



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΜΑΚΡΑΚΗ ΝΙΚΟΛΑΟΥ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ
ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ
ΑΓΩΓΩΝ ΚΑΙ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΠΟΥ ΥΠΟΚΕΙΝΤΑΙ ΣΕ ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΟΥΣ**



Επιβλέπων: Καπτής Μαρίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Ψαρρόπουλος Πρόδρομος, Ε.ΔΙ.Π., Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ
ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ
ΑΓΩΓΩΝ ΚΑΙ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΠΟΥ ΥΠΟΚΕΙΝΤΑΙ ΣΕ ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΟΥΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΜΑΚΡΑΚΗ ΝΙΚΟΛΑΟΥ

Επιβλέπων: Καττής Μαρίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Ψαρρόπουλος Πρόδρομος, Ε.ΔΙ.Π., Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

.....

.....

*Καττής Μαρίνος
Αν. Καθηγητής, Ε.Μ.Π.*

*Ψαρρόπουλος Πρόδρομος
Μέλος Ε.ΔΙ.Π., Ε.Μ.Π.*

*Τσομπανάκης Ιωάννης
Αν. Καθηγητής, Πολ. Κρήτης*

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

Ευχαριστίες

Πρώτα και σημαντικότερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες της παρούσας εργασίας, κ. Μαρίνο Καττή και κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο που με τις άριστες επιστημονικές τους γνώσεις συνέβαλαν καταλυτικά στην εκπόνηση της εργασίας.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο που μου προσέφερε πολύτιμη και υποδειγματική καθοδήγηση βοηθώντας με να αντιμετωπίσω τα προβλήματα της παρούσας εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ τον Στέφανο Τσουγκράνη για τη συνεργασία που είχαμε και με τη βοήθειά του έγινε δυνατή η ολοκλήρωση της εργασίας. Ακόμα, ευχαριστώ την Γεωργία Εξακουστίδου για το ενδιαφέρον που έδειξε κατά την εκπόνηση της εργασίας, παραθέτοντας τις απόψεις της, αλλά και για τη διαρκή στήριξή της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και όλους όσους μου προσέφεραν ηθική συμπαράσταση σε όλη τη διάρκεια αυτού του κύκλου σπουδών.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την ανάπτυξη ενός υπολογιστικού εργαλείου με σκοπό τη βελτιστοποίηση της χάραξης έργων μεγάλου μήκους που υπόκεινται σε γεωκινδύνους. Μετά από μία βιβλιογραφική αναφορά στα υποθαλάσσια καλώδια και αγωγούς που υπάρχουν σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο, πραγματοποιείται εκτενής διερεύνηση του προβλήματος των υποθαλάσσιων γεωκινδύνων με ιδιαίτερη έμφαση στη γενική κατηγορία των γεωλογικών ασυνεχειών και πιο συγκεκριμένα στα ενεργά σεισμικά ρήγματα. Μέσα από το περιβάλλον του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών και τη διεξαγωγή αναλύσεων, προκύπτει η προκαταρκτική χάραξη αποφυγής ή διασταύρωσης του αγωγού ή του καλωδίου με το γεωκίνδυνο. Στην περίπτωση που αρχικά επιλεχθεί η διασταύρωση της κατασκευής με το γεωκίνδυνο, με τη βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, πραγματοποιούνται δύο αναλύσεις. Η πρώτη είναι αμιγώς γεωτεχνική και εξετάζει τη διάρρηξη κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων μέσω ιζηματογενών στρώσεων, εξάγοντας αποτελέσματα που αφορούν τις μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις στον πυθμένα της θάλασσας. Η δεύτερη αφιερώνεται στην καταπόνηση της κατασκευής και συγκεκριμένα του αγωγού από τις προαναφερθείσες εδαφικές παραμορφώσεις. Ο χρήστης του υπολογιστικού εργαλείου αρχικά έχει τη δυνατότητα εισαγωγής παραμέτρων που αφορούν το είδος του ρήματος, τη γωνία διάρρηξής του και το πάχος της ιζηματογενούς στρώσης. Έπειτα, υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής χαρακτηριστικών του προσομοιώματος του αγωγού που σχετίζονται με την εξωτερική του διάμετρο και το βάθος στο οποίο βρίσκεται. Η τελική απόφαση για το ποιά από τις ήδη δύο υπάρχουσες διαδρομές θα ακολουθήσει το έργο, γίνεται με τη χρήση συνθηκών ελέγχου στο περιβάλλον του Σ.Γ.Π., το οποίο εγκρίνει ή απορρίπτει τη διασταύρωση του αγωγού με την περιοχή του γεωκινδύνου. Στην περίπτωση απόρριψης ακολουθείται η χάραξη αποφυγής. Σημειώνεται ότι η εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου γίνεται στην περιοχή της Μεσογείου, σε συνθήκες πολύ κοντά στην πραγματικότητα και αφορούν υποθαλάσσιους αγωγούς που πρόκειται να συνδέσουν την Κρήτη με την Κύπρο και την Κύπρο με την Τουρκία. Η έντονη γεωμορφολογία της περιοχής και η παρουσία γεωκινδύνων απειλούν την ακεραιότητα των έργων αλλά με τη σωστή μελέτη μπορούν να αντιμετωπιστούν.

Abstract

The present thesis aims to develop a computational tool to optimize the route of undersea projects with great length which cross areas of possible occurrence of geohazards. After a literature review of offshore cables and pipelines worldwide, the thesis is involved with an extensive investigation on the potential geohazards with emphasis on the general category of geological discontinuities and especially on the active seismic faults. Through the Geographical Information System's environment and conducting analyzes, it comes of a primary route of a pipeline or a cable which avoids or crosses areas of geohazards. In the case where the crossing route is initially selected, with the finite element software ABAQUS two analyzes are performed. The first one is a geotechnical analysis and it examines the rupture of normal and reverse faults through sedimentary layers and the subsequent permanent ground deformations on the seafloor. The second indicates the distress of the construction and especially the pipeline, when it is subjected to the aforementioned ground deformations. The user of that computational tool at first has the ability to import factors, such as the type of the fault, its geometrical properties and the properties of the ruptured sedimentary formations. Next, it is possible to insert the characteristics of the pipeline model like its diameter and the depth at which is located. The final decision at which of the two existing routes will be followed by the project is made through the G.I.S, which approves or rejects the cross with the geohazard. In the case of rejection, the project follows the avoidance route. It is noted that this thesis studies the Mediterranean region, where at specific conditions very close to reality is examined the possibility of a pipeline connection between Crete and Cyprus as well as from Cyprus to Turkey. The special geomorphology of that area and the possible occurrence of geohazards in some cases may threaten the integrity of that kind of projects, however with the appropriate research they can be addressed.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	7
Abstract	9
1.Εισαγωγή.....	13
2.Υποθαλάσσια καλώδια.....	15
2.1 Εισαγωγή.....	15
2.2 Ιστορική εξέλιξη υποθαλάσσιων καλωδίων τηλεπικοινωνιών.....	15
2.3 Ιστορική εξέλιξη υποθαλάσσιων ενεργειακών καλωδίων.....	17
2.4 Γενικά χαρακτηριστικά υποθαλάσσιων καλωδίων.....	22
2.4.1 Ενεργειακά καλώδια.....	22
2.4.2 Καλώδια τηλεπικοινωνίας.....	25
2.5 Εγκατάσταση υποθαλάσσιων καλωδίων	27
2.5.1 Ενεργειακά καλώδια.....	27
2.5.2 Καλώδια τηλεπικοινωνίας.....	35
2.6 Κίνδυνοι και βλάβες υποθαλάσσιων καλωδίων	39
2.7 Προστασία υποθαλάσσιων καλωδίων	40
3.Υποθαλάσσιοι αγωγοί	44
3.1 Εισαγωγή.....	44
3.2 Ιστορική εξέλιξη υποθαλάσσιων αγωγών	44
3.3 Υποθαλάσσιοι αγωγοί στη Μεσόγειο Θάλασσα	46
3.4 Γενικά χαρακτηριστικά υποθαλάσσιων αγωγών	49
3.5 Εγκατάσταση υποθαλάσσιων αγωγών	51
3.6 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις υποθαλάσσιων αγωγών.....	58
4.Υποθαλάσσιοι Γεωκίνδυνοι	60
4.1 Εισαγωγή.....	60
4.2 Σεισμοί.....	61
4.3 Ηφαιστεια	63
4.4 Κατολισθήσεις.....	66
4.5 Γεωκίνδυνοι στη Μεσόγειο θάλασσα.....	68
4.5.1 Σεισμοί.....	69

4.5.2	Ηφαίστεια	72
4.5.3	Κατολισθήσεις.....	73
4.6	Ρήγματα.....	75
4.6.1	Ορισμός	75
4.6.2	Κατηγορίες ρηγμάτων	76
4.6.3	Διάρρηξη ρηγμάτων	79
4.6.4	Διάδοση ρηγμάτων διαμέσου εδαφικού επιφανειακού στρώματος.....	80
4.6.5	Ρήγματα στη Μεσόγειο θάλασσα.....	82
5.	Ανάπτυξη υπολογιστικού εργαλείου	85
5.1	Εισαγωγή.....	85
5.2	Λειτουργία υπολογιστικού εργαλείου	86
5.3	Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών.....	87
5.3.1	Ορισμός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών.....	88
5.3.2	Περιγραφή λογισμικού ArcGIS 10.3.1.....	90
5.3.3	Βασικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν	96
5.4	Πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.....	102
5.4.1	Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	102
5.4.2	Προγραμματιστικό περιβάλλον ABAQUS.....	103
5.5	Διαδικασία παραμετρικής ανάλυσης διάρρηξης ενεργού ρήγματος δια μέσω ιζηματογενούς στρώσης	103
5.6	Διαδικασία υπολογιστικής ανάλυσης για την αλληλεπίδραση αγωγού και ρήγματος	104
5.6.1	Διαδικασία Υπολογισμού δυνάμεων εδαφικών ελατηρίων.....	106
6.	Εφαρμογές υπολογιστικού εργαλείου	112
6.1	Εφαρμογή 1 ^η : Χάραξη αγωγού μεταξύ Κύπρου – Τουρκίας	120
6.2	Εφαρμογή 2 ^η : Χάραξη αγωγού μεταξύ Κύπρου – Κρήτης	136
7.	Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	149
	Βιβλιογραφία.....	151

1. Εισαγωγή

Τα υποθαλάσσια καλώδια χρησιμοποιούνται ευρέως για την εξυπηρέτηση σκοπών τηλεπικοινωνίας αρκετά χρόνια. Όμως η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που επιτρέπουν τη μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων σε συνδυασμό με υψηλές ταχύτητες έχει οδηγήσει σε εκ νέου άνθισή τους. Εκτός από το συγκεκριμένο είδος καλωδίων, μία νέα μορφή καλωδίων αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια και αφορά την υπεράκτια διασύνδεση περιοχών με καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η εκτεταμένη χρήση των αγωγών για τη μεταφορά υδρογονανθράκων έχει αναπτυχθεί σημαντικά ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες. Σήμερα, η αυξημένη ανάγκη για μεταφορά υδρογονανθράκων μεταξύ των χωρών καθώς και η εκμετάλλευση των υποθαλάσσιων αποθεμάτων τους, καθιστούν επιτακτική τη χρήση υπεράκτιων έργων μεγάλου μήκους (Psarropoulos et al., 2015). Υπό αυτήν την προοπτική, είναι επόμενο ότι αρκετοί αγωγοί έχουν προγραμματιστεί να κατασκευαστούν και να συμπληρώσουν το ήδη υπάρχον υποθαλάσσιο δίκτυο σε παγκόσμιο αλλά και σε ευρωπαϊκό επίπεδο, στο οποίο εστιάζει η παρούσα εργασία.

Οι περιοχές που διασχίζουν τα καλώδια και οι αγωγοί ανάλογα με τις γεωμορφολογικές και τις γεωλογικές συνθήκες είναι δυνατόν να παρουσιάσουν μία σειρά από γεωκινδύνους, ικανούς να απειλήσουν την ακεραιότητα της κατασκευής. Οι υποθαλάσσιοι γεωκίνδυνοι είναι περισσότερο πιθανό να εμφανίζονται και να προκαλούν παραμορφώσεις στον πυθμένα της θάλασσας κυρίως σε περιοχές που βρίσκονται στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών. Η λεκάνη της Μεσογείου αποτελεί μία περιοχή με υψηλή επικινδυνότητα εκδήλωσης φαινομένων όπως υποθαλάσσιων κατολισθήσεων και σεισμών. Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή που εκτείνεται Νότια της Ελλάδας και της Ιταλίας μέχρι τα παράλια της Τουρκίας παρουσιάζει έντονη σεισμικότητα λόγω της ύπαρξης ρηγμάτων και περιοχών με γεωλογικές ασυνέχειες.

Το δίκτυο των υποθαλάσσιων έργων μεγάλου μήκους που έχει υλοποιηθεί αλλά και εκείνο που πρόκειται να υλοποιηθεί, για να εκτελέσει τη διασύνδεση των εκάστοτε περιοχών πρέπει να αντιμετωπίσει όλες εκείνες τις προβληματικές περιοχές που απειλούν την ακεραιότητά του. Είναι προφανές πως η σωστή αντιμετώπιση και η προσεκτική μελέτη για τη χάραξη του έργου αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές διαδικασίες κατά την εκτέλεση της διασύνδεσης. Οι λόγοι που πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στη διαδρομή που πρόκειται να ακολουθήσει ο αγωγός ή το καλώδιο καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα που ξεκινάει από το οικονομικό κόστος του έργου, καθώς σε περίπτωση ατυχήματος της κατασκευής η επισκευή είναι αρκετά δαπανηρή και καταλήγει στον κίνδυνο εκτεταμένης περιβαλλοντικής καταστροφής, σε περίπτωση διαρροής του προϊόντος που μεταφέρεται.

Οι επιλογές σε περιπτώσεις χαράξεων υπεράκτιων έργων που αντιμετωπίζουν τον κίνδυνο έκθεσης σε περιοχές γεωκινδύνων είναι περιορισμένες. Μία αρχική επιλογή, είναι η λήψη της απόφασης για τη χάραξη αποφυγής. Η χάραξη αποφυγής έχει τη δυνατότητα να παρακάμπτει την προβληματική περιοχή με σημαντικό μειονέκτημα η τελική διαδρομή του έργου να διασχίζει περισσότερα χιλιόμετρα, με άμεσο αποτέλεσμα την εκτόξευση του κόστους του. Η δεύτερη επιλογή είναι η απόφαση το έργο να περάσει μέσα από την προβληματική περιοχή, με εκτεταμένη υπολογιστική μελέτη και έλεγχο της περιοχής διασταύρωσης αγωγού ή καλωδίου και γεωκινδύνου. Πρόκειται για μία διαδικασία ιδιαίτερα απαιτητική καθώς η μελέτη τεκτονικών φαινομένων είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί.

Στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκε ένα υπολογιστικό εργαλείο με σκοπό, είτε τη βελτίωση μίας υπάρχουσας υποθαλάσσιας διαδρομής ενός έργου μεγάλου μήκους, είτε τη δημιουργία μίας νέας χάραξης. Δόθηκε έμφαση όχι μόνο στα ρήγματα αλλά και στις προβληματικές περιοχές που παρουσιάζουν παρόμοιες γεωλογικές ασυνέχειες. Στη Νοτιοανατολική Μεσόγειο που επικεντρώθηκε η μελέτη και οι εφαρμογές του εργαλείου, οι περιοχές αυτές είναι αρκετές. Αναλυτικότερα, η χαρτογραφική απεικόνιση και επεξεργασία της περιοχής έγινε μέσω του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών. Με τη βοήθεια του Σ.Γ.Π. και των δεδομένων που συλλέχθηκαν έγινε η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τους γεωκινδύνους, τη βαθυμετρία και τις υποθαλάσσιες χαράξεις της λεκάνης της Μεσογείου. Με τη χρήση των κατάλληλων εργαλείων έγινε η εξαγωγή της χάραξης αποφυγής και της χάραξης διασταύρωσης με το γεωκίνδυνο. Για την αναλυτική μελέτη της περιοχής διασταύρωσης ασυνέχειας – αγωγού δημιουργήθηκε ένα προσομοίωμα που αντιπροσωπεύει τη διάρρηξη ενός ρήγματος σε ελεύθερο πεδίο όπου πάνω του βρίσκεται ιζηματογενής στρώση. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένα προσομοίωμα υποθαλάσσιου αγωγού το οποίο τοποθετήθηκε πρωτίστως απευθείας στο σεισμικό ρήγμα και δευτερευόντως στην ιζηματογενή στρώση. Στη δημιουργία, την επεξεργασία και την εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων σχετικά με τα δύο αυτά προσομοιώματα βοήθησε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Τέλος, η τελική χάραξη του έργου που αφορά τη χάραξη αποφυγής ή διασταύρωσης με την προβληματική περιοχή, προέκυψε μέσω του περιβάλλοντος του Σ.Γ.Π. με δεδομένες τις παραμορφώσεις που δέχεται το προσομοίωμα του αγωγού.

2. Υποθαλάσσια καλώδια

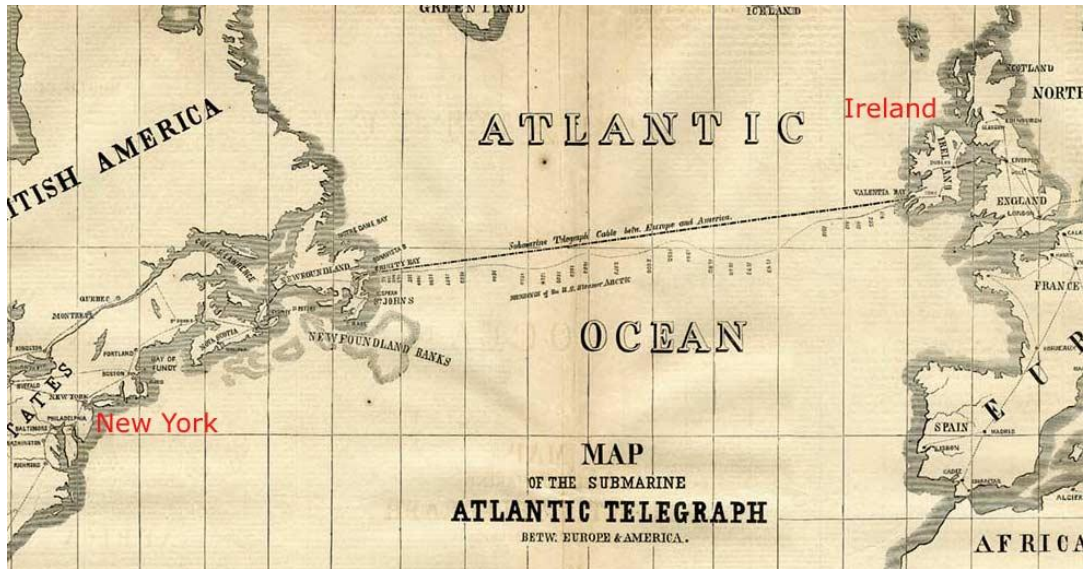
2.1 Εισαγωγή

Τα υποθαλάσσια καλώδια, γνωστά και με τους όρους «undersea cables», «offshore cables» και «submarine cables», αποτελούν το σύνολο των καλωδίων που τοποθετούνται στον θαλάσσιο πυθμένα με σκοπό τη διασύνδεση απομακρυσμένων περιοχών. Οι κύριες κατηγορίες των υποβρύχιων καλωδίων είναι δύο, τα υποβρύχια καλώδια που χρησιμοποιούνται για την τηλεπικοινωνία και τα υποθαλάσσια καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

2.2 Ιστορική εξέλιξη υποθαλάσσιων καλωδίων τηλεπικοινωνιών

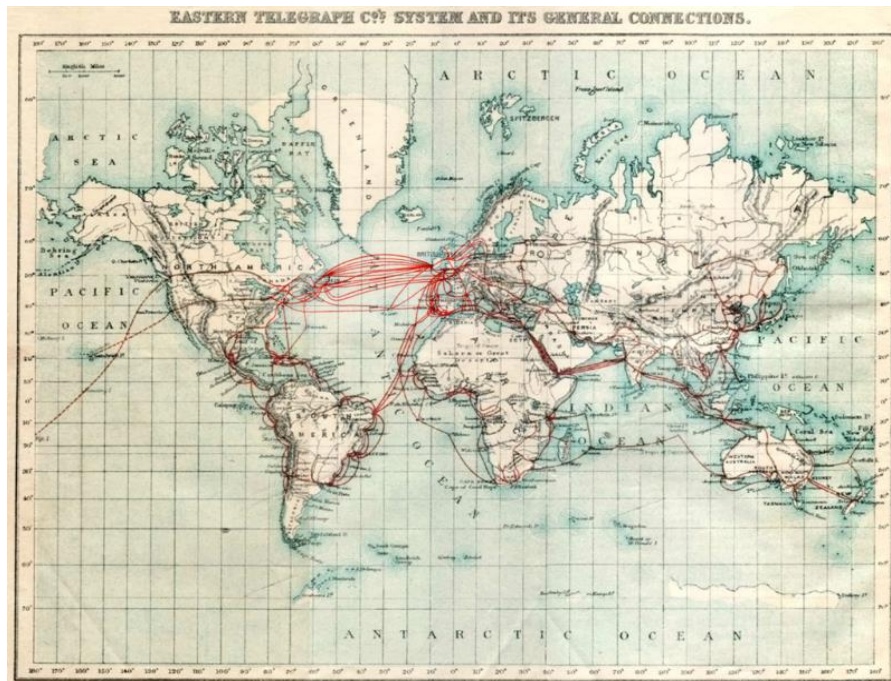
Τα υποβρύχια καλώδια τηλεπικοινωνιών αποτελούν την πρώτη μορφή υποθαλάσσιου καλωδίου με σκοπό να προσφέρουν υπηρεσίες τηλεπικοινωνίας σε νησιωτικά συμπλέγματα και σε διάφορες χώρες. Η τεχνολογική τους εξέλιξη είναι ραγδαία καθώς μέσα σε δύο αιώνες η προσφορά των καλωδίων στην τηλετυπία και στην τηλεφωνία, επεκτάθηκε στη μετάδοση ψηφιακών στοιχείων. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των οπτικών ινών, η μεταφορά του ψηφιακού σήματος σε κάθε σημείο σχεδόν του πλανήτη, με τη βοήθεια των υποθαλάσσιων καλωδίων, έχει μετατρέψει τη διαδικασία της επικοινωνίας μέσω τηλεφώνων και Internet σε μία απλή διαδικασία, καθώς τα παράσιτα πλέον εκλείπουν κατά την διάρκεια της μεταφοράς πληροφοριών, ενώ τέλος με τη βοήθεια μιας ίνας μπορούν να μεταφερθούν χιλιάδες τηλεφωνήματα χωρίς κανένα πρόβλημα.

Οι σκέψεις για τη διασύνδεση περιοχών, νησιών και χωρών που χωρίζονται από την θάλασσα, με σκοπό την τηλεπικοινωνία, ξεκίνησε αμέσως μετά την ανακάλυψη του τηλέγραφου το 1839. Μέχρι και το 1850, οι όποιες προσπάθειες για την τοποθέτηση μιας υποθαλάσσιας γραμμής βρίσκονταν σε δοκιμαστικό επίπεδο. Τον Αύγουστο του 1850 μια αγγλογαλλική επιχείρηση πέρασε το πρώτο υποθαλάσσιο καλώδιο μέσα από τον Πορθμό της Αγγλίας, ενώ το έτος 1852, άρχισαν να δημιουργούνται οι πρώτες μεγάλες διασυνδέσεις μεταξύ διαφορετικών χωρών, όπως της Αγγλίας με την Ιρλανδία, της Αγγλίας με τη Γαλλία και τέλος της Αγγλίας με το Βέλγιο και την Ολλανδία. Ωστόσο ένα μεγάλο εγχείρημα αποτελούσε η τοποθέτηση ενός υπερατλαντικού υποβρύχιου καλωδίου. Η προσπάθεια αυτή επιτεύχθηκε το 1865-1866 με το πρώτο υποθαλάσσιο καλώδιο που διέσχισε έναν ωκεανό.



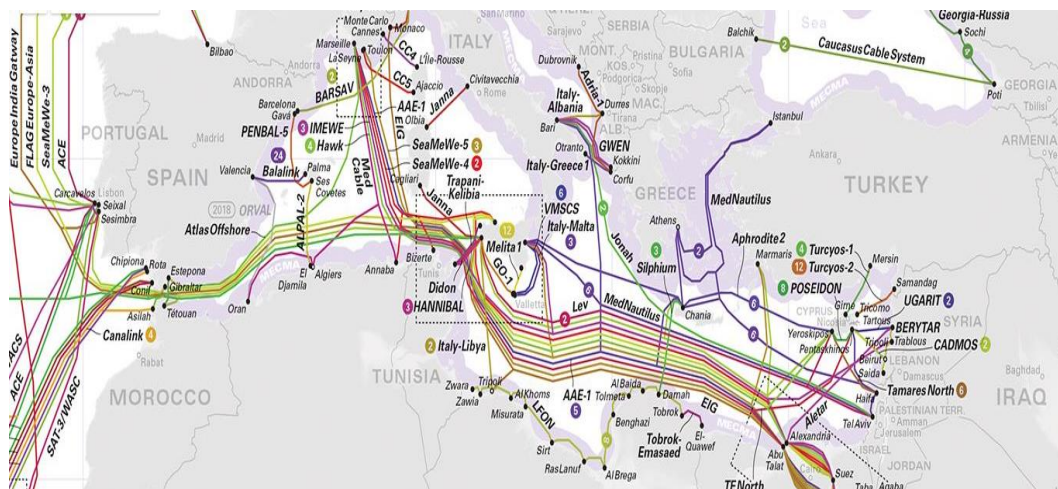
*Εικόνα 2.1: Το πρώτο υπερατλαντικό υποθαλάσσια καλώδιο τηλεπικοινωνιών.
(Πηγή: www.submarinecablesystems.com)*

Περίπου το 1870 η βρετανική κυβέρνηση επιχείρησε και κατάφερε τη σύνδεσή της με την Ινδία και την Σαουδική Αραβία, ενώ το 1872 δημιουργήθηκε η σύνδεση της Αυστραλίας και της Κίνας με το υπάρχον δίκτυο.



*Εικόνα 2.2: Παγκόσμιος χάρτης υποβρύχιων καλωδίων.
(Πηγή: Wikipedia, 2018)*

Με την πάροδο του χρόνου, η σύγχρονη ιστορία των υποθαλάσσιων καλωδίων όπως έχει ήδη αναφερθεί γνωρίζει συνεχώς εξέλιξη. Τη δεκαετία του 1980 ξεκίνησε η κατασκευή των πρώτων καλωδίων που διαθέτουν την τεχνολογία των οπτικών ινών (fiber optic cables), με το πρώτο υπερωκεάνιο υποβρύχιο καλώδιο με την εν λόγω τεχνολογία να μπαίνει σε λειτουργία το 1988, αλλάζοντας σε μεγάλο ποσοστό τη διαδικασία της τηλεπικοινωνίας. Η εγκατάσταση ενός δικτύου οπτικών ινών είναι πιο εύκολη και πιο απλή καθώς μια οπτική ίνα είναι περισσότερο εύχρηστη σε σχέση με τα προϋπάρχοντα καλώδια κατασκευασμένα από χαλκό, δίνοντας τη δυνατότητα για μεγαλύτερο όγκο δεδομένων που ταξιδεύουν με πολύ πιο γρήγορο και ασφαλέστερο ρυθμό.



Εικόνα 2.3: Χάρτης με τα Υποθαλάσσια καλώδια τηλεπικοινωνίας στη Μεσόγειο θάλασσα. (Πηγή: Telegeography, 2018)

2.3 Ιστορική εξέλιξη υποθαλάσσιων ενεργειακών καλωδίων

Η δεύτερη κατηγορία υποθαλάσσιων καλωδίων, που βρίσκεται σε άνθιση τα τελευταία χρόνια έχοντας πολλές προοπτικές ανάπτυξης στο άμεσο μέλλον, είναι τα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ή υποβρύχια καλώδια ηλεκτρικής τροφοδοσίας. Γνωστά και ως submarine power cables, τα εν λόγω καλώδια αποτελούν σημαντικό μέρος της μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος μεταξύ υπεράκτιων εγκαταστάσεων, όπως πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου, νησιών και χωρών.

Ιστορικά, τα υποβρύχια καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υφίστανται για περισσότερο από έναν αιώνα. Η χρήση τους με το πέρασμα των χρόνων αυξάνεται,

ενώ ο ρόλος τους εξελίσσεται σε πολύ σημαντικός και αρκετές φορές απαραίτητος. Αναλυτικότερα, ο ρόλος των υποθαλάσσιων ενεργειακών καλωδίων κατά τα πρώτα χρόνια της χρήσης τους ήταν αποκλειστικά για να μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια σε υπεράκτιες εγκαταστάσεις που ήταν απομονωμένες, όπως ένας φάρος. Αργότερα, χρησιμοποιήθηκαν για τη μεταφορά ενέργειας σε νησιωτικά συμπλέγματα κοντά στην ακτή και σε περιοχές όπου διασχίζονταν από ποταμούς. Είναι άξιο αναφοράς πως το πρώτο υποθαλάσσιο καλώδιο για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας κατασκευάστηκε με σκοπό να διασχίσει τον ποταμό Ίζαρ στη Βαυαρία το 1811. Ακόμα, το 1954 κατασκευάστηκε το πρώτο υποβρύχιο καλώδιο μεταφοράς ενέργειας μεγάλου μήκους. Πιο συγκεκριμένα, το μήκος του έφτανε τα 98 χιλιόμετρα και ξεκινούσε από το νησί Γκότλαντ της Σουηδίας με προορισμό την ηπειρωτική χώρα της Σουηδίας. Το καλώδιο αυτό με όνομα «Gotland-1» αποτέλεσε την αρχή ώστε η ανθρωπότητα να αντιμετωπίσει με διαφορετικό τρόπο την μεταφορά ενέργειας μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων.

Τις τελευταίες δεκαετίες, τα υποθαλάσσια καλώδια ηλεκτρικής τροφοδοσίας χρησιμοποιούνται με σκοπό τη μεταφορά ενέργειας μεταξύ διαφορετικών κρατών, καθώς και για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στις πλατφόρμες εξαγωγής πετρελαίου ή φυσικού αερίου και στα ωκεάνια εργαστήρια που βρίσκονται στην επιφάνεια της θάλασσας. Η λειτουργία των τελευταίων βασίζεται στην ενέργεια που παράγεται στην ξηρά, επομένως η χρήση υποθαλάσσιων καλωδίων για τη μεταφορά αυτή είναι ο πιο κατάλληλος τρόπος. Τέλος, με τα μεγάλα περιβαλλοντικά προβλήματα που αντιμετωπίζει ο πλανήτης μας, η στροφή σε νέες μορφές ενέργειας είναι αναπόφευκτη. Μια νέα μορφή ενέργειας είναι και η «πράσινη» ενέργεια που παράγεται από τα αιολικά πάρκα. Τα υποβρύχια καλώδια έχουν τον σημαντικό ρόλο να μεταφέρουν την ενέργεια που έχει παραχθεί με ασφάλεια στην στεριά, στα ειδικά κέντρα επεξεργασίας.

Σήμερα, το πλήθος των υποθαλάσσιων ενεργειακών καλωδίων δεν φτάνει σε αριθμό εκείνο των υποβρύχιων καλωδίων τηλεπικοινωνίας. Υπάρχουν όμως σημαντικές κατασκευές, όπως το καλώδιο NorNed που συνδέει τη Νορβηγία με την Ολλανδία με σκοπό την διασύνδεση των ηλεκτρικών δικτύων των δύο χωρών. Κατασκευάστηκε το 2007 και το μήκος του φτάνει τα 580 χιλιόμετρα, αποτελώντας για μεγάλο χρονικό διάστημα το υποθαλάσσιο ενεργειακό καλώδιο με το μεγαλύτερο μήκος κοστίζοντας περίπου 600 εκατομμύρια ευρώ (Wikipedia, 2018).



Εικόνα 2.4: Υποθαλάσσιο ενεργειακό καλώδιο NorNed.
(Πηγή: www.new.abb.com)

Επίσης το κέρδος που προσφέρει η χρήση των υποβρύχιων καλωδίων για τη μεταφορά ενέργειας είναι ιδιαίτερα πρόσφορο με αποτέλεσμα να αποσβένονται σύντομα τα χρήματα που δαπανήθηκαν για την κατασκευή του. Χαρακτηριστικά, η Μεγάλη Βρετανία που είναι πρωτοπόρος στα υποθαλάσσια ενεργειακά καλώδια, διαθέτοντας τέσσερα από τα μεγαλύτερα σε μήκος, κερδίζει περίπου 6,5 δισεκατομμύρια αγγλικές λίρες και δημιουργεί περίπου 150.000 θέσεις εργασίας για κάθε έναν χρόνο από το 2013 έως το 2020 με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υποβρύχιων ενεργειακών καλωδίων (European Subsea Cables Association).

Εκτός από το Ηνωμένο Βασίλειο, τα υποθαλάσσια καλώδια αναπτύσσονται και στο χώρο της Μεσογείου, που αποτελεί την περιοχή μελέτης και εφαρμογής της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πρόκειται για το υποβρύχιο καλώδιο τροφοδοσίας ηλεκτρικής ισχύος με όνομα «SA.PE.I» που συνδέει τη Σαρδηνία με την ιταλική ενδοχώρα που τέθηκε σε εφαρμογή το 2012. Το εν λόγω καλώδιο είναι άξιο αναφοράς καθώς πρόκειται για το μεγαλύτερο βάθος που έχει τοποθετηθεί καλώδιο μέχρι σήμερα και φτάνει τα 1650 μέτρα. Το μήκος του καλωδίου φτάνει τα 420 χιλιόμετρα, ενώ το κόστος κατασκευής του έφτασε τα 730 εκατομμύρια ευρώ, αποτελώντας μια δίοδο για την αναβάθμιση ολόκληρου του ιταλικού δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα υποθαλάσσια καλώδια δε λείπουν και από τη χώρα μας. Το 2001 εκτελέστηκε η κατασκευή του καλωδίου διασύνδεσης της Ιταλίας και της Ελλάδας με μήκος τα 160 χιλιόμετρα. Πιο συγκεκριμένα ο σταθμός έναρξης είναι το εργοστάσιο επεξεργασίας και μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας στην Γκαλαντίνα της Ιταλίας και ο σταθμός άφιξης του καλωδίου βρίσκεται κοντά στα αλβανικά σύνορα (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.5: Υποθαλάσσιο ενεργειακό καλώδιο SA.PE.I.
(Πηγή: www.new.abb.com)



Εικόνα 2.6: Υποθαλάσσιο ενεργειακό καλώδιο Ελλάδας – Ιταλίας.
(Πηγή: www.new.abb.com)

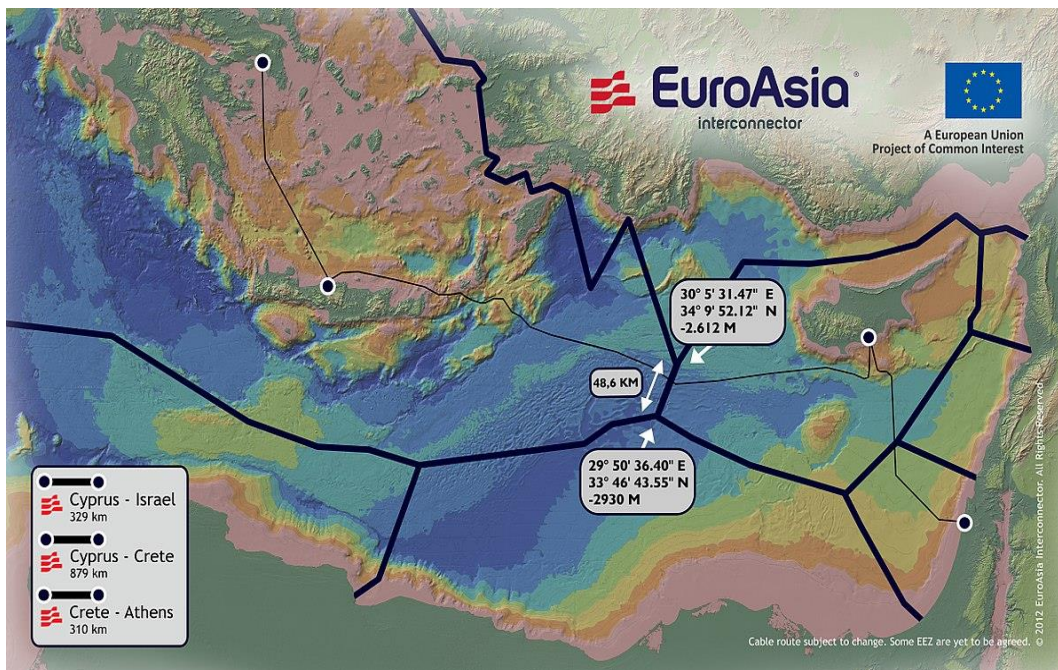
Τέλος, οι τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί επιτρέπουν την κατασκευή καλωδίων που φτάνουν το μήκος των 1500 χιλιομέτρων δίνοντας τη δυνατότητα δημιουργίας ενός υποθαλάσσιου ενεργειακού δικτύου σε όλον τον κόσμο. Η τεχνολογία των υποθαλάσσιων ενεργειακών καλωδίων, όπως φαίνεται και στην εικόνα που

ακολουθεί, έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα στις ευρωπαϊκές χώρες στα βόρεια της ηπείρου, ενώ στον ευρωπαϊκό νότο αντίστοιχα, η ανάπτυξη είναι σε προγενέστερο στάδιο.



Εικόνα 2.7: Υποθαλάσσια ενεργειακά καλώδια στην Ευρώπη.
(Πηγή: Ardelean and Minnebo, 2015)

Το γεγονός όμως ότι η Μεσόγειος θάλασσα, αποτελεί ένα σταυροδρόμι για την ηλεκτρική διασύνδεση της Ευρώπης με την Ασία, την καθιστά έναν πολύ σημαντικό χώρο άξιο για επένδυση στον τομέα των υποθαλάσσιων καλωδίων μεταφοράς ενέργειας. Για αυτό άλλωστε, είναι προγραμματισμένη η διασύνδεση με το υποθαλάσσιο ενεργειακό καλώδιο «EuroAsia Interconnector» του Ισραήλ, της Κύπρου, και της Ελλάδας. Το καλώδιο θα φτάνει τα 1520 χιλιόμετρα και θα τοποθετείται ακόμα και σε βάθος 2000 μέτρων. Ο χρονικός ορίζοντας για την πλήρη ολοκλήρωση του έργου είναι το 2022 και το συνολικό κόστος θα φτάνει περίπου τα 3,5 δισεκατομμύρια ευρώ.



*Εικόνα 2.8: Χάραξη διαδρομής καλωδίου «EuroAsia Interconnector».
(Πηγή: Wikipedia, 2018)*

2.4 Γενικά χαρακτηριστικά υποθαλάσσιων καλωδίων

2.4.1 Ενεργειακά καλώδια

Τα υποβρύχια ενεργειακά καλώδια έχουν άμεση σχέση με το ηλεκτρικό ρεύμα καθώς αποτελούν το μέσο μεταφοράς του. Αρχικά είναι απαραίτητο να γίνει αναφορά σε κάποιες βασικές έννοιες που σχετίζονται με το ηλεκτρικό ρεύμα.

Το συμβατικό ηλεκτρικό ρεύμα έχει τη δυνατότητα να λάβει δύο μορφές, το εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα και το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα. Το κύριο χαρακτηριστικό του εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) είναι πως η ένταση και η κατεύθυνσή του μεταβάλλονται περιοδικά στον χρόνο δημιουργώντας έτσι μια ημιτονοειδή συνάρτηση. Ο λόγος που χρησιμοποιείται κυρίως στο αστικό περιβάλλον το εναλλασσόμενο ρεύμα είναι πως η διάδοσή του είναι πιο εύκολη και περισσότερο οικονομική, ενώ τα καλώδια μέσα από τα οποία μεταφέρεται έχουν μικρότερο πάχος με αποτέλεσμα η τοποθέτησή τους να μην είναι δύσκολη. Τέλος η ικανότητα της συγκεκριμένης μορφής ηλεκτρικού ρεύματος να μετατρέπει την τάση σε τάση με υψηλότερες ή χαμηλότερες τιμές, αποτελεί το πλεονέκτημα που έχει έναντι του συνεχούς ρεύματος. Το συνεχές ρεύμα (DC) έχει το χαρακτηριστικό ότι τα

ηλεκτρόνια κινούνται σε μία ενιαία κατεύθυνση. Η παραγωγή του γίνεται από μπαταρίες, ενώ υπάρχουν και γεννήτριες συνεχούς ρεύματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν απαιτείται η συγκεκριμένη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος.

Η παραπάνω επεξήγηση των μορφών του συμβατικού ηλεκτρικού ρεύματος έγινε καθώς τα υποθαλάσσια ενεργειακά καλώδια χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα καλώδια υψηλής τάσης με εναλλασσόμενο ρεύμα και στα καλώδια υψηλής τάσης με συνεχές ρεύμα, αποτελώντας τους δύο τρόπους με τους οποίους μπορεί να μεταφερθεί η ηλεκτρική ενέργεια μέσω καλωδίων, σε μεγάλες αποστάσεις. Ως υψηλή τάση, που αποτελεί χαρακτηριστικό και στους δύο τύπους των καλωδίων, ορίζεται οποιαδήποτε τάση πάνω από 1000V (Βολτ). Στην περίπτωση των καλωδίων, οι τιμές της τάσης ξεκινάνε από τα 35kV και φτάνουν τα 800kV, με αποτέλεσμα η χρήση της να επιτρέπει τη μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας μειώνοντας το ενδεχόμενο της διαρροής.

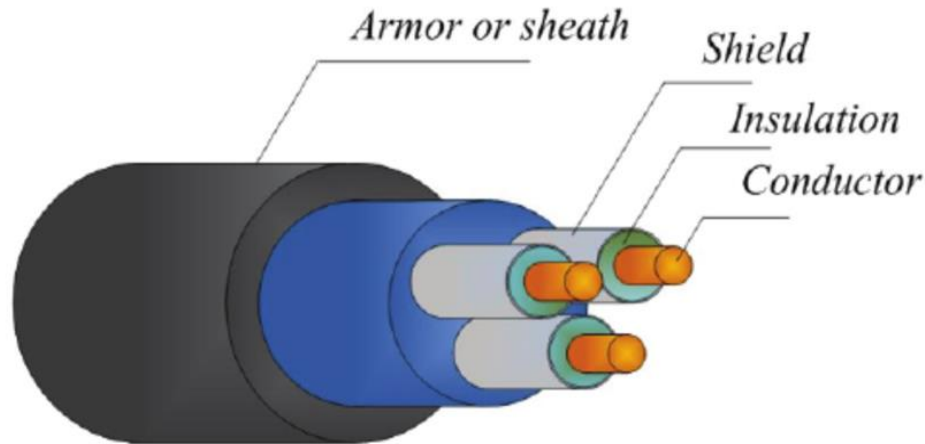
Πιο αναλυτικά, τα καλώδια υψηλής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος HVAC (High Voltage Alternating Current) έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια για αποστάσεις μέχρι τα 80 χιλιόμετρα. Το γεγονός ότι για τη μεταφορά της ισχύος απαιτούνται τρεις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, μετατρέπει αυτά τα καλώδια σε πιο δύσχρηστα λόγω του περισσότερου χώρου που καταλαμβάνουν έναντι των HVDC καλωδίων. Οι πιθανότητες για ενδεχόμενη διαρροή ενέργειας που έχουν τα καλώδια HVAC είναι σχεδόν διπλάσιες, ενώ η μέγιστη δυνατή ποσότητα που μπορούν να μεταφέρουν είναι περίπου η μισή από τη μέγιστη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορούν να μεταφέρουν τα καλώδια συνεχούς ρεύματος. Το χαρακτηριστικό που τα καλώδια του εναλλασσόμενου ρεύματος δεν είναι τόσο αξιόπιστα ως προς την πιθανότητα απώλειας ενέργειας και της μέγιστης χωρητικότητας είναι ότι το ηλεκτρικό ρεύμα κατά τη ροή του εντός του καλωδίου στο HVAC καλώδιο έχει την τάση να κινείται πλησίον της επιφάνειάς του, αυξάνοντας το ενδεχόμενο αστοχίας.

Από την άλλη, τα καλώδια υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος HVDC (High Voltage Direct Current) χρησιμοποιούνται για μεγάλες αποστάσεις άνω των 80 χιλιομέτρων, όπου η χρήση των HVAC είναι ανέφικτη είτε το κόστος της πολύ μεγάλο. Η βασική τους λειτουργία είναι ότι το ηλεκτρικό ρεύμα για να διαδοθεί μετατρέπεται από εναλλασσόμενο στο ένα άκρο του καλωδίου, σε συνεχές ρεύμα για όσο βρίσκεται εντός αυτού, και στο άλλο άκρο του καλωδίου μετατρέπεται ξανά σε εναλλασσόμενο ρεύμα. Το γεγονός αυτό προϋποθέτει και την ύπαρξη των κατάλληλων σταθμών στον τόπο έναρξης και κατάληξης του καλωδίου όπου θα γίνεται η συγκεκριμένη μετατροπή. Το πλεονέκτημα όμως αυτών των καλωδίων εντοπίζεται στο ότι είναι λιγότερο δαπανηρά εφόσον χρησιμοποιούν το συνεχές

ρεύμα για τη μεταφορά μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικής ισχύος και οι απώλειες που μπορεί να υπάρξουν κατά τη διάρκεια της μεταφοράς είναι ελάχιστες. Επίσης στα καλώδια συνεχούς ρεύματος το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει σε όλη τη διατομή τους περιορίζοντας έτσι τον κίνδυνο για απώλεια ενέργειας. Τέλος, τα καλώδια HVDC έχουν λιγότερες απαιτήσεις σε υλικά καθώς χρειάζονται μόνο μία γραμμή για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως και οι απαιτήσεις σε χώρο για την τοποθέτηση θα είναι μικρότερες στη συγκεκριμένη κατηγορία καλωδίων.

Τα υποθαλάσσια καλώδια που μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια έχουν διάμετρο που δεν ξεπερνάει τα 300 χιλιοστά (mm), εκτείνεται από 70mm έως 210mm. Όπως είναι λογικό, υπάρχουν διάφοροι τύποι καλωδίων, ο κάθε ένας από αυτούς επιλέγεται ανάλογα με τις απαιτήσεις που έχει το έργο διασύνδεσης που πρόκειται να πραγματοποιηθεί. Το μήκος της διαδρομής, το ηλεκτρικό δίκτυο που θα συνδέσει το υποθαλάσσιο καλώδιο, η ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος που θα μεταφέρει και η τάση του αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες για την επιλογή του κατάλληλου τύπου υποβρύχιου καλωδίου.

Το ηλεκτρικό ρεύμα που μεταφέρεται από το υποθαλάσσιο καλώδιο ρέει μέσα στον αγωγό, ο οποίος εντοπίζεται σε όλο το μήκος του καλωδίου και είναι κατασκευασμένος από χαλκό ή αλουμίνιο. Για την αποφυγή της ηλεκτρικής επαφής του αγωγού με το περιβάλλον γύρω του, χρησιμοποιείται ειδικό μονωτικό υλικό, από χημικά διασταυρούμενο πολυαιθιλένιο (XLPE) ή από χαρτί για καλώδια HVDC, που καλύπτει τον αγωγό του καλωδίου με σκοπό την προστασία του. Τα υποθαλάσσια καλώδια συγκεκριμένα, επειδή βρίσκονται μέσα στο νερό οφείλουν να έχουν υδατοστεγανότητα, ώστε να καθίσταται αδύνατη η εισροή ύδατος στο εσωτερικό του καλωδίου. Η επίτευξη της υδατοστεγανότητας υλοποιείται με τη χρήση ενός ειδικού περιβλήματος, από μόλυβδο, χαλκό ή άλλα μέταλλα, ικανού να προστατέψει το καλώδιο και τον αγωγό του καλωδίου από ενδεχόμενη εισροή νερού. Τη βασική προστασία του καλωδίου, ιδιαίτερα από τους εξωγενείς παράγοντες φέρει ο οπλισμός του. Αναλυτικότερα, ο οπλισμός του καλωδίου είναι υπεύθυνος για την προστασία από τις τάσεις που ασκούνται πάνω σε αυτό κατά τη μεταφορά του, την αποθήκευσή του, την τοποθέτησή του και την λειτουργία του. Τέλος αυτό που είναι ορατό, είναι το εξωτερικό περίβλημα του καλωδίου που είναι υπεύθυνο για την εξωτερική προστασία ολόκληρου του καλωδίου από ρωγμές και διαβρώσεις.



Εικόνα 2.9: Δομή υποθαλάσσιου ενεργειακού καλωδίου.
(Πηγή: M. Zubiaga et al., 2011)

2.4.2 Καλώδια τηλεπικοινωνίας

Τα τελευταία χρόνια τα υποθαλάσσια καλώδια τηλεπικοινωνιών έχουν γνωρίσει πολύ μεγάλη άνθιση, με αποτέλεσμα το 99% των διεθνών δεδομένων να μεταφέρεται μέσω αυτών. Πλέον υπάρχει η δυνατότητα για 500 εκατομμύρια ταυτόχρονες τηλεφωνικές κλήσεις μεταξύ περιοχών οι οποίες χωρίζονται από ωκεανούς. Επομένως, για την επίτευξη των αριθμών που αναφέρονται παραπάνω οι απαιτήσεις είναι πάρα πολλές, με αποτέλεσμα να έχουν αυξηθεί κατακόρυφα και οι απαιτήσεις κατά την κατασκευή των υποβρυχίων καλωδίων.

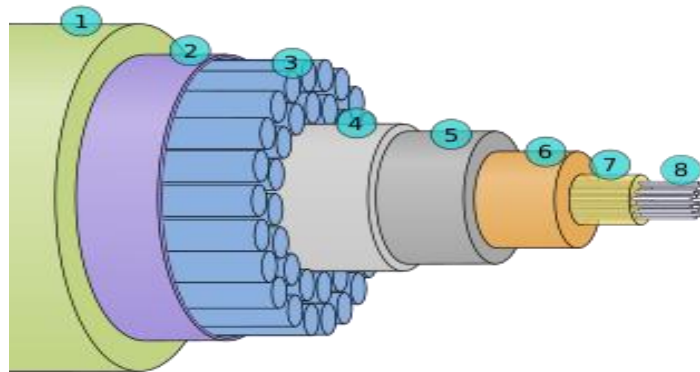
Αναλυτικότερα, τα καλώδια έχουν αυξήσει τη χωρητικότητά τους κατά περίπου 20 φορές έναντι της χωρητικότητας των καλωδίων που χρησιμοποιούνταν πριν λίγες δεκαετίες. Σε ένα υπερατλαντικό καλώδιο η χωρητικότητα μπορεί να προσεγγίσει και τα 20 Tbit/s. Για να γίνει κατανοητή η τιμή αυτή, τα καλώδια πλέον έχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν δεδομένα από περιοχές των Η.Π.Α σε περιοχές της Ευρώπης σε 0.02 δευτερόλεπτα (s), ενώ σε 0.03 τα δεδομένα μπορούν να μεταφερθούν από τις Η.Π.Α στην Ασία.

Η χρήση των υποβρυχίων καλωδίων για την τηλεπικοινωνία αποτελεί το μοναδικό τρόπο διασύνδεσης απομακρυσμένων περιοχών, παρά τις όποιες προσπάθειες έχουν κατά καιρούς γίνει για μεταφορά δεδομένων μέσω δορυφόρων. Ο λόγος που τα υποθαλάσσια καλώδια έχουν εγκατασταθεί πλέον ως ο μοναδικός τρόπος μεταφοράς δεδομένων είναι ότι περιορίζουν σε μεγάλο ποσοστό την πιθανότητα διαρροής της πληροφορίας που μεταφέρουν, αλλά και με τις νέες τεχνολογίες που αναπτύσσονται

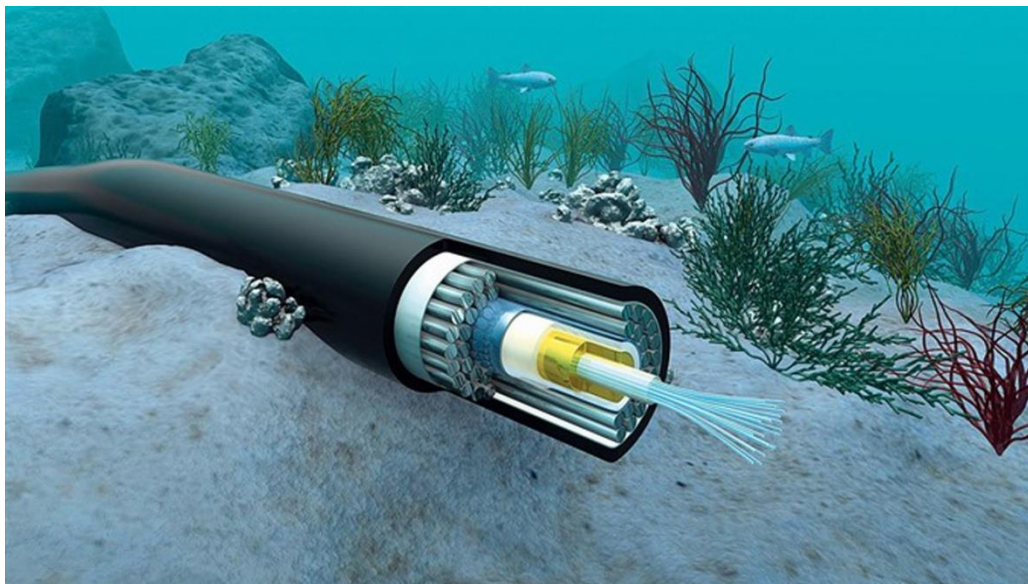
η διάρκεια ζωής τους έχει αυξηθεί σε σχέση με τα καλώδια που χρησιμοποιούνταν τις προηγούμενες δεκαετίες.

Το υποθαλάσσιο καλώδιο που χρησιμοποιείται για τις τηλεπικοινωνίες σήμερα, βασίζεται στις οπτικές ίνες που βρίσκονται εντός του οπτικού πυρήνα του. Ο πυρήνας του καλωδίου προστατεύεται από έναν αγωγό κατασκευασμένο από χαλκό, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ηλεκτρική διασύνδεση του καλωδίου με τους σταθμούς τροφοδοσίας του στην ξηρά. Ο αγωγός και κατ' επέκταση οι οπτικές ίνες προστατεύονται από το νερό της θάλασσας με τη βοήθεια ενός μονωτή, τον αδιάβροχο άνθρακα αλουμινίου. Στη συνέχεια, οι διατάξεις που έχουν ήδη περιγραφεί προστατεύονται από τη χρήση χαλύβδινων προσαραγμένων συρμάτων και πολλές φορές ενισχύονται από διάφορα άλλα μέταλλα, για τις περιοχές με ρηγά νερά, όπου εγκυμονούν απειλές για την αριότητα των καλωδίων. Τέλος, μια μονωτική ταινία Mylar καλύπτει το καλώδιο πριν το εξωτερικό περίβλημα κατασκευασμένο από πολυαιθυλένιο καλύψει όλη τη διάταξη του καλωδίου. Το εξωτερικό περίβλημα είναι ανθεκτικό σε όλες τις εξωτερικές απειλές που μπορεί να δεχτεί το καλώδιο σε όλα τα στάδια από τη μεταφορά του έως την τοποθέτησή του και έχει τη δυνατότητα να ενισχυθεί και με επιπρόσθετο εξοπλισμό ανάλογα τις ανάγκες του έργου.

Τέλος, η διάμετρος του εξωτερικού περιβλήματος κυμαίνεται από τα 17 χιλιοστά (mm) έως και τα 50mm αναλόγως τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται, ενώ ζυγίζουν από 0.7 κιλά ανά μέτρο, τα καλώδια χωρίς ενισχυμένο εξωτερικό περίβλημα, μέχρι και 4.8 κιλά ανά μέτρο, με ενισχυμένο εξωτερικό περίβλημα. Σε αντίθεση με τη διάμετρο του οπτικού πυρήνα μέσα στον οποίο βρίσκονται οι οπτικές ίνες που φτάνει τα 2 χιλιοστά.



Εικόνα 2.10: Διατομή υποθαλάσσιου καλωδίου τηλεπικοινωνιών όπου 1. Πολυαιθυλένιο 2. Ταινία Mylar 3. Προσαραγμένα χαλύβδινα σύρματα 4. Αδιάβροχος θώρακας αλουμινίου 5. Πολυάνθρακας. 6. Σωλήνας χαλκού ή αλουμινίου 7. Ζελατίνα πετρελαίου 8. Οπτικές ίνες. (Πηγή: Wikipedia, 2018)



*Εικόνα 2.11: Διάταξη υποβρύχιου καλωδίου τηλεπικοινωνιών με την τεχνολογία των οπτικών ινών.
(Πηγή: www.guardian.ng)*

2.5 Εγκατάσταση υποθαλάσσιων καλωδίων

2.5.1 Ενεργειακά καλώδια

Κατά τη διαδικασία της ηλεκτρικής διασύνδεσης δύο περιοχών με υποθαλάσσια ενεργειακά καλώδια μεγάλου μήκους, τα πιο δύσκολα και δαπανηρά στάδια είναι η εγκατάσταση του καλωδίου στον πυθμένα της θάλασσας και η συντήρησή του. Συγκρίνοντας με τα υποβρύχια καλώδια τηλεπικοινωνιών προκύπτει πως τα ενεργειακά καλώδια προϋποθέτουν για την τοποθέτησή τους διαφορετικό εξοπλισμό, καθώς το μέγεθός τους είναι μεγαλύτερο από εκείνο των καλωδίων για τις τηλεπικοινωνίες.

Η εγκατάσταση ενός υποθαλάσσιου ενεργειακού καλωδίου είναι περισσότερο απαιτητική έναντι αυτής για ένα χερσαίο ενεργειακό καλώδιο, καθώς οι δυσκολίες και οι ιδιαιτερότητες που ενδέχεται να συναντηθούν στον θαλάσσιο πυθμένα είναι πιο δύσκολο να προβλεφθούν και να αντιμετωπιστούν. Για αυτό, ο σχεδιασμός για την τοποθέτηση του καλωδίου πρέπει να είναι λεπτομερής και απαιτητικός, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των καλωδίων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, τα χαρακτηριστικά της διαδρομής που θα ακολουθηθεί και τις ικανότητες των μηχανημάτων εγκατάστασης. Για κάθε έναν σχεδιασμό, οι συνθήκες αυτές διαφέρουν

κάνοντας έτσι το κάθε έργο υποθαλάσσιας ηλεκτρικής διασύνδεσης μοναδικό. Μια επιτυχημένη εγκατάσταση ενός υποβρύχιου ενεργειακού καλωδίου απαιτεί μια πολύ καλή εικόνα και γνώση του πυθμένα στην διαδρομή που πρόκειται να τοποθετηθεί το καλώδιο και γύρω από αυτήν, έναν ολοκληρωμένο συντονισμό πλοίων και πληρωμάτων και τη χρήση του κατάλληλου για την κάθε περίπτωση εξοπλισμού.

Η διαδικασία της τοποθέτησης ενός υποθαλάσσιου ενεργειακού καλωδίου στον θαλάσσιο πυθμένα ονομάζεται πόντιση. Συνοπτικά, η πόντιση των καλωδίων απαιτεί να γίνουν οι παρακάτω ενέργειες με τη σωστή σειρά:

- Επιλογή της προσωρινής διαδρομής.
- Λήψη άδειας από τις αρμόδιες αρχές.
- Έρευνα της διαδρομής.
- Σχεδιασμός του καλωδιακού συστήματος με σκοπό να ικανοποιηθούν οι συνθήκες και οι ιδιαιτερότητες της επιλεγμένης διαδρομής.
- Τοποθέτηση καλωδίου, με δυνατότητα ταφής του σε ορισμένα σημεία.
- Διενέργεια επιτόπιου ελέγχου όποτε αυτός απαιτείται.
- Κοινοποίηση του καλωδίου σε όλους τους θαλάσσιους χάρτες.

Η πόντιση του καλωδίου στηρίζεται στην ευρεία χρήση ειδικά εξοπλισμένων πλοίων που δραστηριοποιούνται στην θάλασσα υπό όλες τις καιρικές συνθήκες. Το χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τα πλοία πόντισης καλωδίων ή Cable Laying Vessels (CLV) από τα κοινά πλοία, είναι ότι διαθέτουν έναν περιστρεφόμενο δίσκο με χωρητικότητα από 4000 τόνους έως 7000 τόνους καλωδίου (περιστρεφόμενη τράπεζα) και την κατάλληλη υποστηρικτική διάταξη. Τα CLV είναι διαθέσιμα σε διάφορα μεγέθη, αφού όπως έχει προαναφερθεί η κάθε περίπτωση είναι διαφορετική και οι απαιτήσεις σε χωρητικότητα και ευελιξία του ειδικού πλοίου αλλάζουν. Μερικά από τα πιο γνωστά πλοία που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους επιχειρήσεις είναι το «Skagerrak», το «Giulio Verne» και το «C.Sovereign».

Το πλοίο «Skagerrak», αποτελεί ένα από τα πιο αξιόπιστα πλοία πόντισης ενεργειακών υποθαλάσσιων καλωδίων στον κόσμο. Πρόκειται για το πρώτο CLV που κατασκευάστηκε το 1976 συμμετέχοντας σε πολύ γνωστά έργα, όπως στην εγκατάσταση του υποβρύχιου καλωδίου NorNed, ενώ το 2008 ανακαινίστηκε με σκοπό να προσαρμοστεί στις αυξημένες απαιτήσεις της σημερινής εποχής, εισάγοντας στον εξοπλισμό του τις νέες απαραίτητες τεχνολογίες. Το πλοίο «Giulio Verne» κατασκευάστηκε το 1983, έχοντας χωρητικότητα που φτάνει τους 7000 τόνους καλωδίου. Επίσης, διαθέτει την ικανότητα να τοποθετήσει το καλώδιο σε βάθος 1600 μέτρων και για αυτό αποτελεί με τη σειρά του ένα σημαντικό μέσο για να φέρει εις πέρας μεγάλα έργα ηλεκτρικής διασύνδεσης.



Εικόνα 2.12: Πλοίο πόντισης υποθαλάσσιων ενεργειακών καλωδίων C/S «Skagerrak».
(Πηγή: www.worldoil.com)



Εικόνα 2.13: Πλοίο πόντισης υποθαλάσσιων ενεργειακών καλωδίων C/S «Guilio Verne».
(Πηγή: www.vesseltracker.com)

Εκτός όμως από τα ειδικά πλοία CLV, για την ίδια διαδικασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι φορηγίδες και τα πλοία εφοδιασμού. Προϋπόθεση για την προσωρινή χρήση των παραπάνω είναι να είναι εφοδιασμένα με τα απαραίτητα εργαλεία ώστε να μπορούν να ολοκληρώσουν την εγκατάσταση του υποθαλάσσιου καλωδίου. Αναλυτικότερα, οι φορηγίδες είναι επίπεδα πλοία, πολλές φορές όχι αυτοκινούμενα, που μεταφέρουν βαρέα αγαθά. Για τη μετακίνησή τους

χρησιμοποιούνται ρυμουλκά. Συνήθως οι φορτηγίδες χρησιμοποιούνται σε περιοχές με χαμηλό θαλάσσιο βάθος.



Εικόνα 2.14: Φορτηγίδα πόντισης υποθαλάσσιων ενεργειακών καλωδίων.
(Πηγή: www.hibbardinshore.com)

Τα τελευταία 20 χρόνια η εγκατάσταση των υποθαλάσσιων ενεργειακών καλωδίων έχει αναπτυχθεί σημαντικά με αποτέλεσμα οι απαιτήσεις για πιο ακριβή και προσεκτικό σχεδιασμό να αυξάνουν. Για την επίτευξη ενός σχεδιασμού υψηλών προδιαγραφών είναι απαραίτητη προϋπόθεση η εφαρμογή νέων τεχνολογιών που πρέπει να υιοθετήσουν όλοι οι παράγοντες οι οποίοι συμμετέχουν στην εγκατάσταση των ενεργειακών καλωδίων. Όπως υποστηρίζει ο συγγραφέας Thomas. Worzyk στο βιβλίο του με τίτλο «Submarine Power Cables», ένας νέος στόλος πλοίων πόντισης ενεργειακών καλωδίων πρέπει να έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Περιστρεφόμενη τράπεζα με χωρητικότητα 6000-7000 τόνους καλωδίου.
- Κατάστρωμα πρύμνης της περιστρεφόμενης τράπεζας για τον χώρο διασύνδεσης των καλωδίων.
- Έναν μεγάλο τροχό ή στροφέιο στην πρύμη του πλοίου απαραίτητο για το ξεδίπλωμα του καλωδίου.
- Κατάστρωμα υψηλής αντοχής για την προσθήκη περισσότερων εγκαταστάσεων πόντισης καλωδίων ή προσωρινών περιστρεφόμενων τραπεζών.

- Έναν γερανό για τον χειρισμό των δύσκαμπτων συνδέσεων.
- Ένα ελικοδρόμιο για την εύκολη μεταφορά του πληρώματος.

Η περιστρεφόμενη τράπεζα αποτελεί ένα βασικό εξάρτημα για όλα τα πλοία που ασχολούνται με την πόντιση υποβρύχιων ενεργειακών καλωδίων. Ο ρόλος της είναι να αποθηκεύει μεγάλης διατομής καλώδια που είναι δύσκολα ως προς τη διαχείρισή τους λόγω της δυσκαμψίας τους. Το σχήμα της περιστρεφόμενης τράπεζας συνήθως είναι κυκλικό αλλά κατά καιρούς έχουν κατασκευαστεί και περιστρεφόμενες τράπεζες με κωνικό σχήμα. Η περιστροφή της τράπεζας γίνεται γύρω από τον κατακόρυφο άξονά της. Ο χώρος που καταλαμβάνει η τράπεζα είναι αρκετά μεγάλος καθώς η διάμετρος της μπορεί να φτάσει και τα 30 μέτρα. Τα μεγάλα πλοία έχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν ακόμα και δύο περιστρεφόμενες τράπεζες με αποτέλεσμα να είναι ικανά στην ταυτόχρονη πόντιση δύο καλωδίων.



*Εικόνα 2.15: Περιστρεφόμενη τράπεζα.
(Πηγή: ABB)*

Στο χώρο διασύνδεσης καλωδίων γίνεται η ένωση (ή μάτιση) των καλωδίων που προορίζονται για τοποθέτηση στον πυθμένα της θάλασσας. Πρόκειται για έναν χώρο που βρίσκεται στο κατάστρωμα του πλοίου, διαθέτοντας τον κατάλληλο εξοπλισμό που είναι απαραίτητος για τη διεκπεραίωση της διαδικασίας. Βασικά στοιχεία του εξοπλισμού που προαναφέρθηκε είναι η ηλεκτρική τροφοδότηση, ο κλιματισμός, αλλά και ο αφυγραντήρας για την εξασφάλιση των απαιτούμενων περιβαλλοντικών

συνθηκών για την ένωση των καλωδίων. Το μέγεθός του χώρου είναι απαραίτητο να επαρκεί και να πληροί τις προδιαγραφές που έχουν οριστεί από την εταιρία η οποία έχει αναλάβει την ένωση των καλωδίων. Η βέλτιστη τοποθέτησή του είναι πλησίον της περιστρεφόμενης τράπεζας για λόγους αποδοτικότητας στην προετοιμασία της πόντισης.

Ο τροχός ή στροφέιο (καρούλι) στην πρύμνη του πλοίου αποτελεί μια κατασκευή υπεύθυνη για το ξεδίπλωμα του καλωδίου. Μαζί με την περιστρεφόμενη τράπεζα αποτελούν μέσα αποθήκευσης του καλωδίου. Η διαφορά τους είναι ότι για την πόντιση καλωδίων μικρού μήκους, ενδεικτικά μέχρι τα 800 μέτρα, η περιστρεφόμενη τράπεζα δεν είναι απαραίτητη. Η διαδικασία μπορεί να επιτευχθεί και με τη χρήση του τροχού. Το κύριο χαρακτηριστικό των στροφείων είναι ότι ο άξονάς τους είναι οριζόντιος και διαφοροποιείται από τον κατακόρυφο άξονα που διαθέτουν οι περιστρεφόμενες τράπεζες.



Εικόνα 2.16: Καρούλι ξεδίπλωματος υποθαλάσσιου καλωδίου.
(Πηγή: www.fdmarine.com)

Το ελικοδρόμιο αποτελεί μια εγκατάσταση απαραίτητη τουλάχιστον για τα μεγαλύτερα πλοία πόντισης καλωδίων, καθώς διευκολύνει την μετάβαση του πληρώματος που εργάζεται σε αυτά. Σε περίπτωση βλάβης του εξοπλισμού που διαθέτουν τα συγκεκριμένα πλοία, η μετάβαση των τεχνικών για την επίλυσή της είναι άμεση με αποτέλεσμα να μην μένει πίσω όλο το έργο.

Ωστόσο εκτός από τον παραπάνω εξοπλισμό που πρέπει όλα τα πλοία πόντισης καλωδίων της νέας γενιάς, υπάρχουν ακόμα συστήματα και κατασκευές τα οποία αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι ενός CLV.

Ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης ενός πλοίου πόντισης καλωδίων κάθε χρονική στιγμή είναι αναπόσπαστο μέρος του συνολικού έργου. Αναλυτικότερα, η τοποθέτηση του καλωδίου στον πυθμένα της θάλασσας αποτελεί μια διαδικασία που απαιτεί μεγάλη ακρίβεια και προσοχή. Εάν η ακριβή θέση του πλοίου δεν είναι απολύτως γνωστή και χάνεται ο έλεγχός της, τότε είναι πολύ πιθανό η πόντιση του καλωδίου να μην ταυτίζεται με την χάραξη της πορείας που έχει προμελετηθεί με αποτέλεσμα να τίθεται το καλώδιο και κατ' επέκταση όλο το έργο σε κίνδυνο. Επομένως, ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης του πλοίου πόντισης καλωδίων επιτυγχάνεται με τη χρήση του διαφορικού συστήματος GPS. Πρόκειται για ένα σύστημα δορυφορικού εντοπισμού κατάλληλο στις εφαρμογές χαράξεων όπου απαιτείται να είναι γνωστές οι συντεταγμένες με μεγάλη ακρίβεια σε πραγματικό χρόνο.

Τα δυναμικά συστήματα διατήρησης της θέσης (Dynamic Positioning) δίνουν τη δυνατότητα στο πλοίο να κρατήσει τη θέση του και την κατεύθυνσή του δυναμικά, μέσω εξελιγμένων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης. Τα εν λόγω συστήματα διαθέτουν υψηλή τεχνολογία και επιτρέπουν στο πλοίο να διατηρείται στην προκαθορισμένη πορεία του παρά τις όποιες πιθανές αντιξοότητες. Αυτό συμβαίνει γιατί χρησιμοποιείται ένα σύστημα ελιγμών που αντισταθμίζει τις δυνάμεις που δέχεται το πλοίο από το περιβάλλον του οι οποίες προσπαθούν να το θέσουν εκτός πορείας. Τέλος, τα δυναμικά συστήματα διατήρησης της θέσης συνδυάζονται αποτελεσματικά με τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης με τη χρήση του GPS, προσθέτοντας στην διαδικασία πόντισης μεγάλη ακρίβεια και ασφάλεια.

Τα συστήματα αγκυροβολίας αποτελούν την κλασσική μέθοδο της διατήρησης της ακριβούς θέσης του πλοίου πόντισης καλωδίων. Πρόκειται για ένα σύστημα με πολύ χαμηλότερες οικονομικές απαιτήσεις από το δυναμικό σύστημα διατήρησης θέσης, αφού οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται δεν είναι εξελιγμένες. Όμως, αποτελεί ένα σύστημα αρκετά χρονοβόρο και κουραστικό. Η λειτουργία του βασίζεται σε ποντισμένες άγκυρες προς όλες τις κατευθύνσεις, δημιουργώντας έτσι ένα σχήμα βεντάλιας. Ο έλεγχός τους γίνεται από εξειδικευμένους εργάτες που βρίσκονται στο κατάστρωμα του πλοίου. Το αρνητικό του συστήματος που περιγράφεται είναι πως αποτελεί από μόνο του κίνδυνο απέναντι σε άλλα ήδη ποντισμένα καλώδια ή αγωγούς, καθώς είναι πολύ εύκολο να γαντζωθούν καλώδια ή αγωγοί από τις άγκυρες, με αποτέλεσμα τις δαπανηρές εργασίες επισκευής.



*Εικόνα 2.17: Σύστημα αγκυροβολίας.
(Πηγή: www.ship-technology.com)*

Το βαθυσκάφος ROV (Remotely Operated underwater Vehicle) ή Τηλεκατευθυνόμενο Υποβρύχιο Όχημα, είναι μια υποβρύχια συσκευή σημαντική για ένα μεγάλο μέρος της διαδικασίας εγκατάστασης του υποθαλάσσιου καλωδίου. Πιο αναλυτικά, η δυνατότητα που παρέχει η συσκευή να εξοπλιστεί με διάφορα εργαλεία και εξαρτήματα, της δίνει την ικανότητα χρήσης της σε αρκετές εργασίες. Τα οχήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως απλοί παρατηρητές του υποβρύχιου καλωδίου και του βυθού γενικότερα, καθώς διαθέτουν εξελιγμένο σύστημα καταγραφής με κάμερες, φώτα και όργανα μέτρησης απαραίτητα για υποθαλάσσιες κατασκευές, είτε μπορούν, με την τοποθέτηση ενός βραχίονα εκσκαφής ή κοπής, να βοηθήσουν στην διάνοιξη της τάφρου εάν πρόκειται για πόντιση ενός καλωδίου που πρόκειται να θαφτεί. Η χρήση τους μπορεί να είναι και για στρατιωτικού σκοπούς, για την ανίχνευση ναρκοπεδίων και εκρηκτικών μηχανισμών αλλά και για την περιπολία των μεγάλων λιμανιών με σκοπό τη διαφύλαξή τους σε περίοδο πολέμου.

Τα οχήματα ROV χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγάλα βάθη της θάλασσας όπου ένας δύτες είναι πολύ δύσκολο να προσεγγίσει. Τα ειδικά εξοπλισμένα πλοία που είναι υπεύθυνα για τη μεταφορά και εγκατάσταση ενός υποθαλάσσιου καλωδίου πρέπει να έχουν επαρκή χώρο για όλο το σύστημα ROV. Εκτός από την υποβρύχια

συσκευή, ένα σύστημα ROV προϋποθέτει την ύπαρξη ενός χώρου αποθήκευσής του, ενός χώρου όπου θα τοποθετηθεί το δωμάτιο ελέγχου του και τέλος ένας γερανός ανακρέμασης του οχήματος.



*Εικόνα 2.18: Βαθυσκάφος ROV.
(Πηγή: seaconworldwide.com)*

2.5.2 Καλώδια τηλεπικοινωνίας

Στα υποθαλάσσια καλώδια τηλεπικοινωνίας έχει δημιουργηθεί ένα σύστημα με μία σειρά διατάξεων που όλες μαζί συνθέτουν τη διαδικασία εγκατάστασης του υποβρύχιου καλωδίου.

Η διαδρομή του καλωδίου ξεκινάει και καταλήγει στην ακτή και συγκεκριμένα στους λεγόμενους σταθμούς καλωδίων ή cable stations. Από εκεί το καλώδιο που έχει εγκατασταθεί στον πυθμένα της θάλασσας θα συνδεθεί με το υπόλοιπο υπάρχον χερσαίο δίκτυο. Η τοποθεσία που επιλέγεται να κατασκευαστούν οι συγκεκριμένοι σταθμοί έχει ιδιαίτερη σημασία για τη σωστή εξέλιξη του έργου της υποθαλάσσιας διασύνδεσης. Αναλυτικότερα, πρέπει να αποφεύγονται τοποθεσίες που βρίσκονται

πλησίον μιας θαλάσσιας περιοχής με μεγάλη κίνηση, καθώς τότε αυξάνεται ο κίνδυνος να προκληθεί βλάβη στο καλώδιο που βρίσκεται σε χαμηλό βάθος. Επίσης, οι σταθμοί των καλωδίων πρέπει να βρίσκονται σε περιοχές που να επιτρέπουν ενδεχόμενη ταφή του καλωδίου, ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα να υποστεί κάποια ζημία.

Αρχικά σε κάθε σταθμό καλωδίων τοποθετείται ένας ειδικός εξοπλισμός, «Εξοπλισμός Τροφοδοσίας Ισχύος» ή «Power Feed Equipment» με σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ισχύος στα καλώδια. Στη συνέχεια, στους σταθμούς των καλωδίων συχνά εντοπίζεται ο εξοπλισμός τερματισμού της υποβρύχιας γραμμής, «Submarine Line Termination Equipment» ή SLTE, ο οποίος λειτουργεί σαν πομπός που δέχεται και στέλνει τα μήκη κύματος που διαμορφώνονται από τα σήματα επικοινωνίας από και προς τον σταθμό στην άλλη άκρη του καλωδίου αντίστοιχα. Έτσι η πληροφορία που φτάνει στους σταθμούς από την επίγεια τηλεπικοινωνία ανακατασκευάζονται, ώστε να έχουν την κατάλληλη μορφή για να μπορέσουν να μεταφερθούν μέσα από τα υποθαλάσσια καλώδια. Τέλος, σε κάθε σταθμό καλωδίων βρίσκεται και ένα κέντρο ελέγχου, καταρτισμένο από ειδικό προσωπικό και εξοπλισμένο με μηχανήματα παρακολούθησης τελευταίας τεχνολογίας για να είναι γνωστή κάθε χρονική στιγμή η κατάσταση του καλωδίου στον πυθμένα της θάλασσας.



Εικόνα 2.19: Εξοπλισμός τερματισμού της υποβρύχιας γραμμής (SLTE) (στα αριστερά) και Εξοπλισμός τροφοδοσίας ισχύος (PFE) (στα δεξιά).
(Πηγή: www.indicomm.co.uk)

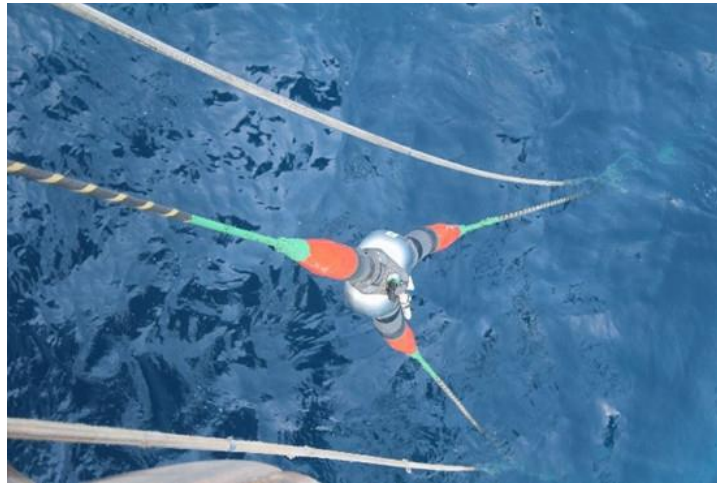
Από τις πιο σημαντικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται στο σύστημα υποβρύχιας διασύνδεσης με τη χρήση καλωδίων τηλεπικοινωνιών, είναι οι αναμεταδότες ή repeaters. Ο σκοπός των αναμεταδοτών είναι να αναγεννούν το οπτικό σήμα που αποστέλλεται μέσω των υποθαλάσσιων καλωδίου, όπου εντοπίζεται εξασθένησή του. Η τοποθέτησή τους γίνεται επάνω στο ποντισμένο καλώδιο με απόσταση από 50 έως 120 χιλιόμετρα μεταξύ τους. Υπάρχουν αναμεταδότες με διαφορετική απόδοση προσαρμοσμένη πάντα στις ανάγκες του έργου, δηλαδή την απόσταση των περιοχών που πρόκειται να διασυνδεθούν. Συνήθως, λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων που μεταφέρεται κυρίως με τα καλώδια που έχουν κατασκευαστεί με την τεχνολογία των οπτικών ινών, το κόστος για την τοποθέτηση αναμεταδοτών σε καλώδια οπτικών ινών με μήκος εκατοντάδων χιλιομέτρων είναι υψηλό.



Εικόνα 2.20: Αναμεταδότης (repeater) υποθαλάσσιου καλωδίου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τα υποθαλάσσια σύνδεση της Νιγηρίας με το Καμερούν (Nigeria Cameroon Submarine Cable System – NCSCS).
(Πηγή: www.communicatonsafrica.com)

Αρκετά συχνά χρησιμοποιούνται οι μονάδες διακλάδωσης ή Branching Units (BU). Οι εν λόγω μονάδες, διαθέτουν εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για να χωριστεί το υποθαλάσσιο καλώδιο με σκοπό να εξυπηρετήσει περισσότερους από έναν προορισμούς. Ο συγκεκριμένος εξοπλισμός τοποθετείται στον πυθμένα της θάλασσας, στο ίδιο βάθος με το καλώδιο. Η διάταξη της μονάδας διακλάδωσης έχει μια είσοδο, στην οποία εισάγεται το υποβρύχιο καλώδιο και δύο εξόδους από τις οποίες θα συνεχίσουν δύο ξεχωριστά καλώδια προς διαφορετικούς προορισμούς. Η λειτουργία τους είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και αυτό προκύπτει εάν αναλογιστεί κανείς τον σκοπό που εξυπηρετούν. Εκτός από τον διαχωρισμό του καλωδίου, οι

συσκευές διακλάδωσης είναι υπεύθυνες να διατηρήσουν την ίδια ποιότητα οπτικού σήματος και την ίδια ταχύτητα διάδοσής τους.



Εικόνα 2.21: Μονάδα Διακλάδωσης (Branching Unit).
(Πηγή: www.huaweimarine.com)

Τέλος, για την πόντιση των καλωδίων στον πυθμένα της θάλασσας, η διαδικασία δε διαφέρει από τη διαδικασία πόντισης των ενεργειακών καλωδίων. Η εγκατάσταση των υποβρύχιων καλωδίων τηλεπικοινωνιών γίνεται με ειδικά εξοπλισμένα πλοία, έχοντας την ικανότητα να μεταφέρουν και να τοποθετήσουν καλώδια μήκους εκατοντάδων χιλιομέτρων, υλοποιώντας την πιο απαιτητική εγκατάσταση που μπορεί να προκύψει. Οι συσκευές και οι μονάδες που διαθέτουν τα συγκεκριμένα πλοία είναι παρόμοιες με εκείνα των ειδικών πλοίων πόντισης ενεργειακών καλωδίων. Η ακρίβεια που τοποθετείται το καλώδιο στην περίπτωση των τηλεπικοινωνιών είναι ιδιαίτερα μεγάλη όπως και στα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 2.22: Πλοίο πόντισης υποθαλάσσιου καλωδίου τηλεπικοινωνιών.
(Πηγή: www.oceanobservatories.org)

2.6 Κίνδυνοι και βλάβες υποθαλάσσιων καλωδίων

Ο κίνδυνος να υποστούν βλάβη τα υποθαλάσσια καλώδια εμφανίζεται από πολύ νωρίς, κατά την έναρξη της διαδικασίας εγκατάστασής τους μέχρι αρκετά χρόνια αργότερα από την τοποθέτησή τους.

Αρχικά, με την τοποθέτηση των καλωδίων στον πυθμένα της θάλασσας, οι πιέσεις που δέχονται είναι πολύ μεγάλες με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος για το τοίχωμα του καλωδίου. Στην συνέχεια, εάν τα υλικά από τα οποία έχει κατασκευαστεί το καλώδιο και η εξωτερική του προστασία δεν είναι αξιόπιστα, αλλά αντιδρούν χημικά με το αλμυρό νερό, τότε η βλάβη που θα δημιουργηθεί θα είναι από κατασκευαστικό σφάλμα.

Όμως οι βλάβες των καλωδίων δεν περιορίζονται μόνο στα παραπάνω που συμβαίνουν σχεδόν άμεσα στα καλώδια κατά την εγκατάστασή τους. Υπάρχει και ένα ευρύ φάσμα κινδύνων που επιδρούν πάνω στο καλώδιο σε βάθος χρόνου. Οι κίνδυνοι στους οποίους είναι εκτεθειμένα τα ήδη ποντισμένα καλώδια προέρχονται από τον άνθρωπο αλλά και από τη φύση. Αναλυτικότερα οι εξωτερικοί παράγοντες για τους οποίους ευθύνεται ο άνθρωπος είναι οι θαλάσσιες οδοί, η αγκυροβολία, οι περιοχές αλιείας, οι είσοδοι λιμένων, οι περιοχές ρίψης πυρομαχικών και τα ναυάγια. Ενώ για τα βραχώδη μέρη, τα απότομα φαράγγια, οι πλαγιές και τα ισχυρά θαλάσσια ρεύματα υπεύθυνη είναι η φύση. Όλα τα παραπάνω πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την διαδικασία μελέτης της χάραξης και επιλογής της κατάλληλης διαδρομής των καλωδίων.

Η σεισμικότητα, τα υποθαλάσσια πρηνή και φαράγγια, οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις συμπληρώνουν τους κινδύνους προς το καλώδιο για τους οποίους ευθύνεται η φύση και δημιουργούν μια λίστα από θαλάσσιους γεωκινδύνους που αναλύονται διεξοδικά σε επόμενο κεφάλαιο. Δεν απουσιάζουν οι περιπτώσεις όπου ένα υποθαλάσσιο καλώδιο καταστράφηκε από μεταβολές που υπέστη ο πυθμένας λόγω των γεωκινδύνων. Για παράδειγμα, το 2006 στην Ταϊβάν πολλά υποθαλάσσια καλώδια καταστράφηκαν από κατολισθήσεις στον θαλάσσιο πυθμένα ενώ το 1973, αρκετά υποθαλάσσια καλώδια υπέστησαν ζημιές λόγω της ηφαιστειακής δραστηριότητας και της έκρηξης Heimaey του ηφαιστείου Eldfell στην Ισλανδία.

Η αντιμετώπιση των κινδύνων που προέρχονται από τη φύση είναι αρκετά πιο δύσκολη από εκείνη των κινδύνων που προέρχονται από τον άνθρωπο, καθώς πρόκειται για κινδύνους που μπορούν να μην έχουν την δυνατότητα να προβλεφθούν επομένως και να μην είναι δυνατή η λήψη μέτρων για την προστασία του καλωδίου και της χάραξής της πορείας του.

Όπως αναφέρεται και παρακάτω, οι ανθρώπινες δραστηριότητες είναι εκείνες που δημιουργούν τις περισσότερες βλάβες στα υποθαλάσσια καλώδια, καθώς με έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί έχει διαπιστωθεί πως η εμπορική αλιεία, μια ανθρώπινη δραστηριότητα, οφείλεται για περίπου των 40% των βλαβών των υποβρύχιων καλωδίων. Επομένως, η προστασία των υποθαλάσσιων καλωδίων κυρίως από τις ανθρώπινες απειλές είναι απαραίτητη και περιλαμβάνεται σε κάθε μελέτη πριν την εγκατάσταση ενός καλωδίου στον βυθό της θάλασσας.

Οι επιπτώσεις από την βλάβη ενός υποθαλάσσιου καλωδίου είναι αρκετές ανάλογα με το είδος που μεταφέρεται από εκείνο. Πιο συγκεκριμένα, στα καλώδια τηλεπικοινωνιών μια ενδεχόμενη βλάβη σε ένα καλώδιο είναι ικανή να δημιουργήσει διαταραχές στο Internet και καθυστερήσεις στην χρήση του, σε εκατομμύρια χρήστες. Ενδεικτικό είναι το παράδειγμα του 2008 όπου η βλάβη σε τρία μεγάλα υποθαλάσσια καλώδια δημιούργησε πρόβλημα σε πάνω από 70 εκατομμύρια χρήστες του Ίντερνετ στην Ινδία, το Πακιστάν, την Σαουδική Αραβία και την Αίγυπτο. Για ένα υποθαλάσσιο καλώδιο που μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια, σε μια περίπτωση αστοχίας του θα κοστίσει την έλλειψη σε ηλεκτρική τροφοδοσία στις τοποθεσίες διασύνδεσης.

Τέλος, όταν ένα καλώδιο φτάσει το χρονικό ορίζοντα για τον οποίο κατασκευάστηκε, τότε πρέπει να ανέβει στην επιφάνεια της θάλασσας και με παρόμοια διαδικασία με την διαδικασία εγκατάστασης τους να αφαιρεθεί. Σε περίπτωση που ένα καλώδιο έχει υποστεί ζημιές, είναι απαραίτητη η άμεση επιδιόρθωση. Η επιδιόρθωση ενός υποθαλάσσιου καλωδίου εξαρτάται από το βάθος που έχει τοποθετηθεί, τις καιρικές συνθήκες αλλά και την τοπογραφία του πυθμένα. Για τον λόγο αυτόν αποτελεί και μία αρκετά δαπανηρή διαδικασία.

2.7 Προστασία υποθαλάσσιων καλωδίων

Η εγκατάσταση ενός υποβρύχιου καλωδίου είναι μια χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία. Η επιδιόρθωση των βλαβών που παρουσιάζονται στα καλώδια που ήδη έχουν τοποθετηθεί στον πυθμένα της θάλασσας είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι η αναγκαιότητα της μεγιστοποίησης της προστασίας του καλωδίου.

Οι θαλάσσιες οδοί, με την προϋπόθεση ότι έχουν επισημανθεί στους θαλάσσιους χάρτες, πρέπει να αποφεύγονται και να μην αποτελούν μέρος της διαδρομής του καλωδίου. Τα μεγάλα πλοία που πλέουν στις θαλάσσιες οδούς είναι πιθανό να δυσκολέψουν την διαδικασία εγκατάστασης και πόντισης του καλωδίου. Οι περιοχές αγκυροβολίας και ρίψης πυρομαχικών εξίσου, πρέπει να αποφεύγονται.

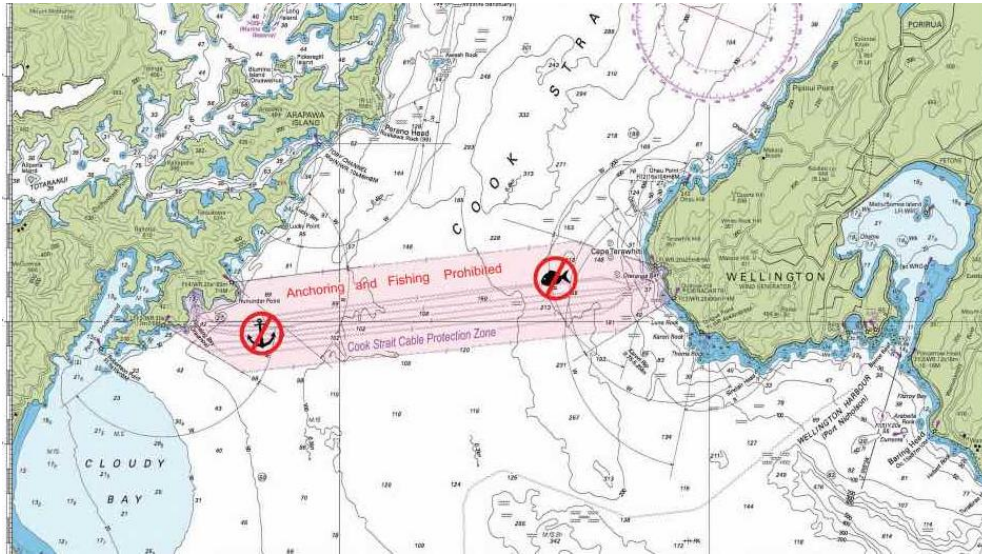
Στις θαλάσσιες περιοχές πλησίον της ακτής όπου το βάθος της θάλασσας δεν είναι μεγάλο, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην προστασία του καλωδίου, καθώς σε μικρά βάθη το καλώδιο είναι εκτεθειμένο ακόμα περισσότερο. Οι περιοχές αλιείας αποτελούν μεγάλο κίνδυνο, καθώς τα αλιευτικά δίχτυα και άλλα εργαλεία μπορούν να προκαλέσουν ρήξη στο καλώδιο που έχει τοποθετηθεί. Τα θαλάσσια ρεύματα που συναντώνται κοντά στα σημεία προσαιγιάλωσης, καθιστούν την ακτή ασταθή και επιρρεπή σε αλλαγές.



Εικόνα 2.23: Υποθαλάσσιο καλώδιο σε ακτή του Ηνωμένου Βασιλείου εκτεθειμένο στην ακτή εξαιτίας της επίδρασης των θαλάσσιων κυμάτων σε αμμώδη παραλία. (Πηγή: Ardelean and Minnebo, 2015)

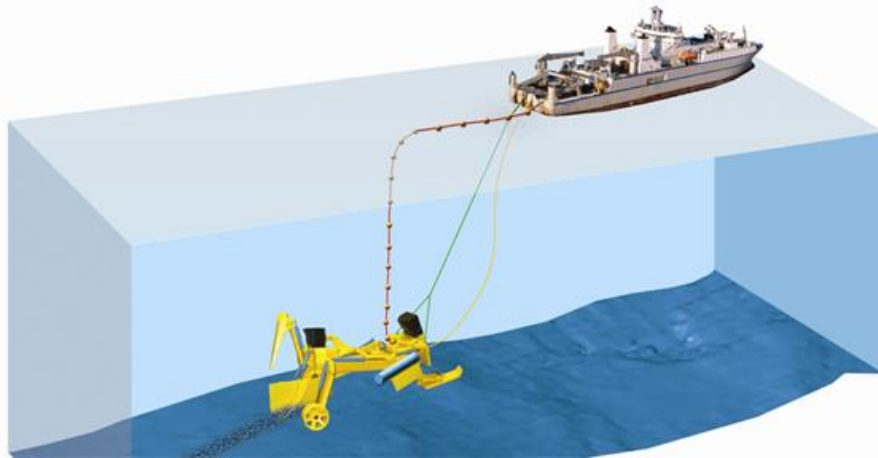
Μία μέθοδος που πρέπει να εφαρμόζεται προκειμένου να περιοριστούν οι ανθρώπινες δραστηριότητες οι οποίες απειλούν τα υποθαλάσσια καλώδια, είναι η δημιουργία μιας «Ζώνης Προστασίας Καλωδίου» ή «Cable Protection Zone» Πρόκειται για μία ζώνη που εκτείνεται εκατέρωθεν του καλωδίου από λίγα μέτρα έως λίγα χιλιόμετρα ανάλογα τις ανάγκες και τις ιδιαιτερότητες της περιοχής. Εντός της ζώνης προστασίας περιορίζεται ή απαγορεύεται η αγκυροβόληση των σκαφών και η αλιεία. Οι ζώνες προστασίας του καλωδίου θα πρέπει να περιλαμβάνονται σε κάθε ναυτικό χάρτη και να έχουν νομική υπόσταση, έτσι ώστε να είναι ευρέως γνωστές και να μην μπορούν να αμφισβητηθούν. Για την αποτελεσματική εφαρμογή αυτού του μέτρου, είναι απαραίτητη η παρακολούθηση της ζώνης από τις αρχές της κάθε περιοχής, ώστε να ελέγχεται εάν τηρούνται οι περιορισμοί και οι απαγορεύσεις,

έχοντας το δικαίωμα της επιβολής χρηματικού προστίμου σε περιπτώσεις όπου δεν τηρούνται.



*Εικόνα 2.24: Ζώνη προστασίας υποθαλάσσιου καλωδίου στη Νέα Ζηλανδία.
(Πηγή: www.evolvingnewsroom.co.nz)*

Για την ενίσχυση της προστασίας και τα αξιοπιστίας των υποβρυχίων καλωδίων συχνά επιλέγεται η ταφή τους σε τάφρους που δημιουργούνται με βάθος που δεν ξεπερνάει τα 10 μέτρα. Για την διάνοιξη της τάφρου χρησιμοποιείται ένα υποβρύχιο άροτρο που είναι συνδεδεμένο με το πλοίο πόντισης των καλωδίων και ακολουθεί την πορεία του. Αφού τοποθετηθεί το καλώδιο εντός της τάφρου, ύστερα καλύπτεται από ιζήματα. Όταν είναι δύσκολη η κάλυψη της τάφρου με ιζήματα, μπορεί να τοποθετηθεί σκυρόδεμα ή ακόμα και βράχοι. Η μέθοδος που αναλύεται, χρησιμοποιείται σε μικρά βάθη, μέχρι τα 800 μέτρα περίπου, όπου οι κίνδυνοι λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων είναι μεγαλύτεροι. Σε μεγαλύτερα βάθη όπου δεν υπάρχει έντονη ανάγκη για προστασία του καλωδίου από εξωγενείς παράγοντες, μπορεί να γίνει η τοποθέτηση απευθείας στον πυθμένα ή η στερέωσή τους σε ειδικές βοηθητικές κατασκευές. Παρά το γεγονός ότι η ταφή του καλωδίου είναι μια χρονοβόρα και δαπανηρή εργασία, αξίζει να αναφερθεί πως ο ρυθμός ταφής ενός υποθαλάσσιου καλωδίου είναι περίπου 0.2km/h, παρατείνει αρκετά την διάρκεια ζωής του. Η παρούσα διαδικασία απαιτεί αρκετά συχνές επιθεωρήσεις από ειδικά συνεργεία.



*Εικόνα 2.25: Μέθοδος διάνοιξης τάφρου από υποβρύχιο άροτρο στον πυθμένα της θάλασσας.
(Πηγή: www.escaeu.org)*

Γενικά, όλα τα υποβρύχια καλώδια σχεδιάζονται με την κατάλληλη θωράκιση με σκοπό να μην είναι ευάλωτα σε οποιαδήποτε μορφή κινδύνου που μπορεί να εκτεθούν καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο μεγαλύτερος κίνδυνος για τα καλώδια βρίσκεται στα πιο ρηχά νερά, επομένως η θωράκιση εκεί πρέπει να είναι ενισχυμένη, σε σχέση με την αντίστοιχη στα πιο βαθιά νερά. Τα υλικά από τα οποία δημιουργείται η ενίσχυση της ανθεκτικότητας των καλωδίων πρέπει να είναι ανθεκτικά στο νερό και να προσφέρουν αξιόπιστη μηχανική προστασία.

3. Υποθαλάσσιοι αγωγοί

3.1 Εισαγωγή

Ένας υποθαλάσσιος αγωγός, γνωστός στα αγγλικά και ως submarine, subsea, marine ή offshore pipeline, είναι ένας αγωγός που τοποθετείται είτε στον πυθμένα της θάλασσας, είτε κάτω από την επιφάνεια αυτού, μέσα σε μια τάφρο. Ο ρόλος των υποθαλάσσιων αγωγών είναι ιδιαίτερα σημαντικός και η χρήση τους επιτακτική για πάνω από έναν αιώνα. Το γεγονός που τους κάνει απαραίτητους είναι ότι έχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν αποτελεσματικά, ρευστά όπως πετρέλαιο, φυσικό αέριο και νερό, μέσω του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

3.2 Ιστορική εξέλιξη υποθαλάσσιων αγωγών

Ανατρέχοντας στο παρελθόν, ο πρώτος υποθαλάσσιος αγωγός κατασκευάστηκε στο κανάλι του Μπρίστολ στο Ηνωμένο Βασίλειο το 1942 και είχε μήκος 70 περίπου χιλιόμετρα. Ο σκοπός της κατασκευής του ήταν δοκιμαστικός για την υποστήριξη στρατιωτικών επιχειρήσεων. Για τον λόγο αυτόν άλλωστε η διαδικασία πήρε το κωδικό όνομα PLUTO (Pipe – Lines – Under – The – Ocean).



Εικόνα 3.1: Διαδικασία τοποθέτησης του αγωγού. Ο κύλινδρος που απεικονίζεται χρησιμοποιείται για την περιέλιξη του σωλήνα.

(Πηγή: Wikipedia, 2018)

Αντίθετα, ο πρώτος υπεράκτιος αγωγός εμπορικής χρήσης κατασκευάστηκε το 1954 από τους Brown & Root στον κόλπο του Μεξικού, με μήκος τα 16 χιλιόμετρα. Από τότε μέχρι την σημερινή εποχή οι υποθαλάσσιοι αγωγοί πληθαίνουν ολοένα και περισσότερο.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και στις αρχές της επόμενης δεκαετίας, η κατασκευή υποθαλάσσιων αγωγών αυξήθηκε σημαντικά. Ο λόγος που οδήγησε στην δημιουργία ολοένα και περισσότερων έργων υποθαλάσσιας διασύνδεσης μέσω αγωγών, ήταν ανάγκη για τη μεταφορά φυσικού αερίου, με αποτέλεσμα θάλασσες όπως η Μεσόγειος, η Βαλτική και η Βόρεια θάλασσα να διασχίζονται από αγωγούς μεγάλου μήκους.

Το Ηνωμένο Βασίλειο, όπως και στα υποθαλάσσια καλώδια, αποτελεί το πρωτοπόρο κράτος και στους υποθαλάσσιους αγωγούς, διαθέτοντας από τα μεγαλύτερα έργα διασύνδεσης μεγάλου μήκους. Ο υποβρύχιος αγωγός Balgzand Bacton Line (BBL), συνδέει το Ηνωμένο Βασίλειο με την Ολλανδία. Πιο συγκεκριμένα, το σημείο έναρξης του είναι το Bacton Gas Terminal και ο προορισμός του ο σταθμός στο Grasweg στην Ολλανδία. Μέσα από την Βόρεια θάλασσα που διασχίζει, ο αγωγός με μήκος περίπου 230 χιλιόμετρα, μεταφέρει μεγάλες ποσότητες φυσικού αερίου. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 2006 και τελείωσε στα τέλη του ίδιου έτους, ενώ κόστισε 500 εκατομμύρια ευρώ.

Από την Νορβηγία ξεκινάει ο υποθαλάσσιος αγωγός Langeled και καταλήγει στο Ηνωμένο Βασίλειο. Πρόκειται για ένα μεγάλο έργο καθώς για περίπου μία δεκαετία αποτελούσε τον υποβρύχιο αγωγό με το μεγαλύτερο μήκος, καθώς φτάνει τα 1166 χιλιόμετρα δια μέσω της Βόρειας θάλασσας. Το προϊόν που μεταφέρεται από τον εν λόγω αγωγό είναι και εδώ το φυσικό αέριο. Αναλυτικότερα, το φυσικό αέριο που παράγεται στη Νορβηγία, μεταφέρεται στον τερματικό σταθμό Nyhamna και από εκεί μέσω του αγωγού διοχετεύεται με προορισμό τον σταθμό Easington Gas στο Ηνωμένο Βασίλειο.

Την θέση του υποθαλάσσιου αγωγού με το μεγαλύτερο μήκος πλέον κατέχει ο αγωγός Nord Stream με μήκος 1222 χιλιόμετρα. Η κατασκευή του έργου ολοκληρώθηκε το 2012. Το προϊόν που μεταφέρεται είναι το φυσικό αέριο, με σημείο έναρξης τη Βίμποργκ της Ρωσίας και τερματικό σταθμό το Greifswald της Γερμανίας. Ο αγωγός διασχίζει τον βυθό της Βαλτικής θάλασσας και το κόστος του ανήλθε στα 8,8 δισεκατομμύρια ευρώ. Επίσης, είναι προγραμματισμένη μια δεύτερη γραμμή υποθαλάσσιου αγωγού για την μεταφορά φυσικού αερίου, με όνομα Nord Stream 2, παράλληλη στην διαδρομή του αγωγού Nord Stream. Με την κατασκευή και της δεύτερης γραμμής, η Γερμανία θα έχει διπλασιάσει τις εισαγωγές σε φυσικό

αέριο από την Ρωσία. Όμως, ο αγωγός Nord Stream 2 αποτελεί ένα αμφιλεγόμενο θέμα ιδίως τα τους τελευταίους μήνες (2018), μεταξύ των κρατών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, για οικονομικούς, πολιτικούς, περιβαλλοντικούς και στρατιωτικούς λόγους. Ορισμένοι από αυτούς είναι ότι ο εν λόγω αγωγός παρακάμπτει χώρες της Κεντρικής και Ανατολικής Ευρώπης, χωρίς να τους δίνει την δυνατότητα να εκμεταλλευτούν οικονομικά το έργο, μέσω του εμπορίου του φυσικού αερίου. Τέλος, οι σκανδιναβικές χώρες υποστηρίζουν πως ένα δεύτερο τόσο μεγάλο σε όγκο έργο θα διαταράξει οριστικά τον βυθό της Βαλτικής θάλασσας καταστρέφοντας το οικοσύστημα που βρίσκεται σε αυτήν.



*Εικόνα 3.2: Διαδρομή υποθαλάσσιου αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου Nord Stream και η χάραξη για τον προγραμματισμένο αγωγό Nord Stream 2.
(Πηγή: Deutsche Welle)*

3.3 Υποθαλάσσιοι αγωγοί στη Μεσόγειο Θάλασσα

Στη θάλασσα της Μεσογείου, που αποτελεί βασική περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, υπάρχουν υποθαλάσσιοι αγωγοί που ήδη λειτουργούν, ή έχει προγραμματιστεί η κατασκευή τους.

Αρχικά, ο αγωγός Greenstream₂ χρησιμοποιείται για την μεταφορά φυσικού αερίου από την δυτική Λιβύη στο νησί της Σικελίας. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 2003 και ολοκληρώθηκε το 2004 κοστίζοντας περίπου 6,5 δισεκατομμύρια δολάρια. Το μήκος του φτάνει τα 540 χιλιόμετρα, ενώ φτάνει και σε βάθος μεγαλύτερο των 1100 μέτρων. Στη συνέχεια, ο υποθαλάσσιος αγωγός μεταφοράς φυσικού αερίου GALSI, εντοπίζεται στην Μεσόγειο θάλασσα. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για έναν αγωγό

που συνδέει την Αλγερία με την Ιταλία διαμέσου της Σαρδηνίας. Το συνολικό έργο ξεκινάει από το εσωτερικό της Αλγερίας και καταλήγει στην ηπειρωτική Ιταλία. Ο υποθαλάσσιος αγωγός διαθέτει δύο σκέλη, το ένα σκέλος συνδέει το λιμάνι El Kala στην μεσογειακή ακτή της Αφρικανικής ηπείρου, με το Κάλιαρι της Σαρδηνίας. Αφού ο αγωγός διασχίσει την νήσο Σαρδηνία, βυθίζεται ξανά για να την συνδέσει με την Τοσκάνη της Ιταλίας. Το πρώτο σκέλος του υποθαλάσσιου αγωγού έχει μήκος 310 χιλιόμετρα, ενώ το δεύτερο 280 χιλιόμετρα.

Από τους πιο γνωστούς υποθαλάσσιους αγωγούς που βρίσκονται στην Μεσόγειο θάλασσα, είναι ο αγωγός Trans-Mediterranean (TransMed ή Enrico Mattei). Το έργο που υλοποιείται μέσω του αγωγού είναι η διασύνδεση της Αλγερίας, της Τυνησίας, της Σικελίας και της Ιταλικής ενδοχώρας. Η ιδέα για την μεταφορά φυσικού αερίου μεταξύ αυτών των περιοχών, ξεκίνησε αρκετές δεκαετίες νωρίτερα. Η κατασκευή του αγωγού ξεκίνησε το 1978 και μέσα από δύο φάσεις κατασκευών απέκτησε την σημερινή του μορφή το 1994. Όπως και ο υποθαλάσσιος αγωγός GALSI, έτσι και ο υποθαλάσσιος αγωγός TransMed αποτελεί μέρος ενός συνολικού έργου έκτασης 2475 χιλιομέτρων που φτάνει μέχρι την Σλοβενία. Το υποθαλάσσιο τμήμα του συγκεκριμένου έργου, ξεκινά από τις μεσογειακές ακτές της Τυνησίας και διασχίζει την Μεσόγειο θάλασσα μέχρι την Σικελία, έχοντας μήκος 155 χιλιόμετρα. Το δεύτερο και πιο μικρό σκέλος του υποθαλάσσιου αγωγού συνδέει την Σικελία με την ηπειρωτική Ιταλία και έχει μήκος 15 χιλιόμετρα.

Ένας ακόμη αγωγός που συνδέει την αφρικανική ήπειρο με την ευρωπαϊκή είναι ο αγωγός Maghreb – Europe (MEG) ή Pedro Duran Farell. Η υποθαλάσσια μεταφορά του φυσικού αερίου γίνεται μέσω του Στενού του Γιβραλτάρ, με αφετηρία την μεσογειακή ακτή του Μαρόκου και προορισμό την περιοχή της Κόρδοβας στην Ανδαλουσία της Ισπανίας. Το μήκος του υποβρύχιου αγωγού φτάνει τα 45 χιλιόμετρα και αποτελεί ένα από τα πέντε σκέλη που διαθέτει συνολικά το έργο. Ο αγωγός MEG έχει συνολικό μήκος 1620 χιλιόμετρα και συνδέει την Αλγερία, το Μαρόκο και την Ισπανία. Η ιδέα για την κατασκευή του ξεκίνησε την δεκαετία του 1960 αλλά η έναρξη της υλοποίησής του έγινε στις αρχές της δεκαετίας του 1990, με κόστος που ανέρχεται στα 2.3 δισεκατομμύρια δολάρια.

Για την διασύνδεση της Αλγερίας με την Ισπανία λειτουργεί επισήμως από το 2011 ο αγωγός Megdaz. Όπως και οι προηγούμενοι αγωγοί που έχουν περιγραφεί παραπάνω, έτσι και ο αγωγός Megdaz αποτελεί ένα εκτεταμένο έργο που δραστηριοποιείται σε χερσαίο και υποθαλάσσιο επίπεδο. Αναλυτικότερα, σε χερσαίο επίπεδο, ο αγωγός ξεκινάει από το πεδίο εξόρυξης Hassi R'mel στην Αλγερία και εκτείνεται μέχρι το λιμάνι της Beni Saf. Ένα δεύτερο σκέλος χερσαίου αγωγού, ξεκινάει στην ευρωπαϊκή ήπειρο και συγκεκριμένα στην Αλμερία με σκοπό να συνδεθεί με το υπάρχον δίκτυο

αγωγών φυσικού αερίου. Στο υποθαλάσσιο επίπεδο, με το οποίο ασχολείται η παρούσα εργασία, η διασύνδεση Αλγερίας – Ισπανίας γίνεται με την χρήση ενός υποβρύχιου αγωγού μήκους 210 χιλιομέτρων με κόστος που φτάνει τα 300 εκατομμύρια δολάρια.

Τέλος ο αγωγός που έχει προγραμματιστεί να γίνει στην περιοχή της Σαχάρας, γνωστός και ως NIGAL ή Trans-African ή Trans-Saharan, θα μεταφέρει φυσικό αέριο διασχίζοντας μεγάλη έκταση της αφρικανικής ηπείρου από την Νιγηρία μέχρι την Αλγερία, έχοντας μήκος 4128 χιλιόμετρα. Στο σημείο εξόρυξης Hassi R'Mel θα συνδέεται με τους αγωγούς που αναφέρονται παραπάνω και θα μεταφέρεται το φυσικό αέριο στην ηπειρωτική Ευρώπη. Οι συνθήκες πολιτικής αστάθειας και τα τρομοκρατικά κινήματα που επικρατούν στις περιοχές τις οποίες έχει προγραμματιστεί να διασχίσει ο αγωγός, δρουν αρνητικά ως προς την έναρξη της λειτουργίας τους.



Εικόνα 3.3: Δίκτυο αγωγών στην Μεσόγειο θάλασσα.
(Πηγή: Wikipedia, 2018)

Όπως προκύπτει από τον χάρτη με το δίκτυο των αγωγών στην Μεσόγειο θάλασσα, έχει αναπτυχθεί ένα δίκτυο μεταφοράς φυσικού αερίου που τροφοδοτεί όλη την Ευρώπη. Πιο συγκεκριμένα, κέντρο αυτού του δικτύου αποτελεί το Hassi R' Mel

στην Αλγερία, από το οποίο ξεκινούν σχεδόν όλοι οι αγωγοί που βρίσκονται στον χώρο της Μεσογείου. Για την Ευρωπαϊκή ήπειρο οι χώρες της Ιταλίας και της Ισπανίας είναι τα κέντρα από τα οποία το φυσικό αέριο μεταφέρεται σε όλα τα υπόλοιπα ευρωπαϊκά κράτη. Η Ελλάδα με τη σειρά της, παρόλο που απουσιάζει από το παραπάνω δίκτυο, έχει δυνατότητες να αναπτύξει την δραστηριότητά της στο χώρο της μεταφοράς φυσικού αερίου και πετρελαίου, καθώς αποτελεί σημαντικό γεωπολιτικό κέντρο κοντά σε κοιτάσματα της Αιγύπτου και του Ισραήλ. Οι συνθήκες που επικρατούν στο βυθό της Μεσογείου θάλασσας περιμετρικά της Ελλάδας δυσχεραίνουν τις όποιες προσπάθειες για υποθαλάσσια διασύνδεσή τις με άλλες χώρες. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να γίνει μία προσπάθεια αυτές οι δυσκολίες να ξεπεραστούν.

Εκτός από τα ορυκτά καύσιμα που μεταφέρονται συνήθως μέσα από τους υποθαλασσίους αγωγούς, υπάρχει η δυνατότητα υποβρύχιας διασύνδεσης δύο περιοχών με σκοπό την εξυπηρέτηση των αναγκών τους για ύδρευση. Ένας υποθαλάσσιος αγωγός μεταφοράς νερού αποτελεί ξεχωριστό τεχνικό έργο με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί εκείνος που έχει σχεδιαστεί για να συνδέσει το νησί της Κύπρου με την Τουρκία. Αναλυτικότερα, πρόκειται για ένα έργο παροχής νερού για πόση και άρδευση μεταξύ της Νότιας Τουρκίας και της Βόρειας Κύπρου. Ο υποθαλάσσιος αγωγός με μήκος τα 80 χιλιόμετρα αποτελεί μέρος ενός συνολικού δικτύου χερσαίων και υποβρύχιων έργων μεγάλου μήκους που ξεκινάει από το φράγμα Alaköprü στην περιοχή της Μερσίνης στη Νότια Τουρκία και καταλήγει λίγα χιλιόμετρα δυτικά της Κερύνειας στη Βόρεια Κύπρο στη δεξαμενή του φράγματος Geçitköy. Ο αγωγός που διασχίζει τη θάλασσα περιοχή της Μεσογείου είναι κατασκευασμένος από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας πιστοποιημένο για τη μεταφορά πόσιμου νερού και διαθέτει πομπούς και αισθητήρες για την ανίχνευση ενδεχόμενων βλαβών. Σε αντίθεση με τους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου, δεν τοποθετείται στον πυθμένα της θάλασσας αλλά σε βάθος 250 μέτρων από την επιφάνεια αυτής, αποτελώντας μία διαφορετική διαδικασία πόντισης ενός υποθαλάσσιου αγωγού.

3.4 Γενικά χαρακτηριστικά υποθαλάσσιων αγωγών

Πολλές είναι οι φορές όπου έχει γίνει σύγκριση των υποθαλάσσιων με τους χερσαίους αγωγούς, έχοντας και οι δύο σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Σχετικά με τους υποθαλάσσιους αγωγούς, με τους οποίους ασχολείται η παρούσα εργασία, είναι απαραίτητο να αναφερθεί πως αποτελούν κατασκευές μεγάλου μήκους περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον έναντι των χερσαίων αγωγών. Αναλυτικότερα οι υπεράκτιοι αγωγοί δεν είναι αναγκασμένοι να περάσουν μέσα από περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές όπως οι περιοχές

NATURA, δάση, λίμνες που συναντώνται στο χερσαίο έδαφος. Ακόμη, σε γεωπολιτικό επίπεδο βρίσκονται σε πιο πλεονεκτική θέση από τους χερσαίους αγωγούς καθώς δεν χρειάζεται να διασχίσουν διαφορετικά εθνικά εδάφη, αποφεύγοντας έτσι ενδεχόμενες πολιτικές συγκρούσεις. Ωστόσο, δεν είναι λίγες οι φορές που οι πολιτικές συγκρούσεις έχουν επηρεάσει και την κατασκευή υποθαλάσσιων αγωγών.

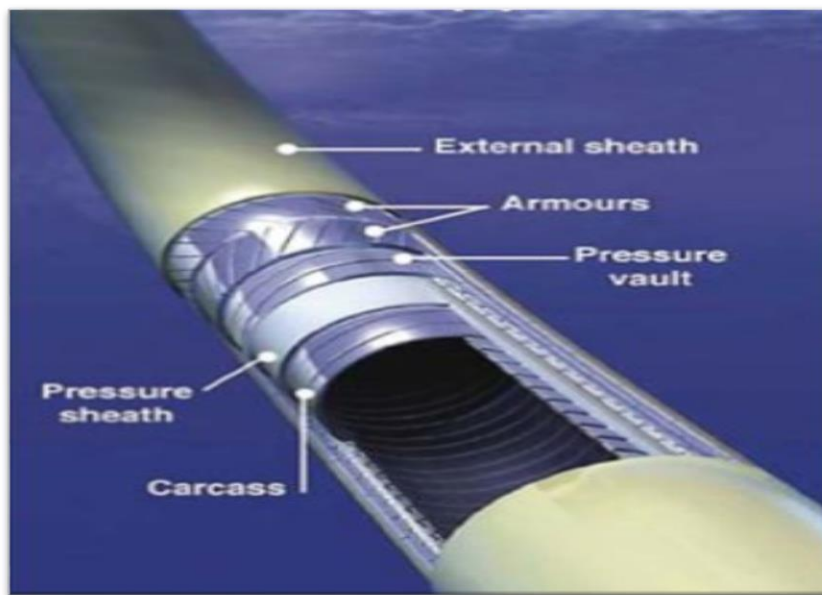
Οι υπεράκτιοι αγωγοί διαφοροποιούνται και ανήκουν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- Αγωγοί εντός-πεδίου ή Gathering pipelines, οι οποίοι χρησιμοποιούνται με σκοπό να μεταφέρουν το αργό πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο από τα σημεία εξόρυξης στα σημεία συλλογής τους. Οι αγωγοί της συγκεκριμένης κατηγορίας έχουν μήκος μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα και η διάμετρός τους είναι μικρή.
- Αγωγοί εξαγωγής ή Distribution pipelines, είναι αγωγοί με σχετικά μικρή διάμετρο και χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του αερίου και του πετρελαίου στην ξηρά.
- Αγωγοί μεταφοράς ή Transportation pipelines, όπου κατασκευάζονται με σκοπό την μεταφορά ρευστών προϊόντων μεταξύ δύο χερσαίων σημείων. Δεν έχουν απαραίτητα σχέση με το πεδίο εξόρυξης και συλλογής, ενώ το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα εκατοντάδες χιλιόμετρα και η διάμετρός τους είναι μεγάλη.

Αξίζει να αναφερθεί πως η τρίτη κατηγορία υποθαλάσσιων αγωγών αρκετές φορές δε χρησιμοποιείται μόνη της ως κατασκευαστικό έργο, αλλά ως τμήμα ολοκληρωμένων διαύλων που συνίστανται από χερσαία και θαλάσσια τμήματα.

Οι διάμετροι των υπεράκτιων αγωγών που συνήθως συναντώνται κυμαίνονται από τις 3 ίντσες (in.), δηλαδή τα 76 χιλιοστά (mm) και μπορούν να φτάσουν μέχρι τις 72 in, δηλαδή 1800mm σε γραμμές σχεδιασμένες για υψηλή χωρητικότητα. Το πάχος τους συνήθως δεν ξεπερνάει τα 75mm, ενώ δύσκολα κατασκευάζονται υποθαλάσσιοι αγωγοί με πάχος μικρότερο από 10mm. Το τελευταίο είναι με τέτοια αντοχή κατασκευασμένο ώστε να είναι αρκετά ανθεκτικό και ασφαλές, προστατεύοντας το εσωτερικό του από πιθανή εξωτερική διάβρωση. Ενδεικτικά, τα τοιχώματα για τέτοιου είδους κατασκευές κατασκευάζονται από χάλυβα υψηλής αντοχής, 350-500MPa., δηλαδή 50.000-70.000psi. Για να ενισχυθεί η προστασία έναντι στην εξωτερική διάβρωση, είναι συχνή η επικάλυψη της δομής με ειδικά επιχρίσματα, η επικάλυψη με υαλοβάμβακα ή σκυρόδεμα, με το τελευταίο να είναι απαραίτητο για την αντιστάθμιση της αρνητικής πλευστότητας όταν ο αγωγός μεταφέρει ρευστά χαμηλής πυκνότητας (Gerwick, 2007 & Ramakrishnan, 2007).

Στο εσωτερικό των υπεράκτιων αγωγών δεν υπάρχει κάποια επικάλυψη ώστε να διευκολύνεται η μεταφορά του πετρελαίου, εάν όμως το υλικό που μεταφέρεται είναι διαβρωτικό με πιθανότητα να προκληθεί βλάβη στο εσωτερικό τους, τότε χρησιμοποιούνται ειδικά υλικά επικάλυψης. Στις περιπτώσεις, όπως στη βιομηχανία πετρελαίου, όπου οι ενδεχόμενες διαρροές είναι μη επιτρεπτές και οι εσωτερικές πιέσεις είναι της τάξης των 10MPa. (1500psi), τα τμήματα του αγωγού ενώνονται με συγκολλήσεις πλήρης διείσδυσης. Τέλος χρησιμοποιείται η ράβδος χυτού μετάλλου, η οποία αποτελεί μια συσκευή πρότυπο για κάθε αγωγό μεταφοράς (Dean, 2010 & Ramakrishnan, 2007).



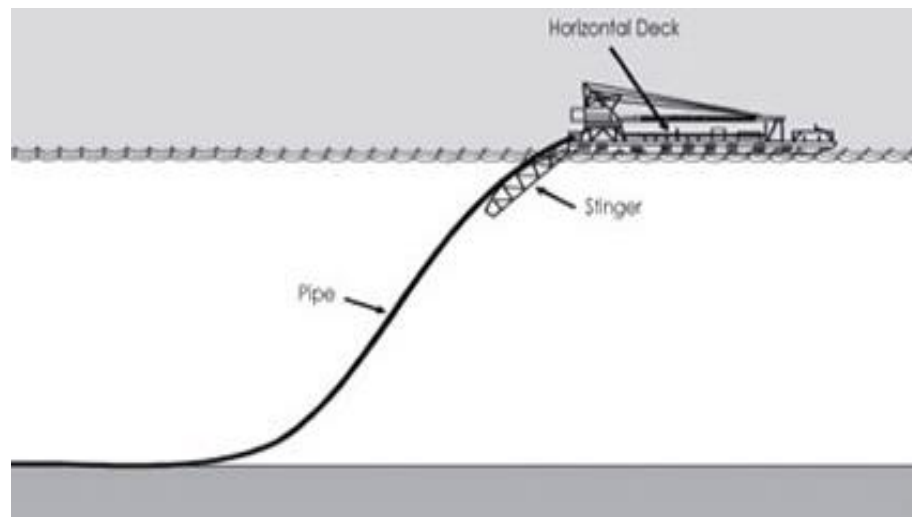
*Εικόνα 3.4: Τυπική δομή υποθαλάσσιου αγωγού.
(Πηγή: www.technip.com)*

3.5 Εγκατάσταση υποθαλάσσιων αγωγών

Η εγκατάσταση ενός υποβρύχιου αγωγού δεν διαφοροποιείται από την διαδικασία εγκατάστασης των υποθαλάσσιων καλωδίων, αλλά στην περίπτωση των αγωγών απαιτείται περισσότερη προσοχή, καθώς οι κίνδυνοι σε περίπτωση αστοχίας για το περιβάλλον είναι περισσότεροι και πιο σοβαροί.

Για την τοποθέτηση του αγωγού στον πυθμένα της θάλασσας χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες μέθοδοι. Οι πιο βασικές από αυτές είναι η μέθοδος S-lay, η μέθοδος

J-lay και η μέθοδος της ρυμούλκησης. Η μέθοδος S-lay, πήρε το όνομά της από το γράμμα S που σχηματίζει ο αγωγός κατά τη διαδικασία εναπόθεσής του στον βυθό της θάλασσας από το ειδικό πλοίο πόντισης. Αναλυτικότερα, ο αγωγός συναρμολογείται πλήρως όσο βρίσκεται πάνω στο πλοίο και στην συνέχεια ως μια μάζα εγκαταλείπει το πλοίο, όσο αυτό βρίσκεται σε κίνηση προς τα εμπρός. Σημαντικά εργαλεία για την υλοποίηση της εγκατάστασης του αγωγού με την μέθοδο S-lay, αποτελούν τα stingers. Βρίσκονται τοποθετημένα επάνω στο πλοίο, στο σημείο εναπόθεσης του αγωγού στην θάλασσα. Πρόκειται για ειδικούς βραχίονες, οι οποίοι είναι ημιβυθισμένοι στο νερό υπό γωνία και μέσα από αυτούς ο αγωγός κατεβαίνει βαθμιαία στον πυθμένα της θάλασσας. Το μήκος των stingers φτάνει τα 90 μέτρα περίπου και ο ρόλος τους είναι να ελέγχουν την καμπυλότητα της κατασκευής μέχρι να φτάσει στο σημείο επαφής, τον θαλάσσιο βυθό. Μέχρι όμως ο αγωγός να φτάσει το σημείο επαφής, δέχεται από το νερό αρκετές δυνάμεις με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος κάμψης του σωλήνα. Για να αντιμετωπιστεί ο κίνδυνος αυτός, χρησιμοποιούνται ειδικοί κύλινδροι τάνυσης, διατηρώντας μια συνεχή ώθηση του σωλήνα προς τα εμπρός. Η μέθοδος S-lay μπορεί να εφαρμοστεί σε βάθη που φτάνουν τα 2000 μέτρα περίπου, με ρυθμό εγκατάστασης τα 6 χιλιόμετρα ημερησίως, ωστόσο η μέθοδος J-lay τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται πιο συχνά.



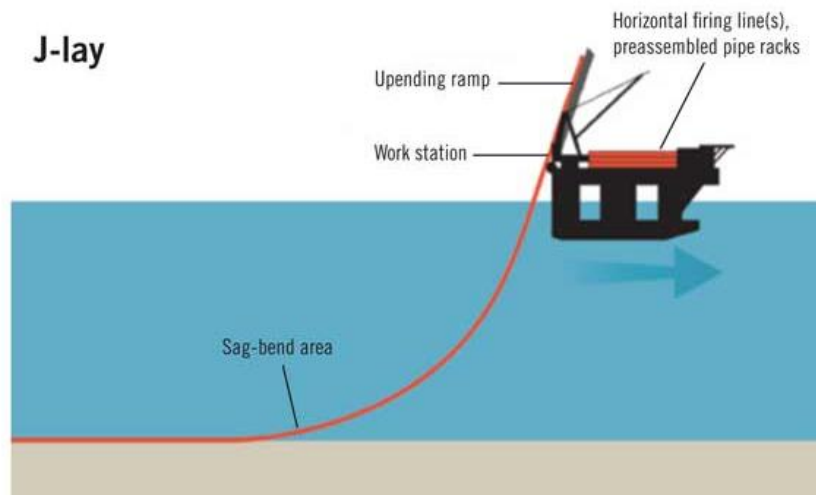
Εικόνα 3.5: Μέθοδος εγκατάστασης υποθαλάσσιου αγωγού S-lay.

(Πηγή: www.ringzone.com)



Εικόνα 3.6: Stinger: για τον έλεγχο και την σωστή καθοδήγηση του αγωγού προς το σημείο επαφής με τον πυθμένα της θάλασσας.
(Πηγή: www.ringzone.com)

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται κυρίως σήμερα, είναι η μέθοδος J-lay. Για μεγάλα βάθη η μέθοδος S-lay δεν είναι κατάλληλη γιατί η κάμψη του αγωγού δεν μπορεί να ελεγχθεί ολοκληρωτικά και επίσης αυξάνεται ο κίνδυνος ανώμαλης συνάντησης του αγωγού με το σημείο επαφής, όσο αυξάνεται το βάθος. Επομένως, δημιουργήθηκε μία διαφορετική μέθοδος, όπου ο αγωγός αμέσως πριν έρθει σε επαφή με το νερό, εγκαταλείπει το πλοίο σε κάθετη θέση με το νερό. Για την εφαρμογή της χρησιμοποιείται ένα ανυψωτικό μηχάνημα για να μπορέσει να φέρει τον αγωγό στην θέση που πρέπει. Αυτό που επιτυγχάνεται με την J-lay μέθοδο είναι η μικρότερη έκθεση του αγωγού στα θαλάσσια κύματα στην επιφάνεια της θάλασσας και στα υποθαλάσσια ρεύματα, αλλά και η καμπύλωση του μόνο σε ένα σημείο. Λόγω της καμπύλωσης του αγωγού σε ένα μόνο σημείο, εκείνος παίρνει το σχήμα J κάτω από την επιφάνεια του νερού, από το οποίο προέρχεται και το όνομα της μεθόδου.



Εικόνα 3.7: Μέθοδος εγκατάστασης υποθαλάσσιου αγωγού J-lay.
(Πηγή: *Oil & Gas Journal*)

Η μέθοδος της ρυμούλκησης προϋποθέτει την συναρμολόγηση του αγωγού στην ξηρά. Το γεγονός αυτό, προσδίδει στην μέθοδο το ουσιώδες πλεονέκτημα έναντι των υπολοίπων δύο, τον έλεγχο και την δοκιμή του αγωγού στην ξηρά. Η επιθεώρηση του αγωγού όσο αυτός βρίσκεται στη θάλασσα, στο πλοίο πόντισης, είναι πιο χρονοβόρα και έχει μεγάλες πιθανότητες παράβλεψης κάποιας βλάβης του αγωγού από ότι μια επιθεώρηση στην ξηρά. Οι διαδικασίες ρυμούλκησης του σωλήνα που πρόκειται να τοποθετηθεί διαφέρουν μεταξύ τους. Αρχικά είναι η επιφανειακή ρυμούλκηση όπου ο αγωγός κατά την διαδικασία της έλξης παραμένει στην επιφάνεια του νερού και βυθίζεται στο σημείο τοποθέτησής του. Έπειτα, είναι ρυμούλκηση του αγωγού, ο οποίος κατά τη διαδικασία της έλξης είναι ελαφρώς βυθισμένος. Ο ρόλος αυτής της μεθόδου είναι να κρατήσει τον αγωγό κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας περιορίζοντας την επίδραση των επιφανειακών κυματισμών. Η ρυμούλκηση μεσαίου βάθους απαιτεί την χρήση δύο πλοίων πόντισης αγωγού. Ο αγωγός είτε λόγω του βάρους του είτε λόγω ειδικών πρόσθετων αλυσίδων που του έχουν τοποθετηθεί βυθίζεται δημιουργώντας ένα τόξο. Η κάμψη που υφίσταται ο αγωγός είναι ελεγχόμενη και προέρχεται από τις τάσεις που ασκούν σε αυτόν τα πλοία και οι ειδικές πρόσθετες αλυσίδες για επιπλέον βάρος. Η μέθοδος της ρυμούλκησης με δέσμευση από τον πυθμένα της θάλασσας, είναι παρόμοια με την αμέσως προηγούμενη διαδικασία ρυμούλκησης με την διαφορά ότι εδώ οι αλυσίδες που τοποθετούνται στον αγωγό βρίσκονται κοντά στον πυθμένα της θάλασσας. Τέλος, υπάρχει και η διαδικασία ρυμούλκησης με την οποία ο αγωγός τοποθετείται εξαρχής στον βυθό της θάλασσας και από εκεί με την βοήθεια ειδικών πλοίων σύρεται μέχρι το σημείο τοποθέτησής του. Οι απαιτήσεις στην εφαρμογή της τελευταίας διαδικασίας ρυμούλκησης είναι αρκετές καθώς ο αγωγός πρέπει να έχει αρκετά μεγάλη αντοχή στην τριβή με τον θαλάσσιο πυθμένα. Η χρήση της συναντάται μόνο για μικρές αποστάσεις.



Εικόνα 3.8: Μέθοδος εγκατάστασης υποθαλάσσιου αγωγού επιφανειακής ρυμούλκησης.
(Πηγή: *Offshore Fleet: Offshore industry and technology journal*)

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί όπως και τα υποθαλάσσια καλώδια μεταφέρονται στο σημείο τοποθέτησής τους και ποντίζονται στον βυθό της θάλασσας με την βοήθεια ειδικών πλοίων. Τα ειδικά αυτά πλοία, γνωστά και ως Pipe – lay Vessels (PLV) έχουν την δυνατότητα να τοποθετήσουν υποθαλάσσιους αγωγούς σε βάθη που φτάνουν μέχρι και τα 2500 μέτρα. Ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση του αγωγού στον θαλάσσιο πυθμένα, επιλέγεται και το κατάλληλο πλοίο. Πιο συγκεκριμένα, διαφορετικά πλοία χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της μεθόδου S-lay και διαφορετικά για την εφαρμογή της μεθόδου J-lay. Τέλος υπάρχουν και οι φορηγίδες, οι οποίες διαφέρουν ως προς τα υπόλοιπα πλοία σημαντικά.

Τα πλοία που χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση του αγωγού με την μέθοδο S-lay και J-lay έχουν την δυνατότητα πάνω σε αυτά να πραγματοποιηθούν και άλλες διαδικασίες εκτός από την τοποθέτηση του αγωγού. Στο κατάστρωμά τους, διαθέτουν έναν σταθμό συγκόλλησης όπου εκεί γίνεται η συναρμολόγηση του αγωγού πριν την τοποθέτησή του. Η διαφορά που εντοπίζεται μεταξύ των δύο κατηγοριών πλοίων είναι ότι στα πλοία που ποντίζουν τον υποθαλάσσιο αγωγό με την μέθοδο J-lay υπάρχει ένα ανυψωτικό μηχάνημα για να φέρει τον αγωγό σε κάθετη θέση, όπως απαιτεί η μέθοδος.

Αντιθέτως, οι φορηγίδες που χρησιμοποιούνται για την πόντιση αγωγών διαφέρουν σημαντικά από τα υπόλοιπα πλοία καθώς δεν έχουν την δυνατότητα συγκόλλησης του αγωγού στο κατάστρωμά τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μεταφέρουν τον αγωγό με την χρήση ενός κυλίνδρου ή αλλιώς καρουλιού, αφού πρώτα έχει συναρμολογηθεί στην ξηρά. Το πλεονέκτημα από την χρήση της φορηγίδας για την εγκατάσταση ενός υποθαλάσσιου αγωγού εντοπίζεται στο ότι η συγκόλληση των τμημάτων του αγωγού που γίνεται στην ξηρά είναι λιγότερο δαπανηρή. Ωστόσο και οι φορηγίδες τοποθετούν τον υποθαλάσσιο αγωγό με κάποια από τις μεθόδους S-lay και J-lay. Εάν ο άξονας του περιστρεφόμενου κυλίνδρου είναι οριζόντιος τότε η πόντιση του αγωγού γίνεται με την μέθοδο S-lay ενώ εάν ο άξονας του κυλίνδρου είναι κάθετος, η πόντιση του αγωγού γίνεται με την μέθοδο J-lay.

Τα πιο γνωστά πλοία που χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση υποθαλάσσιων αγωγών είναι το «Solitaire», το «DCV Aegir» και το «Castoro sei». Αναλυτικότερα, το πλοίο «Solitaire» αποτελεί το μεγαλύτερο σκάφος τοποθέτησης αγωγών στον κόσμο, με μήκος 300μ. Στο εσωτερικό του έχει την ικανότητα να κατασκευάζει τους αγωγούς που πρόκειται να ποντιστούν. Στον χώρο της τοποθέτησης υποβρύχιων αγωγών βρίσκεται από το 1998. Ο εξοπλισμός που διαθέτει είναι τεχνολογικά εξελιγμένος, καθώς διαθέτει σύστημα δορυφορικού εντοπισμού άκρως αναπτυγμένο, ενώ έχει κατασκευαστεί για να μπορεί να τοποθετήσει αγωγούς στο πυθμένα της θάλασσας κάτω από αντίξοες καιρικές συνθήκες. Το πλήρωμά του φτάνει τα 420

άτομα και η ταχύτητα που ποντίζει τους αγωγούς ανέρχεται στα 9 χιλιόμετρα σωληνώσεων ημερησίως.

Το πλοίο «DCV Aegir» αποτελεί ένα μια καινούρια σχετικά κατασκευή που τοποθετεί υποθαλάσσιους αγωγούς με την μέθοδο J-lay. Η έναρξη των διαδικασιών για την κατασκευή του έγιναν το 2010 και ολοκληρώθηκαν το 2013. Όπως και το προηγούμενο πλοίο έτσι και αυτό διαθέτει ένα προηγμένο σύστημα δορυφορικού. Ο βασικός γερανός του πλοίου που χρησιμοποιείται για την πόντιση του αγωγού έχει βραχίονα μήκους 125 μέτρων και ύψος ανύψωσης 96 μέτρα. Το εν λόγω πλοίο είναι ικανό να φιλοξενήσει περίπου 300 άτομα για προσωπικό, ενώ επίσης διαθέτει και δύο τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα (ROV).

Τέλος, σημαντική είναι η αναφορά της σταθερής πλατφόρμας «Castoro Sei», καθώς έχει χρησιμοποιηθεί για αρκετά έργα υποθαλάσσιας διασύνδεσης μέσω αγωγών. Αναλυτικότερα, έχει κατά καιρούς δραστηριοποιηθεί στην Μεσόγειο θάλασσα, την Μαύρη θάλασσα και την Βόρεια θάλασσα στους αγωγούς Greenstream, Trans Mediterranean, BBL, Megdaz και Nord Stream. Στο εσωτερικό της έχει την δυνατότητα κατασκευής και συγκόλλησης σωλήνων που τοποθετούνται στην θάλασσα με την βοήθεια ειδικών γερανών και ραμπών. Το προσωπικό που μπορεί να φιλοξενήσει ανέρχεται στα 354 άτομα, ενώ για την διευκόλυνση της μεταφοράς του διαθέτει ελικοδρόμιο.



Εικόνα 3.9: Πλοίο τοποθέτησης υποθαλάσσιων αγωγών «Solitaire».
(Πηγή: www.shipspotting.com)



Εικόνα 3.10: Πλοίο τοποθέτησης υποθαλάσσιων αγωγών με τη μέθοδο J-lay «DCV Aegir».
(Πηγή: www.marinetraffic.com)



Εικόνα 3.11: Πλατφόρμα τοποθέτησης υποθαλάσσιων αγωγών «Castoro Sei».
(Πηγή: www.nord-stream.com)

3.6 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις υποθαλάσσιων αγωγών

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί έχουν καθιερωθεί στη βιομηχανία εξαγωγής και μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου. Για πολλές χώρες το εμπόριο ορυκτών καυσίμων αποτελεί κύρια πηγή εισοδήματος. Επομένως, η κατασκευή και η λειτουργία υποθαλάσσιων αγωγών με το μικρότερο δυνατό κόστος είναι ιδιαίτερα σημαντικό για αυτές τις χώρες. Ωστόσο, στην περίπτωση των αγωγών, η ασφάλεια κατέχει κυρίαρχο ρόλο, καθώς είτε κατά την διαδικασία της τοποθέτησης, είτε κατά το στάδιο λειτουργίας του έργου, οι κίνδυνοι είναι αρκετοί αυξάνοντας τις πιθανότητες για μία περιβαλλοντική καταστροφή.

Εν αντιθέσει με τα υποθαλάσσια καλώδια, ένας υποβρύχιος αγωγός αποτελεί μια περίπλοκη κατασκευή καθώς χρησιμοποιούνται σωληνώσεις με μεγαλύτερες διαμέτρους και με περισσότερα κατασκευαστικά υλικά λόγω των απαιτητικών προϊόντων που μεταφέρονται μέσω αυτών. Κατά την τοποθέτηση των αγωγών στον πυθμένα της θάλασσας, είτε απευθείας στην επιφάνεια αυτού, είτε εντός μια τάφρου, οι επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι σοβαρές. Αναλυτικότερα, διαταράσσεται η θαλάσσια ζωή και το οικοσύστημα που έχει αναπτυχθεί εδώ και χιλιάδες χρόνια στο βυθό. Μία μικρή επέμβαση στον πυθμένα της θάλασσας, μπορεί να επιφέρει μία τεράστια αλλαγή στον βιότοπό του. Για την αποκατάσταση τέτοιων περιβαλλοντικών ζημιών είναι πιθανό να χρειαστούν αρκετά χρόνια. Εύκολα προκύπτει το μέγεθος των επιπτώσεων που μπορεί να προκαλέσει στον θαλάσσιο πυθμένα ένας αγωγών χιλιάδων χιλιομέτρων.

Από την άλλη μεριά, ένα υποθαλάσσιο έργο μεγάλου μήκους που μεταφέρει πετρέλαιο και φυσικό αέριο σε τεράστιες πιέσεις και ποσότητες δια μέσω αγωγών, αποτελεί κίνδυνο για όλη τη διάρκεια της ζωής του. Οι εξωτερικές πιέσεις, εάν έχει τοποθετηθεί σε μεγάλο βάθος, οι εσωτερικές πιέσεις, ανάλογα με τις ποσότητες του προϊόντος που μεταφέρει αλλά και οι εξωγενείς ανθρώπινοι παράγοντες, απειλούν τον αγωγό με ενδεχόμενη αστοχία. Δεν είναι λίγες οι φορές που ένας υποθαλάσσιος αγωγός έχει διαβρωθεί λόγω του αλμυρού νερού της θάλασσας, με κίνδυνο ρήξης των τοιχωμάτων που προστατεύουν το καύσιμο που μεταφέρεται στο εσωτερικό του. Τα ατυχήματα που προέρχονται από κάποια βλάβη στο εσωτερικό του αγωγού λόγω αστοχίας μιας διάταξης του ή λόγω του συμπιεσμένου αερίου που μεταφέρεται, επίσης είναι συχνά. Ακόμη οι άγκυρες των μεγάλων πλοίων μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στα τοιχώματα ενός αγωγού τοποθετημένου σε μικρό βάθος. Όλα τα γεγονότα που έχουν περιγραφεί έχουν οδηγήσει σε περιστατικά διαρροής καυσίμων στο θαλάσσιο χώρο ή ακόμα και σε εκρήξεις. Μια ενδεχόμενη διαρροή ενός υποθαλάσσιου αγωγού, είναι ικανή να επιφέρει τεράστια οικολογική καταστροφή σε θαλάσσια έκταση εκατοντάδων χιλιομέτρων, καθιστώντας την αντιμετώπισή της ιδιαίτερα δύσκολη.

Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες για την πρόληψη των ατυχημάτων που προέρχονται από αστοχία των υποθαλάσσιων αγωγών. Με νέους νόμους που έχουν θεσπιστεί, πριν την κατασκευή μεγάλων έργων απαιτείται η εκπόνηση της Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων, με σκοπό να μελετηθούν όλες οι επιπτώσεις που θα επιφέρει το έργο στο περιβάλλον γύρω του. Ακόμη νέες τεχνολογίες ως προς την κατασκευή του αγωγού χρησιμοποιούνται. Πλέον δίνεται ιδιαίτερη σημασία στο υλικό από το οποίο κατασκευάζεται ο αγωγός. Τα τοιχώματα των σωληνώσεων που τοποθετούνται στον πυθμένα της θάλασσας είναι περισσότερο ανθεκτικά σε εξωτερικές πιέσεις αλλά και στην διάβρωση που προκαλεί το θαλασσινό νερό. Για τους αγωγούς που βρίσκονται σε πιο μικρά βάθη κοντά στην ακτή, όπως και για τα καλώδια, τοποθετείται ειδικό περίβλημα κατασκευασμένο από σκυρόδεμα για να περιοριστεί ο κίνδυνος ρήξης του αγωγού από πιθανή αγκυροβολία.

Τέλος, μέσα από την λεπτομερή εξέταση του πυθμένα της θάλασσας στην περιοχή όπου πρόκειται να εγκατασταθεί ο αγωγός, γίνεται η προσπάθεια κατασκευής ειδικών εργαλείων που θα δέχονται ως κριτήρια πιθανές περιοχές αστοχίας του πυθμένα της θάλασσας, τοπογραφικές ανωμαλίες που βρίσκονται στο βυθό και γενικότερα όλα τα γεωτεχνικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά του. Τα εργαλεία αυτά όπως εκτενώς αναφέρεται σε επόμενα κεφάλαια έχουν σκοπό την επιλογή της κατάλληλης διαδρομής του αγωγού, που εγγυάται την ασφάλειά του καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του αλλά και την ελάχιστη δυνατή διαταραχή του θαλάσσιου περιβάλλοντος.



Εικόνα 3.12: Έκρηξη υποθαλάσσιου αγωγού μεταφοράς πετρελαίου στον ποταμό Μόσκοβα πλησίον ενός διυλιστηρίου.

(Πηγή: www.dailymail.co.uk, 2015)

4. Υποθαλάσσιοι Γεωκίνδυνοι

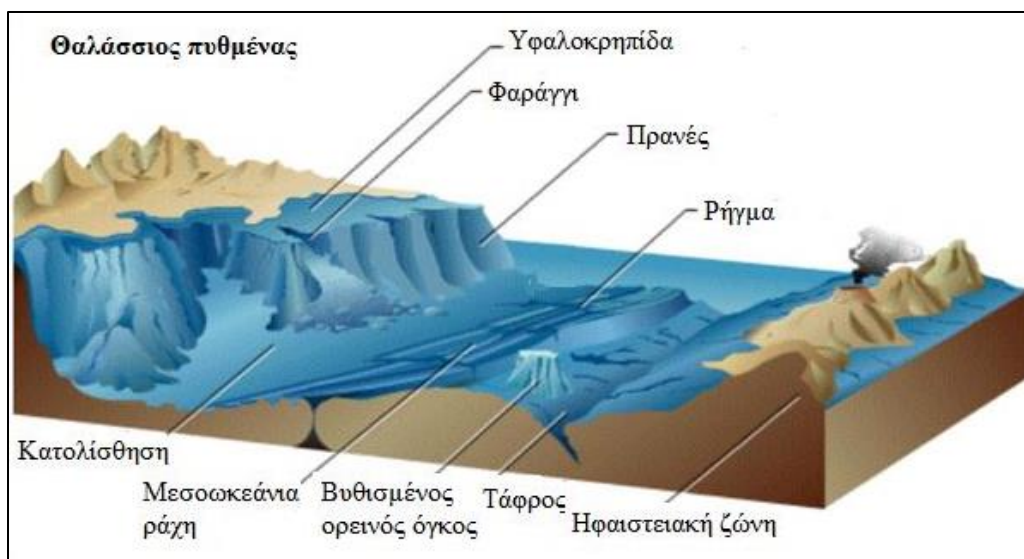
4.1 Εισαγωγή

Οι υποθαλάσσιοι γεωκίνδυνοι ή Offshore Geohazards ορίζονται ως το σύνολο των μακροπρόθεσμων ή βραχυπρόθεσμων διεργασιών και φαινομένων που εκδηλώνονται στον βυθό της θάλασσας και περιέχουν γεωλογικά ή τεκτονικά χαρακτηριστικά με αποτέλεσμα να θέτουν σε κίνδυνο την ασφάλεια και την ακεραιότητα μιας περιοχής. Ο προσδιορισμός τους γίνεται με την μελέτη της γεωγραφίας, της γεωμορφολογίας και της γεωλογίας της περιοχής, ενώ οι περισσότεροι συνδέονται άμεσα με την μηχανική του πυθμένα της θάλασσας.

Η βασική κατηγοριοποίηση των υποθαλάσσιων γεωκινδύνων σχετίζεται με το χρόνο εκδήλωσής τους. Επομένως χωρίζονται σε:

- Ακαριαία φαινόμενα. Τα γεγονότα που έχουν επεισοδιακό χαρακτήρα και συνήθως είναι σπάνια. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι σεισμοί, οι υποβρύχιες κατολισθήσεις, οι τυρβώδεις ροές και η αποβολή αερίων.
- Μακροχρόνια φαινόμενα. Η συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνει διεργασίες αργού και προοδευτικού χαρακτήρα, όπως για παράδειγμα ο ερπυσμός του θαλάσσιου πυθμένα.

Ο κίνδυνος εκδήλωσης ενός γεωκινδύνου σε μία περιοχή μπορεί να είναι χαμηλού επιπέδου, ωστόσο να αυξάνεται λόγω ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, οι οποίες έχουν καθοριστικό ρόλο σε τέτοια φαινόμενα. Στην κατηγορία των γεωκινδύνων ανήκουν οι αστοχίες των πρανών, οι τεκτονικές και μη αστοχίες, οι σεισμικές δονήσεις του θαλάσσιου πυθμένα, τα ηφαίστεια λάσπης και οι υδρίτες αερίων. Εκτός από τους γεωκινδύνους, δευτερογενώς οι υδροδυναμικές δυνάμεις λόγω των τσουνάμι που μπορούν να προκληθούν από έναν σεισμό, την έκρηξη ενός ηφαιστείου ή από μία μεγάλη έκταση υποθαλάσσια κατολίπηση μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα στην ακεραιότητα ενός υποβρύχιου έργου μεγάλου μήκους. Οι γεωκίνδυνοι που επιλέχθηκαν να αναλυθούν αφορούν τους σεισμούς, τα ηφαίστεια και τις κατολισθήσεις.



Σχήμα 4.1: Υποθαλάσσιοι γεωκίνδυνοι.

4.2 Σεισμοί

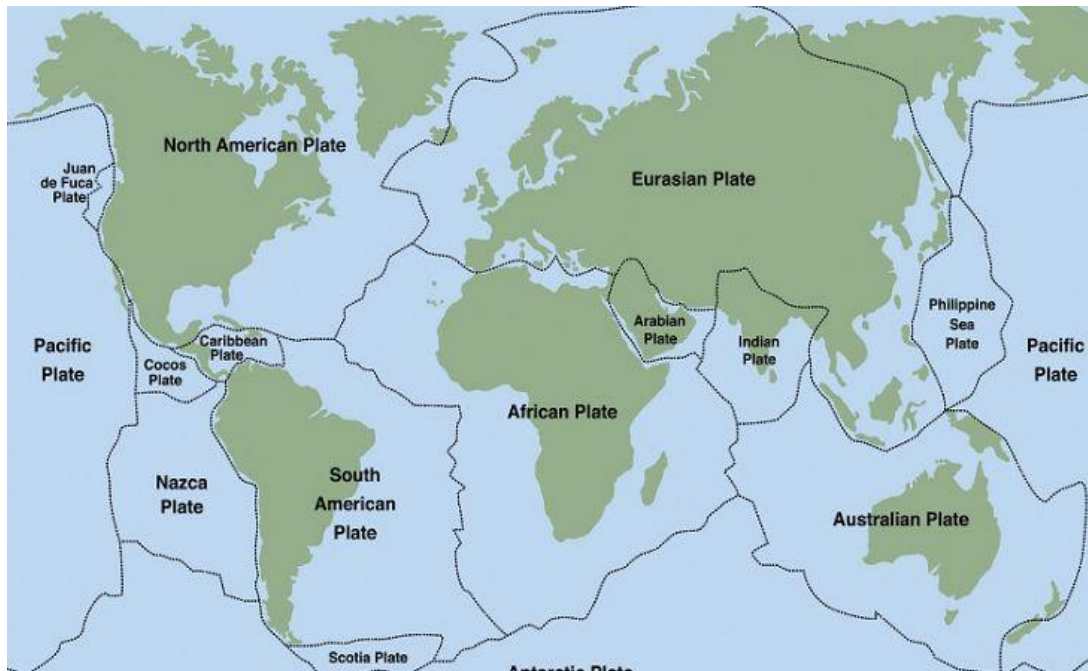
Ο σεισμός αποτελεί ένα φυσικό φαινόμενο που προκαλείται από την απελευθέρωση συσσωρευμένης ενέργειας στο φλοιό της Γης. Η ποσότητα της ενέργειας που απελευθερώνεται διαδίδεται στην επιφάνεια της Γης μέσω των σεισμικών κυμάτων και εκδηλώνεται με κινήσεις του εδάφους. Πρόκειται για ένα ακαριαίο φαινόμενο, καθώς εκδηλώνεται απρόοπτα και ξαφνικά, ενώ έχει την ικανότητα να προκαλέσει εκτεταμένες καταστροφές στην επιφάνεια της Γης ανάλογα με το μέγεθός του και την χρονική του διάρκεια.

Η εκδήλωση του φαινομένου του σεισμού γίνεται είτε ηπειρωτικά είτε σε υποθαλάσσιο επίπεδο. Ο υποβρύχιος σεισμός, που αφορά την παρούσα εργασία, εκδηλώνεται στον θαλάσσιο πυθμένα. Ανάλογα με την έντασή του, υφίστανται μεταβολές στον βυθό, οι οποίες δεν διαφέρουν από αυτές που δημιουργούνται στο χερσαίο έδαφος κατά την διάρκεια ενός ηπειρωτικού σεισμού. Ωστόσο, ένας σεισμός που εκδηλώνεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την δημιουργία μιας σειράς κυμάτων, των τσουνάμι. Τα κύματα αυτά κινούνται προς όλες τις κατευθύνσεις ενισχύοντας τον κίνδυνο καταστροφής παράκτιων περιοχών. Οι υποθαλάσσιοι σεισμοί και τα υποβρύχια ρήγματα που έχουν δημιουργηθεί, αποτελούν εχθρούς των υποβρύχιων καλωδίων και αγωγών.

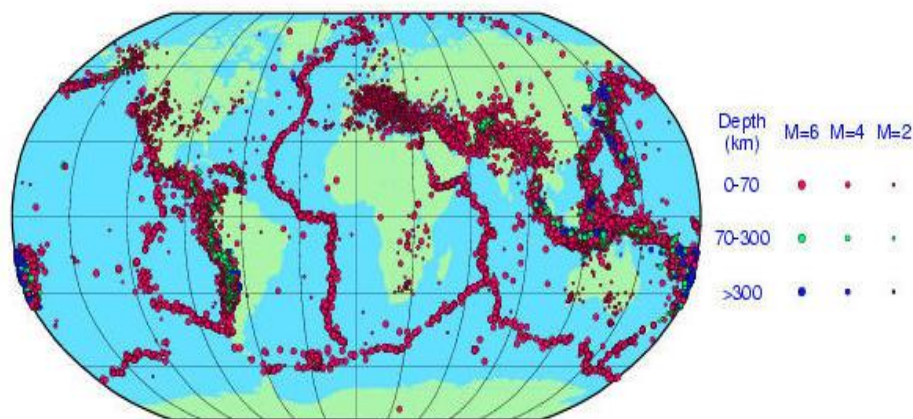
Η πλειοψηφία των σεισμών προκαλούνται στα όρια των τεκτονικών πλακών και για αυτό ονομάζονται τεκτονικοί σεισμοί. Επομένως, σημαντική είναι η αναφορά της θεωρίας των τεκτονικών πλακών, η οποία διατυπώθηκε πρώτη φορά το 1912 από τον

Γερμανό γεωφυσικό και μετεωρολόγο Άλφρεντ Βέγκενερ, ενώ το 1970 πήρε την τελική της μορφή. Η θεωρία υποστηρίζει πως το επιφανειακό στρώμα της Γης, η λιθόσφαιρα, αποτελείται από την σύνθεση δώδεκα λιθосφαιρικών πλακών, οι οποίες βρίσκονται διαρκώς σε κίνηση και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Από τις δώδεκα τεκτονικές πλάκες, οι επτά (Αφρικανική, Ευρασιατική, Ειρηνική, Β. Αμερικής, Ν. Αμερικής και Ινδο-Αυστραλιανή) είναι οι κύριες, ενώ οι υπόλοιπες οι δευτερεύουσες που προέκυψαν από διάσπαση των κύριων. Αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των πλακών, είναι είτε να έρχονται σε σύγκρουση μεταξύ τους, είτε να απομακρύνονται η μία από την άλλη, είτε τέλος η μία να βυθίζεται κάτω από την άλλη.

Με τις κινήσεις των τεκτονικών πλακών σχηματίζονται ρωγμές στον φλοιό της Γης, τα ρήγματα, οι πλευρές των οποίων λόγω της τριβής των πετρωμάτων, δεν ολισθαίνουν. Στην περίπτωση που αναπτυχθούν τάσεις μεγαλύτερες από το όριο θραύσης των πετρωμάτων του ρήγματος, τότε αυτό θα ολισθήσει και θα απελευθερωθούν τεράστιες ποσότητες ενέργειας οι οποίες θα διαδοθούν με τα σεισμικά κύματα σε μορφή ταλαντώσεων και θα έχει εκδηλωθεί ένας τεκτονικός σεισμός.



Εικόνα 4.1: Τεκτονικές πλάκες της Γης.
(Πηγή: www.worldatlas.com)



*Εικόνα 4.2: Παγκόσμια σεισμική δραστηριότητα 1974-1994
(Πηγή: International Seismological Center)*

Όπως προκύπτει και από την παραπάνω εικόνα, η Μεσόγειος θάλασσα που αποτελεί κύρια περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, έχει την πιο έντονη σεισμική δραστηριότητα καθώς βρίσκεται μεταξύ των ορίων της Αφρικανικής, της Ευρασιατικής και της Αραβικής τεκτονικής πλάκας.

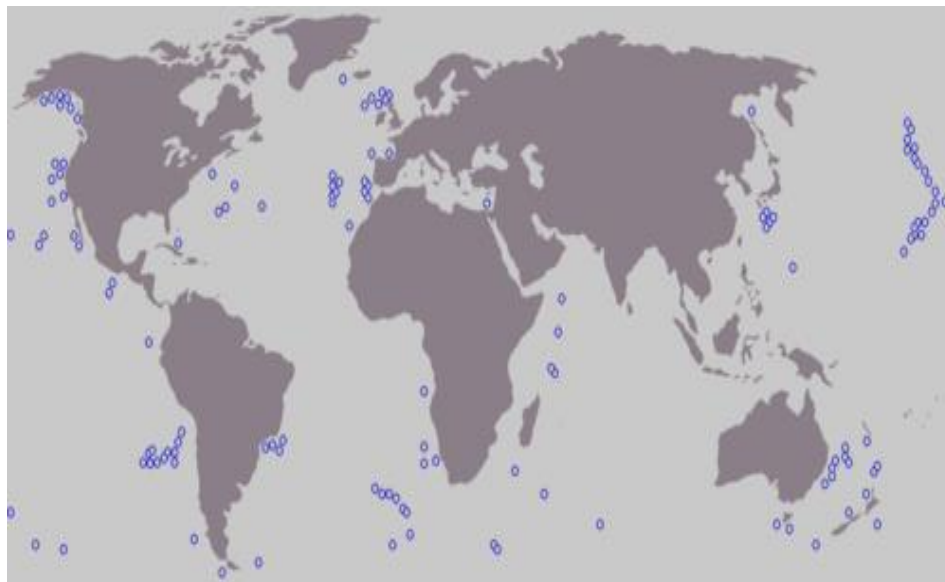
4.3 Ηφαίστεια

Τα ηφαίστεια ορίζονται ως ανοίγματα του φλοιού της Γης που επιτρέπουν την εκροή και την έκρηξη αερίων και ρευστών πετρωμάτων από τον εσωτερικό γήινο μανδύα, με την μορφή λάβας. Όπως οι σεισμοί, έτσι και τα ηφαίστεια αποτελούν ένα φυσικό φαινόμενο που με την εκτόνωσή του επιφέρει εκτεταμένες ζημιές στην επιφάνεια του πλανήτη. Υπάρχουν δύο είδη ηφαιστείων, τα ενεργά, τα οποία έχουν εμφανίσει κάποια σύγχρονη δραστηριότητα και τα ανενεργά ή νεκρά, τα οποία ενώ έχει καταγραφεί η παρουσία τους, δεν έχουν εμφανίσει κάποια δραστηριότητα στους ιστορικούς χρόνους.

Η ύπαρξη ηφαιστείων επεκτείνεται και στον πυθμένα της θάλασσας. Τα υποθαλάσσια ηφαίστεια προέρχονται από τα ρήγματα που έχουν δημιουργηθεί στον φλοιό της Γης, σε υποθαλάσσιες περιοχές. Το γεγονός ότι τα υποθαλάσσια ρήγματα είναι περισσότερα σε σχέση με τα χερσαία, αλλά και ότι ο γήινος φλοιός είναι πιο λεπτός κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, καθιστά περισσότερο πιθανή την εκδήλωση των ηφαιστειακών φαινομένων μακριά από την στεριά. Το βάθος που εντοπίζονται τα υποβρύχια ηφαίστεια ποικίλει καθώς υπάρχουν κατά κύριο λόγο σε

μεγάλα βάθη αλλά δεν είναι σπάνιος και ο σχηματισμός τους σε ρηχά νερά. Τα χαρακτηριστικά της έκρηξης ενός υποθαλάσσιου ηφαιστείου διαφέρουν σημαντικά από εκείνα ενός χερσαίου ηφαιστείου λόγω της ύπαρξης του νερού. Τα ηφαιστειακά υλικά που εκρέουν από ένα ηφαίστειο, μέσα στο νερό, κρυνώνουν πιο εύκολα με αποτέλεσμα να στερεοποιούνται σε μικρότερο χρονικό διάστημα από ότι στην ξηρά. Επομένως από την έκρηξη υποθαλάσσιων ηφαιστείων είναι συχνή η δημιουργία ηφαιστειακών προϊόντων, όπως το ηφαιστειακό γυαλί. Τέλος, ο εντοπισμός ενός ηφαιστείου, γίνεται με τη βοήθεια ειδικών τηλεκατευθυνόμενων βαθυσκάφων ROV και με την χρήση των υδροφώνων για την καταγραφή των ήχων που μεταδίδονται.

Οι περιοχές που συγκρούονται ή απομακρύνονται δύο ή περισσότερες τεκτονικές πλάκες αποτελούν τις περιοχές σχηματισμού των περισσότερων ηφαιστείων. Στην περίπτωση που απομακρύνονται οι τεκτονικές πλάκες μεταξύ τους, δημιουργείται ένας νέος ωκεάνιος φλοιός αποτελούμενος από μια υποθαλάσσια οροσειρά. Οι οροσειρές αυτές δημιουργούνται στο βάθος των ωκεανών, ονομάζονται μεσοωκεάνιες ράχες ή ωκεάνιες κορυφογραμμές και διατρέχουν όλο το μήκος του υποθαλάσσιου τεκτονικού ρήγματος. Μέσα από το υποβρύχιο ρήγμα ανέρχεται το μάγμα, δηλαδή το ρευστό πέτρωμα που βρίσκεται κάτω από τις λιθοσφαιρικές πλάκες. Επομένως, με αυτόν τον τρόπο σχηματίζονται τα ηφαίστεια από «αποκλίνουσες πλάκες». Η πιο γνωστή μεσοωκεάνια ράχη είναι αυτή του Ατλαντικού ωκεανού. Αντιθέτως, τα ηφαίστεια από «συγκλίνουσες πλάκες», σχηματίζονται κατά την βύθιση μιας τεκτονικής πλάκας κάτω από μία άλλη. Συνήθως, οι ωκεάνιες τεκτονικές πλάκες βυθίζονται κάτω από ηπειρωτικές αντίστοιχες, με αποτέλεσμα την δημιουργία του νησιωτικού τόξου. Το νησιωτικό τόξο είναι ο ηπειρωτικός φλοιός που σχηματίζεται από δύο τεκτονικές πλάκες που συγκλίνουν μεταξύ τους, με αποτέλεσμα την δημιουργία χερσαίων οροσειρών που αποτελούν ενεργά ηφαίστεια. Η τεκτονική πλάκα που βυθίζεται, λιώνει στις μεγάλες θερμοκρασίες που επικρατούν στο εσωτερικό της Γης και το υλικό της υγροποιείται με αποτέλεσμα να βρίσκει δίοδο δια μέσω των σχηματισμών που έχουν δημιουργηθεί με την μορφή μάγματος. Ένα νησιωτικό τόξο που αποτελείται από ενεργά ηφαίστεια είναι το «Δαχτυλίδι της φωτιάς» στον Ειρηνικό ωκεανό.



***Εικόνα 4.3:** Υποθαλάσσια ηφαίστεια σε παγκόσμιο επίπεδο.
(Πηγή: Wikipedia, 2018)*



***Εικόνα 4.4:** Έκρηξη υποθαλάσσιου ηφαιστείου στο Νότιο Ειρηνικό ωκεανό κοντά στην ακτή του νησιού Tongatapu.
(Πηγή: www.dailymail.co.uk, 2009)*

4.4 Κατολισθήσεις

Με την έννοια των κατολισθήσεων εννοείται κάθε κίνηση μαζών του εδάφους που βρίσκονται υπό κλίση, όταν αυτή από σταθερή μεταβληθεί σε ασταθή, υπό την επίδραση της βαρύτητας. Πρόκειται για ένα φυσικό φαινόμενο που εμφανίζεται όταν οι δυνάμεις λόγω της βαρύτητας που δρουν σε έναν εδαφικό σχηματισμό υπερβαίνουν την αντοχή του υλικού από το οποίο αποτελείται. Οι αιτίες λόγω των οποίων ένας εδαφικός σχηματισμός έχει χαμηλή αντοχή μπορεί να προέρχονται από συνδυασμό μορφολογικών, γεωλογικών και περιβαλλοντικών συνθηκών, όμως οι εξωτερικές παρεμβάσεις κυρίως από ανθρώπινες δραστηριότητες μπορούν να επιταχύνουν και πιο σπάνια να προκαλέσουν την εκδήλωση του φαινομένου. Εάν τα υλικά της κατολίστησης κινηθούν κάθετα τότε το φαινόμενο ονομάζεται καθίζηση ενώ εάν η κίνησή τους είναι κατά την οριζόντια διεύθυνση, τότε επικρατεί ο γενικός όρος του φαινομένου, κατολίστηση. Οι κατολισθήσεις διακρίνονται σε χερσαίες και υποθαλάσσιες.

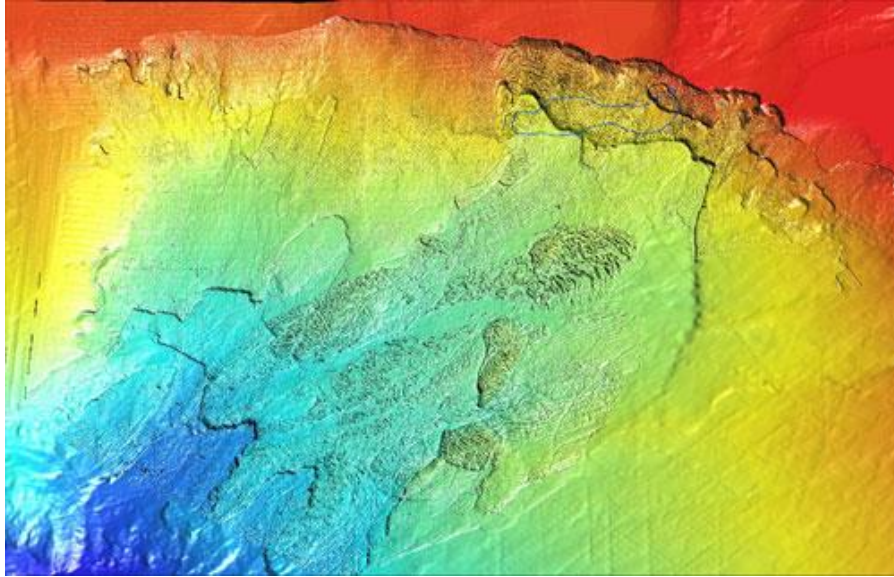
Οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις αποτελούν έναν γεωκίνδυνο άρρηκτα συνδεδεμένο με τον σεισμό. Η σεισμική δραστηριότητα αποτελεί τον κύριο παράγοντα πρόκλησης μιας υποθαλάσσιας κατολίστησης, καθώς αυξάνει την πίεση των εδαφικών πόρων οδηγώντας σε μείωση της διατμητικής αντοχής και σε ρευστοποίηση. Εκτός από τις σεισμικές δονήσεις, η ταχεία εναπόθεση υλικού οδηγεί με την σειρά της σε αδύναμα γεωλογικά στρώματα ενισχύοντας τον κίνδυνο της αστοχίας τους. Η τήξη των υδριτών αερίου που προκαλείται λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας στον πυθμένα της θάλασσας έχει ως αποτέλεσμα να ασκηθούν μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις στα υλικά εναπόθεσης που βρίσκονται στον θαλάσσιο βυθό, αυξάνοντας την πιθανότητα να αστοχήσουν. Το χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τις υποθαλάσσιες κατολισθήσεις από τις χερσαίες είναι ότι οι πρώτες εξαπλώνονται σε πολύ πιο μεγάλες αποστάσεις από ότι οι χερσαίες. Βασικός παράγοντας για την απόσταση που καλύπτουν τα ιζήματα που προέρχονται από την κατολίστηση είναι η πυκνότητά τους. Εάν πρόκειται για ρευστά ιζήματα, το αποτέλεσμα της κατολίστησης θα είναι να θάβονται, κάτω από αυτά, περιοχές του θαλάσσιου πυθμένα που απέχουν περισσότερο από 5 χιλιόμετρα από το φαινόμενο.

Οι κατολισθήσεις που εκδηλώνονται στο θαλάσσιο πυθμένα έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν καταστροφές σε διάφορους τομείς. Στον οικονομικό τομέα, μία υποθαλάσσια κατολίστηση αποτελεί μία από τις κύριες αιτίες για την καταστροφή των εξέδρων γεώτρησης ανοιχτής θαλάσσης που έχουν κατασκευαστεί και των υποθαλάσσιων καλωδίων και αγωγών που έχουν τοποθετηθεί στο βυθό της θάλασσας. Δεν είναι σπάνιο το γεγονός να προκληθεί τσουνάμι από μια υποβρύχια κατολίστηση. Βέβαια το μέγεθός τους δεν είναι ίδιο με εκείνο όσων δημιουργούνται από μία σεισμική δραστηριότητα, καθώς η περιοχή εκδήλωσης των κατολισθήσεων

έχει μικρές διαστάσεις και οι ποσότητες ενέργειας που απελευθερώνονται δεν είναι ίδιες με εκείνες που απελευθερώνονται κατά το φαινόμενο του σεισμού. Ωστόσο εάν η εκδήλωση της κατολίσθησης γίνει κοντά σε παράκτιες περιοχές τότε δεν είναι απίθανο οι επιπτώσεις από το τσουνάμι που ενδέχεται να δημιουργηθεί να είναι ζημιογόνες σε μεγάλο επίπεδο.



*Εικόνα 4.5: Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις Βόρεια των Βρετανικών Νήσων.
(Πηγή: British Geological Survey)*



*Εικόνα 4.6: Απεικόνιση του πυθμένα της θάλασσας για το πάνω μέρος της υποβρύχιας κατολίστησης «Storegga».
(Πηγή: British Geological Survey)*

4.5 Γεωκίνδυνοι στη Μεσόγειο θάλασσα

Όπως έχει προκύψει από τις αναφορές που έγιναν στην περιγραφή των βασικών γεωκινδύνων, η Μεσόγειος θάλασσα αποτελεί μια περιοχή με υψηλή σεισμική και ηφαιστειακή δραστηριότητα. Το γεγονός που καθιστά την περιοχή ευάλωτη στους γεωκινδύνους είναι ότι πρόκειται για ένα θαλάσσιο τμήμα στο οποίο αλληλεπιδρούν τρεις τεκτονικές πλάκες, κυρίως η Ευρασιατική με την Αφρικανική και δευτερευόντως η Αραβική με τις προηγούμενες δύο. Αναλυτικότερα, η καταβύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική οδήγησαν στον σημερινό σχηματισμό της Μεσογείου. Η αλληλεπίδραση της Αραβικής λιθοσφαιρικής πλάκας είναι υπεύθυνη για την ανατολική Μεσόγειο και τις παράκτιες περιοχές της. Η ιδιομορφία της περιοχής, ο αυξημένος πληθυσμός που βρίσκεται παράκτια της θάλασσας αλλά και οι γεωλογικές διεργασίες που έχουν δημιουργήσει ασταθή πρανή και ενεργά ρήγματα στις περιοχές αλληλεπίδρασης των τεκτονικών πλακών, καθιστά απαραίτητο να μελετηθεί η Μεσόγειος θάλασσας ξεχωριστά ως προς τους γεωκινδύνους.

4.5.1 Σεισμοί

Η σεισμική δραστηριότητα της Μεσογείου είναι ιδιαίτερα αυξημένη με αποτέλεσμα οι σεισμοί να αποτελούν ένα συχνό φαινόμενο της περιοχής. Οι άκαμπτες τεκτονικές πλάκες που αλληλεπιδρούν στην περιοχή βρίσκονται διαρκώς σε κίνηση. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και τις μετρήσεις που έχουν γίνει από τους ειδικούς, έχει προκύψει ότι οι δύο πλάκες κινούνται μεταξύ τους από 4 mm/y (χιλιοστά τον χρόνο) και η κίνησή τους μπορεί να φτάσει τα 10 mm/y. Η κίνηση αυτή χρονολογείται εκατομμυρίων χρόνων και επειδή η Ευρασιατική με την Αφρικανική πλάκα είναι συγκλίνουσες, η δημιουργία νησιωτικών τόξων οφείλεται σε αυτές. Στο χώρο της Μεσογείου έχουν σχηματιστεί νησιωτικά τόξα με έντονη σεισμική δραστηριότητα. Ένα από τα πιο γνωστά είναι το Ελληνικό τόξο που αποτελεί το όριο της επαφής των δύο λιθοσφαιρικών πλακών. Την λίστα με τα νησιωτικά τόξα μεγάλης σημασίας στον θαλάσσιο χώρο της Μεσογείου συμπληρώνει το τόξο της Καλαβρίας στην Ιταλία και το κυπριακό τόξο.

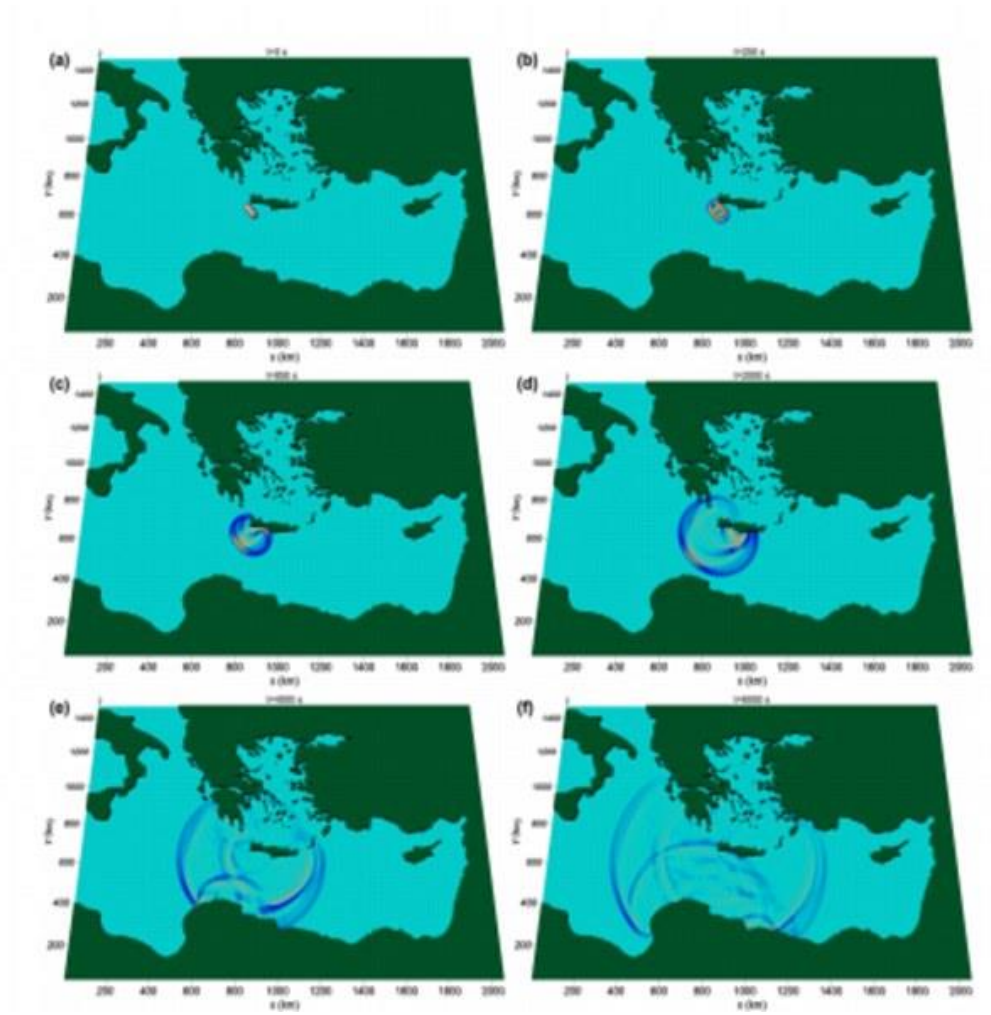
Σε μία θαλάσσια περιοχή με έντονη σεισμική δραστηριότητα δεν εκλείπει ο κίνδυνος για της δημιουργία ενός τσουνάμι ύστερα από τον σεισμό. Το γεγονός ότι η Μεσόγειος αποτελεί μια κλειστή λεκάνη αντίθετα με τους ωκεανούς μετριάξει τις πιθανότητες για τη δημιουργία θαλάσσιων φονικών κυμάτων μεγάλου ύψους. Όμως, λόγω του μικρού μεγέθους της λεκάνης, ένα θαλάσσιο κύμα που κινείται με μεγάλη ταχύτητα είναι ικανό να τη διασχίσει μέσα σε λίγες ώρες.

Σε μία αναφορά της, η αγγλική ιστοσελίδα «www.dailymail.co.uk» δημοσίευσε τον Αύγουστο του 2015 τα αποτελέσματα από μία μελέτη που έγινε από το πανεπιστήμιο της Μπολόνια στην Ιταλία, βασισμένη σε προσομοιώσεις με δεδομένα το βάθος της θάλασσας, την τοπογραφία και την ακτογραμμή. Το σενάριο ξεκινούσε με έναν σεισμό Νοτιοδυτικά της Κρήτης και ολοκληρωνόταν με τους χρόνους και τις περιοχές που θα έπλητταν τα θαλάσσια κύματα που θα δημιουργούνταν από το σεισμό.

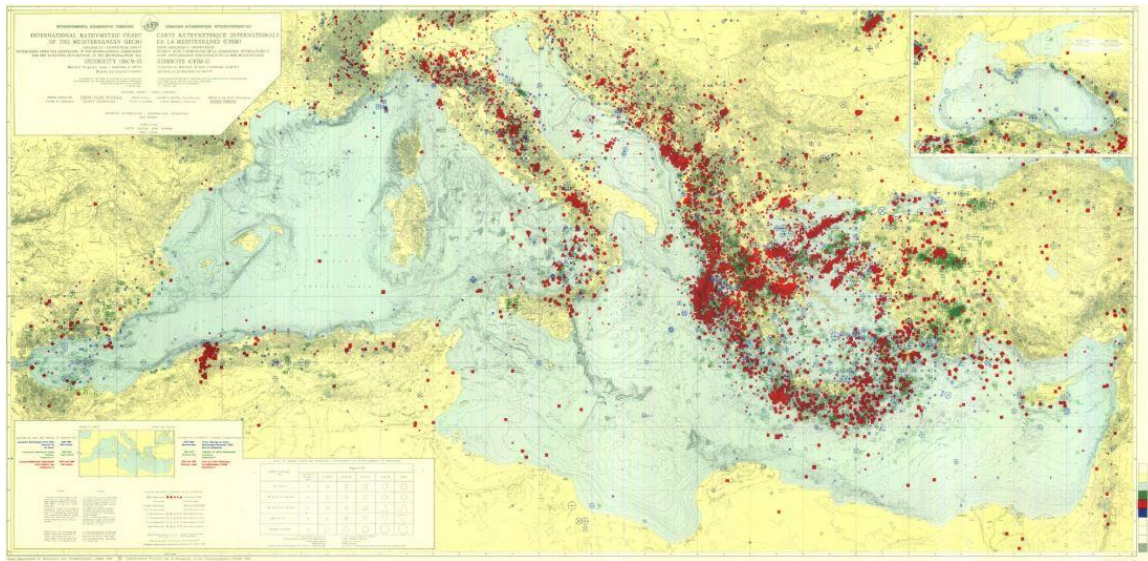
Οι σεισμοί που έχουν γίνει στην Μεσόγειο θάλασσα έχουν πλήξει τις παραθαλάσσιες περιοχές της όπως την νότια Ελλάδα, την Κρήτη, την Σικελία, την Κύπρο, την βόρεια Λιβύη, την Ιβηρική χερσόνησο και την βόρεια Αλγερία. Οι πιο χαρακτηριστικοί σεισμοί του 20^{ου} αιώνα ήταν το 1903 στα Κύθηρα με μέγεθος 8.2 της κλίμακας ρίχτερ και το 1926 στη Ρόδο με μέγεθος 7.8 ρίχτερ.

Οι χώρες που έχουν πληγεί περισσότερο κατά το πέρασμα των χρόνων από τα τσουνάμι είναι κυρίως η Ελλάδα και η Ιταλία. Το πιο γνωστό τσουνάμι που έπληξε την χώρα μας κατά τη σύγχρονη ιστορία της, είναι το τσουνάμι της Αμοργού το

1956. Οι ζημιές που προκάλεσε στα παράκτια σπίτια της Αμοργού και της Αστυπάλαιας ήταν μεγάλες, καθώς επίσης στοίχησε τη ζωή 53 ανθρώπων.



*Εικόνα 4.7: Οι επιπτώσεις ενός σεισμού Νοτιοδυτικά της Κρήτης. Η σταδιακή δημιουργία και πορεία των θαλάσσιων κυμάτων που προκλήθηκαν.
(Πηγή: Samaras et al., 2015)*



Εικόνα 4.8: Σεισμικότητα Μεσογείου θάλασσας.
(Πηγή: www.ngdc.noaa.gov)



Εικόνα 4.9: Περιοχές της Μεσογείου θάλασσας που κινδυνεύουν από τσουνάμι διαβαθμισμένες από χαμηλό μέχρι πολύ υψηλό κίνδυνο.
(Πηγή: Papadopoulos and Fokaefs, 2007)

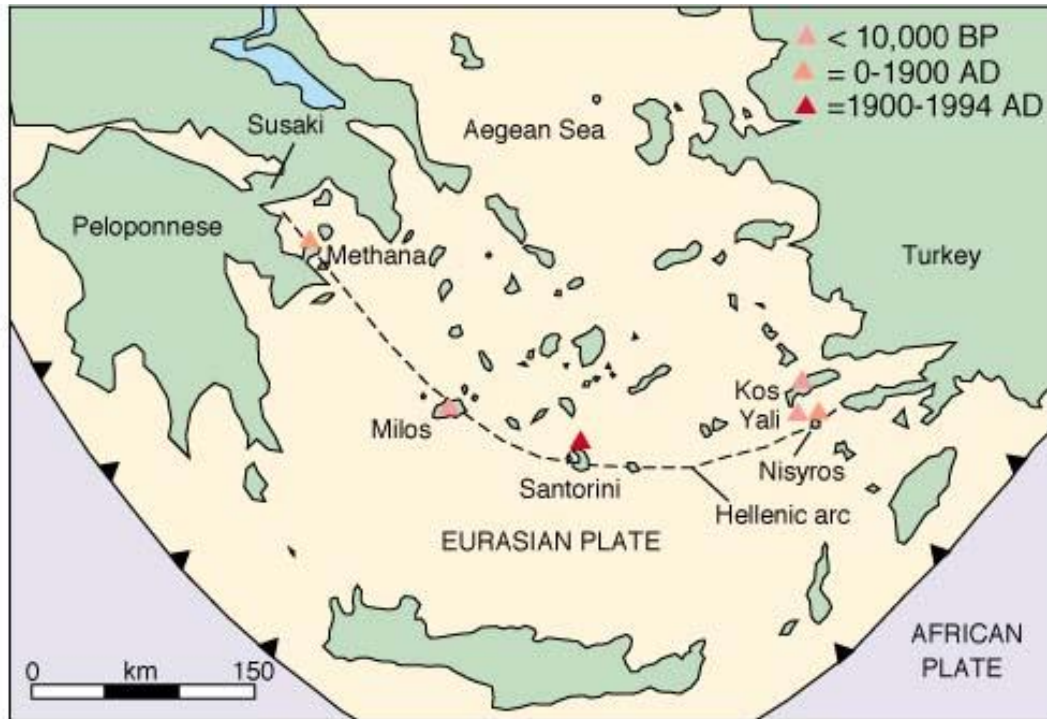
4.5.2 Ηφαιστεια

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα συναντάται στη θαλάσσια περιοχή της Μεσογείου εδώ και εκατομμύρια χρόνια. Οι παράγοντες που ευνόησαν την ανάπτυξή της είναι οι ίδιοι με τους παράγοντες που ανέπτυξαν την σεισμική δραστηριότητα. Οι συγκλίνουσες τεκτονικές πλάκες οδήγησαν στον σχηματισμό ηφαιστειακών τόξων που αποτελούνται από νησιά με ηφαιστειακή δραστηριότητα. Τα δύο πιο σημαντικά τόξα που έχουν σχηματιστεί είναι το Τόξο του Αιόλου στο Τυρρηνικό πέλαγος και το Ελληνικό Ηφαιστειακό Τόξο στο Αιγαίο Πέλαγος.

Το Τόξο του Αιόλου αποτελεί μέρος ενός μεγαλύτερου τόξου που ξεκινάει από τον Βεζούβιο και καταλήγει στην Αίτνα. Οι Αιολήδες Νήσοι είναι ένα σύμπλεγμα οκτώ μικρών νησιών και αρκετών βραχονησίδων που απλώνονται στο νότιο Τυρρηνικό πέλαγος και αποτελούν τις κορυφές της οροσειράς του ηφαιστειακού τόξου που έχει σχηματιστεί. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα που έχει εκδηλωθεί κατά τους πιο πρόσφατους ιστορικούς χρόνους περιορίζεται σε τρία νησιά, στο Στρόμπολι (Stromboli), στο Βουλκάνο και στο Λιπάρι. Αξίζει να αναφερθεί πως το ηφαίστειο στο Στρόμπολι είναι ενεργό ακόμα και σήμερα ενώ τα άλλα δύο σημείωσαν την τελευταία τους έκρηξη το 1890 και τον μεσαίωνα αντίστοιχα.

Στο νότιο Αιγαίο πέλαγος έχει σχηματιστεί λόγω της βύθισης της αφρικανικής τεκτονικής πλάκας κάτω από την ηπειρωτική του Αιγαίου, ένα ηφαιστειακό τόξο γνωστό ως Ελληνικό Ηφαιστειακό Τόξο. Πρόκειται για μια αλυσίδα νησιών που περιλαμβάνουν ενεργά ή ανενεργά ηφαίστεια. Αναλυτικότερα το τόξο απαρτίζουν η Αίγινα, ο Πόρος, τα Μέθανα, η Μήλος, η Σαντορίνη, το Κολούμπο, η Νίσυρος και η Κως. Από τα προαναφερθέντα μόνο τα ηφαίστεια της Σαντορίνης, του Κολούμπο και της Νισύρου είχαν μία ηφαιστειακή δραστηριότητα κατά τα τελευταία 100 χρόνια.

Το ηφαίστειο της Σαντορίνης αποτελεί τη πιο γνωστή ηφαιστειακή δραστηριότητα στον Ελλαδικό χώρο που έχει καταγραφεί στην ιστορία. Η πιο πρόσφατη και πιο γνωστή έκρηξη του ηφαιστείου έγινε τον 17^ο αιώνα π.Χ. και το τσουνάμι που δημιουργήθηκε έφτασε μέχρι τις ακτές της Κρήτης και σύμφωνα με τους αρχαιολόγους θεωρείται ως ο κύριος λόγος για την παρακμή του Μινωικού πολιτισμού. Όμως σημαντική είναι η αναφορά του υποθαλάσσιου ενεργού ηφαιστείου Κολούμπο, που βρίσκεται βορειοανατολικά της Σαντορίνης σε απόσταση λίγων χιλιομέτρων. Ο κρατήρας του ηφαιστείου βρίσκεται σε βάθος 512 μέτρων ενώ η δραστηριότητά του περιορίστηκε κοντά στο 1650. Ωστόσο, η μεγάλη θερμοκρασία που έχει το νερό το οποίο αναβλύζει σε έκταση γύρω από το ηφαίστειο, ίσως να αποτελεί στοιχείο για την σημερινή του ενεργή κατάσταση.



Εικόνα 4.10: Το Ελληνικό Ηφαιστειακό Τόξο.
(Πηγή: Newhall and Dzurisin, 1988)

4.5.3 Κατολισθήσεις

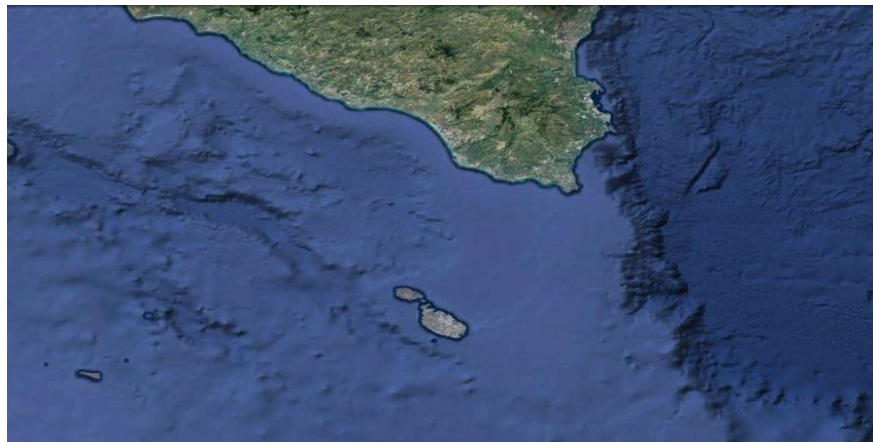
Η περιοχή της Μεσογείου αποτελεί μία ευάλωτη περιοχή ως προς την εκδήλωση φαινομένων όπως οι κατολισθήσεις. Οι παράγοντες που ενισχύουν τις υποθαλάσσιες κατολισθήσεις στη Μεσόγειο θάλασσα δεν περιορίζονται μόνο στους παράγοντες που έχουν αναλυθεί και αποτελούν αιτίες υποθαλάσσιων κατολισθήσεων σε κάθε θαλάσσιο πυθμένα.

Ο χώρος της Μεσογείου είναι ιδιαίτερα ιδιόμορφος από πολλές απόψεις. Αρχικά, τα νερά της έχουν υψηλότερη θερμοκρασία από εκείνη που έχουν τα νερά των ωκεανών, με αποτέλεσμα να ασκούνται μεγαλύτερες διατμητικές τάξεις στα ιζηματογενή υλικά απόθεσης του θαλάσσιου βυθού, λόγω της ταχείας τήξης των υδριτών αερίου. Έπειτα, ο βυθός της Μεσογείου θάλασσας και συγκεκριμένα της Νοτιοανατολικής Μεσογείου καλύπτεται από μεγάλες ποσότητες ιζημάτων που προέρχονται από τα φερτά υλικά του Νείλου ποταμού, για χιλιάδες χρόνια. Αποτέλεσμα της προηγούμενης διαδικασίας είναι μία έκταση αρκετών τετραγωνικών χιλιομέτρων που εκτείνεται σχεδόν σε όλη τη Νοτιοανατολική Μεσόγειο θάλασσα να έχει καλυφθεί από ιζήματα, τα οποία δεν είναι σταθερά και κινδυνεύουν να αστοχήσουν.

Ωστόσο και οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες ενισχύουν τον κίνδυνο για την αστοχία υποθαλάσσιων σχηματισμών με άμεσο αποτέλεσμα την πρόκληση κατολισθήσεων. Η αυξανόμενη χρήση του θαλάσσιου πυθμένα για εξορύξεις αλλά και για έργα μεταφοράς καυσίμων ή ηλεκτρικής ενέργειας δια μέσω αγωγών και καλωδίων, ενισχύει την αστάθεια του βυθού με κίνδυνο την πρόωρη εμφάνιση φυσικών φαινομένων όπως οι κατολισθήσεις.

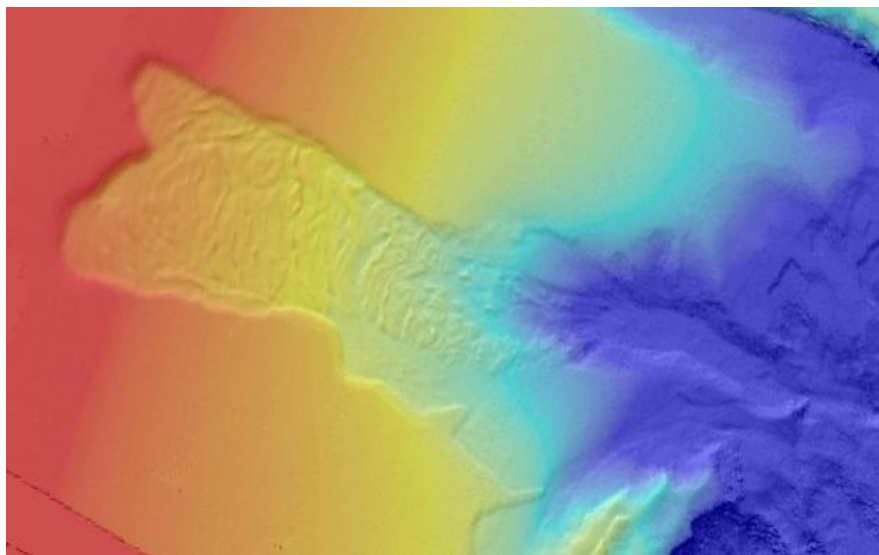
Στους ωκεανούς, λόγω της τεράστιας υδάτινης επιφάνειάς τους, η έκταση των καταστροφών από τα φυσικά φαινόμενα και συγκεκριμένα των κατολισθήσεων είναι μεγάλη. Το γεγονός ότι η Μεσόγειος αποτελεί μία κλειστή θάλασσα με δύο μόνο εξόδους, περιορίζει τη δημιουργία κατολισθήσεων και τις επιπτώσεις μετά από το τέλος του φαινομένου. Οι περισσότερες υποβρύχιες κατολισθήσεις είναι μετρίου μεγέθους, με περιοχές που δεν υπερβαίνουν τα 100 m² (τετραγωνικά μέτρα) αλλά και ο όγκος των υλικών των σχηματισμών που έχουν αστοχήσει και μεταφέρονται μέσω της βαρύτητας και των θαλάσσιων ρευμάτων δεν υπερβαίνει τα 50 m³ (κυβικά μέτρα).

Η πιο γνωστή υποθαλάσσια κατολίσθηση που έχει καταγραφεί βρίσκεται στα Βορειοανατολικά του Marsaxlokk, μια περιοχή Νότια της Μάλτας. Η κατολίσθηση αποτελεί μέρος ενός συνόλου που αποτελείται από 67 υποβρύχιες κατολισθήσεις που φτάνουν σε μήκος τα 18 χιλιόμετρα και σε έκταση περίπου τα 370 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Οι ασυνέχειες που έχουν σχηματιστεί φτάνουν το ύψος των 50 μέτρων. Η μελέτη πάνω στις κατολισθήσεις της Μάλτας έγινε από τον καθηγητή θαλάσσιας γεωλογίας Aaron Micalef, του τμήματος Φυσικής του πανεπιστημίου της Μάλτας. Για την υλοποίηση της μελέτης στο βυθό της Μεσογείου χρησιμοποιήθηκε τεχνολογικά προηγμένος εξοπλισμός.



Εικόνα 4.11: Γενική άποψη της περιοχής των κατολισθήσεων στη Μάλτα.

(Πηγή: Google Earth)



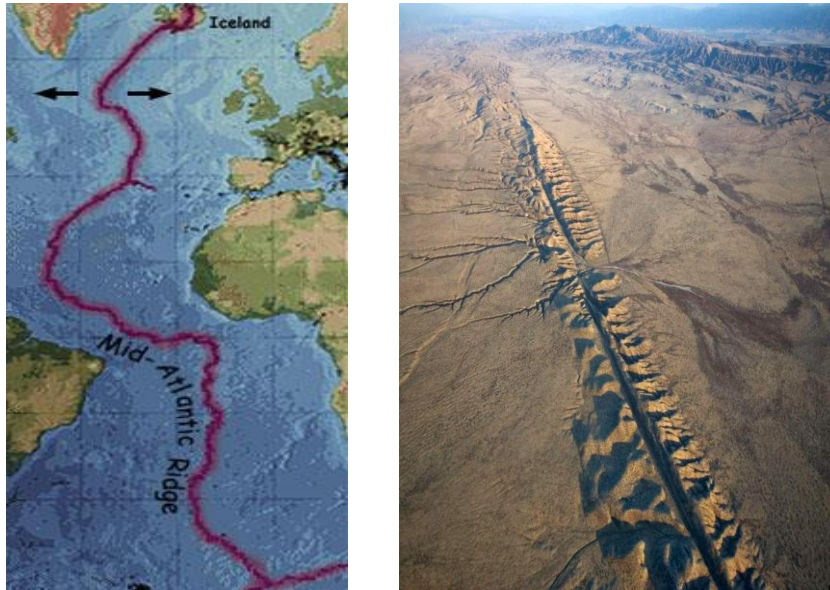
*Εικόνα 4.12: Υποθαλάσσια κατολίσθηση βορειοανατολικά της Μάλτας.
(Πηγή: www.timesofmalta.com)*

4.6 Ρήγματα

4.6.1 Ορισμός

Ο γεωφυσικός Harry Fielding Reid ορμώμενος από το σεισμό που έγινε στο Σαν Φρανσίσκο το 1906 ασχολήθηκε με την σεισμολογία και ανέπτυξε την θεωρία ελαστικής ανάκαμψης ή θεωρία του Reid το 1910, βασικό πυλώνα για τη μετέπειτα μελέτη των σεισμικών κινήσεων. Σύμφωνα με τη θεωρία, τα πετρώματα υπόκεινται σε συνεχή ελαστική παραμόρφωση εξαιτίας της συσσώρευσης μεγάλης ποσότητας δυναμικής ενέργειας, της ενέργειας ελαστικής παραμόρφωσης. Η ελαστική παραμόρφωση των πετρωμάτων αποτελεί την κύρια αιτία για τη δημιουργία ενός επιφανειακού ρήγματος. Οι τάσεις που έχουν ήδη αναπτυχθεί, όταν ξεπεράσουν τα όρια αντοχής των πετρωμάτων, σημειώνουν θραύση με αποτέλεσμα το σχηματισμό δύο τεμαχών που κινούνται σε καθορισμένες διευθύνσεις. Η επιφάνεια πάνω στην οποία γίνεται η μετακίνηση ονομάζεται ρήγμα και χαρακτηρίζεται από οριζόντια ολίσθηση, ενώ οι δύο πλευρές του ρήγματος ονομάζονται ρηξιτεμάχη. Τα ρήγματα αποτελούν τεκτονικές δομές και συνήθως εντοπίζονται στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, αποτελώντας ανωμαλίες και ασυνέχειες των κατά τα άλλα συνεχών πετρωμάτων. Τα επιφανειακά ίχνη των ρηγμάτων που βρίσκονται στο χερσαίο έδαφος εντοπίζονται και μελετώνται πιο εύκολα, καθώς τα ίχνη των υποθαλάσσιων

ρηγμάτων που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, είναι δυσκολότερο καταρχήν να εντοπιστούν και εν συνεχεία να μελετηθούν.



*Εικόνα 4.13: Αριστερά: Μεσω - Ατλαντική ράχη (Mid-Atlantic Ridge).
Δεξιά: Αεροφωτογραφία του επιφανειακού ίχνους του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα στην
Καλιφόρνια
(Πηγή: www.marinebio.net & www.geologyin.com)*

4.6.2 Κατηγορίες ρηγμάτων

Το πιο γνωστό χαρακτηριστικό ενός ρήγματος είναι ότι αμέσως μετά την διάρρηξή του σχηματίζονται δύο τεμάχια που κινούνται μεταξύ τους. Το τεμάχιο που υπέρκειται ονομάζεται υπερκείμενο τεμάχιο ή οροφή του ρήγματος (hanging wall) ενώ το τεμάχιο που υπόκειται ονομάζεται υποκείμενο τεμάχιο ή δάπεδο του ρήγματος (foot wall). Επομένως, με βάση τα κινηματικά χαρακτηριστικά των ρηξιτεμαχίων, δηλαδή τη διεύθυνση και τη φορά της κίνησης, τα ρήγματα διακρίνονται σε:

- **Κανονικά ή ορθά ρήγματα (Normal faults)**

Η οροφή του ρήγματος, δηλαδή το υπερκείμενο τεμάχιο, έχει κατέλθει σε σχέση με το δάπεδο του ρήγματος, το υποκείμενο τεμάχιο. Δηλαδή τα δύο τεμάχια έχουν αποκλίνουσα συμπεριφορά, καθώς απομακρύνονται το ένα από το άλλο. Η

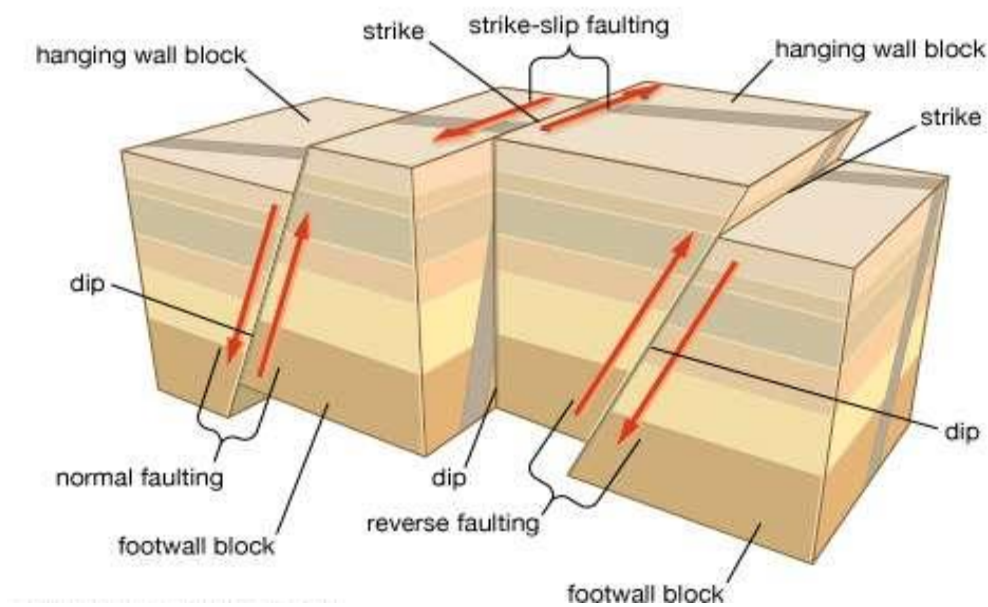
δημιουργία τους οφείλεται στις εφελκυστικές δυνάμεις που ασκούνται με την κατακόρυφη συνιστώσα να υπερτερεί ή στην βαρύτητα με αποτέλεσμα τα κανονικά ρήγματα να είναι κεκλιμένα ή κατακόρυφα. Αντιθέτως με την ονομασία των συγκεκριμένων ρηγμάτων, δεν συναντώνται πολύ συχνά.

- **Ανάστροφα ρήγματα (Reverse faults)**

Στη συγκεκριμένη κατηγορία ρηγμάτων συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο με τα κανονικά ή ορθά ρήγματα. Το υπερκείμενο τέμαχος ανυψώνεται σε σχέση με το υποκείμενο τέμαχος. Ο σχηματισμός των συγκεκριμένων ρηγμάτων είναι αποτέλεσμα διατμητικών τάσεων που έχουν αναπτυχθεί, στις οποίες υπερτερούν η οριζόντιες συνιστώσες. Εν αντιθέσει με την προηγούμενη κατηγορία, η οροφή και το δάπεδο του ρήγματος έχουν συγκλίνουσα συμπεριφορά και μάλιστα το υπερκείμενο τέμαχος κινείται αντίστροφα προς τη γωνία κλίσης του επιπέδου του ρήγματος. Η γωνία κλίσης κυμαίνεται από 45° έως 90° (μοίρες) κατά την οποία τα ρήγματα ονομάζονται ανάστροφα, ενώ για γωνία κλίσης από 0° έως 45° τα ρήγματα ονομάζονται επιππεύσεις.

- **Ρήγματα ολίσθησης κατά παράταξη ή οριζοντιολισθητικά ρήγματα (Strike – slip faults)**

Τα οριζοντιολισθητικά ρήγματα σχηματίζονται από την παράλληλη μετατόπιση των τεμαχών τους ως προς την ρηξιγενή επιφάνεια. Τα ρήγματα σε αυτή την κατηγορία τα ρήγματα δεν έχουν ούτε αποκλίνουσα ούτε συγκλίνουσα συμπεριφορά, επομένως ο γεωλογικός σχηματισμός διατηρείται και μετά τη διάρρηξή τους. Μία επιμέρους κατηγοριοποίηση των ρηγμάτων ολίσθησης κατά παράταξης είναι εκείνη των αριστερόστροφων (left lateral ή sinistral) και των δεξιόστροφων (right-lateral ή dextral) ρηγμάτων. Θεωρώντας το ένα τέμαχος σταθερό, στα αριστερόστροφα ρήγματα, το έτερο τέμαχος θα έχει μετατοπιστεί προς τα αριστερά. Αντίστοιχα ορίζονται και τα δεξιόστροφα ρήγματα. Η συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνει τα ρήγματα που συνδέονται με σεισμούς πολύ μεγάλου μεγέθους. Το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα στην Καλιφόρνια είναι ένα ρήγμα ολίσθησης κατά παράταξη.



*Σχήμα 4.2: Κατηγοριοποίηση ρηγμάτων ανάλογα με τις κινήσεις των ρηξιτεμαχών.
(Πηγή: www.britannica.com)*

Ύστερα από την μελέτη των ρηγμάτων από γεωλογική, γεωφυσική, ιστορική και σεισμολογική άποψη, το 1978 ο Ambraseys ταξινόμησε τα ρήγματα σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες, αυτές των ενεργών, των πιθανά ενεργών, των ρηγμάτων με άγνωστη δραστηριότητα και των αδρανών ή ανενεργών ρηγμάτων.

Αναλυτικότερα,

- **Ενεργά ρήγματα**

Τα ρήγματα όπου η παρουσία τους είναι συνδεδεμένη με ισχυρούς σεισμούς κατά το σύγχρονο ή ιστορικό παρελθόν. Σύνηθες χαρακτηριστικό των ενεργών ρηγμάτων είναι ότι τα ρηξιτεμάχη που το αποτελούν βρίσκονται διαρκώς σε μικρή αλλά συνεχή κίνηση.

- **Πιθανά ενεργά ρήγματα**

Τα πιθανά ενεργά ρήγματα δεν έχουν τόσο μεγάλη συσχέτιση με ισχυρούς σεισμούς παρά μόνο με ορισμένους μικρότερου μεγέθους. Δεν υπάρχουν πληροφορίες για τη δραστηριοποίησή τους από τους ιστορικούς χρόνους μέχρι την σύγχρονη ιστορία.

- **Αδρανή ή άγνωστης δραστηριότητας ρήγματα**

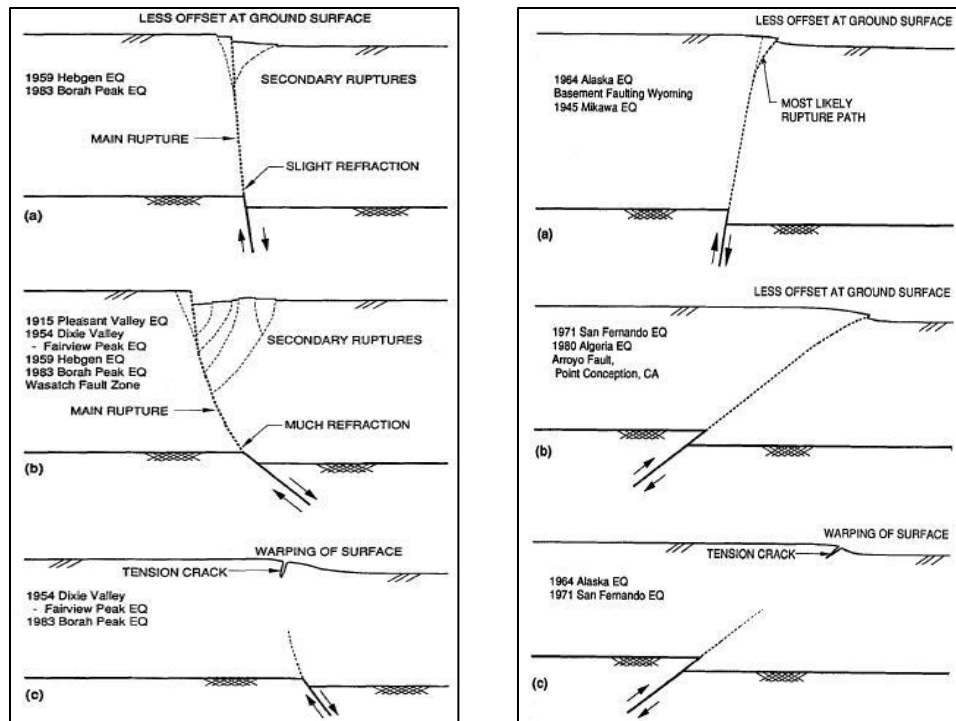
Τα ρήγματα που δεν ικανοποιούν αξιόπιστα καμία από τις διαφορετικές σκοπιές που αναλύθηκαν και έχουν αναφερθεί παραπάνω, κατατάσσονται στην κατηγορία των ρηγμάτων με άγνωστη δραστηριότητα. Ωστόσο, τα ρήγματα που είχαν κάποιου είδους δραστηριότητα στο παρελθόν αλλά ύστερα από την μελέτη τους δεν προκύπτει κάποια ένδειξη για επαναδραστηριοποίησή τους, χαρακτηρίζονται «αδρανή» ή «ανενεργά».

4.6.3 Διάρρηξη ρηγμάτων

Οι μετατοπίσεις του εδάφους που παράγονται κατά τη διάρρηξη ενός ρήγματος διακρίνονται σε δύο τύπους, τη μόνιμη οιονεί – στατική μετατόπιση, που υφίσταται το ρήγμα και τις παροδικές δυναμικές ταλαντώσεις που συμβαίνουν μακριά από αυτό. (Ambraseys & Jackson 1984). Ο σεισμός αποτελεί έναν γεωκίνδυνο ο οποίος δεν μπορεί να προβλεφθεί, ώστε να υπάρξει η κατάλληλη πρόληψη και ο περιορισμός των ενδεχόμενων επιπτώσεων που μπορεί να προκαλέσει σε ένα συμβάν. Εξίσου και για τα σεισμικά ρήγματα είναι δύσκολο να γίνει πρόβλεψη της θέσης τους και του μεγέθους της ρήξης της επιφάνειας που πιθανότατα να προκαλέσει η δράση τους στα πετρώματα. Η συμπεριφορά των ρηγμάτων και πιο συγκεκριμένα οι διαδρομές που ακολουθούν κατά μήκος της ζώνης διάτμησης δεν είναι συνεχείς και προκαθορισμένες με αποτέλεσμα η πρόβλεψη της τοποθεσίας της επιφάνειας στο σημείο που θα δημιουργηθεί το ρήγμα να είναι δύσκολο έργο, παρά τις όποιες προσπάθειες έχουν γίνει με τη δημιουργία χαρτών μεγάλης κλίμακας για την απεικόνιση των ρηγμάτων.

Μελετώντας περιστατικά του παρελθόντος έχουν κατασκευαστεί διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν μερικά τυπικά χαρακτηριστικά τα οποία περιλαμβάνονται στη διάρρηξη ενός σεισμικού ρήγματος. Σύμφωνα με τους Bray et al. (1994) οι πιο σημαντικές μεταβλητές για την περιγραφή των χαρακτηριστικών αυτών είναι:

- Το είδος της κίνησης του ρήγματος.
- Η κλίση του επιπέδου του ρήγματος.
- Η φύση του υπερκείμενου κοιτάσματος του εδάφους.



Σχήμα 4.3: Διαδρομή κανονικού (Σχήμα αριστερά) και ανάστροφου (Σχήμα δεξιά) ρήγματος μέσω του εδάφους *a)* Δύσκαμπτο επίπεδο, απότομο βάθος. *b)* Δύσκαμπτο επίπεδο, ρηχό βάθος. *c)* Όλκιμο επίπεδο. (Πηγή: Bray et al., 1994).

Στα κανονικά ρήγματα όπως έχει ήδη γίνει περιγραφή, το υπερκείμενο έδαφος δέχεται το μεγαλύτερο μέρος των παραμορφώσεων καθώς εκείνο έχει κατέλθει. Αντιθέτως, το υποκείμενο τέμαχος παραμένει άθικτο. Κατά τη διάρκεια διάδοσης της ρήξης προς την επιφάνεια, η διάθλαση στη διαχωριστική επιφάνεια του εδάφους - υποβάθρου κάμπτεται άνωθεν του υπερκείμενου τεμάχους με αποτέλεσμα να αυξάνεται περαιτέρω το βάθος. Σε ένα όλκιμο περιβάλλον η παραμόρφωση τείνει να εξαπλωθεί σε μεγαλύτερες ζώνες (Kramer, 1996). Εν αντιθέσει με τα ανάστροφα ρήγματα, τα οποία τείνουν να κάμπτουν το υποκείμενο τέμαχος ενώ μεταδίδονται προς την επιφάνεια, με αποτέλεσμα το βάθος σε αυτή την περίπτωση να μειώνεται.

4.6.4 Διάδοση ρηγμάτων διαμέσου εδαφικού επιφανειακού στρώματος

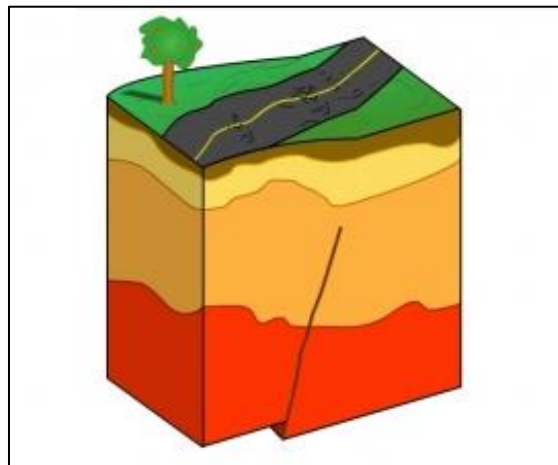
Η διάδοση των ρηγμάτων σε επιφανειακές εδαφικές στρώσεις αποτελεί μία δύσκολη προς μελέτη διαδικασία καθώς η ανομοιογένεια και η ανισοτροπία του εδάφους είναι ιδιαίτερα έντονη. Οι διαστρώσεις των αποθέσεων χαλαρών αλλά και αρκετά πυκνών υλικών αλλοιώνουν τη μορφή διάρρηξης του ρήγματος. Σύνηθες είναι το φαινόμενο κατά της εκδήλωσης ενός σεισμού γύρω από το ίχνος του ρήγματος να εντοπίζονται ασυνέχειες άλλες σε μικρότερες και άλλες σε μεγαλύτερες αποστάσεις, εντός μίας

ζώνης διάτμησης. Οι βασικότεροι παράμετροι που ευθύνονται για τη πολυπλοκότητα της διάδοσης των ρηγμάτων μέσω εδαφικών στρώσεων είναι οι ακόλουθοι:

- Τύπος του ρήγματος (κανονικό, ανάστροφο, οριζόντιας ολίσθησης).
- Κλίση του ρήγματος.
- Βάθος και γεωμετρία εδαφικής στρώσης.
- Ιδιότητες υπερκείμενων υλικών εδάφους.
- Μέγεθος μετατόπισης.
- Πλάτος ζώνης παραμόρφωσης.

Σε συνδυασμό με την κατηγοριοποίηση των ρηγμάτων που έχει προηγηθεί, τα ενεργά ρήγματα κατά τη διαδικασία κατασκευής τεχνικών έργων όπως φραγμάτων ή αγωγών μεταφοράς ενέργειας, μελετώνται εκτεταμένα ως προς τον ρυθμό μετακίνησής τους σήμερα ή τα τελευταία 104 ή 107 έτη. Στη συνέχεια, γίνεται εκτίμηση της πιθανότητας μετακίνησής τους τα επόμενα 50 ή 100 έτη ανάλογα με τον χρονικό ορίζοντα ζωής του έργου που πρόκειται να κατασκευαστεί (Scott, 1987).

Η αστοχία εντός του εδαφικού στρώματος επιφέρει τη διάδοση μετατοπίσεων οι οποίες πραγματοποιούνται καθ' ύψος εμφανιζόμενες στην επιφάνεια του εδάφους με τη μορφή αναβαθμού ή ενός συνόλου μικρορωγμών στο ανάγλυφο. Ωστόσο, υπάρχει και η πιθανότητα η επιφάνεια θραύσεως να μη διαδίδεται μέχρι την επιφάνεια του εδάφους με αποτέλεσμα να μην είναι ορατή. Στη περίπτωση αυτή, μία από τις θεωρήσεις επικεντρώνεται στην ύπαρξη ενός «τυφλού ρήγματος κατά το οποίο το ρήγμα αν και ενεργό δεν επιφέρει παραμόρφωση του υποβάθρου έως την επιφάνεια.

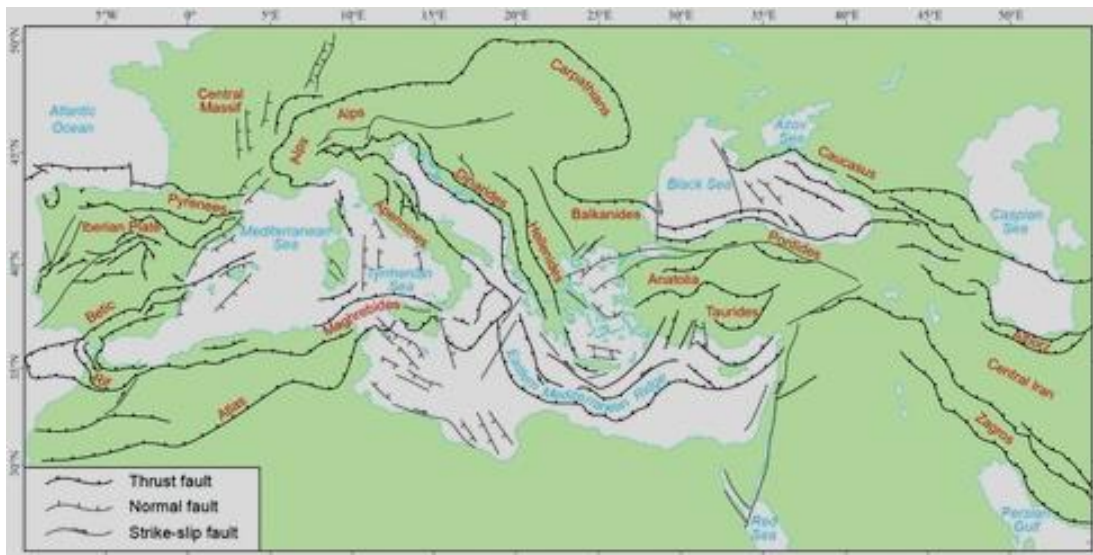


Εικόνα 4.14: Αναπαράσταση «Τυφλού» ρήγματος.
(Πηγή: www.earthquake.usgs.gov)

Τέλος, ένα ενδεδειγμένος τρόπος περιγραφής, μελέτης και αντιμετώπισης προβλημάτων που αφορούν τη διάρρηξη και τη διάδοση σεισμικών ρηγμάτων με την ύπαρξη ή μη εδαφικών στρώσεων, είναι η χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Η αρχή έγινε από τους Duncan & Lefebvre το 1973, που τα χρησιμοποίησαν για να προσδιορίσουν και να υπολογίσουν τις τάσεις που δεχόταν μία κατασκευής πλησίον ενός ρήγματος. Σταδιακά ο συγκεκριμένος τρόπος μελέτης των εν λόγω ασυνεχειών διευρυνόταν και εξελίσσονταν για διάφορες περιπτώσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μελέτη των Bray et al. το 1994 πάνω στη διάδοση ενός ρήγματος σε συνεκτικά υλικά.

4.6.5 Ρήγματα στη Μεσόγειο θάλασσα

Η Μεσόγειος όπως εκτενώς έχει ήδη περιγραφεί, βρίσκεται στο σημείο αλληλεπίδρασης τριών τεκτονικών πλακών, της Ευρασιατικής, της Αφρικανικής και της Αραβικής, με αποτέλεσμα να έχουν δημιουργηθεί αρκετά ρήγματα κατά το πέρασμα των χρόνων στα σημεία σύγκλισης και απόκλισής τους. Όπως φαίνεται και στον χάρτη που ακολουθεί όλη η Μεσόγειος θάλασσα διατρέχεται από ρήγματα, είτε ανάστροφα, είτε κανονικά, είτε από ρήγματα ολίσθησης κατά παράταξη.



Εικόνα 4.15: Ρήγματα Μεσογείου θάλασσας.

(Πηγή: Festa et al., 2016)

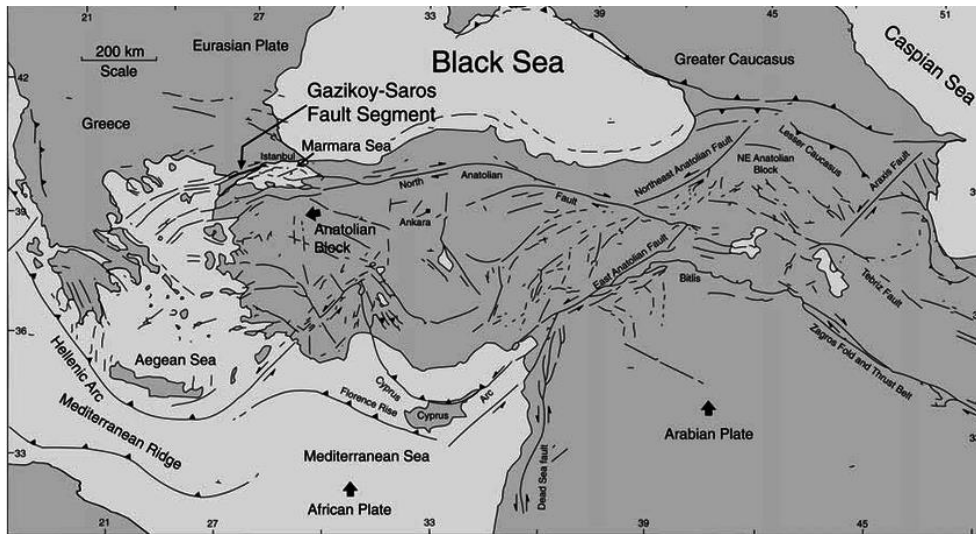
Ωστόσο, περισσότερο έντονη είναι η ύπαρξη τεκτονικών φαινομένων στη Νοτιοανατολική Μεσόγειο, ιδιαίτερα μεταξύ των χωρών Ελλάδας – Κύπρου –

Τουρκίας. Πρόκειται για το σημείο όπου συγκλίνει η Αφρικανική λιθοσφαιρική πλάκα και βυθίζεται κάτω από την Ευρασιατική με αποτέλεσμα τη δημιουργία σεισμικών αναστροφών ρηγμάτων. Νότια της Κρήτης, εντοπίζονται πολύ σημαντικά ρήγματα και γενικότερα γεωλογικές ασυνέχειες τόσο για τον Ελληνικό χώρο αλλά και για ολόκληρη τη Μεσόγειο. Πιο συγκεκριμένα, το Ελληνικό τόξο που εκτείνεται στο Ιόνιο Πέλαγος και αποτελείται από μία θαλάσσια τάφρο, την Ελληνική τάφρο που το μέγιστο βάθος φτάνει τα 5300 μέτρα (5267m) και από το Ηφαιστειακό Τόξο του Νοτίου Αιγαίου. Ιδιαίτερη σημαντικότητα διαθέτει και η υποθαλάσσια κορυφογραμμή «East Mediterranean Ridge» που βρίσκεται Νότια του Ελληνικού Τόξου. Δημιουργήθηκε από τη σύγκλιση των δύο τεκτονικών πλακών και διασχίζει όλο το Νότιο τμήμα της Μεσογείου από την Ιταλία μέχρι την Τουρκία. Η ύπαρξη της συγκεκριμένης ζώνης αποτελεί σημαντικό γεωκίνδυνο στην περιοχή καθώς αποτελεί επίκεντρο πολλών σεισμών που έχουν εκδηλωθεί.



Εικόνα 4.16: Ελληνικό τόξο & East Mediterranean Ridge.
(Πηγή: Taymaz et al., 1991 & www.oceanexplorer.noaa.gov)

Επίσης ένα από τα πιο γνωστά ρήγματα τα οποία σχετίζονται με σεισμούς μεγάλου μεγέθους είναι το ρήγμα της Ανατολίας, Βορειοανατολικά της Μεσογείου αποτελώντας ένα δίκτυο μικρότερων ρηγμάτων που φτάνουν συνολικό μήκος περίπου τα 350 χιλιόμετρα. Τέλος, στην περιοχή της Κύπρου εντοπίζεται η γωνία Isparta που συνδέει την περιοχή με το Ελληνικό τόξο αλλά και το τόξο της Κύπρου, στα Βόρεια της νήσου το οποίο συνδέεται με τα ρήγματα που εντοπίζονται στην Τουρκία.



*Εικόνα 4.17: Ρήγματα Ανατολικής Μεσογείου.
(Πηγή: Barka, 1992)*

5. Ανάπτυξη υπολογιστικού εργαλείου

5.1 Εισαγωγή

Για την κατασκευή ενός υποθαλάσσιου έργου μεγάλου μήκους απαιτείται η συνεργασία πολλών επιστημονικών κλάδων όπου ο κάθε ένας ελέγχει και διαχειρίζεται το έργο σε ξεχωριστά στάδια και από διαφορετική οπτική γωνία. Δεν είναι τυχαίο το γεγονός πως οι υποθαλάσσιες διασυνδέσεις με αγωγούς και καλώδια αποτελούν χρονοβόρα και άκρως δαπανηρά έργα.

Όπως κάθε τεχνικό έργο που κατασκευάζεται έτσι και τα υποβρύχια έργα μεγάλου μήκους αποτελούνται από μία σειρά επιμέρους διαδικασιών που ξεκινούν από τη μελέτη της περιοχής διασύνδεσης μέχρι την τελική υλοποίηση του έργου. Σε αυτή τη σειρά δραστηριοτήτων, ο καθορισμός της χάραξης του υποθαλάσσιου έργου έχει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο. Μέσα από τη μελέτη για τη διαδρομή που πρόκειται να ακολουθήσει ο αγωγός ή το καλώδιο, προσδιορίζονται οι περιορισμοί που εμποδίζουν την εκτέλεσή του αλλά και η οικονομική εφικτότητα, καθώς σε όλα τα έργα υπάρχει ειδικός προϋπολογισμός για το συγκεκριμένο στάδιο της κατασκευής όπου δεν επιτρέπεται να ξεπεραστεί (Mohitpur et al., 2007). Η προκαταρκτική χάραξη υλοποιείται πάνω σε ψηφιακά μοντέλα εδάφους, σε φωτομωσαϊκά και χάρτες, η οποία ακολουθείται από έναν έλεγχο πεδίου στο πυθμένα της θάλασσας για να γίνει αποδεκτή. Οι κυριότεροι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το στάδιο της προκαταρκτικής χάραξης του υποθαλάσσιου έργου σχετίζονται με την οικονομική αποδοτικότητα του κόστους του, την προστασία του θαλάσσιου οικοσυστήματος και του ευρύτερου περιβάλλοντος, καθώς και με την ακεραιότητα του αγωγού. Ωστόσο, ένας γεωτεχνικός έλεγχος έχει τη δική του βαρύτητα καθώς, η παρουσία υποθαλάσσιων γεωκινδύνων είναι ένα σύνηθες φαινόμενο που απειλεί την οποιαδήποτε χάραξη που έχει σχεδιαστεί με αποτέλεσμα να κινδυνεύει εξ' αρχής όλο το έργο.

Σε όλες τις περιπτώσεις παρόμοιων κατασκευών, για τη διαδικασία της χάραξης τίθενται συγκεκριμένοι στόχοι με σκοπό το μικρότερο χρόνο και κόστος υλοποίησης τους. Πιο συγκεκριμένα,

- Καθορισμός των κατάλληλων δεδομένων που πρέπει να συλλεχθούν και να μελετηθούν για την επιλογή των πιθανών διαδρομών του έργου.
- Καταγραφή των γεωκινδύνων, των οικοσυστημάτων που ενδέχεται να συναντήσει και των κινδύνων από τις ανθρώπινες δραστηριότητες που ενδέχεται να συναντήσει το έργο, αλλά και των πιθανών επιπτώσεων που μπορούν να επιφέρουν τα συγκεκριμένα στον αγωγό ή στο καλώδιο.

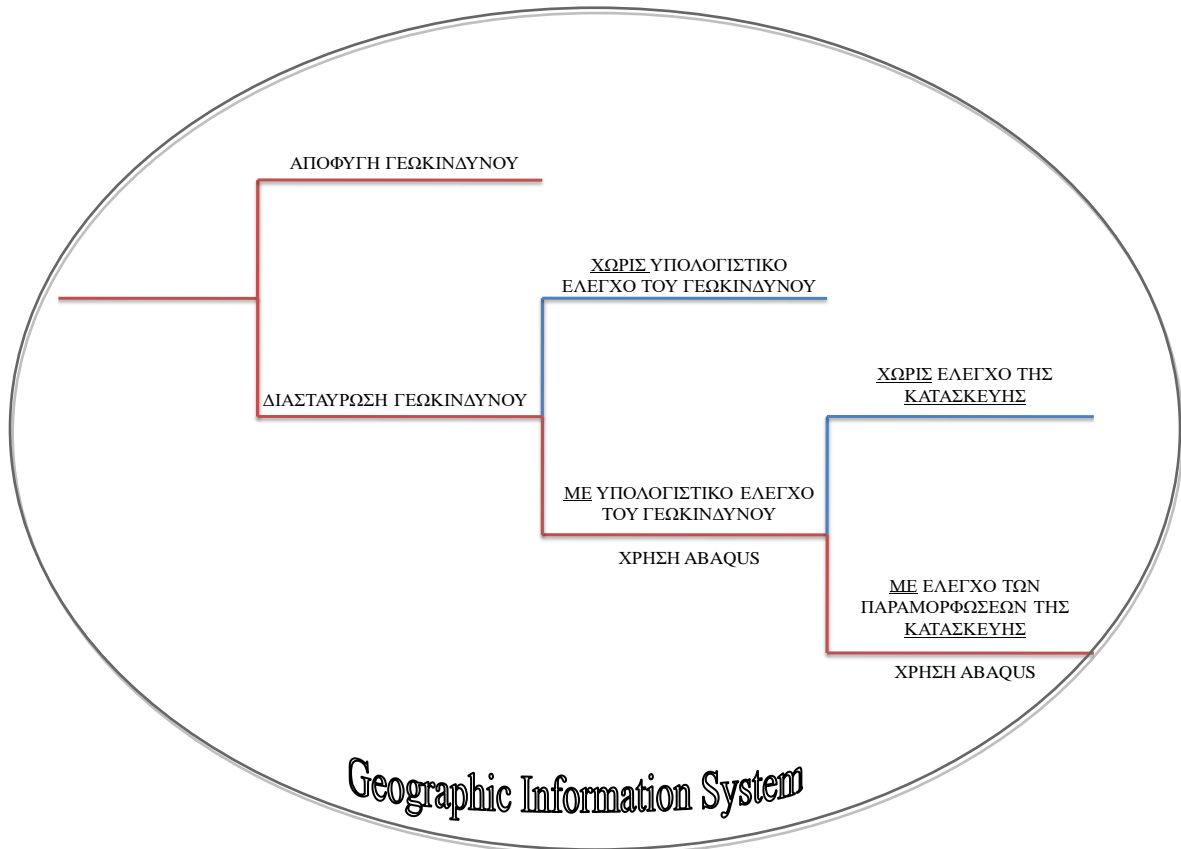
- Αξιολόγηση των παραπάνω και καθορισμός των εναλλακτικών χαράξεων του έργου.
- Τελική απόφαση για την οριστική χάραξη που θα ακολουθηθεί.

Με δεδομένα όσα έχουν περιγραφεί στην παρούσα εργασία, έγινε μία προσπάθεια δημιουργίας ενός υπολογιστικού εργαλείου που θα δέχεται τους υποθαλάσσιους γεωκινδύνους, τις ανθρωπογενείς απειλές, τα χαρακτηριστικά της κατασκευής και τις περιοχές διασύνδεσης. Το αποτέλεσμα που θα εξάγεται θα είναι η απεικόνιση της προκαταρκτικής χάραξης του έργου, με γνώμονα την βέλτιστη διαδρομή που δε θα θέτει την ακεραιότητα του αγωγού σε κίνδυνο λόγω των ασυνεχειών που ενδέχεται να εντοπιστούν στον θαλάσσιο πυθμένα. Για την ανάπτυξη του εργαλείου χρησιμοποιήθηκαν δύο προγράμματα διαφορετικής φιλοσοφίας, το Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (G.I.S) και το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

5.2 Λειτουργία υπολογιστικού εργαλείου

Σύμφωνα με τα όσα περιγράφονται και στο Σχήμα 5.1, το υπολογιστικό εργαλείο αναπτύσσεται σε μία πλατφόρμα που δημιουργείται με τη βοήθεια του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών. Στο περιβάλλον που παρέχεται μέσα από το G.I.S αναπαριστώνται όλα τα δεδομένα που έχουν βρεθεί με τη δυνατότητα επεξεργασίας τους ώστε να προσαρμοστούν στις ανάγκες της περιοχής μελέτης που πρόκειται να γίνει η υποθαλάσσια διασύνδεση. Ωστόσο, το υπολογιστικό εργαλείο δε θα μπορούσε να λειτουργήσει χωρίς τη χρήση του προγράμματος ABAQUS, που είναι βασισμένο στη θεωρία πεπερασμένων στοιχείων. Στο περιβάλλον που παρέχει το εν λόγω πρόγραμμα γίνονται αναλύσεις των εδαφικών στοιχείων που βρίσκονται στο θαλάσσιο βυθό πάνω στον οποίο πρόκειται να ποντιστεί η κατασκευή μεγάλου μήκους. Η δυνατότητα για εφαρμογή προσομοιωμάτων εδαφικών στρωμάτων που υφίστανται οποιαδήποτε μορφή γεωκινδύνου, οδηγεί στην αναλυτική και τεκμηριωμένη μελέτη των μετατοπίσεών τους. Οι δυνατότητες του προγράμματος δεν περιορίζονται μόνο στις εδαφικές στρώσεις, αλλά είναι εφικτή και η μελέτη ενός μοντελοποιημένου προσομοιώματος αγωγού που μπορεί να καθοριστεί με παραμέτρους πολύ κοντά στις πραγματικές, ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την ακεραιότητά του και τις παραμορφώσεις που υφίσταται σε περίπτωση αλληλεπίδρασης με τις εδαφικές στρώσεις που κρύβουν μία μορφή γεωκινδύνου. Όσα δεδομένα έχουν προκύψει μεταφέρονται στην πλατφόρμα GIS που ήδη έχει δημιουργηθεί και μέσω μίας σειράς πολυκριτηριακών επεξεργασιών προκύπτει η ζητούμενη βέλτιστη χάραξη.

Αρκετές είναι οι φορές όπου οι υπολογιστικοί έλεγχοι που είναι απαραίτητοι να γίνουν, παρακάμπτονται και γίνονται ποιοτικά. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ως ορθότερος τρόπος ο ποσοτικός έλεγχος. Η πορεία της περιγράφεται από τις κόκκινες γραμμές του Σχήματος 5.1.



Σχήμα 5.1: Περιγραφή υπολογιστικού εργαλείου για τη βελτιστοποίηση της χάραξης υποθαλάσσιων έργων μεγάλου μήκους που υπόκεινται σε γεωκινδύνους.

5.3 Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών

Η ανάγκη του ανθρώπου για συστηματική καταγραφή και ταξινόμηση των ιδιαίτερων στοιχείων της γήινης επιφάνειας, καθώς και η αναγκαιότητα διάθεσης ειδικών πληροφοριών που αφορούσαν την ίδια, ήταν οι αιτίες που οδήγησαν στην κατασκευή των πρώτων χαρτών, που αποτέλεσαν μία πρώτη μορφή του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (Χαλκιάς, 2006).

Κάθε όρος του Σ.Γ.Π δίνει και μία ξεχωριστή ερμηνεία για τις ικανότητές του, επομένως (Μανιάτης, 1996),

- Γεωγραφία: τα δεδομένα που διαχειρίζεται ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών αλλά και γενικότερα η χρήση του, σχετίζονται άμεσα με τη γεωγραφία και συνδέονται μέσω κάποιου συστήματος συντεταγμένων με συγκεκριμένες θέσεις πάνω στην επιφάνεια της Γης.
- Σύστημα: το περιβάλλον εργασίας μέσα από το οποίο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται, να επεξεργάζεται και να παρουσιάζει τα περιγραφικά και γεωγραφικά δεδομένα.
- Πληροφορία: τα δεδομένα που επεξεργάζονται στο σύστημα διαθέτουν γεωγραφική και περιγραφική πληροφορία.

5.3.1 Ορισμός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών

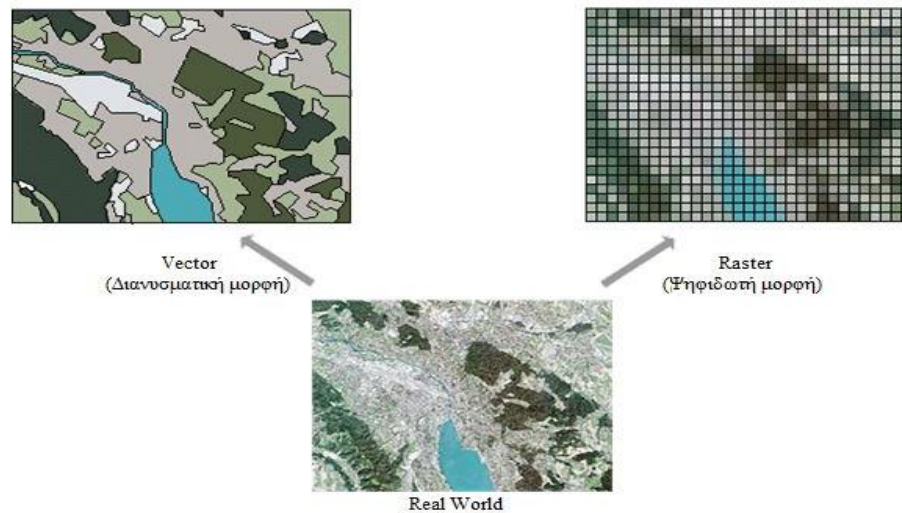
Το Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π) ή Geographic Information System (G.I.S) είναι ένα σύστημα που διαχειρίζεται γεωγραφικά δεδομένα. Πρόκειται για ένα επιστημονικό εργαλείο ικανό να επεξεργάζεται και να αποθηκεύει την πληροφορία των γεωγραφικών δεδομένων, η οποία είναι χωρική (γεωμετρική) και θεματική (μη γεωμετρική). Κοινό χαρακτηριστικό των δεδομένων που δέχεται το εν λόγω εργαλείο είναι ότι όλα τους, παρά τις διαφορετικές πηγές από όπου προέρχονται, ενσωματώνονται σε μια κοινή βάση δεδομένων δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να οπτικοποιήσει μια «περίληψη» του πραγματικού κόσμου και να την αποδώσει σε αναλογικά ή ψηφιακά μέσα.

Η ικανότητα του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών εμφανίζεται στο συνδυασμό των πλεονεκτημάτων μίας βάσης δεδομένων με τη δυνατότητα μιας ρεαλιστικής απεικόνισης και των καταγεγραμμένων χωρικών πληροφοριών που παρέχουν οι χάρτες (Burrough 1986, Longley et al., 2005). Πιο συγκεκριμένα, το ξεχωριστό χαρακτηριστικό του G.I.S. είναι η σύνδεση της γεωμετρικής πληροφορίας, η οποία διαθέτει χωρική υπόσταση, με τη μη γεωμετρική πληροφορία, η οποία δε διαθέτει χωρική υπόσταση. Για αυτό άλλωστε, αποτελεί ένα μοναδικό εργαλείο στη χωρική ανάλυση, διαφορετικό από άλλα σχεδιαστικά προγράμματα.

Η χωρική ή γεωμετρική πληροφορία των γεωγραφικών δεδομένων που εισάγονται στο GIS, συναντάται σε δύο μορφές, ώστε να μπορεί να κωδικοποιηθεί στις βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιούνται. Αναλυτικότερα η πρώτη μορφή είναι η ψηφιδωτή (raster), η οποία σχετίζεται με την αναπαράσταση συνεχών πεδίων. Η δεύτερη μορφή είναι η διανυσματική (vector), όπου χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση διακριτών αντικειμένων.

Η ψηφιδωτή δομή δεδομένων λειτουργεί με παρόμοια λογική αυτής των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών. Κατά την αναπαράσταση με τη συγκεκριμένη μορφή, η επιφάνεια του χάρτη καλύπτεται από ένα πλέγμα ορθογώνιων κελιών ίσου μεγέθους, τα οποία έχουν ένα μοναδικό ζεύγος συντεταγμένων. Τα κελιά που χρησιμεύουν για την αναπαράσταση είναι ευρέως γνωστά με το όνομα «pixels». Σε κάθε ψηφίδα εκχωρείται μία ακέραια αριθμητική τιμή που αντιπροσωπεύει κάθε είδους πληροφορία σχετικά με τη θέση που βρίσκεται. Όσο μικρότερο είναι το μέγεθος της ψηφίδας, τόσο καλύτερη είναι η ανάλυση των δεδομένων, δηλαδή η λεπτομέρεια απεικόνισης της πληροφορίας που περιέχουν τα ψηφιδωτά αρχεία. Το βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης μορφής αφορά τις μεγάλες απαιτήσεις που έχει σε αποθηκευτικό χώρο και μνήμη καθώς είναι ανάλογες με την ανάλυση των αρχείων. Συνήθως η συγκεκριμένη μορφή χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση συνεχών μεταβλητών, όπως υψομετρικών ή βαθυμετρικών δεδομένων.

Το διανυσματικό μοντέλο δεδομένων αναπαριστά τις γεωγραφικές οντότητες με τη μορφή σημείων, γραμμών και πολυγώνων. Η θέση που κατέχουν στο χώρο προσδιορίζεται από τις συντεταγμένες των σημείων έναρξης και πέρατος και από τα σημεία τα οποία αποτελούνται. Ως προς την απόδοσή τους στο χαρτογραφικό υπόβαθρο, απεικονίζονται με καλύτερο τρόπο από ότι τα ψηφιδωτά αρχεία, προσεγγίζοντας περισσότερο την πραγματικότητα. Ωστόσο με τα διανυσματικά δεδομένα δυσχεραίνεται η διαδικασία της υπέρθεσης διαφορετικών θεματικών επιπέδων. Τέλος, η χρήση τους περιορίζεται σε διακριτά δεδομένα όπως οδικό δίκτυο και σύνορα χωρών.

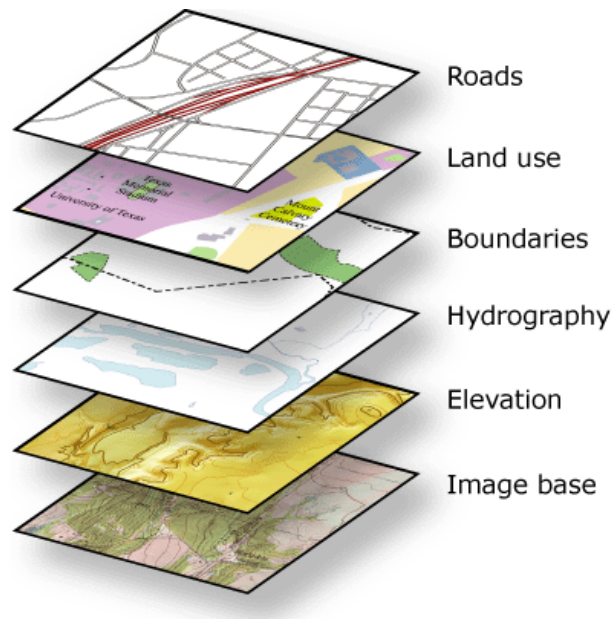


Εικόνα 5.1: Αναπαράσταση της πραγματικότητας μέσω της διανυσματικής και ψηφιδωτής μορφής.

(Πηγή: Geographic Information Technology Training Alliance)

5.3.2 Περιγραφή λογισμικού ArcGIS 10.3.1

Σε κάθε έκδοση του λογισμικού ArcGIS, το shapefile είναι η πιο δημοφιλής διανυσματική μορφή αρχείων που συναντώνται. Η συγκεκριμένη μορφή μπορεί να περιγράψει σημειακές, γραμμικές και πολυγωνικές οντότητες. Για την καλύτερη μελέτη και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων ακολουθείται συχνά η διαδικασία υπέρθεσης θεματικών επιπέδων εντός του προγράμματος. Τα θεματικά επίπεδα (layers), αποτελούν τον μηχανισμό για την απεικόνιση των δεδομένων στην επιφάνεια εργασίας του ArcGIS. Ουσιαστικά, αποτελούν ένα στρώμα της γεωγραφικής πραγματικότητας που περιέχουν μία συγκεκριμένη πληροφορία. Στην εικόνα που ακολουθεί, γίνεται η υπέρθεση διαφορετικών θεματικών επιπέδων κάθε ένα από τα οποία περιλαμβάνει διαφορετικά δεδομένα. Διαφορετικό layer χρησιμοποιείται για τους δρόμους, για τις διοικητικές περιοχές, για το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής.



*Εικόνα 5.2: Υπέρθεση θεματικών επιπέδων διαφορετικής πληροφορίας.
(Πηγή: www.desktop.arcgis.com)*

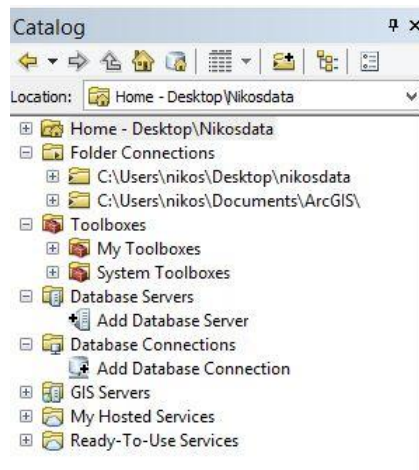
ArcCatalog

Το ArcCatalog είναι μία εφαρμογή η οποία βοηθάει στην οργάνωση και διαχείριση πολλών ειδών γεωγραφικής πληροφορίας που χρησιμοποιούνται στο ArcGIS. Αναλυτικότερα, η εφαρμογή μπορεί να περιλαμβάνει:

- Γεωβάσεις
- Αρχεία Raster
- Αρχεία 2D-3D και διάφορα layers
- Εργαλεία της γεωαναφοράς και κώδικες Python
- Μεταδεδομένα για τις γεωγραφικές πληροφορίες

Οι πληροφορίες προς διαχείριση αναπαριστώνται από το ArcCatalog με τη μορφή φακέλων τοποθετημένοι σε μία δενδροειδή κατάταξη, ώστε να είναι περισσότερο κατανοητό από τον χρήστη το περιεχόμενο του κάθε φακέλου και η αλληλουχία τους.

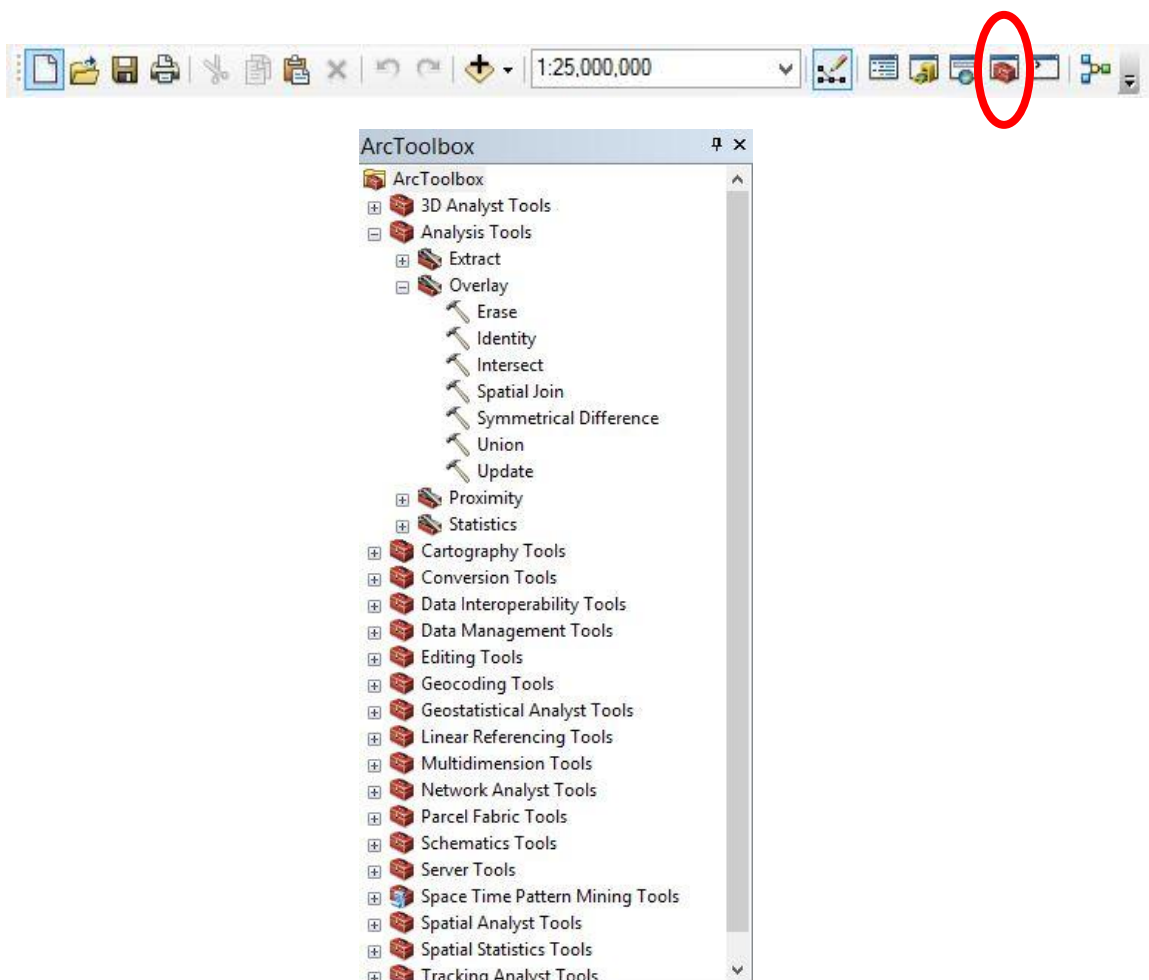
Εκτός από την ξεχωριστή εφαρμογή που παρέχει το πρόγραμμα, υπάρχει η δυνατότητα της χρήσης του παραθύρου Catalog απευθείας από το ArcMap. Δεν υπάρχει καμία διαφορά μεταξύ των δύο επιλογών.



Εικόνα 5.3: Catalog Window.

ArcToolbox

Αποτελεί τη βασική εργαλειοθήκη του προγράμματος, μέσα στην οποία βρίσκονται κατηγοριοποιημένα με τη μορφή δέντρου όλα τα εργαλεία του ArcGIS. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη καθώς βοηθάει τον χρήστη να βρει όλα τα εργαλεία που θα του χρειαστούν για την εκτέλεση της εργασίας του.



Εικόνα 5.4: Κατάλογος με εργαλεία του ArcToolbox.

Model Builder

Μια ιδιαίτερα χρήσιμη εφαρμογή του ArcGIS είναι το Model Builder. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να απεικονίσει όλες τις εργασίες που έκανε στο πρόγραμμα και συγκεκριμένα τα δεδομένα που εισήγαγε, τα αποτελέσματα που έχει εξάγει και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν με την μορφή ενός διαγράμματος ροών εργασίας (work flow). Η ιδιαιτερότητα που συναντάται στην παρούσα εφαρμογή είναι ότι το αποτέλεσμα που εξάγεται ύστερα από τη χρήση του κάθε εργαλείου, εισάγεται για επεξεργασία στο επόμενο εργαλείο με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια αλληλουχία μεταξύ των εργασιών από την αρχή έως το τέλος της επεξεργασίας των γεω-χωρικών δεδομένων. Τέλος, η δυνατότητα που έχει το Model Builder να συνδυαστεί με την γλώσσα προγραμματισμού python, επιτρέπει την ενσωμάτωση του GIS και σε άλλες εφαρμογές.

ArcScene

Το ArcScene αποτελεί μία ξεχωριστή εφαρμογή που ασχολείται με την τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωγραφικής πληροφορίας, επιτρέποντας στον χρήστη την αλληλεπίδραση και την πλοήγηση εντός αυτής. Τα χωρικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται, τοποθετούνται σε τρισδιάστατη επιφάνεια δίνοντας την ευκαιρία να αποδοθεί και η υψομετρική τους πληροφορία. Για την παρούσα εργασία η εφαρμογή ArcScene χρησιμοποιήθηκε, καθώς βοήθησε στην απόδοση της βαθυμετρικής πληροφορίας.

ArcGlobe

Πρόκειται για εξίσου μια εφαρμογή του ArcGIS με σκοπό την οπτικοποίηση της γεωγραφικής πληροφορίας σε τρεις διαστάσεις. Ωστόσο διαφέρει από την προηγούμενη, καθώς χρησιμοποιείται για μεγάλο όγκο παγκόσμιων δεδομένων τα οποία αποδίδονται σε μία επιφάνεια σχήματος σφαίρας.

ArcMap

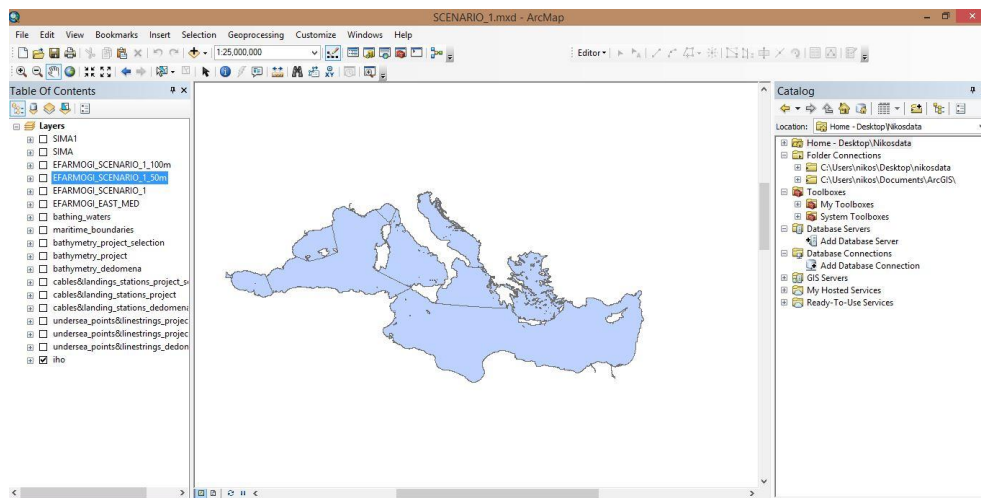
Το ArcMap αποτελεί τη κεντρική εφαρμογή του προγράμματος ArcGIS πάνω στην οποία έγινε και το μεγαλύτερο μέρος της παρούσας εργασίας. Η χρήση του γίνεται με σκοπό να προβληθούν τα γεω-χωρικά δεδομένα, τα δεχτούν τις απαραίτητες επεξεργασίες ώστε ύστερα να είναι κατάλληλα για ανάλυση για να αντλήσει ο χρήστης τις πληροφορίες που χρειάζεται. Το ArcMap αναπαριστά τη γεωγραφική πληροφορία με την μορφή θεματικών επιπέδων (layers) και διαφόρων συμβόλων σε έναν χάρτη. Η εν λόγω εφαρμογή είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με όλες τις εφαρμογές του ArcGIS που έχουν περιγραφεί μέχρι τώρα, επιτρέποντας τη καλύτερη δυνατή διαχείριση των δεδομένων (ArcCatalog ή Catalog Window) και τη βέλτιστη κατανόηση των ενεργειών που πραγματοποιήθηκαν μέσα από διαγράμματα ροών εργασίας (Model Builder).

Η εφαρμογή του ArcMap δίνει την δυνατότητα στον εκάστοτε χρήστη να απεικονίζει τα δεδομένα του σε δύο διαφορετικές προβολές, την Data View και την Layout View. Όπως και σε άλλα σχεδιαστικά προγράμματα, η Data View είναι η προβολή στην οποία γίνεται το σύνολο των επεξεργασιών ενώ η Layout View χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της διάταξης του τελικού χάρτη λίγο πριν την εκτύπωση ή την εξαγωγή του.

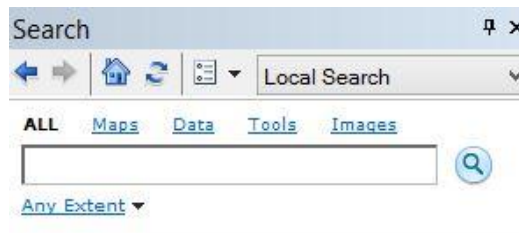
Εκτός από το Catalog Window που έχει αναφερθεί παραπάνω, η επιφάνεια εργασίας του ArcMap περιλαμβάνει και άλλες σημαντικές οντότητες. Αρχικά, ο πίνακας περιεχομένων ή Table of Contents είναι βασικός για οποιαδήποτε επεξεργασία

γίνεται στο πρόγραμμα. Σε αυτόν εμφανίζονται όλα τα θεματικά επίπεδα πληροφορίας με το όνομά τους και τον συμβολισμό τους, δείχνοντας έτσι τι αντιπροσωπεύει το κάθε ένα στον χάρτη. Από τον συγκεκριμένο πίνακα υπάρχει η δυνατότητα ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης ενός ή περισσότερων θεματικών επιπέδων αλλά και η περαιτέρω επεξεργασία τους, καθώς επιτρέπει την εύκολη πρόσβαση στις ιδιότητες του κάθε επιπέδου.

Επίσης ένα σημαντικό παράθυρο που διευκολύνει οποιαδήποτε μορφής εργασία στο ArcMap, είναι το παράθυρο της αναζήτησης ή αλλιώς Search Window. Μέσα από αυτό υπάρχει η δυνατότητα για πληκτρολόγηση και αναζήτηση οποιουδήποτε εργαλείου χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί χωρίς να ξοδεύεται χρόνος να βρεθεί μέσα από το ArcToolbox των πολλών εργαλείων.



Εικόνα 5.5: Επιφάνεια Εργασίας του ArcMap.



Εικόνα 5.6: Search Window.

Ακόμη, βασικά στοιχεία που είναι απαραίτητα αναφοράς είναι ο πίνακας ιδιοτήτων, «attribute table», που διαθέτουν τα δεδομένα που εισάγονται στο πρόγραμμα αλλά και η γραμμή εργαλείων επεξεργασίας, «editor». Ο πίνακας ιδιοτήτων αναφέρεται στη περιγραφική πληροφορία των δεδομένων και περιλαμβάνει τιμές που αντιπροσωπεύουν, μία ομάδα, μία κατηγορία ή μία ιδιότητα τους. Ωστόσο εκτός από αυτές τις παραπάνω ιδιότητες, κάθε πίνακας διαθέτει συγκεκριμένες πληροφορίες που αφορούν την γεωμετρία του θεματικού επιπέδου, τον μοναδικό αύξοντα αριθμό κάθε οντότητας που περιλαμβάνεται στο θεματικό επίπεδο (ID) καθώς και την έκταση που καταλαμβάνει. Η μορφή τους, έχει αρκετές ομοιότητες με το υπολογιστικό περιβάλλον του Excel, με αποτέλεσμα να είναι εύκολοι ως προς τον χειρισμό. Πολλές από τις επεξεργασίες των δεδομένων, έγιναν μέσα από την πρόσθετη γραμμή εργαλείων που παρέχει ο editor. Κύρια λειτουργία αυτής της εφαρμογής είναι η επεξεργασία των δεδομένων που έχουν εισαχθεί τροποποιώντας τις διανυσματικές λειτουργίες τους είτε τις πινακοποιημένες πληροφορίες των χαρακτηριστικών τους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτών αποτελεί η δυνατότητα που δίνει ο editor για παρέμβαση στον attribute table κάθε θεματικού επιπέδου, με σκοπό την επεξεργασία του. Ακόμη ενεργοποιώντας τη διαδικασία της επεξεργασίας, καθίσταται εφικτός ο σχεδιασμός νέων σημείων, πολυγώνων ή γραμμικών οντοτήτων, με αποτέλεσμα ο χρήστης να μπορεί να δημιουργήσει τα δικά του θεματικά επίπεδα.

OBJECTID*	Shape*	name	type	meeting	proposer
1	Polyline	Aby	Canyon	SCUFN-14	
2	Polyline	Aconcagua	Canyon	SCUFN-16	Chilean Hydrographic Office (SHOA)
3	Polyline	Aaores Este	Fracture Zone	SCUFN-14	Jean-Ren
4	Polyline	Adana	Trough		RA. Sevket Ge laer, Turkey
5	Polyline	Adare	Trough	SCUFN-12	Steven C. Cande, Scripps Institution of Oceanography (SIO), USA
6	Polyline	Adieu	Canyon		J. J. Doyle, Australian Hydrographic Service (AHS)
7	Polyline	Admiralteystvo	Trough	SCUFN-17	Galina V. Agapova, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences (GIN RAS)
8	Polyline	Admiralteystvo	Rise	SCUFN-17	Galina V. Agapova, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences (GIN RAS)
9	Polyline	Aegir	Ridge		
10	Polyline	Aegis	Spur	SCUFN-14	Raymond Le Suave and Jean-Francois Bourillet, French Research Institute for Exploitation of the Sea (IFREMER)
11	Polyline	Agassiz	Fracture Zone		
12	Polyline	Agula	Fracture Zone		
13	Polyline	Agulhas	Ridge	SCUFN-25	Eric S. W. Simpson, University of Cape Town (UCT), South Africa
14	Polyline	Agulhas	Basin		

Εικόνα 5.7: Πίνακας ιδιοτήτων (Attribute table).



Εικόνα 5.8: Γραμμή εργαλείων επεξεργασίας (Editor toolbar).

Τέλος μία απαραίτητη διαδικασία που αποτελεί σημαντικό βήμα κατά τη ψηφιοποίηση, δηλαδή της μετατροπής των ψηφιδωτών δεδομένων σε διανυσματικά, αποτελεί η γεωαναφορά (georeference). Επειδή τα δεδομένα που εισάγονται στο πρόγραμμα λαμβάνονται και από αεροφωτογραφίες, δορυφορικές εικόνες και σαρωμένους χάρτες, πολλά από αυτά δεν διαθέτουν επαρκή χωρική πληροφορία με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η προσαρμογή τους σε ένα σύστημα αναφοράς συντεταγμένων. Με την γεωαναφορά, καθορίζεται συγκεκριμένα η θέση μιας οντότητας που αυτή θα έχει στον χώρο (Χατζηχρήστος, 2013). Αναλυτικότερα μέσω της συγκεκριμένης διαδικασίας, τα δεδομένα που ψηφιοποιούνται αποκτούν πραγματικές συντεταγμένες ενός επιθυμητού συστήματος αναφοράς και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εξαγωγή πληροφοριών. Για την εκτέλεση της χρησιμοποιούνται από το περιβάλλον του προγράμματος μία λίστα επιπρόσθετων εργαλείων.

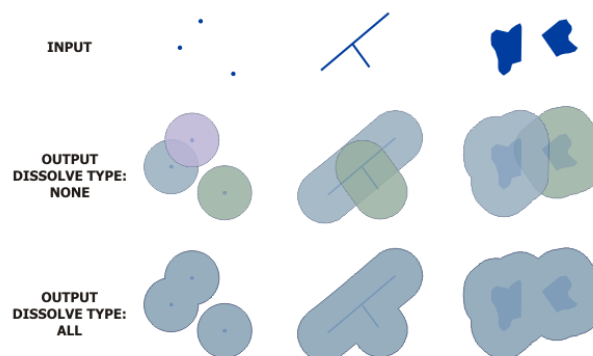


Εικόνα 5.9: Γραμμή εργαλείων γεωαναφοράς (Georeferencing).

5.3.3 Βασικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν

Buffer

Το εργαλείο buffer δημιουργεί μία ζώνη γύρω από τα επιλεγμένα δεδομένα εισόδου σε καθορισμένη απόσταση.



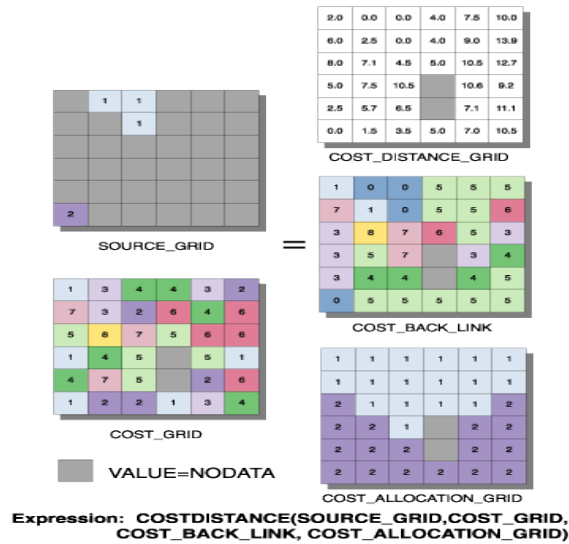
Εικόνα 5.10: Buffer Illustration

(Πηγή: www.desktop.arcgis.com)

Cost distance

Στόχος του συγκεκριμένου εργαλείου είναι ο υπολογισμός της λιγότερο δαπανηρής διαδρομής ξεκινώντας από ένα κελί και καταλήγοντας στο πλησιέστερο που ονομάζεται και πηγή. Το εργαλείο εξάγει ένα αρχείο ψηφιδωτής μορφής (raster) στο οποίο κάθε κελί έχει λάβει μία τιμή συσσωρευτικού κόστους για το πλησιέστερο του. Με βάση τον αλγόριθμο που χρησιμοποιεί το εργαλείο, κάθε κελί αναπαρίσταται ως κόμβος σύνδεσης που βρίσκεται στο κέντρο του και συνδέεται με τους γειτονικούς κόμβους των γειτονικών κελιών. Το κόστος που αντιστοιχεί σε κάθε κελί αντιπροσωπεύει το κόστος ανά μονάδα απόστασης για τη μετακίνηση μέσω του συγκεκριμένου κελιού. Η τελική τιμή ανά κελί προκύπτει εάν πολλαπλασιαστεί το μέγεθός του με την τιμή του κόστους. Τέλος, το στοιχείο που διαφοροποιεί το εργαλείο Cost distance είναι ότι δεν υπολογίζεται η πραγματική απόσταση από μία θέση σε άλλη μετρημένη σε γεωγραφικές μονάδες, αλλά η μικρότερη σταθμισμένη απόσταση από κάθε κελί έως την πλησιέστερη θέση προέλευσης, μετρημένη σε μονάδες κόστους. Επομένως, ως απαραίτητο αρχείο εισόδου του εργαλείου είναι το ψηφιδωτό αρχείου που προέκυψε από την εφαρμογή του εργαλείου σταθμισμένης υπέρθεσης, Weighted overlay και ένα σημείο προέλευσης, origin point.

Η παρακάτω εικόνα περιγράφει τη διαδικασία που ακολουθείται κατά την εφαρμογή του εργαλείου Cost distance. Αρχικά γίνεται η ανάθεση των τιμών στην επιφάνεια προέλευσης, η οποία βρίσκεται σε ψηφιδωτή μορφή. Στη συνέχεια δημιουργείται το ψηφιδωτό κόστους, μία επιφάνεια όπου η τιμή σε κάθε κελί αντιπροσωπεύει το κόστος ανά μονάδα απόστασης. Ύστερα από την υπέρθεση των δύο προηγούμενων επιφανειών, προκύπτει το ψηφιδωτό αρχείο εξόδου που περιέχει τις τιμές συσσωρευτικού κόστους ανά κελί, και το προαιρετικό αρχείο «Backlink», που καθορίζει την κατεύθυνση ή προσδιορίζει το επόμενο γειτονικό κελί, κατά μήκος της ελάχιστης συσσωρευτικής διαδρομής.



*Εικόνα 5.11: Στάδια εργαλείου Cost Distance.
(Πηγή: ESRI Development Network)*

Cost path

Ως συνέχεια του εργαλείου Cost distance, το εργαλείο Cost path καθορίζει τη διαδρομή του ελάχιστου κόστους ξεκινώντας από το σημείο προέλευσης (origin point) που έχει οριστεί ήδη και καταλήγοντας στο σημείο προορισμού (destination point) που ορίζεται στο εν λόγω εργαλείο. Η εξάρτηση με το εργαλείο Cost distance οφείλεται στο ότι τα αποτελέσματα του ενός αποτελούν δεδομένα του άλλου. Πιο συγκεκριμένα για την εφαρμογή του εργαλείου Cost path, εισάγονται δύο ψηφιδωτά αρχεία, το «Cosdis» και το «Backlink». Το τελευταίο, προσδιορίζει τη λιγότερο δαπανηρή διαδρομή που πρέπει να ακολουθηθεί προς το σημείο προέλευσης από κάθε κελί στην επιφάνεια του κόστους απόστασης. Η τελική διαδρομή που αποτελεί το αρχείο εξαγωγής του εργαλείου Cost path, προκύπτει από την ένωση των κόμβων σύνδεσης των κελιών με τις ελάχιστες τιμές κόστους μεταξύ του σημείου προέλευσης και προορισμού.

Erase

Η διαγραφή χρησιμοποιείται στο ArcGIS για να αφαιρεθούν τα χαρακτηριστικά ενός θεματικού επιπέδου με βάση τα χαρακτηριστικά ενός άλλου θεματικού επιπέδου. Το αποτέλεσμα του εργαλείου είναι ένα νέο θεματικό επίπεδο που περιλαμβάνει τη πληροφορία του πρώτου θεματικού επιπέδου η οποία δεν αποτελεί πληροφορία και του δεύτερου θεματικού επιπέδου.

Hillshade & Fill

Το εργαλείο Hillshade δημιουργεί μία σκίαση στην επιφάνεια ενός raster αρχείου ενισχύοντας την αίσθηση του ανάγλυφου. Ενδείκνυται για τα Ψηφιακά Μοντέλα Απεικόνισης εδάφους. Αντίστοιχα και η χρήση του εργαλείου Fill έγινε κατά τη διάρκεια της απόδοσης του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους για την αφαίρεση ατελειών (σημεία sinks) στα δεδομένα της raster επιφάνειας.

Polygon to Raster

Για να μετατραπούν οι πολυγωνικές οντότητες σε αρχεία ψηφιδωτής μορφής (raster), ώστε να είναι εφικτές οι απαραίτητες επεξεργασίες για την εργασία χρησιμοποιείται το εργαλείο Polygon to Raster.

Project

Με τη χρήση του συγκεκριμένου εργαλείου επιτυγχάνεται η αναγωγή των δεδομένων σε ένα σύστημα αναφοράς. Πολλές φορές τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται έχουν διαφορετικό σύστημα αναφοράς μεταξύ τους, δυσχεραίνοντας την συνολική επεξεργασία τους. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται το εργαλείο project ώστε όλα τα θεματικά επίπεδα που χρησιμοποιούνται να έχουν αναχθεί στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων.

Raster calculator

Το Raster calculator αποτελεί ένα βασικό εργαλείο, κυρίως για το είδος των πολυκριτηριακών εφαρμογών που αναλύονται στη παρούσα εργασία. Αποτελεί ένα ιδιαίτερο περιβάλλον εντός του προγράμματος δίνοντας τη δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργήσει και να εκτελέσει αλγεβρικές εκφράσεις. Οι εκφράσεις αυτές εφαρμόζονται μεταξύ των Raster θεματικών επιπέδων που βρίσκονται προς επεξεργασία στο πρόγραμμα. Με την αριθμομηχανή που περιλαμβάνει, εισάγεται οποιαδήποτε αριθμητική τιμή και τελεστής χρειάζονται για την διαμόρφωση της έκφρασης. Τέλος, τα βοηθητικά εργαλεία που συμπληρώνουν το περιβάλλον του εργαλείου, αποτελούν έτοιμες συναρτήσεις οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής.

Raster to polyline

Τα ψηφιδωτά δεδομένα σε έναν χάρτη που προορίζεται για την τελική του εξαγωγή δεν έχουν την καλύτερη δυνατή ποιότητα, υποβαθμίζοντας τη λεπτομέρεια της γεωγραφικής πληροφορίας. Με το εργαλείο Raster to Polyline, τα δεδομένα ψηφιδωτής μορφής μετατρέπονται σε πολυγωνικές γραμμές.

Reclassify

Με το εργαλείο reclassify γίνεται η επαναταξινόμηση των τιμών ενός συνόλου με ψηφιδωτά δεδομένα. Οι τιμές τους αφορούν κάθε κελί και αντικαθίστανται από εναλλακτικές τιμές με μία ποικιλία μεθόδων. Η επαναταξινόμηση μπορεί να γίνει για κάθε τιμή ξεχωριστά, ή σε μία ομάδα τιμών με βάση ένα κριτήριο. Μία γνωστή μέθοδος είναι η επαναταξινόμηση των τιμών σε μία κοινή κλίμακα τιμών. Σύμφωνα με αυτή, αποδίδονται τιμές, για παράδειγμα από το 1 έως το 10, σε ένα αρχείο raster για να διαβαθμιστεί το χαρακτηριστικό που αναπαριστάται μέσω του ψηφιδωτού αρχείου.

Slope

Το εργαλείο slope αποτελεί ένα εργαλείο υπολογισμού της κλίσης που βασίζεται στον υπολογισμό του ρυθμού μεταβολής μεταξύ κάθε κελιού και των οκτώ γειτονικών του. Για αυτό ο υπολογισμός γίνεται μόνο σε raster επιφάνειες. Η χρήση του slope είναι ιδιαίτερα σημαντική ιδιαίτερα στην απεικόνιση στοιχείων του εδάφους με την μορφή DEM, κυρίως για την πρόληψη κινδύνων, για τον εντοπισμών περιοχών με πολύ μεγάλες κλίσης ακατάλληλες για οποιαδήποτε επεξεργασία και για τη μελέτη του υδρογραφικού δικτύου μιας περιοχής.

Smooth line

Στις περιπτώσεις που το τελικό αποτέλεσμα το οποίο εξάγεται περιλαμβάνει γραμμικές οντότητες, όπως δρόμους και χαράξεις διαδρομών, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα με την εφαρμογή του εργαλείου Smooth line, να εξομαλύνει οποιοδήποτε γραμμικό στοιχείο. Η εξομάλυνση γίνεται κυρίως στις αιχμηρές γωνίες των οντοτήτων και έχει σκοπό τη βελτίωση της χαρτογραφικής και της αισθητικής ποιότητας. Ο βασικός αλγόριθμος που εφαρμόζεται κατά τη χρήση του συγκεκριμένου εργαλείου, ονομάζεται PAEK (Polynomial Approximation with Exponential Kernel ή Πολυωνυμική Προσέγγιση με Εκθετική συνάρτηση Kernel). Σύμφωνα με αυτόν, οι τρέχουσες συντεταγμένες υπολογίζονται με τον σταθμισμένο μέσο όρο των συντεταγμένων όλων των σημείων της γραμμής. Η εφαρμογή του γίνεται με την εισαγωγή από τον χρήστη μιας ανοχής (smoothing tolerance), την οποία ύστερα χρησιμοποιεί ως μήκος μεταξύ των νέων κορυφών κατά μήκος της γραμμής που θα σχηματιστεί. Η τελική γραμμή δεν περιέχει απαραίτητα όλες τις κορυφές της αρχικής γραμμής. Τέλος, ο δεύτερος αλγόριθμος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου είναι ο αλγόριθμος παρεμβολής BEZIER. Σύμφωνα με αυτόν, αντιθέτως με τον αλγόριθμο PAEK, χρησιμοποιούνται οι κορυφές της αρχικής γραμμής, από τις οποίες θα διέρχεται και η γραμμή που θα σχηματιστεί. Σημειώνεται ότι με την εφαρμογή του αλγόριθμου BEZIER, οι λεπτομέρειες που διατηρούνται

ύστερα είναι λιγότερες καθώς εφαρμόζεται σε κάθε γραμμικό τμήμα της αρχικής πολυγωνικής γραμμής.

Stack profile

Για τη δημιουργία του γραφήματος που απεικονίζει τη μηκοτομή της κάθε γραμμικής οντότητας που βρίσκεται σε μία επιφάνεια (π.χ DEM) χρησιμοποιείται το εργαλείο Stack profile. Εκτός από το γράφημα, εξάγεται και ένας πίνακας με τις πληροφορίες που απαιτούνται για τη κατασκευή του γραφήματος. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη χρήση του συγκεκριμένου εργαλείου είναι η ύπαρξη ενός μοντέλου εδάφους που να διαθέτει υψομετρική πληροφορία και μία οντότητα με γραμμικά χαρακτηριστικά.

Table to excel & Excel to Table

Χρησιμοποιώντας το εργαλείο Table to Excel, επιτρέπεται στον χρήστη να επεξεργαστεί έναν πίνακα του GIS στο Excel. Εάν έχουν ολοκληρωθεί οι εργασίες στο Excel ή έχει δημιουργηθεί εκ του μηδενός ένας πίνακας στο πρόγραμμα του Excel και χρειάζεται να εισαχθεί στο GIS, χρησιμοποιείται το εργαλείο Excel to Table. Ο νέος πίνακας GIS είναι διαθέσιμος στο Catalog Window και μπορεί να δεχτεί επεξεργασίες όπως κάθε Attribute Table.

Topo to Raster

Με το εργαλείο Topo to Raster δημιουργούνται τα Ψηφιακά Υψομετρικά Μοντέλα (Digital Elevation Model - DEM), που αναπαριστούν την επιφάνεια του εδάφους. Πρόκειται για μία μέθοδο παρεμβολής που ο σκοπός κατασκευής της ήταν για την απόδοση του υδρογραφικού δικτύου μιας περιοχής. Η χρήση του είναι ευρεία καθώς το αποτέλεσμα που εξάγεται συντελεί στη δημιουργία συμπερασμάτων για την μορφολογία της περιοχής που εξετάζεται κάθε φορά. Η τεχνική που ακολουθείται κατά τη διαδικασία της παρεμβολής ονομάζεται «Τεχνική της διακριτής λεπτής επίπεδης σφήνας», δίνοντας τη δυνατότητα στο ψηφιακό μοντέλο να προσαρμόζεται ακολουθώντας απότομες αλλαγές όπως μεταβάσεις από και προς κορυφογραμμές και ρέματα. Για την κατασκευή ενός DEM, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στα δεδομένα εισόδου που δέχεται το εργαλείο, καθώς εκτός από την υψομετρική πληροφορία που είναι απαραίτητη, δεν μπορεί να εξάγει αποτέλεσμα εάν δεν περιλαμβάνεται και το περίγραμμα της περιοχής μελέτης, ώστε να καθορίζονται και σαφήνεια τα όριά της.

Union & Merge

Τα εργαλεία αυτά αναφέρονται στην ένωση των θεματικών επιπέδων. Με το union υπολογίζεται η γεωμετρική ένωση των οντοτήτων και των θεματικών επιπέδων που εισάγονται. Προϋπόθεση για την πραγματοποίηση της ένωσης μέσω του εργαλείου Union αποτελεί ότι όλα τα χαρακτηριστικά εισόδου να είναι πολύγωνα. Το

αποτέλεσμα του εργαλείου είναι η ένωση των πολυγώνων αλλά και των πεδίων τους. Το εργαλείο Merge διαφοροποιείται από το Union καθώς χρησιμοποιείται τόσο σε πολυγωνικά όσο και σε σημειακά ή γραμμικά θεματικά επίπεδα. Το αποτέλεσμα που εξάγεται από το εργαλείο περιέχει τη γεωμετρία του νέου θεματικού επιπέδου αλλά και την συγχωνευμένη περιγραφική πληροφορία.

Weighted overlay

Το εργαλείο Weighted overlay μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη πραγματοποίηση μιας πολυκριτηριακής ανάλυσης καθώς αποτελεί ένα εργαλείο σταθμισμένης υπέρθεσης. Τα δεδομένα που εισάγονται στο περιβάλλον του είναι τα θεματικά επίπεδα σε ψηφιδωτή μορφή, με τη δυνατότητα κατά την εφαρμογή του εργαλείου κάθε ένα από αυτά να αποτελέσει κριτήριο με ξεχωριστό βάρος επιρροής. Απαραίτητη όμως προϋπόθεση είναι το άθροισμα που έχουν τα επιμέρους βάρη να είναι 100%. Πιο συγκεκριμένα, από κάθε θεματικό επίπεδο επιλέγεται το πεδίο από τον Attribute table, που ενδιαφέρει τον χρήστη. Οι τιμές που περιέχονται στο πεδίο αυτό αντιστοιχούνται με μία προσαρμοσμένη κλίμακα, οι τιμές της οποίας αντιπροσωπεύουν μία ποιοτική διαβάθμιση κόστους από τιμή σε τιμή.

5.4 Πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

5.4.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) αποτελεί μία αριθμητική μέθοδο που χρησιμοποιείται με την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η χρήση της είναι ευρεία ιδίως στην έρευνα και στην βιομηχανία, καθώς αποτελεί ισχυρό εργαλείο για την μελέτη των κατασκευών. Τα αποτελέσματά της αν και προσεγγιστικά, είναι αξιόπιστα με το μειονέκτημα ότι για σύνθετα μοντέλα η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται είναι ιδιαίτερα μεγάλη.

Αναλυτικότερα, η κεντρική ιδέα γύρω από την μέθοδο βρίσκεται στην χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων για την αναπαράσταση συνεχών μέσων. Το βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η δυνατότητα που έχει να προσομοιάζει την πραγματική κατασκευή με συστατικά στοιχεία, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με πεπερασμένα στοιχεία.

5.4.2 Προγραμματιστικό περιβάλλον ABAQUS

Η ανάλυση των εφαρμογών που πραγματεύεται η εργασία έγινε και με την βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας το λογισμικό ABAQUS, ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την ανάλυση τάσεων και θερμοκρασιακών πεδίων σε κατασκευές. Το ABAQUS αποτελεί ένα δημοφιλές για τον χώρο του πρόγραμμα κυρίως στην βιομηχανία αυτοκινήτου και την αεροδιαστημική. Ακόμη, το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιείται για ακαδημαϊκούς και ερευνητικούς λόγους.

5.5 Διαδικασίας παραμετρικής ανάλυσης διάρρηξης ενεργού ρήγματος δια μέσω ιζηματογενούς στρώσης

Ο πρώτος υπολογιστικός έλεγχος που υφίσταται στο εργαλείο που έχει αναπτυχθεί γίνεται στο περιβάλλον του Abaqus και αφορά τη διάρρηξη ενός ρήγματος, πάνω στο οποίο βρίσκεται μία ιζηματογενής στρώση σε ελεύθερο πεδίο. Αναλυτικότερα, πραγματοποιήθηκε μία παραμετρική ανάλυση, με παραμέτρους τη γωνία διάρρηξης του ρήγματος, το πάχος της στρώσης και το είδος του ρήγματος.

Το προσομοίωμα που δημιουργήθηκε, θεωρήθηκε ότι έχει ιζηματογενή στρώση με μήκος 1000m, ενώ τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη περιγραφή της είναι τύπου CPE4, 1000 στον αριθμό με 1m μήκος το κάθε ένα. Η διάρρηξη του ρήγματος γίνεται στο μέσο της ιζηματογενούς στρώσης, στα 500m. Επίσης, κάποιες παράμετροι παραμένουν σταθερές. Έχει γίνει η θεώρηση ότι το υλικό των ιζημάτων είναι αργιλικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ να είναι ίση με 2° , η γωνία διασταλτικότητας $\psi = 0.2^\circ$ και η συνοχή $c = 20$ kPa. Τέλος, η πυκνότητα του υλικού που χρησιμοποιήθηκε είναι $\rho = 2$ tn/m³ (τόνους / κυβικό μέτρο), το μέτρο ελαστικότητας $E_0 = 10000$ MPa. και ο λόγος Poisson $\nu = 0.3$.

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει τις τιμές που επιθυμεί διαμορφώνοντας το αρχείο εισόδου, στο οποίο περιγράφεται το πρόβλημα που πρόκειται να αναλυθεί. Πιο συγκεκριμένα, το προσομοίωμα μπορεί να διαμορφωθεί με,

- Πάχος ιζηματογενούς στρώσης H, από 50m αυξανόμενο κατά 50m.
- Είδος του ρήγματος, κανονικό ή ανάστροφο, ανάλογα με την περιοχή μελέτης.
- Γωνία διάρρηξης ρήγματος δ , ανάλογα με τα στοιχεία του ρήγματος.

Οι μετατοπίσεις που δέχεται η επιφάνεια της ιζηματογενούς στρώσης εξαρτώνται άμεσα από τη γωνία διάρρηξης του ρήγματος που έχει επιλέξει ο χρήστης. Οι μετατοπίσεις κατά x και y προκύπτουν (σε μέτρα) από τους παρακάτω τύπους:

- $\Delta y = 2 * D$ (5.1)

Όπου D= η εξωτερική διάμετρος του αγωγού.

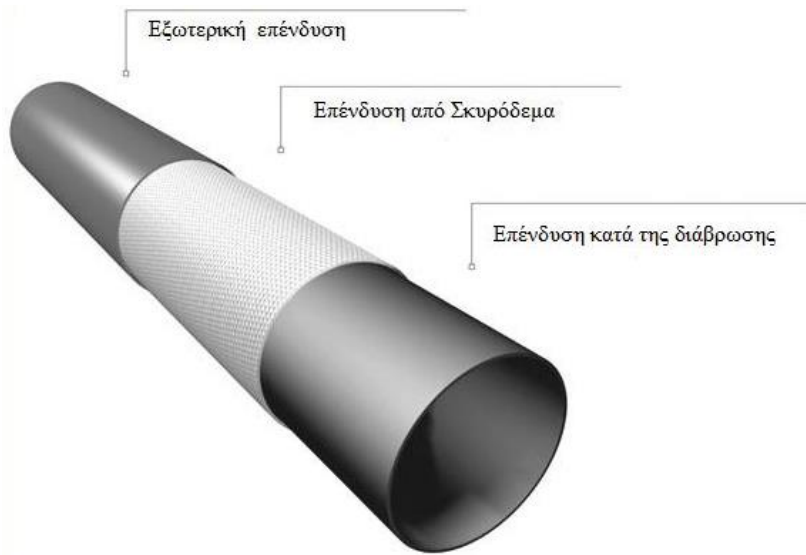
- $\Delta x = \frac{4y}{\tan(\delta)}$ (5.2)

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, και συγκεκριμένα οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις της ιζηματογενούς στρώσης, από τις παραπάνω αναλύσεις είναι άκρως συνδεδεμένα με το κεφάλαιο που ακολουθεί καθώς αποτελούν δεδομένα για τη διαμόρφωση του αρχείου εισόδου του δεύτερου υπολογιστικού ελέγχου.

5.6 Διαδικασία υπολογιστικής ανάλυσης για την αλληλεπίδραση αγωγού και ρήγματος

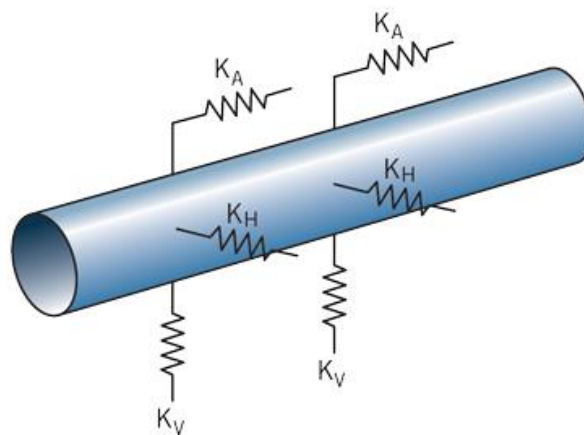
Το παρόν υποκεφάλαιο αποτελεί τον τελευταίο υπολογιστικό έλεγχο που γίνεται στο περιβάλλον του Abaqus. Πιο συγκεκριμένα, ύστερα από τη διαδικασία μελέτης της διάρρηξης ενός κανονικού ή ανάστροφου ρήγματος δια μέσω διαφορετικών τιμών πάχους ιζηματογενούς στρώσης, προστίθεται η εξέταση των παραμορφώσεων που υφίσταται ένας μεταλλικός υποθαλάσσιος αγωγός κατά τη διασταύρωσή του με αυτό.

Το έδαφος που ελέγχεται και σε αυτή τη περίπτωση θεωρείται ως αργιλικό, ενώ η διατομή του υποθαλάσσιου αγωγού κατασκευασμένου από χάλυβα περιλαμβάνει την εξωτερική του διάμετρο, το πάχος του και τρεις στρώσεις επενδύσεων, μία κατά της διάβρωσης του χάλυβα, μία κατασκευασμένη από σκυρόδεμα και μία κατά της εξωτερικής διάβρωσης που υφίσταται λόγω του θαλασσινού νερού.



Σχήμα 5.2: Αναπαράσταση εξωτερικών επενδύσεων υποθαλάσσιου αγωγού.

Για την εκτέλεση της παρούσας εργασίας έγιναν ορισμένες θεωρήσεις που αφορούν τον αγωγό και τη διασταύρωση του με το ρήγμα. Το μήκος του αγωγού είναι 1000 m και η διασταύρωσή του με το ρήγμα γίνεται στο μέσο του με γωνία 90° . Η διακριτοποίηση του αγωγού έγινε σε 1000 στοιχεία ίσου μήκους της μορφής elbow. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν τα ελατήρια (springs) για τη σύνδεση του κάθε κόμβου του αγωγού με τη κάθετη (vertical), την οριζόντια (horizontal) και την εγκάρσια οριζόντια διεύθυνση (axial), ώστε η μετακίνηση του ρήγματος να επιβάλλεται στον αγωγό κάθε φορά μέσω της μετακίνησης των ελεύθερων άκρων των ελατηρίων.



Εικόνα 5.12: Σχηματική απεικόνιση εδαφικών ελατηρίων πάνω σε προσομοίωμα αγωγού.
(Πηγή: Oil & Gas Journal)

Η πίεση που δέχεται ο αγωγός είναι εξωτερική και εσωτερική και οι τιμές των δύο διαφοροποιούνται. Αναλυτικότερα, η εσωτερική πίεση διατηρείται σταθερή και επιλέχθηκε να είναι 11500 kPa, για έναν τυπικό αγωγό μεταφοράς φυσικού αερίου, ενώ η εξωτερική πίεση μεταβάλλεται ανάλογα με το βάθος.

Πίνακας 5.1: Εσωτερική και εξωτερική πίεση προσομοιώματος υποθαλάσσιου αγωγού.

Εσωτερική πίεση (kPa) (σταθερή)	Εξωτερική πίεση (kPa)
PI= 11500	$HPE = 1025 \text{ kg/m}^3$ (πυκνότητα θαλασσινού νερού) * 9.81 m/s^2 * Βάθος της προς εξέταση περιοχής (m)

Εξάιρεση αποτελεί η περίπτωση της επαφής του αγωγού στο ρήγμα χωρίς την ύπαρξη ιζηματογενούς στρώσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση εφαρμόζεται ομοιόμορφη μετακίνηση στα αντίστοιχα ελατήρια, ενώ στις υπόλοιπες η μετακίνηση δεν είναι ομοιόμορφη.

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων που ασκούν τα εδαφικά ελατήρια στον αγωγό έγινε η χρήση της θεωρίας των O' Rourke & Liu, που αναφέρεται συγκεκριμένα σε υποθαλάσσιους αγωγούς. Ωστόσο, ευρέως γνωστός είναι και ο διεθνής κανονισμός ALA, ο οποίος υπολογίζει και αυτός με τη σειρά του τις δυνάμεις που ασκούν τα εδαφικά ελατήρια στον αγωγό προς όλες τις διευθύνσεις με την σημαντική διαφορά ότι ο κανονισμός μελετάει χερσαίο αντί για υποθαλάσσιο αγωγό θαμμένο κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Στη πραγματικότητα, οι υποθαλάσσιοι αγωγοί που τοποθετούνται στην επιφάνεια του πυθμένα της θάλασσας, με το πέρασμα των χρόνων και την επίδραση που υφίσταται ο αγωγός λόγω της συνεχούς εναπόθεσης ιζημάτων αλλά και των θαλάσσιων ρευμάτων, ορισμένα τμήματά τους καλύπτονται έως ένα σημείο. Για το λόγο αυτό, έγινε η θεώρηση του ημιβυθισμένου υποθαλάσσιου αγωγού στον θαλάσσιο πυθμένα.

Ακολουθεί η παρουσίαση των τύπων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις εφαρμογές με την επισήμανση ότι το υπόβαθρο πάνω στο οποίο έγιναν οι υπολογισμοί είναι αργιλώδες.

5.6.1 Διαδικασία Υπολογισμού δυνάμεων εδαφικών ελατηρίων

Πριν την αναφορά στους βασικούς τύπους υπολογισμού των δυνάμεων που ασκούν τα ελατήρια είναι χρήσιμο να αναφερθούν ορισμένοι προκαταρκτικοί τύποι που

βοηθούν στον υπολογισμό της διαμέτρου του αγωγού και του συνολικού του βάρους, καθώς και ορισμένες σταθερές.

Αρχικά, δίνεται το ειδικός βάρος του χάλυβα και του σκυροδέματος

- $\bar{\gamma}_{\text{χάλυβα}} = 78.5 \text{ kN/m}^3$
- $\bar{\gamma}_{\text{σκυροδέματος}} = 25 \text{ kN/m}^3$
-

Στη συνέχεια,

- Συνολική διάμετρος

D_{tot} = εξωτερική διάμετρος του αγωγού D * + 2 * το πάχος του λεπτού στρώματος επένδυσης του αγωγού + 2 * το πάχος της επένδυσης του αγωγού από σκυρόδεμα.

(5.3)

- Συνολικός όγκος

$$V_{\text{tot}} = \pi * \left(\frac{D_{\text{tot}}}{2}\right)^2 \quad (5.4)$$

- Εσωτερικός όγκος του αγωγού

$$V_{\text{εσωτερικό}} = \pi * \left(\frac{D - 2 * \text{πάχος αγωγού}}{2}\right)^2 \quad (5.5)$$

- Όγκος μέχρι και το τοίχωμα του αγωγού

$$V_{\text{εξωτερικό}} = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (5.6)$$

- Όγκος αγωγού χωρίς στρώσεις

$$V_{\text{αγωγού}} = V_{\text{εξωτερικό}} - V_{\text{εσωτερικό}} \quad (5.7)$$

- Όγκος επένδυσης κατά της διάβρωσης

$$V_{\text{διάβρωσης}} = \pi * \left(\frac{D + 2 * \text{πάχος λεπτού στρώματος επένδυσης}}{2}\right)^2 - V_{\text{εξωτερικό}} \quad (5.8)$$

- Όγκος επένδυσης σκυροδέματος

$$V_{\text{σκυροδέματος}} = V_{\text{tot}} - (V_{\text{εξωτερικό}} + V_{\text{διάβρωσης}}) \quad (5.9)$$

- Βάρος αγωγού χωρίς επένδυση

$$W_{\text{αγωγού}} = \bar{\gamma}_{\text{χάλυβα}} * V_{\text{αγωγού}} \quad (5.10)$$

- Βάρος επένδυσης σκυροδέματος

$$W_{\text{σκυροδέματος}} = \bar{\gamma}_{\text{σκυροδέματος}} * V_{\text{σκυροδέματος}} \quad (5.11)$$

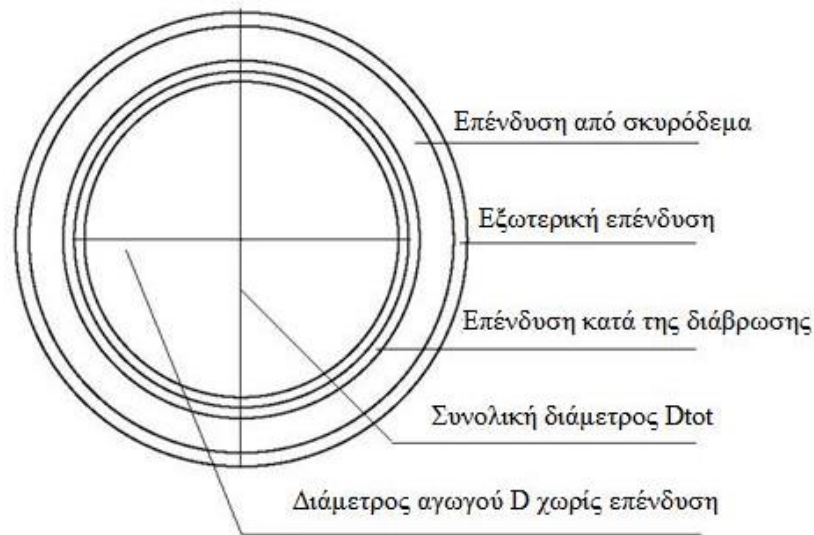
- Συνολικό βάρος επενδυμένου αγωγού

$$W_{\text{tot}} = W_{\text{αγωγού}} + W_{\text{σκυροδέματος}} \quad (5.12)$$

(Το βάρος της στρώσης της εξωτερικής επένδυσης δεν συμπεριλήφθηκε στον υπολογισμό του συνολικού βάρους του επενδυμένου αγωγού.)

- Άνοση

$$A = V_{\text{tot}} * \text{πυκνότητα θαλασσινού νερού } 1.025 \text{ Kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2 \quad (5.13)$$



Σχήμα 5.3: Σχηματική αναπαράσταση υποθαλάσσιου αγωγού.

Υπολογισμός αξονικών ελατηρίων

Για τα αξονικά ελατήρια οι διαφορές μεταξύ της θεωρίας O' Rourke & Liu και του διεθνούς κανονισμού είναι ελάχιστες για αυτό επιλέχθηκαν οι τύποι που δίνονται από τον ALA. Αναλυτικότερα η μέγιστη αξονική δύναμη του εδάφους που ασκείται στον αγωγό προκύπτει,

$$T_u = \pi * D * a * c + \pi * D * H * \bar{\gamma} * \frac{1+K_o}{2} * \tan\delta \quad (5.14)$$

Όπου,

D = η εξωτερική διάμετρος του αγωγού ($D_{tot} / 2$)

c = συνοχή εδαφικού υλικού

H = βάθος από την επιφάνεια του εδάφους έως το κέντρο του αγωγού

$\bar{\gamma}$ = ενεργό ειδικό βάρος

K_0 = συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων

α = συντελεστής συνοχής ($\alpha = 0.608 - 0.123 * c - \frac{0.274}{c^2+1} + \frac{0.695}{c^3+1}$)

δ = γωνία τριβής μεταξύ της επιφάνειας του αγωγού και του εδάφους ($\delta = f * \varphi$)

f = συντελεστής που εξαρτάται από την εξωτερική επένδυση του αγωγού που συσχετίζει την γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους και την γωνία τριβής μεταξύ της επιφάνειας του αγωγού και του εδάφους.

Πίνακας 5.2: Τιμές συντελεστή f για κάθε περίπτωση εξωτερικής επένδυσης του αγωγού.

Εξωτερική επένδυση αγωγού	f
Σκυρόδεμα	1.0
Πίσσα	0.9
Σκληρός χάλυβας	0.8
Μαλακός χάλυβας	0.7
Εποξειδικό υλικό	0.6
Πολυαιθυλένιο	0.6

Η μετακίνηση Δ_t για τη δύναμη T_u εξαρτάται από το υπόβαθρο. Για μαλακή άργιλο η μετακίνηση είναι $\Delta_t = 10\text{mm}$.

Για την θεώρηση που ήδη έχει γίνει και αφορά τον ημιβυθισμένο αγωγό, το H μηδενίζεται.

$$T_u = \pi * D * a * c \quad (5.15)$$

Υπολογισμός οριζόντιων ελατηρίων

Ο υπολογισμός των δυνάμεων που ασκούν τα οριζόντια ελατήρια έγινε με βάση τη θεωρία Ο' Rourke & Liu. Πιο συγκεκριμένα για τα αργιλικά ελατήρια χρησιμοποιείται ο τύπος,

$$p_u = 0.2 * w_s + 3 * z * \sqrt{D * \bar{\gamma} * S_u}$$

Όπου,

$$S_u = c$$

w_s = βυθισμένο βάρος ($w_s = w_{tot} - A$, όπου A η άνωση αφού ο αγωγός είναι υποθαλάσσιος).

z = το τμήμα του αγωγού που είναι βυθισμένο στο βυθό της θάλασσας ($z = D/2$)

Η μετατόπιση για την συγκεκριμένη δύναμη είναι $y_u = 0.1 * D$.

Υπολογισμός κατακόρυφων ελατηρίων

Όπως και στη προηγούμενη περίπτωση, έτσι και για τις δυνάμεις που ασκούν τα κατακόρυφα ελατήρια χρησιμοποιήθηκε η θεωρία των Ο' Rourke & Liu, με τη διαφορά ότι για τη συγκεκριμένη διεύθυνση, υπήρξε ο διαχωρισμός των ελατηρίων που ασκούν δύναμη στον αγωγό προς τα άνω (upward) και των ελατηρίων που ασκούν δύναμη στον αγωγό προς τα κάτω (downward).

- Προς τα άνω

$$q_u = w_s + \alpha + S_u * D * \sin\theta \quad (5.16)$$

όπου $\theta = \sin^{-1}(1 - 2 * \frac{z}{D}) \leq 90^\circ$

Η μετατόπιση για τη συγκεκριμένη δύναμη είναι ίση με 0.002m.

- Προς τα κάτω

$$q_d = N * D * S_u \quad (5.17)$$

Όπου,

$N = \pi + 2 = 5,14$. Όμως έγινε στρογγυλοποίηση προς τα πάνω με αποτέλεσμα το N να θεωρηθεί ίσο με 6.

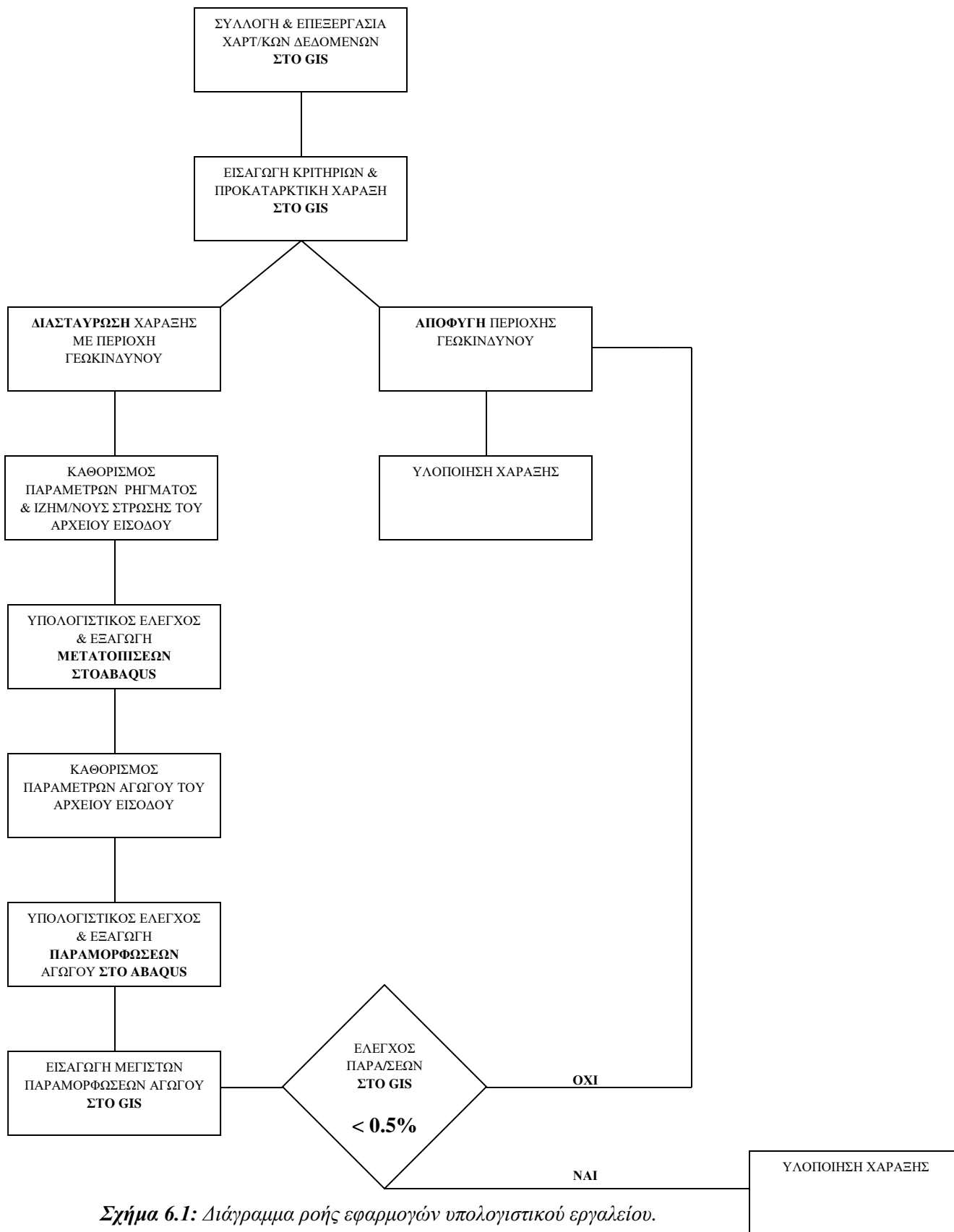
Η μετατόπιση για την συγκεκριμένη δύναμη είναι ίση με $\Delta_{qd} = 0.125 * D$.

6. Εφαρμογές υπολογιστικού εργαλείου

Οι εφαρμογές του υπολογιστικού εργαλείου εστίασαν στη Μεσόγειο θάλασσα και συγκεκριμένα στη Νοτιοανατολική Μεσόγειο. Οι ανάγκες της Ευρώπης για τροφοδοσία δισεκατομμυρίων κυβικών μέτρων φυσικού αερίου, αλλά και ο περιορισμός της εξάρτησης από συγκεκριμένες πηγές τροφοδοσίας οδήγησαν στην αναζήτηση νέων κοιτασμάτων που θα αποτελέσουν πηγές του ορυκτού καυσίμου. Οι ανακαλύψεις των τελευταίων χρόνων σε Ισραήλ, Αίγυπτο και Κύπρο έχουν φέρει στην επιφάνεια κοιτάσματα ικανά να καλύψουν τις ευρωπαϊκές ανάγκες. Ωστόσο, για τη μεταφορά φυσικού αερίου σε τόσο μεγάλες αποστάσεις χρειάζονται να τοποθετηθούν υποθαλάσσιοι αγωγοί πολλών χιλιομέτρων, σε μία περιοχή γεμάτη γεωκινδύνους, όπως η Ανατολική Μεσόγειος. Οι προβληματικές περιοχές πρέπει να εξετασθούν εκτενώς καθώς η παράκαμψη τους, αν και αποτελεί σημαντική λύση, πολλές φορές είναι δαπανηρή.

Το υπολογιστικό εργαλείο που αναπτύχθηκε, για να εφαρμοστεί και να δώσει αποτελέσματα, είναι απαραίτητη η εξέταση ενός συγκεκριμένου είδους γεωκινδύνου. Στις εφαρμογές που ακολουθούν ο προς ανάλυση γεωκίνδυνος είναι ο σεισμός και συγκεκριμένα τα ρήγματα, που αποτελούν μία από τις βασικές απειλές ενός υποθαλάσσιου αγωγού ή καλωδίου και πρέπει να εξετασθεί εάν είναι εφικτό για την κατασκευή να διασταυρώνεται μαζί τους ή εάν πρέπει να αποφεύγονται εξ' ολοκλήρου. Για λόγους υπέρ της ασφαλείας η κατηγορία των ρηγμάτων διευρύνθηκε και συμπεριλήφθηκαν περιοχές που η τοπογραφία τους υποδηλώνει την ύπαρξη κάποιου ανενεργού ρήματος που ενδέχεται κάποια στιγμή να αποτελέσει ζημιογόνο παράγοντα για την αρτιότητα του υποθαλάσσιου έργου.

Για την καλύτερη κατανόηση των εφαρμογών έχει σχεδιαστεί το παρακάτω λογικό διάγραμμα που εξηγεί περιεκτικά τον τρόπο σκέψης και τις ενέργειες που ακολουθεί το υπολογιστικό εργαλείο ώστε να φτάσει σε μία αν όχι τελική, πολύ καλή προσέγγιση της τελικής χάραξης του υποθαλάσσιου έργου μεγάλου μήκους που πρόκειται να κατασκευαστεί.



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα ροής εφαρμογών υπολογιστικού εργαλείου.

Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων στο περιβάλλον του G.I.S

Ένα σημαντικό αρνητικό σε υποθαλάσσια έργα μεγάλου μήκους είναι ότι τα δεδομένα, σε ψηφιακή μορφή, για τον πυθμένα της θάλασσας είναι δυσεύρετα. Το αρνητικό αυτό μεγιστοποιείται στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, καθώς οι πηγές από όπου μπορούν να αντληθούν ψηφιακά δεδομένα είναι ακόμα πιο λίγες.

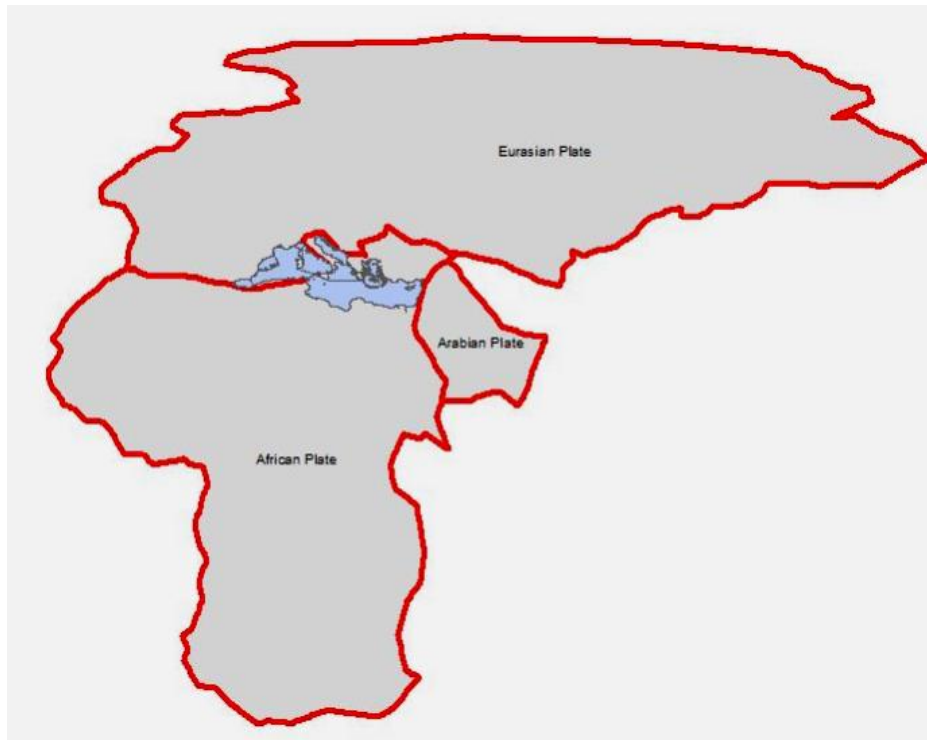
Τα περισσότερα δεδομένα που βρέθηκαν βρίσκονται σε μορφή shapefile και δέχτηκαν τις κατάλληλες επεξεργασίες στο προγραμματιστικό περιβάλλον του GIS. Ωστόσο, λόγω έλλειψης πληροφορίας, χρειάστηκε να γίνει ψηφιοποίηση αξιόλογων χαρτών που συλλέχθηκαν.

Η εύρεση των δεδομένων έγινε αφού καθορίστηκε η ευρύτερη περιοχή μελέτης. Οι εφαρμογές του υπολογιστικού εργαλείου που έχει αναπτυχθεί, έγιναν στον ευρύτερο χώρο της Μεσογείου θάλασσας δίνοντας έμφαση στη Νοτιοανατολική Μεσόγειο.



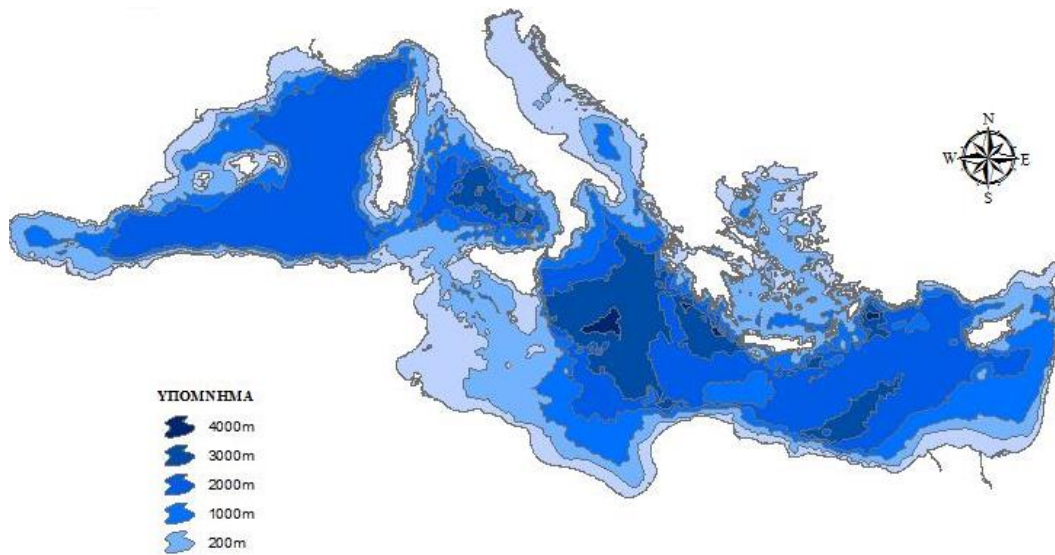
*Εικόνα 6.1: Δορυφορική εικόνα Μεσογείου θάλασσας.
(Πηγή: Google Earth)*

Αρχικά, επειδή ένα μεγάλο μέρος της εργασίας αναφέρεται στους γεωκινδύνους και όπως έχει ήδη αναλυθεί οι περιοχές που είναι περισσότερο ευάλωτες σε αυτούς είναι εκείνες που βρίσκονται στα όρια των τεκτονικών πλακών. Για την καλύτερη μελέτη της Μεσογείου από τεκτονική άποψη, αντλήθηκαν και επεξεργάστηκαν δεδομένα που προσδιορίζουν τη θέση της θάλασσας ως προς εκείνη των τεκτονικών πλακών και επιβεβαιώνουν όσα έχουν προηγηθεί που αναφέρουν ότι η περιοχή που μελετάται αποτελεί μία σεισμογενή περιοχή καθώς βρίσκεται στα όρια τριών τεκτονικών πλακών, της Ευρασιατικής, της Αφρικάνικης και της Αραβικής.



Εικόνα 6.2: Μεσόγειος θάλασσα & Τεκτονικές πλάκες (Αφρικανική, Ευρασιατική, Αραβική).

Το ψηφιακό υπόβαθρο της εργασίας που αναπαριστά τη θαλάσσια περιοχή της Μεσογείου, πάνω στο οποίο αναπτύχθηκαν όλα τα δεδομένα, αντλήθηκε από τον ιστότοπο, «www.marineregions.org». Βασικό δεδομένο για κάθε υποθαλάσσια εφαρμογή αποτελεί η βαθυμετρία. Ένας βαθυμετρικός χάρτης ισοδυναμεί με έναν τοπογραφικό χάρτη που χρησιμοποιείται σε επίγειες μελέτες χάραξης έργων μεγάλου μήκους. Είναι ιδιαίτερα σημαντικός καθώς δίνει μία γενική εικόνα του βυθού της περιοχής που εξετάζεται και βοηθάει την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την μορφολογία του βυθού. Συνήθως οι βαθυμετρικοί χάρτες έχουν σημαντικό ρόλο στην τελική χάραξη του αγωγού καθώς οι περιοχές με περισσότερο βάθος είναι ωφέλιμο να αποφεύγονται εφόσον για να φτάσει ο αγωγός ή το καλώδιο σε μεγάλα βάθη χρειάζεται περισσότερο μήκος και περισσότερη ενίσχυση λόγω των μεγάλων πιέσεων. Επομένως, η τοποθέτηση αγωγού σε περιοχές με υπερβολικά μεγάλο βάθος ζημιώνουν οικονομικά την κατασκευή.

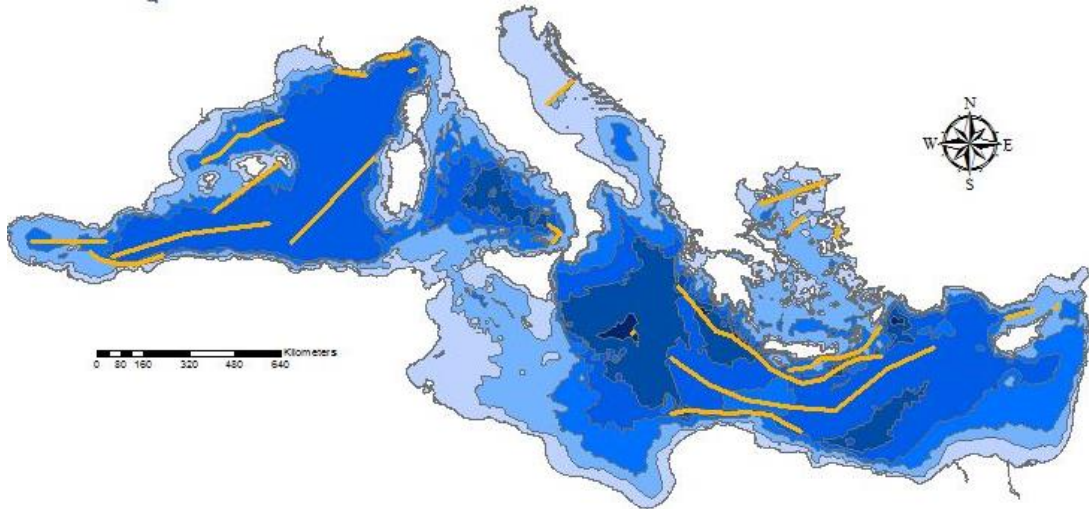


Εικόνα 6.3: Χάρτης βαθυμετρίας Μεσογείου θάλασσας.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για να αποδοθεί ο χάρτης με τη βαθυμετρία αντλήθηκαν από τον ιστότοπο «www.naturalearthdata.com», ο οποίος παρέχει βαθυμετρικές πληροφορίες σε μορφή shapefile πολυγωνικού χαρακτήρα, για παγκόσμιο επίπεδο.

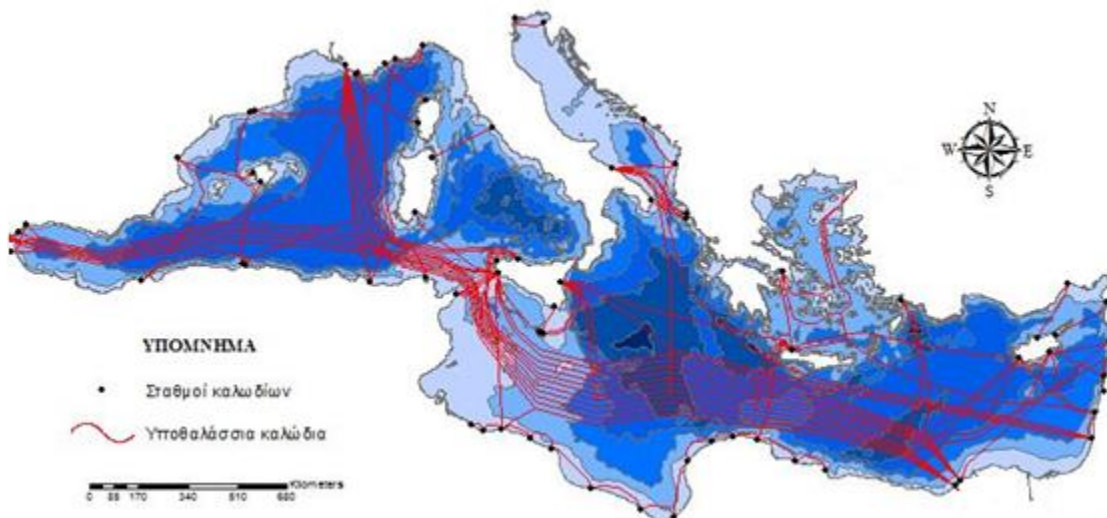
Εφόσον επιλέχθηκε η εστίαση στα υποθαλάσσια ρήγματα έγινε αναζήτηση της ψηφιακής μορφής των ρηγμάτων και γενικότερα περιοχών που παρουσιάζουν ασυνέχειες και ενδεχομένως να ευθύνεται η ύπαρξη κάποιου αδρανούς ρήγματος. Με τη βοήθεια της ηλεκτρονικής ιστοσελίδας του ινστιτούτου βαθυμετρίας των Ωκεανών, General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) και του National Geophysical Data Center του National Oceanic and Atmospheric Administration των ΗΠΑ, βρέθηκαν σε ψηφιακή μορφή οι γεωλογικές ασυνέχειες που μας ενδιαφέρουν, για παγκόσμιο επίπεδο.

Τα υποθαλάσσια και γενικά τα ρήγματα είναι δύσκολα στον εντοπισμό τους. Μόνο τα ρήγματα που το ίχνος τους φτάνει στη χερσαία επιφάνεια, είτε στον θαλάσσιο πυθμένα, μπορούν να εντοπιστούν. Όμως λόγω των διεργασιών που υφίσταται ο φλοιός της Γης εδώ και εκατομμύρια χρόνια, πολλά ρήγματα που είχαν σχηματιστεί στους ιστορικούς χρόνους και έδωσαν μεγάλους σεισμούς, είναι πιθανό να έχουν καλυφθεί από ιζηματογενείς στρώσεις πάχους πολλών μέτρων. Όταν ένα ρήγμα είναι καλυμμένο από ιζήματα δε σημαίνει ότι δεν είναι επικίνδυνο. Για αυτό, στον παρακάτω χάρτη επισημαίνονται όλες οι γεωλογικές ασυνέχειες γραμμικής μορφής που βρέθηκαν στον πυθμένα της Μεσογείου, για λόγους ασφάλειας της χάραξης.



Εικόνα 6.4: Γραμμικές γεωλογικές ασυνέχειες στο βυθό της Μεσογείου.

Ο βυθός της Μεσογείου είναι γεμάτος από συστήματα καλωδίων και αγωγών που έχουν δημιουργηθεί και αναπτυχθεί ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια. Για την ανάπτυξη του υπολογιστικού εργαλείου αλλά και των εφαρμογών της παρούσας εργασίας έγινε αναζήτηση με σκοπό να βρεθούν τα υποθαλάσσια έργα μεγάλου μήκους που βρίσκονται στο πυθμένα της Μεσογείου, ώστε να σχηματιστεί μία εικόνα για τη χάραξη που έχουν αλλά και για το πώς αντιμετωπίστηκαν οι γεωκίνδυνοι που παρουσιάζονται κατά την πορεία τους. Τα μόνα διαθέσιμα ψηφιακά δεδομένα που βρέθηκαν στο διαδίκτυο, και συγκεκριμένα στην ηλεκτρονική ιστοσελίδα «www.emodnet.eu», συλλέχθηκαν και δέχτηκαν επεξεργασία στο πρόγραμμα του GIS, αφορούν τα υποθαλάσσια καλώδια τηλεπικοινωνιών που έχουν τοποθετηθεί στο βυθό της Μεσογείου και τους σταθμούς τροφοδοσίας τους.

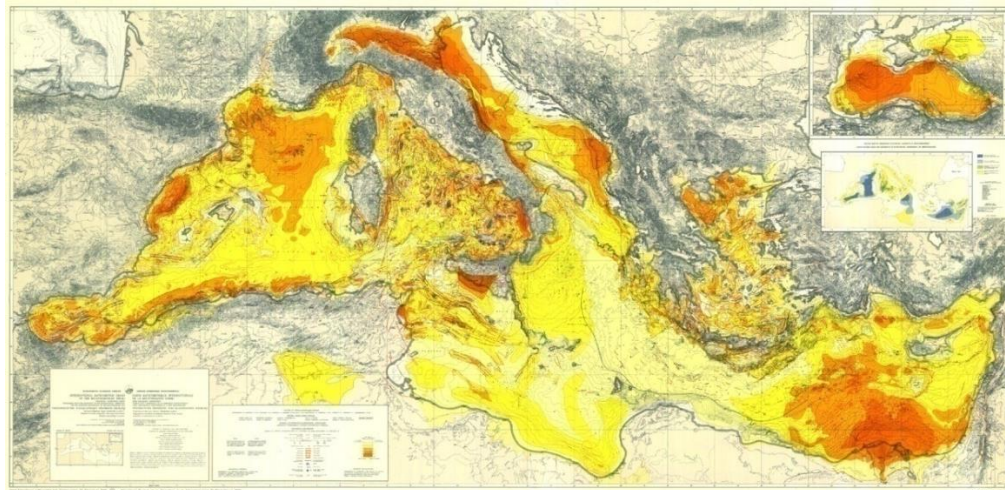


Εικόνα 6.5: Χάρτης υποθαλάσσιων καλωδίων & σταθμών καλωδίων στη Μεσόγειο θάλασσα.

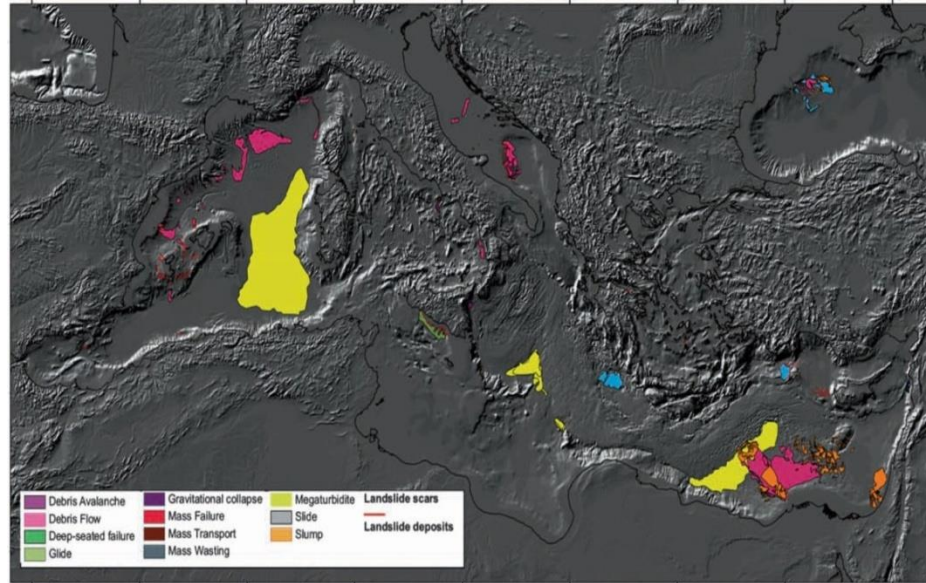
Χρήσιμη για την ορθότητα των ψηφιακών δεδομένων που αφορούν τα υποθαλάσσια καλώδια και τους σταθμούς τους, θα μπορούσε να φανεί και η σύγκριση με την Εικόνα 2.3 στη σελίδα 17 από τον ιστότοπο «www.telegeography.com».

Τέλος, αξιοποιήθηκαν ορισμένοι χάρτες που μπορούσαν να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες για την περιοχή μελέτης. Αρχικά, ο χάρτης της Εικόνας 6.6 με το πάχος των ιζημάτων που έχουν συγκεντρωθεί στη Μεσόγειο θάλασσα, αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένο για τον έλεγχο της ορθότητας του εργαλείου, καθώς όπως αναφέρεται και παρακάτω, το πάχος της ιζηματογενούς στρώσης αποτελεί αναπόσπαστο μέρος των αναλύσεων που έγιναν. Στη συνέχεια, πληροφορίες για τους γεωκινδύνους που αφορούν τις κατολισθήσεις δίνει ο χάρτης επισκιασμένου ανάγλυφου της Μεσογείου της Εικόνας 6.7. Έγινε προσπάθεια ψηφιοποίησης στο περιβάλλον του GIS, των κατολισθήσεων που αφορούν την Νοτιοανατολική Μεσόγειο.

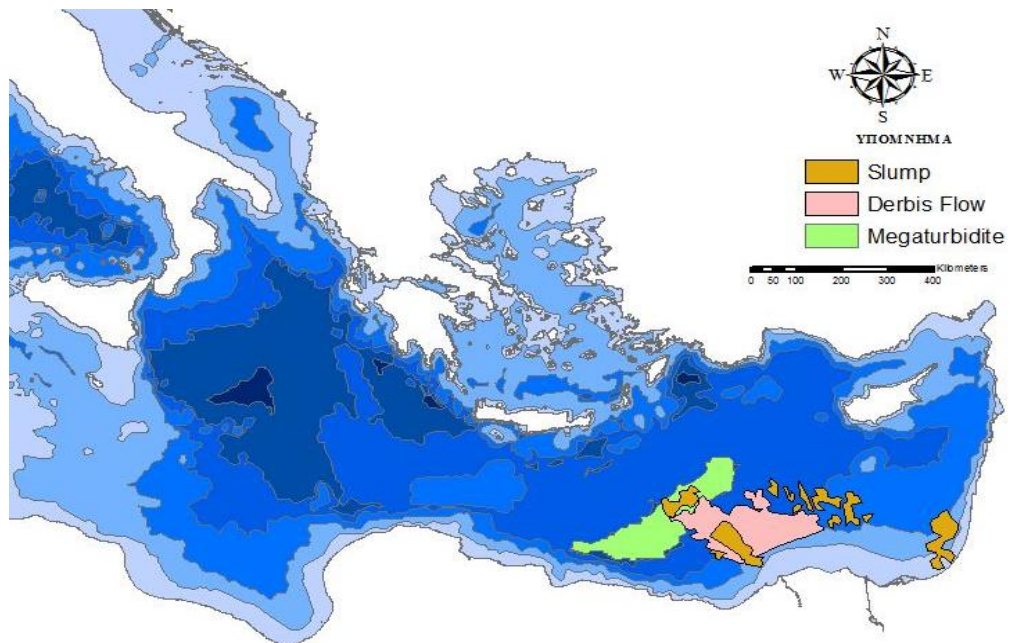
Σημειώνεται ότι με βάση την εικόνα με το πάχος των ιζημάτων, επιβεβαιώνονται όσα έχουν ήδη αναφερθεί σχετικά με την υψηλή συγκέντρωση ιζηματογενών στρώσεων στην Νοτιοανατολική Μεσόγειο, λόγω του ποταμού Νείλου και των υλικών που εναποθέτει στις εκβολές του για χιλιάδες χρόνια.



Εικόνα 6.6: Χάρτης πάχους ιζημάτων στον πυθμένα της Μεσογείου θάλασσας.
(Πηγή: *International Bathymetric Chart of Mediterranean*)



Εικόνα 6.7: Χάρτης υποθαλάσσιων κατολισθήσεων στη περιοχή της Μεσογείου.
(Πηγή: Camerlenghi et al., 2010)



Εικόνα 6.8: Χάρτης ψηφιοποιημένων υποθαλάσσιων κατολισθήσεων στη Νοτιοανατολική Μεσόγειο.

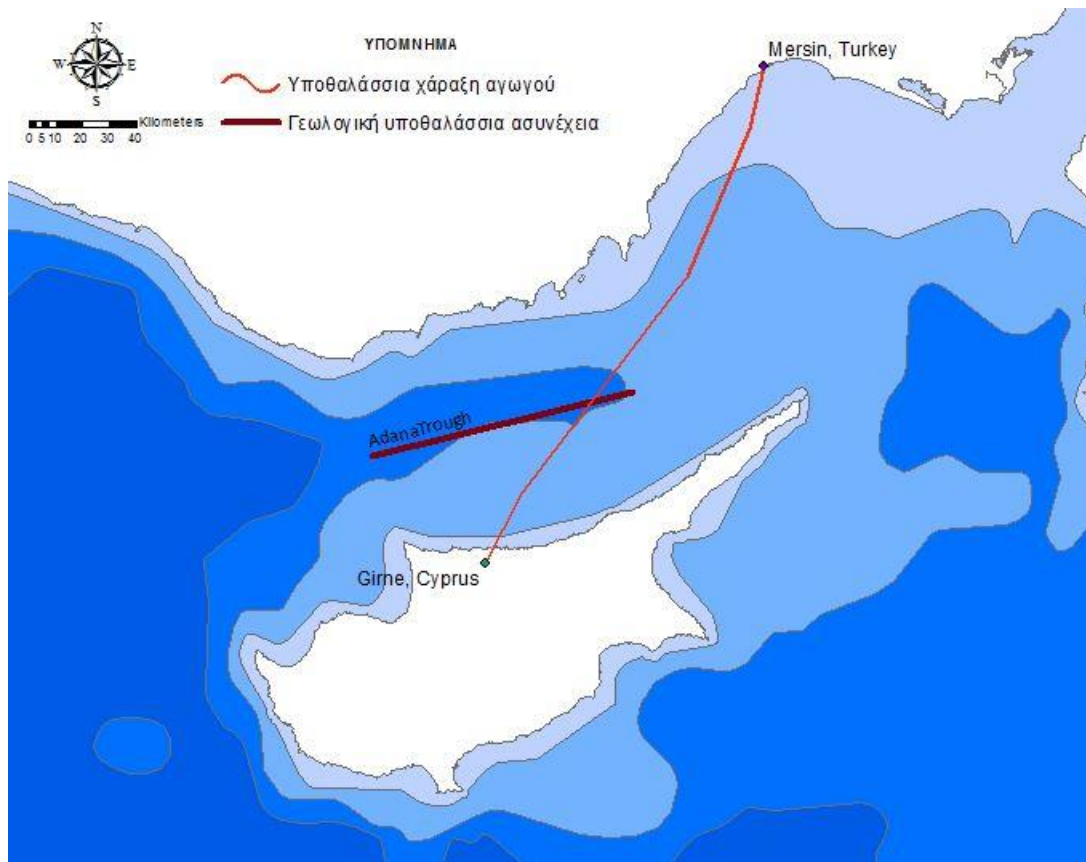
6.1 Εφαρμογή 1^η : Χάραξη αγωγού μεταξύ Κύπρου – Τουρκίας

Η πρώτη εφαρμογή έχει ως σκοπό τη διασύνδεση της Κύπρου με την Τουρκία με έναν υποθαλάσσιο αγωγό μεταφοράς φυσικού αερίου. Εξετάζοντας εκτενώς τον χάρτη που περιλαμβάνει τις υποθαλάσσιες διαδρομές των καλωδίων, έχει ήδη υλοποιηθεί η χάραξη ενός υποθαλάσσιου καλωδίου τηλεπικοινωνιών από την εταιρεία Turk Telecom. Το όνομα του καλωδίου είναι «Turcyos-1», και συνδέει τους επίγειους σταθμούς τροφοδοσίας της Κερύνειας (Girne, Cyprus) στο Βορειοανατολικό κομμάτι της νήσου με τον επίγειο σταθμό τροφοδοσίας της Μερσίνης (Mersin, Turkey).

Η χάραξη που είναι διαθέσιμη μπορεί να αποτελέσει τη βασική χάραξη του αγωγού που πρόκειται να τοποθετηθεί. Όμως μέσω του GIS, παραθέτοντας στο ίδιο θεματικό επίπεδο τη χάραξη που πρόκειται να ακολουθήσει ο αγωγός και τις γραμμικές γεωλογικές ασυνέχειες της περιοχής μελέτης, προκύπτει το γεγονός ότι η χάραξη διασταυρώνεται με μία γεωλογική ασυνέχεια, την Adana Trough όπως έχει αποδοθεί και στο χαρτογραφικό υπόβαθρο στην Εικόνα 6.10.



*Εικόνα 6.9: Περιοχή μελέτης 1^{ης} εφαρμογής
(Πηγή: Google Earth)*

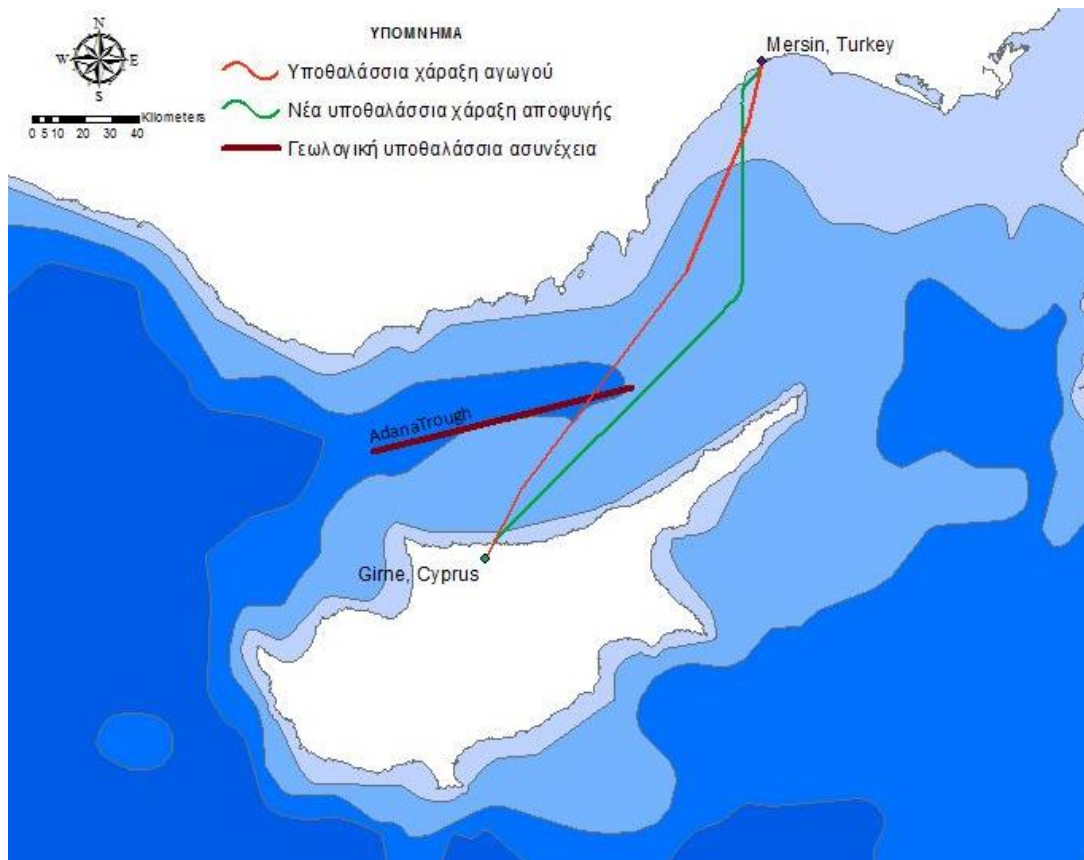


Εικόνα 6.10: Χάραξη υποθαλάσσιου αγωγού διασύνδεσης Κύπρου – Τουρκίας. Διασταύρωση χάραξης με γεωλογική ασυνέχεια.

Βήμα 1^ο : Αποφυγή προβληματικής περιοχής

Ένα πρώτο βήμα και το πιο εύκολο στην εφαρμογή του, είναι μέσα από μία σειρά εργασιών στο περιβάλλον του GIS, είναι να γίνει μία χάραξη που να αποφεύγει την προβληματική περιοχή εξ' ολοκλήρου.

Ακολουθεί η χάραξη που αποφεύγει την περιοχή που εμφανίζει τον γεωκίνδυνο τοποθετημένη σε έναν χάρτη που υπερθέτει την ασυνέχεια, την πρώτη χάραξη και τη νέα χάραξη αποφυγής,



Εικόνα 6.11: Χάραξη αποφυγής.

Είναι εμφανές από τον παραπάνω χάρτη ότι η νέα διαδρομή με το πράσινο χρώμα αποφεύγει πλήρως τη προβληματική περιοχή. Αυτό έγινε με τη βοήθεια των κατάλληλων εργαλείων στο GIS και τη διαμόρφωση των κριτηρίων από τον χρήστη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, επιλέχθηκε η χάραξη να αποφεύγει κατά 100% την περιοχή Adana Trough.

Περιγραφή διαδικασίας

Αφού έχουν εισαχθεί τα δεδομένα, έγινε η κατάλληλη επεξεργασία τους με σκοπό την υπέρθεση του θεματικού επιπέδου, των χαράξεων που ήδη υπάρχουν, της βαθυμετρίας και των υποθαλάσσιων γεωλογικών ασυνεχειών με γραμμικά χαρακτηριστικά. (Εικόνα 6.10). Επειδή πολλά από τα δεδομένα βρίσκονταν σε διαφορετικά συστήματα αναφοράς, μεταφέρθηκαν όλα σε κοινό σύστημα συντεταγμένων με τη βοήθεια του εργαλείου project.

Πριν ξεκινήσει η οποιαδήποτε χρήση εργαλείου, με τη βοήθεια του Catalog Window και Editor που παρέχει το ArcMap, ορίστηκαν και τοποθετήθηκαν τα σημεία προέλευσης και προορισμού της χάραξης.

Αρχικά έγινε η χρήση του εργαλείου Buffer ώστε τα γραμμικά προς αποφυγή χαρακτηριστικά να μετατραπούν σε πολυγωνική μορφή καθώς το εργαλείο Erase που θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω δεν δέχεται γραμμικές οντότητες.

Με τα εργαλεία της διαγραφής και της ένωσης (Union), δημιουργήθηκε ένα ενιαίο θεματικό επίπεδο που αποτελούνταν από το θαλάσσιο υπόβαθρο της Μεσογείου και τις γεωλογικές ασυνέχειες, περιβαλλόμενες από τη ζώνη του εργαλείου buffer.

Για την περαιτέρω επεξεργασία, έγινε η μετατροπή των πολυγωνικών οντοτήτων σε ψηφιδωτά αρχεία, με το εργαλείο Polygon to Raster. Με αυτόν τον τρόπο, τα δεδομένα μπορούν να εισαχθούν στο εργαλείο σταθμισμένης υπέρθεσης Weighted Overlay για τον καθορισμό του βάρους στα προς αποφυγή χαρακτηριστικά. Η εφαρμογή πραγματοποιείται την αποφυγή των γραμμικών ασυνεχειών, επομένως στη κλίμακα που βρίσκεται εντός του περιβάλλοντος του εργαλείου στις συγκεκριμένες τοποθετήθηκε ο μεγαλύτερος αριθμός το 9, ενώ στα υπόλοιπα χαρακτηριστικά πολύ μικρός αριθμός, το 1. Ένας δεύτερος τρόπος ίδιων αποτελεσμάτων με το εργαλείο Weighted Overlay, είναι η χρήση του εργαλείου Raster Calculator, στο οποίο γίνεται η εισαγωγή των επαναταξινομημένων, με τη χρήση του εργαλείου Reclassify, τιμών των ψηφιακών αρχείων. Εφόσον το κριτήριο στην εφαρμογή είναι μοναδικό, η συνθήκη που διαμορφώνεται στο περιβάλλον του Raster Calculator πολλαπλασιάζει το αρχείο με 1.

Με δεδομένα τα αποτελέσματα της σταθμισμένης υπέρθεσης, έγινε η εφαρμογή των αλληλοεξαρτώμενων εργαλείων Cost Distance και Cost Path. Πρώτα χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Cost Distance, με αρχεία εισόδου το σημείο προέλευσης και το αρχείο αποτελέσματος του Weighted Overlay, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Cost Path, με αρχείο εισόδου το σημείο προορισμού και τα αρχεία που προέκυψαν από το Cost Distance, όπως «CosDis» και «Backlink». Το τελικό αποτέλεσμα του εργαλείου ήταν η ζητούμενη χάραξη αποφυγής. Για τη καλύτερη απεικόνισή της, με το εργαλείο Raster to Polyline, μετατράπηκε από ψηφιδωτό αρχείο σε γραμμική οντότητα. Τέλος για λόγους χαρτογραφικής απόδοσης, έγινε η εξομάλυνση της εν λόγω οντότητας με τη χρήση του εργαλείου Smoothline.

Βήμα 2^ο : Υπολογιστικός έλεγχος διάρρηξης ρήγματος δια μέσω ιζηματογενούς στρώσης

Η λύση της αποφυγής δεν αποτελεί την ενδεδειγμένη καθώς υπάρχει κίνδυνος πολλαπλασιασμού του τελικού κόστους καθώς για να αποφευχθεί μία περιοχή απαιτείται και μεγαλύτερο μήκος κατασκευής. Επομένως, είναι απαραίτητη η διεξοδική ανάλυση της περιοχής του γεωκινδύνου με τη βοήθεια του λογισμικού ABAQUS.

Με τη χρήση των τύπων του υποκεφαλαίου 5.5 έγινε μία παραμετρική ανάλυση του πυθμένα της θάλασσας κάτω από τον οποίο βρίσκεται το πιθανό ρήγμα που υποδηλώνει η ύπαρξη της ασυνέχειας στη περιοχή Adana.

Αναλυτικότερα, θεωρήθηκε ότι το ρήγμα είναι κανονικό με γωνία διάρρηξης τις 30°. Το πάχος της ιζηματογενούς στρώσης μελετήθηκε για 50, 100 και 150m, ενώ ο αγωγός που θα τοποθετηθεί θα έχει εξωτερική διάμετρο 0.9144m.

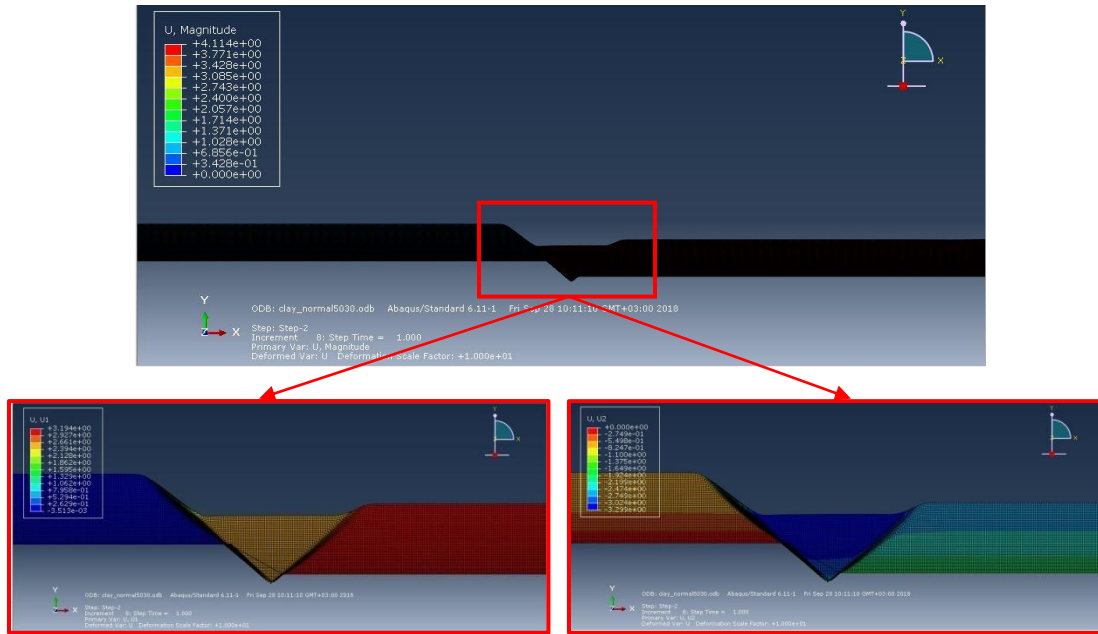
Για γωνία διάρρηξης 30°, προέκυψαν οι παρακάτω τιμές,

$$\Delta y = 1.8288\text{m και } \Delta x = 3.1676.$$

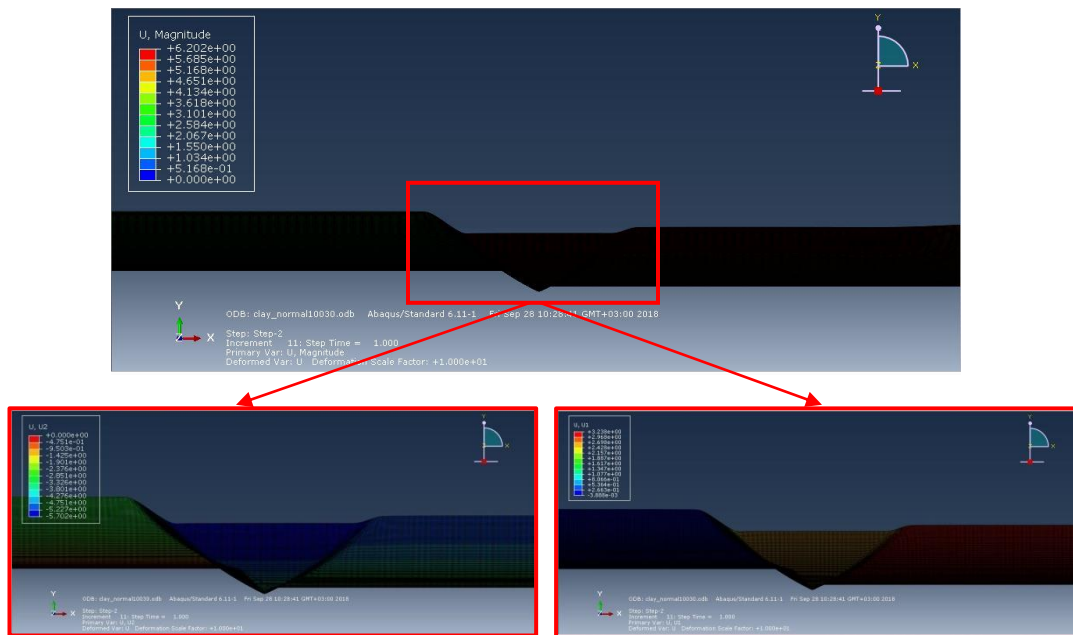
Η διαφορική καθίζηση της ιζηματογενούς στρώσης λόγω της διάρρηξης κανονικού ρήγματος για τις διαφορετικές τιμές πάχους της, παρουσιάζονται όπως προέκυψαν από το ABAQUS.

Για την καλύτερη κατανόηση των γραφικών αποτελεσμάτων, η απεικόνισή τους έγινε με συντελεστή παραμόρφωσης 10.

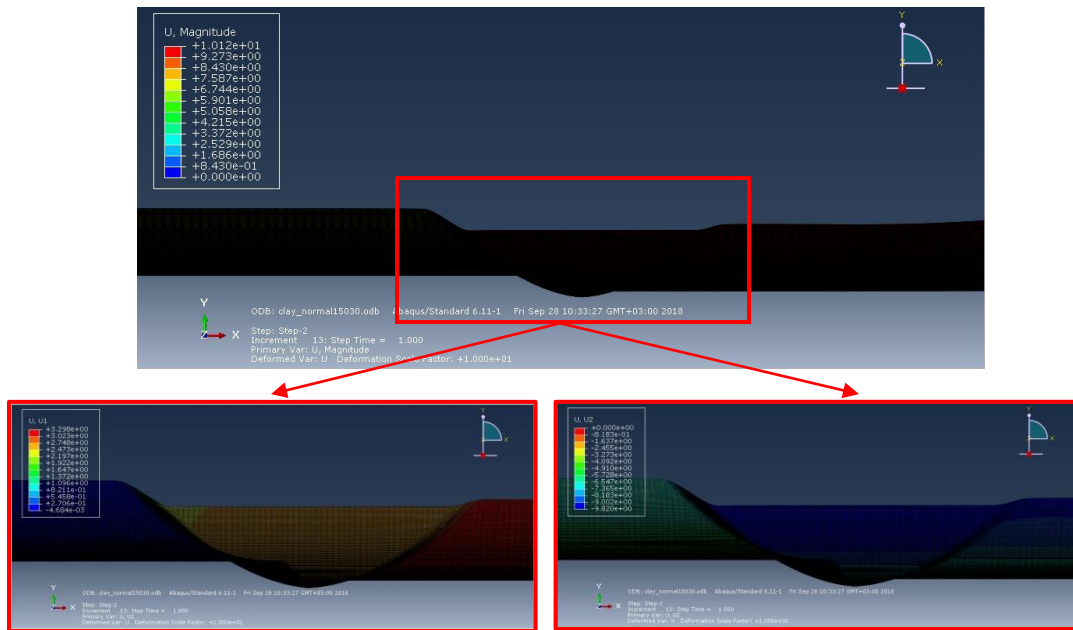
Τα αποτελέσματα που απαιτούνται να εξαχθούν από τις αναλύσεις του παρόντος βήματος, αναφέρονται στις μετατοπίσεις που δέχεται η επιφάνεια της ιζηματογενούς στρώσης λόγω της διάρρηξης του ρήγματος και συγκεκριμένα, οι μετατοπίσεις κατά την οριζόντια διεύθυνση (U_1) και οι μετατοπίσεις κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (U_2).



Εικόνα 6.12: Αναπαράσταση διάρρηξης ρήγματος με πάχος ιζηματογενούς στρώσης 50m και γωνία διάρρηξης 30°.



Εικόνα 6.13: Αναπαράσταση διάρρηξης ρήγματος με πάχος ιζηματογενούς στρώσης 100m και γωνία διάρρηξης 30°.



Εικόνα 6.14: Αναπαράσταση διάρρηξης ρήγματος με πάχος ιζηματογενούς στρώσης 150m και γωνία διάρρηξης 30°.

Βήμα 3ο: Υπολογιστικός έλεγχος αλληλεπίδρασης αγωγού & πυθμένα της θάλασσας με την ύπαρξη ή μη ιζηματογενούς στρώσης.

Με δεδομένες τις μετατοπίσεις που υφίσταται η επιφάνεια του βυθού λόγω της διάρρηξης του ρήγματος, έγινε λεπτομερής εξέταση στις παραμορφώσεις που δέχεται ο αγωγός εξαιτίας αυτών.

Τα δεδομένα συμπλήρωσαν οι τιμές που έδωσε ο χρήστης και τα αποτελέσματα των τύπων του υποκεφαλαίου 5.6, τα οποία όλα αναφέρονται στον αγωγό και στα ελατήρια που χρησιμοποιούνται. Αναλυτικότερα, έχει ήδη δοθεί η εξωτερική διάμετρος του αγωγού $D = 0.9144\text{m}$, ενώ συμπληρώνεται, το πάχος του αγωγού 0.027m , η επένδυση λόγω εξωτερικής διάβρωσης 0.003m και η επένδυση λόγω σκυροδέματος 0.055m . Επομένως με βάση τους τύπους που έχουν αναπτυχθεί υπολογίζεται,

$$D_{\text{tot}} = 1.0304\text{m}$$

$$V_{\text{tot}} = \pi * \left(\frac{D_{\text{tot}}}{2}\right)^2 = 0.833876205\text{m}^3$$

$$V_{\text{εσωτερικό}} = \pi * \left(\frac{D - 2 * \text{πάχος αγωγού}}{2}\right)^2 = 0.581420961\text{m}^3$$

$$V_{\text{εξωτερικό}} = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 0.656692893\text{m}^3$$

$$V_{\text{αγωγού}} = V_{\text{εξωτερικό}} - V_{\text{εσωτερικό}} = 0.075271932\text{m}^3$$

$$V_{\text{διάβρωσης}} = \pi * \left(\frac{D + 2 * \text{πάχος λεπτού στρώματος επένδυσης}}{2}\right)^2 - V_{\text{εξωτερικό}} = 0.008646291\text{m}^3$$

$$V_{\text{σκυροδέματος}} = V_{\text{tot}} - (V_{\text{εξωτερικό}} + V_{\text{διάβρωσης}}) = 0.168537021\text{m}^3$$

$$W_{\text{αγωγού}} = \bar{\gamma}_{\text{άλυβα}} * V_{\text{αγωγού}} = 5.908846635 \text{ kN/m}$$

$$W_{\text{σκυροδέματος}} = \bar{\gamma}_{\text{σκυροδέματος}} * V_{\text{σκυροδέματος}} = 4.213425527 \text{ kN/m}$$

$$W_{\text{tot}} = W_{\text{αγωγού}} + W_{\text{σκυροδέματος}} = 10.12227216 \text{ kN/m}$$

$$A = V_{\text{tot}} * \text{πυκνότητα θαλασσινού νερού } 1.025 \text{ Kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2 = 8.384833713 \text{ kN/m}$$

Για τα αξονικά ελατήρια,

$$T_u = \pi * D * a * c + \pi * D * H * \bar{\gamma} * \frac{1+K_o}{2} * \tan\delta = 32.67598904 \text{ kN/m}$$

Για τα οριζόντια ελατήρια,

$$p_u = 0.2 * w_s + 3 * z * \sqrt{D * \bar{\gamma} * S_u} = 22.53532802 \text{ kN/m}$$

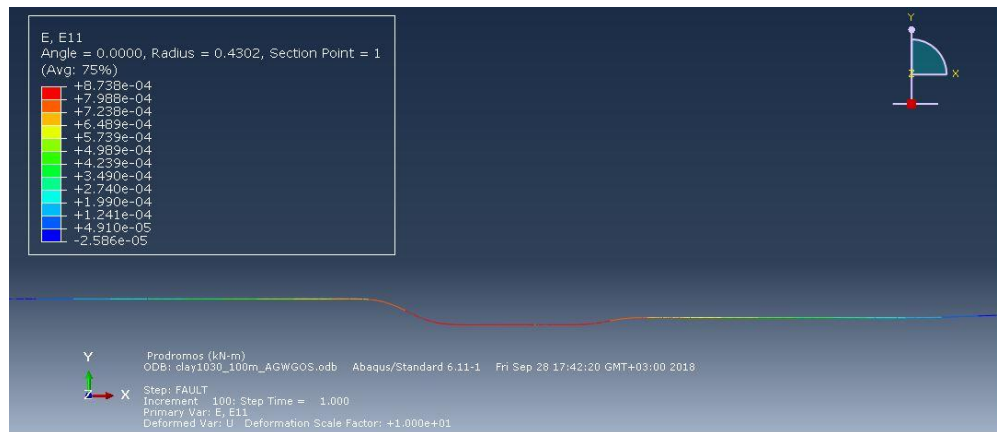
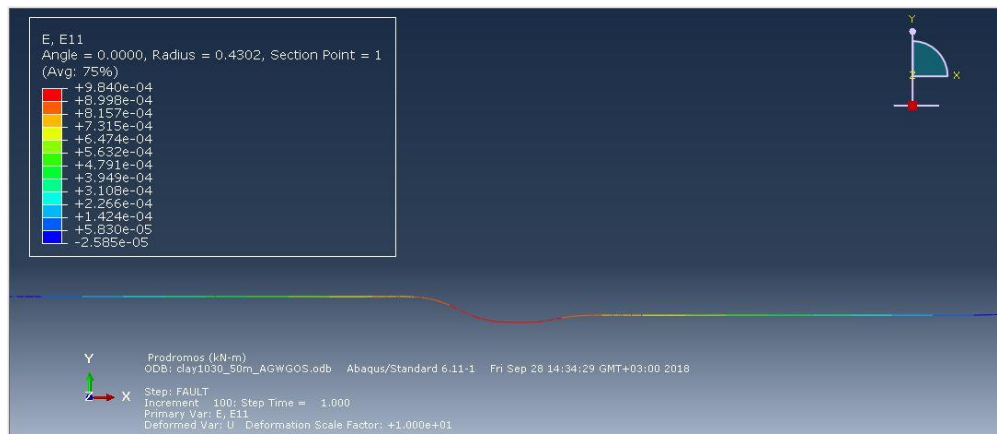
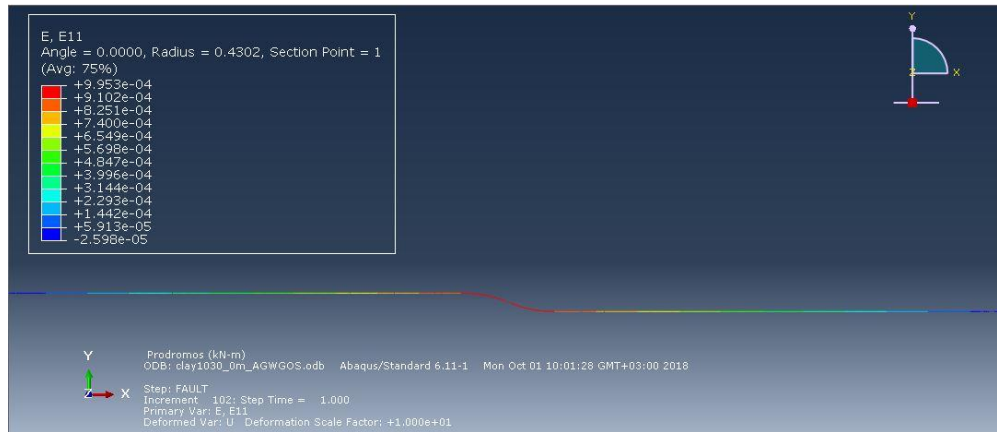
Για τα κατακόρυφα ελατήρια προς τα άνω και προς τα κάτω αντίστοιχα,

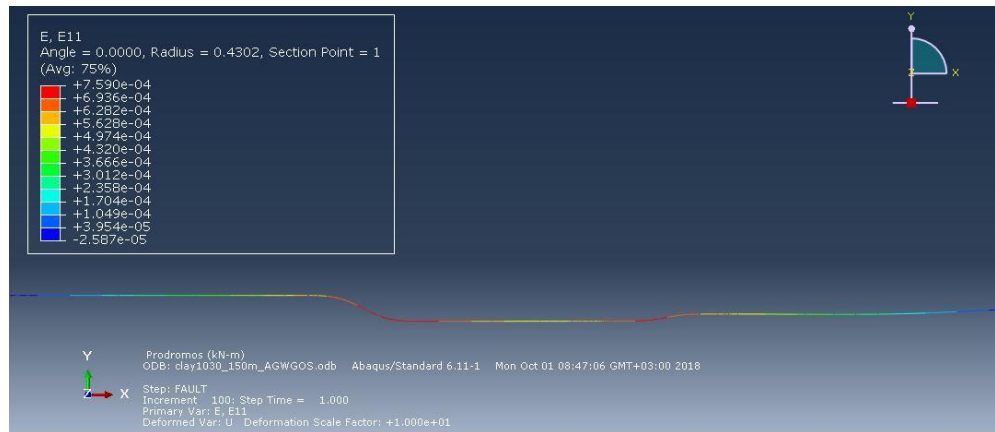
$$q_u = w_s + \alpha + S_u * D * \sin\theta = 22.53961915 \text{ kN/m}$$

$$q_d = N * D * S_u = 123.648 \text{ kN/m}$$

Τέλος, για τον καθορισμό των πιέσεων που υφίσταται ο αγωγός, η εσωτερική πίεση είναι σταθερή ίση με 11000 kPa και για την εξωτερική, για βάθος 1032m, είναι ίση με 10377.018kPa.

Τα αποτελέσματα που είναι απαραίτητο να εξαχθούν από το συγκεκριμένο βήμα αφορούν τις παραμορφώσεις που δέχεται ο αγωγός. Στις ήδη υπάρχουσες περιπτώσεις των ιζηματογενών στρώσεων με πάχος 50, 100, 150m προστίθεται και η περίπτωση να μην υπάρχει ιζηματογενής στρώση, ώστε ο αγωγός να εναποτίθεται κατευθείαν επάνω στο ρήγμα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα γραφικά αποτελέσματα που προέκυψαν στο ABAQUS.





Εικόνα 6.15: Παραμορφώσεις αγωγού για 0, 50, 100, 150m πάχους ιζηματογενούς στρώσης.

Βήμα 4ο: Εισαγωγή παραμορφώσεων στο GIS και δημιουργία συνθήκης ελέγχου

Έπειτα και από την εξαγωγή των παραμορφώσεων που δέχεται ο αγωγός από τη διάρρηξη του ρήγματος για τις διάφορες περιπτώσεις που έχουν αναλυθεί, έγινε εισαγωγή των μεγαλύτερων κατά απόλυτη τιμή στο πρόγραμμα του GIS. Η εισαγωγή έγινε για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν και αναφέρονται παραπάνω, για την απευθείας τοποθέτηση του αγωγού στην γεωλογική ασυνέχεια και για πάχος ιζηματογενούς στρώσης 50, 100 και 150m.

Πίνακας 6.1: Μέγιστες παραμορφώσεις του υποθαλάσσιου αγωγού για κάθε περίπτωση πάχους ιζηματογενούς στρώσης.

Πάχος ιζηματογενούς στρώσης.(m)	Μέγιστες κατά απόλυτη τιμή παραμορφώσεις που υφίσταται ο αγωγός.
0	0.000995
50	0.000984
100	0.000874
150	0.000759

history	comments	Shape_Length	e11_0m	e11_50m	e11_100m	e11_150m
	Formerly, Adana (or Cilicia) Trough.	100104.202636	0.000995	0.000984	0.000874	0.000759

Εικόνα 6.16: Εισαγωγή παραμορφώσεων αγωγού για τις διάφορες τιμές πάχους ιζηματογενούς στρώσης στον πίνακα χαρακτηριστικών στο ArcMap.

Εφόσον έχει πραγματοποιηθεί η διασύνδεση των δύο λογισμικών, με μία διαδικασία σύγκρισης που περιγράφεται παρακάτω προέκυψε το τελικό αποτέλεσμα της έγκρισης ή μη της διασταύρωσης της χάραξης με την προβληματική περιοχή.

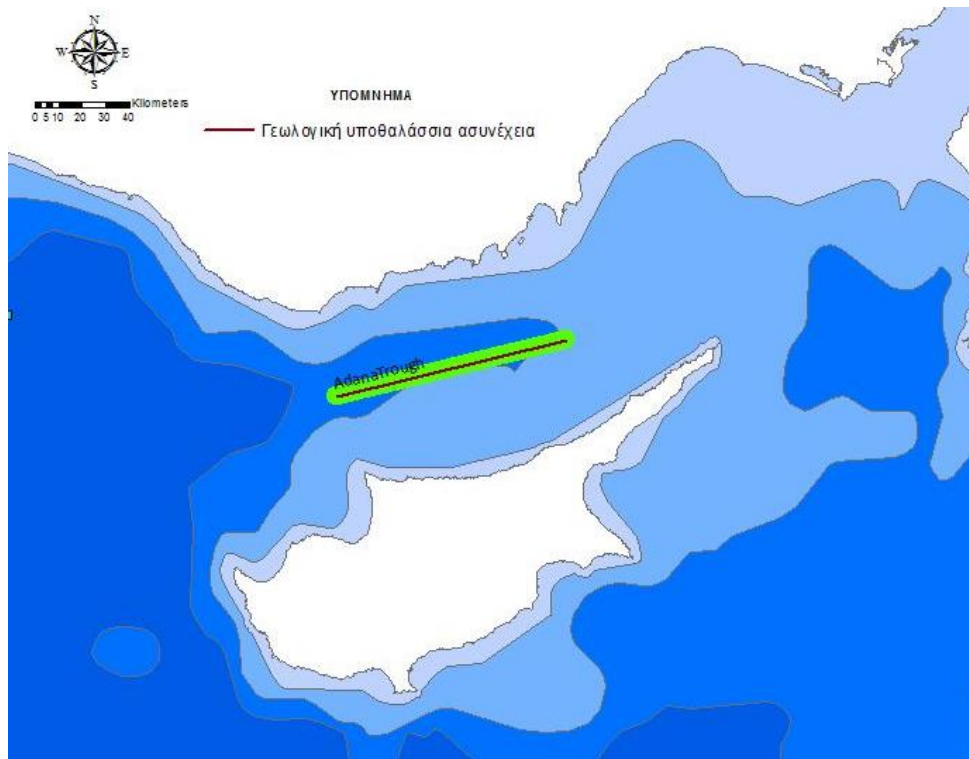
Απαραίτητο αναφοράς είναι πως για την σύγκριση η βασική τιμή που πρέπει να χρησιμοποιείται είναι το 0.5%. Όμως για λόγους της εφαρμογής το ποσοστό αυτό μεταβλήθηκε. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις, η πρώτη περίπτωση αφορούσε τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου με τιμή ελέγχου το 0.5% και η δεύτερη το 0.05%.

1^η περίπτωση: Ποσοστό ελέγχου 0.5%.

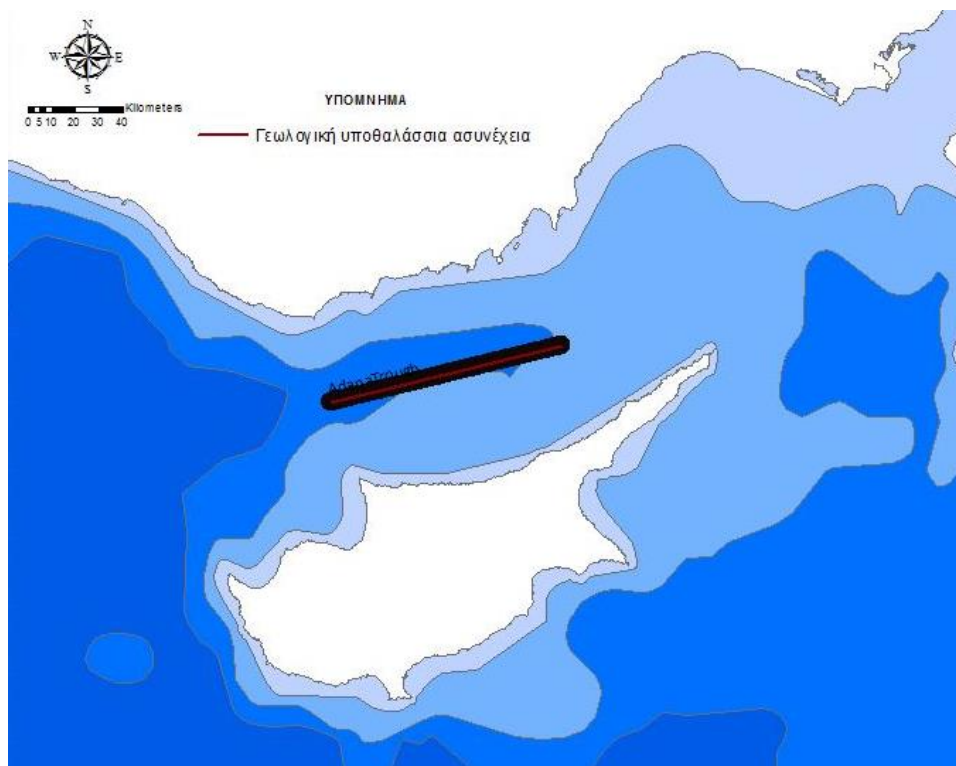
Στη συγκεκριμένη περίπτωση με δεδομένα τις τιμές που έχουν εισαχθεί στην Εικόνα 6.16 το εργαλείο εγκρίνει τη διασταύρωση της χάραξης με τη γεωλογική ασυνέχεια καθώς όλες οι τιμές είναι μικρότερες του 0.005 (0.5%). Επομένως το αποτέλεσμα που θα εμφανιστεί στο περιβάλλον του GIS θα είναι η Εικόνα 6.17 που ακολουθεί, η οποία παρουσιάζει την περιοχή γεωκινδύνου με πράσινο χρώμα.

2^η Περίπτωση: Ποσοστό ελέγχου 0.05%.

Το συγκεκριμένο ποσοστό είναι αρκετά πιο μικρό από τις τιμές των μέγιστων παραμορφώσεων που δέχεται ο αγωγός, ο οποίος πρόκειται να διασταυρωθεί με την προβληματική περιοχή. Η επιβεβαίωση αυτού γίνεται από τη σύγκριση των δεδομένων τιμών με το 0.0005, οι οποίες το υπερβαίνουν. Επομένως η διασταύρωση αγωγού και γεωλογικής ασυνέχειας δεν μπορεί να επιτευχθεί και το πρόγραμμα θα εμφανίσει την ακόλουθη Εικόνα 6.18, χρησιμοποιώντας το μαύρο χρώμα για τον γεωκίνδυνο.



Εικόνα 6.17: Έγκριση διασταύρωσης με περιοχή γεωκινδύνου.



Εικόνα 6.18: Απόρριψη διασταύρωσης με περιοχή γεωκινδύνου.

Περιγραφή διαδικασίας που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της σύγκρισης στο GIS.

Για τη σύνδεση των δύο προγραμμάτων, χρησιμοποιήθηκε η ικανότητα της εκτέλεσης εργασιών στον attribute table του ArcMap, παρόμοιων με εκείνων που γίνονται στο περιβάλλον του Excel. Η επεξεργασία των συγκεκριμένων πινάκων έγινε μέσα από την εργαλειοθήκη επεξεργασίας (editor toolbox) που παρέχει το πρόγραμμα και δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επέμβει στις τιμές των χαρακτηριστικών κάθε θεματικού επιπέδου.

Στο θεματικό επίπεδο της γεωλογικής ασυνέχειας δημιουργήθηκαν νέα κελιά στον πίνακα ιδιοτήτων και μέσα σε αυτά έγινε εισαγωγή των μέγιστων τιμών παραμορφώσεων για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε. Η συνθήκη ελέγχου διαμορφώθηκε μέσα από το υπολογιστικό περιβάλλον του εργαλείου Raster Calculator και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση συγκρίσεων Con.

Βήμα 5^ο: Τελική απόφαση για την υλοποίηση της χάραξης

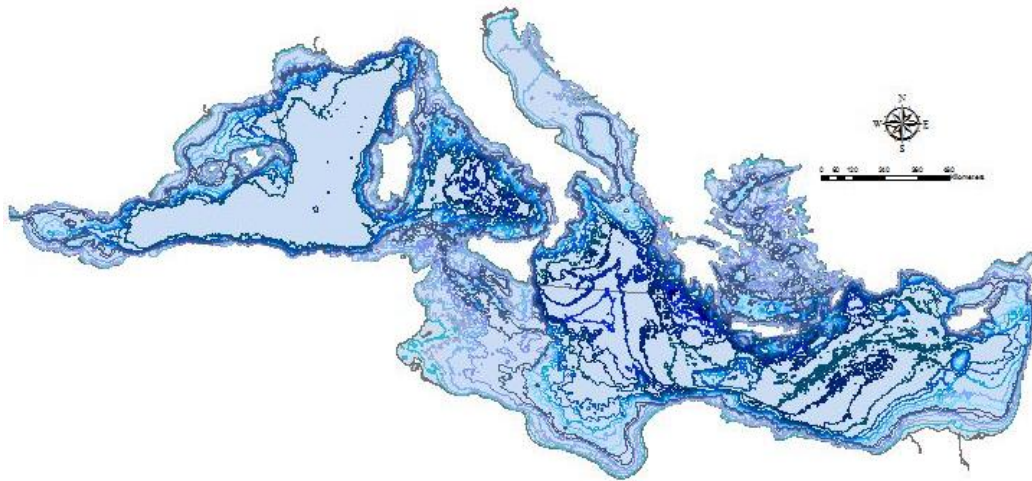
Πλέον το εργαλείο έχει αποφασίσει εάν είναι δυνατή η διασταύρωση του αγωγού με τον συγκεκριμένο γεωκίνδυνο. Στην περίπτωση που δεν εγκρίνει το υπολογιστικό εργαλείο την αλληλεπίδραση της ασυνέχειας με τον αγωγό, ο χρήστης οδηγείται στην εφαρμογή της χάραξης αποφυγής, ενώ αν αντιθέτως εγκριθεί η διασταύρωση της κατασκευής με τον γεωκίνδυνο, τότε υλοποιείται η αρχική βασική χάραξη.

Βήμα 6^ο: Βοηθητικές εφαρμογές

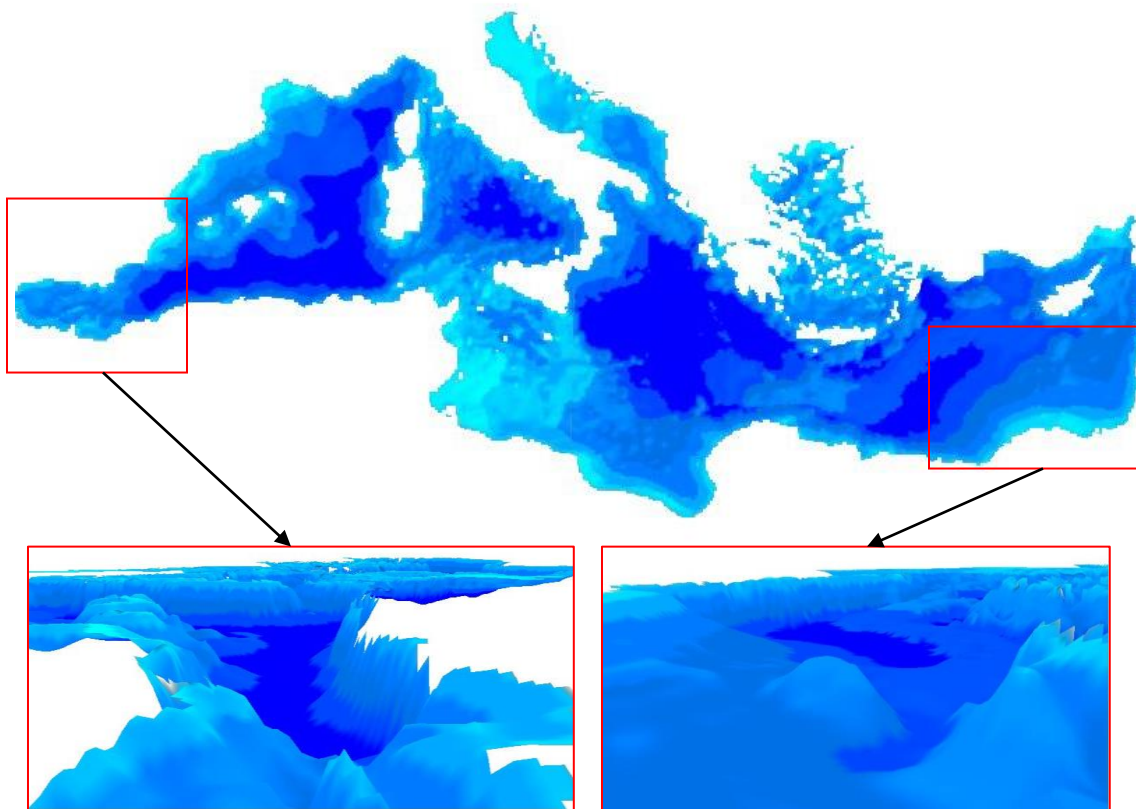
3D-αναπαράσταση & Μηκοτομή χαράξεων

Οι δύο υποστηρικτικές απεικονίσεις έγιναν με τη χρήση του προγράμματος ArcScene, μία από τις εφαρμογές που διαθέτει το πρόγραμμα του ArcGIS και έχουν περιγραφεί παραπάνω.

Για την αναπαράσταση και στις τρεις διαστάσεις δημιουργήθηκε το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους αποτελούμενο από τη βαθυμετρική πληροφορία της Μεσογείου, κατόπιν κατάλληλων επεξεργασιών. Τα δεδομένα που βοήθησαν στη δημιουργία του ήταν οι ισοβαθείς καμπύλες που συλλέχθηκαν σε μορφή shapefile από την ηλεκτρονική ιστοσελίδα του ινστιτούτου βαθυμετρίας των Ωκεανών, General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) και το περίγραμμα της Μεσογείου.

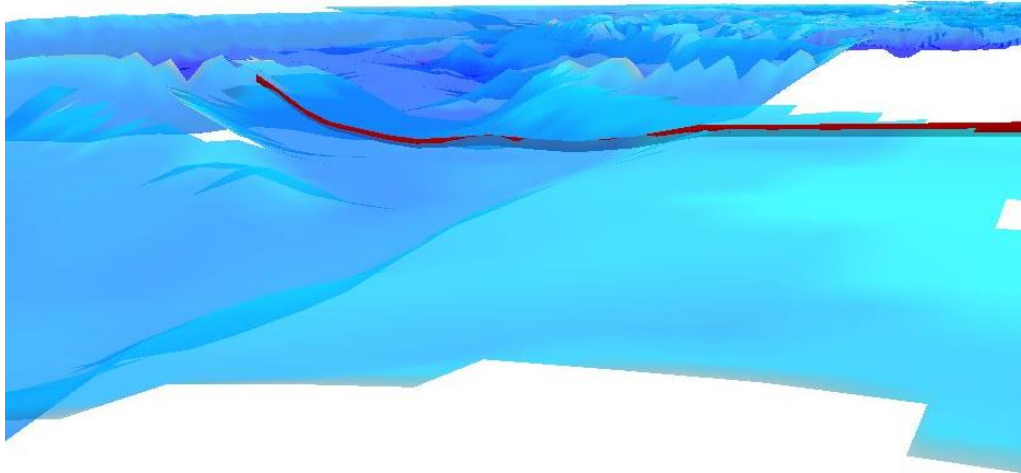


Εικόνα 6.19: Ισοβαθείς καμπύλες Μεσογείου.

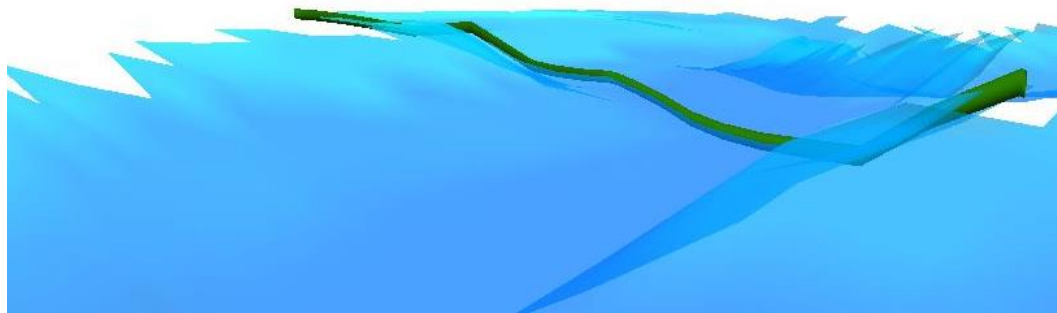


Εικόνα 6.20: Τρισδιάστατη απεικόνιση Μεσογείου.

Στο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους τοποθετήθηκαν για αναπαράσταση και οι δύο χαράξεις που προέκυψαν κατά την πρώτη εφαρμογή, η βασική και η χάραξη αποφυγής. Όπως φαίνεται και στις εικόνες που ακολουθούν (6.21) και (6.22) οι διαδρομές προσαρμόζονται στο ανάγλυφο της περιοχής, για αυτό αν και βοηθητική εφαρμογή με χαμηλή ποιότητα των υψομετρικών δεδομένων, το DEM που δημιουργήθηκε αποτέλεσε χρήσιμο μέσο εξαγωγής γενικών και ειδικών συμπερασμάτων για την τοπογραφία του πυθμένα της περιοχής μελέτης.

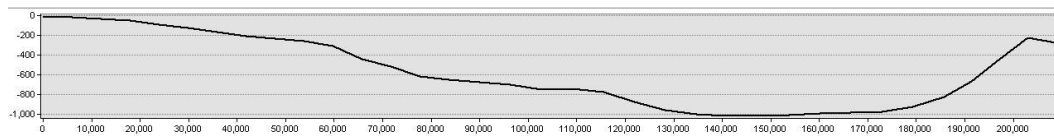


Εικόνα 6.21: Βασική χάραξης υποθαλάσσιου αγωγού. Αριστερά το σημείο έναρξης στην Κύπρο και δεξιά το σημείο προορισμού στην Τουρκία.

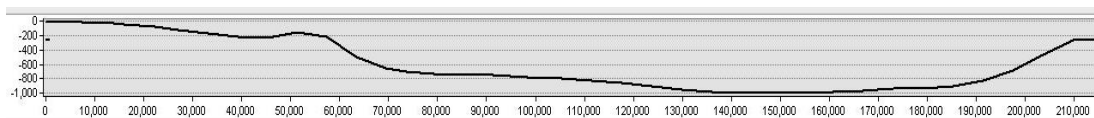


Εικόνα 6.22: Χάραξη αποφυγής. Δεξιά είναι το σημείο έναρξης στην Κύπρο και αριστερά το σημείο λήξης στην Τουρκία.

Οι μηκοτομές των δύο αυτών χαράξεων που προέκυψαν απεικονίζονται στις αμέσως επόμενες εικόνες.



Εικόνα 6.23: Μηκοτομή βασικής χάραξης. Σημείο έναρξης Μερσίνη Τουρκίας και σημείο λήξης Κερόνεια Κύπρου.



Εικόνα 6.24: Μηκοτομή χάραξης αποφυγής. Σημείο έναρξης Μερσίνη Τουρκίας και σημείο λήξης Κερόνεια Κύπρου.

Περιγραφή διαδικασίας

Για τη δημιουργία του Ψηφιακού Υψομετρικού Μοντέλου (D.E.M) του πυθμένα της Μεσογείου χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Topo to Raster και για την εξαγωγή της μηκοτομής της κάθε χάραξης το εργαλείο Stack Profile.

Αναλυτικότερα, έγινε εξαγωγή της υψομετρικής πληροφορίας των βαθυμετρικών δεδομένων που υπήρχαν σε δυσδιάστατη απεικόνιση σε γραμμική μορφή (Εικόνα 6.19) με τη βοήθεια του εργαλείου Table to Excel. Αφού έγιναν οι κατάλληλες επεξεργασίες των τιμών στο περιβάλλον του Excel, έγινε η εισαγωγή τους στο περιβάλλον του ArcGIS με τη μορφή πίνακα χαρακτηριστικών, χρησιμοποιώντας το εργαλείο Excel to Table. Επιπλέον, στην επιφάνεια εργασίας του ArcScene εφαρμόστηκε το εργαλείο Topo to Raster, με αρχεία εισόδου τις ισοβαθείς καμπύλες με τις νέες τιμές και το περίγραμμα της Μεσογείου. Για την ενίσχυση της απόδοσης του αποτελέσματος, χρησιμοποιήθηκαν και τα εργαλεία Fill και Hillshade με την αντίστοιχη σειρά. Σκοπός τους όπως έχει ήδη αναφερθεί κατά τη περιγραφή τους, είναι να δώσουν στο μοντέλο την αίσθηση του ανάγλυφου και να εξομαλύνουν πιθανές ατέλειες.

Τέλος, η μηκοτομή αποτελεί ένα από τα δύο αρχεία εξαγωγής του εργαλείου Stack Profile. Για τη χρήση του εργαλείου απαραίτητη προϋπόθεση αποτελούν η είσοδος του Ψηφιακού Υψομετρικού Μοντέλου που δημιουργήθηκε παραπάνω και η είσοδος των χαράξεων ως γραμμικές οντότητες. Το δεύτερο αρχείο εξαγωγής του εργαλείου είναι ένας πίνακας που περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την απόδοση του γραφήματος της μηκοτομής.

6.2 Εφαρμογή 2^η : Χάραξη αγωγού μεταξύ Κύπρου – Κρήτης

Η δεύτερη εφαρμογή αναφέρεται σε ένα πραγματικό έργο που θα συνδέει την Ανατολική Μεσόγειο και συγκεκριμένα το Ισραήλ με την Ελλάδα δια μέσω της Κύπρου, με δυνατότητα προέκτασης από τον Ελληνικό χώρο προς εκείνο της Ιταλίας. Ο αγωγός φυσικού αερίου με όνομα «East Med» συγκροτεί ένα χερσαίο και υποθαλάσσιο δίκτυο συνολικού μήκους 1900 χιλιομέτρων, όπου τα 1300 είναι υποθαλάσσια και τα 600 χερσαία. Πιο συγκεκριμένα, η διαδρομή του αγωγού χωρίζεται στις παρακάτω υπό – διαδρομές (IGI POSEIDON, 2018),

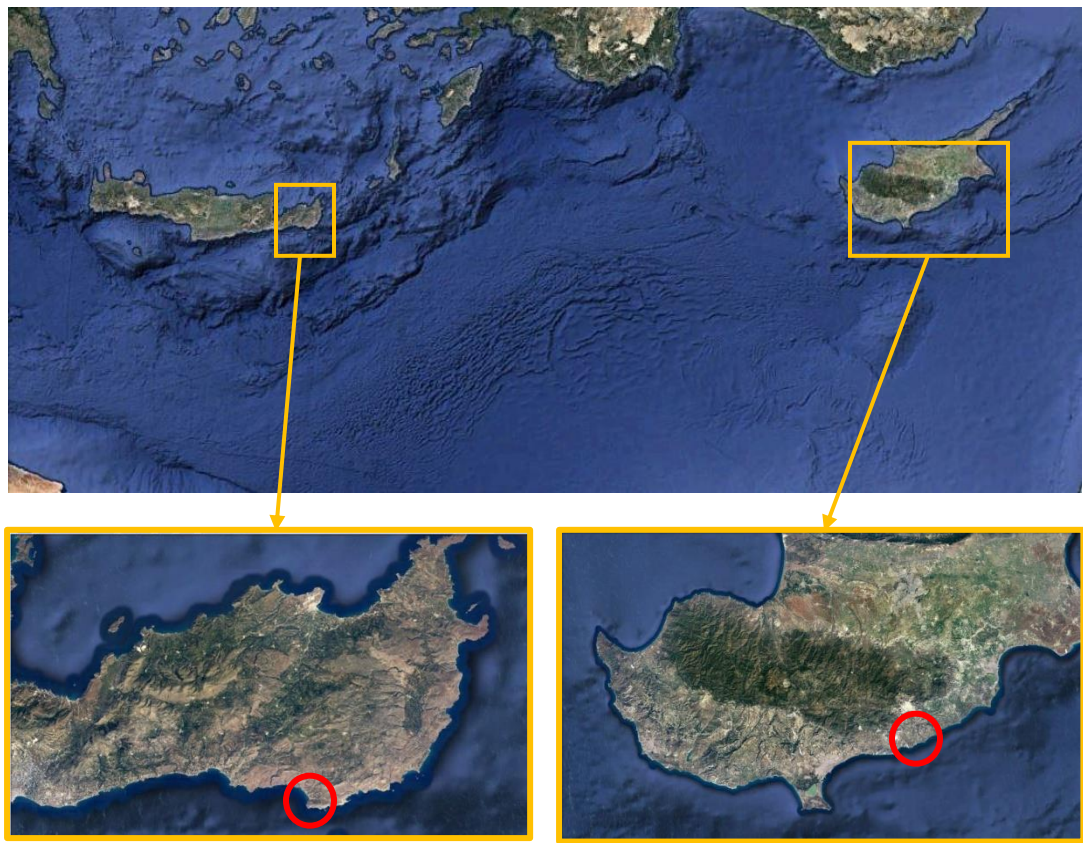
- 200km υπεράκτιου αγωγού από την Ανατολική Μεσόγειο προς την Κύπρο,
- 700km υπεράκτιου αγωγού από την Κύπρο προς την Κρήτη,
- 400km υπεράκτιου αγωγού από την Κρήτη προς την ηπειρωτική Ελλάδα (Πελοπόννησος),
- 600km χερσαίου αγωγού που διασχίζει την Πελοπόννησο και τη Δυτική Ελλάδα.

Οι απαιτήσεις για την κατασκευή του έργου είναι τεράστιες καθώς το μεγαλύτερο υποθαλάσσιο μέρος του στην Ανατολική Μεσόγειο διασχίζει μία περιοχή με σημαντικούς γεωκινδύνους ικανούς να εμποδίσουν την ορθή λειτουργία του αγωγού. Επίσης το βάθος που μπορεί να τοποθετηθεί ο αγωγός κατά τόπους ενδέχεται να ξεπερνάει τα 2000 μέτρα. Τέλος, πρόκειται για ένα έργο μεγάλου μήκους με έντονη γεωπολιτική σημασία λόγω της θέσης του, καθώς θα τροφοδοτήσει όλη την Ευρώπη με φυσικό αέριο. Το κόστος του αναμένεται να ξεπεράσει τα 7 δισεκατομμύρια δολάρια και στις αρχές του 2019 αναμένεται να έχει γίνει σταδιακά η αρχή υλοποίησης του έργου.

Στην παρούσα εφαρμογή μελετήθηκε το υποθαλάσσιο κομμάτι διασύνδεσης της Κύπρου με την Κρήτη. Αναλυτικότερα, σημείο έναρξης της χάραξης είναι το Ζύγι της Κύπρου, 40 χιλιόμετρα Νοτιοδυτικά της Λάρνακας, ενώ το σημείο λήξης βρίσκεται στον Γούδουρα της Κρήτης, 35 χιλιόμετρα Ανατολικά της Ιεράπετρας. Όπως εντοπίζεται στην εικόνα της περιοχής μελέτης, η υποθαλάσσια διαδρομή καλείται να αντιμετωπίσει ένα μέρος του πυθμένα της Μεσογείου με αρκετές ανωμαλίες επιβλαβείς για την ακεραιότητα του αγωγού.



*Εικόνα 6.25: Διαδρομή East Med.
(Πηγή: www.cyprus-mail.com, 2017)*

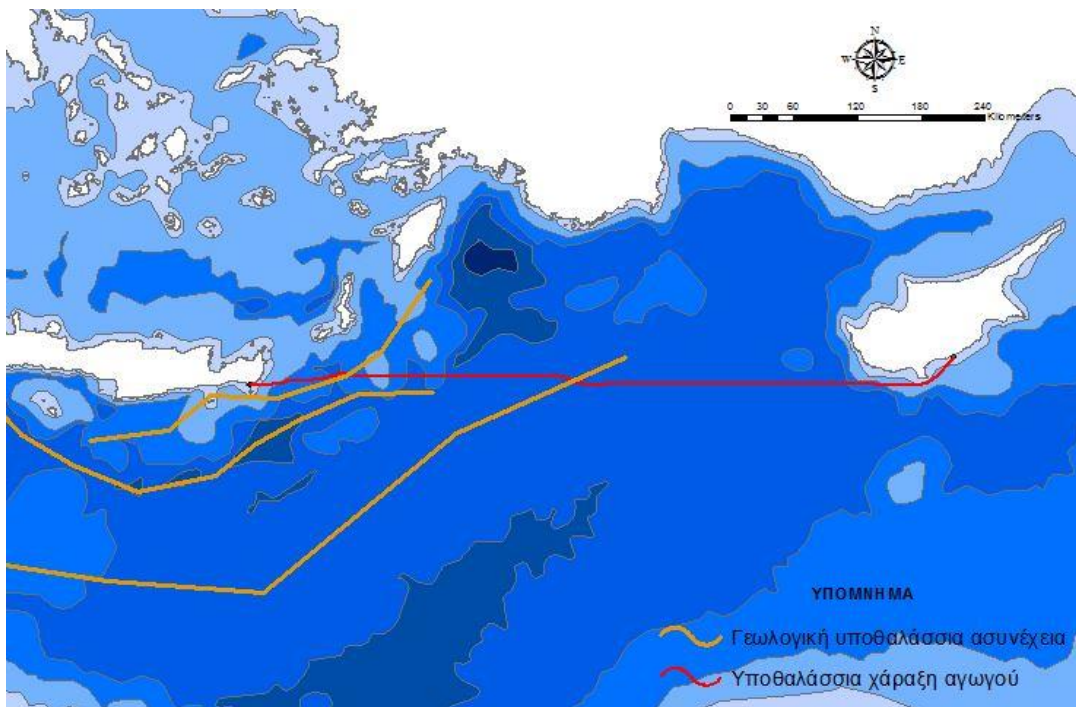


*Εικόνα 6.26: Περιοχή μελέτης 2^{ης} εφαρμογής & σημεία προέλευσης και προορισμού υποθαλάσσιου αγωγού. Αριστερά Γούδουρας Κρήτης, δεξιά Ζύγι Κύπρου.
(Πηγή: Google Earth)*

Βήμα 1^ο : Αποφυγή προβληματικής περιοχής

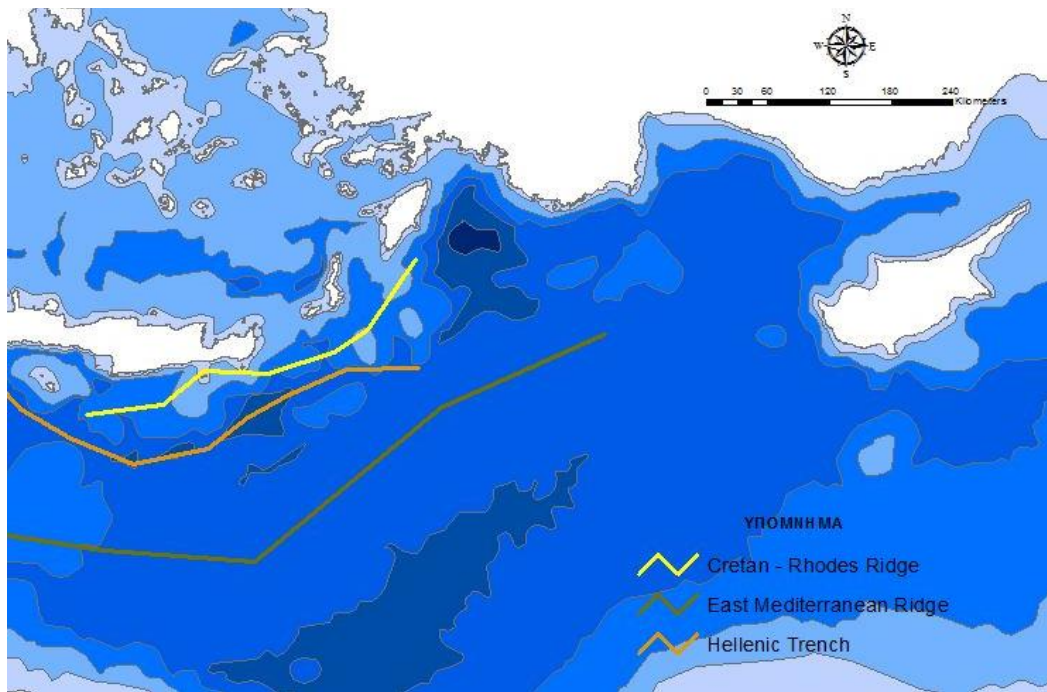
Η διαφορά με την εφαρμογή 1 είναι πως στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν υπάρχει κάποια χάραξη που να έχει υλοποιηθεί ήδη για την εξυπηρέτηση άλλου έργου μεγάλου μήκους. Επομένως με τη βοήθεια του προγράμματος ArcGIS αφού έγινε η μελέτη των γραμμικών γεωλογικών ασυνεχειών της περιοχής, δημιουργήθηκε μία προκαταρκτική χάραξη με κριτήριο την εξ' ολοκλήρου αποφυγή τους.

Ο χάρτης που ακολουθεί προέκυψε από την υπέρθεση των θεματικών επιπέδων των δεδομένων της βαθυμετρίας και των γεωλογικών ασυνεχειών, ενώ η χάραξη υλοποιήθηκε μέσω επεξεργασιών με τη βοήθεια σχετικών εργαλείων στο περιβάλλον του GIS. Παρατηρείται η ύπαρξη γεωκινδύνων σε τρεις περιοχές κατά μήκος της διαδρομής. Όλες τους βρίσκονται πλησίον της Κρήτης και αποτελούν επικίνδυνες περιοχές που πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή. Η χάραξη που προέκυψε αποφεύγει εξ' ολοκλήρου τη δεύτερη γραμμική ασυνέχεια, ενώ διασταυρώνεται με τις υπόλοιπες δύο. Αυτό συμβαίνει καθώς το πρόγραμμα εκτός από το κριτήριο που εισάγεται από τον χρήστη, έχει και ως κριτήριο την ελάχιστη δυνατή διαδρομή, επομένως μία γενική παράκαμψη όλων των ασυνεχειών δεν αποτελεί την μικρότερη διαδρομή σε μήκος. Ωστόσο και στην πραγματικότητα μία διαδρομή αποφυγής όλων των περιοχών γεωκινδύνων θα ήταν ιδιαίτερος δαπανηρή.



Εικόνα 6.27: Χάρτης χάραξης αγωγού αποφυγής γεωλογικών ασυνεχειών.

Με βάση τη χάραξη που δημιουργήθηκε οι περιοχές που χρήζουν περαιτέρω μελέτη και εξέταση είναι εκείνες με τις οποίες διασταυρώνεται η χάραξη του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα από Ανατολή προς Δύση, η πρώτη ασυνέχεια με όνομα «East Mediterranean Ridge» και η τελευταία με όνομα «Cretan – Rhodes Ridge». Τέλος η γεωλογική ασυνέχεια με όνομα «Hellenic Trench» αποφεύγεται από τη χάραξη πλήρως. Στην παρούσα εφαρμογή εξετάστηκε η διασταύρωση με το East Mediterranean Ridge.



Εικόνα 6.28: Χάρτης με τις υποθαλάσσιες γεωλογικές ασυνέχειες γραμμικής μορφής στην περιοχή μελέτης.

Βήμα 2^ο : Υπολογιστικός έλεγχος διάρρηξης ρήγματος δια μέσω ιζηματογενούς στρώσης

Για τη διεξοδική ανάλυση της περιοχής του γεωκινδύνου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ABAQUS.

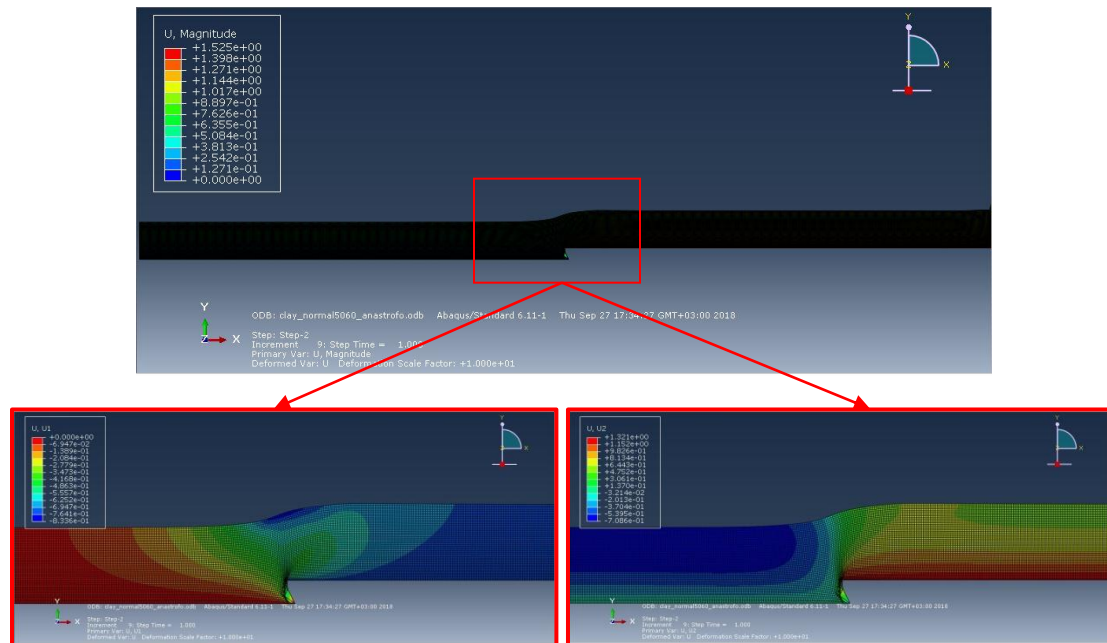
Με τη χρήση των τύπων του υποκεφαλαίου 5.5 έγινε μία παραμετρική ανάλυση του πυθμένα της θάλασσας κάτω από τον οποίο βρίσκεται η ασυνέχεια East Mediterranean Ridge.

Αναλυτικότερα, θεωρήθηκε ότι το ρήγμα είναι ανάστροφο με γωνία διάρρηξης τις 60° . Το πάχος της ιζηματογενούς στρώσης μελετήθηκε για 50, 100 και 150m, ενώ ο αγωγός που θα τοποθετηθεί θα έχει εξωτερική διάμετρο 0.6604m.

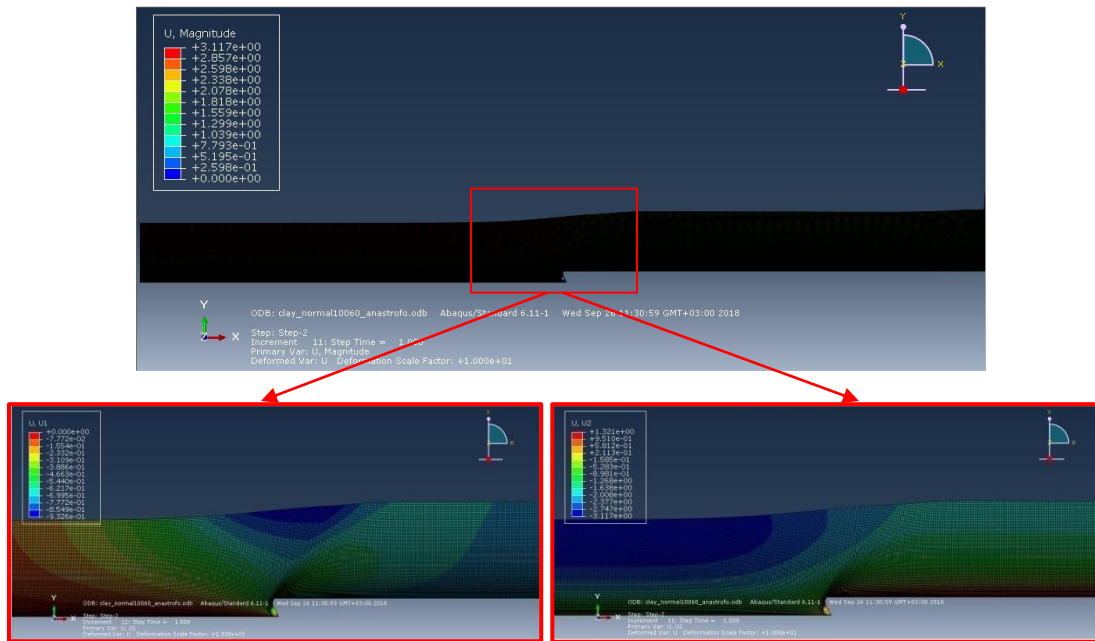
Για γωνία διάρρηξης 60° , προέκυψαν οι παρακάτω τιμές,

$$\Delta y = 1.3208\text{m και } \Delta x = 0.7626\text{m.}$$

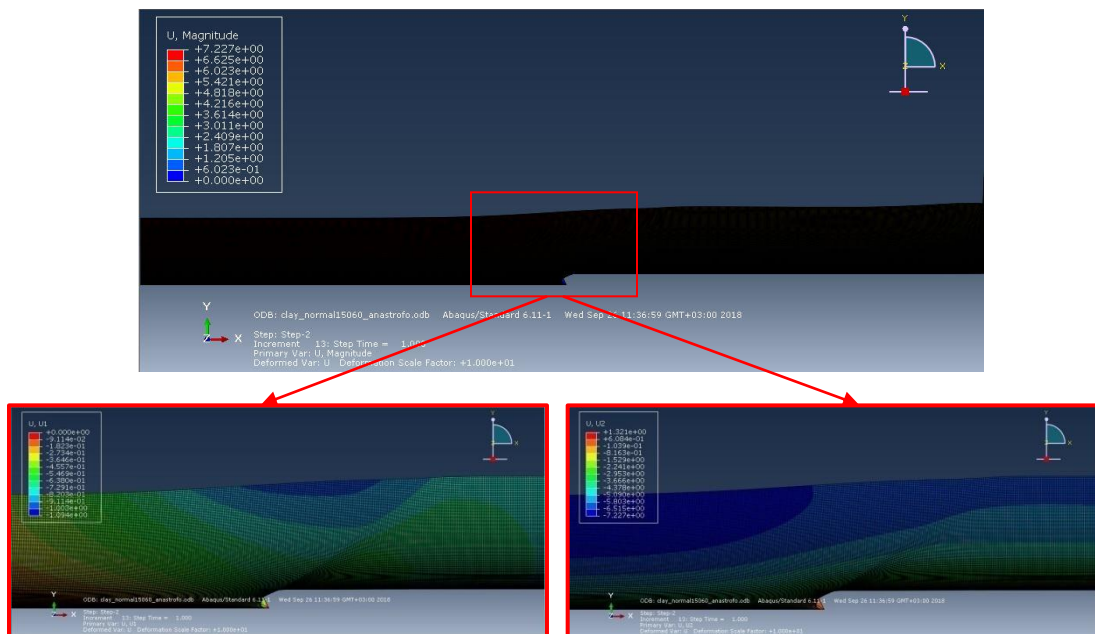
Η διαφορική καθίζηση της ιζηματογενούς στρώσης λόγω της διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος για τις διαφορετικές τιμές πάχους της, παρουσιάζονται όπως προέκυψαν από το ABAQUS.



Εικόνα 6.29: Αναπαράσταση διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος με πάχος ιζηματογενούς στρώσης 50m και γωνία διάρρηξης 60° .



Εικόνα 6.30: Αναπαράσταση διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος με πάχος ιζηματογενούς στρώσης 100m και γωνία διάρρηξης 60°.



Εικόνα 6.31: Αναπαράσταση διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος με πάχος ιζηματογενούς στρώσης 150m και γωνία διάρρηξης 60°.

Για την καλύτερη κατανόηση των γραφικών αποτελεσμάτων, η απεικόνισή τους έγινε με συντελεστή παραμόρφωσης 10.

Τα αποτελέσματα που απαιτούνται να εξαχθούν από τις αναλύσεις του παρόντος βήματος, αναφέρονται στις μετατοπίσεις που δέχεται η επιφάνεια της ιζηματογενούς στρώσης λόγω της διάρρηξης του ρήγματος και συγκεκριμένα, οι μετατοπίσεις κατά την οριζόντια διεύθυνση (U_1) και οι μετατοπίσεις κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (U_2).

Βήμα 3^ο: Υπολογιστικός έλεγχος αλληλεπίδρασης αγωγού & πυθμένα της θάλασσας με την ύπαρξη ιζηματογενούς στρώσης.

Με δεδομένες τις μετατοπίσεις που υφίσταται η επιφάνεια του βυθού λόγω της διάρρηξης του ρήγματος, έγινε λεπτομερής εξέταση στις παραμορφώσεις που δέχεται ο αγωγός εξαιτίας αυτών.

Τα δεδομένα συμπλήρωσαν οι τιμές που έδωσε ο χρήστης και τα αποτελέσματα των τύπων του υποκεφαλαίου 5.6, τα οποία όλα αναφέρονται στον αγωγό και στα ελατήρια που χρησιμοποιούνται. Αναλυτικότερα, έχει ήδη δοθεί η εξωτερική διάμετρος του αγωγού $D=0.6604\text{m}$, ενώ συμπληρώνεται, το πάχος του αγωγού 0.027m , η επένδυση λόγω εξωτερικής διάβρωσης 0.003m και η επένδυση λόγω σκυροδέματος 0.055m . Επομένως με βάση τους τύπους που έχουν αναπτυχθεί υπολογίζεται,

$$D_{\text{tot}} = 0.7764\text{m}$$

$$V_{\text{tot}} = \pi * \left(\frac{D_{\text{tot}}}{2}\right)^2 = 0.473435625\text{m}^3$$

$$V_{\text{εσωτερικό}} = \pi * \left(\frac{D - 2 * \text{πάχος αγωγού}}{2}\right)^2 = 0.288807367\text{m}^3$$

$$V_{\text{εξωτερικό}} = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 0.342534256\text{m}^3$$

$$V_{\text{αγωγού}} = V_{\text{εξωτερικό}} - V_{\text{εσωτερικό}} = 0.053726889\text{m}^3$$

$$V_{\text{διάβρωσης}} = \pi * \left(\frac{D + 2 * \text{πάχος λεπτού στρώματος επένδυσης}}{2}\right)^2 - V_{\text{εξωτερικό}} = 0.006252398\text{m}^3$$

$$V_{\text{σκυροδέματος}} = V_{\text{tot}} - (V_{\text{εξωτερικό}} + V_{\text{διάβρωσης}}) = 0.124648972\text{m}^3$$

$$W_{\text{αγωγού}} = \bar{\gamma}_{\text{χάλυβα}} * V_{\text{αγωγού}} = 4.217560806 \text{ kN/m}$$

$$W_{\text{σκυροδέματος}} = \bar{\gamma}_{\text{σκυροδέματος}} * V_{\text{σκυροδέματος}} = 3.116224293 \text{ kN/m}$$

$$W_{tot} = W_{αγωγού} + W_{σκυροδέματος} = 7.333785099 \text{ kN/m}$$

$$A = V_{tot} * \text{πυκνότητα θαλασσινού νερού } 1025 \text{ Kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2 = 4.760513571 \text{ kN/m}$$

Για τα αξονικά ελατήρια,

$$T_u = \pi * D * a * c + \pi * D * H * \bar{\gamma} * \frac{1+K_0}{2} * \tan\delta = 24.62115478 \text{ kN/m}$$

Για τα οριζόντια ελατήρια,

$$p_u = 0.2 * w_s + 3 * z * \sqrt{D * \bar{\gamma} * S_u} = 15.02689748 \text{ kN/m}$$

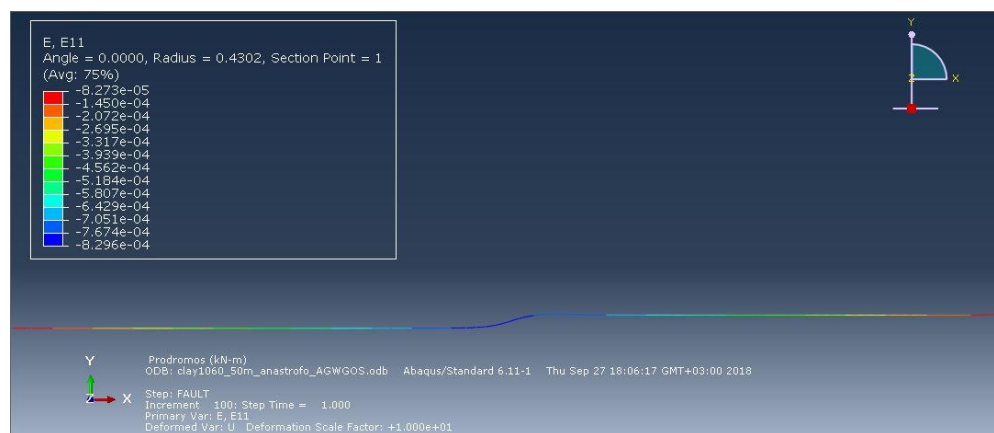
Για τα κατακόρυφα ελατήρια προς τα άνω και προς τα κάτω αντίστοιχα,

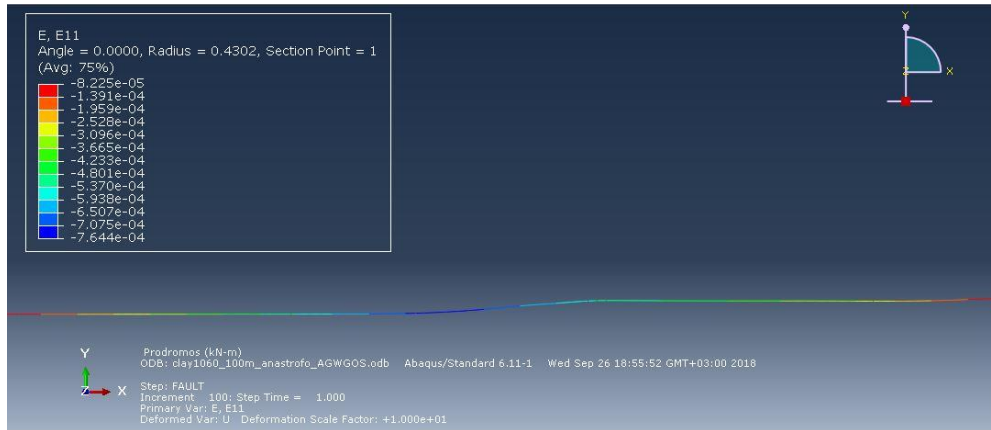
$$q_u = w_s + \alpha + S_u * D * \sin\theta = 18.24758548 \text{ kN/m}$$

$$q_d = N * D * S_u = 93.168 \text{ kN/m}$$

Τέλος, για τον καθορισμό των πιέσεων που υφίσταται ο αγωγός, η εσωτερική πίεση είναι σταθερή ίση με 11000 kPa και για την εξωτερική, για βάθος 2562 m, είναι ίση με 25761.551 kPa.

Τα αποτελέσματα που είναι απαραίτητο να εξαχθούν από το συγκεκριμένο βήμα αφορούν τις παραμορφώσεις που δέχεται ο αγωγός. Παρακάτω παρουσιάζονται τα γραφικά αποτελέσματα που προέκυψαν στο ABAQUS.





Εικόνα 6.32: Παραμορφώσεις αγωγού για 50, 100, 150m πάχους ιζηματογενούς στρώσης.

Για την καλύτερη κατανόηση των γραφικών αποτελεσμάτων, η απεικόνισή τους έγινε με συντελεστή παραμόρφωσης 10.

Βήμα 4^ο: Εισαγωγή παραμορφώσεων στο GIS και δημιουργία συνθήκης ελέγχου

Έπειτα και από την εξαγωγή των παραμορφώσεων που δέχεται ο αγωγός από τη διάρρηξη του ρήγματος για τις διάφορες περιπτώσεις που έχουν αναλυθεί, έγινε εισαγωγή των μεγαλύτερων κατά απόλυτη τιμή στο πρόγραμμα του GIS. Η εισαγωγή έγινε για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν και αναφέρονται παραπάνω, για πάχος ιζηματογενούς στρώσης 50, 100 και 150m.

Πίνακας 6.2: Μέγιστες παραμορφώσεις του υποθαλάσσιου αγωγού για κάθε περίπτωση πάχους ιζηματογενούς στρώσης.

Πάχος ιζηματογενούς στρώσης.(m)	Μέγιστες κατά απόλυτη τιμή παραμορφώσεις που υφίσταται ο αγωγός.
50	0.000829628
100	0.000764418
150	0.000710472

Table					
East Mediterranean Ridge					
	comments	Shape_Length	e11_50m_anastrofo	e11_100m_anastrofo	e11_150m_anastrofo
▶	Formerly, Mediterranean Ridge.	1025876.799808	0.00083	0.000764	0.00071

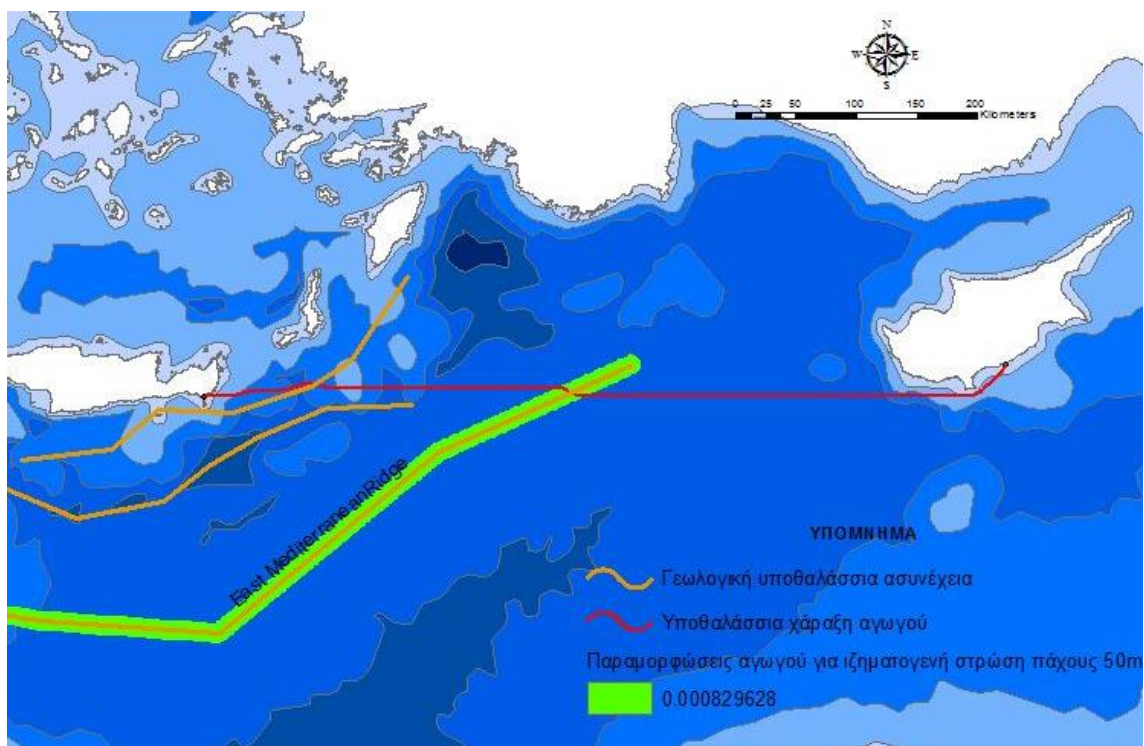
Εικόνα 6.33: Εισαγωγή παραμορφώσεων αγωγού για τις διάφορες τιμές πάχους ιζηματογενούς στρώσης στον πίνακα χαρακτηριστικών στο ArcMap.

Εφόσον έχει πραγματοποιηθεί η διασύνδεση των δύο λογισμικών, με μία διαδικασία σύγκρισης που περιγράφεται παρακάτω προέκυψε το τελικό αποτέλεσμα της έγκρισης ή μη της διασταύρωσης της χάραξης με την προβληματική περιοχή.

Απαραίτητο αναφοράς είναι πως για τη σύγκριση η βασική τιμή που πρέπει να χρησιμοποιείται είναι το 0.5%. Εφόσον πρόκειται για έργο που είναι προγραμματισμένο να κατασκευαστεί θεωρήθηκε πως η τιμή αυτή δε θα πρέπει να μεταβληθεί. Επομένως εξετάστηκε η περίπτωση ελέγχου μόνο με το 0.5%.

Ποσοστό ελέγχου 0.5%

Στη συγκεκριμένη περίπτωση με δεδομένα τις τιμές που έχουν εισαχθεί (Εικόνα 6.33) το εργαλείο εγκρίνει τη διασταύρωση της χάραξης με τη γεωλογική ασυνέχεια καθώς όλες οι τιμές είναι μικρότερες του 0.005 (0.5%). Επομένως το αποτέλεσμα που θα εμφανιστεί στο περιβάλλον του GIS για τη δυσμενέστερη περίπτωση, δηλαδή του πάχους ιζηματογενούς στρώσης 50m, θα είναι η εικόνα που ακολουθεί, η οποία παρουσιάζει την περιοχή γεωκινδύνου με πράσινο χρώμα.



Εικόνα 6.34: Έγκριση διασταύρωσης με περιοχή γεωκινδύνου.

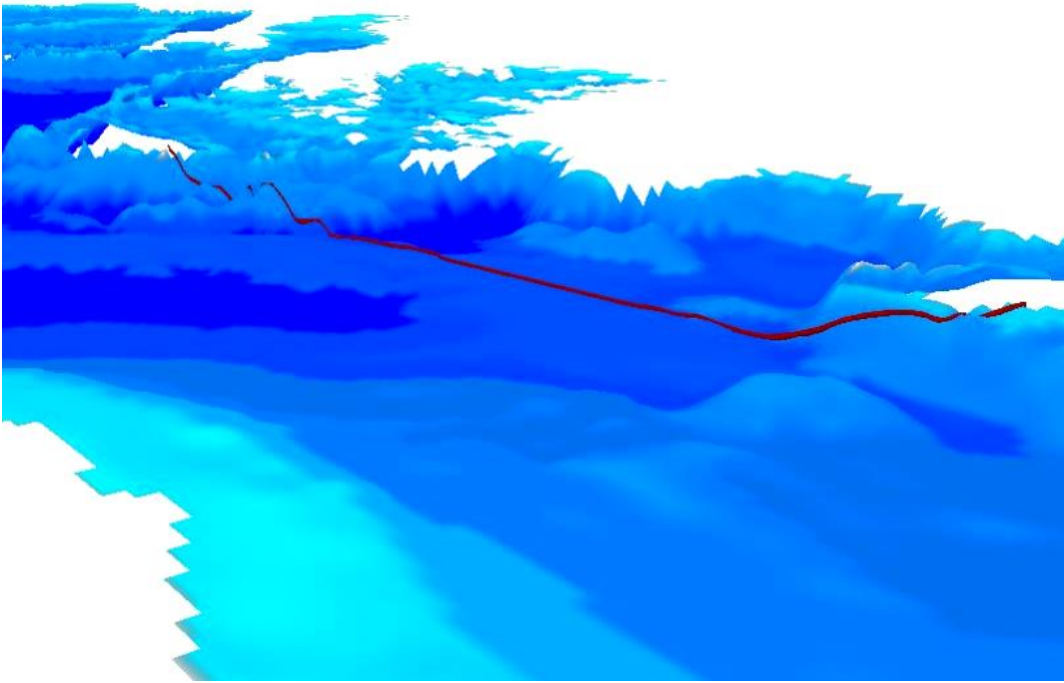
Βήμα 5^ο: Τελική απόφαση για την υλοποίηση της χάραξης

Εφόσον για τα 50m πάχους ιζηματογενούς στρώσης, το υπολογιστικό εργαλείο αποφάσισε ότι είναι η εφικτή η διασταύρωση του αγωγού και δεν κινδυνεύει από τις παραμορφώσεις που υφίσταται, το ίδιο θα συμβεί και στις περιπτώσεις που ιζηματογενής στρώση θα έχει μεγαλύτερο πάχος. (100,150m). Επομένως η προκαταρκτική χάραξη που έχει δημιουργηθεί εγκρίνεται για όλες τις περιπτώσεις και μπορεί να υλοποιηθεί.

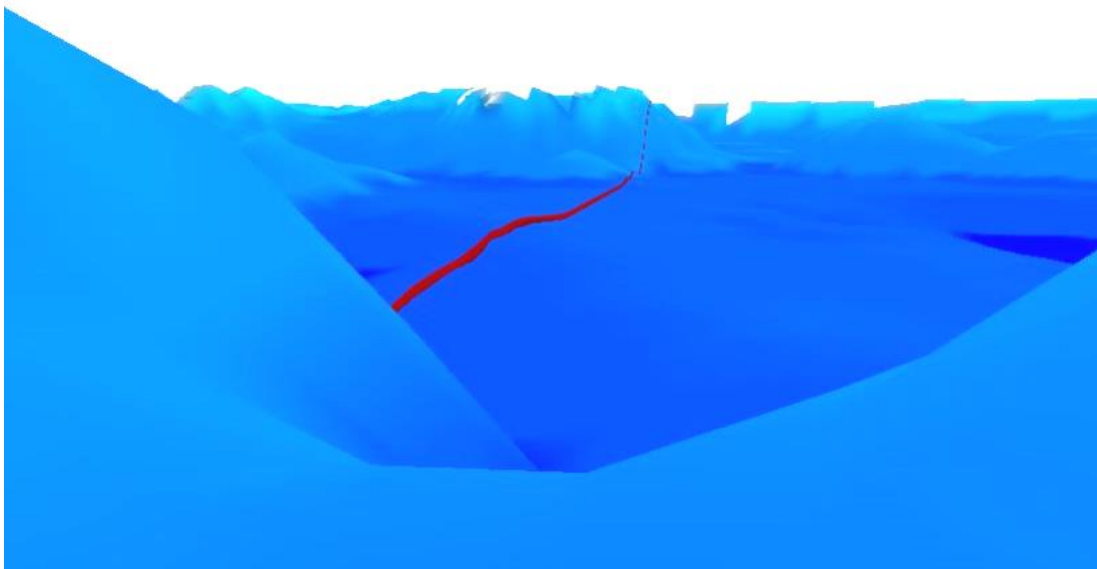
Βήμα 6^ο: Βοηθητικές εφαρμογές

3D-αναπαράσταση & Μηκοτομή χαράξεων

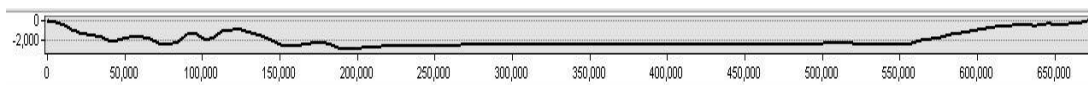
Με βάση τα δεδομένα που έχουν προκύψει και χρησιμοποιήθηκαν στην πρώτη εφαρμογή (Εικόνες 6.19 και 6.20) μελετήθηκε η χάραξη του αγωγού της συγκεκριμένης εφαρμογής με τη βοήθεια του Ψηφιακού Υψομετρικού Μοντέλου. Η προβολή της χάραξης στο υποθαλάσσιο ανάγλυφο της Μεσογείου απεικονίζει την πορεία που ακολουθεί ο αγωγός και τον τρόπο με τον οποίο προσαρμόζεται στο έντονο ανάγλυφο που επικρατεί Νότια της Κρήτης.



Εικόνα 6.35: Γενική άποψη της χάραξης του υποθαλάσσιου αγωγού. Στα δεξιά το σημείο προέλευσης στην Κύπρο και αριστερά το σημείο προορισμού στην Κρήτη.



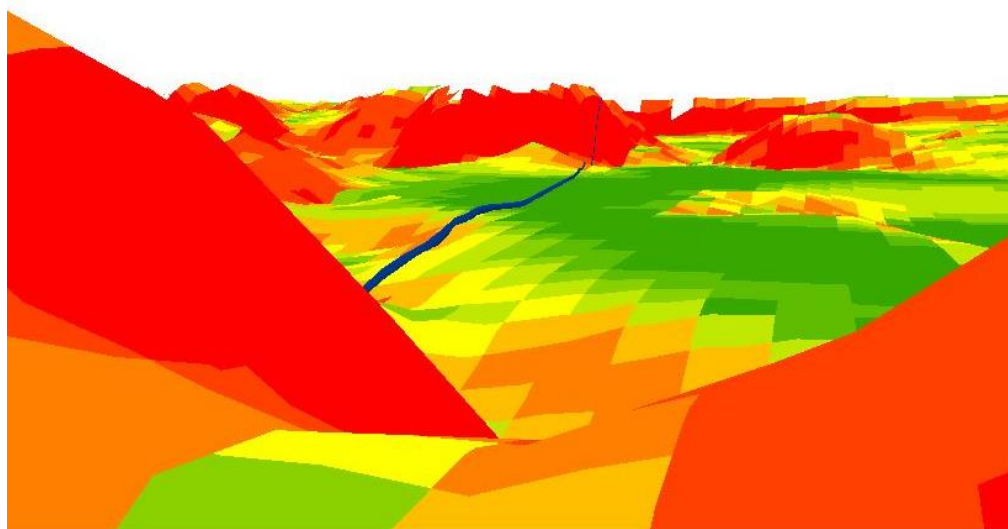
Εικόνα 6.37: Άποψη του υποθαλάσσιου αγωγού ερχόμενος από την Κύπρο (στο βάθος) κατά τη διασταύρωσή του με την εξεταζόμενη περιοχή του γεωκινδύνου (κεντρικά της εικόνας) σε βάθος μεγαλύτερο των 2500m.



Εικόνα 6.38: Μηκοτομή χάραξης αγωγού από Κρήτη (αριστερά) προς Κύπρο (δεξιά).

Παρατηρώντας τη μηκοτομή που προέκυψε, η χάραξη βρίσκεται πολύ κοντά στα πραγματικά δεδομένα του αγωγού καθώς το μήκος της σύμφωνα με τις επεξεργασίες και τα αποτελέσματα του προγράμματος GIS φτάνει περίπου το μήκος που έχει αναφερθεί κατά τη μελέτη, τα 700 χιλιόμετρα.

Τέλος η Εικόνα 6.39 παρουσιάζει τη διαδρομή του υποθαλάσσιου αγωγού στη περιοχή μελέτης όπου διασταυρώνεται με τη προβληματική περιοχή τοποθετημένη στο χαρτογραφικό υπόβαθρο απεικόνισης κλίσεων. Ουσιαστικά πρόκειται για έναν ποιοτικό χάρτη με διαβάθμιση χρωμάτων από το πράσινο στο κόκκινο ανάλογα με την κλίση των υποθαλάσσιων πρηνών. Είναι μία χρήσιμη προσέγγιση ώστε ο χρήστης να εμπεδώσει καλύτερα το ανάγλυφο του πυθμένα της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 6.39: Ποιοτική απεικόνιση κλίσεων του θαλάσσια πυθμένα στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Περιγραφή διαδικασίας για την εξαγωγή χάρτη κλίσεων

Το βασικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του μοντέλου κλίσεων είναι το slope στο περιβάλλον του GIS. Αρχείο εισόδου αποτέλεσε το τρισδιάστατο DEM που έχει ήδη δημιουργηθεί.

7. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Μέσα από τη μελέτη του αντικειμένου των υποθαλάσσιων έργων μεγάλου μήκους και πιο συγκεκριμένα μέσα από τα όσα αναφέρονται στην παρούσα εργασία προέκυψαν βασικά συμπεράσματα. Αρχικά τα υπεράκτια έργα όπως καλώδια και αγωγοί εκτός από τα καλώδια τηλεπικοινωνιών, δεν έχουν γνωρίσει ακόμα ιδιαίτερη ανάπτυξη στην περιοχή της Μεσογείου σε αντίθεση με τη Βαλτική και τη Βόρεια θάλασσα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η περιοχή μελέτης είναι γεμάτη από γεωκινδύνους δύσκολους να αντιμετωπιστούν και να μελετηθούν. Πολλά έργα έχουν προγραμματιστεί αλλά δεν έχουν προχωρήσει στο στάδιο της υλοποίησής τους. Επομένως η Μεσογείος θάλασσα με τη σωστή και προσεκτική μελέτη μπορεί να προσφέρει πολλά στις υποθαλάσσιες μεταφορές ενέργειας και ορυκτών καυσίμων από την Ασία, την Αφρική προς την Ευρώπη, καθώς οι γεωκίνδυνοι μπορούν με τη σωστή μεθοδολογία να αντιμετωπιστούν, ώστε να μην τίθεται σε κίνδυνο καμία κατασκευή.

Η συλλογή δεδομένων και η απεικόνιση διαφόρων θεματικών επιπέδων στο περιβάλλον του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών βοήθησε στο να γίνει κατανοητή η γεωμορφολογία της περιοχής μελέτης και γενικότερα της λεκάνης της Μεσογείου. Το πλήθος των περισσότερων γεωλογικών ασυνεχειών βρίσκεται στο Νοτιοανατολικό μέρος της θάλασσας όπου η παρουσία ιζημάτων μεγάλου πάχους ενδεχομένως να καλύπτει τις εν λόγω ασυνέχειες, χωρίς να μειώνει το ενδεχόμενο έντονης σεισμικής δραστηριότητας με καταστροφικές συνέπειες για το υπεράκτιο έργο. Ακόμα με τη βοήθεια του G.I.S και με τη χρήση συγκεκριμένων εργαλείων υπάρχει η δυνατότητα της δημιουργίας μίας προκαταρκτικής χάραξης που να αποφεύγει οποιοδήποτε κριτήριο σε βαθμό που ο χρήστης ορίζει ανάλογα με μία αριθμητική κλίμακα. Τέλος εξίσου χρήσιμες είναι οι δυνατότητες του προγράμματος για τη δημιουργία Ψηφιακού Υψομετρικού Μοντέλου σε δύο ή τρεις διαστάσεις στο οποίο απεικονίζεται το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης, το οποίο είναι ικανό να δώσει στο χρήστη μία πολύ κοντά στην πραγματικότητα εικόνα του πυθμένα της Μεσογείου, ανάλογα με την ακρίβεια των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν. Η σημαντικότητα αυτής της δυνατότητας αυξάνεται αν κάποιος αναλογιστεί πως υπάρχει έλλειψη δεδομένων και εικόνων από την επιφάνεια του θαλάσσιου πυθμένα της περιοχής.

Μέσα από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα μέσα από τη χρήση του προγράμματος ABAQUS, δόθηκε η ευκαιρία να μελετηθεί και να κατανοηθεί πώς γίνεται η διάρρηξη ενός ρήγματος και πώς εκείνο διαδίδεται μέσω της ύπαρξης ιζηματογενούς στρώσης σε διαφορετικές τιμές πάχους. Επίσης, με τη δυνατότητα του εργαλείου να δέχεται είτε κανονικό είτε ανάστροφο ρήγμα, προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι δύο κατηγορίες ρηγμάτων συμπεριφέρονται με

διαφορετικό τρόπο. Η αλληλεπίδραση αγωγού και ρήγματος βοήθησε στο να γίνει κατανοητός ο τρόπος που συμπεριφέρεται ένας αγωγός στον πυθμένα της θάλασσας. Τα εδαφικά ελατήρια αποτέλεσαν σημαντικό μέρος των αναλύσεων καθώς επηρέασαν σε μεγάλο βαθμό τις παραμορφώσεις που δέχτηκε ο αγωγός. Ακόμα, η ύπαρξη ιζηματογενούς στρώσης έχει καθοριστικό ρόλο καθώς οι παραμορφώσεις του αγωγού στην περίπτωση της μη ύπαρξης της στρώσης διαφοροποιούνται.

Το υπολογιστικό εργαλείο που έχει ήδη δημιουργηθεί μπορεί να επεκταθεί και να αποτελέσει βασικό παράγοντα για την τελική χάραξη ενός υποθαλάσσιου έργου σε πραγματικές συνθήκες. Ωστόσο για να γίνει αυτό, θα πρέπει να βρεθούν δεδομένα καλύτερης ακρίβειας και για τα δύο προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν, που για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας δεν υπήρχε πρόσβαση. Στο Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών, υπάρχει η δυνατότητα για βελτίωση των δεδομένων που έχουν βρεθεί ώστε τα μοντέλα που θα προκύψουν να έχουν καλύτερη ακρίβεια. Οι πραγματικές συνθήκες απαιτούν την ύπαρξη δεδομένων για τους γεωκινδύνους που πρόκειται να εξετασθούν, ώστε η χρήση του εργαλείου να μη περιορίζεται μόνο σε παραμετρική ανάλυση αλλά να έχει συγκεκριμένες τιμές. Επίσης σημαντικό θα ήταν να δημιουργηθεί ένας κανονισμός για εδαφικά ελατήρια που αφορούν αποκλειστικά υποθαλάσσιους αγωγούς ώστε να μην υπάρχει η εναλλαγή μεταξύ του κανονισμού ALA και της θεωρίας O' Rourke & Liu. Το εδαφικό υπόβαθρο που εξετάστηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων εάν βρεθούν τα απαραίτητα δεδομένα μπορεί να προσαρμοστεί και να μη περιοριστεί στο αργιλικό. Ακόμα η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης του ρήγματος με τον αγωγό μπορεί να γίνει σε τρεις διαστάσεις προσθέτοντας και το οριζοντιολισθητικό ρήγμα στις αναλύσεις. Τέλος, επειδή πρόκειται για ένα υπολογιστικό εργαλείο που συνδυάζει δύο διαφορετικά προγράμματα, είναι δυνατόν να εφαρμοστεί μια μορφή αυτοματοποίησης με σκοπό ο χρήστης να αναλώνεται μόνο στην εισαγωγή των δεδομένων και να μην επεμβαίνει χειρονακτικά κατά τη διαδικασία λειτουργίας του εργαλείου.

Βιβλιογραφία

1. Ambraseys N., 1978, Studies in historical seismicity and tectonics Ch.12, Environmental History of Middle East, ed. W. Brice, Acad. Press.
2. Ambraseys N. & Jackson J., 1984, Seismic Movements, in Ground Movements and their Effects on Structures, Ed. P.B. Attewell and R.K. Taylor, New York: Surrey University Press.
3. Ardelean M., Minnebo P., 2015, HVDC Submarine Power Cables in the World, JRC TECHNICAL REPORTS, European Commission.
4. Barka A. and Reilinger R., 1997, Active tectonics of the Eastern Mediterranean region: deduced from GPS, neotectonic and seismicity data, Annali di Geodisica, Vol. XL, N.3.
5. Bray J.D., Seed R.B., Cluff L.S. and Seed H.B., 1994, Earthquake Fault Rupture Propagation through Soil, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE.
6. Burrough P.A., 1986, Principles of Geographic Information Systems for Land Resource Assessment. Monographs on Soil and Resources Survey No.12, Oxford Science Publications, New York.
7. Camerlenghi A., Urgelers R., and Fantoni L., 2010, A database on submarine landslides of the Mediterranean Sea.
8. Dean, E.T.R., 2010, Offshore Geotechnical Engineering – Principles and Practice, Thomas Telford, Reston, VA, U.S.A.
9. Festa A., Ogata K., Pini A. G., Dilek Y., Alonso J. L., 2016, Origin and significance of olistostromes in the evolution of orogenic belts: A global synthesis, Gondwana Research.
10. Fokaefs A., Papadopoulos G.A., 2007, Tsunami hazard in the Eastern Mediterranean: strong earthquakes and tsunamis in Cyprus and the Levantine Sea, Natural Hazards.
11. Gerwick B.C., 2007, Construction of Marine and Offshore Structures, CRC Press, New York.
12. Kramer S.L., 1996, Geotechnical earthquake engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.
13. Lefebvre G., Duncan J.M., Wilson E.L., 1973, Three – dimensional finite element analyses of dams, University of California, Berkeley. Dept. of Civil Engineering.
14. Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W., 2005, Geographic Information Systems and Science, John Wiley & Sons.
15. Mohitpur M., Golshan H., Murray A., 2007, Pipeline Design & Construction: A Practical Approach, Third Edition, ASME Press.
16. Newhall C.G., Dzursin. D, 1988, Historical unrest at large calderas of the world 2, U.S Government Printing Office.
17. Ramakrishnan T.V., 2008, Offshore Engineering, Gene – Tech Books.

18. Samaras A.G., Karambas Th.V., Archetti R., 2015, Simulation of tsunami generation, propagation and coastal inundation in the Eastern Mediterranean, Ocean Science.
19. Scott R.F., 1987, Failure, Geotechnique, Vol. 37, No. 4.
20. Taymaz T., Jackson J., McKenzie D., 1991, Active tectonics of the north and central Aegean Sea, Geophysical Journal International, Vol. 106.
21. Trimintziou S.M., Sakellariou G., Psarropoulos P.N., 2015, Designing Offshore Pipelines Facing the Geohazard of Active Seismic Faults, World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil and Environmental Engineering, Vol: 9, No: 6.
22. Worzyk Thomas, 2009, Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects, Springer.
23. Zubiaga M., Abad G., Barrena J.A., Aurtenetxea S., Cárcar A., 2011, Evaluation of the Frequency Response of AC Transmission Based Offshore Wind Farms, IntechOpen.
24. Μανιάτης Γ., 1996, ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΓΗΣ ΚΤΗΑΤΟΛΟΓΙΟΥ, Ζήτη.
25. Χαλκιάς Ν.Χ., 2006, Όροι και έννοιες επιστήμης γεωγραφικών πληροφοριών, Ίων.
26. Χατζηχρήστος Θ., Μαρσέλη Κ., 2013, Τα Βασικά του ArcGis 10.1 for Desktop, QnE.