



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ»

ΧΑΒΕΛΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ
ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΦΥΓΗ ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΩΝ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ ΘΑΛΑΣΣΑ,
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΙΧΑΗΛ Γ. ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ
ΟΜΟΤΙΜΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.**

**ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ Ν. ΨΑΡΡΟΠΟΥΛΟΣ
ΔΡ. ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ
Ε.ΔΙ.Π. / Ε.Μ.Π.**

ΑΘΗΝΑ

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2016

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελεί μεταπτυχιακή εργασία στα πλαίσια του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη» της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.

Πριν την παρουσίαση της παρούσας εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνεργάστηκα και έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση και ολοκλήρωσή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου κ. Σακελλαρίου Μιχαήλ, Ομότιμο Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ο οποίος με εμπιστεύτηκε και μου έδωσε τη δυνατότητα να αναλάβω αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον συνεπιβλέποντα της εργασίας μου Δρ. Ψαρρόπουλο Πρόδρομο, Πολιτικό Μηχανικό και Ε.ΔΙ.Π της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ο οποίος με την πολύτιμη καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη και την εκτίμηση που μου έδειξε, συνέβαλλε ουσιαστικά στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ρουσάκη Γρηγόριο, Γεωλόγο και Κύριο Ερευνητή στο Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών, για τη συμβολή του στην κατανόηση και ορθή περιγραφή τεχνικών θεμάτων, που σχετίζονται με τη μελέτη της θαλάσσιας περιοχής πόντισης καλωδίων.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τσουγκράνη Στέφανο, Αγρονόμο και Τοπογράφο μηχανικό, ο οποίος με βοήθησε να εξοικειωθώ με το λογισμικό ArcGIS και με καθοδήγησε τόσο κατά το σχεδιασμό, όσο και κατά την εκτέλεση των υπολογισμών του προγράμματος.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της οικογένειάς μου και όλους όσους υπομονετικά μου προσέφεραν την ηθική συμπαράσταση, τόσο κατά τη συνολική διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών, όσο και κατά τη διάρκεια της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περιεχόμενα	5
Περίληψη.....	9
Abstract.....	11
1. Εισαγωγή.....	13
2. Υποθαλάσσια ενεργειακά καλώδια	15
2.1. Εφαρμογές υποθαλάσσιων ενεργειακών καλωδίων	15
2.1.1. Εισαγωγή	15
2.1.2. Παροχή ενέργειας σε νησιά	16
2.1.3. Σύνδεση σε αυτόνομα δίκτυα	18
2.1.4. Θαλάσσια Αιολικά Πάρκα	19
2.1.5. Παροχή ενέργειας σε πλωτές πλατφόρμες	21
2.1.6. Διασυνδέσεις μικρών αποστάσεων	23
2.1.7. Άλλες εφαρμογές των υποθαλάσσιων καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος	24
2.2. Μελέτη θαλάσσιας περιοχής	25
2.2.1. Πεδίο εφαρμογής της θαλάσσιας μελέτης	27
2.2.2. Βαθυμετρία.....	29
2.2.3. Πλευρική ηχοβολιστική σάρωση	32
2.2.4. Τομογράφος υποδομής πυθμένα.....	34
2.2.5. Έρευνα με μαγνητόμετρο.....	35
2.2.6. Οπτικός έλεγχος.....	35
2.2.7. Δειγματοληψία ιζημάτων πυθμένα	35
2.2.8. Θερμοκρασίες των ιζημάτων και του νερού	37
2.3. Εγκατάσταση και προστασία υποθαλάσσιων καλωδίων.....	38
2.3.1. Πλοία πόντισης καλωδίων	39
2.3.2. Προστασία των υποθαλάσσιων καλωδίων ρεύματος	51

2.3.3.	<i>Επιλογή της κατάλληλης διαδρομής του καλωδίου</i>	52
2.3.4.	<i>Σχεδιασμός της κατάλληλης θωράκισης των καλωδίων</i>	55
2.3.5.	<i>Βλάβες υποθαλάσσιων καλωδίων</i>	58
3.	Υπεράκτιοι γεωκίνδυνοι	60
3.1.	Γενικά	60
3.2.	Σημαντικότερες κατηγορίες υπερράκτιων γεωκινδύνων	60
3.2.1.	<i>Σεισμοί</i>	61
3.2.2.	<i>Αστάθεια υποθαλάσσιων πρηνών</i>	62
3.2.3.	<i>Γεωλογία πυθμένα</i>	63
3.2.4.	<i>Υλικά θαλάσσιου πυθμένα</i>	64
3.3.	Μηχανισμοί ενεργοποίησης αστοχίας των ιζημάτων του πυθμένα	65
3.4.	Οι συνέπειες των γεωκινδύνων	66
3.5.	Ταυτοποίηση των γεωκινδύνων	68
3.5.1.	<i>Γεωφυσικές έρευνες</i>	72
3.5.2.	<i>Γεωτεχνική έρευνα πεδίου</i>	75
3.6.	Αξιολόγηση κινδύνου	77
3.7.	Αστοχίες υποθαλάσσιων πρηνών και κατολισθήσεις	81
3.7.1.	<i>Εισαγωγή</i>	81
3.7.2.	<i>Αστάθεια πρηνούς</i>	83
3.7.2.1.	<i>Επισκόπηση</i>	83
3.7.2.2.	<i>Αστοχία ρηχού πρηνούς</i>	84
3.7.2.3.	<i>Αστοχία βαθέως πρηνούς</i>	87
3.7.3.	<i>Βαρυτικές ροές μάζας</i>	91
3.7.3.1.	<i>Επισκόπηση</i>	91
3.7.3.2.	<i>Μοντέλα ροής</i>	92
3.7.3.3.	<i>Υπολογιστικές μέθοδοι για τη μοντελοποίηση της ροής κορημάτων</i>	94
3.7.3.4.	<i>Σημειώσεις σχετικά με την ανάλυση για τις ροές μάζας βαρύτητας</i>	95
3.8.	Υπεράκτιοι γεωκίνδυνοι στη Μεσόγειο Θάλασσα	96
3.9.	Γεωκίνδυνοι και δίκτυα υποθαλάσσιων καλωδίων	98

3.9.1.	<i>Γεωλογικά ρήγματα</i>	98
3.9.2.	<i>Μορφολογία πυθμένα</i>	98
3.9.3.	<i>Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις</i>	98
3.9.4.	<i>Τοπογραφικές ιδιαιτερότητες του πυθμένα</i>	99
4.	Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα	100
4.1.	Γενικά.....	100
4.2.	Ροή Εργασιών σε ένα Γεωγραφικό Πληροφοριακό Σύστημα	102
4.3.	Αναπαράσταση των δεδομένων	103
4.3.1.	<i>Μοντέλο Διανυσματικών Δεδομένων</i>	105
4.3.2.	<i>Μοντέλο Ψηφιδωτών Δεδομένων</i>	106
4.3.3.	<i>Μοντέλο ψηφιδωτών και διανυσματικών δεδομένων</i>	107
4.4.	Θεμελιώδεις έννοιες των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων....	108
4.5.	Συνοπτική περιγραφή του λογισμικού ArcGIS v.10.2.2.....	111
4.5.1.	<i>ArcCatalog</i>	112
4.5.2.	<i>ArcGlobe</i>	115
4.5.3.	<i>ArcToolbox</i>	115
4.5.4.	<i>ModelBuilder</i>	115
4.5.5.	<i>ArcMap</i>	116
4.6.	Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα και οδεύσεις καλωδίων.....	117
4.6.1.	<i>Μοντελοποίηση των προβλημάτων και χρησιμοποιούμενα εργαλεία</i> . 117	
4.6.2.	<i>Βασικά εργαλεία</i>	118
5.	Εφαρμογή: Χάραξη καλωδίου μεταξύ Ελλάδας - Ιταλίας	127
5.1.	Εισαγωγή.....	127
5.2.	Συλλογή και διαχείριση δεδομένων	128
5.3.	Διαμόρφωση κριτηρίων	132
5.4.	Δημιουργία μοντέλου και εκπονούμενη διαδικασία	133
5.5.	Αποτελέσματα μοντέλου	140
6.	Συμπεράσματα και μελλοντικές προεκτάσεις.....	145
6.1.	Συμπεράσματα και αποτίμηση των αποτελεσμάτων της εργασίας.....	145

6.2. Μελλοντικές προεκτάσεις μεθοδολογίας.....	146
Βιβλιογραφία	148

Περίληψη

Ένα από τα βασικότερα κριτήρια για τη βέλτιστη χάραξη υποθαλάσσιων δικτύων ενεργειακών καλωδίων, το οποίο σχετίζεται άμεσα με την ασφάλεια και την ακεραιότητα των εν-λόγω δικτύων, αποτελεί ο εντοπισμός και η αντιμετώπιση των ενδεχόμενων γεωκινδύνων στο βυθό, όπως κατολισθήσεις, βραχοπτώσεις, ενεργά ρήγματα, κ.α. Στην παρούσα εργασία, έπειτα από μία εκτενή διερεύνηση του προβλήματος των υποθαλάσσιων γεωκινδύνων, δίνεται έμφαση στην τρωτότητα των υποθαλάσσιων δικτύων ενεργειακών καλωδίων, και γίνεται προσπάθεια ανάπτυξης και εφαρμογής ενός υπολογιστικού εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων σε περιβάλλον γεωγραφικών πληροφοριακών συστημάτων για τη βελτιστοποίηση της χάραξης. Είναι προφανές ότι με τον τρόπο αυτό διερευνάται η δυνατότητα των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων στο να διαχειριστούν το πρόβλημα της χάραξης υποθαλάσσιων καλωδίων με κριτήρια που σχετίζονται με υπεράκτιους γεωκινδύνους. Σημειώνεται ότι η εργασία δίνει ιδιαίτερη έμφαση στη Μεσόγειο Θάλασσα, λόγω των έντονων γεωλογικών φαινομένων που χαρακτηρίζουν την ευρύτερη περιοχή εξαιτίας των κινήσεων των τεκτονικών πλακών (π.χ. σεισμοί, ηφαίστεια, κ.α.), σε συνδυασμό με τα αναμενόμενα έργα ζεύξης μεταξύ νησιών ή χωρών της Μεσογείου. Συγκεκριμένα:

Στα πρώτα κεφάλαια της παρούσας εργασίας δίνονται πληροφορίες σχετικά με τις εφαρμογές των υποθαλάσσιων καλωδίων ηλεκτρικού ρεύματος και την διαδικασία πόντισής τους στο θαλάσσιο πυθμένα. Επίσης, γίνεται αναφορά στις απαιτούμενες διαδικασίες μελέτης της θαλάσσιας περιοχής πριν από την πόντιση ενός καλωδίου. Επιπροσθέτως, παρουσιάζεται εκτενώς ο απαραίτητος εξοπλισμός για την εγκατάσταση, αλλά και τις μεθόδους προστασίας των υποθαλάσσιων καλωδίων.

Στη συνέχεια, μελετώνται εκτενώς οι υπεράκτιοι γεωκίνδυνοι. Εντοπίζονται οι σημαντικότερες κατηγορίες τους και οι σπουδαιότεροι γεωκίνδυνοι που επηρεάζουν τα δίκτυα υποθαλάσσιων καλωδίων. Αναλύονται οι μηχανισμοί ενεργοποίησης των γεωκινδύνων και περιγράφονται οι διαδικασίες ταυτοποίησης και αξιολόγησής τους. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην αστοχία υποθαλάσσιων πρυνών και στις κατολισθήσεις ιζημάτων και παρουσιάζονται διάφορα υπολογιστικά μοντέλα της γεωτεχνικής ανάλυσης.

Όπως προαναφέρθηκε, γίνεται προσπάθεια δημιουργίας ενός εργαλείου λήψης αποφάσεων για την βέλτιστη χάραξη υποθαλάσσιων καλωδίων συναρτήσεων των υπεράκτιων γεωκινδύνων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός γεωγραφικού πληροφοριακού συστήματος το οποίο είναι σε θέση να διεξάγει πολυ-κριτηριακή ανάλυση. Παρουσιάζονται βασικές αρχές λειτουργίας του συστήματος και αποδίδονται οι θεμελιώδεις έννοιες των γεωγραφικών πληροφοριακών συστημάτων. Επίσης, γίνεται μια συνοπτική περιγραφή του λογισμικού ArcGIS v.10.2.2 και των υποσυστημάτων του, που χρησιμοποιούνται για την εκπόνηση της μελέτης για τη βέλτιστη χάραξη υποθαλάσσιου καλωδίου.

Στην παρούσα εργασία μελετάται, ως εφαρμογή, η δυνατότητα διασύνδεσης της Ελλάδας και της Ιταλίας. Τα κύρια κριτήρια για τη διεξαγωγή της μελέτης βελτιστοποίησης της χάραξης του υποθαλάσσιου καλωδίου, είναι η αποφυγή των δυσμενέστερων περιοχών εμφάνισης γεωκινδύνων και το ελάχιστο δυνατό μήκος του καλωδίου. Επιπροσθέτως, οι γεωκίνδυνοι οι οποίοι διερευνώνται στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι τα ενεργά ρήγματα και οι περιοχές ενδεχόμενης ρευστοποίησης του θαλάσσιου πυθμένα στην περιοχή της Αδριατικής, ενώ παράλληλα καταβάλλεται προσπάθεια να αποφευχθούν περιοχές του πυθμένα με μεγάλες κλίσεις οι οποίες είναι επικίνδυνες ως προς την αστάθεια των πρανών. Σημειώνεται ότι ο χάρτης των περιοχών δυνητικής ρευστοποίησης είναι ένας συνδυασμός επιμέρους δεδομένων. Συγκεκριμένα, οι περιοχές ρευστοποίησης αποτελούν υπέρθεση της μέσης συγκέντρωσης ιζημάτων, των ζωνών σεισμικής επιτάχυνσης και των ομαλών κλίσεων του πυθμένα της θαλάσσιας περιοχής ενδιαφέροντος. Ως σημείο εκκίνησης του καλωδίου ορίζεται η περιοχή Σαγιάδα Θεσπρωτίας και ως σημείο πέρατος η περιοχή Οτράντο της Ιταλίας. Εν κατακλείδι, μέσω της εκτενούς περιγραφής της διαδικασίας, ώστε να δημιουργηθεί το εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων με το λογισμικό ArcGIS, και ύστερα από την επιτυχή εφαρμογή του, σχεδιάζονται και παρουσιάζονται οι εναλλακτικές οδεύσεις του υποθαλάσσιου καλωδίου.

Abstract

One of the main criteria for the optimal design of submarine power cable grids route, which is directly related with the security and integrity of these networks, is to identify and address potential geohazards in the seabed, such as landslides, rock falls, active seismic faults, etc. The current thesis, after a thorough investigation of the problem of offshore geohazards, emphasizes on the vulnerability of the submarine power cable grids, and is trying to develop a computational decision-support tool in a G.I.S. environment for route optimization. It is evident that in this way we try to investigate the capability of G.I.S. to cope with the issue of submarine cable routing taking into account criteria related to offshore geohazards. It is noted that the thesis emphasizes on the Mediterranean Sea, due to the intense geological phenomena that characterize the region as a result of the movement of tectonic plates (e.g. earthquakes, volcanoes, etc.), combined with the expected projects interconnecting islands and/or countries of the Mediterranean Sea. More specifically:

In the first chapters of the thesis information about the application of submarine power cables and the process of cable-laying on the seabed are given. Reference is also made to the required survey procedures of the site area before the cable-laying. Additionally, there is extensively presented the necessary equipment for the installation and the methods of protection of submarine cables.

Then, offshore geohazards are extensively studied. The main categories of the most significant geohazards affecting submarine cable grids are identified. Triggering mechanisms of geohazards are analyzed and the identification and evaluation procedures are described. There is particular emphasis on submarine slope failure and landslides and various computational models of geotechnical analysis are presented.

As mentioned above, there is an effort to create a decision making tool for the optimal submarine cables route versus offshore geohazards. This is achieved through a geographic information system. Basic operating principles of the system are presented and the fundamental concepts of G.I.S. are assigned. Also, a brief description of ArcGIS v.10.2.2 software is made and its subsystems, used for the study on the submarine cable route optimization.

This thesis studies the possibility of interconnection between Greece and Italy. The main criteria for the conduct of the study for the submarine cable's route optimization are the avoidance of the worst geohazards areas and the minimum cable length. In addition, geohazards which investigated in this application are the active seismic faults and the potentially liquefiable areas of the seabed in the Adriatic region, while additionally there is an effort to avoid areas of the seabed characterized by high inclination that are susceptible to slope instability phenomena. Note that the map of the potential areas of liquefaction is a combination of individual data. Specifically, the liquefiable areas are overlay of the average sediments concentration, the seismic acceleration zones and gentle slopes of the seabed of the site of interest. The starting point of the cable is Sagiada of Thesprotia in Greece and the end point is Otranto in Italy. In conclusion, through the extensive description of the process to create a decision-support tool on ArcGIS software, and after its successful application, the alternative routes of the submarine cable are designed and presented.

1. Εισαγωγή

Παλαιότερα, τα υποθαλάσσια ενεργειακά καλώδια χρησιμοποιούνταν για τη διασύνδεση επίγειων ενεργειακών δικτύων κατά μήκος ακτών, εκβολών, ποταμών, ισθμών κλπ. Στη σύγχρονη εποχή, μεταφέρουν ενέργεια μεταξύ χωρών, νησιών και υπερράκιων εγκαταστάσεων, όπως για παράδειγμα πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου, παρατηρητήρια ωκεανολογίας κ.λπ. Επιπροσθέτως, τα υποθαλάσσια καλώδια συμβάλλουν στη μεταφορά, προς τη στεριά, ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως είναι ο αέρας, οι κυματισμοί και οι παλίρροιες. Ιστορικά, το πρώτο υποθαλάσσιο ενεργειακό καλώδιο εγκαταστάθηκε στον ποταμό Ίζαρ της Γερμανίας το 1811 και ήταν μονωμένο με φυσικό καουτσούκ. Με το πέρας των δεκαετιών η τεχνολογία των καλωδίων συνεχώς αναπτύσσεται. Σήμερα, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 2, χρησιμοποιούνται δύο βασικοί τύποι καλωδίων, τα HVAC και τα HVDC. Τα HVAC (High Voltage, Alternating Current) περιορίζονται σε αποστάσεις διάδοσης μικρότερες των 80 km. Τα HVDC (High Voltage, Direct Current) χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερες αποστάσεις. Το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) μετατρέπεται σε συνεχές (DC) για να διαδοθεί μέσω του καλωδίου και ξαναγίνεται AC στο άλλο άκρο του. Επίσης, στις μέρες μας κυριαρχούν δύο βασικοί τύποι μόνωσης καλωδίου. Η μόνωση με μανδύα από μόλυβδο και η μόνωση με εξηλασμένο πολυαιθυλένιο τριπλής εξώθησης (XLPE, διασταυρωμένο πολυαιθυλένιο ή EPR, καουτσούκ αιθυλενίου-πολυαιθυλενίου).

Το σημαντικότερο στάδιο πριν την πόντιση ενός καλωδίου είναι η μελέτη της θαλάσσιας περιοχής. Ο θαλάσσιος πυθμένας πρέπει να αποτυπωθεί με λεπτομέρεια κατά μήκος ζωνών εύρους 500-1500 m, ώστε να βρεθεί η καλύτερη και ασφαλέστερη όδευση για την πόντιση και ταφή καλωδίων ρεύματος υψηλής τάσης. Μία όδευση χαρακτηρίζεται ασφαλής όταν (Ρουσάκης, 2015):

- Η κλίση του πυθμένα δεν υπερβαίνει τις 10-11 μοίρες κατά μήκος της τελικής προτεινόμενης όδευσης του καλωδίου.
- Στις μεγάλες κλίσεις του πυθμένα θα πρέπει να χαράσσονται διαδρομές καλωδίων κάθετα στην κλίση του πρηνούς.
- Δεν υπάρχουν μεγάλα κατολισθητικά φαινόμενα, καθώς και αστάθεια ιζημάτων στον πυθμένα.
- Ο πυθμένας δεν είναι βραχώδης και δεν υπάρχουν πάνω στην επιφάνειά του εξάρσεις βράχων και αντικείμενα όπως ναυάγια κ.λπ.

- Δεν υπάρχουν θαμμένα αντικείμενα κάτω από τον πυθμένα, όπως ναυάγια, νάρκες κ.λπ.
- Τα επιφανειακά ιζημάτα έχουν πάχος τουλάχιστον 0.5 - 2 m ώστε να είναι δυνατή η ταφή του καλωδίου.
- Η διατμητική αντοχή των ιζημάτων δεν υπερβαίνει τα 80 kPa, ώστε να είναι εύκολη η εκσκαφή τους.
- Δεν υπάρχει έντονη αλιευτική δραστηριότητα, κυρίως από συρόμενα εργαλεία, τράτες.

Στην παρούσα εργασία, μελετάται η ανάπτυξη ενός εργαλείου, αναπτυσσόμενο στο περιβάλλον ενός Γεωγραφικού Πληροφοριακού Συστήματος (Γ.Π.Σ. - G.I.S.), το οποίο προτείνει ασφαλείς οδεύσεις υποθαλάσσιου καλωδίου, λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη γεωκινδύνων στην περιοχή εγκατάστασης. Οι γεωκίνδυνοι είναι γεωλογικές και υδροδυναμικές καταστάσεις ή διαδικασίες που μπορούν να οδηγήσουν σε κινήσεις ιζημάτων, μετακινήσεις πετρωμάτων και κινήσεις υγρών ή αερίων κατά τη διάρκεια είτε ξαφνικών επεισοδιακών γεγονότων, είτε λόγω αργής προοδευτικής παραμόρφωσης του πυθμένα. Όπως προαναφέρθηκε, οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις και η αστάθεια των ιζημάτων του πυθμένα είναι δύο σπουδαίοι παράγοντες που πρέπει να αποφεύγονται κατά την πόντιση ενός καλωδίου. Στο κεφάλαιο 3, γίνεται μια εκτενής παρουσίαση των υποθαλάσσιων γεωκινδύνων και των μεθόδων ταυτοποίησης και αξιολόγησής τους.

Τα τελευταία χρόνια πολλοί θεσμικοί φορείς χρησιμοποιούν τα Γ.Π.Σ. στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Όπως παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4, το Γ.Π.Σ. είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής, αποθήκευσης, διαχείρισης και ανάλυσης πληροφορίας που σχετίζεται με φαινόμενα εξελισσόμενα στο γεωγραφικό χώρο. Χρησιμοποιώντας ένα τέτοιο σύστημα, στο κεφάλαιο 5, γίνεται προσπάθεια χάραξης των βέλτιστων οδεύσεων υποθαλάσσιων καλωδίων στην περιοχή της Αδριατικής θάλασσας μεταξύ Ελλάδας και Ιταλίας, με σκοπό την αποφυγή γεωκινδύνων, που μπορούν να βλάψουν την ακεραιότητα του καλωδίου.

2. Υποθαλάσσια ενεργειακά καλώδια

2.1. Εφαρμογές υποθαλάσσιων ενεργειακών καλωδίων

2.1.1. Εισαγωγή






Τα υποθαλάσσια ενεργειακά καλώδια υφίστανται για περισσότερο από έναν αιώνα και με το πέρασ των δεκαετιών αυξάνεται σημαντικά η χρήση τους. Αρχικά, τα υποθαλάσσια ενεργειακά καλώδια χρησιμοποιήθηκαν για την τροφοδοσία απομονωμένων υπεράκτιων κατασκευών, όπως φάροι κ.λπ. Αργότερα, η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος σε νησιά κοντά στην ακτή ήταν ο βασικός στόχος των υποθαλάσσιων ενεργειακών καλωδίων. Η σύνδεση αυτόνομων ενεργειακών δικτύων για χάρη της καλύτερης σταθερότητας και αξιοποίησης των πόρων επιδιώκεται από τη δεκαετία του 1960. Σήμερα, η σύνδεση υπεράκτιων εγκαταστάσεων βρίσκεται και πάλι στο επίκεντρο. Οι μονάδες παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου ζητούν ενέργεια που παράγεται στην ξηρά, ενώ τα θαλάσσια αιολικά πάρκα πρέπει να διοχετεύσουν την πολύτιμη «πράσινη» ενέργεια στα χερσαία δίκτυα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται πέντε βασικοί τύποι καλωδίων. Ο πίνακας 2-1 συνοψίζει ορισμένες εφαρμογές και κάποια χαρακτηριστικά των καλωδίων.

Τα επιλεγμένα πέντε είδη καλωδίων αντιπροσωπεύουν την πλειοψηφία των υποθαλάσσιων καλωδίων που είναι σήμερα εγκατεστημένα. Φυσικά υπάρχουν και άλλοι τύποι. Κάποιοι από αυτούς έχουν ιστορικό ενδιαφέρον ή έχουν χρησιμοποιηθεί σε λίγες περιπτώσεις. Άλλα είναι πολύ εξειδικευμένα προϊόντα, όπως τα καλώδια παροχής ρεύματος για υποθαλάσσιες εγκαταστάσεις της βιομηχανίας πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Δίνονται οι τάσεις και η ισχύς για τους πέντε τύπους καλωδίων. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι αυτά τα καλώδια είναι τυποποιημένα. Οι περισσότερες επενδύσεις των καλωδίων προορίζονται για διαφορετικές συνθήκες, γι' αυτό το λόγο απαιτείται ποικιλία στο σχεδιασμό του καλωδίου.

Πίνακας 2-1: Πέντε βασικές κατηγορίες υποθαλάσσιων καλωδίων (Worzyk, 2009)

					
Τύπος καλωδίου	1	2	3	4	5
Ονομαστική τάση U_0	33 kV a.c	150 kV a.c	420 kV a.c	320 kV d.c	450 kV d.c
Μόνωση	XLPE, EPR	XLPE	XLPE	Πεπιεσμένο υλικό	Πολλές στρώσεις υλικού
Χαρακτηριστικές εφαρμογές	Παροχή σε μικρά νησιά, σύνδεση πλωτών ανεμογεννητριών	Σύνδεση νησιών με μεγάλο πληθυσμό, καλώδια εξαγωγής από ΘΑΠ	Διασύνδεση μεγάλων ποταμών	Συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων για πλωτές πλατφόρμες ή αιολικά πάρκα	Σύνδεση μεγάλης απόστασης για αυτόνομα ηλεκτρικά δίκτυα
Μέγιστο μήκος	20-30 km	70-150 km	<50 km	>500 km	>500 km
Χαρακτηριστική ισχύς	30 MW	180 MW	700 MW/ τρία καλώδια	1000MW/ ζεύγος καλωδίων	600 MW/ καλώδιο

2.1.2. Παροχή ενέργειας σε νησιά

Τα νησιά που βρίσκονται κοντά στην ηπειρωτική χώρα μπορούν να συνδεθούν με το ηπειρωτικό δίκτυο μέσω υποθαλάσσιων ενεργειακών καλωδίων. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με καλώδια εναλλασσόμενου ρεύματος μέσης τάσης (≤ 52 kV) και μετάδοσης ισχύος περίπου 10-30 MW ανά καλώδιο. Τα υποθαλάσσια καλώδια αντικαθιστούν τις, συχνά αναποτελεσματικές, γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως για παράδειγμα εκείνες που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το πετρέλαιο τύπου diesel. Το μέγιστο οικονομικό μήκος αυτών των καλωδίων είναι 10-30 km. Λόγω της αυξημένης ενεργειακής ζήτησης του νησιού, ποντίζονται επιπρόσθετα καλώδια με διαφορετικές οδεύσεις για την αποφυγή κινδύνων και την αύξηση της ενεργειακής διαθεσιμότητας στο νησί. Η παροχή του νησιού μπορεί να

διαφυλαχθεί από άλλα καλώδια, ακόμα και στην περίπτωση βλάβης κάποιου καλωδίου. Η παροχή σε απομακρυσμένα νησιά είναι δύσκολη αφού οι απώλειες στα καλώδια εναλλασσόμενου ρεύματος αυξάνονται δραματικά με την απόσταση. Το νησί Gotland βρίσκεται 100 km μακριά από την ενδοχώρα της Σουηδίας κι έπρεπε να βασίζεται για πολύ καιρό σε ηλεκτρογεννήτριες. Όσπου το 1954 εγκαταστάθηκε το πρώτο υποθαλάσσιο καλώδιο συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC - High Voltage Direct Current). Τα νησιά στο στενό της Μάγχης Jersey και Guernsey συνδέθηκαν με τη Γαλλία το 1987 και ξανά το 2000. Τέλος, τα νησιά της Σικελίας και της Σαρδηνίας είναι συνδεδεμένα με την ηπειρωτική Ιταλία μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων.

Νησιά με αυτόνομη ενεργειακή τροφοδοσία είναι μερικές φορές συνδεδεμένα με την ηπειρωτική χώρα ή με γειτονικά νησιά με σκοπό να αυξήσουν την ενεργειακή διαθεσιμότητα. Το υποθαλάσσιο καλώδιο λειτουργεί σαν εφεδρικός σταθμός παροχής ενέργειας παρέχοντας ενέργεια σε περίπτωση ανάγκης όπως είναι η διακοπή της λειτουργίας της ηλεκτρογεννήτριας.

Λόγω του γεωγραφικού χαρακτήρα, κάποιες χώρες όπως η Νορβηγία, οι Φιλιππίνες, η Ιαπωνία κ.α., έχουν μακρά παράδοση στην εγκατάσταση υποθαλάσσιων ενεργειακών καλωδίων μεταξύ των πολυάριθμων νησιών τους.

Στην Ελλάδα υπάρχουν αρκετά παραδείγματα εγκατεστημένων δικτύων υποθαλάσσιων καλωδίων, άλλα μεγάλης και άλλα μικρής έκτασης, όπως π.χ. το υποθαλάσσιο καλώδιο μεταξύ των Ψαρών και της Χίου που εγκαταστάθηκε το 1992. Ένα άλλο παράδειγμα είναι το έργο της ζεύξης μεταξύ Κεραμωτής και Θάσου, στο οποίο από το 1960 έως το 2012 χρησιμοποιήθηκαν αρκετά καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το 1960 τοποθετήθηκαν τέσσερα καλώδια αλουμινίου 20 kV συνολικού μήκους 8.2 km. Ωστόσο η αύξηση των ενεργειακών αναγκών του νησιού οδήγησε το 1973 στην εγκατάσταση ακόμη τριών καλωδίων αλουμινίου 20 kV συνολικού μήκους 8.2 km. Τέλος, παρά την ομαλή λειτουργία του δικτύου, μια νέα αύξηση της ενεργειακής ζήτησης οδήγησε τον Αύγουστο του 2012 στην τοποθέτηση ακόμα ενός τριπολικού καλωδίου χαλκού XLPE 20 kV, με διαφορετική όδευση από τα υπόλοιπα, συνολικού μήκους 8.7 km (Assodivers, 2012).

Ένα ακόμα σπουδαίο έργο υποθαλάσσιων καλωδίων στην Ελλάδα είναι η ηλεκτρική διασύνδεση των Κυκλάδων με την ηπειρωτική χώρα που ολοκληρώθηκε το 2016. Το έργο αποτελείται από την υποθαλάσσια καλωδιακή διασύνδεση 150 kV μεταξύ Λαυρίου-Σύρου, συνολικού μήκους 108 km και τις υποθαλάσσιες καλωδιακές διασυνδέσεις 150 kV, από τη Σύρο προς την Τήνο, τη Μύκονο και την Πάρο, και

τερματικό καλωδίων 150 kV στην Τήνο. Ακόμα, στο Λαύριο εγκαταστάθηκε ένας υποσταθμός ζεύξης 150 kV, υπαίθριες διατάξεις σύνδεσης με το κέντρο υπερυψηλής τάσης (Κ.Υ.Τ.) 400 kV Λαυρίου, καθώς και τρεις υποσταθμοί υποβιβασμού 150 kV προς μέση τάση στις νήσους Σύρο, Πάρο και Μύκονο. Στην εικόνα 2-1 παρουσιάζεται ο χάρτης της υποθαλάσσιας ηλεκτρικής διασύνδεσης των Κυκλάδων.



Εικόνα 2-1: Ο χάρτης της ηλεκτρικής διασύνδεσης των Κυκλάδων (ΑΔΜΗΕ, 2014).

2.1.3. Σύνδεση σε αυτόνομα δίκτυα

Από την έλευση των υποθαλάσσιων καλωδίων υψηλής ενέργειας πολλά δίκτυα έχουν διασυνδεθεί, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές. Τα υποθαλάσσια καλώδια συνδέουν δίκτυα διαφορετικών χωρών (π.χ. Ηνωμένο Βασίλειο - Γαλλία, Σουηδία - Γερμανία, Δανία - Σουηδία, Μαρόκο - Ισπανία, Ελλάδα - Ιταλία). Χρησιμοποιώντας την τεχνογνωσία των HVDC καλωδίων, μπορούν να συνδεθούν περιοχές με διαφορετικό έλεγχο συχνότητας (Σουηδία - Γερμανία, Νορβηγία - Ολλανδία). Στη προαναφερθείσες περιοχές, και οι δύο πλευρές έχουν ένα δίκτυο 50 Hz, αλλά η συχνότητα ελέγχεται με διαφορετικό τρόπο, καθιστώντας το δίκτυο ασύγχρονο. Επισημαίνεται ότι η διασύνδεση των εθνικών δικτύων αποτελεί πρωταρχικό στόχο της Ευρωπαϊκής Κοινότητας.

Τα μεγάλοι μήκους υποθαλάσσια καλώδια τύπου HVDC χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση μακρινών αυτόνομων δικτύων. Το μακρύτερο υπάρχον δίκτυο υποθαλάσσιων καλωδίων τέτοιου είδους είναι ένα ζεύγος καλωδίων μήκους 580 km (NorNed) και μια σειρά από δίκτυα μήκους μεγαλύτερου των 200 km βρίσκονται σε λειτουργία (Baltic Cable, SwePol, Basslink, BritNed, SAPEI).

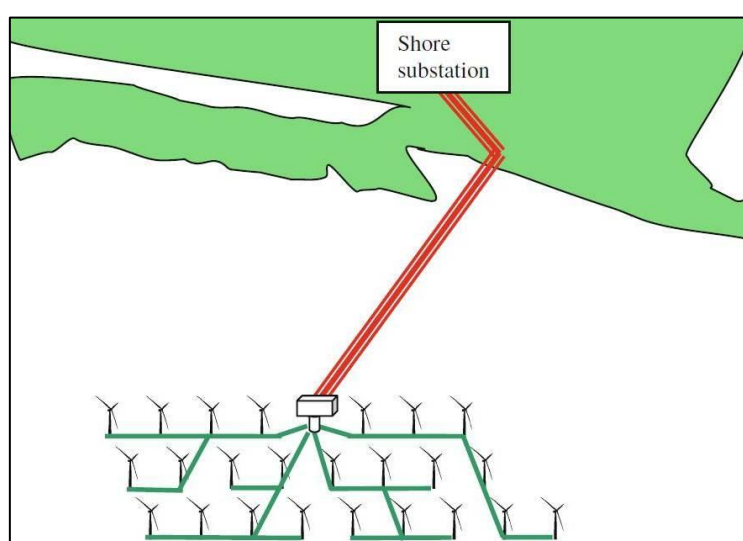
Με το Ιταλικό σύστημα η Ελλάδα συνδέεται από τα τέλη του 2002 μέσω ενός υποθαλάσσιου καλωδίου συνεχούς ρεύματος 400 kV ισχύος 500 MW και συνολικού μήκους 200 km. Η διασύνδεση αυτή συνδέει το Κέντρο Υπερυψηλής Τάσης (Κ.Υ.Τ.) Αράχθου με τον Υποσταθμό (Υ/Σ) Galatina στην Ιταλία. Είναι σύνδεση συνεχούς ρεύματος 400 kV και περιλαμβάνει δύο σταθμούς μετατροπής εναλασσόμενου ρεύματος (Ε.Ρ.) σε συνεχές ρεύμα (Σ.Ρ.) και αντίστροφα ικανότητας 500 MW, ένα υποθαλάσσιο καλώδιο μήκους 200 km και τμήματα εναερίων γραμμών μεταφοράς (Γ.Μ.) συνεχούς ρεύματος εκατέρωθεν μήκους 45 km επί Ιταλικού εδάφους και 120 km επί ελληνικού εδάφους (ABB, 2016).

Έως το 2022 εκτιμάται ότι θα έχει υλοποιηθεί η διασύνδεση της Κρήτης με την ηπειρωτική Ελλάδα. Το έργο εντάσσεται στο διευρωπαϊκό σύστημα ζεύξης Ισραήλ-Κύπρου- Κρήτης- Αθηνών «EuroAsia Interconnector» και αφορά υποθαλάσσιο καλώδιο συνεχούς ρεύματος 600 kV για τη διασύνδεση των ηλεκτρικών συστημάτων Ισραήλ – Κύπρου – Ελλάδας, το οποίο θα έχει μεταφορική ικανότητα 2000 MW και συνολικό μήκος περίπου 1518 km. Επίσης, θα επιτρέπει τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας και προς τις δυο κατευθύνσεις. Ειδικότερα θα περιλαμβάνει τρεις διασυνδέσεις ως εξής: α) 329 km μεταξύ Ισραήλ και Κύπρου, β) 879 km μεταξύ Κύπρου και Κρήτης και γ) 310 km μεταξύ Κρήτης και Αττικής (EuroAsia Interconnector, 2016).

2.1.4. Θαλάσσια Αιολικά Πάρκα

Τα Θ.Α.Π. αποτελούνται από έναν αριθμό ανεμογεννητριών. Η απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών είναι 300 – 800 m. Ένα δίκτυο υποθαλάσσιων καλωδίων συνδέει τις ανεμογεννήτριες μεταξύ τους και μεταφέρει την ενέργεια στην ακτή. Τα καλώδια του δικτύου είναι τριφασικά μέσης τάσης (10-36kV) με πολυμερική μόνωση. Η σύνδεση με την ακτή μπορεί να επιτευχθεί με καλώδιο μέσης τάσης για αποστάσεις περίπου 10 km.

Για Θ.Α.Π. με πολλές ανεμογεννήτριες, με μεγάλη παραγόμενη ενέργεια, ή με μεγάλη απόσταση από την ακτή οι απώλειες ενέργειας από τη μεταφορά στην ακτή μέσω καλώδιου μέσης τάσης θα ήταν αρκετά υψηλές. Έτσι η σύνδεση της ακτής με ένα καλώδιο υψηλής τάσης θα ήταν πιο οικονομική. Σε μεγαλύτερα θαλάσσια πάρκα οι ανεμογεννήτριες είναι συνδεδεμένες σε μια πλωτή πλατφόρμα η οποία φέρει ένα μετασχηματιστή τάσης. Από την πλατφόρμα, ένα υποθαλάσσιο ενεργειακό καλώδιο (καλώδιο εξαγωγής) στέλνει το ρεύμα στην ακτή. Πολύ συχνά, χρησιμοποιούνται τριφασικά καλώδια με τάση λειτουργίας μεγαλύτερης των 100 kV, ως καλώδια εξαγωγής, για αποστάσεις άνω των 30 km. (Εικόνα 2-2)



Εικόνα 2-2: Διάταξη ενός θαλάσσιου αιολικού πάρκου (Θ.Α.Π.) με τάση 34.5 kV στα καλώδια μεταξύ των ανεμογεννητριών και τάση 138 kV στα καλώδια που συνδέουν το ΘΑΠ με την ακτογραμμή.

Σαν καλώδια εξαγωγής μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα HVDC, τα οποία απαιτούν ταυτόχρονα υπεράκτιους και παράκτιους μετατροπέες εναλλασσόμενου/συνεχούς ρεύματος. Η ανέγερση ενός πλωτού μετατροπέα εναλλασσόμενου/συνεχούς ρεύματος είναι ακριβή. Γι' αυτό το λόγο, μόνο η ανάγκη μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις μπορεί να οδηγήσει στην ανέγερση τέτοιων κατασκευών.

Εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας μικρότερης των 50 Hz χρησιμοποιείται με σκοπό τη μείωση των χωρητικών απωλειών των καλωδίων και τις μηχανικές απαιτήσεις των ανεμογεννητριών.

2.1.5. Παροχή ενέργειας σε πλωτές πλατφόρμες

Οι πλωτές πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου έχουν μεγάλη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για την εξόρυξη υδρογονανθράκων μέσω γεωτρήσεων. Η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτει ένα φάσμα δραστηριοτήτων, όπως η λειτουργία των αντλιών για την εξόρυξη των υδρογονανθράκων και την έγχυση νερού για την ενίσχυση της ανάκτησης του πετρελαίου. Επίσης, χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του ρεύματος εξόδου ώστε να επιτραπεί ο διαχωρισμός του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και του νερού. Επιπλέον, τροφοδοτεί του συμπιεστές και τις αντλίες που μεταφέρουν το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, μέσω αγωγών, σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας ή στην ακτή. Τέλος, η ηλεκτρική ενέργεια απαιτείται για επιτόπιες εργασίες για τους χώρους διαμονής.

Οι ενεργειακές ανάγκες ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες και τις συνθήκες λειτουργίας. Η ηλεκτρική ενέργεια για πολλές πλατφόρμες παράγεται τοπικά από φυσικό αέριο σε αεριοστροβίλους σε χαμηλή απόδοση. Οι εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας απαιτούν χώρο, ενώ το προσωπικό για τη λειτουργία και τη συντήρησή τους χρειάζεται επιπρόσθετους χώρους ενδιαίτησης και μεταφορά. Όλα αυτά κάνουν την τοπική παραγωγή ενέργειας ακριβή. Καθώς αυξάνεται η ενεργειακή ανάγκη, καθίσταται βιώσιμη η σύνδεση της πλατφόρμας με χερσαία δίκτυα μέσω υποθαλάσσιων ενεργειακών καλωδίων.

Στη Νορβηγία, η υπεράκτια βιομηχανία παρήγαγε τον ένα τέταρτο της συνολικής εκπομπής CO₂ της χώρας το 2006. Καθώς η Νορβηγία διαθέτει τεράστιους πόρους υδροηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχει μεγάλη δυνατότητα για μείωση των εκπομπών CO₂ μέσω της σύνδεσης των πλατφόρμων σε χερσαία δίκτυα (Εικόνα 2-3).



Εικόνα 2-3: Η νορβηγική πλατφόρμα εξόρυξης φυσικού αερίου “Troll A” παραλαμβάνει την ηλεκτρική του ενέργεια από ζεύγος HVDC καλωδίων.

Για τους λόγους αυτούς, ένας αυξανόμενος αριθμός φορέων εκμετάλλευσης πλατφόρμων επενδύει σε υποθαλάσσια καλώδια για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε πλωτές πλατφόρμες

2.1.6. Διασυνδέσεις μικρών αποστάσεων

Εκατοντάδες υποθαλάσσια καλώδια ρεύματος έχουν εγκατασταθεί για να μεταφέρουν ηλεκτρικό ρεύμα διαμέσου των ποταμών, των καναλιών, των στενών, των φιόρδ ή των κόλπων. Αν και οι εναέριες γραμμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διασυνδέσεις μέχρι και τα 3 km (π.χ. Στενά της Μεσίνα, Ιταλία), σε πολλές περιπτώσεις έχουν επιλεγεί τα υποθαλάσσια καλώδια αντί των εναερίων γραμμών. Σε τουριστικά μέρη ή σε περιοχές με φυσικούς πόρους είναι σημαντικό το να μην είναι ορατά τα καλώδια. Για παράδειγμα, για τη διέλευση του συστήματος μετάδοσης 500 kV συνεχούς ρεύματος πάνω από το ποτάμι St.Lawrence του Καναδά, χρησιμοποιήθηκε υποθαλάσσιο καλώδιο μήκους 5.1 km για να αποφευχθεί η οπτική όχληση. Τα καλώδια δεν εμποδίζουν τη διέλευση των πλοίων από το ποτάμι ή το στενό λόγω του ύψους. Οι εναέριες γραμμές πάνω από τον ποταμό Εμς στη Γερμανία, έπρεπε να κόβονται κάθε φορά που ένα ναυπηγείο μετέφερε προς τα ανάντη τα γιγάντια κρουαζιερόπλοια στη Βόρεια θάλασσα. Όταν οι γραμμές τέθηκαν εκτός δικτύου το 2006 για τη διέλευση του «M/S Norwegian Star», μια ανεξέλεγκτη αστάθεια δημιουργήθηκε λόγω της συσκότισης εκατομμυρίων νοικοκυριών στην Ευρώπη. Είχε ήδη γίνει μελέτη για την τοποθέτηση καλωδίων κάτω από το ποτάμι, αλλά τίποτα δεν είχε γίνει μέχρι τότε.

Επίσης, το κόστος ενός καλωδίου χωρίς ιδιαίτερη ανάγκη συντήρησης καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του μπορεί να είναι χαμηλότερο από μια εναέρια γραμμή, η οποία έχει ζημιές λόγω καταιγίδων, αλατιού και εναπόθεσης πάγου κτλ..

Σε εφαρμογές μικρών αποστάσεων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υποθαλάσσια καλώδια με υψηλή τάση όταν δεν χρειάζονται ζεύξεις. Συχνά, διατίθενται καλώδια σε υψηλότερες τάσεις από τις αντίστοιχες ζεύξεις.

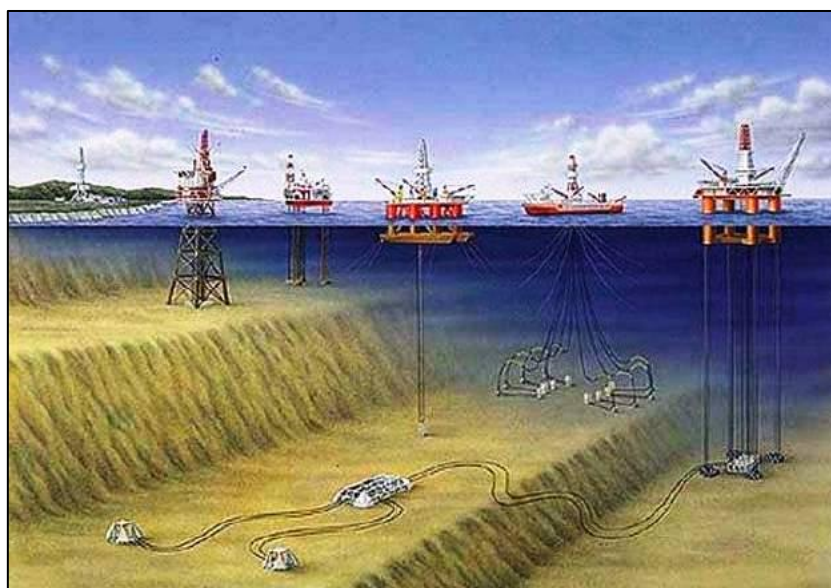
Οι διασυνδέσεις των 1400 – 1800 m περίπου μπορούν να δημιουργηθούν με μεθόδους οριζόντιας γέωτρησης και διάνοιξης τάφρου από την ακτογραμμή. Τα καλώδια θα περάσουν μέσω των σωλήνων. Οι μεγαλύτερες σε απόσταση διασταυρώσεις χρειάζονται τις συνήθεις τεχνικές πόντισης υποθαλάσσιων καλωδίων.

2.1.7. Άλλες εφαρμογές των υποθαλάσσιων καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος

Υπάρχουν πολλές κατηγορίες εφαρμογών των υποθαλάσσιων καλωδίων. Τα υποθαλάσσια καλώδια που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι χαμηλής ή μεσαίας τάσης. Παρακάτω αναφέρονται μερικές κατηγορίες:

- Καλώδια στην παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου

Καθώς οι γεωτρήσεις παραγωγής εγκαθίστανται σε όλο και μεγαλύτερα βάθη θάλασσας, χρειάζεται πιο εξελιγμένος εξοπλισμός, όπως υποβρύχιες αντλίες και συμπιεστές κάθε τύπου για να τοποθετηθούν στο πυθμένα. Η σχηματική αναπαράσταση της εικόνας 2-4 παρουσιάζει διάφορες εγκαταστάσεις εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου που χρειάζονται υποθαλάσσια καλώδια.



Εικόνα 2-4: Διάφορες εγκαταστάσεις εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου που απαιτούν υποθαλάσσια ενεργειακά καλώδια (Worzyk, 2009).

- Καλώδια τροφοδοσίας

Είναι ενισχυμένα εύκαμπτα καλώδια συνδεσμολογίας που περιέχουν τα πάντα, από πυρήνες καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καλώδια σήματος, αγωγούς υγρών, υδραυλικές σωληνώσεις κ.λπ. στα ίδια καλώδια. Βοηθούν πολύ στον

εξοπλισμό πετρελαίου και φυσικού αερίου στο βυθό και στα τηλεχειριζόμενα υποβρύχια οχήματα (ROV).

- Καλώδια θέρμανσης αγωγού

Κάποιες φορές οι υποθαλάσσιοι αγωγοί χρειάζονται ηλεκτρική θέρμανση για την αποφυγή εναποθέσεων κεριού και σχηματισμού υδριτών. Ο ίδιος ο αγωγός χρησιμοποιείται ως θερμαντικό στοιχείο, και η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με μονωμένα καλώδια XLPE με μεγάλο μέγεθος του αγωγού και χωρίς μεταλλικό φράγμα νερού (Hvidsten S. et al, 2004).

- Υποθαλάσσια παρατηρητήρια

Τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης για παλιρροιακά κύματα και οι στρατιωτικές συστοιχίες αναγνώρισης απαιτούν υποβρύχια ηλεκτρική ενέργεια. Η αυξανόμενη έμφαση στην ωκεανογραφική έρευνα αποτέλεσε το έναυσμα για την εγκατάσταση υποβρύχιων αυτόματων ερευνητικών σταθμών για τη συλλογή δεδομένων. Όλα αυτά απαιτείται να έχουν αξιόπιστη παροχή υποθαλάσσιας ηλεκτρικής ενέργειας (Shepherd K. et al, 2007).

2.2. Μελέτη θαλάσσιας περιοχής

Μία από τις πιο σημαντικές δραστηριότητες κατά το σχεδιασμό και την προετοιμασία ενός έργου υποθαλάσσιου καλωδίου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μια αρκετά λεπτομερής μελέτη της θαλάσσιας περιοχής. Η μελέτη μπορεί να προσφέρει κρίσιμα εισερχόμενα δεδομένα για την επιλογή της βέλτιστης διαδρομής του καλωδίου, το σχεδιασμό του καλωδίου, καθώς και το σχεδιασμό της διαδικασίας εγκατάστασης του καλωδίου. Αυτές οι παράμετροι δεν έχουν μόνο σημαντικό αντίκτυπο στο κόστος αλλά και στο χρονοδιάγραμμα. Μια ολοκληρωμένη μελέτη μπορεί επίσης να κάνει σημαντική διαφορά για τη μελλοντική διαθεσιμότητα και το κόστος επισκευής του καλωδίου σύνδεσης. Η αποδοτικότητα της σύνδεσης του καλωδίου μπορεί να εξαρτάται καθοριστικά από τη μελέτη.

Με βάση τα στοιχεία της μελέτης του βυθού μεταξύ των σημείων προσαιγιάλωσης, μπορεί να προταθεί η βέλτιστη διαδρομή του καλωδίου προκειμένου να αποφευχθούν υποθαλάσσια εμπόδια και κίνδυνοι, όπως:

- Υφιστάμενα καλώδια και αγωγοί
- Αλιεία και αλιεία με τράτες
- Ναυαγία πλοίων και άλλα θαμμένα αντικείμενα, εγκαταλελειμμένα καλώδια
- Οδοί ναυσιπλοΐας, είσοδοι λιμανιών και αγκυροβόλια
- Κοιτάσματα πετρελαίου και αερίου
- Στρατιωτικές δραστηριότητες
- Πεδία ρίψης πυρομαχικών
- Περιοχές εξόρυξης άμμου ή αμμοχάλικου
- Ρίψη απορριμμάτων στη θάλασσα και βυθοκόρηση
- Ρύπανση βυθού

Οι προβληματικές περιοχές θα πρέπει να αποφεύγονται, διότι κάθε σημαντικό εμπόδιο που θα εμποδίζει στην ομαλή λειτουργία των εργασιών πόντισης μπορεί να δημιουργήσει μεγάλες δαπάνες και καθυστερήσεις. Αποφεύγοντας αυτές τις περιοχές μπορεί να είναι ένα σημαντικό κομμάτι στο πλαίσιο της προστασίας για το έργο του καλωδίου.

Η καλύτερη διαδρομή του καλωδίου είναι επίσης ανάλογη με τη γνώση των συνθηκών και των ιδιοτήτων του βυθού. Ειδικότερα, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τα ακόλουθα στοιχεία:

- Βαθυμετρία, δηλαδή το βάθος του νερού σε όλη τη διαδρομή του καλωδίου.
- Μορφολογία του πυθμένα
- Γεωφυσικά δεδομένα με στόχο να έχουμε άποψη για το πάχος και την υφή των ιζημάτων
- Τεκτονικά στοιχεία του πυθμένα (δηλαδή ρήγματα, ενεργά και μη)
- Δομή του βυθού, παρουσία βραχωδών εξάρσεων, ρωγμές, υποθαλάσσια φαράγγια, απότομες πλαγιές, βραχώδης ακανόνιστος πυθμένας.
- Περιοχές με κίνδυνο κατολισθήσεων λόγω μεγάλων κλίσεων.
- Μετακινήσεις ιζημάτων (λόγω κατολισθήσεων ή/και θαλάσσιων ρευμάτων).

Μια εμπειριστατωμένη γνώση των συνθηκών του πυθμένα βοηθά τους μελετητές του έργου να προσδιορίσουν και να εντοπίσουν πιθανούς κινδύνους κατά τη λειτουργία. Τα δεδομένα έχουν επίπτωση στον σχεδιασμό του καλωδίου καθώς και στην επιλογή της περιοχής της εγκατάστασης. Εάν οι συνθήκες του πυθμένα είναι πολύ δύσκολες κατά μήκος της προτεινόμενης διαδρομής του καλωδίου, αυτό μπορεί να είναι αρκετό για να μεταβληθεί η διαδρομή.

Ακόμη και τα υδρολογικά δεδομένα παίζουν σημαντικό ρόλο στις διαδικασίες σχεδιασμού και εγκατάστασης του καλωδίου:

- Η θερμοκρασία του νερού (επιφανειακά και στον πυθμένα) κατά τη διάρκεια του έτους
- Παλίρροιες, κύματα και ρεύματα
- Πρότυπα ανέμων κατά τη διάρκεια του έτους

Ο άνεμος, τα κύματα και οι παλίρροιες έχουν την ιδιότητα να εμποδίζουν σοβαρά ή να διακόπτουν μια δραστηριότητα εγκατάστασης. Για το λόγο αυτό είναι καλό να τα γνωρίζουμε εκ των προτέρων.

Λοιπά στοιχεία που δεν μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο το καλώδιο, αλλά μπορούν να διαταράξουν τις εργασίες πόντισης του καλωδίου είναι τα εξής:

- Ύπαρξη λιβαδιών ποσειδώνιας (σε βάθη 10 έως 30 μέτρων)
- Τουριστικά θέρετρα

Συνήθως, η διαδικασία πόντισης εντός ή κοντά σε αυτές τις θέσεις περιορίζεται ή ρυθμίζεται από τις αρχές.

Σε ορισμένες χώρες, οι αρχές μπορεί να είναι ελλιπείς ή δεν ενδιαφέρονται για το θέμα αυτό. Είναι θέμα της επαγγελματικής ηθικής και των περιβαλλοντικών πολιτικών για να αποφασίσουν τι να κάνουν και τι να μην κάνουν.

2.2.1. Πεδίο εφαρμογής της θαλάσσιας μελέτης

Οι κανόνες εφαρμογής της θαλάσσιας μελέτης τίθενται από την εταιρεία κατασκευής. Μια ολοκληρωμένη μελέτη συμβάλει στην ορθή εκτέλεση του έργου.

Ο αρμόδιος για το σχεδιασμό του έργου θα πρέπει να εκτελέσει καταρχάς μια ολοκληρωμένη μελέτη γραφείου (Desktop Study). Μια εντυπωσιακά μεγάλη ποσότητα δεδομένων μπορούν να ανακτηθούν από τράπεζες ωκεανογραφικών δεδομένων, δημόσιες πηγές, ή/και λιμενικές αρχές. Μπορούν να συγκεντρωθούν βαθυμετρικοί χάρτες, οι θερμοκρασίες του πυθμένα, οι θαλάσσιοι χάρτες του πυθμένα, τα ρεύματα, τα κύματα, ο άνεμος, (οι παλίρροιες - αν υπάρχουν παλιρροιογράφοι), τα υδρολογικά δεδομένα, άλλοι χρήστες του βυθού της θάλασσας, και πολλά άλλα δεδομένα (Lyll, 2000). Όταν γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων από διαφορετικές πηγές είναι σημαντικό να αναφέρονται οι ακριβείς θέσεις σε ένα συμφωνημένο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Το Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα '84 (WGDS'84) είναι πρότυπο στον τομέα αυτό. Η μελέτη γραφείου θα πρέπει επίσης να αξιολογεί εάν υπάρχει ανάγκη για έκδοση αδειών τόσο για την μετέπειτα επί τόπου έρευνα για τη θαλάσσια διαδρομή, όσο και για την ίδια την εγκατάσταση των καλωδίων. Το να αμεληθεί η μελέτη γραφείου θα οδηγήσει πιθανότατα σε αύξηση του κόστους της έρευνας και της εγκατάστασης. Μια ολοκληρωμένη μελέτη γραφείου είναι μια καλή βάση για τη διαδικασία υποβολής προσφορών, εκτός και αν πρόκειται για πολύπλοκα έργα.

Η μελέτη για τη θαλάσσια διαδρομή πρέπει να γίνει κατά μήκος της ζώνης της διαδρομής που θα λάβει χώρα το έργο. Οι ερευνητικοί φορείς ή οι εταιρείες έρευνας θα διεξάγουν την έρευνα με ειδικά ερευνητικά σκάφη για να παράσχουν οποιαδήποτε δεδομένα προς ζήτηση κατά μήκος της προτεινόμενης ζώνης της διαδρομής του καλωδίου. Για πιο απλές περιπτώσεις, κινητοποιούνται σκάφη (Vessels of Opportunity) με τον απαιτούμενο εξοπλισμό για τη συγκεκριμένη εργασία. Σε κάθε περίπτωση, η ποιότητα του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, καθώς και η εξειδίκευση του πληρώματος και των επιστημόνων είναι κομβικής σημασίας για την έκβαση της προσπάθειας. Δεν αρκεί απλώς να αποδειχτεί η παρουσία τεκτονικών συνθηκών ή ενός ναυάγιου, αλλά είναι σημαντικό να προσδιοριστεί το ακριβές στίγμα του. Η μεγάλη ακρίβεια του συστήματος προσδιορισμού θέσεως (με DGPS τεχνολογίας RTK με τη χρήση διορθώσεων με επίγειο σύστημα αναφοράς - αν υπάρχει) οδηγεί στη μέγιστη δυνατή ακρίβεια των δεδομένων του πυθμένα που λαμβάνονται από τα ωκεανογραφικά σκάφη, δεδομένα τα οποία στις μέρες μας είναι της τάξης των μερικών εκατοστών.

Η θαλάσσια έρευνα για την επιλογή της διαδρομής η οποία διεξάγεται με το ερευνητικό σκάφος πιστοποιείται με τη δειγματοληψία επιφανειακών ιζημάτων του πυθμένα. Επίσης, μία επίσκεψη στο χώρο όπου θα γίνει η προσαιγιάλωση θεωρείται απαραίτητη τόσο στην προμελέτη όσο και στη συγκεκριμένη φάση μελέτης.

2.2.2. Βαθυμετρία

Το θαλάσσιο ισοδύναμο ενός τοπογραφικού χάρτη της γης είναι ένας βαθυμετρικός χάρτης, που απεικονίζει το βάθος, τη μορφολογία καθώς και κάποια χρήσιμα συμπεράσματα από την ανακλαστικότητα των ιζημάτων σε οποιοδήποτε σημείο του βυθού. Ο μελετητής που σχεδιάζει τη διαδρομή του καλωδίου πρέπει να γνωρίζει τη μορφολογία και το βάθος προκειμένου να αποφύγει τα απότομα πρηνή και τα επικίνδυνα σημεία του πυθμένα που μπορεί να ολισθήσουν λόγω μεγάλης κλίσης τα οποία είναι προφανές ότι μπορούν να καταστρέψουν τα καλώδια.

Τα βαθυμετρικά δεδομένα έχουν χρησιμοποιηθεί στη ναυσιπλοΐα για περισσότερα από 3000 χρόνια. Μπορούν να ληφθούν από διάφορες πηγές με την αλλαγή της ποιότητας και της ακρίβειας. Μόνο οι Εθνικές ή οι κυβερνητικές υδρογραφικές υπηρεσίες (Hydrographical Offices) παρέχουν επίσημους χάρτες και τις πρόσφατες ενημερώσεις τους. Οι εμπορικοί θαλάσσιοι χάρτες είναι διαθέσιμοι από διαφορετικούς προμηθευτές, κυρίως ως ηλεκτρονικοί χάρτες (Electronic Charts). Στην καλύτερη περίπτωση, τα προϊόντα αυτά είναι σε ψηφιακή μορφή από τους επίσημους χάρτες των υδρογραφικών υπηρεσιών. Μόνο μερικά συστήματα ηλεκτρονικών χαρτών πληρούν τις προδιαγραφές του κώδικα του IMO (Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας) για την "Ασφάλεια της Ζωής στη Θάλασσα" (SOLAS). Παρά την εντυπωσιακή απεικόνισή τους, οι ηλεκτρονικοί χάρτες δεν είναι πιο ακριβείς από τους χάρτες που είναι αποτυπωμένοι σε χαρτί. Για τη μελέτη γραφείου, οι χάρτες από τις υδρογραφικές υπηρεσίες ή τα προϊόντα ηλεκτρονικών χαρτών που προέρχονται από τα δεδομένα των υδρογραφικών υπηρεσιών μπορεί να είναι ένα καλό ξεκίνημα. Ο υπεύθυνος της μελέτης του έργου θα πρέπει να είναι ενήμερος για τον περιορισμό της ακρίβειας των βαθυμετρικών δεδομένων. Βυθομετρήσεις γίνονταν για αιώνες, αλλά κάποιος θα πρέπει να ελέγξει διεξοδικά την πηγή των βαθυμετρικών δεδομένων. Από το 2002, πάνω από το 50% των δεδομένων για τις βυθομετρήσεις που βρέθηκαν στους αμερικάνικους χάρτες βασίστηκαν σε υδρογραφικές έρευνες που πραγματοποιήθηκαν πριν από το 1940. Όμως οι ακτές μπορεί να έχουν αλλάξει από τότε. Οι κατασκευαστικές δραστηριότητες ενδέχεται να έχουν αλλάξει την ακτογραμμή σημαντικά μέσα σε λίγα χρόνια, ιδίως σε περιοχές με λιμάνια που είναι κοντά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Επίσης, η φυσική διάβρωση έχει τη δυνατότητα να αναμορφώσει τις ακτογραμμές και τη βαθυμετρία. Οι πυθμένες κοντά σε παλιρροιακά νερά ή σε άλλα θαλάσσια ρεύματα επηρεάζονται ιδιαίτερα από τις γρήγορες αλλαγές της βαθυμετρίας του πυθμένα.

Όλη η βαθυμετρία αναφέρεται σε ένα επίπεδο αναφοράς της επιφάνειας του νερού που ονομάζεται στάθμη χάρτου (Chart Datum, CD). Από το 2005, τα κράτη της Βόρειας Θάλασσας υιοθέτησαν τη «Κατώτερη Στάθμη Παλίρροιας» (Lowest Astronomical Tide, LAT) ως στάθμη χάρτου. Αυτή είναι προφανώς χαμηλότερη από τη μέση στάθμη της θάλασσας. Η Γερμανία, η Ισπανία, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Γαλλία έχουν υιοθετήσει τη LAT όπως το CD υιοθετήθηκε από τις χώρες της Βόρειας Θάλασσας. Στο Βέλγιο, σε τμήματα των Κάτω Χωρών (Ολλανδία) και της Δανίας (Δυτικά του Skagen), η μέση τιμή των πηγών νερού χρησιμοποιείται ως CD. Στη Βαλτική Θάλασσα και τη Δανία (Ανατολικά του Skagen), το CD συνήθως ορίζεται ως η μέση στάθμη της θάλασσας (BSH, 2007). Η στάθμη χάρτου μπορεί να έχει αλλάξει από την ημερομηνία των μετρήσεων, είτε λόγω διοικητικών/νομικών αλλαγών, είτε λόγω πραγματικών αλλαγών στο πυθμένα της θάλασσας.

Οι διαφορές της στάθμης χάρτου σε σχέση με τα επίπεδα στην ξηρά, έχουν μικρή σημασία στην ανοικτή θάλασσα. Ωστόσο, στην παράκτια και υπεράκτια ζώνη, οι συνθήκες της παλίρροιας μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τις δραστηριότητες στην πόντιση καλωδίων.

Οι πρώτοι χαρτογράφοι μπορεί να μετρούσαν το βάθος σε διακριτά σημεία. Μπορεί να είχαν παρεμβολή μεταξύ των σημείων μέτρησης, αμελώντας την ύπαρξη των κορυφογραμμών και των ενδιάμεσων προεξοχών (Calder, 2006). Μεταξύ των εντοπισμένων και χαρτογραφημένων βυθομετρήσεων, ενδέχεται να υπάρχουν φυσικές κορυφογραμμές, βράχοι, ναυάγια και άλλα στοιχεία που διαταράσσουν την επιφάνεια.

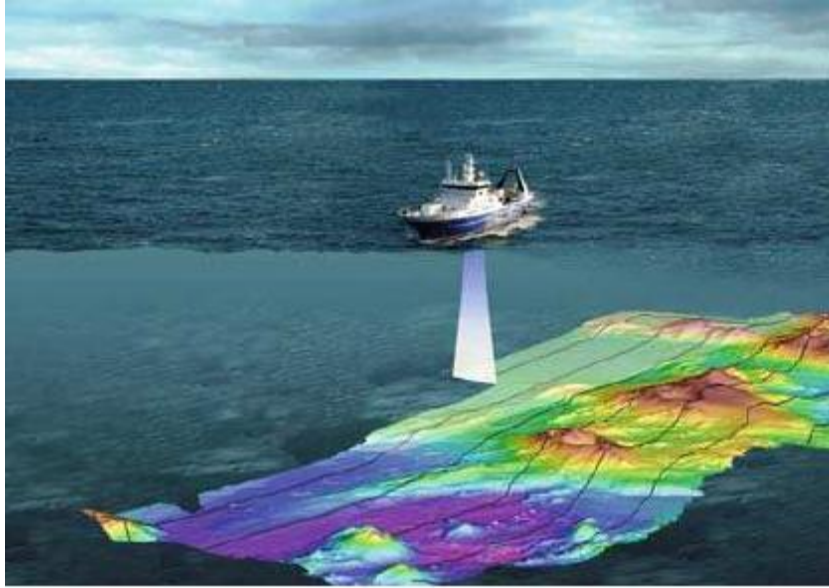
Μια πολύ χρήσιμη πηγή για τις μελέτες εργασίας στα Βόρειο-αμερικανικά ύδατα είναι η υπηρεσία που παρέχεται από την Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (NOAA). Τα σωστά βαθυμετρικά δεδομένα είναι σημαντικά, τόσο για τον σχεδιασμό του καλωδίου, όσο και για την επιλογή των κατάλληλων σκαφών τοποθέτησης προσαιγιάλωσης σε σχέση με το σχέδιο τους. Μπορεί να υπάρχουν μεγάλες συνέπειες σε κόστος, σε περίπτωση που ο εξοπλισμός βυθομέτρησης κάνει σφάλματα.

Σήμερα, τα συστήματα σόναρ χρησιμοποιούνται συνήθως για να παρέχουν μια υψηλής ανάλυσης βαθυμετρική τοπογραφία της διαδρομής του καλωδίου. Η μέθοδος μπορεί να συγκριθεί με το ραντάρ, αλλά χρησιμοποιεί ηχητικούς παλμούς υψηλής συχνότητας με συχνότητες έως 500 kHz αντί των ηλεκτρομαγνητικών παλμών. Τα συστήματα μεταδίδουν ηχητικές ανακλάσεις και αναλύουν το σήμα επιστροφής που ανακλάται από το πυθμένα ή τα αντικείμενα σε αυτόν.

Η επικρατέστερη μέθοδος βαθυμετρίας για τη μελέτη θαλάσσιων διαδρομών είναι η μέθοδος που βασίζεται σε βυθόμετρα πολλαπλής δέσμης (MBES) με

κατάλληλη συχνότητα και υψηλή ανάλυση, σχετικά μικρούς μετατροπείς σήματος, και έτσι μπορεί να προσαρμοστεί και σε ωκεανογραφικά σκάφη και σε σκάφη ευκαιρίας που δραστηριοποιούνται στο έργο. Το πλεονέκτημα των βυθομέτρων αυτών είναι ότι λόγω της πολλαπλής δέσμης που εκπέμπουν μπορούν και γράφουν ζώνες βαθυμετρίας πολλαπλάσιου εύρους από το βάθος. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα για την ακρίβεια και την ταχύτητα αποτύπωσης του έργου. Τα συστήματα μέτρησης βάθους με μεγάλη εμβέλεια χρησιμοποιούνται στα μεγαλύτερα βάθη και απαιτούν μεγάλες συστοιχίες μετατροπέων σήματος, χαμηλότερη συχνότητα σήματος και είναι εγκατεστημένα στα ύφαλα των ερευνητικών σκαφών. Για τα ρηχά νερά των περισσότερων έργων εγκατάστασης υποθαλάσσιου καλωδίου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τα συστήματα υψηλής συχνότητας μπορεί να είναι αρκετά καλά. Σε κάθε περίπτωση, οι προδιαγραφές για την υπεργολαβία της θαλάσσιας έρευνας θα πρέπει να προσδιορίζουν τα στοιχεία της ακρίβειας και της κάλυψης. Η ακρίβεια είναι περίπου 0,5-1% του βάθους του νερού εις το κέντρο της δέσμης (κάθετα προς τα κάτω) και κάπως λιγότερο στα άκρα της δέσμης. Στα βαθιά νερά, το εύρος της δέσμης μπορεί να παρακολουθεί ένα ευρύτερο διάδρομο. Συχνά, ο διάδρομος του καλωδίου μπορεί να ερευνηθεί σε ένα μόνο πέρασμα, αλλά σε πολύ ρηχά νερά μόνο ένας στενός διάδρομος μπορεί να χαρτογραφηθεί με ένα πέρασμα. Με το βυθόμετρο πολλαπλής δέσμης (MBES), μπορούν με ακρίβεια να χαρτογραφηθούν οι κλίσεις του πυθμένα και να εντοπιστούν πολύ μεγάλα εμπόδια στη διαδρομή του καλωδίου. Μεγάλα ηλεκτρικά καλώδια και αγωγοί μπορεί να εντοπιστούν αν δεν είναι πολύ βαθιά (Εικόνα 2-5).

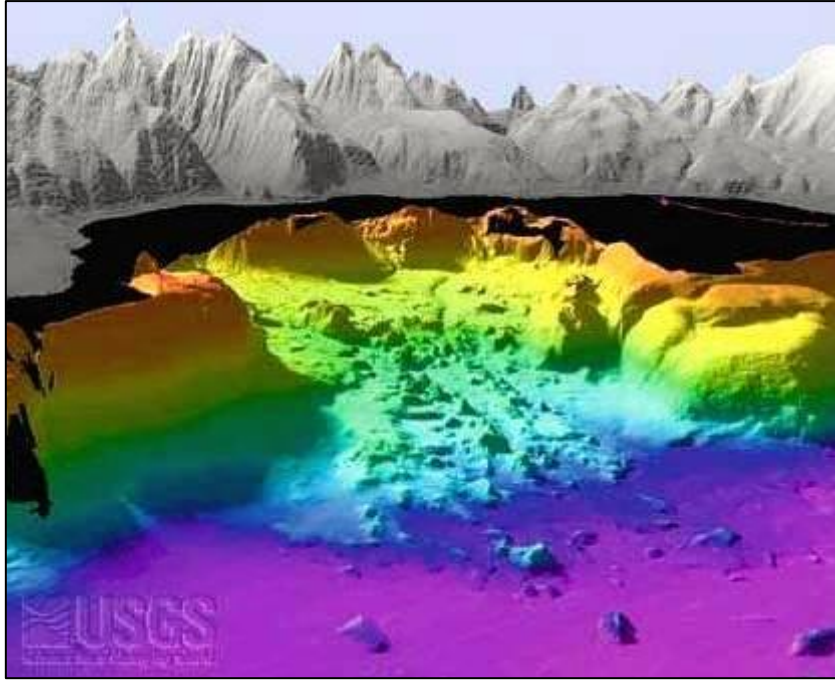
Μια μη λεπτομερής έρευνα μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες. Ένα μηχάνημα εκσκαφής του βυθού που κατασκευάζει τάφρους τραβήχτηκε πάνω στο θαλάσσιο πυθμένα, όπου οι μέγιστες γωνίες κλίσης είχαν υπολογιστεί 5° . Ωστόσο, οι πραγματικές κλίσεις ήταν πολύ πιο απότομες. Το μηχάνημα τραβήχτηκε πάνω σε αμμώδη ιζήματα με μεγαλύτερη κλίση, και τελικά ανατράπηκε σε μια πλαγιά 17° (Allan, 2001).



Εικόνα 2-5: Ερευνητικό σκάφος χαρτογραφεί τη βαθυμετρία με σόναρ. (National Institute of Water & atmospheric Research Ltd, Νέα Ζηλανδία) (Worzyk, 2009)

2.2.3. Πλευρική ηχοβολιστική σάρωση

Για τις ανάγκες αποτύπωσης φυσικών ή ανθρωπογενών αντικειμένων που βρίσκονται πάνω στον πυθμένα χρησιμοποιούνται ηχοβολιστικά όργανα πλευρικής σάρωσης, των οποίων οι αισθητήρες μέτρησης βρίσκονται στο «tow fish». Είναι μια συσκευή που μοιάζει με τορπίλη και σέρνεται μέσα στο νερό σε σταθερό ύψος ως επί το πλείστον πάνω από το θαλάσσιο πυθμένα. Παράγονται δύο ηχητικές δέσμες, η μία δεξιά και η άλλη αριστερά του σκάφους, με αποτέλεσμα την άριστη απεικόνιση του πυθμένα και όλων των αντικειμένων που βρίσκονται σε αυτόν. Το «tow fish» δεν επηρεάζεται από το κύλινδρο του ερευνητικού σκάφους και την κλίση. Η ικανότητα ανίχνευσης των χαρακτηριστικών του θαλάσσιου πυθμένα είναι ανάλογα με το εύρος λειτουργίας, την απόσταση της τορπίλης από τον πυθμένα, την ταχύτητα του σκάφους πάνω από την επιφάνεια, και το ποσοστό ανάκλασης. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Διεθνούς Υδρογραφικού Οργανισμού (ΙΗΟ), απαιτούνται τρεις ανακλάσεις ανά αντικείμενο προκειμένου να εντοπιστεί το αντικείμενο. Τα συστήματα πλευρικής σάρωσης μπορούν επίσης να παρέχουν κάποιες πληροφορίες για τη δομή των επιφανειακών ιζημάτων του πυθμένα (Εικόνα 2-6).



Εικόνα 2-6: Τρισδιάστατη απεικόνιση της βαθυμετρίας της λίμνης Tahoe των ΗΠΑ. Η περιοχή με μαύρο είναι η μη επιθεωρημένη έκταση της ακτής. Η κλίμακα των κάθετων εξάρσεων είναι x2. Η «γλώσσα» των συντριμμιών έχει πλάτος 7.5km και μήκος 9km. Τα μεγάλα τμήματα μέσα στη «γλώσσα» των συντριμμιών έχω ύψος περίπου 20m (**Worzyk, 2009**).

Οι καταγραφές του πλευρικού ηχοβολιστικού που προέρχονται από διαφορετικές πορείες παράλληλης καταγραφής συνδυάζονται μεταξύ τους σε μορφή ενός ηχο-διαγράμματος (mosaic) πάνω στην οποία φαίνονται και σημειώνονται από το μελετητή όλα τα φυσικά ή τεχνητά εμπόδια που βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια του πυθμένα κατά μήκος της ζώνης έρευνας του καλωδίου. Όλα τα εμπόδια λαμβάνονται υπόψη για την τελική χάραξη της διαδρομής.

Κατά τη διάρκεια έρευνας για τη διαδρομή του καλωδίου για το νησί New Wolfe του ποταμού Saint Lawrence, εντοπίστηκαν βράχια, κορήματα και σωλήνες από ένα άλλο κοντινό δίκτυο. Επιπλέον, ένα υπάρχον καλώδιο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας βρέθηκε 60 μέτρα μακριά από την υποτιθέμενη θέση του (Canadian Seabed Research Ltd, 2007). Τα ευρήματα βοήθησαν στην αλλαγή της διαδρομής του νέου καλωδίου για την αποφυγή των κινδύνων.

Μερικοί από τους μεγαλύτερους εχθρούς των υποθαλάσσιων καλωδίων είναι οι εξάρσεις των βράχων, οι ύφαλοι και τα υποθαλάσσια φαράγγια.

2.2.4. Τομογράφος υποδομής πυθμένα

Για την προστασία του υποθαλάσσιου καλωδίου δεν αρκεί μόνο η γνώση της γεωμορφολογίας του πυθμένα. Ειδικά για το εξωτερικό περίβλημα του καλωδίου είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τα υποστρώματα του πυθμένα της θαλάσσιας ζώνης πόντισης του καλωδίου. Τα χαρακτηριστικά, το είδος, η υφή, η σκληρότητα και το πάχος των διαφόρων στρωμάτων του πυθμένα είναι αποφασιστικής σημασίας για τη δυνατότητα ταφής του καλωδίου ή άλλης μεθόδου προστασίας. Η τομογραφία υποδομής πυθμένα μπορεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με το βάθος και το χαρακτήρα των στρωμάτων που υπάρχουν κάτω από το θαλάσσιο πυθμένα.

Η μονάδα του τομογράφου υποδομής του πυθμένα βρίσκεται πάνω στο σκάφος (για ρηχά νερά) ή πάνω στο «tow fish» (για βαθιά νερά) και είναι σε θέση να διερευνήσει την υποδομή του πυθμένα κατακόρυφα κάτω από τη μονάδα. Τα συστήματα τομογραφίας που χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις έρευνας για πόντιση καλωδίων συνήθως είναι υψίσυχνα ώστε να έχουμε τη μέγιστη δυνατή ανάλυση στα επιφανειακά ιζήματα του πυθμένα. Τέτοια συστήματα είναι των 3.5 kHz, τα chirp ή για σκληρότερους πυθμένες τα τύπου boomer.

Η τομογραφία υποδομής του πυθμένα θα πρέπει να γίνεται όσο το δυνατό πληρέστερη (δηλαδή πυκνές διαδρομές). Η υποδομή του πυθμένα μπορεί να αλλάξει σημαντικά ακόμη και όταν η επιφάνειά του δεν αλλάζει. Η έλλειψη γνώσεων σχετικά με τα χαρακτηριστικά του πυθμένα μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στο εξωτερικό περίβλημα των καλωδίων. Ξαφνικά, ο εξοπλισμός εκσκαφής του καλωδίου ενδέχεται να αντιμετωπίσει ένα βραχώδες υπόστρωμα, μόλις 30 cm κάτω από τον αμμώδη πυθμένα. Αυτή η κατάσταση θα οδηγήσει σε μια δαπανηρή αλλαγή της λειτουργίας προστασίας του καλωδίου.

Ένα άλλο παράδειγμα της ανεπαρκούς μελέτης του βάθους: μια υποδομή πυθμένα είχε πραγματοποιηθεί μέχρι το σχεδιασμό του βάθους εκσκαφής των 2 m σε ένα έργο εγκατάστασης καλωδίου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ενός θαλάσσιου αιολικού πάρκου, χωρίς να παρουσιάζει κανένα πρόβλημα. Αποδείχθηκε ότι η βαθυμετρία του πυθμένα είχε αλλάξει από τότε που έγινε η μελέτη. Το καλώδιο συνδέθηκε τελικά σε ένα σωλήνα, που ήταν ελαφρώς κάτω από τα -2 m.

2.2.5. Έρευνα με μαγνητόμετρο

Για την περίπτωση ανίχνευσης βυθισμένων μεταλλικών αντικειμένων (νάρκες, καλυμμένα ναυάγια) χρησιμοποιούνται όργανα μέτρησης του μαγνητικού πεδίου, τα μαγνητόμετρα, τα οποία σύρονται πίσω από τα σκάφη της έρευνας είτε μαζί με το πλευρικό ηχοβολιστικό, είτε μόνα τους. Τα όργανα αυτά καταγράφουν τις ανωμαλίες του μαγνητικού πεδίου που προκαλούν τα μεταλλικά αντικείμενα που βρίσκονται στον πυθμένα.

2.2.6. Οπτικός έλεγχος

Μία πιο εμπειριστατωμένη έρευνα, ειδικά σε σημεία δύσκολα του πυθμένα, απαιτεί όργανα οπτικής παρατήρησης του πυθμένα. Προκειμένου να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα για τις υποθαλάσσιες συνθήκες πριν από την πόντιση του καλωδίου, χρησιμοποιούνται επανδρωμένα υποβρύχια σκάφη, όπως έγινε για παράδειγμα κατά τη διάρκεια της έρευνας για το καλωδιακό σύστημα του Στενού της Μεσίνα (Ιταλία- Σικελία) (The CIGRE Paper , 1986). Σήμερα, παρόμοιες δραστηριότητες μπορούν να εκτελεστούν πολύ εύκολα από τα Τηλεχειριζόμενα Υποβρύχια Οχήματα (Remote-Operated Vehicles, ROV) ή από τα Αυτόνομα Υποβρύχια Οχήματα (Autonomous Underwater Vehicles, AUV). Και οι δυο τύποι είναι ικανοί στο να φέρουν συστήματα με κάμερα, κατάλληλα για το βάθος της πόντισης για την εκτέλεση μιας λεπτομερούς επιθεώρησης των σημαντικών σημείων της διαδρομής. Επισημαίνεται ότι οι παράκτιες περιοχές επιθεωρούνται και εικονοσκοπούνται με τη βοήθεια αυτοδυτών.

2.2.7. Δειγματοληψία ιζημάτων πυθμένα

Επειδή η τομογραφία υποδομής πυθμένα δεν έχει επαρκή ανάλυση για να παρέχει στοιχεία για μια έρευνα αξιολόγησης της εκσκαφής, απαιτείται η δειγματοληψία ιζημάτων πυθμένα η οποία μπορεί να δώσει πρόσθετα δεδομένα από τις επιλεγμένες τοποθεσίες για να στηρίξει τις αποφάσεις για τα εργαλεία εκσκαφής. Η διατμητική αντοχή και τα χαρακτηριστικά της υποδομής του πυθμένα σε διαφορετικά βάθη μπορεί να διερευνηθεί με τη λήψη καρότων ιζημάτων (πυρήνων).

Σε αντίθεση με τις τεχνικές της ηχοβολιστικής έρευνας, η πυρηνοληψία αποδίδει απτά δείγματα για περαιτέρω εργαστηριακές αξιολογήσεις (Εικόνα 2-7).



Εικόνα 2-7: Δειγματολήπτης ιζημάτων.

Εκτός από τη διατμητική αντοχή, με τα δείγματα πυρήνα μπορεί να μετρηθεί η κοκκομετρία του ιζήματος και η θερμική αντίσταση των ιζημάτων του πυθμένα ρ_T . Η θερμική αντίσταση ρ_T στη διαδρομή του καλωδίου είναι μία σημαντική παράμετρος για τον σχεδιασμό του καλωδίου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Παρά το γεγονός ότι η ρ_T δεν διαφέρει πολύ για πολλούς γνωστούς τύπους πυθμένα, μπορεί να υπάρχουν σημεία ασυνήθιστου ιζήματος με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ειδικά οι τύποι των ιζημάτων με υψηλή περιεκτικότητα οργανικού άνθρακα μπορεί να έχει υψηλή τιμή ρ_T , που οδηγεί σε μια ελλiptή ψύξη του καλωδίου (Abu-Hamdeh N H et al., 2000). Έχοντας καλή γνώση σχετικά με το ρ_T δίνεται η δυνατότητα στο μηχανικό

σχεδιασμό του καλωδίου να βελτιστοποιήσει τη διατομή του αγωγού και να εξοικονομήσει χρήματα.

Η δειγματοληψία ιζημάτων μπορεί επίσης να αποκαλύψει την ύπαρξη ρύπανσης στον πυθμένα της θάλασσας. Η ρίψη αποβλήτων ή πυρομαχικών, ή η συσσώρευση επιβλαβών ιζημάτων στις εκβολές των ποταμών μπορεί να έχει προκαλέσει ρύπανση. Η ρύπανση μπορεί να απελευθερωθεί κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης του καλωδίου.

Η σκληρότητα του πυθμένα είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό της μεθόδου εκσκαφής. Ιζήματα με υψηλή διατμητική αντοχή μπορούν να επιφέρουν αύξηση του κόστους ταφής και κατ' επέκταση μπορούν να καθορίσουν το πλοίο που θα χρησιμοποιηθεί για την εκσκαφή. Το κόστος της δειγματοληψίας κατά μήκος της διαδρομής του καλωδίου εξαρτάται από τον αριθμό των σημείων δειγματοληψίας, δηλαδή η απαιτούμενη απόσταση μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας. Τα αποτελέσματα της μελέτης με τα ηχοβολιστικά ενδεχομένως από την τομογραφία της υποδομής του πυθμένα, παρέχουν πολύτιμα στοιχεία για τον προσδιορισμό της απαραίτητης συχνότητας της δειγματοληψίας. Εάν η τομογραφία της υποδομής του πυθμένα δείχνει μεγάλα ομοιόμορφα τμήματα του πυθμένα, τα σημεία του δείγματος μπορεί να έχουν μεταξύ τους απόσταση των 0.5 έως 5 km. Όσο περισσότερο τα χαρακτηριστικά του πυθμένα ποικίλουν κατά μήκος της διαδρομής του καλωδίου, τόσο τα σημεία του δείγματος πρέπει να βρίσκονται πιο κοντά.

2.2.8. Θερμοκρασίες των ιζημάτων και του νερού

Η διακύμανση των θερμοκρασιών των ιζημάτων και του νερού κατά τη διάρκεια του έτους είναι ένα από τα πρώτα στοιχεία που ζητά ο μελετητής της εγκατάστασης του καλωδίου. Για τα περισσότερα νερά, είναι διαθέσιμα τα πλήρη σύνολα δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη τις ετήσιες διακυμάνσεις και τα στατιστικά στοιχεία πολλών ετών. Η θερμοκρασία του νερού στο βυθό μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τη θερμοκρασία της επιφάνειας του νερού.

Στα περισσότερα έργα υποθαλάσσιων καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι θερμικές συνθήκες στη ξηρά είναι πιο επαχθείς. Πριν ξεκινήσει ο σχεδιασμός του καλωδίου θα πρέπει να αναφέρονται οι υψηλές θερμοκρασίες το καλοκαίρι, το μεγάλο εικονικό βάθος εκσκαφής σε διασυνδέσεις με αναχώματα και τάφρους, ή οι παρεμβάσεις από βιομηχανικές δραστηριότητες.

2.3. Εγκατάσταση και προστασία υποθαλάσσιων καλωδίων

Η εγκατάσταση υποθαλάσσιων καλωδίων έχει αναπτυχθεί σημαντικά από πολλές απόψεις κατά τη διάρκεια των τελευταίων 20 ετών. Οι κατασκευαστές καλωδίων είναι σε θέση να παραδώσουν πολύ μεγάλα μήκη υποθαλάσσιων καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος, μέχρι 160 km σε ένα κομμάτι. Πλοία πόντισης καλωδίων με περισσότερους από 6000 τόνους στροφέα μπορούν να δραστηριοποιηθούν σε αντίξοες συνθήκες στη θάλασσα χρησιμοποιώντας συστήματα δορυφορικής πλοήγησης και σύγχρονα συστήματα πρόωσης. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μεγάλη εμπειρία από τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου για την εγκατάσταση των υποθαλάσσιων καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος. Επίσης, η ακμάζουσα βιομηχανία των υποθαλάσσιων ινών-καλωδίων τροφοδότησε την τεχνική εξέλιξη στην πόντιση υποθαλάσσιων καλωδίων. Τα τηλεχειριζόμενα υποβρύχια οχήματα (ROV) έχουν αναπτύξει εκπληκτικές δεξιότητες σήμερα, τις οποίες κανείς δεν μπορούσε να φανταστεί μόλις πριν από δύο δεκαετίες. Έχει αναπτυχθεί η μέθοδος JET με την οποία ανοίγει σε δύσκολες περιοχές του πυθμένα μικρή τάφρος προκειμένου να θαφτεί το καλώδιο. Επίσης, η έρευνα του πυθμένα μπορεί να πραγματοποιηθεί πολύ πιο εύκολα σε σχέση με αυτή που θα μπορούσε πριν από 20 χρόνια, παρέχοντας σήμερα μια πιο «κοντινή» εξέταση του πυθμένα και, ως εκ τούτου, την αποφυγή τυχόν δυσμενών καταστάσεων για το καλώδιο.

Εντούτοις, η εγκατάσταση των υποθαλάσσιων καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικής ενεργείας δεν είναι εύκολη. Ο λεπτομερής σχεδιασμός είναι απαραίτητος, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των καλωδίων, τα χαρακτηριστικά της διαδρομής του καλωδίου και τις ικανότητες των μηχανημάτων εγκατάστασης. Οι συνθήκες διαφέρουν τόσο πολύ από περίπτωση σε περίπτωση, κατά την οποία ο οικονομικός σχεδιασμός και τα χρονοδιαγράμματα πρέπει να παρέχουν «χώρο» για απόκλιση, ακόμη και αν υπάρχει καλή γνώση όλων των προϋποθέσεων. Μια επιτυχημένη εγκατάσταση του υποθαλάσσιου καλωδίου απαιτεί ένα προσεκτικά επιλεγμένο και ολοκληρωμένο συντονισμό πλοίων, πληρωμάτων και βοηθητικού εξοπλισμού. Ένα ακατάλληλο πλοίο πόντισης καλωδίων, ένας εξοπλισμός μικρού μεγέθους επί του πλοίου, ή ένα άπειρο πλήρωμα έχουν καταστρέψει περισσότερες από μία δράσεις πόντισης καλωδίων. Επιπλέον, θα πρέπει να περιλαμβάνεται μια κατάλληλη και αποφασιστική διαχείριση της εγκατάστασης. Τέλος, πρέπει να έχουν συμφωνηθεί οι σαφείς και εν ισχύ εξουσιοδοτήσεις για όλα τα συμβαλλόμενα μέρη επί του πλοίου.

2.3.1. Πλοία πόντισης καλωδίων

Τα πλοία πόντισης καλωδίων (CLV) αποτελούν την καρδιά σε κάθε μια επιχείρηση εγκατάστασης υποθαλάσσιου καλωδίου. Τα CLV είναι διαθέσιμα σε όλα τα μεγέθη και με όλα τα είδη εξοπλισμού. Υπάρχουν παγκοσμίως μερικά πλήρως εξοπλισμένα και άκρως εξειδικευμένα CLV για μεγάλα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος, όπως είναι το C/S "Skagerrak" (Εικόνα 2-8).



Εικόνα 2-8: C/S "Skagerrak" DP2 πλοίο με περιστρεφόμενη τράπεζα άνω των 6000 t, κατάλληλο για όλα τα είδη εγκατάστασης και επισκευής καλωδίων.

Υπάρχει επίσης μια σειρά από πλοία πόντισης καλωδίων με πολύ μεγάλη χωρητικότητα, τα οποία κατασκευάστηκαν για την εγκατάσταση καλωδίων τηλεπικοινωνιών. Τα περισσότερα από αυτά τα πλοία δεν είναι κατάλληλα για την εγκατάσταση καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος, καθώς ο εξοπλισμός του χειρισμού του καλωδίου επί του σκάφους είναι σχεδιασμένος για ελαφριά καλώδια τηλεπικοινωνιών μικρής διαμέτρου. Μερικά από τα πλοία αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εγκατάσταση καλωδίου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, μετά από σημαντικές τροποποιήσεις.

Εκτός από τα ειδικά CLV, πολλοί άλλοι τύποι πλοίων μπορούν να μετασκευαστούν προσωρινά για την πόντιση καλωδίων. Οι φορηγίδες και τα πλοία εφοδιασμού μπορεί να είναι εφοδιασμένα με τα κατάλληλα εργαλεία για τις εργασίες πόντισης καλωδίων. Οι φορηγίδες δεν έχουν τη δική τους πρόωση, αλλά είναι ρυμουλκούμενες. Κατά τη διάρκεια της πόντισης των καλωδίων, μπορούν να ρυμουλκούνται από τα ρυμουλκά προσεκτικά κατά μήκος της διαδρομής του

καλωδίου. Οι φορηγίδες για το σκοπό αυτό, κατασκευάζονται σε όλα τα μεγέθη και σχήματα.

Οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή μιας πλατφόρμας πόντισης καλωδίου (πλοίο ή φορηγίδα) είναι η ικανότητα μεταφοράς του φορτίου, οι ιδιότητες των ελιγμών, ο χώρος του καταστρώματος για τον εξοπλισμό του χειρισμού καλωδίου και του χώρου σύζευξης, ο αριθμός πληρώματος κ.λπ. Οι ιδιότητες καλής διατήρησης θέσης στη θάλασσα, δηλαδή η σταθερότητα του πλοίου στον άνεμο και τα κύματα, είναι απαραίτητες για τις εργασίες στην ανοικτή θάλασσα.

Η φορηγίδα της εικόνας 2-9 δεν έχει τη δική της πρόωση και πρέπει να ρυμουλκείται στον προορισμό. Κατά τη διάρκεια της πόντισης του καλωδίου σύρεται από αγκυροβόλια και βαρούλκα. Τα ακόλουθα χαρακτηριστικά είναι ορατά: αλυσίδες ρυμούλκησης στα αριστερά, κεντρική περιστρεφόμενη τράπεζα για τα βαριά καλώδια, βαρούλκα άγκυρας σε κάθε γωνία, κοντέινερ για τη διαμονή σε τρεις ορόφους, πλαίσιο σε σχήμα Π (A-Frame) προς την πρύμνη για την καθέλκυση των σταθερών συνδέσεων και άλλες δομές.



Εικόνα 2-9: Μεγάλη φορηγίδα πόντισης καλωδίου.

Η φορηγίδα της εικόνας 2-10 είναι σε θέση να καθίσει στον πυθμένα κατά τη διάρκεια της άμπωτης. Το καλώδιο είναι τυλιγμένο σε μια σταθερή δεξαμενή καλωδίου. Μια άλλη, μάλλον ασυνήθιστη φορηγίδα με περιστρεφόμενη τράπεζα 1700 τόνων και ένα τροχό τοποθέτησης 6 m είναι η "H P Lading" (Εικόνα 2-11).



Εικόνα 2-10: Φορηγίδα επίπεδου πυθμένα κινητοποιείται για πόντιση καλωδίου σε παλιρροιακές πεδιάδες.



Εικόνα 2-11: Ρυμουλκούμενη φορηγίδα πόντισης καλωδίου “H.P. Lading” με περιστρεφόμενη τράπεζα.

Ένας νέος στόλος από CLV (Cable Laying Vessels) υψηλής χωρητικότητας είναι υπό κατασκευή. Η εικόνα 2-12 παρουσιάζει ένα από τα νέα CLV. Τα σημαντικά χαρακτηριστικά του είναι:

- Περιστρεφόμενη τράπεζα με 6000–7000 τόνους χωρητικότητας καλωδίου.
- Κατάστρωμα πρύμνης της περιστρεφόμενης τράπεζας για το χώρο διασύνδεσης καλωδίων και εντατήρες καλωδίων.
- Μεγάλος τροχός ή στροφέιο στην πρύμη για το ξεδίπλωμα του καλωδίου.
- Κατάστρωμα υψηλής αντοχής για την προσθήκη περισσότερων εγκαταστάσεων πόντισης καλωδίων ή προσωρινών περιστρεφόμενων τραπεζών.
- Γερανός για τον χειρισμό δύσκαμπτων συνδέσεων.
- Ελικοδρόμιο για την εύκολη μεταφορά του πληρώματος.



Εικόνα 2-12: Νεότερης γενιάς πλοίο πόντισης καλωδίου.

Χωρητικότητα φορτίου. Κάθε επιχείρηση πόντισης θα πρέπει να μεταφέρει όσο το δυνατόν περισσότερο καλώδιο μπορεί για να μειωθεί ο αριθμός των δαπανηρών και μερικές φορές επικίνδυνων συνδέσεων στη θάλασσα. Τα μεγαλύτερα CLV για τα καλώδια ρεύματος έχουν περιστρεφόμενη τράπεζα με εξωτερική διάμετρο περίπου τα 30 μέτρα και ικανότητα φορτίου άνω των 6000 MT. Η χωρητικότητα φορτίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία της θάλασσας και της αλμυρότητας, δηλαδή την τοποθεσία και την χρονική περίοδο μέσα στο χρόνο. Ανάλογα με το σχεδιασμό του καλωδίου, ο όγκος ή το βάρος αποτελούν περιοριστικό παράγοντα κατά τον ορισμό της χωρητικότητας φορτίου.

Περιστρεφόμενες τράπεζες. Η περιστρεφόμενη τράπεζα (ή καρουσέλ) έχει ένα κατακόρυφο άξονα περιστροφής και είναι σε θέση να αποθηκεύσει ακόμη μεγάλης διατομής καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος με σημαντικό συντελεστή δυσκαμψίας, τα οποία δεν είναι δυνατό να αποθηκευτούν στις δεξαμενές αποθήκευσης καλωδίων. Οι περισσότερες περιστρεφόμενες τράπεζες τοποθετούνται σε οριζόντια στρώματα ξεκινώντας από το κάτω επίπεδο. Άλλες περιστρεφόμενες τράπεζες έχουν κωνικό εσωτερικό κόμβο και το καλώδιο τυλίγεται επάνω σε αυτόν τον κόμβο σε ομόκεντρα στρώματα πάνω και κάτω υπό συνεχές τέντωμα. Η μέθοδος αυτή απαιτεί ένα συνεχές τέντωμα του καλωδίου κατά τη φόρτωση και την πόντιση. Εάν διακοπεί το συνεχές τέντωμα, η μέθοδος αυτή μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα στις στροφές του καλωδίου καθώς από το κέντρο ολισθαίνουν προς τα κάτω.

Ορισμένα σκάφη φέρουν ή μπορεί να φέρουν δύο ανεξάρτητες περιστρεφόμενες τράπεζες με ικανότητα ταυτόχρονης πόντισης δύο ξεχωριστών καλωδίων. Εάν το CLV είναι εξοπλισμένο με δύο τροχούς πόντισης σε απόσταση μεταξύ τους στην πρύμνη ή τη πλώρη, τα δύο καλώδια μπορούν να τοποθετηθούν με σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Κατά προτίμηση, τα καλώδια που τοποθετούνται

κοντά, ομαδοποιούνται μεταξύ τους. Η ομαδοποίηση επιτυγχάνεται καθώς το ζεύγος καλωδίων αφήνει το CLV μέσω κατάλληλων περιτυλιγμάτων ταινίας ή ιμάντες καλωδίων. Αυτή είναι η προτιμώμενη μέθοδος για ένα ζεύγος καλωδίων HVDC σε ρηγά νερά (βάθος έως 250 m.). Στην τελευταία περίπτωση, το ζεύγος των καλωδίων μπορεί να ποντιστεί αργότερα με μία μόνο λειτουργία.

Οι περιστρεφόμενες τράπεζες μπορεί να είναι διαιρούμενες και να αποτελούνται από την εσωτερική και εξωτερική διαίρεση. Τα δυο καλώδια μπορούν να φορτωθούν σε αυτά τα χωρίσματα ανεξάρτητα, είτε το ένα μετά το άλλο, ή και στα δύο χωρίσματα ταυτόχρονα (Εικόνα 2-13). Η μέθοδος αυτή απαιτεί μια θωράκιση καλωδίου με ενιαία κατεύθυνση πόντισης. Τα δύο καλώδια μπορούν να τυλίγονται στο αντίστοιχο χωρίσμα της περιστρεφόμενης τράπεζας ανεξάρτητα κάνοντας χρήση μεμονωμένων ταχυτήτων πρόωσης έξω από το «εργοτάξιο». Μια καλύτερη μέθοδος, όμως, είναι να τυλιχθεί το καλώδιο στο εξωτερικό χωρίσμα και το άλλο καλώδιο να συσπειρωθεί κάτω, στο εσωτερικό χωρίσμα, πάνω από ένα κρεμαστό διαμορφωτή. Δεδομένου ότι η τράπεζα περιστρέφεται για την περιέλιξη του πρώτου καλωδίου, το δεύτερο καλώδιο περνά μέσα από ένα ημι-διαμορφωτή, όπου το καλώδιο τυλίγεται λιγότερο από μία φορά ανά στροφή. Κατά την πόντιση η διαδικασία αντιστρέφεται και τα καλώδια μπορούν να τοποθετηθούν με την ίδια ταχύτητα πάνω στο πυθμένα της θάλασσας, χωρίς υπολειμματική συστροφή. Το ζεύγος των καλωδίων μπορεί να τοποθετηθεί και να ομαδοποιηθεί έτσι ώστε να μπορεί να θαφτεί αργότερα σε μια κοινή διαδρομή. Εάν τα καλώδια δεν είναι ομαδοποιημένα, ενδέχεται να αποκλίνουν από τη διαδρομή τους στον πυθμένα της θάλασσας και έτσι να θέσει σε κίνδυνο την μετέπειτα ταφή.



Εικόνα 2-13: Περιστρεφόμενη τράπεζα με εσωτερικό χώρισμα για ταυτόχρονη τοποθέτηση δύο καλωδίων. Εδώ, ένα υποθαλάσσιο καλώδιο ρεύματος (εξωτερικό τμήμα) και ένα καλώδιο οπτικών ινών (εσωτερικό τμήμα) είναι αποθηκευμένα στην περιστρεφόμενη τράπεζα.

Μικρές περιστρεφόμενες τράπεζες μπορούν να τοποθετηθούν προσωρινά στο κατάστρωμα των φορηγίδων ή στα πλοία εφοδιασμού για έργα μικρότερων υποθαλάσσιων καλωδίων ή για εργασίες επισκευής.

Δεξαμενές αποθήκευσης καλωδίων. Οι δεξαμενές αποθήκευσης καλωδίων μπορεί να είναι κυκλικής διαμέτρου ή παραλληλόγραμμες και χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση καλωδίων με μικρό συντελεστή δυσκαμψίας για καλώδια τηλεπικοινωνιών και για καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το καλώδιο εναποτίθεται με τη βοήθεια ενός διαμορφωτή που είναι κρεμασμένος ή σταθερός σε μεγάλο ύψος πάνω από τη δεξαμενή. Κατά την αποθήκευση είναι σημαντικό να διατηρηθεί μια ελάχιστη εσωτερική διάμετρος περιέλιξης που ορίζεται από τον κατασκευαστή του καλωδίου. Πρέπει να παρέχονται στηρίγματα για να αποτραπεί η ολίσθηση του καλωδίου προς τα κάτω από τον μεγάλο όγκο του καλωδίου. Μια ομάδα από έμπειρο προσωπικό τοποθετεί μέσα στη δεξαμενή αποθήκευσης σε σωστή θέση το καλώδιο. Για την ασφάλεια του προσωπικού η κουλούρα από καλώδιο θα πρέπει να είναι περιφραγμένη, καθώς αυξάνει σε ύψος. Η πόντιση είναι η αντίστροφη λειτουργία της φόρτωσης, και το καλώδιο θα πρέπει να επικαθίσει στο βυθό χωρίς εσωτερική συστροφή.

Οι σταθερές δεξαμενές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για καλώδια μέτριας διαμέτρου με θωράκιση καλωδίου με ενιαία κατεύθυνση πόντισης. Τα μονόκλινα καλώδια με μονή θωράκιση καλωδίου είναι καλά για τη χρήση των σταθερών

δεξαμενών. Το υποθαλάσσιο τριφασικό καλώδιο μέσης τάσης μπορεί επίσης να φορτωθεί με μια παρόμοια τεχνική σε πλοία με παραλληλόγραμμες δεξαμενές.

Στροφεία καλωδίων. Σε πολλά έργα υποθαλάσσιων καλωδίων με μικρό μήκος καλωδίου, δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένα ειδικό CLV. Τα υποθαλάσσια καλώδια που συνδέουν τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες έχουν μήκος 400-800 m. Μπορούν να εγκατασταθούν από φορηγίδες ή πλοία εφοδιασμού, τα οποία είναι εξοπλισμένα με στροφεία καλωδίων και κατάλληλες μηχανές τάνυσης και πέδησης (Εικόνα 2-14). Εξαιρετικά μεγάλα στροφεία με οριζόντιο άξονα περιστροφής δύνανται να φέρουν ορισμένα πλοία πόντισης αγωγών και μπορεί να χρησιμοποιηθούν και για την πόντιση καλωδίων.



Εικόνα 2-14: Πόντιση με στροφεία καλωδίων πάνω σε φορηγίδα.

Δυνατότητα ακριβούς προσδιορισμού θέσης. Κάθε πλοίο πόντισης καλωδίων πρέπει να έχει την ικανότητα να διατηρεί ακριβή θέση κατά τη διέλευση του από μια συγκεκριμένη πορεία χωρίς να χάνει τον έλεγχο θέσης. Ακόμη και μικρές παρεκκλίσεις από την προγραμματισμένη θέση και την κατεύθυνση μπορεί ριψοκινδυνεύσουν τη κατάσταση του καλωδίου ή την ακρίβεια της πόντισης των

καλωδίων. Το καλώδιο μπορεί να καταλήξει σε μια υποθαλάσσια θέση διαφορετική από την αναμενόμενη. Ίσως το καλώδιο να κατεβεί δίπλα σε μια τάφρο σκαμμένη από πριν, μακριά από την προσχεδιασμένη διαδρομή ή σε μια επικίνδυνη περιοχή του πυθμένα.

Συστήματα αγκυροβολίας. Η κλασσική μέθοδος για να παραμείνει το CLV στη θέση του είναι η χρήση συστημάτων αγκυροβολίας. Το CLV και συχνά η φορτηγίδα χωρίς πρόωση, ελίσσεται ανάμεσα στα αμπάρια των πολυάριθμων αγκυρών αποκλίνοντας προς όλες τις κατευθύνσεις. Οι άγκυρες χειρίζονται από ανεξάρτητα ΑΗΤ (ρυμουλκά χειρισμού άγκυρας). Οι φορτηγίδες επικάθισης καλωδίου χρησιμοποιούν τέσσερις με οκτώ άγκυρες. Τοποθετούνται μερικές εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες μέτρα μακριά από τη φορτηγίδα μέσα στο νερό και συνδέονται με βαρούλκα που είναι πάνω στη φορτηγίδα. Η φορτηγίδα ελέγχει τη θέση της, τη ταχύτητα της, και την κατεύθυνση της από τη λειτουργία των βαρούλκων. Σε πολύ ρηγά νερά μπορεί να είναι επωφελής η χρήση επίπεδων φορτηγίδων, μέθοδοι αγκυροβολίας και ρυμουλκά, διότι τα μεγάλα CLV έχουν συχνά μεγάλο βύθισμα και προεξέχουσες συσκευές προώθησης. Η μέθοδος αγκύρωσης είναι επικίνδυνη σε νερά, όπου υπάρχουν άλλα καλώδια ή αγωγοί. Οι αγωγοί αυτοί γαντζώνονται εύκολα από τις πολυάριθμες άγκυρες, με αποτέλεσμα τις δαπανηρές εργασίες επισκευής. Πρέπει επίσης να δίνεται προσοχή, ώστε να μην προκληθεί ζημιά στο ήδη ποντισμένο καλώδιο. Η μέθοδος αγκύρωσης είναι μια κουραστική και χρονοβόρα μέθοδος, αλλά αποφεύγει τις υψηλές ημερήσιες χρεώσεις ενός αυτοκινούμενου CLV.

Δυναμικά συστήματα διατήρησης θέσης (DP). Τα συστήματα αυτά διατηρούν το σκάφος σε μια προκαθορισμένη θέση με τη βοήθεια συστημάτων πλοήγησης υψηλής τεχνολογίας και των διάφορων συσκευών πρόωσης των πλοίων. Τα συστήματα DP μπορούν να κατευθύνουν το πλοίο επακριβώς κατά το μήκος μιας προκαθορισμένης πορείας πάνω από τον πυθμένα. Τα συστήματα DP μπορούν επίσης να διατηρήσουν το πλοίο στο σταθμό σε οποιαδήποτε επιθυμητή κατεύθυνση. Εντός των ορισμένων ορίων, είναι δυνατό ακόμη και όταν ο άνεμος, τα κύματα, ή τα ρεύματα να προσπαθήσουν να βγάλουν το πλοίο εκτός πορείας. Οι συμβατικές βιδωτές έλικες παρέχουν ώθηση προς τα εμπρός και, σε συνδυασμό με τα πηδάλια, ελέγχουν επίσης τη κατεύθυνση μέχρι ενός ορισμένου βαθμού. Υπάρχουν διαθέσιμα και άλλα συστήματα πρόωσης για να παρέχουν τον έλεγχο της κατεύθυνσης, ακόμη και χωρίς πηδάλια και σε χαμηλή ή καθόλου ταχύτητα. Οι κυκλοειδείς έλικες στην πλώρη και την πρύμνη μπορούν να ωθήσουν το πλοίο πλαγίως και να το στρίψουν επί τόπου. Οι αζιμουθιακές έλικες είναι βιδωτές έλικες κάτω από το πλοίο (Εικόνα 2-15).



Εικόνα 2-15: Ατρακτοειδείς προπέλες. (ABB, Φινλανδία)

Μπορούν να στρίψουν 360° στις περισσότερες περιπτώσεις, και να παρέχουν εξαιρετική ευελιξία σε οποιαδήποτε ταχύτητα. Δύο ξεχωριστές αζιμουθιακές έλικες μπορούν να κρατήσουν το πλοίο στη θέση του ή να το στρίψουν στην απαιτούμενη κατεύθυνση. Οι ατρακτοειδείς προπέλες μπορούν να τροφοδοτηθούν μηχανικά από το κινητήρα στο σκάφος (μετάδοση κίνησης Schottel), ή με έναν ηλεκτρικό κινητήρα στην άτρακτο που τροφοδοτείται από μια γεννήτρια στο σκάφος. Ορισμένα σκάφη έχουν αφαιρούμενες αζιμουθιακές έλικες για να βελτιώσουν την ικανότητα της πλοήγησης στα ρηχά νερά.

Οι προωθήσεις Voith-Schneider αποτελούνται από περιστρεφόμενα κάθετα πτερύγια τοποθετημένα κάτω από το πλοίο. Μπορούν να παράγουν προώθηση προς όλες τις κατευθύνσεις. Η μετάδοση κίνησης με αζιμουθιακές έλικες και οι προπέλες Voith-Schneider παρέχουν εξαιρετική ευελιξία και μπορεί να μετακινήσουν το πλοίο προς όλες τις κατευθύνσεις (πίσω / εμπρός, πλάγια), οι οποίες μπορεί να είναι απαραίτητες κατά τη διάρκεια της περίπλοκης πόντισης καλωδίων ή εργασιών επισκευής. Σε αντίθεση με τη συμβατική πρόωση, δεν χρειάζεται ελάχιστη ταχύτητα για να διατηρήσει την κατεύθυνση και τον έλεγχο. Το σκάφος είναι σε θέση να ποντίσει το καλώδιο κατά μήκος μιας προκαθορισμένης διαδρομής και να εξακολουθεί να κρατά τη πορεία του μέσα από τις καιρικές συνθήκες μειώνοντας έτσι τη κύλιση του. Για τις σταθερές εργασίες, όπως είναι η σύζευξη ή επιχειρήσεις με τηλεχειριζόμενα υποβρύχια οχήματα (ROV), το σκάφος μπορεί επίσης να διατηρήσει τη θέση του και την κατεύθυνση του κάτω από αντίξοες συνθήκες.

Τα συστήματα DP χρησιμοποιούν διαφορετικά συστήματα πλοήγησης όπως τα συστήματα πλοήγησης με χρήση GPS, συσκευές τάνυσης καλωδίων και ακουστικούς φάρους. Τα περισσότερα από τα σύγχρονα πλοία έχουν συστήματα GPS. Αυτά κατατάσσονται σε κλάσεις DP, από DP0 μέχρι DP3 ανάλογα με την

εφεδρεία των υποσυστημάτων σύμφωνα με την κατάταξη του Διεθνούς Οργανισμού Ναυσιπλοΐας (IMO). Οι απαιτήσεις της εφεδρείας περιλαμβάνουν, όχι μόνο τα συστήματα πλοήγησης και πρόωσης, αλλά επίσης χαρακτηριστικά όπως ανεξάρτητα συστήματα παραγωγής ενέργειας και άλλα βοηθητικά συστήματα που διαχωρίζονται με ζώνες ασφαλείας. Μια ανώτερη κλάση DP επί του πλοίου αυξάνει την ασφάλεια της λειτουργίας του καλωδίου. Η κλάση DP θα πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά σε σχέση με τις απαιτήσεις και το ρίσκο του έργου. Μερικές φορές, οι ασφαλιστικές εταιρείες απαιτούν τη χρήση των σκαφών με καθορισμένη κλάση DP. Πολλά μεγάλα έργα υποθαλάσσιων καλωδίων απασχολούν σκάφη με συστήματα κλάσης DP2.

Χώρος διασύνδεσης καλωδίων. Η μάτιση των υποθαλάσσιων καλωδίων ρεύματος μπορεί να γίνει μόνο σε ειδικούς εξοπλισμένους χώρους. Θα πρέπει να είναι σχεδιασμένος σύμφωνα με τις προδιαγραφές της εταιρείας μάτισης και θα πρέπει να έχει επαρκές μέγεθος. Σε ένα πρόσφατο έργο πόντισης υποθαλάσσιου καλωδίου ρεύματος, ο χώρος μάτισης καλωδίων πάνω στο πλοίο είχε διαστάσεις 4 × 17 m. Ο χώρος μάτισης καλωδίων πρέπει να έχει ηλεκτρική τροφοδότηση, κλιματισμό και αφυγραντήρα. Θα πρέπει να τοποθετηθεί κοντά στο μηχανισμό απόθεσης του καλωδίου πάνω στο κατάστρωμα. Είναι πλεονέκτημα αν ο χώρος μάτισης των καλωδίων είναι αποσπώμενος, έτσι ώστε να μπορεί να διαχωριστεί από το καλώδιο μετά τη μάτιση. Για λόγους ασφαλείας, ο χώρος μάτισης έχει ανεξάρτητο σύστημα επικοινωνίας με τη γέφυρα του πλοίου, και alarm που διαχειρίζεται από τη γέφυρα.

Εντατήρες καλωδίου. Αποκαλούνται επίσης και γραμμικές μηχανές, οι οποίοι είναι απαραίτητες για οποιαδήποτε κίνηση των καλωδίων επί του πλοίου, καθώς και για να προσδώσουν την απαραίτητη τάνυση κατά τη διάρκεια του ποντίσματος του καλωδίου. Πολλές γραμμικές μηχανές χρησιμοποιούν κοινούς τροχούς. Οι τροχοί μπορούν να ανοίξουν και να κλείσουν με ελεγχόμενη πίεση για να σφίγγουν το καλώδιο. Το ξεχωριστό άνοιγμα είναι απαραίτητο όταν πρέπει να δημιουργηθούν ογκώδεις ματίσεις. Η κίνηση των τροχών συχνά είναι υδραυλική. Η γραμμική μηχανή της εικόνας 2-16 έχει οκτώ ζεύγη τροχών και έχει εγκατασταθεί κοντά στον τροχό πόντισης στην πρύμνη του πλοίου. Το πρώτο άκρο του καλωδίου διέρχεται μέσω της γραμμικής μηχανής, η οποία βρίσκεται σε λειτουργία έλξης. Όταν το καλώδιο αναπτύσσεται στον πυθμένα, η γραμμική μηχανή μπορεί να λειτουργήσει και ως φρένο. Πολλές μηχανές μπορούν να ενεργούν σε λειτουργία ελεγχόμενης ταχύτητας ή ελεγχόμενης τάνυσης. Οι γραμμικές μηχανές είναι επίσης διαθέσιμες με ιμάντες αντί για τροχούς, οι λεγόμενες ερπύστριες. Μια καλή ολίσθηση μεταξύ των τροχών και της επιφάνειας του καλωδίου είναι απαραίτητη, χωρίς ιδιαίτερη πίεση πάνω στο καλώδιο. Όπως με τα ελαστικά των αυτοκινήτων, οι τροχοί της γραμμικής μηχανής

πρέπει να έχουν επαρκή πρόσφυση για αποτελεσματική πέδηση / ελκτική δύναμη, και η επιφάνεια του καλωδίου δεν πρέπει να είναι πάρα πολύ ολισθηρή. Μερικά στρώματα καλωδίου υποστηρίζουν τη χρήση της άμμου μεταξύ του καλωδίου και των τροχών όταν υπάρχει ολίσθηση. Η ανάγκη για επαρκή ισχύ στις γραμμικές μηχανές δεν πρέπει να υποτιμάται. Θα πρέπει να οργανωθεί προσεκτικά η συνεργασία των γραμμικών μηχανών, των περιστρεφόμενων τραπεζών και του πλοίου.



Εικόνα 2-16: Εντατήρας καλωδίου με οκτώ ζεύγη τροχών που συγκρατούν το τελείωμα του προπορευόμενου καλωδίου.

Κόφτης ανάγκης. Η κοπή πρέπει να εκτελείται άμεσα. Προτιμώμενη λύση είναι μια υδραυλική κεφαλή κοπής κοντά στο πρυμναίο τροχό με τηλεχειριστήριο (Εικόνα 2-17). Μια απλούστερη συσκευή είναι ένα αυτόνομο βενζινοκίνητο ή ηλεκτροκίνητο χειροκίνητο πριόνι το οποίο χειρίζεται από έναν εργάτη. Η συσκευή θα πρέπει να είναι σε θέση να κόψει το καλώδιο μέσα σε 60-90 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 2-17: Υδραυλικός κόφτης καλωδίου.

Τα συρματόσχοινα, τα ράουλα, οι βραχίονες/λαβές τοποθέτησης και ανύψωσης, οι ολισθητήρες, και οι τροχοί πόντισης. Είναι άλλες συσκευές που είναι αναγκαίες για την εγκατάσταση καλωδίων. Για κάθε συγκεκριμένη εργασία εγκατάστασης, πρέπει να επιλεγεί το σύνολο των μηχανημάτων που να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις και να επιτρέπουν την ασφαλή και επιτυχή λειτουργία. Ιδιαίτερα θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η συγκεκριμένη ακτίνα καμπής υπό καθορισμένες τιμές τάνυσης. Πολλές εργασίες υπέστησαν μεγάλες καθυστερήσεις λόγω των αδύναμων ράουλων καλωδίων, τα οποία έσπασαν λόγω των μεγάλων φορτίων ή των αδύναμων γραμμικών κινητήρων.

Ο σχεδιασμός πρυμναίων τροχών τοποθέτησης ή ολισθητήρων με δυναμική αντιστάθμισης ταλάντωσης, προκειμένου να διευκολυνθεί η εγκατάσταση των καλωδίων σε δυσκολότερες συνθήκες, βρίσκεται σε εξέλιξη. Ένα άλλο μέσο για τη μείωση της κατακόρυφης κίνησης του τροχού πόντισης είναι η τοποθέτησή του στη μέση του πλοίου, προκειμένου να μειωθούν οι επιπτώσεις της ταλάντωσης και της κλίσης.

Εξοπλισμός ROV. Πολλές δραστηριότητες σε επιχειρήσεις πόντισης καλωδίων είναι εφικτές μόνο με τη βοήθεια των ROV (τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα, Εικόνα 2-18). Το ROV είναι μια υποβρύχια συσκευή με δυνατότητα να εξοπλιστεί με διαφορετικά εξαρτήματα και εργαλεία. Η χρήση των καμερών του προσφέρει τη δυνατότητα καταγραφής πολύτιμων στοιχείων για τα δύσκολα τμήματα της διαδρομής, πέτρες, βράχους, ή τα ανθρώπινα απορρίμματα, όπως ναυάγια ή

κοντέινερ. Επίσης, σε εύκολα νερά, το ROV μπορεί να προσφέρει πολύτιμα στοιχεία για την ενσωματωμένη τεκμηρίωση. Το ROV μπορεί να χειριστεί υποβρύχιες επιχειρήσεις ανύψωσης, ελέγχους πιθανών ζημιών, και να λάβει κοντινά πλάνα αμφίβολων περιοχών. Τα ROV είναι εξαιρετικά πολύπλοκα συστήματα και είναι διαθέσιμα σε όλα τα μεγέθη. Το πλοίο πρέπει να έχει επαρκή χώρο για ένα πλήρες σύστημα ROV, περιλαμβάνοντας το όχημα και το χώρο αποθήκευσής του, τον γερανό ανακρέμασης, το κοντέινερ για το δωμάτιο ελέγχου και προμηθειών και τη διαμονή του πληρώματος των χειριστών του ROV κτλ.



Εικόνα 2-18: ROV με βραχίονες συγκράτησης και κάμερες.

Ελικοδρόμιο. Η ύπαρξη χώρου ελικοδρομίου διευκολύνει τη μετάβαση από και προς το σκάφος μελών του πληρώματος, καθώς του εξειδικευμένου προσωπικού είτε πρόκειται για ειδικούς στους συνδέσμους είτε για ειδικούς στον εντοπισμό βλάβης. Η μεταφορά με ελικόπτερο μπορεί να είναι μια οικονομική λύση ή και να είναι η μοναδική επιλογή.

2.3.2. Προστασία των υποθαλάσσιων καλωδίων ρεύματος

Τα υποθαλάσσια καλώδια είναι πολύτιμα περιουσιακά στοιχεία και πρέπει να προστατεύονται από τους εξωτερικούς κινδύνους. Η μελέτη του Cigré το 1986 (Cigré Working Group 21.06, 1986) παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη συλλογή βλαβών των

υποθαλάσσιων καλωδίων καθώς και τις μεθόδους προστασίας τους. Η προστασία αποτελεί σημαντικό τμήμα της συνολικής επένδυσης.

Υπάρχουν τέσσερα βασικά στάδια για την προστασία των υποθαλάσσιων καλωδίων:

- επιλογή μιας κατάλληλης διαδρομής του καλωδίου.
- σχεδιασμός της κατάλληλης θωράκισης του καλωδίου.
- προστασία στο θαλάσσιο πυθμένα π.χ. με ταφή.
- ενεργή προστασία μετά την εγκατάσταση.

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι μια καλά σχεδιασμένη προστασία του καλωδίου ενισχύει την αξιοπιστία του. Επίσης τα λειτουργικά κόστη επισκευής και συντήρησης μπορεί να μειωθούν με την κατάλληλη προστασία.

2.3.3. Επιλογή της κατάλληλης διαδρομής του καλωδίου

Μετά από τη μελέτη γραφείου μπορεί να επιλεγεί μια προσωρινή διαδρομή του καλωδίου. Όσο είναι εφικτό θα πρέπει να αποφεύγονται πιθανές, επικίνδυνες περιοχές, όπως:

- Θαλάσσιες οδοί, αγκυροβόλια, είσοδοι λιμανιών
- Περιοχές αλιείας
- Βραχώδη μέρη, υποβρύχια φαράγγια και απότομες πλαγιές
- Ναυάγια, περιοχές ρίψης πυρομαχικών, συντρίμμια
- Περιοχές με ισχυρά θαλάσσια ρεύματα

Οι θαλάσσιες οδοί θα πρέπει να αποφεύγονται λόγω της μεγάλης κυκλοφορίας μεγάλων πλοίων, διότι μπορεί να επιβάλει περιορισμούς στις δραστηριότητες εγκατάστασης. Επίσης, ο κίνδυνος να πάθουν ζημιά οι αγκυρώσεις είναι μεγαλύτερος όταν τα πλοία ταξιδεύουν. Αν πρέπει να διασχίσουμε τις θαλάσσιες οδούς, καλό είναι να γίνει σε ορθή γωνία για να διατηρήσουμε χαμηλές τις παρεμβολές. Τα αγκυροβόλια, οι περιοχές ρίψης πυρομαχικών και οι περιοχές στρατιωτικών ασκήσεων δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση υποθαλάσσιων καλωδίων.

Οι περιοχές αλιείας ασκούν μια άμεση απειλή για την κατάσταση του καλωδίου. Δεν είναι μόνο τα αλιευτικά δίχτυα, αλλά και τα βοηθητικά εργαλεία, όπως

είναι τα σημεία πρόσδεσης που μπορούν να κάνουν ζημιά στο καλώδιο. Τα σημεία προσαιγιάλωσης για τη σύνδεση του καλωδίου πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά. Οι ακτές έχουν πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά. Μερικές φορές είναι σταθερές στη θέση τους, μερικές φορές όμως πολύ ασταθείς και επιρρεπείς σε αλλαγές. Η ακτογραμμή και η παρακείμενη βαθυμετρία μπορεί να αλλάξει γρήγορα, λόγω των παλιρροϊκών ρευμάτων, των συνεχών θαλάσσιων ρευμάτων, τους τύπους των κυμάτων, τη σεισμική δραστηριότητα, τις εποχιακές καταιγίδες, και πολλά άλλα. Ακόμα κι αν πολλές παράκτιες κοινότητες προσπαθούν να διατηρήσουν την ακτογραμμή όπως είναι, με διάφορα δαπανηρά μέτρα, υπάρχουν φωνές που υποστηρίζουν την αποδοχή των φυσικών μεταβολών των ακτογραμμών.

Οι ακτογραμμές μπορούν επίσης να διαταραχθούν από τεχνητές παρεμβάσεις, όπως τους κυματοθραύστες, τις εισόδους λιμανιών, την προστασία της παραλίας κ.λπ. Κατά την επιλογή μιας διαδρομής καλωδίου, θα πρέπει να ληφθούν επίσης υπόψη οι μελλοντικές εξελίξεις κοντά στην ακτή.

Τα ηλεκτρικά ρεύματα διασποράς από τις χερσαίες δραστηριότητες (ηλεκτρικά τρένα, ηλεκτροσυγκόλληση κ.λπ.) φέρεται να έχουν προκαλέσει ζημιές στο καλώδιο. Ως εκ τούτου, η επιλογή διαδρομής θα πρέπει επίσης να περιλαμβάνει τις πιθανές επιπτώσεις από τις χερσαίες δραστηριότητες.

Πολλά άλλα εμπόδια μπορεί να κρύβονται μέσα στο νερό ή ακόμα και κάτω από το θαλάσσιο πυθμένα. Η ακόλουθη λίστα έχει μερικά από αυτά, και έχουν βρεθεί και πολλά άλλα από τα ερευνητικά πληρώματα: ναυάγια, εγκαταλελειμμένα αυτοκίνητα και φορτηγά, χαμένα εμπορευματοκιβώτια, πεταμένα δομικά υλικά, ενεργές ή ανενεργές υποθαλάσσιες εγκαταστάσεις, στρατιωτικές εγκαταστάσεις, χώροι ρίψης απορριμμάτων, σωλήνες εισροής και εκροής, κ.λπ. Τις περισσότερες φορές δεν είναι δυνατόν να αποφευχθεί η διέλευση των καλωδίων και των αγωγών, αλλά πρέπει κανείς να επιλέξει τα κατάλληλα σημεία διέλευσης σε απόσταση από την ακτή.

Οι εγκαταστάσεις των Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων (Θ.Α.Π) ορίζουν μια ζώνη ασφαλείας των 500 m για τη δική τους προστασία, αλλά συνιστάται να είναι μακριά από το Θ.Α.Π τουλάχιστον 2000 m, εκτός αν το καλώδιο τρέχει σε αυτό το Θ.Α.Π. Αυτό γίνεται για να καταστούν δυνατές πιθανές μελλοντικές δραστηριότητες επισκευής, οι οποίες μπορεί να απαιτούν λίγο χώρο έξω από το διάδρομο του καλωδίου. Επίσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα μελλοντικά Θ.Α.Π. Οι νόμοι της ανοικτής θάλασσας δεν παρέχουν μια ζώνη ασφαλείας γύρω από το υποθαλάσσιο καλώδιο.

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή της καλύτερης τοπολογίας και μορφολογίας του θαλάσσιου πυθμένα για τη διαδρομή του καλωδίου. Όχι μόνο τα

βραχώδη πεδία, αλλά και οι βραχώδεις προεξοχές, τα υποθαλάσσια φαράγγια και οι απότομες πλαγιές απειλούν το καλώδιο ή προκαλούν πρόβλημα κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης. Ένας ομαλός αμμώδης βυθός μπορεί να φαίνεται κατάλληλος για την πόντιση και την εγκατάσταση, αλλά θα μπορούσε να υπάρχει μια βραχώδης κορυφογραμμή μόνο μερικά εκατοστά παρακάτω, καθιστώντας την ακόλουθη εκσκαφή πολύ δύσκολη.

Τα κύματα άμμου στο βυθό θα μπορούσαν να αποτελέσουν σημαντικό κίνδυνο για τη κατάσταση του καλωδίου. Τα κύματα άμμου μπορούν να κινηθούν απρόβλεπτα, δημιουργώντας έτσι απροσδόκητες διατάξεις μέσα στο χρόνο. Ως αποτέλεσμα, το καλώδιο μπορεί να θαφτεί πολύ βαθύτερα από ότι αναμενόταν προηγουμένως, ή το καλώδιο μπορεί να είναι εκτεθειμένο και χωρίς προστασία στις κοιλάδες μεταξύ των κυμάτων άμμου. Στις χειρότερες περιπτώσεις, μπορούν να δημιουργηθούν ελεύθερα ανοίγματα ή το εκτεθειμένο καλώδιο μπορεί να αμμοβοληθεί από το θαλάσσιο ρεύμα με άμμο.

Μπορεί να είναι πιο οικονομικό το καλώδιο να ακολουθήσει μια παράκαμψη αντί να δαπανηθούν χρήματα για μια άλλη προστασία υψηλότερου βαθμού σε μια επικίνδυνη περιοχή.

Η επιλογή της διαδρομής περιλαμβάνει επίσης την ακριβή ρύθμιση κατά τη διάρκεια πόντισης του καλωδίου, όπου το ROV μπορεί να παρακολουθεί τη λεπτομερή διαδρομή του καλωδίου και να βοηθά στην επικάθιση του καλωδίου ανάμεσα σε βράχια και όχι από πάνω τους. Σε ένα Νορβηγικό έργο, το καλώδιο αφέθηκε να ακολουθήσει τις "κοιλάδες" μεταξύ των υψομέτρων του πυθμένα, αντί να ακολουθήσει μια "τυφλή" ευθεία τοποθέτηση (Εικόνα 2-19). Στην πραγματικότητα, η κάλυψη του καλωδίου μεταξύ των φυσικών υψομέτρων θα μπορούσε να προσδώσει μια καλή προστασία χωρίς να χρειαστεί να ταφεί, αλλά κάτι τέτοιο απαιτεί σχολαστικό έλεγχο του σημείου επαφής του καλωδίου κατά τη διάρκεια της πόντισης.



Εικόνα 2-19: Η αρχικά σχεδιασμένη διαδρομή (ευθεία γραμμή) θα συνεπαγόταν πολλές διασταυρώσεις με κορυφογραμμές και κοιλάδες με τον κίνδυνο των μεγάλων ανοιγμάτων. Η λεπτομερής έρευνα της διαδρομής επέτρεψε την πόντιση του καλωδίου κατά μήκος της καμπύλης γραμμής, αποφεύγοντας τους κυματισμούς (Berthelsen, 2008).

2.3.4. Σχεδιασμός της κατάλληλης θωράκισης των καλωδίων

Η θωράκιση των υποθαλάσσιων καλωδίων (ρεύματος ή τηλεπικοινωνιών) πρέπει να είναι σχεδιασμένη για να καλύψει τις δυνάμεις τάνυσης κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης και τις απαιτήσεις για την προστασία κατά τη διάρκεια ζωής του καλωδίου. Η βιομηχανία υποθαλάσσιων καλωδίων έχει αναπτύξει μια φιλοσοφία θωράκισης σύμφωνα με τον πίνακα 2-2. Σύμφωνα με αυτή τη φιλοσοφία, τα καλώδια σε ρηχά νερά προστατεύονται με βαριά θωράκιση κατά της εξωτερικής βίας, ενώ τα καλώδια σε βαθιά νερά έχουν ελαφρύτερη θωράκιση, επειδή εκεί κάτω υπάρχει μικρότερη απειλή από ανθρώπινες δραστηριότητες.

Πίνακας 2-2: Είδη θωράκισης υποθαλάσσιων καλωδίων.

Βάθος νερού	Θωράκιση	Χαρακτηριστικά
< 200m	Θωράκιση βράχων (Rock Armor)	Διπλή θωράκιση, βελτιωμένη αντοχή σε κρούση και καλύτερη ευκαμψία ώστε να ακολουθεί τη μορφολογία του πυθμένα
< 500m	Διπλή θωράκιση (Double Armor)	Προστατευμένο καλώδιο για περιοχές με μικρό ή καθόλου βάθος ταφής
<1500m	Απλή θωράκιση (Single Armor)	Χρησιμοποιείται για περιοχές με περιορισμένο βάθος ταφής

Τα έργα τοποθέτησης υποθαλάσσιων καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος κατά τις δεκαετίες του 1950-1960, συχνά ακολουθούσαν μια παρόμοια ιδέα παρέχοντας βαρύτερη θωράκιση για το τμήμα της παραλίας, καθώς οι εξωτερικοί κίνδυνοι αναμένονταν να είναι πιο συχνοί σε ρηχά νερά και στη ζώνη καταδύσεων. Το καλώδιο για την ανοικτή θάλασσα, καλύφθηκε με μια ελαφρύτερη προστασία. Η αρχή είναι πολύ εύκολη: η μαζική θωράκιση των καλωδίων με χάλυβα παρέχει καλύτερη προστασία από τα αλιευτικά και τις άγκυρες.

Καθώς οι διαστάσεις και το βάρος του υποθαλάσσιου καλωδίου ηλεκτρικού ρεύματος έχουν αυξηθεί σημαντικά κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, οι κατασκευαστές είναι λιγότερο πρόθυμοι να προσφέρουν επιπλέον βαριά θωράκιση για τα καλώδια που είναι για τη ζώνη της παραλίας. Σε πολλές περιπτώσεις, η θωράκιση έχει σχεδιαστεί μόνο για να πληροί τις απαιτήσεις των δυνάμεων τάνυσης κατά τη διάρκεια της πόντισης. Καθώς τα περισσότερα καλώδια ρεύματος εγκαθίστανται σε ρηχά έως μέτρια βάθη (<300 m), η θωράκιση μπορεί να είναι απλή. Συχνά, αυτό επιτρέπει μια θωράκιση ενός λεπτού καλωδίου, η οποία δεν είναι έτοιμη να αντιμετωπίσει τις εξωτερικές απειλές. Δυστυχώς, η προστασία έναντι ζημιών, μερικές φορές παραμελείται όταν οι κατασκευαστές επιχειρούν να υποβάλλουν τη χαμηλότερη προσφορά. Ωστόσο, υπάρχουν και καλά παραδείγματα. Το 2000 το καλώδιο του Channel Island μεταξύ της Γαλλίας και του νησιού Γκέρνσεϊ, ήταν εξοπλισμένο με ένα επιπλέον ισχυρό ατσάλινο καλώδιο. Μια αντι-ελικοειδής διπλής στρώσης θωράκιση παρέχει μια πολύ καλύτερη προστασία κατά της εξωτερικής βίας

έναντι μίας θωράκισης μονής στρώσης. Σε πολλές αλληλεπιδράσεις των υποθαλάσσιων καλωδίων ηλεκτρικού ρεύματος με εργαλεία εγκατάστασης, άγκυρες, κ.λπ., η εξωτερική στρώση υπέστη ζημιές, αλλά όχι η εσωτερική στρώση του καλωδίου.

Θα πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά αν οι συνθήκες της διαδρομής του καλωδίου (θαλάσσιες οδοί, αλιευτικά πεδία, κ.λπ.) ή η μέθοδος εγκατάστασης μπορεί να απαιτεί πρόσθετη ενίσχυση του καλωδίου. Συχνά, ο κατασκευαστής μπορεί να προσφέρει θωράκιση με υψηλότερο επίπεδο προστασίας ως επιλογή.

Η επιλογή της κατάλληλης θωράκισης είναι μια δύσκολη ισορροπία μεταξύ των αρχικών δαπανών του κεφαλαίου και του αναμενόμενου κόστους των μελλοντικών ζημιών του καλωδίου, συμπεριλαμβανομένων της επισκευής και των απωλειών εισοδήματος. Οι αρχικές δαπάνες για την επιπλέον βαριά θωράκιση είναι γνωστή, αλλά οι μελλοντικές δαπάνες μπορούν μόνο να εκτιμηθούν. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η θωράκιση δεν μπορεί να αναβαθμιστεί μετά από μερικά χρόνια εμπειρίας σε έργα.

Τα μικρότερα τμήματα του καλωδίου μπορούν να εξοπλιστούν με πρόσθετη προστασία με την προσάρτηση πλαστικών κελυφών κατά τη πόντιση του καλωδίου (Εικόνα 2-20). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά για να ενισχύσει την προστασία στις διασυνδέσεις καλωδίου και αγωγού.



Εικόνα 2-20: Προστατευτικά πλαστικά κελύφη συνδέονται με δύο HVDC καλώδια και ένα καλώδιο οπτικής ίνας προτού το σύνολο των καλωδίων ποντιστεί.

2.3.5. Βλάβες υποθαλάσσιων καλωδίων

Οι άγκυρες και οι αλιευτικές δραστηριότητες ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος των βλαβών των υποθαλάσσιων καλωδίων. Ένα μικρότερο ποσοστό προκαλείται από άλλους παράγοντες, το μερίδιο αυτό είναι μικρότερο για υποθαλάσσια καλώδια ηλεκτρικού ρεύματος καθώς είναι ισχυρότερα από τα καλώδια τηλεπικοινωνιών.

Πολλές βλάβες προκαλούνται σε εγκατεστημένα καλώδια με μεγάλα ανοίγματα. Μερικές φορές δεν μπορούν να αποφευχθούν δύσκολες υποθαλάσσιες περιοχές με βραχώδη σημεία και μεγάλες προεξοχές βράχων. Ακόμη και με τις πλέον κατάλληλες μεθόδους εγκατάστασης και προστασίας που χρησιμοποιούνται, το καλώδιο μπορεί να καταλήξει να κρέμεται ελεύθερο πάνω από υποθαλάσσια εμπόδια. Η κατάσταση αυτή σε συνδυασμό με τα θαλάσσια ρεύματα μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε ταλαντώσεις που προκαλούνται από δίνες, ένα φαινόμενο γνωστό ως «δίνη που προκαλείται από τις δονήσεις (VIV)» ή "αποφόρτιση δίνης". Οι ταλαντώσεις μπορεί να προκαλέσουν έντονη φθορά στα σημεία επαφής του καλωδίου με το σταθερό πυθμένα, και πρόωρη κόπωση του μολύβδινου μανδύα. Τα θαλάσσια ρεύματα που μπορούν να προκαλέσουν επιβλαβείς ταλαντώσεις ενδέχεται να προκύψουν από (Dobie, 2003):

- Διαβαθμίσεις της ατμοσφαιρικής πίεσης, καταιγίδες.
- Παλιρροιακά ρεύματα.
- Ρεύματα μεταφοράς (π.χ. το Ρεύμα του Κόλπου και παρελκόμενα των συστημάτων του μεγάλου θαλάσσιου ρεύματος).
- Παράκτια ρεύματα - τρέχουν παράλληλα με την ακτογραμμή και οδηγούνται από διαθλόμενα κύματα.

Έχουν μετρηθεί ρεύματα μέχρι 7 km σε διαδρομές καλωδίων, π.χ. στο στενό Öresund μεταξύ της Δανίας και της Σουηδίας (Yamamoto, T. et al., 1964). Το πρώτο σύστημα καλωδίων που τοποθετήθηκε μεταξύ των νησιών της Βόρειας και της Νότιας Νέας Ζηλανδίας είχε καταστραφεί αρκετές φορές σε μεγάλα ανοίγματα όπου το καλώδιο κόπηκε μεταξύ των βραχωδών προεξοχών. Η συμβουλή «μην εγκαταστήσετε καλώδια σε μεγάλα ανοίγματα», δίνεται σε πολλά έργα υποθαλάσσιων καλωδίων.

Υποθαλάσσια καλώδια έχουν καταστραφεί από άμεσα χτυπήματα πλοίων και όχι μόνο από άγκυρες. Το φεριμπότ «Nils Holgersson» στις 16 Μαρτίου 2002

προσάραξε έξω από το Travemünde στη Γερμανία λόγω απώλειας ενέργειας. Το «Καλώδιο της Βαλτικής» υψηλής τάσης 450 kV συνεχούς ρεύματος είχε καταστραφεί από την καρίνα και διακόπηκε η παροχή ρεύματος. Όταν το φορτηγό πλοίο «Roy A Jodrey» βυθίστηκε με 20.000 τόνους σιδηρομεταλλεύματος μπροστά στο Λιμενικό Σώμα στον ποταμό του Αγίου Λαυρεντίου, έκοψε το υποθαλάσσιο καλώδιο ρεύματος που προμήθευε το σταθμό του Λιμενικού Σώματος, αφήνοντάς τους στο σκοτάδι (Berthelsen, 2008).

Μια χαρτογράφηση των εκβολών του ποταμού Τάμεση παρουσιάζει ένα μεγάλο αριθμό ναυαγίων, πολλών εξ' αυτών λόγω των διάσημων ναυμαχιών των προηγούμενων αιώνων. Κάποια από τα ναυάγια μετέφεραν πυρομαχικά τα οποία δεν έχουν εκραγεί. Έτσι αυτό το μέρος δεν είναι καλό για πόντιση υποθαλάσσιων καλωδίων.

Όπως περιγράφεται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο, ο βυθός των ωκεανών και των θαλασσών χαρακτηρίζεται σε γεωλογικούς κινδύνους (γεωκινδύνους) που συνεπάγονται δυνητικά επιβλαβή φαινόμενα, όπως κατολισθήσεις, ενεργά σεισμικά ρήγματα, ηφαιστειακή δραστηριότητα, αποσταθεροποίηση υδριτών αερίου κ.λπ. Οι κινήσεις του πυθμένα της θάλασσας, λόγω των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων ή των σεισμών μπορούν να καταστρέψουν τα υποθαλάσσια καλώδια με άμεσο αντίκτυπο (π.χ. Suna 1953 και Ταϊβάν 2006). Η ηφαιστειακή δραστηριότητα κατέστρεψε τα υποθαλάσσια καλώδια ρεύματος με την έκρηξη Heimaey (Ισλανδία, 1973). Οι κατολισθήσεις και άλλες κινήσεις του πυθμένα μπορούν ακόμα να προκληθούν από την ετήσια μορφοποίηση / παραμόρφωση των υδριτών αερίων, ένα υλικό που μπορεί να υπάρξει μόνο σε ορισμένα ύδατα υπό ορισμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας κάτω από περίπου 200 μέτρα (Houtz, R. E. et al., 1962). Οι υδρίτες έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν τη δομή και μηχανική αντοχή του πυθμένα κατά την πάροδο των ετών. Η αλλαγή τους μπορεί να θέτει σε κίνδυνο τις υποθαλάσσιες εγκαταστάσεις.

3. Υπεράκτιοι γεωκίνδυνοι

3.1. Γενικά

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι γεωκίνδυνοι ορίζονται ως γεωλογικές και υδροδυναμικές καταστάσεις ή διαδικασίες που μπορούν να οδηγήσουν σε κινήσεις ιζημάτων, μετακινήσεις πετρωμάτων και κινήσεις υγρών ή αερίων κατά τη διάρκεια είτε ξαφνικών επεισοδιακών γεγονότων, είτε λόγω αργών προοδευτικών παραμορφώσεων.

Πολυάριθμοι γεωκίνδυνοι σχετίζονται με τη μηχανική του θαλάσσιου πυθμένα και συχνά η διάδοσή τους είναι μεγάλη και οι συνέπειές τους εμφανίζονται εντονότερα σε μεγάλα βάθη. Υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες γεωκινδύνων:

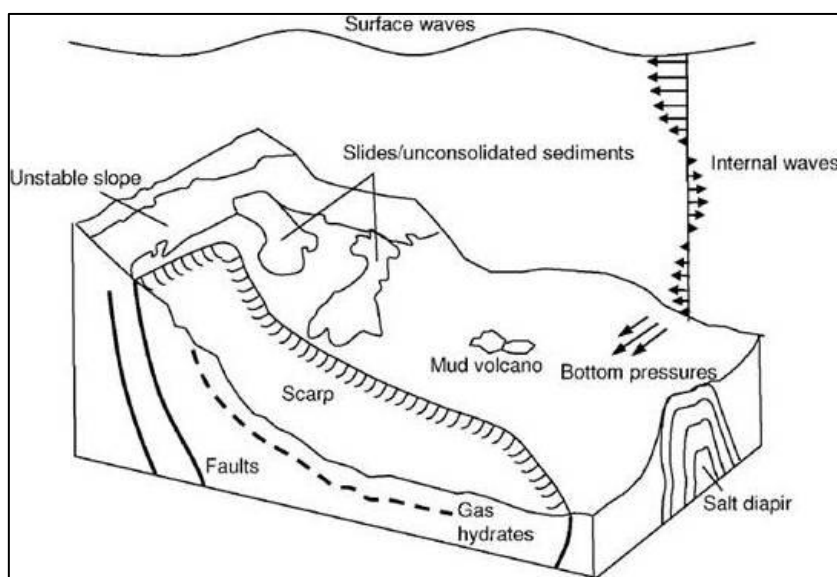
- Ακαριαία γεγονότα: Γεγονότα τα οποία είναι σπάνια και επεισοδιακού χαρακτήρα. Για παράδειγμα σεισμοί και συναφή φαινόμενα, υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, τυρβώδεις ροές και αποβολή αερίων.
- Μακροχρόνια φαινόμενα: Συνθήκες που περιλαμβάνουν αργές διαδικασίες προοδευτικού χαρακτήρα, όπως για παράδειγμα ο ερπυσμός του πυθμένα.

Ο κίνδυνος εμφάνισης ενός συγκεκριμένου γεωκινδύνου εξαρτάται από την τοποθεσία βάσει της υποδομής της, τη σοβαρότητα του γεγονότος και τη συχνότητα εμφάνισής του. Ορισμένες συνθήκες του πυθμένα μπορεί να ενέχουν ένα κίνδυνο χαμηλού επιπέδου, εωσότου ενεργοποιηθούν από ανθρώπινες δραστηριότητες. Άλλες συνθήκες του πυθμένα ενδέχεται να ενέχουν κινδύνους υψηλού επιπέδου λόγω συχνών μετακινήσεων, αλλά αν δεν υπάρχει ανάπτυξη του φαινομένου στη γύρω περιοχή, η πιθανότητα εμφάνισης του κίνδυνου μειώνεται.

3.2. Σημαντικότερες κατηγορίες υπεράκτιων γεωκινδύνων

Οι υπεράκτιοι γεωκίνδυνοι περιλαμβάνουν αστοχίες πρσανών, τεκτονικές και μη τεκτονικές αστοχίες, ισχυρές δονήσεις του πυθμένα, ρευστοποιήσεις των ιζημάτων του πυθμένα, ηφαίστεια λάσπης, αέρια και υδρίτες αερίων. Οι υδροδυναμικές δυνάμεις από τσουνάμι, η δράση των κυμάτων και το είδος των υλικών του πυθμένα μπορούν επίσης να δημιουργήσουν προβλήματα σε υπεράκτια

έργα. Παραδείγματα διαφόρων ειδών υπερράκιων γεωκινδύνων εμφανίζονται σχηματικά στην εικόνα 3-1.



Εικόνα 3-1: Σχηματική αναπαράσταση διαφόρων ειδών υπερράκιων γεωκινδύνων (Randolph & Gourvenec, 2011).

Δύο τύποι αστοχιών αποτελούν πιθανούς κινδύνους. Σεισμογενείς αστοχίες λόγω τεκτονικών παραμορφώσεων του φλοιού, οι οποίες αποτελούν πηγές για πιθανούς σεισμούς (ισχυρή δόνηση του πυθμένα) και διάρρηξη της επιφάνειας του πυθμένα. Η ισχυρή δόνηση του πυθμένα που παράγεται κατά τη διάρκεια του σεισμού μπορεί να οδηγήσει σε ρευστοποίηση του πυθμένα και σαν επακόλουθο σε παραμορφώσεις των ιζημάτων του. Οι μη τεκτονικές αστοχίες δεν δημιουργούν σεισμογενείς κινδύνους, αλλά δημιουργούν είτε αργές παραμορφώσεις λόγω ερπυσμού, είτε ξαφνικές μετακινήσεις. Και οι δύο μορφές μη τεκτονικών παραμορφώσεων επιβάλλουν μεγάλες παραμορφώσεις στα γεωυλικά. Οι μη τεκτονικές αστοχίες είναι συνήθεις σε δέλτα ποταμών (εξελισσόμενες αστοχίες), κοντά σε ηφαίστεια λάσπης και σε περιοχές καλυμμένες από αλάτι.

3.2.1. Σεισμοί

Οι σεισμοί είναι εδαφικές αναταράξεις, που διαρκούν μερικά δευτερόλεπτα ή μερικά λεπτά (Bolt, 2005). Οφείλονται σε τοπικές αστοχίες τμημάτων του φλοιού της

γης οι οποίες καταπονούνται από δυνάμεις προερχόμενες από το μανδύα. Οι σεισμοί λαμβάνουν χώρα είτε υπόγεια είτε υποθαλάσσια.

3.2.2. Αστάθεια υποθαλάσσιων πρανών

Τα υποθαλάσσια πρανή αποτελούν ένα γεωκίνδυνο λόγω της δυνατότητάς τους να γίνονται ασταθή και να αστοχούν. Η κατολίσθηση συνοδεύεται από ροή μάζας στην κατωφέρεια του πρανούς. Η αστοχία υποθαλάσσιων πρανών είναι αρκετά διαδεδομένη, ακόμα και σε ομαλές πλαγιές με κλίση 0.5° .

Αστάθεια υποθαλάσσιων πρανών, κατολισθήσεις, ολισθήσεις κορημάτων και ιλύος μπορούν να προκληθούν, είτε από σεισμούς, είτε από φαινόμενα μακράς διάρκειας, όπως η απόθεση υλικού στις ανώτερες επιφάνειες των πρανών ή η διάβρωση στην κατωφέρεια ή στη βάση του πρανούς.

Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, ολισθήσεις κορημάτων και ιλύος μπορούν, επίσης, να προκληθούν από περιοδικές τάσεις κυματισμών (Henkel, 1970). Τα πρανή μπορούν να δημιουργούνται στις εκβολές των ποταμών λόγω της εναπόθεσης ιζήματος, καθώς η ταχύτητα του νερού μειώνεται όταν αυτό εκβάλει στον ωκεανό (Coleman, et al., 1978α), (Templeton, et al., 1985β). Κατά την κατολίσθηση τα μεγαλύτερα σώματα σταματούν γρηγορότερα, ενώ οι άργιλοι μπορούν να διανύσουν αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων. Με την πάροδο του χρόνου η κλίση των πρανών γίνεται απότομη και τελικά φθάνουν σε ένα κρίσιμο ύψος και μια κρίσιμη κλίση η οποία προκαλεί την αστοχία του πρανούς (Mulder & Cochonat, 1996α), (Huhnerbach & Masson, 2004β), (Masson, et al., 2006γ). Ο πυθμένας που ολισθαίνει μπορεί να διαχωριστεί σε μεγάλα τμήματα και στη συνέχεια σε μικρότερα καθώς κινείται, δημιουργώντας ροή κορημάτων ή τοπική τύρβη, η οποία εντείνεται από το νερό που παρασύρεται εντός αυτής. Η ροή μπορεί να συνεχιστεί για εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά από την πηγή της κατολίσθησης (Felix & Peakall, 2006).

3.2.3. Γεωλογία πυθμένα

Ο θαλάσσιος πυθμένας σπάνια είναι ομοιόμορφος, επίπεδος ή χωρίς ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Τα στρώματα κάτω από τον πυθμένα δεν είναι ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις και τα γεωλογικά ρήγματα είναι συνήθη. Τα ενεργά ρήγματα μπορούν να μετακινηθούν ανά πάσα στιγμή, δημιουργώντας σεισμούς χαμηλής ή υψηλής έντασης. Δεν είναι συνετή η τοποθέτηση μιας θαλάσσιας κατασκευής κοντά σε ένα ρήγμα. Βέβαια, για μεγάλου μήκους δίκτυα υποθαλάσσιων καλωδίων ενδέχεται να μην υπάρχει άλλη επιλογή από το να διασχίσουν ένα ρήγμα.

Τα ηφαίστεια λάσπης είναι κώνοι από λάσπη πάνω στον πυθμένα, τα οποία σχηματίζονται με τον ίδιο τρόπο που σχηματίζονται και τα ηφαίστεια λάβας. Η διαφορά είναι ότι αντί για λάβα, εκτοξεύεται λεπτόκοκκο χώμα βαθιά μέσα από τον πυθμένα της θάλασσας (Camerlenghi, et al., 1995). Τα ηφαίστεια λάσπης προκαλούν εκρήξεις ή αποβολές αερίου μεθανίου, το οποίο έχει συσσωρευτεί σε ρηχές ιζηματογενείς αποθέσεις, και ακολουθείται από υδαρή λάσπη και συχνά βράχους μεγάλης μάζας. Τα κορήματα από τα ηφαίστεια λάσπης εκτοξεύονται σε πολλές δεκάδες ή εκατοντάδες μέτρα καθ' ύψος του νερού και ταξιδεύουν πολλά χιλιόμετρα κατά μήκος του πυθμένα, ειδικά από μεγάλα ηφαίστεια με διάμετρο κάποιων χιλιομέτρων. Το αέριο μεθάνιο υπάρχει διαλυμένο στο νερό των πόρων. Η αύξηση της θερμοκρασίας ή η μείωση της πίεσης οδηγεί σε αστάθεια και διαστολή του αερίου προκαλώντας αύξηση στην πίεση των πόρων. Οι υδρίτες αερίων είναι στερεές ενώσεις αερίου (συνήθως μεθανίου) και νερού, τα οποία είναι σταθερά σε ένα σταθερό εύρος συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας ή η μείωση της πίεσης οδηγεί σε διαχωρισμό των υδριτών μεθανίου στην αέρια (μεθάνιο) και την υγρή φάση (νερό), με αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου. Ο διαχωρισμός του αερίου και του νερού από τον υδρίτη του αερίου αυξάνει τον όγκο, με αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της πίεσης των πόρων και τη μείωση της τάσης στα ιζήματα.

Σε ορισμένες θαλάσσιες περιοχές εντοπίζεται καρστική γεωμορφολογία. Ο καρστικός πυθμένας απαρτίζεται από βράχους που έχουν διαλυθεί εν μέρει από υπόγεια ύδατα, σε μια περίοδο της γεωλογικής ιστορίας όπου η επιφάνεια του νερού ήταν διαφορετική απ' ό,τι σήμερα. Η διάλυση αυτή είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία καταβόθρων, κοιλοτήτων και σπηλαίων σε ρηχό βάθος (Waltham, 2000). Τα καρστικά φαινόμενα μπορούν να ανιχνευθούν εύκολα από γεωφυσικές έρευνες. Αναπτύσσονται κυρίως σε ισχυρούς ασβεστόλιθους και δολομίτες. Παρόμοια

φαινόμενα συμβαίνουν και σε ασθενείς ασβεστόλιθους και αλυκές. Οι αλυκές είναι επίπεδες πολύ αλατούχες περιοχές άμμου ή ιλύος που αποτίθενται στην ξηρά και συχνά περιέχουν γύψο ή ανυδρίτη (Boggs, 2006). Στη συνέχεια καλύπτονται από άλλα ιζήματα και γίνονται τμήματα του πυθμένα της θάλασσας, σαν αποτέλεσμα της κίνησης του φλοιού της γης.

3.2.4. Υλικά θαλάσσιου πυθμένα

Μη ενοποιημένα ιζήματα είναι ποσότητες ιλύος και αργίλου, οι οποίες εναποτέθηκαν σχετικά πρόσφατα και δεν έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία της πρωτογενούς ενοποίησής τους. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπήρχε χρόνος για τη διασπορά της περίσσειας της πίεσης των πόρων, που έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη συμπιεστικών τάσεων, οι οποίες προσδίδουν αντοχή στα ιζήματα. Τα ιζήματα είναι συνήθως ελαφριά υλικά.

Ασβεστόχα και ανθρακικά ιζήματα μπορούν να εντοπιστούν από την αντίδρασή τους με αραιό υδροχλωρικό οξύ, η οποία παράγει διοξείδιο του άνθρακα. Οι κόκκοι γίνονται εν μέρει ή εξ ολοκλήρου ανθρακικό ασβέστιο και μπορούν να σχηματιστούν από τα σκελετικά υπολείμματα της μικροσκοπικής θαλάσσιας χλωρίδας και πανίδας. Το ανθρακικό ασβέστιο είναι ένα σχετικά μαλακό ορυκτό, σε σύγκριση με τα πυριτικά ορυκτά (Mitchell & Soga, 2005). Διαλύεται με πολύ αργούς ρυθμούς στο θαλασσινό νερό, αλλά μπορεί να καθιζάνει και να σχηματίζει ανθρακικό τσιμέντο το οποίο ενώνει τους κόκκους μεταξύ τους. Αυτή η σύνδεση είναι πολύ ασταθής και κάνει τις ανθρακούχες άμμους αναξιόπιστα ιζήματα πυθμένα (Murff, 1987α), (Jewell & Khorshid, 2000β), (Kolk, 2000γ).

Οι αμμόλοφοι μπορούν να κινούνται κατά μήκος του πυθμένα λόγω διάβρωσης. Η κίνησή τους μπορεί να θάψει υποθαλάσσιες κατασκευές, δημιουργώντας προβλήματα στη λειτουργικότητα και στη συντήρησή τους. Το βάρος τους μπορεί να προκαλέσει επικαθίσεις και τοπικές αστοχίες στην κατασκευή. Κάποιοι πυθμένες αποτελούνται από παχιά ιζήματα αρχαίων αμμόλοφων οι οποίοι έχουν συσσωρευτεί ο ένας πάνω στον άλλο. Αυτό μπορεί να προκαλέσει αρνητικές μεταβολές στην αντοχή και την πυκνότητα του πυθμένα.

3.3. Μηχανισμοί ενεργοποίησης αστοχίας των ιζημάτων του πυθμένα

Τα ιζήματα του θαλάσσιου περιβάλλοντος μπορεί να γίνουν ασταθή και να αστοχήσουν ως αποτέλεσμα μιας σειράς διαδικασιών. Ωστόσο, οι περισσότερες αστοχίες ιζημάτων συνδέονται με κάποιο γενεσιουργό γεγονός. Αυτή η πυροδότηση της αστοχίας μπορεί να είναι ξαφνική ή να παραχθεί προοδευτικά από φυσικές διαδικασίες. Μπορεί επίσης να οφείλεται σε ανθρώπινες δραστηριότητες. Κάθε πηγή αστοχίας, τείνει να προκαλέσει αύξηση των τάσεων του πυθμένα ή μείωση της αντοχής του, οδηγώντας στην αστοχία των ιζημάτων. Η κατανόηση των συνθηκών πίεσης πόρων και των μηχανισμών που οδηγούν σε υπερβολική παραγωγή πίεσης, είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση των πιθανών μηχανισμών ενεργοποίησης γεωκινδύνων. Ο Kvalstad (Kvalstad, et al., 2001) προσδιόρισε μερικούς μηχανισμούς ενεργοποίησης:

1. Φυσικές διαδικασίες:

- Η ταχεία εναπόθεση υλικού οδηγεί σε υπερβολικές πιέσεις πόρων και αυξανόμενες διατμητικές τάσεις σε ένα πρηνές.
- Η διάβρωση της βάσης του πρηνούς ή η εναπόθεση υλικού στην κορυφή του, οδηγεί σε πρηνή υψηλότερης κλίσης και αυξάνει τις βαρυτικές δυνάμεις και τις διατμητικές τάσεις κατά μήκος των κρίσιμων επιφανειών αστοχίας.
- Η τήξη των υδριτών αερίου λόγω αύξησης της θερμοκρασίας ή μείωση της πίεσης, οδηγεί σε αύξηση της πίεσης των πόρων και μείωση της αντοχής των ιζημάτων του πυθμένα.
- Οι ενεργές ροές και αποβολές υγρών ή αερίων.
- Οι εκρήξεις ηφαιστειών λάσπης προκαλούν απώλεια μάζας και μετατοπίσεις των ιζημάτων του πυθμένα.
- Οι τεκτονικές αστοχίες δημιουργούν σεισμούς, κοντινού εύρους παλμούς λόγω μετατοπίσεων και ρήξη του πυθμένα.
- Οι ισχυρές δονήσεις του πυθμένα λόγω σεισμού προκαλούν βραχυπρόθεσμες αδρανειακές δυνάμεις και αυξάνουν την πίεση των πόρων.

- Η φόρτιση από κυματισμούς με μεγάλο μήκος κύματος
- Τα ευαίσθητα (συστολικά) ιζήματα αυξάνουν τον κίνδυνο κατολίσθησης και την έκταση των ζωνών αστοχίας.
- Οι αυξημένη θερμοκρασία νερού στον πυθμένα, οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας των ιζημάτων και σε διαχωρισμό των υδριτών.

2. Ανθρώπινες δραστηριότητες:

- Οι γεωτρήσεις δημιουργούν εκρήξεις και κρατήρες στον πυθμένα.
- Οι υπόγειες εκρήξεις αλλάζουν την πίεση των πόρων στα ρηχά στρώματα και δημιουργούν αστάθεια στην επιφάνεια των πρηνών.
- Η παραγωγή πετρελαίου αυξάνει τη ροή θερμότητας και τη θερμοκρασία γύρω από τις γεωτρήσεις που οδηγούν σε διαχωρισμό των υδριτών, αύξηση της πίεσης των πόρων και απώλεια της αντοχής των παρακείμενων ιζημάτων.
- Οι εγκαταστάσεις πλωτών πλατφόρμων οδηγούν σε αύξηση των βαρυτικών δυνάμεων.
- Οι αγκυρώσεις επιβάλλουν βραχυπρόθεσμες ή μακροπρόθεσμες πλευρικές δυνάμεις.

Μια μοναδική γενεσιουργός κατάσταση μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση ενός μεμονωμένου γεωκινδύνου ή μιας σειράς αλληλένδετων γεγονότων. Για παράδειγμα, οι μεταβολές της θερμοκρασίας λόγω της λειτουργίας ενός αγωγού μπορεί να οδηγήσει σε διάσπαση των ένυδρων αερίων που προκαλεί αύξηση της πίεσης των πόρων και οδηγεί στην αστοχία του πρηνούς.

3.4. Οι συνέπειες των γεωκινδύνων

Οι υπεράκτιοι ή θαλάσσιοι γεωκίνδυνοι γενικά περιλαμβάνουν την κινητικότητα του πυθμένα και των ιζημάτων του. Τα μετακινούμενα ιζήματα ενδέχεται να επηρεάσουν αρνητικά ή να θάψουν την υποδομή ή να οδηγήσουν σε απώλεια της στήριξής της. Ο όγκος των εμπλεκόμενων γεωυλικών κυμαίνεται από μερικά κυβικά

μέτρα μέχρι χιλιάδες κυβικά χιλιόμετρα. Οι συνέπειες από ένα τέτοιο γεγονός κυμαίνονται από τοπικές υπερβάσεις τάσης στην υποθαλάσσια κατασκευή μέχρι ολική απώλειά της, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει ανθρώπινα θύματα, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Πολύ μεγάλες μετατοπίσεις του πυθμένα έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν ένα τσουνάμι, το οποίο μπορεί να προκαλέσει μαζικές ανθρώπινες, οικονομικές και περιβαλλοντικές απώλειες (βλ. Ιαπωνία 2011).

Στη συνέχεια παρατίθενται οι μορφές των συνεπειών που συνδέονται με διαφορετικούς τύπους θαλάσσιων γεωκινδύνων. Η αστοχία των πρανών μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια της στήριξης της κατωφέρειας του πρανούς, ή της κορυφής του, αν λάβει χώρα μια κατολίσθηση. Οι εγκαταστάσεις ή οι υποδομές στη διαδρομή της κατολίσθησης μπορούν να καταστραφούν λόγω των δυνάμεων που θα ασκηθούν, ή μπορεί να θαφτούν όταν ολοκληρωθεί η κατολίσθηση. Κινήσεις κατά μήκος ρηγμάτων ή σεισμική δραστηριότητα οδηγεί σε επιφανειακή αστοχία καθώς και σε κυκλικές διατμητικές καταπονήσεις και μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις του πυθμένα. Αυτές οι σεισμικές τάσεις μπορούν να προκαλέσουν αστάθεια πρανών ή ρευστοποίηση των ιζημάτων, οδηγώντας σε υπερφόρτιση και καταστροφή των κατασκευών. Η παραμόρφωση της επιφάνειας του πυθμένα λόγω εκρήξεων ηφαιστειών λάσπης, διαρροές ρευστών και διάβρωση του πυθμένα, μπορεί να οδηγήσει σε τάσεις στην υποδομή. Αυτές οι τάσεις επηρεάζουν τη δομική ακεραιότητα και τη λειτουργία των υποθαλάσσιων εγκαταστάσεων, όπως για παράδειγμα των συλλεκτών, των αγωγών και των καλωδίων. Η διάσπαση των υδριτών αερίων που οφείλονται στις μεταβολές της πίεσης και της θερμοκρασίας οδηγούν σε αύξηση του όγκου των πόρων, που παράγει υπερπίεση πόρων, μειώνοντας έτσι την διατμητική αντοχή που οδηγεί στην αστάθεια του πυθμένα. Ανακυκλικές εξωτερικές τάσεις που εφαρμόζονται στον πυθμένα από επιφανειακά ή εσωτερικά κύματα, μπορούν επίσης να δημιουργήσουν περίσσεια πίεσης του πορώδους, η οποία με τη σειρά της μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της διατμητικής αντοχής, προκαλώντας αστάθειες ή ρευστοποίηση. Η διάτμηση και ανάπλαση των ευαίσθητων ιζημάτων κατά τη διάρκεια κατολίσθησης ή λόγω δραστηριοτήτων εγκατάστασης, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της αντοχής και να θέσει σε κίνδυνο τη σταθερότητα του πυθμένα.

Λαμβάνοντας υπόψη το μεγάλο εύρος των κινδύνων σε υπεράκτιες κατασκευές, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι τοποθεσίες όπου μπορούν να εμφανιστούν γεωκίνδυνοι, καθώς επίσης οι μηχανισμοί ενεργοποίησής τους, η σοβαρότητα των κινήσεων και η συχνότητα των γεγονότων που συμβαίνουν. Μόλις χαρακτηριστούν αυτές οι παράμετροι των γεωκινδύνων, ένα έργο μπορεί να εκτιμήσει την καταλληλότητα της στρατηγικής μετριασμού του κινδύνου.

Παρά την ύπαρξη καταστροφικών γεγονότων, όπως μια σεισμογενής υποθαλάσσια κατολίσθηση σημαντικού μεγέθους, που μπορεί να επηρεάσει μια πλήρη κατασκευή στον πυθμένα, είναι πιθανή η τοποθέτηση μιας υπεράκτιας εγκατάστασης μέσα σε ένα πεδίο χαμηλού κινδύνου. Παρόλα αυτά, κάτι τέτοιο δεν ισχύει για τα υποθαλάσσια καλώδια αφού περνούν από μια πολύ μεγαλύτερη περιοχή του πυθμένα. Ως εκ τούτου, ο κύριος στόχος της αξιολόγησης του γεωκινδύνου συχνά απευθύνεται σε διαδρομές καλωδίων και την έκθεσή τους σε φαινόμενα μετακίνησης μάζας, είτε όπου διασταυρώνονται με ρήγματα ή με ζώνες αστάθειας υποθαλάσσιων πρानών με συνεχή ερπυσμό του πρανούς, είτε όπου πρέπει να δρομολογούνται σε διαδρομές ροής κορημάτων και τυρβωδών ρευμάτων.

3.5. Ταυτοποίηση των γεωκινδύνων

Η ανάπτυξη υπεράκτιων έργων συχνά περιλαμβάνει ένα σύμπλεγμα γεωγραφικά κατανομημένων συστημάτων. Με βάση το μέγεθός τους, κάποιες υπεράκτιες εφαρμογές καλύπτουν ένα ευρύ περιβάλλον, το οποίο εκτείνεται από τα βαθιά ύδατα, στην ανωφέρεια του πυθμένα, ύστερα διασχίζει την υφαλοκρηπίδα και μέσω των ρηχών υδάτων καταλήγει στην ακτογραμμή. Παρότι κάποιες υπεράκτιες εγκαταστάσεις μπορεί να καλύπτουν μικρή περιοχή, έργα που περιλαμβάνουν συμπλέγματα βαθέν υδάτων, αγωγούς και καλώδια ίσως εκτείνονται πάνω από 1000 km, και ως εκ τούτου, εκτίθενται σε ένα ευρύ φάσμα γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών. Λόγω του περίπλοκου χαρακτήρα των μεγάλων κατασκευών, τα έργα αυτά εξελίσσονται με το χρόνο και μπορούν να περάσουν μέσα από πολλά στάδια σχεδίασης και τεχνικής μελέτης.

Στην απλούστερη περίπτωση, τα έργα περιλαμβάνουν τρία κύρια στάδια που κινούνται από το γενικό στο εξειδικευμένο. Αυτά τα στάδια περιλαμβάνουν προερευνητικές ερμηνείες των πιθανών συνθηκών της περιοχής (Στάδιο 1), προκαταρκτικές τεχνικές μελέτες (Στάδιο 2), και ολοκληρωμένο χαρακτηρισμό της περιοχής για την υποστήριξη του σχεδιασμού και της τεχνικής μελέτης (Στάδιο 3). Τα τρία στάδια συνοψίζονται στον πίνακα 3-1. Καθένα από αυτά τα στάδια περιλαμβάνει επιμέρους εργασίες και μια σειρά από προσωπικό με διαφορετική περιοχή εξειδίκευσης. Οι γεωλογικές και γεωτεχνικές πληροφορίες που προκύπτουν κατά τη διάρκεια ενός έργου πρέπει να είναι επαρκείς για να στηρίξουν κάθε στάδιο του έργου, κι έτσι κι αυτές κινούνται από τις γενικές στις ειδικές. Ως εκ τούτου, μια σταδιακή προσέγγιση συχνά αποδεικνύεται πιο αποτελεσματική στην υλοποίηση των μηχανικών απαιτήσεων των υπεράκτιων έργων. Είναι πολύ σημαντικό, αυτές οι

έρευνες να συντονίζονται από μια ομάδα μελετητών, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι όλες οι πληροφορίες έχουν συμπεριληφθεί σε όλα τα στάδια του σχεδιασμού.

Πίνακας 3-1: Σύνοψη των γενικευμένων στοιχείων της έρευνας (Campbell, et al., 2008).

Στάδιο 1 Προκαταρκτικές ενέργειες	Στάδιο 2 Μετά την ανακάλυψη	Στάδιο 3 Ολοκληρωμένος χαρακτηρισμός της περιοχής
Διαλογή των γεωλογικών φαινομένων	Προκαταρκτική αξιολόγηση από μελετητή	Ποσοτικοποίηση σεισμικών δεδομένων και ανάπτυξη τελικών γεωτεχνικών κριτηρίων
Αξιολόγηση γεωκινδύνων στην περιοχή ενδιαφέροντος	Λεπτομερής σχεδιασμός γεωφυσικής έρευνας	Λεπτομερής αξιολόγηση γεωκινδύνων, αναλύσεις για εξειδικευμένα προβλήματα μηχανικής φύσης
Αξιολόγηση κινδύνων σε συγκεκριμένες τοποθεσίες	Λεπτομερής διεξαγωγή γεωφυσικής έρευνας	Αξιολόγηση κινδύνου
Συνεδρίαση της ομάδας και υποβολή εκθέσεων	<p>Προετοιμασία και επεξεργασία γεωφυσικών δεδομένων</p> <p>Πλήρης προκαταρκτικός χαρακτηρισμός της περιοχής</p> <p>Σχεδιασμός γεωτεχνικής έρευνας</p> <p>Διεξαγωγή γεωτεχνικής έρευνας</p> <p>Προετοιμασία δειγμάτων και μεταφορά σε εργαστήρια</p> <p>Γεωλογικές εργαστηριακές δοκιμές</p> <p>Γεωτεχνικές εργαστηριακές δοκιμές</p> <p>Συνεδρίαση της ομάδας και υποβολή εκθέσεων</p>	<p>Ανάπτυξη μοντέλου με τα ολοκληρωμένα χαρακτηριστικά της περιοχής</p> <p>Προετοιμασία ολοκληρωμένης έκθεσης</p> <p>Συνεδριάσεις της ομάδας και υποβολή εκθέσεων</p>

Οι αρχικές έρευνες του σταδίου 1 διενεργούνται για να παρέχουν ευρέως τους περιορισμούς στην επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης, της επιλογής της διαδρομής και της δυνατότητας πραγματοποίησης της κατασκευής. Αυτό το στάδιο είναι ουσιαστικά μια μελέτη γραφείου με σκοπό την αξιολόγηση περιορισμών όπως έντονο ανάγλυφο, σεισμοί και ενεργά ρήγματα, αστάθεια πρανών και γεωτεχνικές ιδιότητες του πυθμένα. Το αρχικό πεδίο εφαρμογής εργασιών μπορεί να περιλαμβάνει μια σειρά εργασιών, αλλά γενικά περιλαμβάνει:

- Επεξεργασία και αναθεώρηση των δημοσιευμένων και αδημοσίευτων στοιχείων και εκθέσεων
- Ανάπτυξη ενός προγράμματος σε περιβάλλον συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών (GIS)
- Προσδιορισμό των κρίσιμων ζητημάτων μηχανικής και του τρόπου αντιμετώπισής τους

Το κύριο προϊόν του πρώιμου σταδίου μιας μελέτης είναι ένας μεγάλης κλίμακας χάρτης γεωκινδύνων ή μιας σειράς χαρτών που προσδιορίζουν περιοχές γεωκινδύνων επιρρεπείς σε κινδύνους όπως κατολισθήσεις, διασταυρώσεις ρηγμάτων, ρευστοποίηση, θόλοι άλατος, ηφαιστεια λάσπης και περιοχές υδριτών αερίων. Αυτοί οι χάρτες παρέχουν μια γενική εκτίμηση της θέσης και της κατανομής των κινδύνων σε σχέση με την περιοχή της εφαρμογής. Επίσης, παρέχουν τις βασικές συνθήκες εκδήλωσης των γεωκινδύνων απ' όπου αξιολογείται ο σχεδιασμός και προσδιορίζονται συγκεκριμένες περιοχές, που απαιτούν λεπτομερή έρευνα πεδίου. Τα αποτελέσματα της έρευνας του σταδίου 1 έχουν μεγάλη αβεβαιότητα και δεν είναι κατάλληλα για τον λεπτομερή σχεδιασμό (International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2005).

Το επόμενο στάδιο της εργασίας (Στάδιο 2) εμφανίζεται, μετά από μια ανακάλυψη που έγινε και βασίζεται στην βασική αξιολόγηση γεωκινδύνων του σταδίου 1, ώστε να καθορίσει τους γεωκινδύνους που μπορούν να επηρεάσουν τη μελέτη. Οι μελέτες του σταδίου 2 περιλαμβάνουν σχεδιασμό και εκτέλεση προγραμμάτων γεωφυσικών και γεωτεχνικών δεδομένων, καθώς και προκαταρκτικό χαρακτηρισμό της περιοχής ενδιαφέροντος. Οι έρευνες του σταδίου 2 περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Απόκτηση λεπτομερών γεωφυσικών και γεωτεχνικών δεδομένων
- Ανάπτυξη ενός μοντέλου εκτίμησης μορφολογίας πυθμένα
- Ανάπτυξη ενός μοντέλου σε περιβάλλον γεωγραφικών πληροφοριακών συστημάτων (GIS) και χαρτογράφηση των γεωλογικών συνθηκών στην περιοχή εγκατάστασης ή κατά μήκος της όδευσης.
- Διεξαγωγή λεπτομερούς ανάλυσης της μορφολογίας του πυθμένα, και ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων για τον εντοπισμό συγκεκριμένων κινδύνων εντός της περιοχής του έργου
- Κατασκευή χαρτών με ευπαθείς περιοχές σε γεωκινδύνους, όπως για παράδειγμα, απότομα πρανή, ρήγματα, κατολισθήσεις, ρευστοποιήσιμα ιζήματα, και διασταυρώσεις υποβρύχιων φαραγγίων.

- Προσδιορισμός συγκεκριμένων στόχων που χρειάζονται έρευνα για την τελική ανάπτυξη των παραμέτρων
- Αλληλεπίδραση με την ομάδα μελετητών για να συζητηθούν οι περιορισμοί και οι επιπτώσεις των γεωκινδύνων στο σχεδιασμό
- Ανάπτυξη προτάσεων για ειδικές μελέτες που απαιτούνται για την αντιμετώπιση ειδικών τεχνικών ζητημάτων

Πέρα από την απλή υποβολή μιας έκθεσης μετά την ολοκλήρωση των διεργασιών του σταδίου 2, πρέπει να πραγματοποιηθεί μια συνεδρίαση των υπεύθυνων ομάδων για τους γεωκινδύνους και για το σχεδιασμό, ώστε να επανεξεταστούν τα ευρήματα και να κριθεί αν πρέπει να διεξαχθούν πρόσθετες έρευνες. Μέσω της συνεχούς επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης αυτών των ομάδων, πολλοί γεωκίνδυνοι, γεωτεχνικά και σχεδιαστικά ζητήματα μπορούν να επιλυθούν ή μπορεί να συμφωνηθεί ο τρόπος αποφυγής, διαχείρισης ή αποδοχής πιθανών κινδύνων. Όπου απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση, η ομάδα μπορεί να ιεραρχήσει τις προτεινόμενες επιτόπιες έρευνες και να τις συνδυάσει με άλλες δραστηριότητες ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος και ο χρόνος.

Οι δραστηριότητες του σταδίου 3 περιλαμβάνουν τον τελικό λεπτομερή συνδυασμό όλων των δεδομένων. Αυτό είναι ένα εντατικό στάδιο κάθε έργου και περιλαμβάνει στενή αλληλεπίδραση μεταξύ των γεωλόγων, των γεωτεχνικών μηχανικών και των εκπροσώπων των ιδιοκτητών. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, μπορεί να διεξαχθεί επιπρόσθετη γεωφυσική επεξεργασία, αναπτύσσονται τα τελικά μοντέλα του πυθμένα, και καθορίζονται οι παράμετροι του πυθμένα για χρήση σε ειδικές μελέτες όπως για την ενίσχυση της περιοχής του έργου, ή για αναλύσεις ευστάθειας πρανών και ρευστοποίησης. Επίσης, διεξάγονται λεπτομερείς αξιολογήσεις των γεωκινδύνων με σκοπό την αντιμετώπιση της κατανομής, της σοβαρότητας και της συχνότητας φαινομένων όπως υποθαλάσσιες αστοχίες πρανών, ροές μαζών, ρήγματα, ισχυρές δονήσεις του πυθμένα, ρευστοποίηση, εκρήξεις υδριτών και ρευστών. Τα αποτελέσματα των λεπτομερών ερευνών του σταδίου 3 πρέπει να διαβιβάζονται σε μορφή κατάλληλη, ώστε να μπορούν να ενσωματωθούν και σε οικονομικές αξιολογήσεις ζημίας και στον τελικό σχεδιασμό της εγκατάστασης.

Η αξιολόγηση των γεωκινδύνων απαιτεί μια διεπιστημονική ομάδα γεωτεχνικών μηχανικών, θαλάσσιων γεωλόγων, γεωχημικών, γεωφυσικών και ωκεανογράφων. Κάθε τομέας είναι εξειδικευμένος και σε αυτή την ενότητα, υπολογίζεται μόνο το πεδίο της αξιολόγησης των γεωκινδύνων, που εμπίπτει στον

τομέα των γεωτεχνικών μηχανικών. Η αξιολόγηση ενός γεωκινδύνου πρέπει να λαμβάνει υπόψη της μια πολύ μεγαλύτερη περιοχή, από ότι το πεδίο ενδιαφέροντος, όπως τους γεωκινδύνους έξω από το πεδίο που μπορούν να επηρεάσουν την προτεινόμενη εγκατάσταση.

Υπάρχουν δύο γενικοί τύποι εργαλείων (μέσων) απόκτησης δεδομένων που απαιτούνται για την ολοκλήρωση εγκαταστάσεων σε βαθιά ύδατα. Ο πρώτος περιλαμβάνει εργαλεία γεωφυσικής έρευνας, ενώ ο δεύτερος εργαλεία γεωτεχνικής/γεωλογικής δειγματοληψίας και εργαλεία επιτόπιων δοκιμών.

3.5.1. Γεωφυσικές έρευνες

Τα υπεράκτια έργα θα πρέπει να αρχίζουν με την αξιολόγηση των γεωφυσικών δεδομένων μέσω της τρισδιάστατης έρευνας (Campbell, et al., 2008). Οι πληροφορίες αυτές, σε συνδυασμό με άλλες πηγές δεδομένων, παρέχουν ένδειξη των μεγάλων γεωλογικών χαρακτηριστικών που θα πρέπει να αναμένεται σε μια περιοχή του έργου. Τα δεδομένα από τη τρισδιάστατη έρευνα (3DX) έχουν σχετικά χαμηλή ανάλυση σε σημεία δεδομένων με βάθος τα 12.5 – 25 m και με κάθετη ανάλυση τα 8 – 10 m. Τα δεδομένα από τη τρισδιάστατη έρευνα (3DX) μπορούν να ξανα-επεξεργαστούν για να παρέχουν περισσότερες λεπτομέρειες για το ρηχό τμήμα της στρωματογραφικής ενότητας. Η ερμηνεία των σεισμικών 3DX είναι κατάλληλη για τα πρώτα στάδια ενός έργου, ειδικά στην αρχική χωροθέτηση για πιθανές καλές τοποθεσίες.

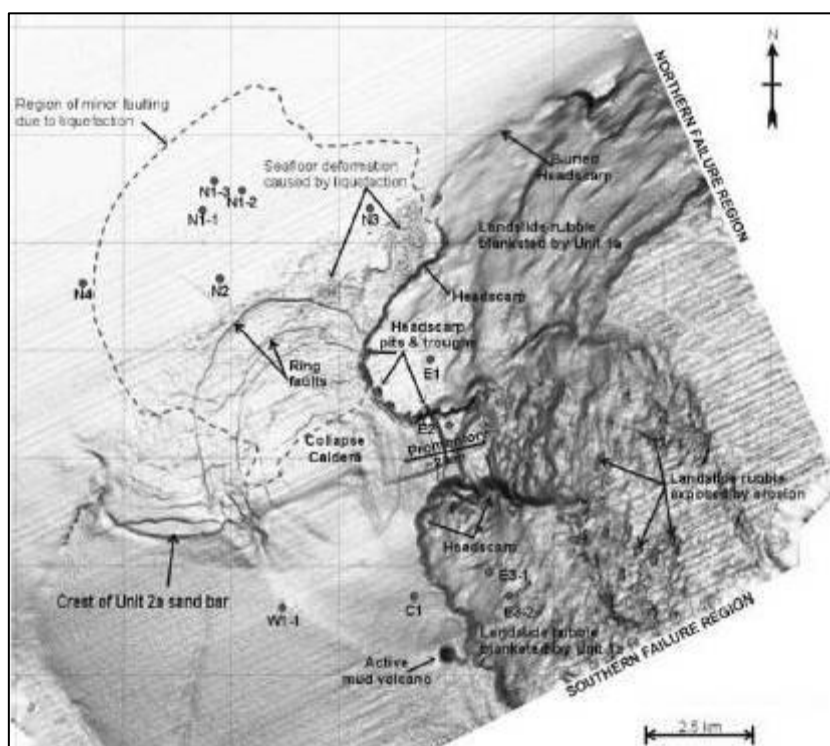
Μόλις πραγματοποιηθεί μια ανακάλυψη, θα πρέπει να διενεργηθούν γεωφυσικές έρευνες για συγκεκριμένα σημεία για να παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες για χρήση για την ανάπτυξη μιας αρχικής αξιολόγησης γεωλογικών κινδύνων και για τον σχεδιασμό του προγράμματος της γεωτεχνικής έρευνας. Οι αναλυτικές γεωφυσικές έρευνες εμπεριέχουν την απόκτηση των λεπτομερών βαθυμετρικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης του βυθού και του πυθμένα. Μια σειρά από γεωφυσικές τεχνικές είναι διαθέσιμες και μπορούν να περιλαμβάνουν τις έρευνες από τη χρήση ενός αυτόνομου ή ρυμουλκούμενου υποβρυχίου οχήματος. Τα αυτόνομα υποβρυχία οχήματα (AUV) έρευνας περιλαμβάνουν συνήθως: (α) βυθόμετρα πολλαπλής δέσμης (MBES), δεδομένα της βυθομετρικής κάλυψης και οπισθοσκέδασης (ανακλαστικότητα πυθμένα) με σημεία δειγματοληψίας σε βάθος

περίπου των 2 m, (β) ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης, ο οποίος παρέχει εικόνες παρόμοιες με τις αεροφωτογραφίες, με σημεία δεδομένων σε βάθος περίπου του 1 m και, (γ) δεδομένα του τομογράφου μορφολογίας πυθμένα που παρέχουν στρωματογραφικές λεπτομέρειες στα 70 m από το τμήμα με τη κάθετη ανάλυση μικρότερη από 0.5 m, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν κάτω από την επιφάνεια. Τα ρυμουλκούμενα συστήματα βάθους (DT) που συλλέγουν ένα παρόμοιο πακέτο τύπων δεδομένων είναι διαθέσιμα, αλλά είναι λιγότερο αποτελεσματικά και μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο την ποιότητα των δεδομένων σε ανώμαλο πυθμένα. Τα AUV έρευνας προτιμώνται περισσότερο από τα ρυμουλκούμενα συστήματα, διότι παρέχουν καλύτερη ποιότητα χαρακτηριστικών σεισμικών δεδομένων βαθυμετρίας και ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης που αναφέρονται στο ίδιο σύνολο συντεταγμένων θέσεων, αποφεύγοντας έτσι τις ασάφειες που σχετίζονται με ξεχωριστές θέσεις δεδομένων με γεωγραφική αναφορά (Jeanjean, et al., 2005).

Τα δεδομένα που συλλέγονται με συστήματα AUV ή DT παρέχουν πληροφορίες για να χρησιμοποιηθούν για τον χαρακτηρισμό του πυθμένα και της ζώνης ρηχής έδρασης. Ωστόσο, ορισμένες έννοιες της έδρασης έχουν ζώνες έδρασης, που απαιτούν πληροφορίες για βάθη μεγαλύτερα από αυτά που μπορούν να αποκτηθούν με τη χρήση συστημάτων AUV. Όταν απαιτούνται δεδομένα για την υποστήριξη αυτών των σχεδίων της έδρασης ή για να χαρακτηρίσουν τις βαθύτερες γεωλογικές συνθήκες ή τους κίνδυνους, χρησιμοποιούνται εναλλακτικές τεχνικές έρευνας. Αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν έρευνες δισδιάστατης υπερ-υψηλής ανάλυσης (UHR2D), δισδιάστατης υψηλής ανάλυσης (HR2D) ή τρισδιάστατης υψηλής ανάλυσης (HR3D). Οι έρευνες με UHR2D μπορούν να συλλέγουν δεδομένα σε βάθος περίπου 200-500 m κάτω από το θαλάσσιο πυθμένα και μπορούν να πετύχουν κάθετη ανάλυση στο 1 - 1.5 m. Οι έρευνες με HR2D συλλέγουν δεδομένα σε βάθος περίπου 1500 m και έχουν κάθετη ανάλυση περίπου τα 3 m. Οι έρευνες με UHR2D παρέχουν τις πιο λεπτομερείς πληροφορίες για τις έρευνες της ζώνης έδρασης. Οι έρευνες με HR3D παρέχουν στοιχεία για ένα τρισδιάστατο «όγκο» και όχι κατά μήκος των μεμονωμένων δισδιάστατων γραμμών έρευνας. Επειδή τότε είναι δυνατό να εκτιμηθούν οι συνθήκες κάτω από την επιφάνεια σε τρεις διαστάσεις, οι πιο δυνατές ερμηνείες μπορούν να γίνουν πιο γρήγορα και με μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα, χρησιμοποιώντας τα στοιχεία της έρευνας HR3D σε σύγκριση με τα στοιχεία της έρευνας HR2D. Ωστόσο, οι δαπάνες που συσχετίζονται με τις έρευνες με HR3D είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις έρευνες με HR2D και

ως εκ τούτου τα δεδομένα αυτά συνήθως μόνο αποκτούνται σε περιοχές με πολύπλοκη γεωλογία, όπου οι κίνδυνοι είναι υψηλοί (Campbell, et al., 2008).

Τα στοιχεία από τα AUV παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το βυθό και τις συνθήκες των ρηχών υποθαλάσσιων επιφανειών που είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την αξιολόγηση των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών. Για παράδειγμα, τα δεδομένα από τα AUV μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των υφιστάμενων πρηνών, ανάγλυφων που υποδηλώνουν προηγούμενα κατεστραμμένα πρηνή, διαδρομές εκτροπής από προηγούμενες κατολισθήσεις, ηφαίστεια λάσπης και καταπτώσεις από προηγούμενες εκρήξεις και επιστρώσεις που μπορεί να υποδεικνύουν την παρουσία ιζημάτων τσιμεντοποιημένου ανθρακικού άλατος. Οι βαθύτερης διείσδυσης έρευνες με UHR2D, HR2D και HR3D είναι πιο χρήσιμες για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών, όπως ρήγματα και βαθιά κατεστραμμένα πρηνή. Στην εικόνα 3-2 φαίνεται ένα παράδειγμα της απόδοσης του AUV στο βυθό του πεδίου Shah Deniz, στη Κασπία Θάλασσα.



Εικόνα 3-2: Απόδοση του βυθού στο πεδίο Shah Deniz, στην Κασπία Θάλασσα (Mildenhall & Fowler, 2001).

Μια σειρά από γεωφυσικές τεχνικές κατά μήκος της γεώτρησης είναι διαθέσιμες για την αξιολόγηση των συνθηκών του πυθμένα σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία (Campbell, et al., 2008). Τα εργαλεία αυτά παρέχουν συνεχή δεδομένα για ένα εύρος των στρωματογραφικών ιδιοτήτων του πυθμένα. Τα δεδομένα συλλέγονται με το χαμήλωμα ενός εργαλείου με ένα εύρος αισθητήρων κάτω από την ερευνητική γεώτρηση. Τα είδη των δεδομένων που μπορούν να συλλέγονται περιλαμβάνουν, για παράδειγμα:

- Φυσική εκπομπή ακτινών γάμμα - στρωματογραφική καταγραφή που παρουσιάζει τις διακυμάνσεις στην ορυκτολογία.
- Πυκνότητα ακτινών γάμμα - χημική σύνθεση, πυκνότητα και παράγωγο πορώδες των πετρωμάτων.
- Πορώδες νετρονίων – σχηματισμό πορώδους
- Ηλεκτρική αντίσταση – ο δείκτης του ένυδρου αερίου, οι αλλαγές στο είδος του ιζηματος πυθμένα και οι ορυκτολογικές αλλαγές.
- Ηχητική κυματομορφή - συσχετίζει τα σεισμικά δεδομένα για τη στρωματογραφική ερμηνεία.
- Διαστημόμετρο (Caliper) – διάμετρος ερευνητικής γεώτρησης.
- Κάθετη σεισμική υποδομή - σεισμικές ταχύτητες για ανάλυση απόκρισης του σημείου και συσχέτιση των δεδομένων καταγραφής με σεισμικές καταγραφές.

3.5.2. Γεωτεχνική έρευνα πεδίου

Ένα πρόγραμμα γεωτεχνικής έρευνας πεδίου πραγματοποιείται πιο αποτελεσματικά με την απόκτηση των γεωτεχνικών δεδομένων στη συγκεκριμένη τοποθεσία, την ανάπτυξη του προκαταρκτικού προσομοιώματος πυθμένα και την ολοκλήρωση της αρχικής αξιολόγησης των γεωλογικών κινδύνων. Αυτό επιτρέπει τη συλλογή των στοχευμένων γεωτεχνικών δεδομένων και δειγμάτων για να υποστηρίξει το στάδιο θεμελίωσης του έργου, αλλά παρέχει επίσης τη δυνατότητα να αποκτήσουμε τα δεδομένα για την εκτίμηση των ειδικών χαρακτηριστικών του πυθμένα. Η γεωτεχνική έρευνα παρέχει στοιχεία για τις συγκεκριμένες ιδιότητες του πυθμένα και τις συνθήκες πίεσης πόρων των ιζημάτων του βυθού και περιλαμβάνει

την καταγραφή της ερευνητικής γεώτρησης, τις δοκιμές πεδίου, τη δειγματοληψία και τις εργαστηριακές αναλύσεις.

Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις για τις γεωτεχνικές έρευνες πεδίου. Αυτές περιλαμβάνουν τη κατάσταση του πυθμένα και τη κατάσταση κατά μήκος της γεώτρησης (Campbell, et al., 2008). Οι μέθοδοι για την κατάσταση του πυθμένα χαρακτηρίζουν το ρηχό τμήμα της στρωματογραφικής ενότητας σε βάθη κάτω από 50 m. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν συχνά μεγάλη διάμετρο του πυρήνα του εμβόλου δειγματοληψίας και επί τόπου δοκιμών, τις δοκιμές διείσδυσης κώνου (πιεζοκώνος/ piezocone penetrometer testing, PCPT), τις δοκιμές διάτμησης πτερυγίου (Vane Shear Test, VST) και τις δοκιμές πενετρόμετρου σε σχήμα T και σε σχήμα μπάλας (Peuchen & Rapp, 2007). Ορισμένες εγκαταστάσεις, όπως είναι οι πλατφόρμες Tension-Leg (TLP), οι συμβατές πλατφόρμες και τα συστήματα πρόσδεσης για πλατφόρμες SPAR, τα ημι-βυθιζόμενα σκάφη και οι πλωτές μονάδες αποθήκευσης και εκφόρτωσης παραγωγής (FPSO), έχουν οδηγήσει τα έργα υποσύλωσης, τα οποία χρειάζονται δεδομένα για τον πυθμένα σε μεγαλύτερο βάθος από ότι μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας προσεγγιστικές έρευνες πυθμένα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η δειγματοληψία ολοκληρώνεται χρησιμοποιώντας τις προσεγγίσεις κατά μήκος της γεώτρησης. Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση τεχνικών περιστροφικής γεώτρησης από μια πλατφόρμα γεώτρησης εγκατεστημένη σε πλοίο. Τα εργαλεία πυρηνοληψίας είναι προηγμένα και ανακτώνται μέσω του στελέχους του τρυπανιού. Οι τύποι των δειγμάτων μπορεί να περιλαμβάνουν: δειγματολήπτες εμβόλου, σωλήνες ώθησης, περιστροφικούς πυρηνολήπτες, κρουστικούς πυρηνολήπτες και πυρηνολήπτες πίεσης για να λάβουν δείγμα ένυδρων αερίων.

Οι δοκιμές πεδίου θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των συνθηκών πίεσης των πόρων, τις κατανομές θερμοκρασίας και τη επαναυποτοπιζόμενη και υπολειμματική αντοχή διάτμησης. Η σημασία των ακριβών προσδιορισμών των συνθηκών πίεσης πόρων κατά τη διάρκεια μιας αξιολόγησης των γεωλογικών κινδύνων, δεν μπορεί να υπερεκτιμηθεί. Οι τεχνικές δειγματοληψίας υψηλής ποιότητας θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση πυρήνων (δειγμάτων γεώτρησης) για εργαστηριακές δοκιμές. Το πρόγραμμα δοκιμών πρέπει να περιλαμβάνει: (α) τις δοκιμές κατάταξης για τον εντοπισμό της υφής του πυθμένα και την ορυκτολογία, την ορυκτολογία αργίλου, την ηλικία, την αλατότητα του νερού των πόρων και τις θερμικές ιδιότητες, (β) τις δοκιμές αντοχής για τον εντοπισμό κορυφών, τη κρίσιμη κατάσταση, την αναμορφωμένη και απομένουσα αντοχή διάτμησης και τις δοκιμές αντοχής για τη διερεύνηση των επιπτώσεων της εξάρτησης

από την αντοχή, το ποσοστό παραμόρφωσης, την ανισοτροπία της αντοχής και τη κυκλική φόρτιση.

3.6. Αξιολόγηση κινδύνου

Ο χαρακτηρισμός των γεωκινδύνων για μεγάλα έργα υποδομής, όπως εξορύξεις πετρελαίου και φυσικού αερίου βαθέων υδάτων, περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της τοποθεσίας των δυνητικών γεωκινδύνων, καθώς και το μέγεθος των γεγονότων κινδύνου και τη συχνότητα με την οποία συμβαίνουν αυτά τα γεγονότα. Η σχέση μεγέθους-συχνότητας που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του χαρακτηρισμού των γεωκινδύνων, επιτρέπει η πληροφορία αυτή να χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του κινδύνου για μια δεδομένη δομή ή ένα σύστημα. Ο όρος «κίνδυνος» εκφράζει τις οικονομικές ζημίες, την απώλεια ζωής ή τις περιβαλλοντικές ζημίες που ενδέχεται να προκύψουν λόγω κάποιου είδους αστοχίας σε μια δεδομένη περίοδο έκθεσης. Οι αστοχίες μπορεί να είναι για παράδειγμα δομικές, λειτουργικές, γεωτεχνικές ή γεωλογικές και σχετίζονται με τον συνδυασμό των φυσικών κινδύνων, τις διαδικασίες ή τις συνθήκες και την ευπάθεια του συστήματος. Ο κίνδυνος είναι επίσης ένα προϊόν της συνέπειας της αστοχίας, όπου, για παράδειγμα, μια μικρή διαρροή σε ένα σχετικά ευαίσθητο περιβάλλον θα έχει μικρές σχετικές συνέπειες, ενώ μια σημαντική διαρροή σε ένα ευαίσθητο περιβάλλον θα μπορούσε να έχει σοβαρές συνέπειες.

Οι εκτιμήσεις κινδύνου των γεωκινδύνων μπορεί να είναι είτε αιτιοκρατικές, όπου ο κίνδυνος υπολογίζεται για ένα γεγονός, ή πιθανολογικές, όπου ο κίνδυνος υπολογίζεται ως μια απώλεια που έχει μια ορισμένη πιθανότητα εμφάνισης για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Οι αιτιοκρατικές αναλύσεις προσδιορίζουν το συντελεστή ασφαλείας για την αποφυγή κατάρρευσης και τη συνέπεια της κατάρρευσης για ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων εισόδου. Για παράδειγμα, αν ένα πρανές θα καταρρεύσει από ένα δεδομένο σύνολο οριακών συνθηκών, και εάν ναι, η έκταση της κατολίσθησης που προκύπτει από την κατάρρευση του πρανούς και αν η παλινδρομική ολίσθηση θα προκληθεί από την αρχική αστοχία του πρανούς. Για να εξακριβωθεί η πιθανότητα αστοχίας που λαμβάνει χώρα, απαιτεί εκτίμηση της συχνότητας ενός συμβάντος. Αυτό συνεπάγεται μια πιθανολογική ανάλυση, η οποία τυπικά θα έχει ως αποτέλεσμα μια πρόβλεψη εκφραζόμενη σε ετήσια πιθανότητα αστοχίας.

Η μεθοδολογία για την ποσοτικοποίηση του κινδύνου μπορεί να εκφραστεί χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Bayesian, με την πιθανότητα ενός δεδομένου ζημιογόνου γεγονότος που εκφράζεται σε όρους του προϊόντος των πιθανοτήτων υπό όρους σύμφωνα με (λήψη μιας υποθαλάσσιας κατολίσθησης για παράδειγμα):

$$P(\text{βλάβη}) = P(\text{κατολίσθηση}) \times P(\text{επιπτώσεις/ κατολίσθηση}) \times P(\text{ζημιές/ επιπτώσεις}) \quad (1)$$

Παρόλο που αυτή η διαδικασία οδηγεί σε μια ποσοτική εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης των διαφόρων χρηματοοικονομικών μεγεθών της βλάβης, η ίδια η διαδικασία μπορεί να είναι εντούτοις ποιοτική, με συναίνεση των εμπειρογνομόνων που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των διαφόρων πιθανοτήτων.

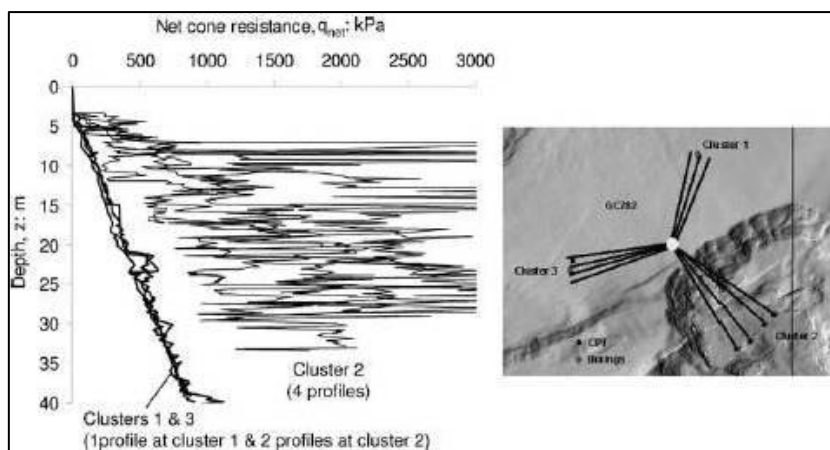
Στη διαδικασία αυτή επικρατούν συχνά χαμηλής συχνότητας καταστροφικά γεγονότα, όπως μια μεγάλη σε βάθος κατολίσθηση. Ένα μεγάλο ποσοστό της προσπάθειας, τουλάχιστον αρχικά, θα πρέπει να πάει στην θέσπιση ότι η πιθανότητα ενός τέτοιου γεγονότος είναι πολύ μικρή. Στη συνέχεια, η εκτίμηση του κινδύνου μπορεί να εστιαστεί σε γεγονότα που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα επιμέρους συστατικά της όλης ανάπτυξης, διασφαλίζοντας ότι το αποτέλεσμα της πιθανότητας εμφάνισης οποιασδήποτε δεδομένης βλάβης και το οικονομικό κόστος της ζημίας αυτής είναι κάτω από το επίπεδο κινδύνου που θεωρείται αποδεκτό.

Μία από τις πιο κοινές αβεβαιότητες στη γεωτεχνική ανάλυση είναι η κατάλληλη τιμή της αντοχής των ιζημάτων του πυθμένα, από την άποψη της επί τούτου χωρικής μεταβολής, οι αλλαγές με τις μεταβλητές που εξαρτώνται από το βάθος και το χρόνο λόγω των αλλαγών της πίεσης των πόρων που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης. Είναι αρκετά εύκολο να πραγματοποιηθεί μια παραμετρική μελέτη για τον προσδιορισμό του αποτελέσματος για την αντοχή των ιζημάτων, για παράδειγμα, στον παράγοντα της ασφάλειας ενός πρανούς. Ωστόσο, ένας μελετητής πρέπει επίσης να κάνει μια εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας που λαμβάνει χώρα εντός της διάρκειας ζωής του έργου. Οι παράγοντες αυτοί αναφέρονται ως αβεβαιότητα.

Η αβεβαιότητα μπορεί να χαρακτηριστεί ως φυσική ή επιστημονική. Η φυσική αβεβαιότητα οφείλεται, για παράδειγμα στην τυχαιότητα των συνθηκών του πυθμένα, ενώ η επιστημονική αβεβαιότητα οφείλεται στην έλλειψη γνώσης (Christian, 2003). Πρόσθετες πληροφορίες δεν θα μειώσουν τη φυσική αβεβαιότητα, ενώ οι πρόσθετες

πληροφορίες μπορούν να μειώσουν, αν όχι να εξαλείψουν την επιστημονική αβεβαιότητα.

Η εικόνα 3-3 απεικονίζει τα προφίλ της αντίστασης κώνου από επί τόπου δοκιμές διείσδυσης κώνου (CPT), οι οποίες διεξήχθησαν σε χώρο με βαθιά νερά, όπου η προτεινόμενη πρόσδεση εκτείνεται σε μια απόκρημνη πλευρά της υφαλοκρηπίδας. Τρεις ομάδες των τεσσάρων προσδέσεων προτάθηκαν με δύο από τις ομάδες προσδέσεων (1 και 3) να βρίσκονται σε μια περιοχή της υφαλοκρηπίδας, και η τρίτη ομάδα πρόσδεσης να βρίσκεται στην ανεπηρέαστη περιοχή πίσω από την απόκρημνη πλευρά του πρανούς. Τα προφίλ αντίστασης κώνου στις δύο θέσεις ομάδων πρόσδεσης στην ανεπηρέαστη περιοχή πίσω από την κορυφή του πρανούς (ομάδες 1 και 3) είναι παρόμοια μεταξύ τους, αλλά διαφέρουν σημαντικά από εκείνα που καταγράφονται από τις δοκιμές διείσδυσης κώνου (CPT) στη θέση της ομάδας πρόσδεσης στην απόκρημνη πλευρά (ομάδα 2), τα οποία από μόνα τους δείχνουν ένα μεγάλο βαθμό μεταβλητότητας. Εάν η έρευνα της τοποθεσίας περιελάμβανε μόνο μια δοκιμή διείσδυσης κώνου (CPT) σε οποιαδήποτε από τις θέσεις της ομάδας, η επιστημονική αβεβαιότητα θα ήταν μεγαλύτερη, αλλά οι πρόσθετες δοκιμές διείσδυσης κώνου (CPT) τεκμηριώνουν το φάσμα των προφίλ της διατμητικής αντοχής μειώνοντας έτσι την επιστημονική αβεβαιότητα, και τελικά τον κίνδυνο της κατάρρευσης. Με μια δοκιμή διείσδυσης κώνου (CPT) σε καθεμία από τις θέσεις της ομάδας, θα υπήρχαν μεγάλες επιστημονικές αβεβαιότητες, όμως, οι πολλαπλές δοκιμές διείσδυσης κώνου (CPT) στις θέσεις των ομάδων 1 και 3 έδειξαν τη μεταβλητότητα του άθικτου υλικού πίσω από την κορυφή του πρανούς, και οι δοκιμές διείσδυσης κώνου (CPT) στην ομάδα 2 επιβεβαιώνουν τις διαφορές στο προφίλ της διατμητικής αντοχής στην απόκρημνη πλευρά. Η δεύτερη δοκιμή διείσδυσης κώνου (CPT) στην ομάδα 2 δείχνει μεταβλητότητα και η αβεβαιότητα είναι μερικώς φυσική, όπως οι περισσότερες δοκιμές διείσδυσης κώνου (CPT) θα επιβεβαίωναν μόνο τη μεταβλητή φύση του υλικού στην απόκρημνη πλευρά. Υπάρχει βέβαια ένα επιστημονικό συστατικό της αβεβαιότητας όσον αφορά τον καθορισμό των ορίων στο σχεδιασμό των προφίλ της διατμητικής αντοχής. Η πραγματική έρευνα τοποθεσίας περιλάμβανε τρεις δοκιμές διείσδυσης κώνου (CPT) κατά μήκος των οκτώ θέσεων πρόσδεσης στο μεγάλο βαθμού άθικτο υλικό πίσω από την κορυφή του πρανούς (μία δοκιμή στην ομάδα 1 και δύο δοκιμές στην ομάδα 3) και μία δοκιμή διείσδυσης κώνου (CPT) σε κάθε μία από τις προτεινόμενες τοποθεσίες πρόσδεσης στην απόκρημνη πλευρά (ομάδα 2).



Εικόνα 3-3: Αποτελέσματα CPT για εγκατάσταση που εκτείνεται σε μια απόκρημνη πλευρά της υφαλοκρηπίδας (Jeanjean, et al., 2005).

Ο σκοπός της αξιολόγησης των γεωκινδύνων είναι να προσδιορίσει το επίπεδο κινδύνου που συνδέεται με τους γεωλογικούς κινδύνους ενός συγκεκριμένου πεδίου. Τελικά, το επίπεδο του κινδύνου εκφράζεται ως το γινόμενο της πιθανότητας εμφάνισης ενός δεδομένου γεωλογικού κινδύνου και του κόστους των συνεπειών που προκύπτει. Σε γενικές γραμμές, οι ποσότητες αυτές διαφέρουν σε ένα αντίστροφο τρόπο, με μικρή πιθανότητα εμφάνισης καταστροφικών συνεπειών, αλλά πολύ μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης γεωλογικών κινδύνων με μικρότερες συνέπειες κόστους. Υπό την προϋπόθεση ότι η αποδοχή των κριτηρίων του κινδύνου έχουν ήδη οριστεί, ο μελετητής μπορεί στη συνέχεια να αποφασίσει εάν θα αποδεχθεί τους κινδύνους ως έχουν, τον μετριασμό των κινδύνων με το να μειώσει είτε την πιθανότητα εμφάνισης ή τις συνέπειες στην εγκατάστασή του ή με το να αποφύγει το κίνδυνο μετατοπίζοντας την εγκατάσταση σε μια εναλλακτική τοποθεσία.

Επί του παρόντος, δεν υπάρχει κανένα επίσημο βιομηχανικό πρότυπο για την αξιολόγηση των γεωκινδύνων. Ο Kvalstad (Kvalstad, 2007) παρουσίασε μια προηγμένη επανεξέταση των βέλτιστων πρακτικών για τις υπεράκτιες έρευνες των γεωλογικών κινδύνων και συνέστησε ότι η ποσοτικοποίηση των γεωλογικών κινδύνων θα πρέπει να βασίζεται στα ακόλουθα:

- Την κατανόηση της περιφερειακής και τοπικής γεωλογίας, τις εν εξελίξει γεωλογικές διαδικασίες και τον τύπο, τις θέσεις και την έκταση των ανωμαλιών για να ποσοτικοποιηθεί η πιθανή επίπτωση, το ποσοστό ή η συχνότητα των εν εξελίξει φυσικών διεργασιών.

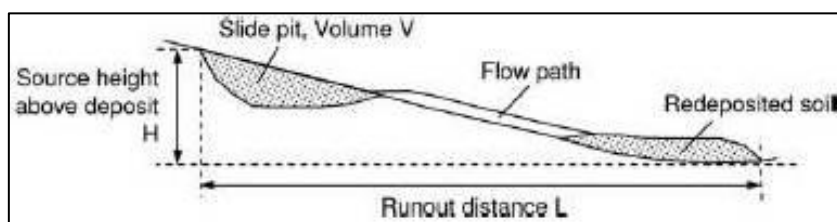
- Τις έρευνες τοποθεσίας για τον εντοπισμό των τοπικών κλίσεων του πυθμένα, τη στρωματογραφία, τις ιδιότητες των ιζημάτων και των πόρων, τις πιέσεις τοποθεσίας, τις πιέσεις πόρων και τη θερμοκρασία.
- Την αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων από τις δραστηριότητες εξερεύνησης, ανάπτυξης και παραγωγής στις συνθήκες του πυθμένα για την αξιολόγηση του κινδύνου της ανθρώπινης παρέμβασης.

3.7. Αστοχίες υποθαλάσσιων πρηνών και κατολισθήσεις

3.7.1. Εισαγωγή

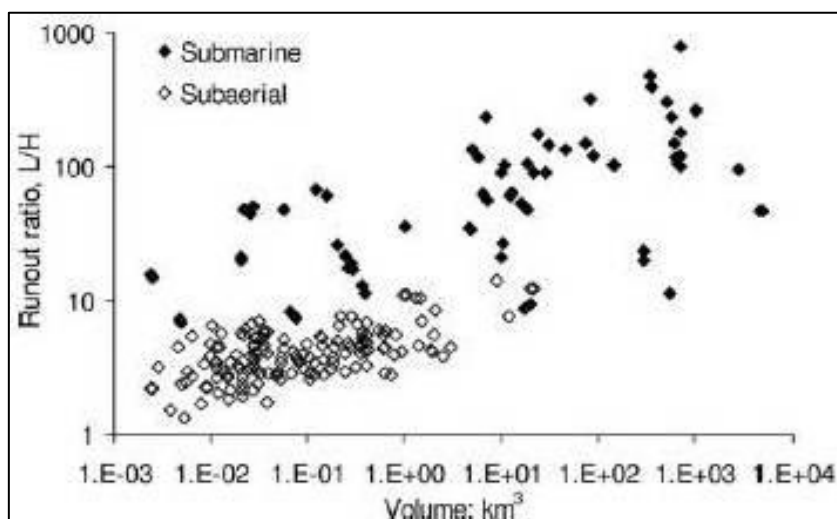
Η αστάθεια του πυθμένα είναι ο κύριος γεωκίνδυνος που αντιμετωπίζουν τα υπεράκτια αναπτυξιακά έργα και μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες για αυτά. Η αστάθεια του βυθού είναι ένα ζήτημα ακόμη και για την υφαλοκρηπίδα με κλίσεις πυθμένα τόσο μικρές όσο 0.5° . Οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις μπορεί να κυμαίνονται σε μέγεθος από σχετικά μικρές παράκτιες κατολισθήσεις, λιγότερο του ενός κυβικού χιλιομέτρου, σε πολύ μεγάλες κατολισθήσεις που αφορούν χιλιάδες κυβικά χιλιόμετρα υλικού. Η κατολίσθηση Storegga στο ηπειρωτικό πρηνές της Νορβηγίας είναι ίσως η πιο μεγάλη υποθαλάσσια κατολίσθηση, που έχει ερευνηθεί διεξοδικά. Η κατολίσθηση Storegga έχει ενδιαφέρον διότι το οικόπεδο φυσικού αερίου Ormen Lange βρίσκεται στην πλευρική προεξοχή του (Bugge, et al., 1998α), (Bryn, et al., 1999β). Η κατολίσθηση εκτιμάται ότι έλαβε χώρα πριν από 8000 χρόνια, φέρεται να υπάρχουν 5600 κυβικά χιλιόμετρα υλικού και έλαβε χώρα σε μια περιοχή με μια μέση κλίση μικρότερη από 2° . Η κατολίσθηση επηρέασε μια έκταση άνω των 30000 κυβικών χιλιομέτρων με αποστάσεις εκτροπής που εκτείνονται έως και 800 km (Kvalstad, et al., 2001).

Η κινητικότητα των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων μπορεί να χαρακτηριστεί γεωμετρικά από το λόγο εκτροπής L/H , όπου L είναι η οριζόντια απόσταση από την πηγή στη κατακρήμνιση και H είναι η κατακόρυφη αύξηση της πηγής της ροής κορημάτων πάνω από την κατακρήμνιση, όπως φαίνεται στην εικόνα 3-4.



Εικόνα 3-4: Προσδιορισμός της κινητικότητας των κατολισθήσεων.

Παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Heim (Heim, 1932) και χρησιμοποιήθηκε αργότερα από τον Scheidegger (Scheidegger, 1973α). Η αναλογία μπορεί να προβλεφθεί από την εξέταση της ενεργειακής ισορροπίας για μια ξηρή μάζα που παρασύρεται στο πρηνές. Η εικόνα 3-5 δείχνει την αναλογία του όγκου του υλικού που συμμετέχει και την εκτροπή των διαφόρων υποθαλάσσιων και χερσαίων κατολισθήσεων. Από τα συγκεντρωτικά στοιχεία, φαίνεται ότι οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερες από τις χερσαίες, και τείνουν να παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποστάσεις εκτροπής για τον ίδιο όγκο υλικού κατολίσθησης. Αυτό δείχνει ότι το νερό παίζει έναν ιδιαίτερο ρόλο στην κινητικότητα της ολισθαίνουσας μάζας.



Εικόνα 3-5: Σύγκριση του όγκου και της απόστασης της εκτροπής των υποθαλάσσιων και των χερσαίων κατολισθήσεων (Scheidegger, 1973α), (Edgers & Karlsrud, 1982β), (Hampton, et al., 1996γ), (Dade & Huppert, 1998δ) (de Blasio, et al., 2006ε).

Μια υποθαλάσσια κατολίσθηση περιλαμβάνει ένα συμβάν έναρξης, συνήθως μια ρηχή ή βαθιά αστοχία πρανούς, συχνά με οπισθοδρομική καθίζηση, και ακολουθούμενη από μια μαζική ροή βαρύτητας που περιλαμβάνει μια ιξωδοελαστική ροή κορημάτων, και θολά ρεύματα χαμηλής αιώρησης. Η αστοχία πρανούς και η μαζική ροή βαρύτητας πρέπει να αναλυθούν ως μέρος της αξιολόγησης γεωλογικών κινδύνων.

3.7.2. Αστάθεια πρανούς

3.7.2.1. Επισκόπηση

Οι αναλύσεις αστάθειας των πρανών συνήθως πραγματοποιούνται με βάση το καθιερωμένο αναλυτικό πλαίσιο ολικής ανάλυσης πρανών για τις αστοχίες ρηχών κοιλωμάτων των πρανών και τη μέθοδο ολίσθησης για τις αστοχίες βαθέων κοιλωμάτων των πρανών. Η θεωρητική βάση αυτών των δύο μεθόδων μπορεί να βρεθεί στα εγχειρίδια της εδαφομηχανικής και εν συντομία περιγράφονται στην επόμενη ενότητα. Παρουσιάζεται επίσης μια εναλλακτική αναλυτική λύση για τις αστοχίες βαθέων κοιλωμάτων των πρανών που βασίζεται σε ένα μηχανισμό μπλοκαρίσματος της ολίσθησης. Οι αριθμητικές αναλύσεις είναι απαραίτητες για να συλλάβουν τους κινηματικούς μηχανισμούς και τις οριακές καταστάσεις των αστοχιών για συνθήκες πεδίου με πολύπλοκη γεωμετρία ή χαρακτηριστικά βυθού.

Οποιοσδήποτε και αν είναι ο τρόπος για να αναλυθεί η αστοχία, τρεις κύριες προϋποθέσεις θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στην αξιολόγηση σχετικά με την αστάθεια των πρανών:

- Αστράγγιστες συνθήκες, εάν ο μηχανισμός ενεργοποίησης είναι αρκετά γρήγορος έτσι ώστε η στράγγιση δεν λαμβάνει χώρα.
- Πλήρως στραγγιζόμενες συνθήκες, στις οποίες δεν υπάρχει επιπλέον πίεση πόρων.
- Μερικώς στραγγιζόμενες συνθήκες, στις οποίες έχει συμβεί κάποια διάχυση πίεσης πόρων, αλλά παραμένει επιπλέον πίεση πόρων.

Οι αστράγγιστες συνθήκες έχουν σχέση με την επιπλέον πίεση πόρων που έχει προκληθεί από σεισμό, οι αποστραγγισμένες συνθήκες έχουν σχέση με το αν

ένα υποθαλάσσιο πρανές έχει κατέβει αρκετά αργά έτσι ώστε οι πιέσεις πόρων είναι παντού υδροστατικές και δεν υπάρχουν διαρροές. Οι μερικώς στραγγισμένες συνθήκες μπορεί να προκύψουν από μια σειρά γεωλογικών, γεωφυσικών και γεωτεχνικών διαδικασιών που οδηγούν σε επιπλέον (περισσότερο από την υδροστατική) πίεση πόρων, συχνά σε δυναμική ισορροπία λόγω της ταυτόχρονης συμπύκνωσης και της παραγωγής της πίεσης πόρων. Για παράδειγμα, η υπερβολική πίεση πόρων μπορεί να υπάρχει σε περιοχές υψηλών ρυθμών καθίζησης (με αποτέλεσμα συνήθως τεχνικά να συμπυκνώνονται, αλλά συχνά αναφέρονται ως υποσυμπυκνωποιημένα ιζήματα) ή προέρχονται από προηγούμενη έκλυση των πόρων του φυσικού αερίου ή του διαχωρισμού των ένυδρων αερίων, με το μέγεθος που καθορίζεται από τις σχετικές τιμές του διαχωρισμού και της παραγωγής. Το βασικό ζήτημα είναι να αξιολογηθεί ο βαθμός της επιπλέον πίεσης πόρων που απομένει, η οποία θα μπορούσε να συμβάλει στο μηχανισμό της ενεργοποίησης αυτών.

Η σταθερότητα ενός πρανούς εκφράζεται μέσω του συντελεστή ασφαλείας F , ο οποίος εκφράζεται ως ο λόγος της διαθέσιμης διατμητικής αντοχής του των ιζημάτων του πυθμένα T_{ult} προς την απαιτούμενη διατμητική αντοχή T_{mob} για την πρόληψη της κατολίσθησης.

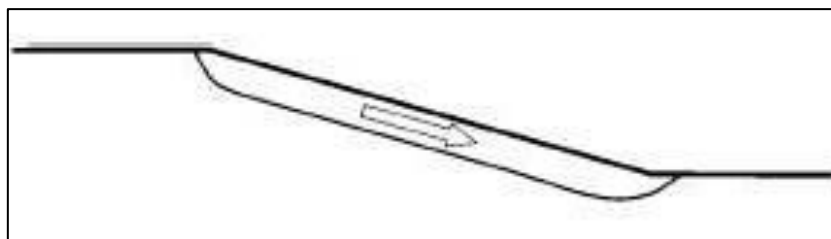
$$F = \frac{T_{ult}}{T_{mob}} \quad (2)$$

Για πρώτη φορά αστοχίας του πρανούς, η μακροπρόθεσμη σταθερότητα των πρανών διέπεται από την κρίσιμη κατάσταση αντοχής των ιζημάτων του πυθμένα. Εάν υπάρχει μια προϋπάρχουσα κατολίσθηση, καλύτερα είναι να προσδιοριστεί η σταθερότητα του πρανούς χρησιμοποιώντας την απομένουσα αντοχή, τουλάχιστον πάνω από τα τμήματα εκείνα της επιφάνειας της αστοχίας που μπορεί να συμπίπτει με την προϋπάρχουσα κατολίσθηση ή σε στρώματα πυθμένα όπου μπορεί να έχουν αναπτυχθεί οι υπολειπόμενες επιφάνειες (Mesri & Shahien, 2003).

3.7.2.2. Αστοχία ρηχού πρανούς

Οι αστοχίες ρηχού πρανούς είναι εκείνες όπου η επιφάνεια αστοχίας βρίσκεται λίγα μέτρα κάτω από την επιφάνεια και η αστοχία λαμβάνει χώρα παράλληλα με τη μετωπική επιφάνεια του πρανούς (Εικόνα 3-6). Ένα πλαίσιο άπειρης σταθερότητας πρανών μπορεί να εφαρμοστεί σε αστοχίες ρηχού πρανούς. Το βάθος της επιφάνειας ολίσθησης ελέγχεται για γεωλογικές συνθήκες ή για

συνθήκες των υπόγειων υδάτων, για παράδειγμα, ένα ισχυρό στρώμα στηρίζει ένα ασθενέστερο στρώμα σε σχετικά μικρό βάθος κάτω από την επιφάνεια του πρανούς. Η ανάλυση πρανούς είναι χρήσιμη για πολύ ρηχές μεταθετικές ολισθήσεις και είναι κατάλληλη για πολλά ήπια και εκτεταμένα υποθαλάσσια πρανή όπου η αστοχία τείνει να είναι επίπεδη και σχεδόν παράλληλη με την ολίσθηση.



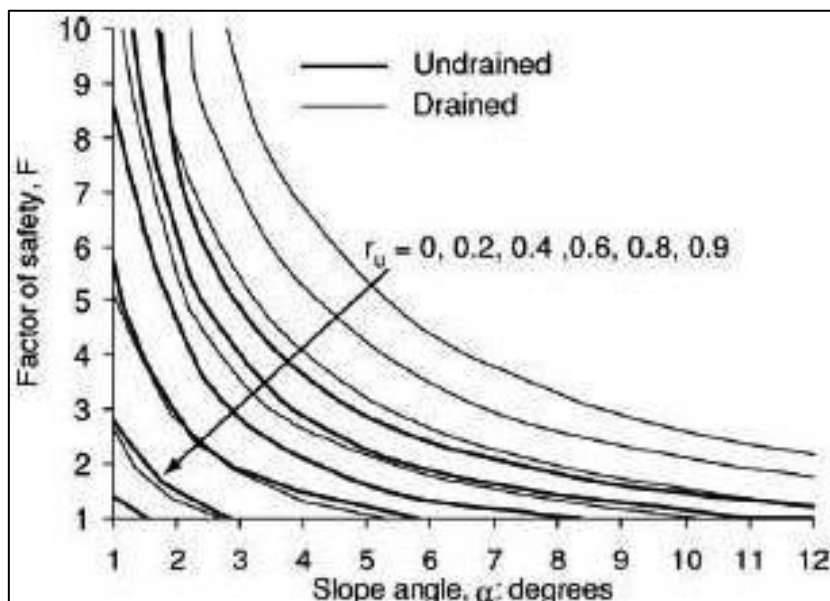
Εικόνα 3-6: Μηχανισμός αστοχίας ρηχού πρανούς.

Ανάλυση ευστάθειας απειρομήκων πρανών

Για ένα απείρως μεγάλο πρανές το οποίο κλίνει σε μια σταθερή γωνία ως προς το οριζόντιο επίπεδο, όπου ο μηχανισμός της κατάρρευσης διέπεται από μια επιφάνεια ολίσθησης παράλληλη με το πρανές, τα άνω και κάτω όρια που συμπίπτουν δείχνουν ότι υπάρχουν ακριβείς λύσεις για την κρίσιμη γωνία πρανούς για το αστράγγιστο και το στραγγισμένο φορτίο. Οι μερικώς στραγγισμένες συνθήκες, δηλαδή όταν υπάρχουν επιπλέον πιέσεις πόρων, θα μειώσουν την κρίσιμη γωνία πρανούς και πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά.

Η παρουσία επιπλέον πιέσεων πόρων, που έχουν δημιουργηθεί είτε πρόσφατα είτε προϋπήρχαν, λόγω της ατελούς συμπύκνωσης, θα μειώσει την ευστάθεια του πρανούς και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό. Ακόμα κι αν μπορεί να αναμένεται ότι η αστοχία θα λάβει χώρα με ένα αστράγγιστο τρόπο, είναι κοινή πρακτική να ακολουθήσουμε την προσέγγιση μιας ενεργούς τάσης, η οποία ουσιαστικά σημαίνει ότι η διατμητική αντοχή ποικίλλει σε άμεση αναλογία με την τρέχουσα ενεργή τάση. Αυτό είναι σίγουρα λογικό για το πρανές με αναλογία καθίζησης μεγαλύτερη από ό,τι θα επέτρεπε την πλήρη εξισορρόπηση των πιέσεων πόρων, και θα είναι συντηρητική για τις περιπτώσεις όπου έχει σημειωθεί αύξηση στην επιπλέον πίεση πόρων που προέκυψε λόγω, για παράδειγμα, σεισμικής δραστηριότητας ή παραγωγής φυσικού αερίου.

Η εικόνα 3-7 δείχνει το συντελεστή ασφαλείας έναντι της αστοχίας του πρανούς ως συνάρτηση του λόγου της γωνίας του πρανούς και της επιπλέον πίεσης πόρων r_u ($=u_e/\gamma'_z$) για αστράγγιστες και αποστραγγισμένες συνθήκες, με ένα αστράγγιστο δείκτη διατμητικής αντοχής k ($=s_u / \sigma'_v$) = 0.25 και γωνία τριβής $\phi_{cr}=25^\circ$, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι ο στραγγιζόμενος συντελεστής ασφαλείας είναι περίπου διπλάσιος της αστράγγιστης τιμής.



Εικόνα 3-7: Συντελεστές ασφαλείας από ανάλυση ευστάθειας απειρομήκων πρανών για μερική αποστράγγιση (Kvalstad, et al., 2001).

Λαμβάνοντας υπόψη την ισορροπία των δυνάμεων που δρουν στο στοιχείο των μερικώς στραγγισμένων ιζημάτων του πυθμένα, δείχνει τη μέγιστη γωνία κλίσης που μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με το λόγο της επιπλέον πίεσης πόρων.

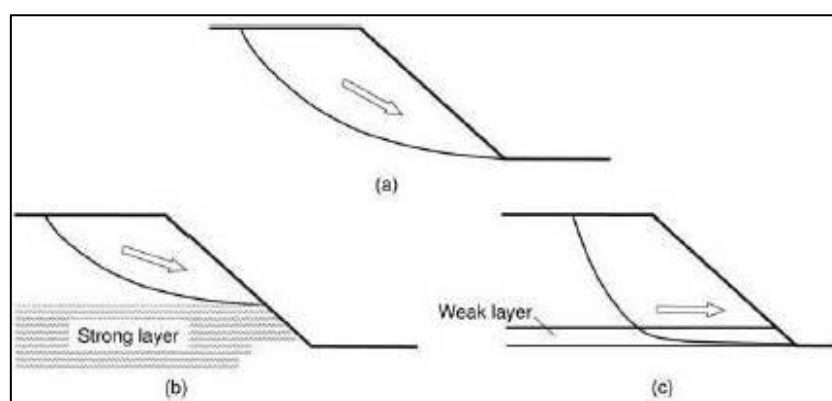
Η ανάλυση απειρομήκους πρανούς είναι κατάλληλη για μεγάλες ενιαίες κλίσεις, αλλά πολλές κλίσεις δεν μπορούν λογικά να εξιδανικευτούν ως μεγάλες ή ομοιόμορφες. Επίσης, είναι συχνά σημαντικό να είναι ικανή η διερεύνηση των εντοπισμένων επιδράσεων αποσταθεροποίησης στην κορυφή ή στο δάκτυλο ενός πρανούς, για παράδειγμα, κατά την κατασκευή μιας πλατφόρμας ή τη δημιουργία μιας τάφρου για ένα καλώδιο, για τις οποίες η προσέγγιση της άπειρης ανάλυσης του πρανούς δεν είναι επαρκώς λεπτομερής, ενώ η ανάλυση της αστοχίας βάθους είναι πιο κατάλληλη.

Ένας μηχανισμός ενεργοποίησης που λειτουργεί στο ένα τμήμα ενός μεγάλου πρανούς μπορεί να προκαλέσει τοπικές αστοχίες που στη συνέχεια μεταδίδονται πάνω και κάτω στο πρανές, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται αποσκλήρυνση στην επιφάνεια της ολίσθησης. Οι συνθήκες για την ανάπτυξη της διαμητικής ζώνης και την πιθανή καταστροφική αστοχία έχουν εκτιμηθεί από τον Puzrin (Puzrin, et al., 2004α), (Puzrin & Germanovich, 2005β). Η προοδευτική αστοχία του τύπου που περιγράφεται θα βοηθούσε να εξηγήσει τις παρατηρήσεις των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων στα πρανή σε σχετικά χαμηλές γωνίες.

3.7.2.3. Αστοχία βαθέως πρανούς

Μέθοδοι κύκλων ολίσθησης

Οι αστοχίες βαθέων πρανών εμφανίζονται συχνά με περιστροφική κίνηση κατά μήκος των τοξοειδών (ή κυκλικών) επιφανειών ολίσθησης, όπως φαίνεται στην εικόνα 3-8α. Οι κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης σχετίζονται γενικά με ομοιογενή ιζήματα και οι μη κυκλικές καμπύλες με μη ομογενή ιζήματα. Εάν τα ισχυρά ή τα αδύναμα στρώματα είναι παρόντα, μία συνολική αστοχία επιφάνειας μπορεί να σχηματίσει μια μορφή που να αποτελείται από επίπεδα και καμπύλα τμήματα, όπως απεικονίζονται στις εικόνες 3-8b και 3-8c.



Εικόνα 3-8: Μηχανισμός για βαθιές περιστροφικές και σύνθετες ολισθήσεις.

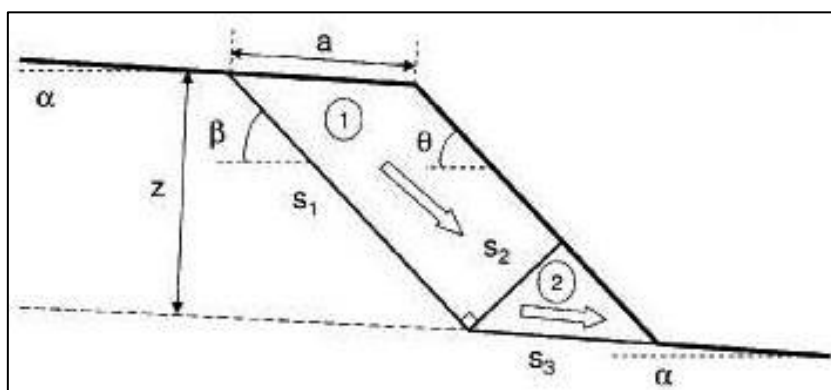
Οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας συνήθως χρησιμοποιούνται για την ανάλυση βαθέων αστοχιών. Η αστοχία θεωρείται ότι πραγματοποιείται κατά μήκος μιας

υποτιθέμενης ή γνωστής αστοχίας στην επιφάνεια και η απαιτούμενη αντοχή διάτμησης για να διατηρήσει μια κατάσταση περιορισμού ισορροπίας συγκρίνεται με τη διαθέσιμη διατμητική αντοχή των ιζημάτων του πυθμένα δίνοντας ένα μέσο όρο συντελεστή ασφαλείας κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας. Για μια συνολική προσέγγιση έντασης, το πρόβλημα είναι στατικά αόριστο και απαιτεί μια σχετικά απλή λύση. Για μια αποτελεσματική προσέγγιση έντασης, το πρόβλημα είναι απροσδιόριστο στατικά και χρειάζεται μια απλούστερη υπόθεση. Μια σειρά από διαφορετικές λύσεις έχουν αναπτυχθεί με βάση διαφορετικές υποθέσεις (π.χ. (Fellenius, 1927), (Bishop, 1955), (Morgenstern & Price, 1965), (Janbu, 1973)) Τα όρια των αναλύσεων ισορροπίας για τους υπολογισμούς της ευστάθειας των πρηνών είναι σε μεγάλο βαθμό επαναλαμβανόμενα, καθώς πολλοί μηχανισμοί πρέπει να διερευνηθούν για να προσδιορίσουν την πιο κρίσιμη, δηλαδή τη μια με το χαμηλότερο συντελεστή ασφαλείας. Ως αποτέλεσμα, αυτοί οι υπολογισμοί διεξάγονται από προγράμματα λογισμικού για το όριο ισορροπίας.

Ανάλυση του μηχανισμού τεμαχίων

Σε πολλές περιπτώσεις, μια κυκλική ή καμπυλοειδής επιφάνεια ολίσθησης μπορεί να μην είναι κρίσιμη. Ένας μηχανισμός τεμαχίων μπορεί να ρυθμίσει την αστοχία, ιδιαίτερα για τα πρηνή που περιλαμβάνουν την οριζόντια διαστρωμάτωση του πυθμένα ή εάν υπάρχει ένα ασθενές στρώμα στη βάση του πρηνούς. Το Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI) (Nadim, et al., 2003) ανέπτυξε ένα μηχανισμό δύο σφηνών, ως μια εναλλακτική λύση για τις μεθόδους του κύκλου ολίσθησης για να αναλύσει τις αστοχίες σε βάθη, με ιδιαίτερη εφαρμογή στις ανάδρομες ολισθήσεις. Ένα από τα πλεονεκτήματα του μηχανισμού των δύο σφηνών είναι ότι έχει μια αρκετά απλή λύση κλειστού τύπου που το καθιστά κατάλληλο για την επίλυση. Παρ' όλα αυτά, ένας αριθμός διαφορετικών επιφανειών ολίσθησης πρέπει να ερευνάνται για να βρεθεί ο κρίσιμος μηχανισμός. Η διαμόρφωση του μηχανισμού των δύο σφηνοειδών απεικονίζεται στην εικόνα 3-9, η οποία περιλαμβάνει μια οπίσθια σφήνα (σφήνα 1) και μια σφήνα δακτύλου (σφήνα 2). Η γωνία α του πυθμένα της θάλασσας υποθέτουμε ότι είναι η ίδια πάνω και κάτω από το πρηνές και υπαγορεύει την κλίση του βασικού επιπέδου ολίσθησης του σφηνοειδούς δακτύλου, αλλά η γωνία πρηνούς θ , δεν χρειάζεται να είναι ίση με τη γωνία του επιπέδου ολίσθησης της οπίσθιας σφήνας β . Τα επίπεδα ολίσθησης της οπίσθιας σφήνας (s_1 και s_2 της σφήνας 1) είναι κάθετα το ένα με το άλλο, έτσι ώστε η δεξιά γωνία του τριγώνου σχηματίζεται από την επέκταση της γραμμής του επιπέδου

της χαμηλότερης ολίσθησης (s_2) για να τέμνει, με την επέκταση της γραμμής του πυθμένα της θάλασσας, την κορυφή του πρσανούς. Η απόσταση από το σημείο έναρξης του επιπέδου της ολίσθησης της οπίσθιας σφήνας πίσω από την κορυφή του πρσανούς ορίζεται με την παράμετρο a . Το ύψος ή το βάθος του κάθετου πρσανούς στο επίπεδο του αδύνατου στρώματος, μετράται από τον πυθμένα της θάλασσας προς το παράλληλο επίπεδο στο επίπεδο δακτύλου, ή στο επίπεδο ενός ασθενούς στρώματος και καθορίζεται από την παράμετρο z .



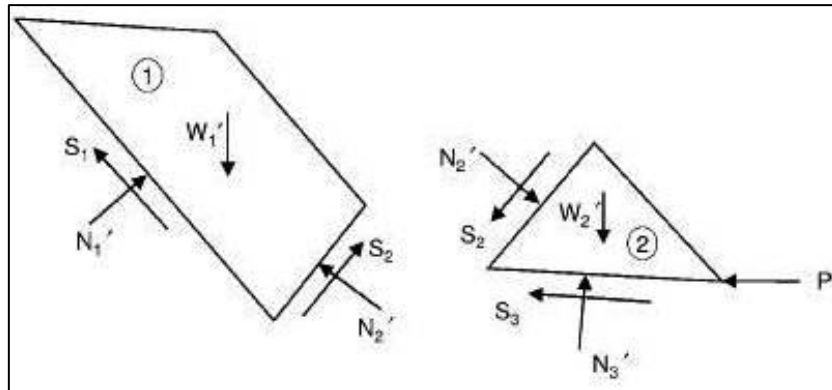
Εικόνα 3-9: Μηχανισμός των δύο σφηνοειδών για αστοχία βαθέως πρσανούς (Nadim, et al., 2003).

Η ισορροπία των δύο σφηνοειδών φαίνεται στην εικόνα 3-10. Οι N_1' , N_2' και N_3' είναι οι κανονικές αποτελεσματικές δυνάμεις που δρουν κάθετα προς τα επίπεδα ολίσθησης. Οι S_1 , S_2 και S_3 είναι οι διατμητικές δυνάμεις κατά μήκος των επιπέδων ολίσθησης, ίσες με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή S_u επί το μήκος του επιπέδου ολίσθησης s_i , δηλαδή $s_u(s_i)$, όπου $i=1,2,3$. Τα W_1' και W_2' είναι τα βυθισμένα βάρη του σφηνοειδούς 1 και του σφηνοειδούς 2, που δίνεται από τη μονάδα βάρους του υλικού επί το εμβαδόν του σφηνοειδούς. Και το P περιγράφει οποιαδήποτε (ισχύει - δηλαδή μετά την αφαίρεση των υδροστατικών πιέσεων πόρων) παθητική πλευρική αντίσταση στη κορυφή του πρσανούς. Λαμβάνοντας υπόψη την ισορροπία των δύο σφηνοειδών και αν υποθεθεί ότι όλα τα επίπεδα ολίσθησης έχουν τον ίδιο συντελεστή ασφαλείας F , μια κοντινή εξίσωση για το συντελεστή ασφαλείας μπορεί να ληφθεί ως:

$$F = \frac{S_1^{max} + S_2^{max} \sin(\beta - \alpha) + S_3^{max} \cos(\beta - \alpha) + P \cos(\alpha)}{W_1' \sin(\alpha) + W_2' \sin(\beta) \cos(\beta - \alpha)} \quad (3)$$

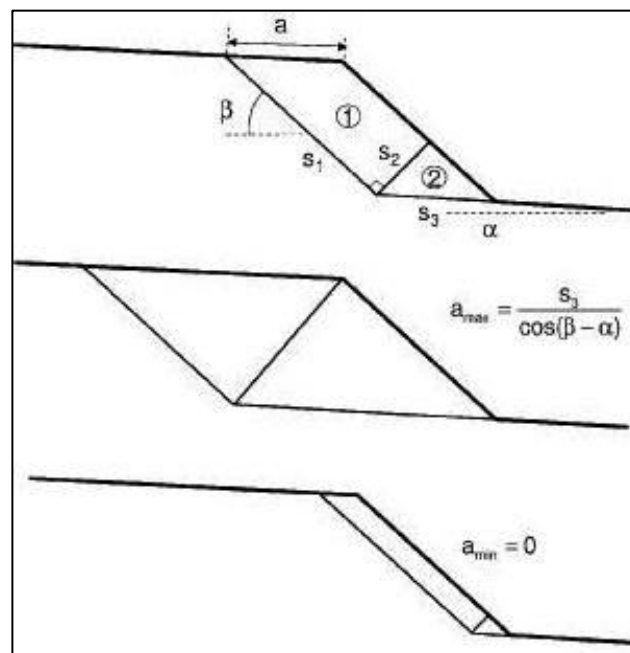
Οι ορθές δυνάμεις στο επίπεδο ολίσθησης (όπως φαίνεται στην εικόνα 3-10) αναιρούνται και, ως εκ τούτου, δεν εμφανίζονται στον υπολογισμό. Ο αριθμητής δίνει

τα στοιχεία των μέγιστων διατμητικών δυνάμεων που μπορούν να κινητοποιηθούν για τα επίπεδα ολίσθησης ενεργώντας παράλληλα με τον πυθμένα της θάλασσας, και ο παρονομαστής δίνει τις συνιστώσες των διατμητικών δυνάμεων που ενεργούν παράλληλα προς τον πυθμένα της θάλασσας, λόγω του βάρους των ίδιων των σφηνοειδών.



Εικόνα 3-10: Η ισορροπία των σφηνών στο μηχανισμό των δύο σφηνοειδών (Nadim, et al., 2003).

Η κινηματική δυνατότητα παραδοχής επιβάλλει όρια για το μηχανισμό των δύο σφηνοειδών όπως φαίνεται στην εικόνα 3-11.



Εικόνα 3-11: Τα όρια για το μηχανισμό των δύο σφηνοειδών.

3.7.3. Βαρυτικές ροές μάζας

3.7.3.1. Επισκόπηση

Οι αστοχίες των πρσανών ξεκινούν τη κίνηση του υλικού προς τα κάτω με τη μορφή εκτροπής, ή βαρυτικών ροών μάζας. Το υλικό που εμπλέκεται σε μια κατολίσθηση προέρχεται από στερεό υλικό και σταδιακά μεταμορφώνεται σε ρευστή κατάσταση, καθώς μαλακώνει κατά τη διάρκεια της μετακίνησης του προς τα κάτω συμπαρασύροντας επιπλέον νερό. Οι βαρυτικές ροές μάζας ακολουθούν μετά από μια αστοχία υποθαλάσσιου πρσανούς κατά κανόνα ως ροές κορημάτων και τυρβωδών ρευμάτων. Η ορολογία των φαινομένων αυτών δεν είναι τυποποιημένη. Ο Niedoroda (Niedoroda, et al., 2003) προτείνει τις ακόλουθες διακρίσεις. Οι ροές κορημάτων είναι μετακινήσεις μαζών κατά τις οποίες τα ιζήματα μεταφέρονται προς τα κάτω. Κατά τη διάρκεια των ροών κορημάτων, το ιζημα ανασυστήνεται, και ο βαθμός στον οποίο συμβαίνει αυτό, συμπεριλαμβανομένου του ποσού του νερού που παρασύρεται, καθορίζει τις ρεολογικές ιδιότητες και τις ιδιότητες ροής. Η μάζα των ιζημάτων ταξιδεύει ως πλαστικό υλικό με χαρακτηριστικά του ποσοστού της διακριτής τάσης και των παραμορφώσεων και η ροή είναι γενικά γραμμική. Τα συστατικά της τύρβης είναι ιζήματα τα οποία προέρχονται από τις ροές κορημάτων. Τα αιωρούμενα ιζήματα παρέχουν την αντίθεση πυκνότητας με το περιβάλλον νερό σε ένα στροβιλώδες ρεύμα με αποτέλεσμα μια βαρυτική ενέργεια που οδηγεί τις ροές. Καθώς τα τυρβώδη ρεύματα ταξιδεύουν προς τα κάτω, μπορεί να συμπαρασύρουν περισσότερα ιζήματα, έτσι ώστε να γίνουν πιο πυκνά και να έχουν μεγαλύτερη επιτάχυνση, με αποτέλεσμα η ροή να γίνεται κατά κύριο λόγο στροβιλώδης. Η πυκνότητα ενός τυρβώδους ρεύματος είναι συνήθως 2 – 4 % μεγαλύτερη από το περιβάλλον νερό και οι ταχύτητες κυμαίνονται από 1 m/s έως άνω των 10 m/s.

Τα διάφορα στάδια της μετακίνησης μαζών προς τα κάτω διέπονται από διαφορετικούς μηχανισμούς ή καθεστώτα ροής και απαιτούν διαφορετικά μοντέλα. Στην αστοχία, το υλικό της ολίσθησης χαρακτηρίζεται από γεωτεχνικές ιδιότητες που ορίζουν τα χαρακτηριστικά των τάσεων - παραμορφώσεων. Κατά τη διάρκεια της εκτροπής, το υλικό της ολίσθησης υφίσταται ανάπλαση και μαλακώνει και μεταμορφώνεται σε μια ροή κορημάτων με ιξωδο-πλαστικές ιδιότητες των υλικών. Με την περαιτέρω πρόοδο, η ροή μετατρέπεται σε βαρύ υγρό που περιγράφεται καλύτερα από τις ιδιότητες του ρευστού. Αυτό παρουσιάζει μια ιδιαίτερη πρόκληση όσον αφορά την προσομοίωση της συστατικής συμπεριφοράς των κατολισθήσεων, δεδομένου ότι το προσομοίωμα πρέπει να συλλάβει το εύρος της συμπεριφοράς από

ένα στερεό υλικό ικανό να αντέχει τις τάσεις διάτμησης χωρίς σημαντική παραμόρφωση σε ένα μίγμα στερεού - νερού που είναι επιρρεπές σε μεγάλες παραμορφώσεις. Συνήθως, αφού έχει ενεργοποιηθεί μια υποθαλάσσια κατολίσθηση, οι γεωτεχνικές ιδιότητες, που περιγράφουν τη συμπεριφορά του πυθμένα, αναιρούνται και αντικαθίστανται από τις ιδιότητες υγρού, όπως είναι η τάση διαρροής και το ιξώδες. Η ανάλυση της βαρυτικής ροής μάζας τείνει να επικεντρωθεί στη συμπεριφορά της ιλύος με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό (πολύ πάνω από το όριο υγρού του υλικού) με τάση διαρροής του περίπου τα 10 Pa. Το προγενέστερο στάδιο μετάβασης, όταν το υλικό της ολίσθησης μαλακώνει από ένα άθικτο στερεό με διατμητική αντοχή των περίπου 10 kPa λαμβάνει λιγότερη προσοχή, αν και αναμφισβήτητα το ισχυρότερο υλικό μπορεί να δημιουργήσει πιο δυναμικά φορτία σε οποιαδήποτε υποθαλάσσια υποδομή από την ασθενέστερη ροή υγρού (αν και ίσως πιο γρήγορα κινούμενη).

3.7.3.2. Μοντέλα ροής

Η συμπεριφορά των βαρυτικών ροών μάζας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του σωματιδίου (όπως ο τύπος, η κατανομή μεγέθους, ο τρόπος αλληλεπίδρασης με το νερό), τη συγκέντρωση του στερεού και το ρυθμό διάτμησης. Διάφορα συστατικά και ρεολογικά μοντέλα που προέρχονται από τις αρχές της εδαφομηχανικής και τις αρχές της ρευστομηχανικής είναι διαθέσιμα τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν για τις ροές μάζας βαρύτητας.

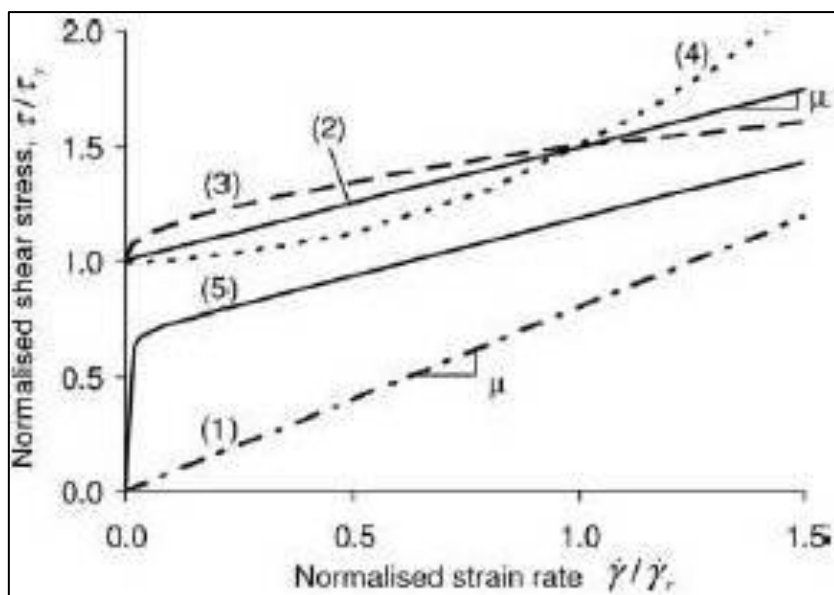
Πλαίσιο εδαφομηχανικής

Η κρίσιμη κατάσταση της εδαφομηχανικής (Schofield & Wroth, 1968) είναι κατάλληλη για την ποσοτική αξιολόγηση όσον αφορά την διατμηματική αντοχή του αναδημιουργημένου πυθμένα σε περιεκτικότητα σε νερό, σε ένα αρκετά υψηλό επίπεδο σχετικά με τις ροές κορημάτων. Το πλαίσιο αυτό είναι επίσης κατάλληλο για την ποιοτική αξιολόγηση για να προσδιορίσει το αν ένα συγκεκριμένο εδαφικό υλικό, σε μια δεδομένη αποτελεσματική τάση και περιεκτικότητα σε νερό, θα προσπαθήσει να διασταλεί όταν διατμηθεί, προκαλώντας έτσι αρνητικές επιπλέον πιέσεις πόρων και την ενδεχόμενη αποσκλήρυνση, ή θα τείνει να συσταλεί όταν διατμηθεί, οδηγώντας σε θετικές επιπλέον πιέσεις πόρων και να επιφέρει σκλήρυνση.

Τα χαρακτηριστικά του πυθμένα, όπως η ευαισθησία και η εξάρτηση της ταχύτητας παραμόρφωσης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την εφαρμογή ενός μοντέλου εδαφομηχανικής σε μια ροή κορημάτων. Τα περισσότερα εδάφη παρουσιάζουν κάποιο βαθμό ευαισθησίας, οδηγώντας σε μειωμένη αντοχή σε διάτμηση μετά από την ανάπλαση. Οι πυθμένες συνήθως εμφανίζουν ευαισθησίες της τάξης των 2 - 6. Η διατμητική αντοχή του πυθμένα εξαρτάται επίσης από το ρυθμό παραμόρφωσης της διάτμησης, που περιγράφεται από την αναλογική μεταβολή της διατμητικής αντοχής έναντι μιας σειράς αλλαγής μεγέθους στο ρυθμό παραμόρφωσης. Παρά το γεγονός ότι η προσέγγιση της εδαφομηχανικής εφαρμόζεται σαφώς στη μοντελοποίηση των ροών κορημάτων, οι προσεγγίσεις της ιστορικής ρευστομηχανικής έχουν πολύ πιο ευρεία εφαρμογή.

Πλαίσιο ρευστομηχανικής

Τα ρευστά που περιέχουν ένα ορισμένο ποσοστό στερεών περιγράφονται ως μη νευτώνεια ρευστά, τα οποία χαρακτηρίζονται από μια τάση διαρροής τ_y , κάτω από το οποίο ο ρυθμός παραμόρφωσης της διάτμησης είναι πολύ μικρός, και μία μη γραμμική σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και του ρυθμού παραμόρφωσης της διάτμησης. Οι ροές κορημάτων συνήθως αναλύονται ως μη Νευτώνεια ρευστά και συχνά ως ρευστό «Bingham». Το μοντέλο Bingham είναι παρόμοιο με ένα μοντέλο γεωτεχνικής αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, με μηδενικές επιδράσεις από το ρυθμό παραμόρφωσης έως ότου υπερβεί την τάση διαρροής του υλικού, αλλά μετά η δύναμη αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του ρυθμού παραμόρφωσης. Οι μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ του ρυθμού παραμόρφωσης και της διατμητικής τάσης έχουν εξεταστεί για την προσομοίωση των ροών κορημάτων, για να επιτραπούν οι αλλαγές στο ιξώδες με το ρυθμό διάτμησης (Elverhøi, et al., 2005α), (Huang & Garcia, 1999β). Τέτοια μοντέλα αναφέρονται ποικιλοτρόπως ως μοντέλο Casson (Locat & Demers, 1988), ή πιο συχνά ως μοντέλο Herschel-Bulkley. Μια σύγκριση των διαφόρων μοντέλων φαίνεται στην εικόνα 3-12.



Εικόνα 3-12: Συσχετισμός μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης για διαφορετικούς ρεολογικούς σχηματισμούς: (1) Νευτώνεια (ιξώδη), (2) Bingham (γραμμικά ιξοδοπλαστικά), (3) Herschel-Bulkley (μη γραμμικά ιξοδοπλαστικά λεπτόρευστα), (4) Παχύρευστα ιξοδοπλαστικά, (5) Διγραμμικά ιξοδοπλαστικά.

Οποιοδήποτε από τα διάφορα προσομοιώματα ροής που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη ροή κορημάτων θα πρέπει να συνδυαστούν με προσομοιώματα της αποσκλήρυνσης της παραμόρφωσης και ανάπλασης για να καλύψουν τη συμπεριφορά του πυθμένα από σχεδόν στατική διάτμηση, υπέρβαση της διατμητικής αντοχής και ανάπτυξη της υπολειπομένης αντοχής σε ολική ανάπλαση. Τα τυρβώδη ρεύματα συνήθως προσομοιώνονται ως ροή βαρέως υγρού (π.χ. ως Νευτώνειο ρευστό) χρησιμοποιώντας τεχνικές υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Τα χαρακτηριστικά της ροής κορημάτων μαζί με τα ιζήματα σε μέγεθος κόκκου και το βάθος των διαβρώσιμων ιζημάτων χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των διαδρομών ροής και την ταχύτητα των τυρβωδών ρευμάτων.

3.7.3.3. Υπολογιστικές μέθοδοι για τη μοντελοποίηση της ροής κορημάτων

Οι υπολογιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη Γεωτεχνική Μηχανική έχουν προκύψει από τα πεδία της ανάλυσης των στερεών και της δομικής ανάλυσης. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει ευρέως αναπτυχθεί και τελειοποιηθεί. Η περιγραφή κατά Lagrange, δηλαδή κατά την οποία το πλέγμα θεωρείται ότι συμπίπτει με τη φυσική περιοχή, έτσι ώστε να ακολουθεί την κίνηση του υλικού, έχει σχεδόν καθολικά υιοθετηθεί λόγω κυρίως της ευκολίας του στην περιγραφή των οριακών συνθηκών. Δεδομένου ότι οι περισσότερες γεωτεχνικές εφαρμογές

περιλαμβάνουν συνθήκες μέχρι το σημείο της κατάρρευσης, ή της σταθερής πλαστικής παραμόρφωσης, οι αριθμητικοί κώδικες έχουν την τάση να επικεντρώνονται σε σχεδόν στατικές αναλύσεις, αν και οι δυναμικές μορφές είναι επίσης ευρέως διαθέσιμες.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτέλεση αναλύσεων ευστάθειας πρηνών, για να καθορίσει πότε ένα πρηνές θα αστοχήσει καθώς και το σχήμα της επιφάνειας αστοχίας, αλλά όχι στο να περιγράψει το πώς η κίνηση του υλικού θα αναπτυχθεί κατά την αστοχία. Σε γενικές γραμμές, η εξέλιξη της διαδικασίας αστοχίας που αφορούν τις μεγάλες παραμορφώσεις δεν προσομοιώνεται. Αυτό οφείλεται στην ευρεία υιοθέτηση της μεθόδου του Langrange, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τα στοιχεία του πλέγματος να παραμορφωθούν υπερβολικά, αλλά και επειδή η διαδικασία γίνεται μη σταθερή, η σύγκλιση σε μια ψευδοστατική λύση δεν μπορεί να επιτευχθεί. Για την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών, έχουν προταθεί διάφορες αριθμητικές προσεγγίσεις. Στις ενότητες που ακολουθούν, περιγράφονται οι τρεις προσεγγίσεις: (i) μια μικρή ανάλυση παραμόρφωσης σε συνδυασμό με διακριτοποίηση, (ii) μια αυθαίρετη διαμόρφωση των πεπερασμένων στοιχείων κατά Langrange - Euler, (iii) μια διαμόρφωση πεπερασμένων στοιχείων κατά Langrange στο σημείο ολοκλήρωσης.

3.7.3.4. Σημειώσεις σχετικά με την ανάλυση για τις ροές μάζας βαρύτητας

Η κύρια δυσκολία στην εφαρμογή οποιουδήποτε προσομοιώματος για την ανάλυση των υποθαλάσσιων ροών είναι ο προσδιορισμός των κατάλληλων παραμέτρων εισόδου για να περιγράψει τη συμπεριφορά ροής του ιξώδους ή του υγρού. Δεδομένου ότι η άμεση μέτρηση των ταχυτήτων της ροής κορημάτων και των τυρβωδών ρευμάτων, καθώς και των άλλων χαρακτηριστικών της ροής δεν είναι πρακτική, είναι κοινή πρακτική να υποστηρίζουμε την ανάλυση των προηγούμενων ροών από τις παρατηρούμενες (τώρα στατικές) εκτροπές. Ο στόχος αυτών των αξιολογήσεων είναι η κατηγοριοποίηση των ποικιλιών των ροών μάζας βαρύτητας που έχουν συμβεί στο παρελθόν, η κατανόηση των αιτίων αυτών των γεγονότων, ο χαρακτηρισμός της κινηματικής (π.χ. ταχύτητες και διαστάσεις) αυτών των ροών και στη συνέχεια η χρήση αυτών των πληροφοριών για να προβλέψουμε τη μελλοντική δραστηριότητα (Niedoroda, et al., 2003).

3.8. Υπεράκτιοι γεωκίνδυνοι στη Μεσόγειο Θάλασσα

Η Μεσόγειος Θάλασσα χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλομορφία των τεκτονικών συνθηκών που οδηγούν σε πολύπλοκες γεωλογικές και γεωφυσικές διεργασίες. Οι ακτογραμμές κατά μήκος της Μεσογείου εκτίθενται σε υψηλό κίνδυνο εκδήλωσης υπεράκτιων γεωκινδύνων. Μέσα από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί έχουν εντοπιστεί γεωκίνδυνοι όπως είναι οι σεισμοί, οι εκρήξεις ηφαιστειών, οι μετακινήσεις μαζών και οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, η διαφυγή φυσικού αερίου ή άλλου ρευστού από το θαλάσσιο πυθμένα, η ραγδαία άνοδος της στάθμης της θάλασσας, τα ηφαίστεια λάσπης κ.α. Έχουν δε γίνει εκτεταμένες μελέτες στις περιοχές εμφάνισης γεωκινδύνων ώστε να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός ενεργοποίησης και δράσης τους.

Ιστορικά στοιχεία αναφέρουν πολλά ισχυρά τσουνάμι που έχουν κοστίσει τις ζωές χιλιάδων ανθρώπων κατά τη διάρκεια των αιώνων και έχουν επηρεάσει καταστροφικά τις παράκτιες πόλεις και την οικονομία τους. Η εκδήλωση τσουνάμι οφείλεται σε σεισμούς, εκρήξεις ηφαιστειών, υποθαλάσσιες κατολισθήσεις κ.α. Οι επιπτώσεις των τσουνάμι είναι γνωστές από την Ιταλία μέχρι τον Κορινθιακό κόλπο, την Κρήτη, την Κύπρο, τις ακτές της Κιλικίας και το Δέλτα του Νείλου. Ιζημάτα από παλαιά τσουνάμι έχουν εντοπιστεί κατά μήκος των ακτών της Ιταλίας και της Ελλάδας, τη δυτική Ανατολία και το Μαρμαρά υποδεικνύοντας ότι οι περιοχές αυτές έχουν επανειλημμένα ταλαιπωρηθεί από τσουνάμι, όπου πολλοί άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους ή τραυματίστηκαν ενώ εκατοντάδες σπίτια καταστράφηκαν. Έχουν αναφερθεί περίπου εκατό εκδηλώσεις τσουνάμι, ξεκινώντας από τη μινωική περίοδο λόγω της έκρηξης του ηφαιστείου της Σαντορίνης στο Αιγαίο, και φτάνοντας στο σεισμό του 1999 στη Θάλασσα του Μαρμαρά. Στις μέρες μας η εκδήλωση γεωκινδύνων και η πρόκληση τσουνάμι στη Μεσόγειο Θάλασσα θα είχε σοβαρές επιπτώσεις και στις υπεράκτιες υποδομές όπως λιμάνια, γέφυρες, υποθαλάσσιες σήραγγες, υποθαλάσσιους αγωγούς, υποθαλάσσια καλώδια ρεύματος και τηλεπικοινωνιών, υπεράκτιες πλατφόρμες κ.α.

Οι κλιματικές αλλαγές και οι συναφείς διακυμάνσεις της στάθμης της θάλασσας που παρατηρούνται στην περιοχή της Μεσογείου, μπορούν να επηρεάσουν την αντοχή και τη θερμοκρασία των ιζημάτων του πυθμένα που προάγουν την αστοχία των υποθαλάσσιων πρνανών και τις μετακινήσεις ιζημάτων του πυθμένα. Η αλλαγή της αντοχής και της θερμοκρασίας του θαλάσσιου πυθμένα είναι ανησυχητική για την ευστάθεια των υποθαλάσσιων πρνανών, ιδιαίτερα όταν τα

ιζηήματα του πυθμένα φέρουν αέρια και υδρίτες αλάτων. Επίσης, έχουν σημειωθεί υποθαλάσσιες κατολισθήσεις οι οποίες προκλήθηκαν από εκρήξεις ηφαιστειών (Στρόμπολι 2002) και σεισμούς (Σκύλλα 1783 και Αμοργός 1956).

Η μορφολογία του πυθμένα της Μεσογείου μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την εκδήλωση γεωκινδύνων. Στην περιοχή ανατολικά της Σικελίας έχουν εντοπιστεί υποθαλάσσια φαράγγια. Τα υποθαλάσσια φαράγγια λειτουργούν σαν ένα μονοπάτι που συνδέει τα παράκτια ύδατα με τις βαθιές λεκάνες, μέσω της αλληλεπίδρασης με τις ακτογραμμές. Αυτές οι διεργασίες σχετίζονται με την ανακατανομή των ιζημάτων και της οργανικής ύλης. Επιπροσθέτως μπορούν να εγείρουν γεωκινδύνους για τους παράκτιους πληθυσμούς και τις υπεράκτιες υποδομές.

Η Μεσόγειος Θάλασσα χαρακτηρίζεται από μια ευρεία κατανομή υδριτών που βρίσκονται κάτω από τις βαθιές λεκάνες. Τέτοια στρώματα άλατος λειτουργούν σαν κάλυμμα φυσικού αερίου και άλλων ρευστών του πυθμένα. Πρόσφατα, στη Μεσόγειο έχει ανανεωθεί το ενδιαφέρον για εύρεση υδρογονανθράκων ύστερα από τις ανακαλύψεις στην Ανατολική Μεσόγειο. Βάσει, λοιπόν, του γεωλογικού και γεωτεχνικού χαρακτηρισμού των επιφανειακών ιζημάτων, της βαθυμετρικής χαρτογράφησης και της σεισμολογικής ανάλυσης, οι ερευνητές έχουν εκτιμήσει το δυναμικό των γεωκινδύνων που σχετίζονται με τη διαφυγή φυσικού αερίου και άλλων ρευστών στον Κόλπο του Λέοντα και τη Θάλασσα των Βαλεαρίδων στη Δυτική Μεσόγειο και στη Θάλασσα της Κιλικίας στην Ανατολική Μεσόγειο.

Λόγω της ζώνης καταβύθισης μεταξύ της Τυρρηνικής Θάλασσας και του Ιονίου πελάγους, η περιοχή είναι αρκετά ηφαιστειογενής. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα συμβαίνει σε μια στενή περιοχή της βυθιζόμενης πλάκας (π.χ. Αίτνα). Η Τυρρηνική Θάλασσα έχει υψηλά ποσοστά ροής θερμότητας και μεγάλα υποθαλάσσια ηφαίστεια (π.χ. Μαρσίλι). Για το λόγο αυτό περιοχή έχει πληγεί από τους ισχυρότερους ιστορικά σεισμούς και τσουνάμι.

Τέλος, ηφαίστεια ιλύος έχουν εντοπιστεί στο Λιβυκό πέλαγος, την Αλεξάνδρεια, τη Σικελία και τη Θάλασσα του Αλμπωράν. Τα ηφαίστεια λάσπης έχουν προβληματίσει τους γεωλόγους για δύο αιώνες. Το φυσικό αέριο (μεθάνιο, CH₄) το νερό και η λάσπη μπορούν να μετακινηθούν πολλά χιλιόμετρα κάτι που κάνει αρκετά δύσκολη τη μελέτη του συγκεκριμένου φαινομένου.

3.9. Γεωκίνδυνοι και δίκτυα υποθαλάσσιων καλωδίων

3.9.1. Γεωλογικά ρήγματα

Τα γεωλογικά ρήγματα είναι περιοχές, όπου μπορούν να λάβουν χώρα σημαντικές κινήσεις του πυθμένα (Willis, et al., 2008). Ένα μακρύ δίκτυο υποθαλάσσιου καλωδίου μπορεί να διέρχεται από περιοχές διαφορετικού συντελεστή σεισμικής επικινδυνότητας και διαφορετικών υδροδυναμικών κλιμάτων. Οι κυκλικές φορτίσεις τόσο λόγω των σεισμών όσο και των υδάτινων κυματισμών, ενδέχεται να οδηγήσουν σε άμεση ρευστοποίηση του αμμώδους πυθμένα. Ωστόσο, οι πιέσεις λόγω των κυματισμών μπορούν να οδηγήσουν και σε πύκνωση του υλικού πλήρωσης της τάφρου (Clukey, et al., 1980).

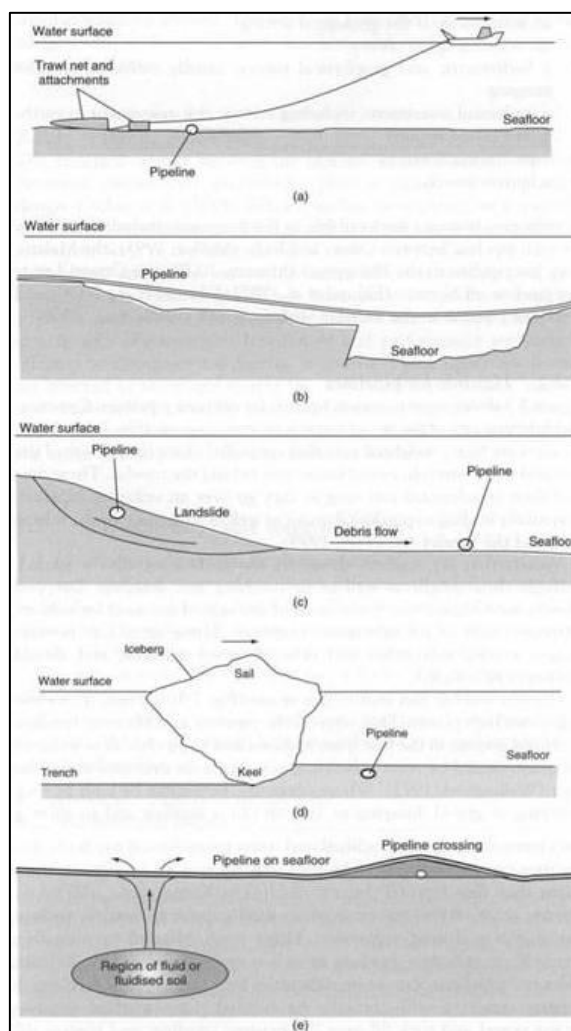
3.9.2. Μορφολογία πυθμένα

Οι σκληροί, βραχώδεις πυθμένες μπορούν να φθείρουν ένα καλώδιο και να μη παρέχουν τρόπους για την επιτόπου επισκευή του. Εντούτοις, οι πολύ μαλακοί πυθμένες διευκολύνουν τη βύθιση ενός καλωδίου, η οποία μπορεί να δημιουργήσει δυσκολίες κατά τη συντήρησή του. Τέλος, η ύπαρξη βράχων ή εξάρσεων βράχων στον πυθμένα μπορεί να καθυστερήσει την κατασκευή δικτύων υποθαλάσσιων καλωδίων, τα οποία πρόκειται να ταφούν.

3.9.3. Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις

Ορισμένες περιοχές του πυθμένα είναι λοφώδεις, ακόμα και ορεινές, αναδεικνύοντας τον κίνδυνο υποθαλάσσιων κατολισθήσεων (Εικόνα 3-13). Κατολίσθηση όγκου ιλύος μπορεί να προκληθεί από τυφώνες, σεισμούς, ή και απλή συσσώρευση ιζημάτων κατά την πάροδο του χρόνου (Mirza, et al., 2006α), (Gilbert, et al., 2007β). Οι επίπεδοι πυθμένες (seafloor valleys) μπορούν να μεταδώσουν ροές κορημάτων (debris flows) ή ρεύματα από κατολισθήσεις που συμβαίνουν σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, δημιουργώντας σημαντικά προβλήματα σε καλώδια

που διέρχονται από αυτούς (Parker, et al., 2008α), (Zakeri & Nadim, 2008β). Τα «πεδία αυλακίων» (furrow fields) είναι επίσης, πολύ γνωστές τοπογραφικές ανωμαλίες μεγάλης κλίμακας στον ωκεάνιο πυθμένα που, μεταξύ άλλων επιπτώσεων, ενδέχεται να διαδώσουν και υποθαλάσσια ρεύματα με τρόπο που μπορεί να μεγεθύνει την έντασή τους γύρω από το καλώδιο (Clukey, et al., 2007).



Εικόνα 3-13: Μερικοί γεωκίνδυνοι για καλώδια και αγωγούς (χωρίς κλίμακα). (α) Κίνδυνοι από αλιευτικά σκάφη και αγκυρώσεις σκαφών. (β) Ελεύθερο άνοιγμα που δημιουργείται από έναν ανομοιόμορφο πυθμένα, αμμόλοφους, εξάρσεις βράχων, ή κίνηση σε ένα γεωλογικό ρήγμα. (γ) Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις και ροές κορημάτων. (δ) Εκσκαφή της βάσης ενός παγόβουνου. (ε) Απελευθέρωση ρευστού και άλλοι αγωγοί ή αποθέσεις του πυθμένα.

3.9.4. Τοπογραφικές ιδιαιτερότητες του πυθμένα

Κάποιες περιοχές του πυθμένα περιέχουν θύλακες αέρα (rock marks) ή/και ηφαίστεια ιλύος (mud volcanoes) τα οποία ενδέχεται να προκαλέσουν έντονη κίνηση του πυθμένα επηρεάζοντας κατά τόπους το καλώδιο, με αποτέλεσμα τη φόρτισή του.

4. Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα

4.1. Γενικά

Το Γεωγραφικό Πληροφοριακό Σύστημα (Γ.Π.Σ.), γνωστό ευρέως και ως G.I.S (Geographic Information Systems), είναι σύστημα διαχείρισης χωρικών δεδομένων (spatial data) και συσχετισμένων ιδιοτήτων. Στην πιο αυστηρή μορφή του είναι ένα ψηφιακό σύστημα, ικανό να ενσωματώσει, αποθηκεύσει, προσαρμόσει, αναλύσει και παρουσιάσει γεωγραφικά συσχετισμένες (geographically-referenced) πληροφορίες. Σε πιο γενική μορφή, ένα Γ.Π.Σ. είναι ένα εργαλείο "έξυπνου χάρτη", το οποίο επιτρέπει στους χρήστες του να αποτυπώσουν μια περίληψη του πραγματικού κόσμου, να δημιουργήσουν διαδραστικά ερωτήσεις χωρικού ή περιγραφικού χαρακτήρα (αναζητήσεις δημιουργούμενες από τον χρήστη), να αναλύσουν τα χωρικά δεδομένα, να τα προσαρμόσουν και να τα αποδώσουν σε αναλογικά μέσα (εκτυπώσεις χαρτών και διαγραμμάτων) ή σε ψηφιακά μέσα (αρχεία χωρικών δεδομένων, διαδραστικοί χάρτες στο Διαδίκτυο).

Το Γ.Π.Σ. είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα χρήσιμο για τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται από πολλούς θεσμικούς φορείς τα τελευταία χρόνια. Τα συστήματα G.I.S αποτυπώνουν χωρικά δεδομένα σε γεωγραφικό ή χαρτογραφικό ή καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Βασικό χαρακτηριστικό των Γ.Π.Σ. είναι ότι τα χωρικά δεδομένα συνδέονται και με περιγραφικά δεδομένα, π.χ. μια ομάδα σημείων που αναπαριστούν θέσεις πόλεων συνδέεται με ένα πίνακα, όπου κάθε εγγραφή εκτός από τη θέση περιέχει πληροφορίες όπως ονομασία, πληθυσμός κ.λπ.

Τα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα (Γ.Π.Σ.) είναι πληροφοριακά συστήματα (Information Systems) που παρέχουν την δυνατότητα συλλογής, διαχείρισης, αποθήκευσης, επεξεργασίας, ανάλυσης και οπτικοποίησης, σε ψηφιακό περιβάλλον, των δεδομένων που σχετίζονται με τον χώρο. Η οπτικοποίηση της πληροφορίας που διαθέτει ένα Γ.Π.Σ., επιτυγχάνεται με την παραγωγή από αυτό διαγραμμάτων, χαρτών, πινάκων και αναφορών.

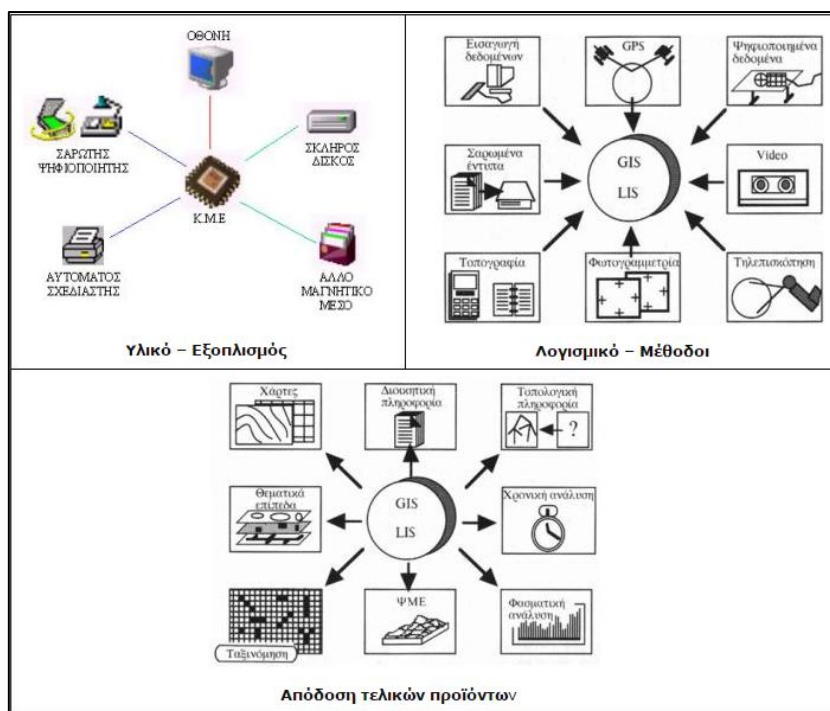
Η χαρακτηριστική δυνατότητα, που παρέχουν τα G.I.S, είναι αυτή της σύνδεσης της χωρικής με την περιγραφική πληροφορία (η οποία δεν έχει από μόνη

της χωρική υπόσταση). Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την λειτουργία αυτή βασίζεται:

- Είτε στο σχεσιακό (relational) μοντέλο δεδομένων, όπου τα περιγραφικά δεδομένα πινακοποιούνται χωριστά και αργότερα συσχετίζονται με τα χωρικά δεδομένα μέσω κάποιων μοναδικών τιμών που είναι κοινές και στα δύο είδη δεδομένων.
- Είτε στο αντικειμενοστραφές (object-oriented) μοντέλο δεδομένων, όπου τόσο τα χωρικά όσο και τα περιγραφικά δεδομένα συγχωνεύονται σε αντικείμενα, τα οποία μπορεί να μοντελοποιούν κάποια αντικείμενα με φυσική υπόσταση (π.χ. κατηγορία = "δρόμος", όνομα = "Πανεπιστημίου", γεωμετρία = "[X1,Y1],[X2,Y2]...", πλάτος = "20μέτρα").

Το αντικειμενοστραφές μοντέλο τείνει να χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε εφαρμογές G.I.S εξαιτίας των αυξημένων δυνατοτήτων του σε σχέση με το σχεσιακό μοντέλο, λόγω της δυνατότητας που παρέχει για την εύκολη και απλοποιημένη μοντελοποίηση σύνθετων φυσικών φαινομένων και αντικειμένων με χωρική διάσταση.

Πολλές φορές η ολοκληρωμένη έννοια των G.I.S (integrated G.I.S concept) επεκτείνεται για να συμπεριλάβει τόσο τα δεδομένα (που αποτελούν ουσιαστικά τον πυρήνα τους), το λογισμικό και τον μηχανικό εξοπλισμό, όσο και τις διαδικασίες και το ανθρώπινο δυναμικό, που αποτελούν αναπόσπαστα τμήματα ενός οργανισμού, ο οποίος έχει σαν πρωταρχική του δραστηριότητα την διαχείριση πληροφορίας με την βοήθεια G.I.S. Στην παρούσα εργασία δίνεται έμφαση στα δεδομένα και την επεξεργασία τους μέσω λογισμικού (Εικόνα 4-1).



Εικόνα 4-1: Σχηματικές αναπαράστασεις τριών βασικών τμημάτων ενός Γ.Π.Σ. : Του υλικού και του εξοπλισμού για συλλογή και προβολή της πληροφορίας, του λογισμικού και των μεθόδων για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων και της απόδοσης των τελικών προϊόντων (Σωμαράς, 2013).

4.2. Ροή Εργασιών σε ένα Γεωγραφικό Πληροφοριακό Σύστημα

Ένα Γ.Π.Σ., ως πληροφοριακό σύστημα, συντελείται από μία αλληλουχία διαδικασιών, κατά τις οποίες λαμβάνουν μέρος οι απαραίτητες εργασίες για την εξαγωγή του επιθυμητού αποτελέσματος. Αναλυτικότερα, αυτές οι επιμέρους διαδικασίες, με την σειρά, είναι:

- **Εισαγωγή :** Αποτελεί την διαδικασία που είναι υπεύθυνη για την τροφοδότηση του συστήματος με δεδομένα. Αυτά, όπως και αναλύεται παρακάτω, έχουν συνήθως ψηφιακή δομή και αποκτούν γεωγραφική και περιγραφική διάσταση.
- **Επεξεργασία :** Είναι το σύνολο των διαδικασιών που καθιστά τα δεδομένα κατάλληλα για περαιτέρω ανάλυση και χρήση. Αυτό, συνήθως, αφορά την ορθή απόδοση του συστήματος συντεταγμένων, την δημιουργία σχέσεων μεταξύ των δεδομένων, την διόρθωση σφαλμάτων και την μετάβαση από ένα μοντέλο αναπαράστασης σε ένα άλλο.

- **Ανάλυση** : Κατά την οποία ο χρήστης – αναλυτής θέτει ερωτήσεις (queries) χωρικού ή/και περιγραφικού τύπου προς απάντηση, σύμφωνα με την δυνατότητα που προσφέρεται από τα ίδια τα δεδομένα.
- **Απόδοση** : Κατά την οποία τα αποτελέσματα αποδίδονται με αναλογικά μέσα, μέσω της οργάνωσης της εκτύπωσης χαρτογραφικών προϊόντων ή της απόδοσης σε ψηφιακές πλατφόρμες είτε της χρήσης του Διαδικτύου, μέσω διαδραστικών χαρτών (Web-based G.I.S), είτε μέσω εσωτερικών δικτύων οργανισμών και εφαρμογών που υποστηρίζουν πολλαπλούς χρήστες με διακριτούς ρόλους (π.χ. Enterprise G.I.S).
- **Έλεγχος** : Κάθε σύστημα οφείλει να έχει, τελικώς, μηχανισμούς ανάδρασης (feedback) ώστε να εξασφαλίζεται η ορθότητα και ακρίβεια των πληροφοριών. Αυτό μπορεί να γίνεται μέσω λογισμικού με διαδικασίες κανόνων επικύρωσης, με διαδικασίες ελέγχου ακρίβειας συντεταγμένων και, γενικότερα, με διαδικασίες ποιοτικών και ποσοτικών ελέγχων ανάλογα με τη φύση των δεδομένων.

4.3. Αναπαράσταση των δεδομένων

Τα Γ.Π.Σ., όπως προαναφέρθηκε, αποτυπώνουν χωρικά δεδομένα σε γεωγραφικό ή χαρτογραφικό ή καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Βασικό τους χαρακτηριστικό, όμως, είναι ότι αυτά τα δεδομένα χωρικού τύπου συνδέονται με εκείνα περιγραφικού τύπου. Τα δεδομένα που διαχειρίζεται ένα Γ.Π.Σ. είναι οι οντότητες (χωρική πληροφορία) και οι πίνακες γνωρισμάτων τους (ποιοτικές και ποσοτικές ιδιότητες των χωρικών οντοτήτων).

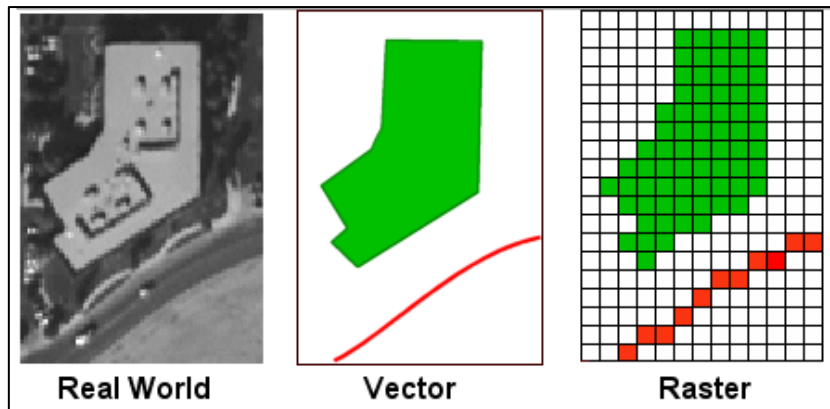
Οι οντότητες διαχωρίζονται σε χαρτογραφικά υπόβαθρα ανάλογα με το είδος τους. Βασική αρχή σε ένα Γ.Π.Σ. είναι το γεγονός ότι δεν μπορούν να συνυπάρχουν δύο και περισσότερα είδη οντοτήτων στο ίδιο χαρτογραφικό υπόβαθρο (Σωμαράς, 2013).

Κατά την συντριπτική πλειοψηφία, τα πρωτογενή δεδομένα ενός σημερινού Γ.Π.Σ. αναπαριστώνται ψηφιακά, μέσω της συλλογής τους με την χρήση ψηφιακών μεθόδων αποτύπωσης χώρου (Συστήματα Εντοπισμού Παγκόσμιας Θέσης / G.P.S., Τηλεπισκόπηση / Remote Sensing) ή της ψηφιοποίησης αναλογικών δεδομένων

(τυπωμένοι χάρτες κ.τ.λ.). Οι υπολογιστές αναπαριστούν τα δεδομένα με τη μορφή των δυαδικών ψηφίων 0 και 1, οπότε και κάθε δοθέν στοιχείο που αφορά την επιφάνεια της Γης ανάγεται τελικά από το Γ.Π.Σ. σε κάποιο συνδυασμό των 0 και 1. Συνεπώς, αν και η χρήση της λέξης «ψηφιακά» θεωρείται εσφαλμένη από πλευράς ονομασίας (ο όρος «ψηφιακός» προέρχεται από την λατινική λέξη «digitus» που σημαίνει δάκτυλο χεριού, υποδεικνύοντας ότι το σύστημα μέτρησης που χρησιμοποιείται έχει εύρος από το 0 έως το 9) ακολουθείται η σύμβαση χρήσης της για δυαδικές αναπαραστάσεις της ηλεκτρονικής τεχνολογίας.

Ειδικότερα, τα δεδομένα αναπαριστούν πραγματικές οντότητες (π.χ. δρόμοι, χρήσεις γης, τοπογραφικό ανάγλυφο, δέντρα, ποτάμια κ.τ.λ.), με τα ψηφιακά δεδομένα να προσδιορίζουν το τελικό μείγμα. Τα πραγματικά αντικείμενα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, οι οποίες αποτελούν τους δύο θεμελιώδεις τρόπους γεωγραφικής αναπαράστασης : τα διακριτά αντικείμενα (discrete objects) και τα συνεχή πεδία (continuous fields). Η θεώρηση των διακριτών αντικειμένων (π.χ. ενός κτηρίου) αναπαριστά το γεωγραφικό κόσμο με τη μορφή αντικειμένων με καθορισμένα όρια μέσα σε έναν κατά τα άλλα κενό χώρο. Αντίθετα, η θεώρηση του συνεχούς πεδίου (π.χ. ύψους βροχόπτωσης, τοπογραφικού ανάγλυφου κ.τ.λ.) αναπαριστά τον πραγματικό κόσμο με έναν πεπερασμένο αριθμό μεταβλητών, για κάθε μία από τις οποίες προσδιορίζεται η τιμή της σε κάθε πιθανή θέση (Longley, 2010).

Τα συνεχή πεδία και τα διακριτά αντικείμενα, ωστόσο, αποτελούν δύο εννοιολογικές θεωρήσεις γεωγραφικών φαινομένων που δεν λύνουν το ζήτημα της προαναφερθείσας ψηφιακής αναπαράστασης. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι και στις δύο θεωρήσεις εμπεριέχεται άπειρη ποσότητα πληροφοριών στην περίπτωση του ορισμού μεταβλητών ανά κάθε σημείο, η οποία δεν μπορεί να αναπαρασταθεί λόγω τεχνικών περιορισμών των υπολογιστών. Οι δύο μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό των γεωγραφικών φαινομένων σε μορφές που μπορούν να κωδικοποιηθούν στις βάσεις δεδομένων των υπολογιστών είναι η ψηφιδωτή (raster) και η διανυσματική (vector) αναπαράσταση (Εικόνα 4-2). Θεωρητικά, και οι δύο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κωδικοποίηση τόσο των συνεχών όσο και των διακριτών οντοτήτων, πρακτικά, ωστόσο, η ψηφιδωτή αναπαράσταση συσχετίζεται με τα συνεχή πεδία και η διανυσματική με τα διακριτά αντικείμενα.



Εικόνα 4-2: Εμφανής η διαφορά της αναπαράστασης των πραγματικών αντικειμένων κατά την διανυσματική (vector) και ψηφιδωτή (raster) αναπαράσταση αντίστοιχα (**Geographic data models, 2014**).

4.3.1. Μοντέλο Διανυσματικών Δεδομένων

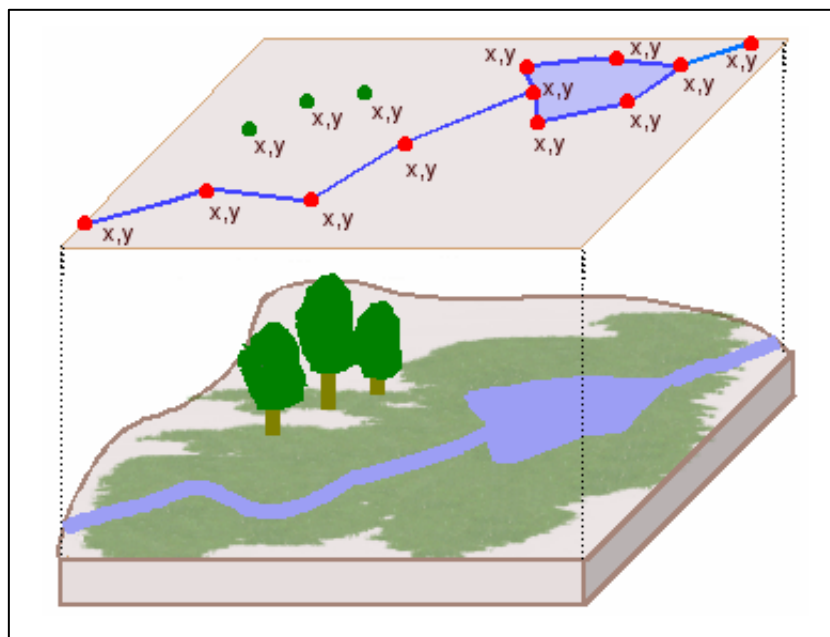
Το μοντέλο διανυσματικής αναπαράστασης δεδομένων (vector data model) βασίζεται στην υπόθεση ότι η επιφάνεια της γης αποτελείται από διακριτά αντικείμενα όπως δέντρα, ποτάμια, λίμνες κ.λπ. Τα αντικείμενα αυτά μπορούν να αντιπροσωπευτούν ως σημειακές, γραμμικές και πολυγωνικές οντότητες με καλά καθορισμένα όρια. Τα όρια αυτών των οντοτήτων καθορίζονται από ζεύγη συντεταγμένων (x,y) , τα οποία και τα αναφέρουν σε μία θέση στον πραγματικό κόσμο (Εικόνα 4-3). Ειδικότερα:

- Οι σημειακές οντότητες ορίζονται από ένα ζεύγος συντεταγμένων (x,y) .
- Οι γραμμικές οντότητες ορίζονται ως δύο ή περισσότερα ζεύγη συντεταγμένων (x,y) .
- Οι πολυγωνικές οντότητες ορίζονται από τις γραμμές που κλείνουν έτσι ώστε να σχηματίσουν το πολύγωνο.

Έτσι για την απόδοση της θέσης μια πόλης σε ένα χάρτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σημείο, για την αποτύπωση του οδικού δικτύου μια γραμμή αποτελούμενη από πολλές κορυφές και για την αποτύπωση μιας ιδιοκτησίας ένα πολύγωνο. Στην ουσία τα πάντα αναπαρίστανται από γραμμές. Το σημείο είναι μια γραμμή μηδενικού μήκους, ενώ το πολύγωνο είναι μια ακολουθία γραμμών με αρχή και τέλος την ίδια κορυφή. Η γεωμετρία που θα υιοθετηθεί για το συμβολισμό ενός αντικειμένου εξαρτάται από την κλίμακα απεικόνισης και το σκοπό της εφαρμογής που αναπτύσσεται. Έτσι π.χ. σε μια πολύ μεγάλη κλίμακα (1:1000) τα κτίσματα

αποτυπώνονται ως πολύγωνα, ενώ σε μικρότερες κλίμακες (1:10.000) είναι ορθότερο να χρησιμοποιηθεί η γεωμετρία του σημείου.

Τέλος, σε κάθε μοντέλο διανυσματικών αναπαραστάσεων, αντιστοιχείται στην κάθε οντότητα μία μοναδική αριθμητική αναγνωριστική τιμή, η οποία αποθηκεύεται ως εγγραφή σε έναν πίνακα γνωρισμάτων (attribute table).



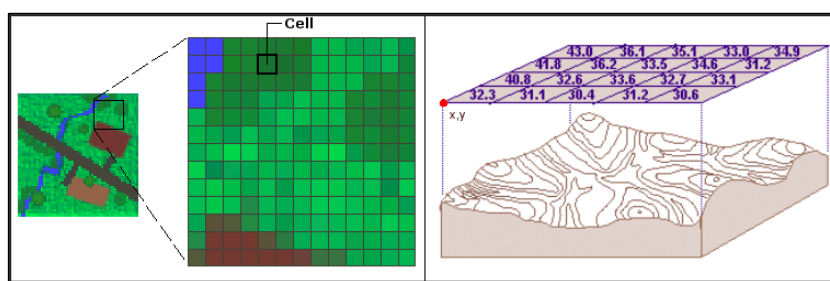
Εικόνα 4-3: Το μοντέλο διανυσματικών δεδομένων αναπαριστά οντότητες του πραγματικού κόσμου ως σημεία, γραμμές και πολύγωνα, τα όρια των οποίων καθορίζονται από ζεύγη συντεταγμένων (x,y) (Geographic data models, 2014).

4.3.2. Μοντέλο Ψηφιδωτών Δεδομένων

Η ψηφιδωτή δομή δεδομένων χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που το χωρικό φαινόμενο που αποτυπώνεται χαρακτηρίζεται ως συνεχής μεταβλητή (π.χ. το υψόμετρο του εδάφους, η κατανομή του θορύβου) ή σε περιπτώσεις που στο Γ.Π.Σ. θέλουμε να ενσωματώσουμε μια δορυφορική εικόνα ή μια σαρωμένη αεροφωτογραφία. Οι ψηφιδωτές δομές δεδομένων έχουν περιορισμένες δυνατότητες σύνδεσης με περιγραφικά χαρακτηριστικά.

Στο μοντέλο ψηφιδωτής αναπαράστασης δεδομένων η γη αναπαριστάται ως ένα πλέγμα κελιών ίσου μεγέθους, στα οποία εκχωρούνται χαρακτηριστικά ή

ιδιότητες. Ένα μεμονωμένο κελί αντιπροσωπεύει ένα τμήμα γης συγκεκριμένων διαστάσεων και αποτελεί την βασική μονάδα ανάλυσης του μοντέλου (Εικόνα 4-4). Σε αντίθεση με το μοντέλο διανυσματικών δεδομένων, όπου ζεύγη συντεταγμένων (x,y) χρησιμοποιούνται για τον ορισμό του σχήματος και της τοποθεσίας των οντοτήτων, στο μοντέλο ψηφιδωτών δεδομένων μόνο ένα ζεύγος (x,y) είναι ουσιαστικά παρόν, το οποίο ονομάζεται ζεύγος προέλευσης και ορίζει τη θέση του κάθε κελιού. Το ζεύγος αυτό μπορεί να αναφέρεται στο κέντρο του κελιού ή σε κάποια από τις άκρες του. Επίσης, σε κάθε κελί εκχωρείται μία αριθμητική τιμή, η οποία ενδέχεται να αντιπροσωπεύει κάθε είδους πληροφορία σχετικά με την συγκεκριμένη γεωγραφική θέση, όπως μέτρηση υψομέτρου (Εικόνα 4-4) ή και έναν κωδικό αριθμό προσδιορισμού του είδους βλάστησης.



Εικόνα 4-4: Στην αριστερή εικόνα απεικονίζεται η διάταξη κελιών των ψηφιδωτών δεδομένων, ενώ δεξιά η ανάθεση υψομετρικών τιμών σε κάθε κελί (Geographic data models, 2014).

4.3.3. Μοντέλο ψηφιδωτών και διανυσματικών δεδομένων

Και τα δύο είδη μοντέλων καθίστανται πολύ χρήσιμα στην αναπαράσταση γεωγραφικών πληροφοριών, ωστόσο, ενδέχεται το ένα να είναι καταλληλότερο του άλλου όταν πρόκειται για συγκεκριμένο είδος γεωγραφικών πληροφοριών ή διαφορετικών ειδών ερωτήσεων. Σε γενικές γραμμές, το μοντέλο διανυσματικών δεδομένων προτιμάται για αντικείμενα που έχουν διακριτά όρια, αλλά και το μοντέλο ψηφιδωτών δεδομένων παρέχει την δυνατότητα αναπαράστασης διακριτών χαρακτηριστικών υπό την μορφή συνδεδεμένων κελιών με την ίδια χαρακτηριστική τιμή (κτήριο της Εικόνας 4-4). Επιπρόσθετα, η αναπαράσταση διακριτών αντικειμένων με το πρώτο μοντέλο καταλαμβάνει λιγότερο χώρο, αλλά είναι λιγότερο ακριβής.

Σε αντίθεση με τα διακριτά, τα συνεχή γεωγραφικά δεδομένα προτείνεται να αναπαριστώνται με το μοντέλο των ψηφιδωτών δεδομένων, γιατί δεν έχουν σαφώς καθορισμένα όρια και αλλάζουν συνεχώς εντός μίας δεδομένης περιοχής. Από την άλλη πλευρά, βέβαια, η αποτύπωση ενός επιφανειακού ή συνεχούς αντικειμένου σε διανυσματική μορφή μπορεί να θεωρηθεί αποδοτικότερη, διότι σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται να καθοριστούν μόνο οι θέσεις των κορυφών του πολυγώνου και όχι όλες οι τιμές των ενδιάμεσων κελιών που το συνθέτουν. Αυτές οι ιδέες περιλαμβάνονται περιεκτικά στο σχόλιο του P. Longley (Longley, 2010) “Raster is vaster but vector is correcter”, που μεταφράζεται ελεύθερα στο «Το ψηφιδωτό είναι ογκωδέστερο αλλά το διάνυσμα είναι ορθότερο», επισημαίνοντας την δυσκολία επιλογής μεταξύ των δύο διαφορετικών αυτών μοντέλων.

Όσο αφορά την ακρίβεια των αναπαραστάσεων, που αποτελεί ένα από τα βασικότερα κριτήρια επιλογής ενός εκ των δύο, η θεώρηση μπορεί να χαρακτηριστεί ως πολύπλοκη. Για την δημιουργία μίας ακριβούς προσέγγισης μίας επιφανείας σε ψηφιδωτή μορφή, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν πολλά κελιά μικρών διαστάσεων, οπότε ο αριθμός των κελιών αυξάνεται αναλογικά της ακριβείας (στην πραγματικότητα, κάθε διχοτόμηση του πλάτους και του ύψους κάθε κελιού προκαλεί τον τετραπλασιασμό του αριθμού των κελιών), ταυτόχρονα με το μέγεθος των εξαγόμενων αρχείων. Από την άλλη πλευρά, η φαινομενική ακρίβεια της διανυσματικής αναπαράστασης αμφισβητείται, αφού πολλά γεωγραφικά φαινόμενα δεν μπορούν να εντοπιστούν με υψηλή ακρίβεια. Έτσι, παρόλο που τα δεδομένα ψηφιδωτού τύπου φαντάζουν λιγότερο ελκυστικά, ίσως είναι πολύ πιο αντιπροσωπευτικά της εγγενούς ποιότητας των δοθέντων δεδομένων.

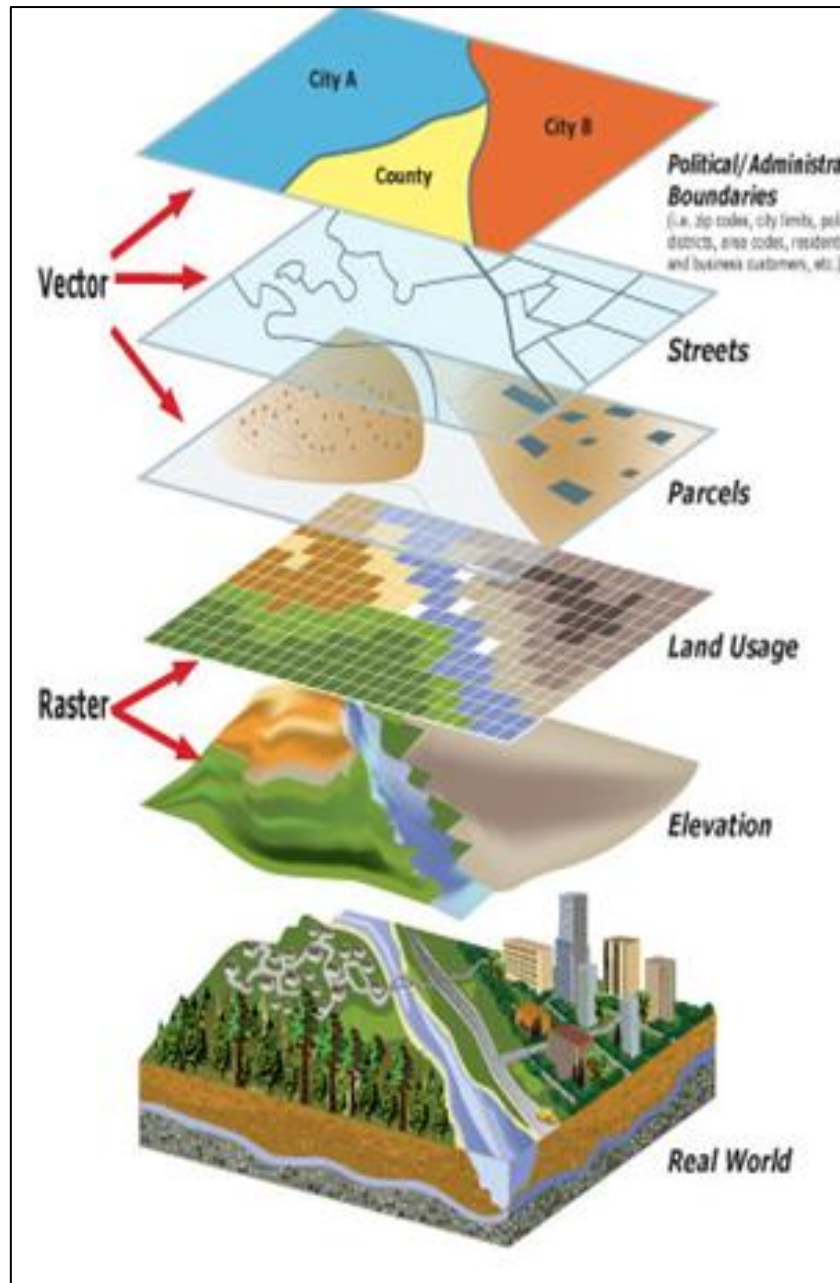
4.4. Θεμελιώδεις έννοιες των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων

Μετά την περιγραφή των μοντέλων δεδομένων καθώς και τον τρόπο αναπαράστασης τους, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν μερικές βασικές έννοιες των Γ.Π.Σ., οι οποίες αποτελούν βασικούς μηχανισμούς και βαρύνουσας σημασίας ορολογίες που συνδράμουν στην συνολική θεώρηση και την καλύτερη κατανόηση των μετέπειτα μελετών περίπτωσης. Ειδικότερα, ως βασικές έννοιες θεωρούνται οι εξής:

- **Γεωγραφική θέση ή τοποθεσία (location)** : Εννοείται μία ορισμένη θέση στην επιφάνεια της γης, καθορισμένη βάσει του χρησιμοποιούμενου γεωγραφικού συστήματος αναφοράς (Κουτσόπουλος, 2009).
- **Γεωγραφικό σύστημα αναφοράς (geographical coordinate system)** : Αποτελεί το σύστημα γεωγραφικών συντεταγμένων (γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος) στο οποίο ανάγονται τα συλλεχθέντα δεδομένα.
- **Χωρική κατανομή (spatial distribution)** : Η διάταξη με την οποία τα αντικείμενα, φαινόμενα κ.λπ. που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης κατανέμονται στο χώρο.
- **Χωρικές γεωγραφικές οντότητες (spatial geographic features)** : Είναι τα γεωμετρικά καθορισμένα σχήματα που έχουν συγκεκριμένη τοποθεσία στην πραγματικότητα και απεικονίζονται στους χάρτες σύμφωνα με αυτή (Σωμαράς, 2013), καθώς και απαρτίζουν τον γεωγραφικό χώρο. Χωρίζονται σε σημειακές, γραμμικές και πολυγωνικές.
- **Τοπολογία (topology)** : Στον τομέα της γεωπληροφορικής (στον οποίο συγκαταλέγονται τα Γ.Π.Σ.) εννοείται το σύνολο των γεωμετρικών κανόνων που πρέπει να ακολουθεί η γεωγραφική πληροφορία, ανάλογα με την φύση της. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ένα οικοδομικό πολύγωνο που αναπαριστάται ως πολύγωνο, του οποίου τα όρια δεν πρέπει να ταυτίζονται με αυτά των γειτονικών πολυγώνων, δηλαδή αποφεύγεται η αλληλοεπικάλυψη.
- **Μεταδεδομένα (metadata)** : Είναι δεδομένα που περιγράφουν άλλα δεδομένα. Το πρόθεμα -μετα- στην τεχνολογία των πληροφοριών σημαίνει μία επιπρόσθετη διευκρίνιση ή περιγραφή. Ουσιαστικά, τα μεταδεδομένα συνοψίζουν τις βασικές πληροφορίες σχετικά με τα δεδομένα, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την αναζήτηση και την εργασία με συγκεκριμένες περιπτώσεις δεδομένων.
- **Γεωβάση (geodatabase) ή γεωγραφική βάση δεδομένων** : Αποτελεί βάση δεδομένων στην οποία αποθηκεύεται ένα σύνολο γεωγραφικών και περιγραφικών δεδομένων, ενώ ταυτόχρονα παρέχεται η δυνατότητα επεξεργασίας και ενημέρωσής του.
- **Πίνακας χαρακτηριστικών ή ιδιοτήτων (attribute table)** : Αρχείο της γεωβάσης το οποίο περιέχει πληροφορίες σχετικά με ένα σύνολο γεωγραφικών χαρακτηριστικών, τα οποία είναι συνήθως τοποθετημένα σε μορφή πίνακα (table). Κάθε σειρά (row) αντιπροσωπεύει μία οντότητα και ονομάζεται εγγραφή (record), ενώ κάθε στήλη αντιπροσωπεύει ένα

χαρακτηριστικό γνώρισμα της οντότητας και ονομάζεται πεδίο (field). Στα σύνολα ψηφιδωτών δεδομένων, κάθε γραμμή του πίνακα ιδιοτήτων αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη περιοχή κελιών που έχουν την ίδια αξία. Επισημαίνεται ότι τα πεδία μοναδικού αναγνωριστικού αριθμού (ObjectID), εμβαδού (Shape_Area) και επίπεδου μήκους (Shape_Length) δημιουργούνται και συμπληρώνονται αυτόματα από το λογισμικό του Γ.Π.Σ. για διανυσματικά δεδομένα, ενώ για ψηφιδωτά δεδομένα τα πεδία μοναδικού αναγνωριστικού αριθμού (ObjectID), χαρακτηριστικής τιμής (Value) και αριθμού καταχωρήσεων (Count).

- **Κατηγορία ή κλάση χαρακτηριστικών (feature class)** : Ένα σύνολο γεωγραφικών χαρακτηριστικών υπό τον ίδιο γεωμετρικό τύπο (σημείο, γραμμή ή πολύγωνο), τα ίδια χαρακτηριστικά και γεωαναφερόμενα στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων.
- **Θεματικά επίπεδα (layers)** : Η οπτική αναπαράσταση ενός γεωγραφικού συνόλου δεδομένων σε οποιοδήποτε περιβάλλον ψηφιακού χάρτη. Εννοιολογικά, αποτελεί μία φέτα (slice) ή ένα στρώμα (stratum) της γεωγραφικής πραγματικότητας σε μία συγκεκριμένη περιοχή και θεωρείται περίπτωση ισοδύναμη με έναν χάρτινο χάρτη (Εικόνα 4-5). Σε έναν οδικό χάρτη, για παράδειγμα, οι δρόμοι, τα εθνικά πάρκα, τα πολιτικά σύνορα, τα ποτάμια κ.α. μπορούν να θεωρηθούν ως διαφορετικά θεματικά επίπεδα.
- **Ερώτημα (query)** : Αποτελεί ένα αίτημα του χρήστη του λογισμικού του Σ.Γ.Π. που εξετάζει τον πίνακα χαρακτηριστικών με βάση τα καθορισθέντα κριτήρια και προβάλλει εκείνα τα χαρακτηριστικά ή τις εγγραφές που πληρούν τα κριτήρια.
- **Γλώσσα Δομημένων Ερωτημάτων (Structured Query Language)** : Αναφερόμενη και ως γλώσσα προγραμματισμού ειδικού σκοπού SQL, έχει σχεδιαστεί για να διαχειρίζεται τα δεδομένα ενός συστήματος βάσεων δεδομένων. Βασίζεται στην τυπική άλγεβρα και την πλειάδα σχεσιακού λογισμού (tuple relational calculus), η οποία εκφράζει τις σχέσεις μεταξύ των δεδομένων μίας βάσης δεδομένων (Wikipedia- SQL, 2016).



Εικόνα 4-5: Παράδειγμα υπέρθεσης θεματικών επιπέδων, με στόχο μία ρεαλιστική απεικόνιση του πραγματικού κόσμου (CMS, 2013)

4.5. Συνοπτική περιγραφή του λογισμικού ArcGIS v.10.2.2

Το ArcGIS v.10.2.2 της εταιρείας Environmental Systems Research Institute (ESRI) αποτελεί μια ολοκληρωμένη συλλογή από προϊόντα λογισμικού Γ.Π.Σ. και

παρέχει μια πλατφόρμα για διαδικασίες χωρικής ανάλυσης, διαχείρισης δεδομένων και απεικόνισης. Είναι ένα πληροφοριακό σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται για :

- **Διαχείριση δεδομένων/πόρων** : ενσωμάτωση συστημάτων, διαχείριση υποθέσεων/αξιώσεων, διαχείριση περιοχών εξυπηρέτησης/ ευθύνης και διαχείριση πελατών
- **Ανάλυση και σχεδιασμό** : προβλέψεις και ανάλυση κινδύνου
- **Επιχειρησιακές διαδικασίες** : τηλεφωνικό κέντρο/αποστολές, παρακολούθηση και συλλογή δεδομένων από το πεδίο, επιθεωρήσεις, συντήρηση και λειτουργίες, δρομολόγηση
- **Επίγνωση καταστάσεων** : υποστήριξη λήψης αποφάσεων, όπως παρουσιάζεται και μέσω της παρούσας διπλωματικής εργασίας και πρόσβαση από πελάτες και κοινό.

Αν και το ArcGIS κυκλοφορεί σε διαφορετικές εκδόσεις ανάλογα με το επίπεδο των κατεχόμενων αδειών (licenses) αυτή την στιγμή, λόγω της χρησιμοποίησης του στην παρούσα εργασία, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί και περιγραφεί η έκδοση μειωμένης λειτουργικότητας ArcGIS for Desktop, σε περιβάλλον Microsoft Windows.

Η έκδοση αυτή, λοιπόν, του ArcGIS, έχει δημιουργηθεί με την γλώσσα προγραμματισμού C++ και περιέχει μία ομάδα από ενοποιημένες εφαρμογές στις οποίες περιλαμβάνονται οι ArcCatalog, ArcMap, ArcGlobe, ArcToolbox και Model Builder (Marathon Data Systems, 2016).

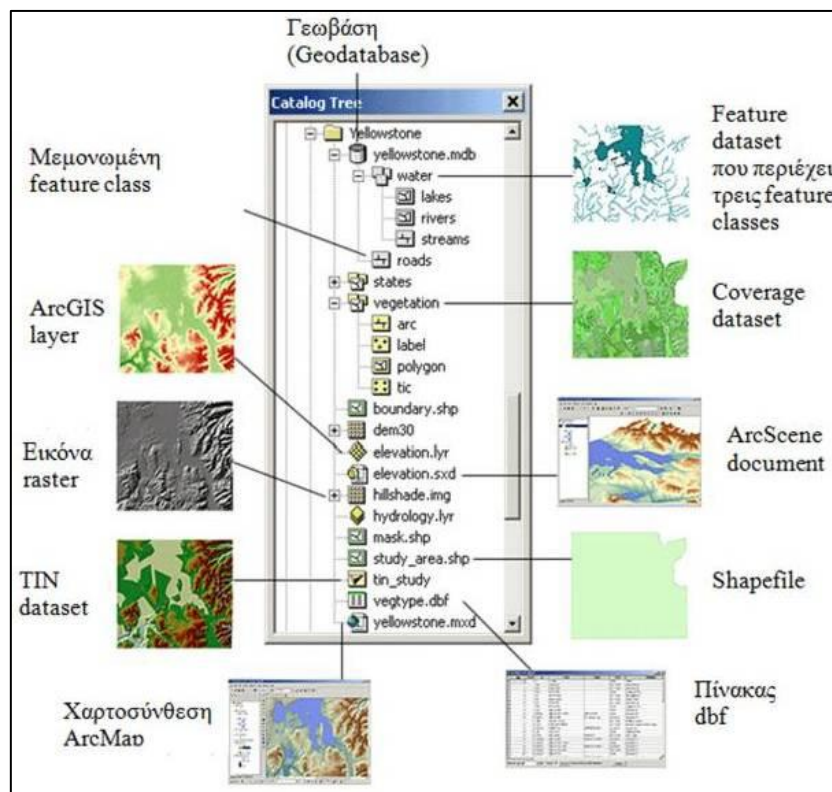
4.5.1. ArcCatalog

Το περιβάλλον ArcCatalog παρέχει στον χρήστη μια ολοκληρωμένη άποψη του συνόλου των μορφών δεδομένων που υποστηρίζονται από το ArcGIS: data files, databases καθώς και άλλων αρχείων του ArcGIS. Τα χωρικά δεδομένα συχνά αποτελούνται από ομάδες αρχείων και διαχειρίζονται ως ενιαίες οντότητες.

Το ArcCatalog είναι το υποσύστημα, που χρησιμοποιείται για την οργάνωση και διαχείριση των χωρικών δεδομένων και επιτρέπει τη σύνδεση με τους «φυσικούς» χώρους, που είναι αποθηκευμένα τα δεδομένα και οι χάρτες, τη διερεύνηση, τη διαχείριση και την αναζήτησή τους. Είναι εφοδιασμένος μεταξύ άλλων με εργαλεία για:

- Αναζήτηση χωρικών δεδομένων.
- Επισκόπηση χωρικών δεδομένων (γεωμετρικών και περιγραφικών).
- Καταγραφή, επισκόπηση και διαχείριση μεταδεδομένων.
- Εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων σε άλλες γεωγραφικές δομές.
- Δημιουργία και διαχείριση γεωβάσεων.

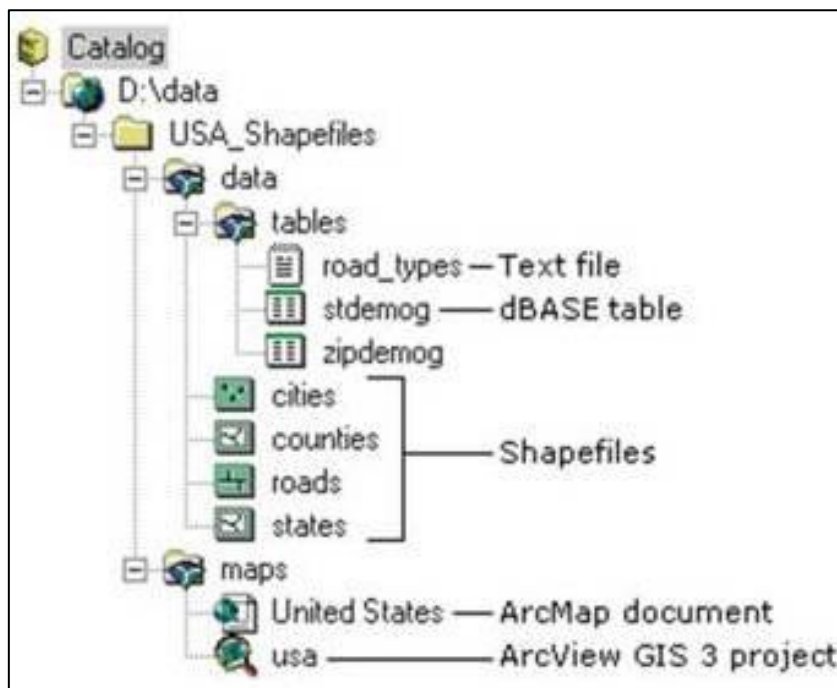
Η οργάνωση των δεδομένων στο ArcCatalog γίνεται σε δύο βασικούς τύπους. Τους χώρους εργασίας (workspaces) και τις γεωβάσεις (geodatabases).



Εικόνα 4-6: Ο κατάλογος δεδομένων του ArcCatalog (Τσούλος, 2015).

Το Shapefile, είναι ένα απλό μη τοπολογικό format χωρικών δεδομένων, για την αποθήκευση γεωμετρικής και περιγραφικής πληροφορίας. Οι γεωγραφικές οντότητες σε ένα shapefile αποθηκεύονται ως γραμμές ή σημεία ή πολύγωνα και οι περιγραφικές πληροφορίες μπορούν να είναι αποθηκευμένες σε πίνακες τύπου .dbf, που να συνδέονται με το shapefile. Μπορούν να βρίσκονται αποθηκευμένα σε έναν απλό φάκελο του συστήματος ή/και σε workspace (Εικόνα 4-7). Τα shapefiles μπορούν να εξαχθούν (export) σε άλλες δομές δεδομένων (CAD, Coverage,

Geodatabase) αλλά και να αποτελέσουν πηγή για εισαγωγή δεδομένων (import) σε μια γεωβάση (geodatabase).



Εικόνα 4-7: Αποθήκευση shapefiles στο ArcCatalog (Τσούλος, 2015).

Η feature class αποτελείται από ομοιογενείς γεωγραφικές οντότητες που έχουν κοινές ιδιότητες (attributes). Περιέχεται σε μια γεωβάση ή σε ένα feature dataset μιας γεωβάσης και υποστηρίζει τοπολογικές σχέσεις. Γενικά στηρίζεται σε τρία γεωμετρικά αρχέτυπα (σημείο, γραμμή, πολύγωνο) αλλά υπάρχουν επτά (7) τύποι feature classes:

- Σημεία (points).
- Γραμμές (lines).
- Πολύγωνα (polygons).
- Ονοματολογία (annotation).
- Διαστάσεις (dimensions).
- Πολλαπλά σημεία (multipoints).
- Πολλαπλές Επιφάνειες (multipatches).

Οι feature classes μπορούν να εξαχθούν σε άλλες δομές δεδομένων (CAD, Coverage, Geodatabase, Shapefile) αλλά και να αποτελέσουν πηγή για εισαγωγή δεδομένων (import) σε μια γεωβάση (geodatabase) ή σε ένα feature dataset.

4.5.2. ArcGlobe

Αποτελεί μία εφαρμογή τρισδιάστατης οπτικοποίησης που επιτρέπει την προβολή μεγάλου όγκου δεδομένων στην επιφάνεια της υδρογείου. Τα χωρικά δεδομένα τοποθετούνται σε τρισδιάστατη επιφάνεια, αναπαριστώντας την πραγματική γεωδαιτική τοποθεσία τους. Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται ότι η συγκεκριμένη εφαρμογή δεν χρησιμοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, αφού οι τρισδιάστατες απεικονίσεις είναι σημαντικά πιο πολύπλοκες θεωρήσεις που βγαίνουν εκτός των ορίων της.

4.5.3. ArcToolbox

Είναι το ολοκληρωμένο εργαλείο που παρέχει αναφορά στις εργαλειοθήκες για διευκόλυνση της πρόσβασης σε και οργάνωσης μίας συλλογής εργαλείων γεωεπεξεργασίας, μοντέλων και κείμενων κώδικα από την επιφάνεια χρήσης του προγράμματος. Η εργαλειοθήκη περικλείει, ουσιαστικά, όλα τα απαραίτητα εργαλεία για την εκτέλεση μίας προηγμένης εργασίας σε έναν συγκεκριμένο τομέα. Ομοίως, το ArcToolbox περιλαμβάνει όλα τα εργαλεία τα οποία απαιτούνται για τις σύνθετες εργασίες γεωεπεξεργασίας, έτσι ώστε να διευκολύνει την πρόσβαση σε αυτά και την οργάνωση τους κατά έναν λογικό τρόπο (Wiki GIS, 2011).

4.5.4. ModelBuilder

Αποτελεί την εφαρμογή με την οποία κατασκευάζονται, επεξεργάζονται και διαχειρίζονται μοντέλα. Τα μοντέλα είναι ροές εργασίας (work flows) οι οποίες συνθέτουν αλληλουχίες εργαλείων γεωεπεξεργασίας, τροφοδοτώντας το αποτέλεσμα ενός εργαλείου σε αμέσως επόμενο εργαλείο, ως δεδομένο εισόδου. Μπορεί επίσης

να θεωρηθεί και ως μία «οπτική» γλώσσα προγραμματισμού (visual programming language), αφού προσφέρεται η δυνατότητα μετατροπής της ροής εργασίας σε κείμενο κώδικα σε γλώσσα Python, δίνοντας την ευκαιρία σε άλλα άτομα να χρησιμοποιήσουν και να τροποποιήσουν το παραγόμενο μοντέλο. Επισημαίνεται ότι χρησιμοποιείται εκτενέστερα στις μετέπειτα μελέτες περίπτωσης.

4.5.5. ArcMap

Αποτελεί την σημαντικότερη εφαρμογή της πλατφόρμας λογισμικού του ArcGIS και χρησιμοποιείται κυρίως για την προβολή, επεξεργασία, δημιουργία και ανάλυση γεω-χωρικών δεδομένων. Συνδέεται άμεσα με όλες τις προαναφερθείσες εφαρμογές, με ουσιαστικότερες συνδέσεις εξ αυτών με την ArcCatalog, με στόχο την σύνδεση των δημιουργούντων γεωβάσεων και φάκελου προέλευσης των δεδομένων, με την ArcToolbox, με στόχο την πρόσβαση στις γνωστές εργαλειοθήκες και την δημιουργία, οργάνωση και διαχείριση εργαλείων και με την Model Builder, με στόχο την δημιουργία, επεξεργασία και διαχείριση μοντέλων ροών εργασίας. Βασικοί μηχανισμοί λειτουργίας του αποτελούν τα θεματικά επίπεδα πληροφοριών (layers), μέσω των οποίων προβάλλεται, επεξεργάζεται, διαμορφώνεται, αναλύεται και προκύπτει η χωρική πληροφορία. Όντας ενοποιημένο με τις προαναφερθείσες εφαρμογές, προσφέρει την δυνατότητα μελέτης και διευθέτησης πολυσύνθετων χωρικών προβλημάτων για τα οποία μπορεί να είναι απαραίτητη η χρήση μοντέλων ή/και η συγγραφή προγραμματιστικού κώδικα (σε γλώσσα Python ή Visual Basic – VB).

Το ArcMap είναι το κύριο υποσύστημα του ArcGIS που χρησιμοποιείται για όλες τις χαρτογραφικές διαδικασίες αλλά και τις διαδικασίες διόρθωσης (editing) των δεδομένων. Σε μία χαρτογραφική σύνθεση η γεωχωρική πληροφορία αποδίδεται σαν μια συλλογή θεματικών επιπέδων και συμπληρώνεται από άλλα στοιχεία (γραφήματα, εικόνες, υπόμνημα συμβόλων, γραφική και ονομαστική κλίμακα, κάναβοι, τίτλος και λοιπές πληροφορίες περιθωρίου).

4.6. Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα και οδεύσεις καλωδίων

Η μοντελοποίηση πραγματικών καταστάσεων, μέσω της χρήσης των Γ.Π.Σ., αποτελεί ένα νέο και καινοτόμο ρεύμα, που αρχίζει να διερευνάται και να εφαρμόζεται σε πολλά σύνθετα έργα, λόγω της δυνατότητας εξαγωγής σπουδαίων συμπερασμάτων για τον πραγματικό κόσμο. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διερευνάται η χρησιμότητα των Γ.Π.Σ. στον καθορισμό των περιοχών πιθανής εμφάνισης γεωκινδύνων, καθώς και τη μοντελοποίηση της βέλτιστης όδευσης ενός καλωδίου συναρτήσει των επικίνδυνων αυτών περιοχών. Η βελτιστοποίηση της χάραξης του υποθαλάσσιου καλωδίου πραγματοποιείται μέσω της πολυκριτηριακής ανάλυσης, η οποία περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.6.1. Μοντελοποίηση των προβλημάτων και χρησιμοποιούμενα εργαλεία

Για την διεξαγωγή της πολυκριτηριακής ανάλυσης δημιουργήθηκαν και εφαρμόστηκαν μοντέλα από τα συλλεχθέντα δεδομένα. Τα μοντέλα αποτελούν προσομοιώσεις του πραγματικού κόσμου, οι οποίες λειτουργούν με μία αφαιρετική λογική. Κατά την αφαίρεση, εξαιρούνται στοιχεία από το διαθέσιμο πληροφοριακό υλικό τα οποία, είτε δεν θεωρούνται σημαντικά στην αποτύπωση της πραγματικότητας, είτε απλοποιούν το πλαίσιο όπου λαμβάνουν χώρα οι επιλεγθείσες διαδικασίες. Την αφαίρεση ακολουθεί ο μετασχηματισμός του μοντέλου, κατά τον οποίο, αποφασίζεται ο τύπος του ανάλογα με το είδος του προβλήματος και η εξαγωγή των συμπερασμάτων σχετικά με τον πραγματικό κόσμο (Κουτσόπουλος, 2009). Στην παρούσα μελέτη, ο τύπος μοντέλου που επιλέχθηκε προσομοιάζει αυτόν του αναλογικού. Αυτό το είδος αναφέρεται στον μετασχηματισμό ιδιοτήτων του πραγματικού κόσμου (πχ η κλίμακα μεγέθους) με στόχο μία περιορισμένα αφηρημένη θεώρηση του.

Το μοντέλο δημιουργήθηκε μέσω του εργαλείου Model Builder της εφαρμογής ArcMap. Η δόμηση του έγινε σταδιακά, εισάγοντας εργαλεία της πρότυπης εργαλειοθήκης του ArcToolbox και προμηθεύοντας τα με δεδομένα της αντίστοιχης γεωβάσης, ως παραμετρικές τιμές για την εκτέλεση τους. Η εισαγωγή των δεδομένων σε ένα εργαλείο (input) και η εξαγωγή αποτελεσμάτων (output) από αυτό, αποτελεί την βασική διαδικασία της εκπόνησης του μοντέλου, αφού η τελική του μορφή

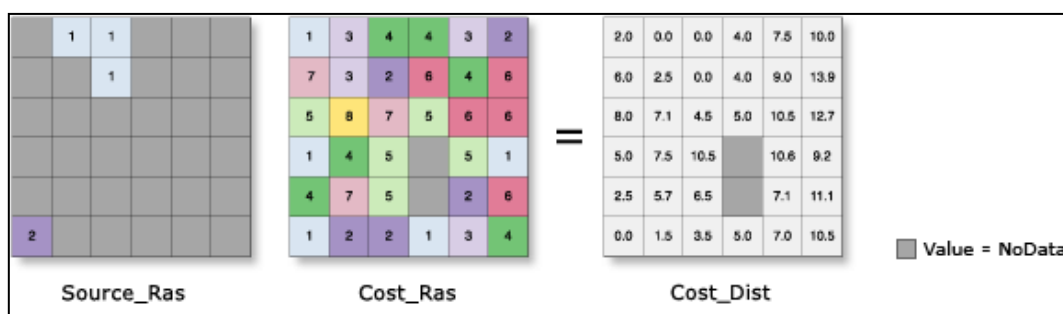
προκύπτει ως μία λογική αλληλουχία τέτοιων διαδικασιών (ArcGIS Resource Center, 2012).

4.6.2. Βασικά εργαλεία

Μέσω του Model Builder χρησιμοποιήθηκε ένας σημαντικός αριθμός εργαλείων από την εργαλειοθήκη της εφαρμογής ArcToolbox, τα οποία αναφέρονται αναλυτικά σε αυτή την ενότητα, σύμφωνα με τις επίσημες οδηγίες της κατασκευάστριας εταιρείας ESRI (ArcGIS Resource Center, 2012) για την πλατφόρμα εφαρμογών του ArcGIS (σε αλφαβητική σειρά, ως προς την αγγλική τους ονομασία):

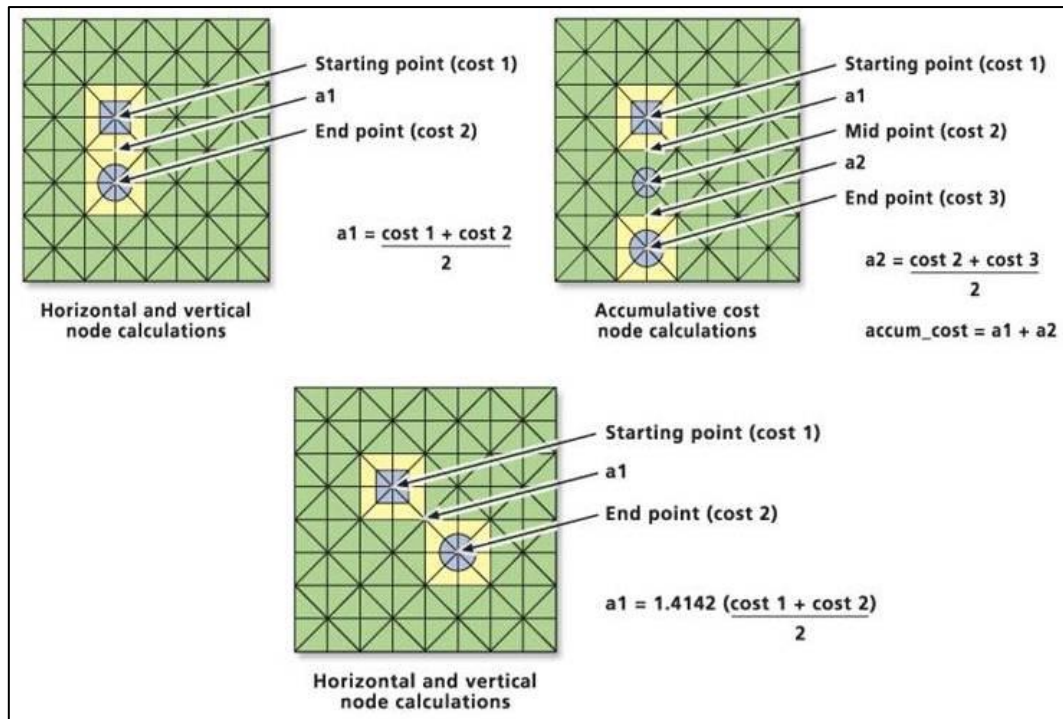
- **Προσθήκη Πεδίου (Add Field)** : Προσθέτει ένα νέο πεδίο, δηλαδή μία νέα στήλη, στον πίνακα χαρακτηριστικών της επιλεγθείσας κλάσης χαρακτηριστικών (feature class) ή του επιλεγθέντος θεματικού επιπέδου (layer).
- **Υπολογισμός Πεδίου (Calculate Field)** : Υπολογίζει τις τιμές του επιλεγθέντος πεδίου μίας κλάσης χαρακτηριστικών ή ενός θεματικού επιπέδου. Ο υπολογισμός γίνεται βάσει της προγραμματιστικής γλώσσας SQL, αν και η εφαρμογή ενός σύνθετου υπολογισμού απαιτεί την εφαρμογή και μίας εκ των δύο προγραμματιστικών γλωσσών Visual Basic (VB) ή Python.
- **Κόστος απόστασης (Cost Distance)** : Δημιουργεί ένα ψηφιδωτό του οποίου κάθε κελί λαμβάνει μία τιμή συσσωρευτικού κόστους για το πλησιέστερο κελί-πηγή (source cell). Ο αλγόριθμος του εργαλείου χρησιμοποιεί την αναπαράσταση κελιών ως κόμβων σύνδεσης, όπως ορίζεται από την θεωρία γράφων (Βικιπαίδεια- Θεωρία γράφων, 2016). Σε αυτή την αναπαράσταση, το κέντρο κάθε κελιού θεωρείται κόμβος και ενώνεται με τους γειτονικούς κόμβους με πολλαπλές συνδέσεις. Τα εισαγόμενα δεδομένα αποτελούν τα σημεία προέλευσης (origin points) και το ψηφιδωτό απεικόνισης του σταθμισμένου κόστους, όπως προκύπτει από το εργαλείο Weighted Overlay. Το κόστος που αποδίδεται σε κάθε κελί, όπως φαίνεται στο παράδειγμα της εικόνας 4-8, αντιπροσωπεύει το κόστος ανά μονάδα απόστασης για την μετακίνηση

μέσω του συγκεκριμένου κελιού. Η τελική τιμή ανά κελί προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του μεγέθους του με την τιμή του κόστους.



Εικόνα 4-8: Στάδια από αριστερά προς τα δεξιά: (1) Ανάθεση τιμών στο ψηφιδωτό της επιφάνειας προέλευσης, η οποία συμβολίζεται με την τιμή 1, και του σημείου προορισμού, που συμβολίζεται με την τιμή 2. (2) Υπέρθωση αυτού του ψηφιδωτού με το ψηφιδωτό κόστους που έχει προκύψει από άλλο εργαλείο του προγράμματος (3) Τελικό ψηφιδωτό, το οποίο περιέχει τιμές συσσωρευτικού κόστους ανά κελί, όπου υπάρχει πληροφορία.

Επιπρόσθετα, το κόστος μετακίνησης από τον κόμβο ενός κελιού σε έναν αμέσως επόμενο εξαρτάται από την σχετική χωρική τους κατεύθυνση και τον τρόπο σύνδεσής τους. Ειδικότερα, το κόστος υπολογίζεται για τις διαφορετικές περιπτώσεις όπως διαφαίνεται στην εικόνα 4-9, όπου $cost_n$ το κόστος του κελιού n . Επισημαίνεται το ότι η δημιουργία του ψηφιδωτού που περιέχει τις τελικές τιμές του συσσωρευτικού κόστους απόστασης προκύπτει από μία επαναληπτική διαδικασία, χρησιμοποιώντας την θεωρία γράφων και ξεκινώντας από τα κελιά προέλευσης. Ουσιαστικά, στην πρώτη επανάληψη αναγνωρίζονται τα κελιά προέλευσης στα οποία ανατίθεται η μηδενική τιμή (αφού δεν παρουσιάζεται κόστος για να επιστρέψουν στον εαυτό τους) και ενεργοποιούνται όλα τα γειτονικά τους κελιά, στα οποία αντιστοιχείται μία τιμή κόστους σύμφωνα με την μεθοδολογία της εικόνας 4-9. Έπειτα, δημιουργείται μία λίστα με τις τιμές των κοστών από την οποία επιλέγεται η μικρότερη τιμή και εγγράφεται αμέσως στο τελικό ψηφιδωτό, εκκινώντας την δεύτερη επανάληψη. Η διαδικασία τελειώνει όταν έχουν ανατεθεί τιμές σε όλα τα κελιά.

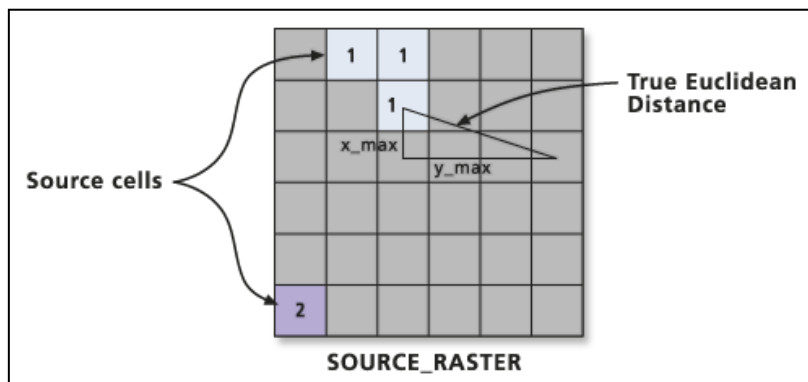


Εικόνα 4-9: Οι διαφορετικές περιπτώσεις υπολογισμού του συσσωρευτικού κόστους και οι αντίστοιχες εξισώσεις υπολογισμού.

- Διαδρομή ελάχιστου κόστους (Cost Path) :** Καθορίζει το μονοπάτι ελάχιστου κόστους από ένα σημείο προορισμού (destination point) έως το σημείο προέλευσης (source or origin point). Εκτός από την απαίτηση να οριστεί ο προορισμός, το εργαλείο απαιτεί ως εισαγόμενα δεδομένα (input) δύο ψηφιδωτά σετ δεδομένων, ως έχουν προκύψει από το εργαλείο “Cost Distance”: του κόστους απόστασης (least Cost-Distance raster) και της γεινίασης των κελιών με την ελάχιστη τιμή κόστους (Back Link raster). Το δεύτερο εξ αυτών, χρησιμοποιείται για να ανιχνευθεί η λιγότερο δαπανηρή πορεία από τον προορισμό προς το σημείο προέλευσης πάνω στην επιφάνεια του κόστους απόστασης (cost distance raster). Η τελική διαδρομή προκύπτει ενώνοντας τα κέντρα των κελιών με τις ελάχιστες τιμές κόστους μεταξύ των σημείων προέλευσης και προορισμού, σύμφωνα με την προεπιλεγμένη λειτουργία του προγράμματος ArcMap.

- Υπολογισμός Ευκλείδειας απόστασης (Euclidean Distance) :** Περιγράφει την σχέση κάθε κελιού με ένα ή πολλά σημεία προορισμού, βάσει της τυπικής ευθείας απόστασης (ArcGIS Resource Center, 2012). Δέχεται ως εισαγόμενα δεδομένα τα σημεία προέλευσης και υπολογίζει την απόσταση αυτών από κάθε γειτονικό κελί. Ως διαδικασία, ο Ευκλείδειος αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής: για κάθε

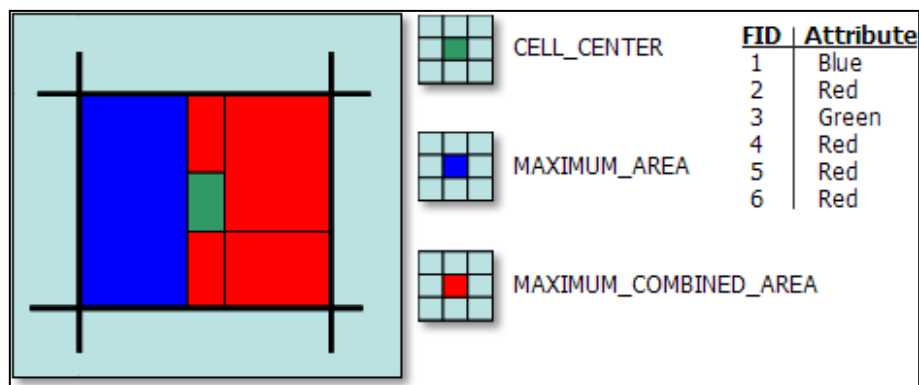
κελί, η απόσταση από κάθε σημείο προέλευσης –πηγή καθορίζεται υπολογίζοντας την υποτεινούσα με τις πρότυπες μέγιστες τιμές συντεταγμένων (x,y) του ArcMap ως τα άλλα δύο σκέλη του τριγώνου (Εικόνα 4-10). Η μικρότερη απόσταση προς μια πηγή προσδιορίζεται, και εάν είναι μικρότερη από την καθορισμένη μέγιστη απόσταση, η τιμή έχει εκχωρηθεί στη θέση των κελιών στο ψηφιδωτό εξόδου (output raster).



Εικόνα 4-10: Ο καθορισμός της μέγιστης ή "πραγματικής" ευκλείδειας απόστασης (ArcGIS Resource Center, 2012).

- **Τομή θεματικών επιπέδων (Intersect)** : Υπολογίζει την γεωμετρική τομή των εισαγόμενων χαρακτηριστικών. Ουσιαστικά, τα χαρακτηριστικά που επικαλύπτονται μεταξύ τους σε όλα τα εισαγόμενα θεματικά επίπεδα καταγράφονται στο τελικό αποτέλεσμα.
- **Μετατροπή πολυγωνικών οντοτήτων σε δεδομένα τύπου raster (Polygon to Raster)** : Μετατρέπει πολυγωνικές οντότητες σε σετ ψηφιδωτών (raster) δεδομένων. Το ψηφιδωτό δημιουργείται ανά κελί, αφού σε κάθε ένα από αυτά αντιστοιχίζεται μία τιμή ανάλογα με το χαρακτηριστικό του πίνακα ιδιοτήτων που έχει οριστεί ως πρωτεύων. Η ανάθεση της τιμής γίνεται με μία εκ των επόμενων τριών μεθόδων: κεντρικής ανάθεσης (CELL_CENTER), μέγιστης επιφάνειας (MAXIMUM_AREA) ή μέγιστης συνδυαζόμενης επιφάνειας (MAXIMUM_COMBINED_AREA). Στην κεντρική ανάθεση τιμής, το κελί λαμβάνει την τιμή από το πολύγωνο που καλύπτει το κέντρο του (ανεξάρτητα των τιμών των άλλων πολυγώνων), στην ανάθεση μέγιστης επιφάνειας λαμβάνει την τιμή του πολυγώνου που καταλαμβάνει την μέγιστη επιφάνεια εντός του κελιού και κατά την ανάθεση μέγιστης συνδυαζόμενης επιφάνειας του εκχωρείται η τιμή του πολυγώνου που έχει την μέγιστη επιφάνεια, αφού έχει πρώτα ενωθεί με πολύγωνα του ίδιου

κελιού που παρουσιάζουν την ίδια χαρακτηριστική τιμή (Εικόνα 4-11). Στην παρούσα εργασία, επισημαίνεται, ότι χρησιμοποιήθηκε η προτεινόμενη από το πρόγραμμα κεντρική ανάθεση τιμών.



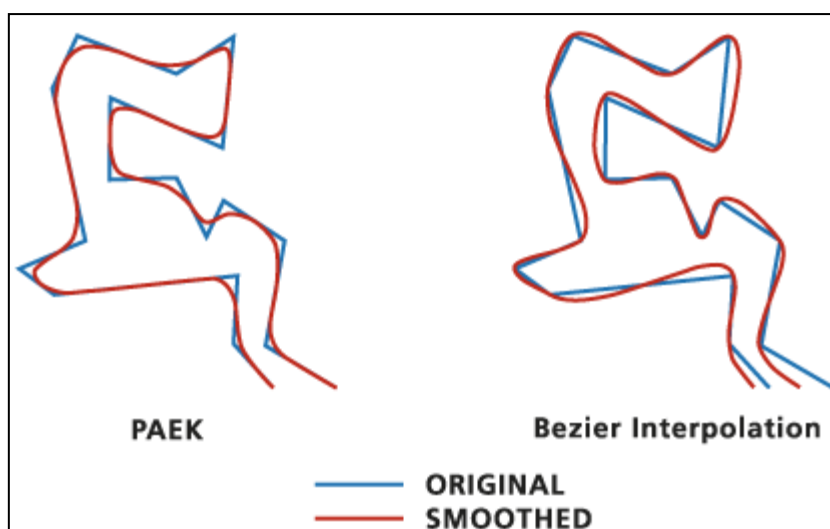
Εικόνα 4-11: Σχηματική απεικόνιση συνύπαρξης 6 πολυγώνων εντός ενός κελιού, με πρωτεύων πεδίο τον αύξοντα αριθμό τους. Δίπλα από το κελί απεικονίζεται το αποτέλεσμα της μετατροπής σε ψηφιδωτή μορφή με τις τρεις μεθόδους ανάθεσης τιμών (ArcGIS Help, 2016).

- **Αναγωγή σε προβολικό σύστημα (Project)** : Προβάλλει χωρικά δεδομένα από ένα σύστημα συντεταγμένων σε ένα άλλο. Επισημαίνεται ότι η προβολές που έγιναν στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν απαιτήσαν κάποιο γεωγραφικό μετασχηματισμό, οπότε και χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες τιμές του προγράμματος.
- **Μετατροπή raster δεδομένων σε πολυγωνικές οντότητες (Raster to Polygon)** : Μετατρέπει τα δεδομένα ψηφιδωτής μορφής σε πολυγωνικές οντότητες.
- **Μετατροπή raster δεδομένων σε πολυγωνικές γραμμές (Raster to Polyline)** : Μετατρέπει τα δεδομένα ψηφιδωτής μορφής σε πολυγωνικές γραμμές.
- **Επαναταξινόμηση δεδομένων (Reclassify)** : Επαναταξινομεί ή αλλάζει τις τιμές ενός συνόλου ψηφιδωτών δεδομένων. Η ταξινόμηση δεδομένων μίας πολυφασματικής εικόνας αποτελεί αντικείμενο της Ψηφιακής Τηλεπισκόπησης (Digital Remote Sensing) και αποτελεί μία βασική μέθοδο για την ποσοτική ανάλυση φαινομένων (Αργιαλάς, 1998). Βασιζόμενο στο ιστόγραμμα της εισαγόμενης εικόνας, το εργαλείο ταξινομεί ή επαναταξινομεί σε κλάσεις την πληροφορία που περιέχεται σε αυτήν και την εκχωρεί έπειτα σε κάθε κελί, ανάλογα με την επιλεγόμενη μέθοδο ταξινόμησης. Οι διαθέσιμες μέθοδοι ταξινόμησης στο πρόγραμμα ArcMap είναι

πολλές και εναπόκειται στην κρίση του μελετητή η επιλογή μίας ορθότερης, με στόχο την καλύτερη απεικόνιση της πληροφορίας. Επισημαίνεται, σε αυτό το σημείο, ότι η μέθοδος που εφαρμόστηκε στην παρούσα μελέτη είναι η μέθοδος βελτιστοποίησης του Jenks (μέθοδος φυσικών παύσεων –natural breaks), η οποία αποτελεί μέθοδο ομαδοποίησης δεδομένων για τον καθορισμό της καλύτερης ρύθμισης των τιμών σε διαφορετικές μεταξύ τους κλάσεις. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ελαχιστοποίησης της μέσης απόκλισης κάθε κλάσης από τη μέση τιμή της, ενώ ταυτόχρονα μεγιστοποιείται η μέγιστη απόκλιση από τις μέσες τιμές των υπόλοιπων κλάσεων (Wikipedia - Jenks natural breaks optimization, 2016).

- **Επιλογή χωρικών οντοτήτων (Select)** : Εξάγει, αποθηκεύει και απεικονίζει, σε νέο θεματικό επίπεδο, χωρικές οντότητες από μία κλάση οντοτήτων ή θεματικό επίπεδο, χρησιμοποιώντας γλώσσα SQL για την διατύπωση των ερωτημάτων (queries).
- **Υπολογισμός κλίσης (Slope)** : Υπολογίζει τον ρυθμό της μέγιστης μεταβολής στην κατακόρυφη διεύθυνση από κάθε κελί προς τα οχτώ γειτονικά του, ενός συνόλου ψηφιδωτών δεδομένων. Η διαδικασία που ακολουθεί το εργαλείο, ουσιαστικά, είναι η προσαρμογή ενός επιπέδου στις τιμές του κατακόρυφου άξονα z για ένα 3x3 σύστημα κελιών γύρω από το κεντρικό κελί ή κελί επεξεργασίας (center of processing cell). Η τιμή κλίσης αυτού του επιπέδου υπολογίζεται με την τεχνική μέσου μεγίστου του Burrough (Burrough, 1986), της οποίας η ανάλυση ξεπερνά τα όρια της παρούσας διπλωματικής. Η κατεύθυνση του επιπέδου ορίζει την διεύθυνση για το κεντρικό κελί. Όπου δεν υπάρχει τιμή z σε κάποιο κελί, τότε του εκχωρείται η τιμή z του κεντρικού κελιού. Η κλίση μπορεί να υπολογιστεί σε μοίρες (οι οποίες και επιλέχθηκαν στις μελέτες ως πιο εύληπτη μορφή μεταβλητής) και σε ποσοστό ανύψωσης (percent rise).
- **Εξομάλυνση γραμμικού στοιχείου (Smooth Line)** : Εξομαλύνει μία γραμμή για να βελτιώσει την αισθητική και την ποιότητα ενός χάρτη. Η εξομάλυνση αποτελεί ένα τύπο διαδικασίας της γενίκευσης χαρτών, με δύο αλγόριθμους να απασχολούν τις γραμμικές οντότητες : ο PAEK (Polynomial Approximation with Exponential Kernel – Πολυωνυμική Προσέγγιση με Εκθετική συνάρτηση Kernel) και ο αλγόριθμος παρεμβολής Bezier (Bezier Interpolation) (Robinson, 2002). Κατά τον αλγόριθμο PAEK δημιουργούνται εξομαλυμένες γραμμές μία παραμετρική τεχνική συνεχούς μέσου όρου. Οι συντεταγμένες των τρεχόντων σημείων υπολογίζονται από τον

σταθμισμένο μέσο όρο των συντεταγμένων όλων των σημείων της γραμμής. Τα βάρη για το κάθε σημείο ελαττώνονται με την απόσταση κατά μήκος της γραμμής για το τρέχον σημείο. Εκτός από τον μέσο όρο, χρησιμοποιείται και προσέγγιση με πολυώνυμα δευτέρου βαθμού. Η τελική γραμμή δεν περιέχει απαραίτητα όλες τις κορυφές της γραμμής πηγής (Εικόνα 5-12). Από την άλλη, η παρεμβολή Bezier προσαρμόζει καμπύλες Bezier (Bezier curves) σε κάθε γραμμικό τμήμα της εισαχθείσας, στο εργαλείο, πολυγωνικής γραμμής. Η εφαπτομένη Bessel (Bessel tangent) χρησιμοποιείται για να συνδέσει τις καμπύλες με ομαλό τρόπο στις κορυφές. Επισημαίνεται ότι η προκύπτουσα γραμμή διέρχεται από τις κορυφές της αρχικής πολυγωνικής γραμμής (Εικόνα 4-12). Τονίζεται ότι η μέθοδος εξομάλυνσης που χρησιμοποιήθηκε είναι η Bezier, διότι παράγει, τις περισσότερες φορές, αποτέλεσμα που προσομοιάζει καλύτερα την εισαγόμενη γραμμή (Εικόνα 4-12).

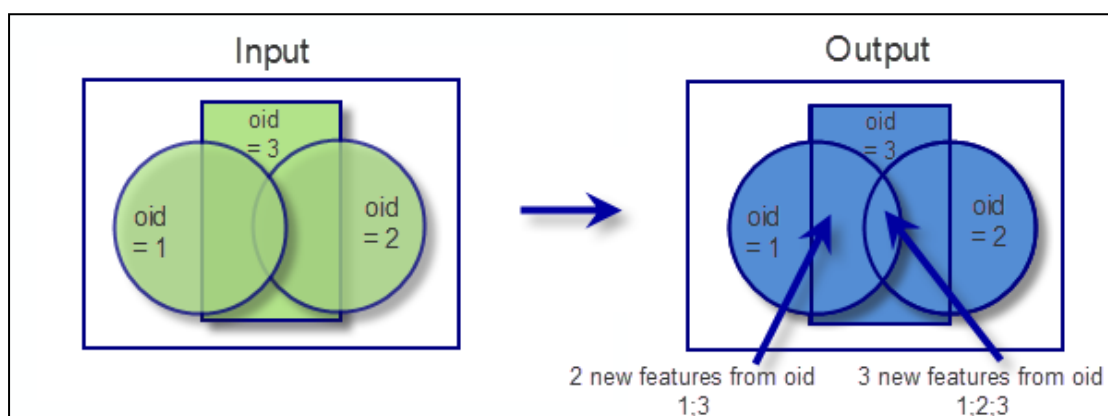


Εικόνα 4-12: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων εξομάλυνσης, στην ίδια πολυγωνική γραμμή. Παρατηρώντας το τελικό αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος Bezier, προσεγγίζει καλύτερα το αρχικό σχήμα (ArcGIS Help, 2016).

- **Μετατροπή τοπογραφικών δεδομένων σε σύνολο ψηφιδωτών δεδομένων (Topo to Raster)** : Αποτελεί μία μέθοδο παρεμβολής επιφανείας που έχει σχεδιαστεί ειδικά για την δημιουργία υδρολογικά ορθών ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων (Digital Elevation Model - DEM), η οποία βασίζεται στην έκδοση 4.6.3 του προγράμματος ANUDEM, το οποίο αναπτύχθηκε από τον Hutchinson την περίοδο 1988-1989. Το εργαλείο, συγκεκριμένα, παρεμβάλλει μία επιφάνεια που περιέχει τις υψομετρικές τιμές μεταξύ δοσμένων σημείων και πολυγώνων, με στόχο την δημιουργία ενός DEM το οποίο έχει μία ρεαλιστική δομή αποστράγγισης και αποτελεί ορθή αναπαράσταση των κορυφογραμμών και των υπαρκτών ρεμάτων. Η τεχνική

που ακολουθείται στην παρεμβολή είναι εκείνη της διακριτής λεπτής επίπεδης σφήνας (discretized thin plate spline technique), όπως ορίζεται από την Wahba (1990), η οποία έχει τροποποιηθεί για να επιτρέπει το DEM να ακολουθεί απότομες αλλαγές στον πυθμένα, όπως μεταβάσεις από και προς κορυφογραμμές και ρέματα. Τα απαραίτητα στοιχεία για λειτουργία του προγράμματος είναι οι ισοϋψείς καμπύλες ως γραμμικές οντότητες, οι σημειακές οντότητες με υψομετρική πληροφορία και το πολύγωνο που καθορίζει τα όρια της περιοχής μελέτης.

- **Ένωση θεματικών επιπέδων (Union)** : Υπολογίζει την γεωμετρική ένωση οποιουδήποτε αριθμού κλάσεων οντοτήτων ή/και θεματικών επιπέδων, με την προϋπόθεση να είναι πολυγωνικής μορφής. Το αποτέλεσμα (output) του συγκεκριμένου εργαλείου αποτελείται από πολύγωνα που αντιπροσωπεύουν την γεωμετρική ένωση όλων των εισαχθέντων πολυγώνων (input), όπως επίσης και όλων των αντίστοιχων χαρακτηριστικών τους (Εικόνα 4-13). Επιπρόσθετα, ορίζει και την χωρική αναφορά των εξαγόμενων οντοτήτων στην οποία και προβάλλονται.



Εικόνα 4-13: Αναπαράσταση της λογικής διαδικασίας που ακολουθεί το εργαλείο Union. Οι τρεις, αρχικά διαφορετικές, πολυγωνικές οντότητες ενώνονται μεταξύ τους, λαμβάνοντας και τις τιμές των αντίστοιχων συμμετεχόντων πολυγώνων. Για παράδειγμα, η τομή των δύο κύκλων στο output λαμβάνει τις τρεις τιμές : του παραλληλογράμμου και των δύο κύκλων (ArcGIS Help, 2016).

- **Σταθμισμένη Υπέρθωση (Weighted Overlay)** : Αφού εισαχθούν ως δεδομένα διαφορετικά θεματικά επίπεδα σε μορφή ψηφιδωτών (raster) εκτελεί μία σταθμισμένη πολυκριτηριακή ανάλυση, όπου κάθε θεματικό επίπεδο αποτελεί ένα κριτήριο. Για κάθε θεματικό επίπεδο επιλέγεται το χαρακτηριστικό πεδίο (από τον πίνακα ιδιοτήτων του), του οποίου οι τιμές αντιστοιχούνται με εκείνες μίας προσαρμόσιμης κλίμακας. Αυτή η κλίμακα αντιπροσωπεύει μία ποιοτική διαβάθμιση του κόστους από τιμή σε τιμή. Μετά την αντιστοίχιση των τιμών κάθε θεματικού

επιπέδου με την κλίμακα, τοποθετούνται βάρη επιρροής (influence) σε κάθε θεματικό επίπεδο, ορίζοντας και το τελικό αποτέλεσμα.

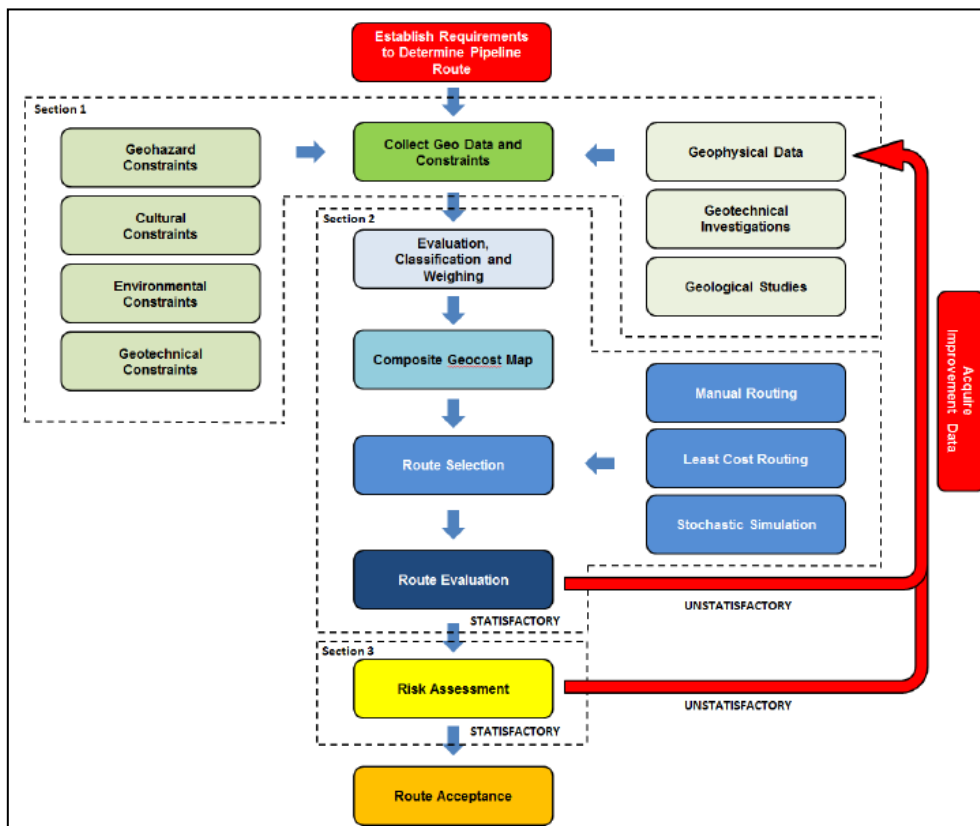
- **Σταθμισμένο άθροισμα (Weighted Sum)** : Εκτελεί μία υπέρθεση θεματικών επιπέδων σε μορφή raster, πολλαπλασιάζοντας την τιμή του κάθε κελιού εξ αυτών με το επιλεγόμενο βάρος και αθροίζοντας τις τελικές τιμές. Ουσιαστικά, το εργαλείο εκτελείται ανά κελί, αφού ο υπολογισμός και η ανάθεση τιμής γίνεται σε κάθε ένα από αυτά.

Μετά από την ανάλυση των βασικών εννοιών των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων και την παρουσίαση του λογισμικού ArcGIS v.10.2.2 και των εργαλείων του, ακολουθεί η παρουσίαση της εφαρμογής.

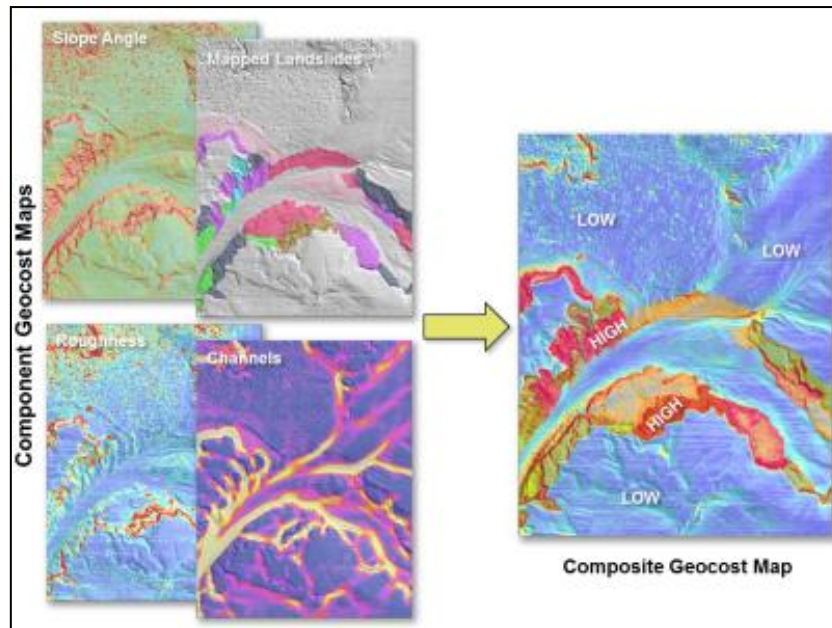
5. Εφαρμογή: Χάραξη καλωδίου μεταξύ Ελλάδας - Ιταλίας

5.1. Εισαγωγή

Λόγω της ενασχόλησης με τον συνεχώς αναπτυσσόμενο κλάδο των υπεράκτιων έργων, στην παρούσα εφαρμογή, γίνεται προσπάθεια κατασκευής ενός μοντέλου προσέγγισης της βέλτιστης όδευσης υποθαλάσσιων ενεργειακών καλωδίων, βάσει των διαθέσιμων δεδομένων. Επισημαίνεται ότι το μοντέλο που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη εργασία αποτελεί βελτιωμένη εκδοχή αντίστοιχης προσπάθειας ανάπτυξης υπολογιστικού εργαλείου κατά τη χάραξη αγωγών μεγάλου μήκους (Τσουγκράνης, 2015), ενώ, όπως διαπιστώνεται και από τα δύο παρακάτω σχήματα, αντίστοιχης λογικής είναι οι πρόσφατες οδηγίες του American Bureau of Shipping (ABS) σχετικά με τον καθορισμό της χάραξης υποθαλάσσιων αγωγών (ABS, 2016).



Εικόνα 5-1: Διάγραμμα ροής για τον καθορισμό της χάραξης (ABS, 2016).



Εικόνα 5-2: Σταθμισμένη υπέρθεση χαρτών (ABS, 2016).

Η περιοχή που επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης εμφανίζεται στο νότιο τμήμα της Αδριατικής Θάλασσας, που αποτελεί τμήμα της Μεσογείου Θάλασσας, μεταξύ Ελλάδας από την ανατολική πλευρά (Σαγιάδα) και Ιταλίας από τη δυτική (Οτράντο). Η περιοχή αυτή επιλέχθηκε λόγω της ύπαρξης διαθέσιμων δεδομένων προς επεξεργασία καθώς και των αναμενόμενων μελλοντικών έργων διασύνδεσης.

5.2. Συλλογή και διαχείριση δεδομένων

Αφού καθορίστηκαν τα όρια της περιοχής μελέτης, ακολούθησε ο ορισμός των απαραίτητων δεδομένων για την εκπόνηση της διαδικασίας και η συλλογή τους. Τα απαιτούμενα δεδομένα καθορίστηκαν ως εξής:

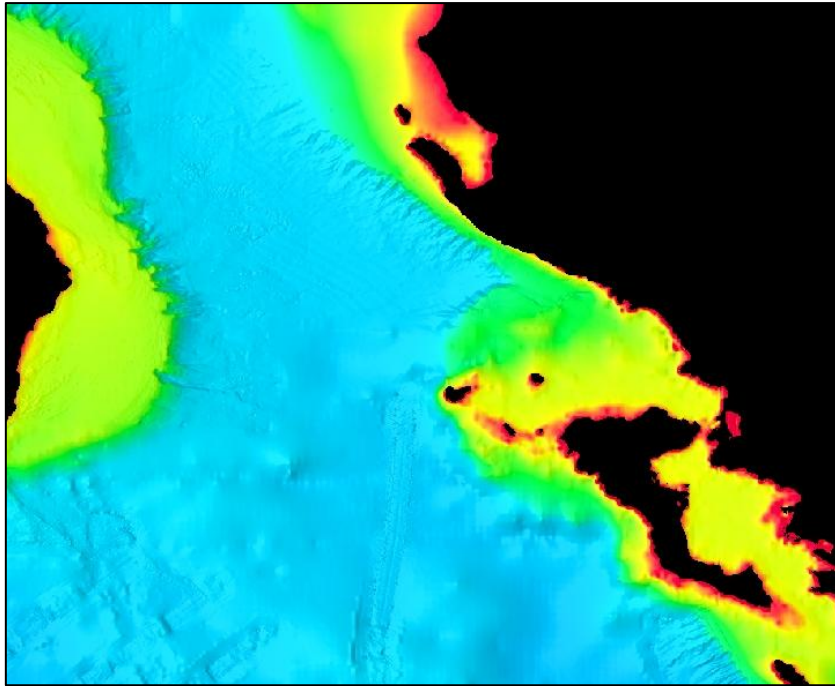
- Μορφολογικό ανάγλυφο του πυθμένα της Αδριατικής ή ψηφιακό βαθυμετρικό μοντέλο πυθμένα (DEM).
- Χάρτης των βασικών ρηγμάτων της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος
- Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας, για την συλλογή πληροφοριών πάνω στις μέσες τιμές των αναπτυσσόμενων σεισμικών επιταχύνσεων στην επιφάνεια του πυθμένα

- Χάρτης απεικόνισης της μέσης συγκέντρωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια του πυθμένα ή γεωλογικός χάρτης και χαρακτηριστικά του πυθμένα

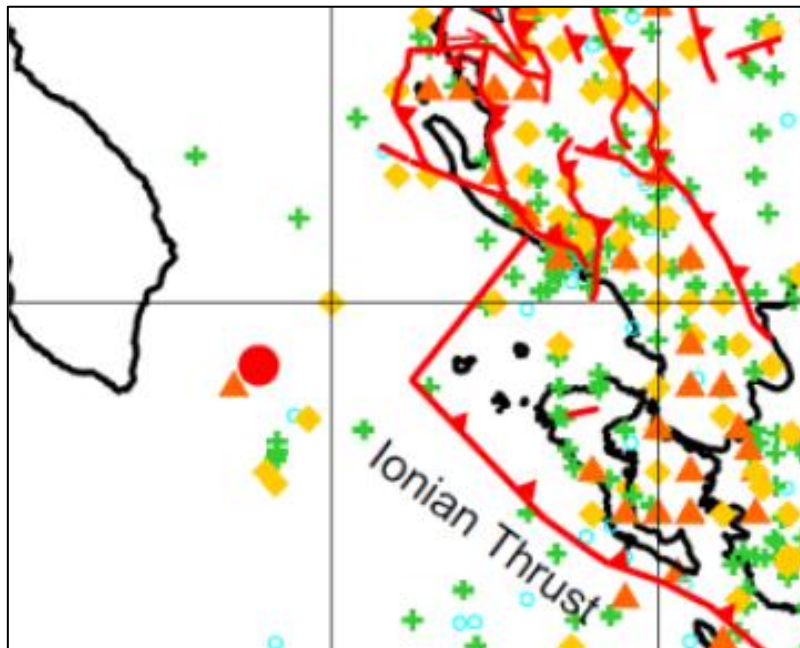
Τα δεδομένα, που τελικά συγκεντρώθηκαν, είναι τα εξής:

- Ένα ψηφιακό βαθυμετρικό μοντέλο πυθμένα DEM, όπως φαίνεται στην εικόνα 5-3, (σε αρχείο μορφής geotiff) από το Ευρωπαϊκό Δίκτυο Θαλάσσιας Παρακολούθησης και Δεδομένων EMODnet (EMODnet, 2016)
- Ένας χάρτης βασικών ρηγμάτων στην Αδριατική θάλασσα (Εικόνα 5-4)
- Ένας χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας από την «Εκτίμηση σεισμικών κινδύνων για την Αδριατική» του D.Slejko (Slejko, et al., 1999) με περίοδο επαναφοράς 475 ετών (Εικόνα 5-5)
- Ένας χάρτης απεικόνισης της μέσης συγκέντρωσης καθιζήσεων στον πυθμένα της θάλασσας, από το Εθνικό Ινστιτούτο Γεωφυσικής και Ηφαιστειολογίας ADRICOSM (Εικόνα 5-6).

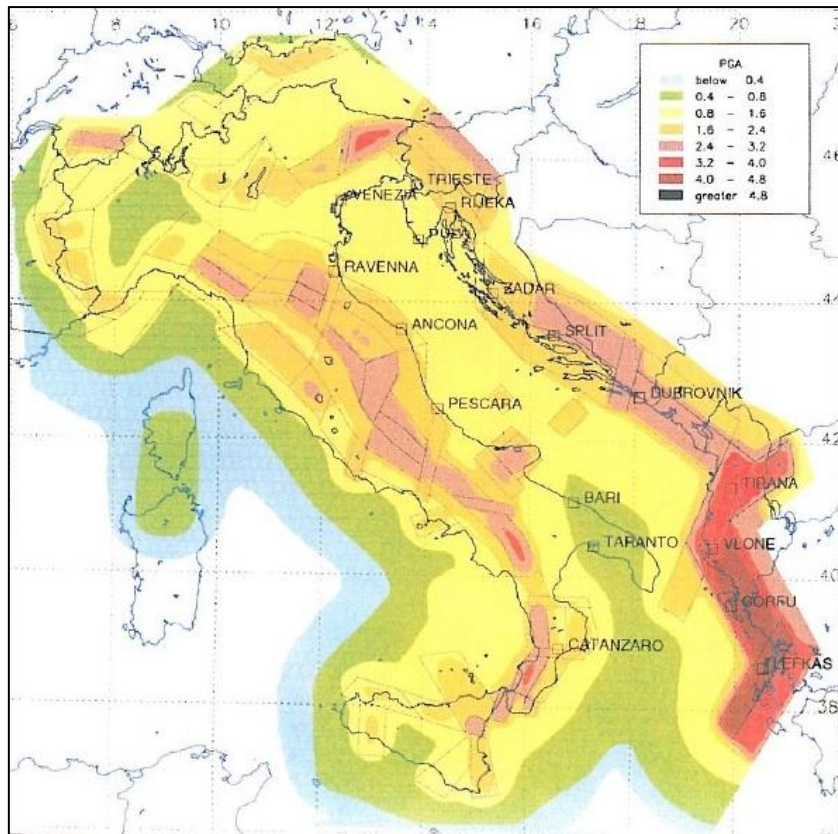
Μετά τη συλλογή των δεδομένων, χρησιμοποιώντας το εργαλείο ArcCatalog, συνδέθηκε το πρόγραμμα ArcMap με το φάκελο προέλευσης των δεδομένων και δημιουργήθηκε εντός του μία γεωβάση, για την αποθήκευση και βέλτιστη διαχείρισή τους. Το κελί του DEM είχε προσεγγιστικές διαστάσεις 200 m x 200 m (δηλαδή μικρή χωρική ανάλυση) και σύστημα χωρικής αναφοράς WGS '84 UTM της ζώνης 34N. Όλα τα δεδομένα εκτός του DEM ψηφιοποιήθηκαν και αναφέρθηκαν στο ίδιο γεωδαιτικό σύστημα, ενώ ταυτόχρονα ορίστηκε κάθε ψηφιδωτό θεματικό επίπεδο να έχει τις ίδιες διαστάσεις κελιού με αυτές του βαθυμετρικού μοντέλου.



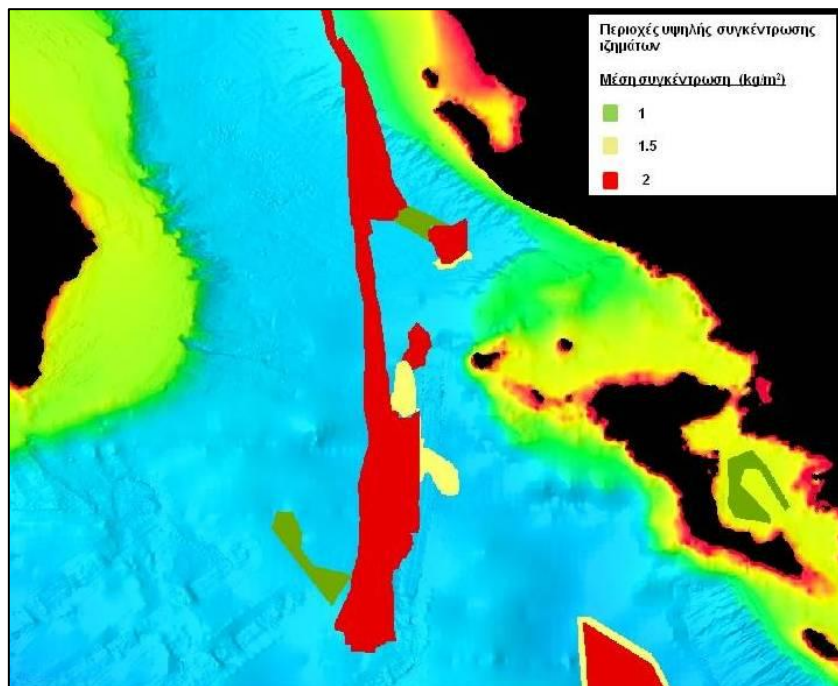
Εικόνα 5-3: Ψηφιακό βαθυμετρικό μοντέλο πυθμένα της περιοχής ενδιαφέροντος μεταξύ Ελλάδας και Ιταλίας.



Εικόνα 5-4: Χάρτης βασικών ρηγμάτων της Αδριατικής θάλασσας.



Εικόνα 5-5: Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας από την «Εκτίμηση σεισμικών κινδύνων για την Αδριατική» των D.Slejko et al. (1999)



Εικόνα 5-6: Χάρτης απεικόνισης της μέσης συγκέντρωσης καθιζήσεων στον πυθμένα της θάλασσας

Μετά την συλλογή των δεδομένων και αρχική τους επεξεργασία, μέσω του εργαλείου ArcCatalog, δημιουργήθηκε σύνδεση του προγράμματος ArcMap με τον φάκελο προέλευσης τους και ακολούθησε η εισαγωγή τους στην γεωβάση, με σκοπό την καλύτερη διαχείριση τους. Η επόμενη διαδικασία άντλησε τα δεδομένα από την προαναφερθείσα γεωβάση.

5.3. Διαμόρφωση κριτηρίων

Επιθυμώντας να χαραχθεί η διαδρομή του υποθαλάσσιου καλωδίου με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο, δημιουργήθηκαν θεματικά επίπεδα το καθένα εκ των οποίων αντιπροσωπεύει ένα κριτήριο στην επιλογή της τελικής διαδρομής.

Ως βασικά κριτήρια για την εξαγωγή του τελικού σταθμισμένου κόστους διαμορφώθηκαν τα εξής:

- Η επίτευξη της συντομότερης δυνατής διαδρομής (βάσει του κανόνα της ευθύτητας)
- Η αποφυγή των ενεργών και εν δυνάμει ενεργών ρηγμάτων της περιοχής
- Η αποφυγή των περιοχών πιθανής ρευστοποίησης των ιζημάτων του πυθμένα
- Η αποφυγή των περιοχών όπου εμφανίζεται μεγάλη κλίση πρηνών

Στο σημείο αυτό, κρίνεται απαραίτητο να επισημανθεί η σημαντικότητα του κριτηρίου αποφυγής των περιοχών πιθανής υποθαλάσσιας κατολισθήσεως. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις (submarine landslides) αποτελούν το φαινόμενο μεταφοράς ιζημάτων κατά μήκος του επιπέδου του πυθμένα και προκαλούνται όταν η κατακόρυφα ασκούμενη δύναμη (π.χ. βαρύτητα) ξεπεράσει την διατμητική αντοχή των ιζημάτων του πυθμένα εκκινώντας μετακινήσεις κατά μήκος μίας ή περισσότερων κοίλων ή επίπεδων επιφανειών (Wikipedia - Submarine landslide, 2016). Προκαλούνται από μία σειρά αιτιών, όπως η σεισμική δραστηριότητα, η υπερπίεση πόρων, η ύπαρξη κοιτασμάτων υδρογονανθράκων, οι ροές κορημάτων, τα υποθαλάσσια ηφαίστεια, τα υποθαλάσσια ρεύματα και τα παλιρροϊκά κύματα, που αποτελούν σύνθετα φαινόμενα προς μελέτη. Αυτό καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη δεδομένων σχετικά με τα περισσότερα από αυτά τα αίτια για την δημιουργία μίας μεθοδολογίας προσδιορισμού της εμφάνισής τους, πριν την χρησιμοποίησή τους για τον καθορισμό των περιοχών πιθανής εμφάνισης

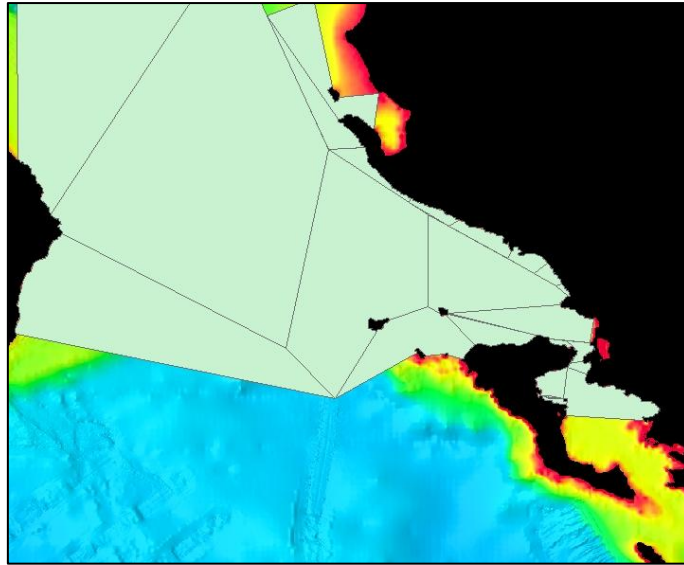
υποβρύχιων κατολισθήσεων. Στην παρούσα εργασία, λόγω της αδυναμίας εξεύρεσης των προαναφερθέντων δεδομένων, το κριτήριο αποφυγής των περιοχών πιθανής κατολίσθησης λαμβάνεται υπόψη έμμεσα, μέσω του κριτηρίου αποφυγής περιοχών που εμφανίζουν μεγάλη κλίση πρανών.

5.4. Δημιουργία μοντέλου και εκπονούμενη διαδικασία

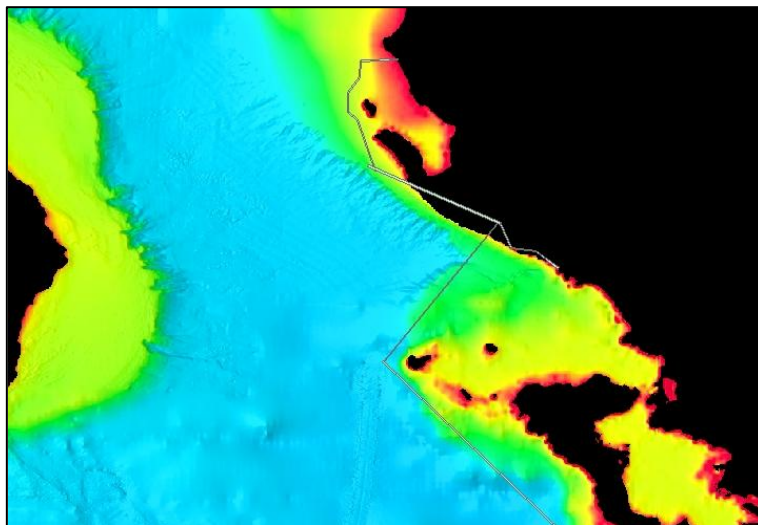
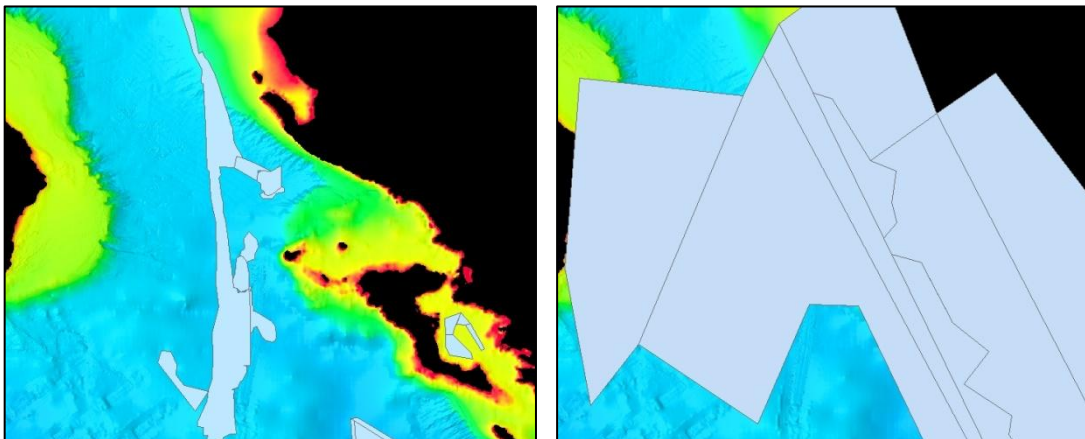
Βάσει των προαναφερθέντων κριτηρίων, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο ροής εργασιών, με το εργαλείο Model Builder του προγράμματος ArcMap. Σε πρώτη φάση, διαμορφώθηκαν κατάλληλα τα δεδομένα για να εισαχθούν στην αλληλουχία εργαλείων, σε δεύτερη φάση παράχθηκαν τα θεματικά επίπεδα των εφαρμοζόμενων κριτηρίων και στην τρίτη και τελευταία φάση ορίστηκε το συνολικό ποιοτικό κόστος και η τελική χάραξη της διαδρομής σε διανυσματική μορφή.

Αρχικά, έγινε εισαγωγή του ψηφιακού βαθυμετρικού μοντέλου πυθμένα της περιοχής ενδιαφέροντος μεταξύ Ελλάδας και Ιταλίας (αρχείο μορφής geotiff) στο περιβάλλον εργασίας του προγράμματος ArcMap. Στη συνέχεια, εντοπίστηκε η θαλάσσια περιοχή διαμέσου της οποίας θα σχεδιαζόταν η όδευση του υποθαλάσσιου καλωδίου. Για την εκπόνηση της διαδικασίας κρίθηκε απαραίτητη η οριοθέτηση της περιοχής ενδιαφέροντος. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε αρχικά ένα θεματικό επίπεδο αποτελούμενο από πολύγωνα, το οποίο απεικόνιζε τη θαλάσσια περιοχή όδευσης του καλωδίου (Εικόνα 5-7).

Ακολούθως, σχεδιάστηκαν μέσω πολυγώνων και δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα θεματικά επίπεδα των ρηγμάτων, των ζωνών σεισμικής επιτάχυνσης και των περιοχών μέσης συγκέντρωσης ιζημάτων (Εικόνα 5-8). Ο σχεδιασμός και η εισαγωγή των τιμών στα πεδία έγινε σύμφωνα με τους χάρτες των δεδομένων που περιγράφηκαν στην ενότητα 5.2.



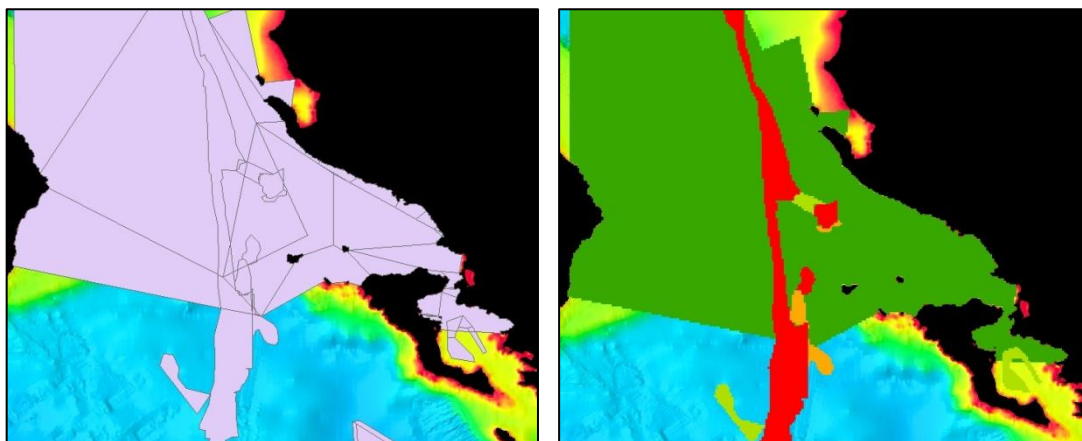
Εικόνα 5-7: Θεματικό επίπεδο θαλάσσιας περιοχής.



Εικόνα 5-8: Θεματικά επίπεδα α) μέσης συγκέντρωσης ιζημάτων, β) ζωνών σεισμικής επιτάχυνσης, γ) σεισμικών ρηγμάτων.

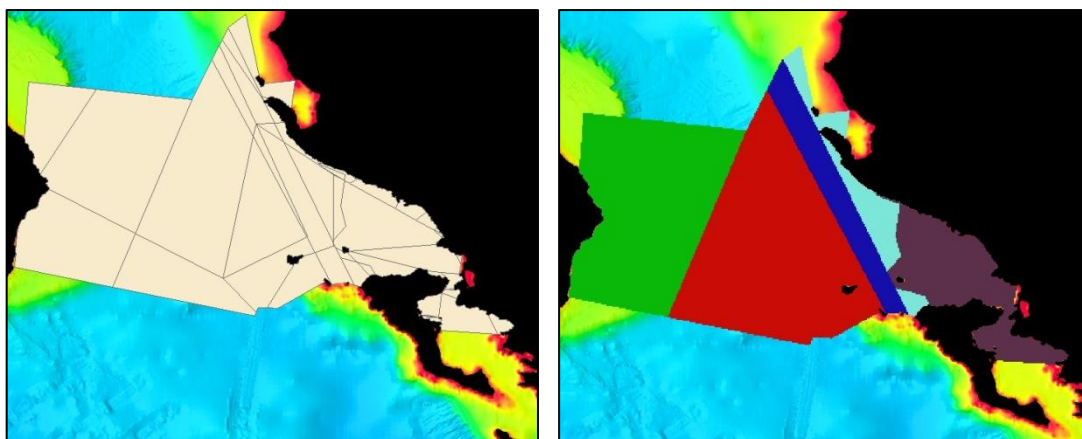
Μετά το σχεδιασμό των ανωτέρω τριών θεματικών επιπέδων, έγινε σύνδεση του καθενός με το θεματικό επίπεδο της θαλάσσιας περιοχής, έτσι ώστε να παραχθούν επίπεδα που θα κάλυπταν όλη την περιοχή μελέτης.

Αρχικά, έγινε ένωση του θεματικού επιπέδου του πολυγώνου που όριζε τη θαλάσσια περιοχή μελέτης με εκείνο της μέσης συγκέντρωσης ιζημάτων (εργαλείο Union). Επιπλέον, έγινε μετατροπή του νέου θεματικού επιπέδου σε μορφή ψηφιδωτού, με το εργαλείο Polygon to Raster και επαναταξινόμηση των δεδομένων του με το εργαλείο Reclassify. Στην εικόνα 5-9 παρουσιάζεται το νέο επίπεδο που αφορά τη μέση συγκέντρωση ιζημάτων.



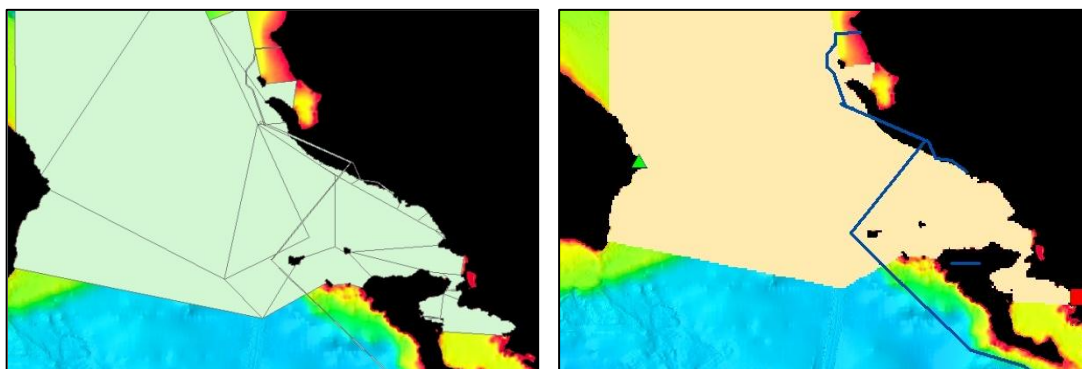
Εικόνα 5-9: Ένωση των θεματικών επιπέδων της θαλάσσιας περιοχής και της μέσης συγκέντρωσης ιζημάτων και μετατροπή του νέου θεματικού επιπέδου σε μορφή ψηφιδωτού.

Για τις ζώνες σεισμικής επιτάχυνσης έγινε τομή με το πολύγωνο της θαλάσσιας περιοχής (εργαλείο Intersect), για τον ίδιο σκοπό που εφαρμόστηκε και η προηγούμενη ένωση. Ακολούθησε η μετατροπή του αποτελέσματος της τομής σε μορφή ψηφιδωτού με το εργαλείο Polygon to Raster και επαναταξινόμηση των δεδομένων με το εργαλείο Reclassify. Στην εικόνα 5-10 παρουσιάζεται το νέο επίπεδο που αφορά τις ζώνες σεισμικής επιτάχυνσης.



Εικόνα 5-10: Τομή των θεματικών επιπέδων της θαλάσσιας περιοχής και των ζωνών σεισμικής επιτάχυνσης και μετατροπή του νέου θεματικού επιπέδου σε μορφή ψηφιδωτού.

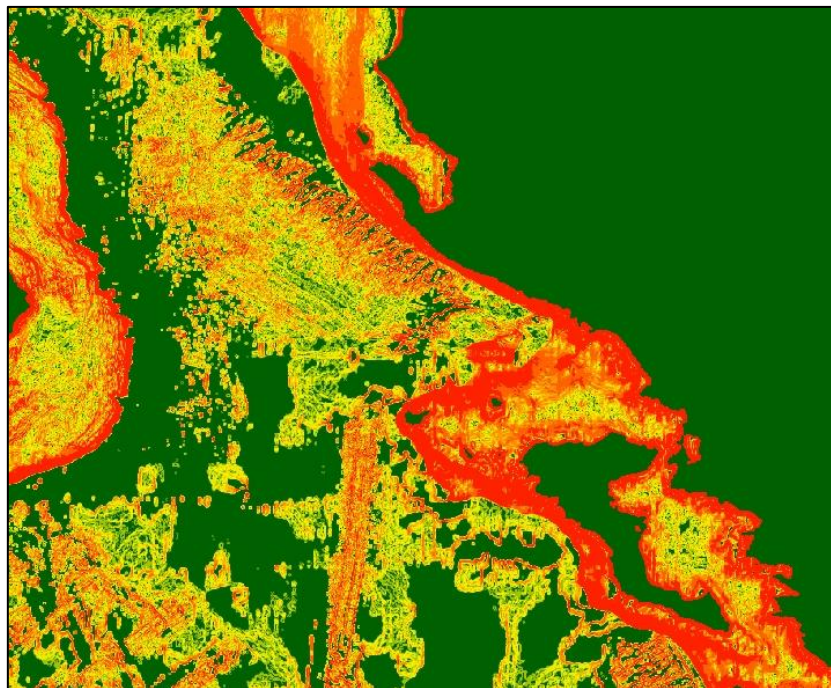
Τέλος, έγινε ένωση του θεματικού επιπέδου του πολυγώνου που όριζε τη θαλάσσια περιοχή μελέτης με εκείνο των ρηγμάτων (εργαλείο Union). Επιπλέον, έγινε μετατροπή του νέου θεματικού επιπέδου σε μορφή ψηφιδωτού, με το εργαλείο Polygon to Raster και επαναταξινόμηση των δεδομένων του με το εργαλείο Reclassify. Στην εικόνα 5-11 παρουσιάζεται το νέο επίπεδο που αφορά τα σεισμικά ρήγματα.



Εικόνα 5-11: Ένωση των θεματικών επιπέδων της θαλάσσιας περιοχής και των σεισμικών ρηγμάτων και μετατροπή του νέου θεματικού επιπέδου σε μορφή ψηφιδωτού.

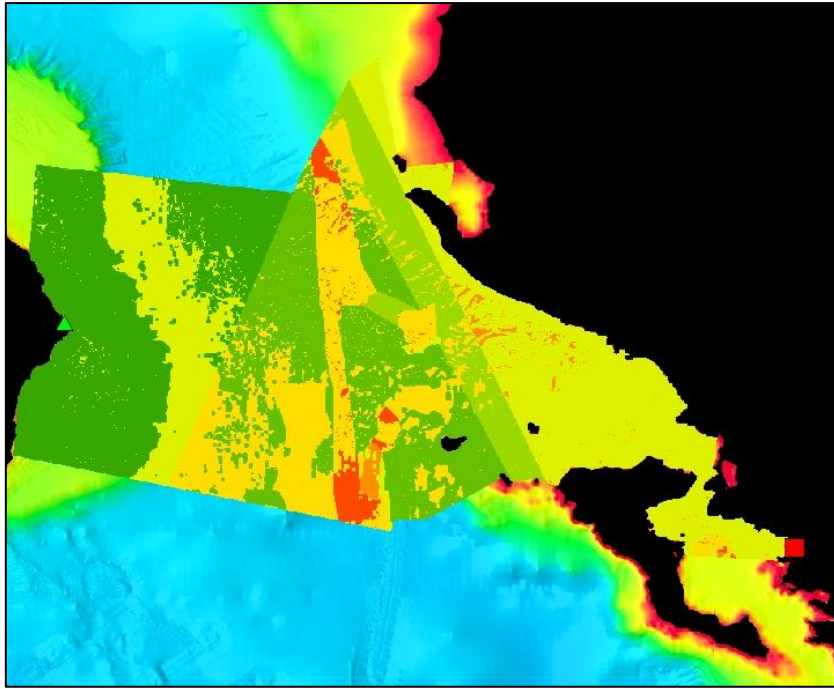
Κατά τη μετατροπή όλων των θεματικών επιπέδων σε μορφή ψηφιδωτού, οι διαστάσεις κελιού κάθε ψηφιδωτού θεματικού επιπέδου ορίστηκαν ίδιες με τις διαστάσεις κελιού του βαθυμετρικού μοντέλου.

Εφόσον τελειοποιήθηκαν τα ψηφιδωτά θεματικά επίπεδα, έγινε υπολογισμός της κλίσης του πυθμένα από το δοσμένο DEM μέσω του εργαλείου Slope (Εικόνα 5-12) και επαναταξινόμηση των τελικών δεδομένων με το εργαλείο Reclassify.



Εικόνα 5-12: Υπολογισμός των κλίσεων του θαλάσσιου πυθμένα στην περιοχή ενδιαφέροντος. Επισημαίνεται ότι οι απεικονιζόμενες χερσαίες περιοχές σε Ελλάδα, Αλβανία και Ιταλία θεωρούνται επίπεδες (πράσινο χρώμα) επειδή το πρόγραμμα, στη συγκεκριμένη εφαρμογή, αναλύει βαθυμετρικά (και όχι τοπογραφικά) δεδομένα.

Ακολούθησε η σταθμισμένη υπέρθεση των θεματικών επιπέδων του επαναταξινομημένου ψηφιδωτού της μέσης συγκέντρωσης ιζημάτων στον πυθμένα, του επαναταξινομημένου ψηφιδωτού της κλίσης του πυθμένα και του επαναταξινομημένου ψηφιδωτού των σεισμικών επιταχύνσεων με το εργαλείο Weighted Overlay. Η ισοβαρής αυτή υπέρθεση είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός θεματικού επιπέδου με τις περιοχές πιθανής ρευστοποίησης των ιζημάτων του πυθμένα. Αυτό προέκυψε από την υπόθεση ότι οι περιοχές του πυθμένα που παρουσιάζουν ταυτόχρονα υψηλή συγκέντρωση ιζημάτων, υψηλή τιμή μέσης σεισμικής επιτάχυνσης και έχουν πολύ ήπια κλίση μπορούν να οριστούν ως περιοχές που ενδέχεται να υποκύψουν σε ρευστοποίηση. Το θεματικό επίπεδο με το αποτέλεσμα της ισοβαρούς υπέρθεσης εμφανίζεται στην εικόνα 5-13.



Εικόνα 5-13: Θεματικό επίπεδο περιοχών ρευστοποίησης.

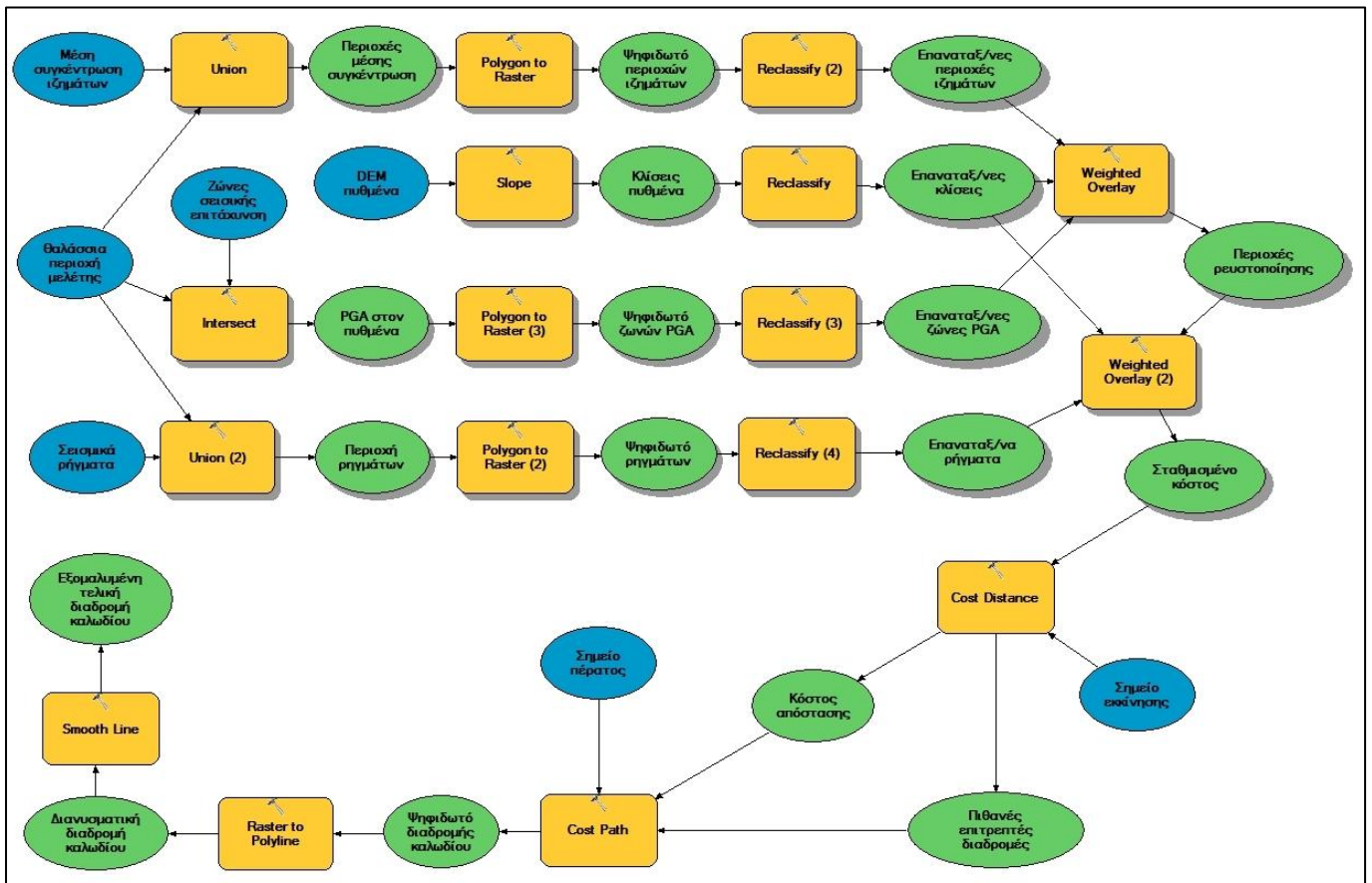
Στο επόμενο στάδιο της διαδικασίας υλοποιήθηκε η τελική σταθμισμένη υπέρθεση των κριτηρίων με το εργαλείο Weighted Overlay. Κατά τη μελέτη της θαλάσσιας περιοχής ενδιαφέροντος παρατηρήθηκε ότι η διασταύρωση του καλωδίου με το ρήγμα είναι αναπόφευκτη, καθώς το ρήγμα εμφανίζεται να είναι συνεχές για ένα πολύ μεγάλο μήκος. Βάσει αυτής της παρατήρησης, το κριτήριο της αποφυγής ρηγματος δεν ελήφθη υπόψη και κατ' επέκταση χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα θεματικά επίπεδα των περιοχών πιθανής ρευστοποίησης και των κλίσεων του πυθμένα. Οι κατανομές βαρών των κριτηρίων και τα αποτελέσματα της σταθμισμένης υπέρθεσης περιγράφονται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα (Ενότητα 5.5).

Για την τελική χάραξη των καλωδίων χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία Cost Distance και Cost Path. Τα σημεία εκκίνησης και πέρατος του καλωδίου καθορίστηκαν σε θέση των ακτογραμμών της Ελλάδας (Σαγιάδα) και της Ιταλίας (Οτράντο) αντίστοιχα, έτσι ώστε να διερευνηθούν οι δυνατότητες αποφυγής των ρηγμάτων και των περιοχών ρευστοποίησης. Αρχικά, υπολογίστηκε το κόστος απόστασης με το εργαλείο Cost Distance, εισάγοντας το σημείο εκκίνησης και το αποτέλεσμα της τελικής σταθμισμένης υπέρθεσης. Παράλληλα, το εργαλείο Cost Distance εξήγαγε τις πιθανές διαδρομές του καλωδίου (Cost Back Link).

Ακολουθως, παράχθηκε η τελική διαδρομή του καλωδίου σε μορφή raster, εισάγοντας στο εργαλείο Cost Path το σημείο πέρατος και τα αποτελέσματα του κόστους απόστασης και των πιθανών διαδρομών. Η τελική διαδρομή μετατράπηκε από ψηφιδωτή σε διανυσματική μορφή με το εργαλείο Raster to Polyline και εξομαλύνθηκε από το εργαλείο Smooth Line σύμφωνα με τον αλγόριθμο Bezier.

Το μοντέλο που προέκυψε από την εφαρμογή της ανωτέρω περιγραφείσας διαδικασίας απεικονίζεται στην εικόνα 5-14, όπου:

- ως μπλε ελλείψεις συμβολίζονται τα εισαγόμενα δεδομένα (input)
- ως πράσινες ελλείψεις τα εξαγόμενα αποτελέσματα (output) και
- ως κίτρινα ορθογώνια τα χρησιμοποιούμενα εργαλεία.



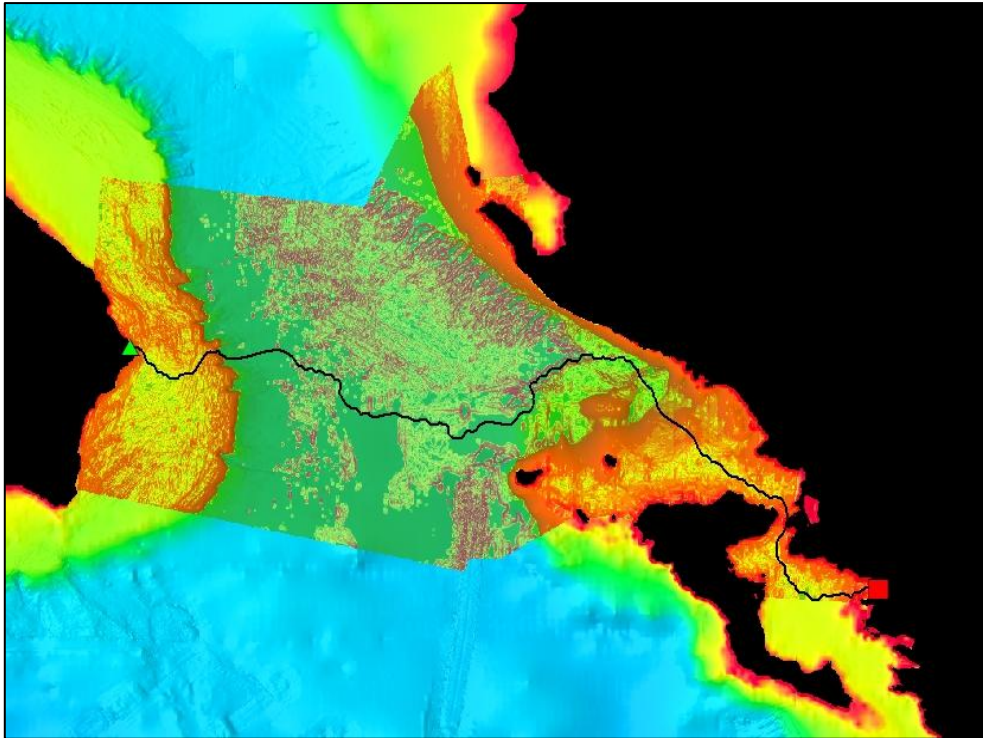
Εικόνα 5-14: Το μοντέλο ροής εργασιών της εξομαλυσμένης χάραξης υποθαλάσσιου καλωδίου.

5.5. Αποτελέσματα μοντέλου

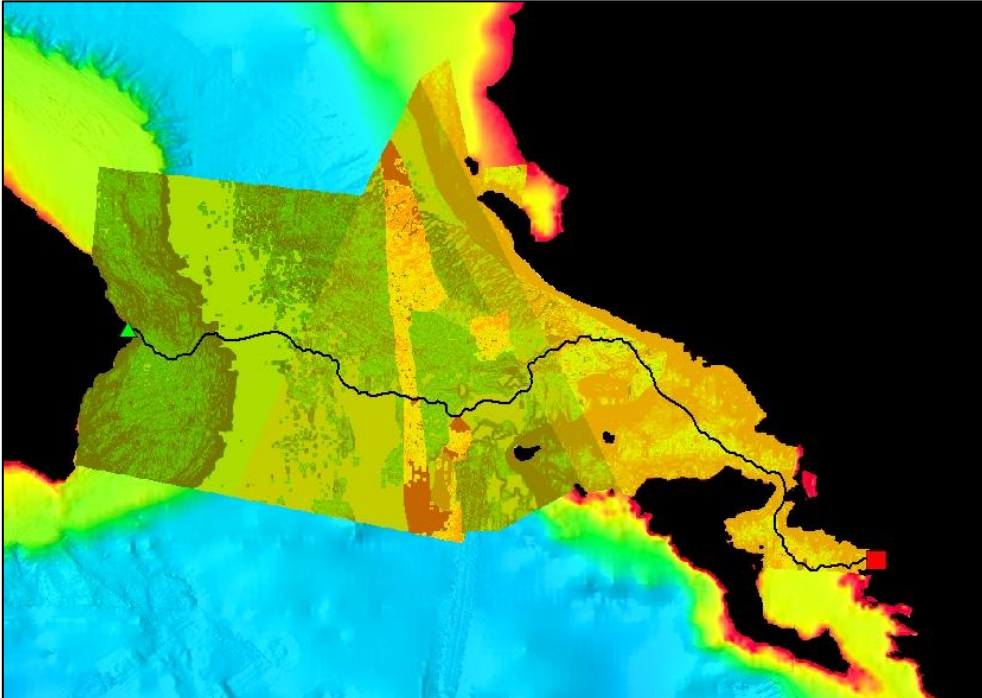
Ως αποτέλεσμα του παραπάνω μοντέλου προέκυψε μία τελική εξομαλυμένη διανυσματική διαδρομή του υποθαλάσσιου καλωδίου, μέσω της σταθμισμένης υπέρθεσης των ορισθέντων κριτηρίων. Η μελέτη εκτελέστηκε με διαφορετικές τιμές βαρών στη σταθμισμένη υπέρθεση, με στόχο την εξαγωγή εναλλακτικών οδεύσεων προς αξιολόγηση.

Στόχος ήταν η αποφυγή των περιοχών όπου εμφανίζονται οι δυσμενέστερες περιοχές ενδεχόμενης ρευστοποίησης και η αποφυγή των απότομων κλίσεων του θαλάσσιου πυθμένα ($>10^\circ$). Αρχικά διερευνήθηκε η περίπτωση των ακραίων καταστάσεων, όπου ένα από τα δύο κριτήρια είναι επιθυμητό να αποφευχθεί εντελώς. Επιλέχθηκε η αποφυγή των απότομων κλίσεων σε ποσοστό 100% και η αποφυγή των περιοχών ενδεχόμενης ρευστοποίησης σε ποσοστό 0%. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη χάραξη αφενός μίας μακροσκελούς διαδρομής καλωδίου, η οποία, αφετέρου, διέσχισε τις περισσότερες περιοχές ενδεχόμενης ρευστοποίησης. Στην εικόνα 5-15 παριστάνονται τα αποτελέσματα της υπέρθεσης και της τελικής όδευσης του καλωδίου. Στην εικόνα 5-16 φαίνεται η τελική όδευση του υποθαλάσσιου καλωδίου με φόντο τις δυνητικές περιοχές ρευστοποίησης και τις περιοχές απότομων κλίσεων.

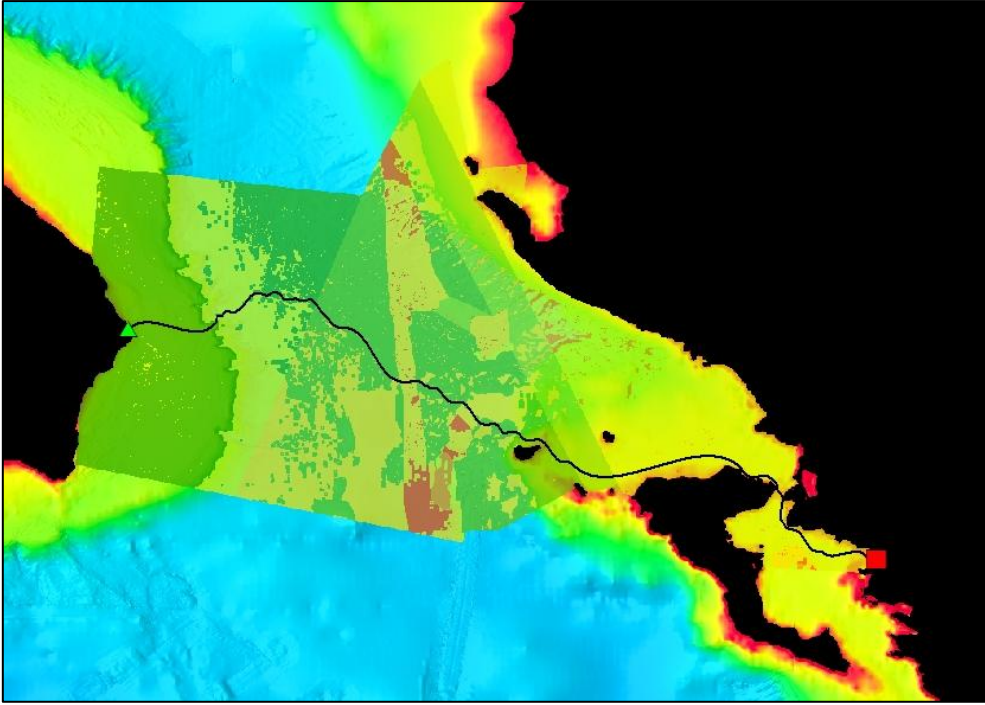
Στη συνέχεια διερευνήθηκε η αντίστροφη περίπτωση, δηλαδή η αποφυγή των απότομων κλίσεων σε ποσοστό 0% και η αποφυγή των περιοχών πιθανής ρευστοποίησης σε ποσοστό 100%. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη χάραξη μίας συντομότερης διαδρομής, από ότι στην πρώτη περίπτωση, στην οποία το καλώδιο απέφευγε εμφανώς τις δυσμενείς περιοχές ενδεχόμενης ρευστοποίησης. Όμως όπως διακρίνεται στην εικόνα 5-18, η όδευση του καλωδίου πραγματοποιείται για αρκετή απόσταση μέσω περιοχών απότομων κλίσεων στην περιοχή βόρεια της Κέρκυρας. Στην εικόνα 5-17 παριστάνονται τα αποτελέσματα της υπέρθεσης και της τελικής όδευσης του καλωδίου. Στην εικόνα 5-18 φαίνεται η τελική όδευση του υποθαλάσσιου καλωδίου με φόντο τις δυνητικές περιοχές ρευστοποίησης και τις περιοχές απότομων κλίσεων.



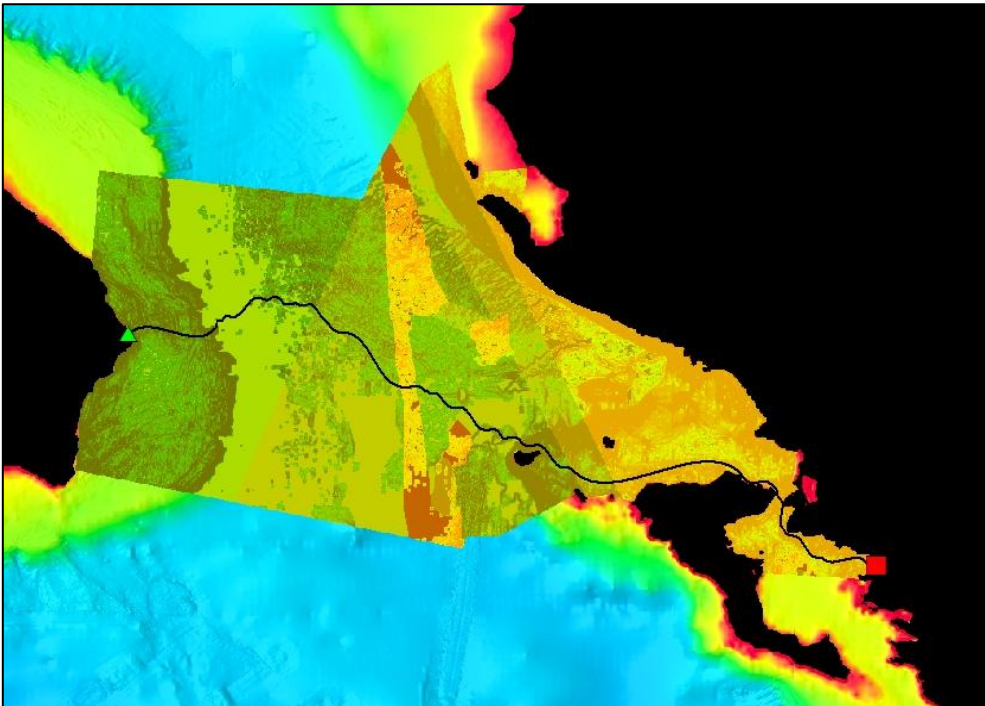
Εικόνα 5-15: Αποφυγή 100% απότομων κλίσεων - 0% ρευστοποίησης: Αποτελέσματα σταθμισμένης υπέρθεσης κριτηρίων και χάραξη όδευσης καλωδίου.



Εικόνα 5-16: Όδευση υποθαλάσσιου καλωδίου στην περίπτωση αποφυγής 100% απότομων κλίσεων - 0% ρευστοποίησης



Εικόνα 5-17: Αποφυγή 0% απότομων κλίσεων - 100% ρευστοποίησης: Αποτελέσματα σταθμισμένης υπέρθεσης κριτηρίων και χάραξη όδευσης καλωδίου.

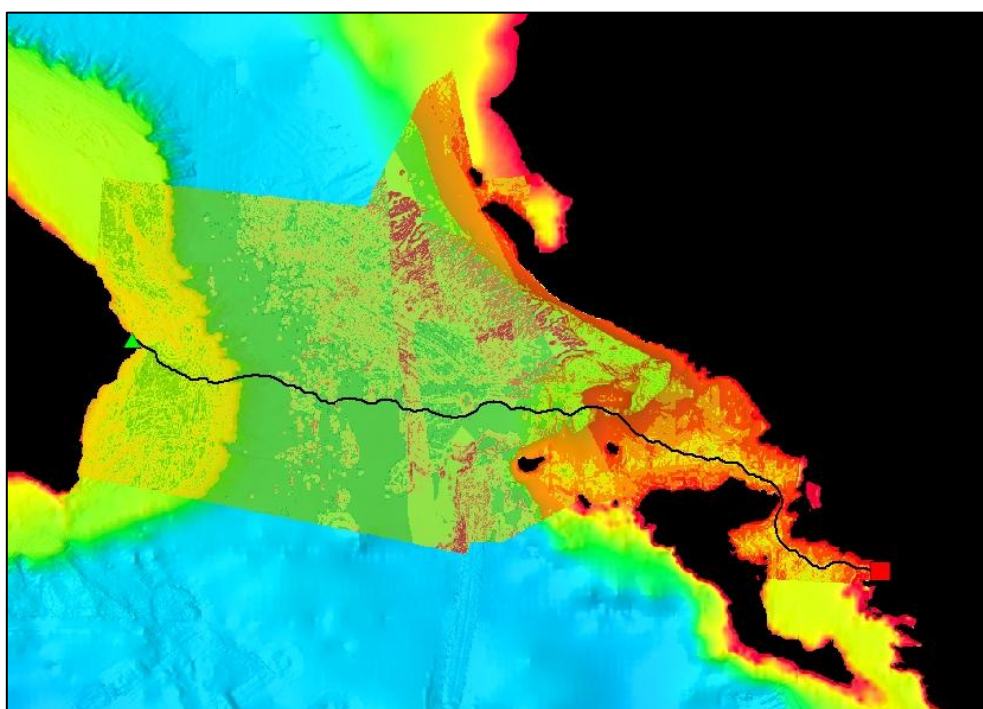


Εικόνα 5-18: Όδευση υποθαλάσσιου καλωδίου στην περίπτωση αποφυγής 0% απότομων κλίσεων - 0% ρευστοποίησης.

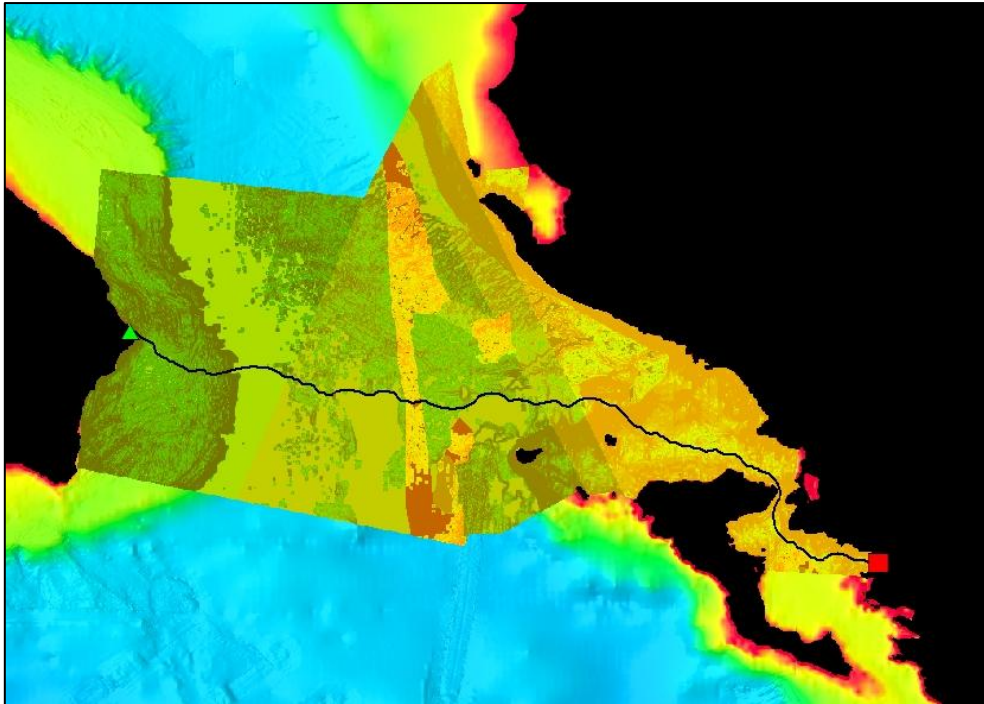
Η πιο ενδιαφέρουσα περίπτωση ήταν εκείνη όπου τέθηκε αποφυγή των απότομων κλίσεων σε ποσοστό 50% και η αποφυγή των περιοχών ρευστοποίησης σε ποσοστό 50%. Το μήκος της τελικής όδευσης του καλωδίου ήταν μικρότερο από ότι στις δύο αρχικές περιπτώσεις. Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 5-20, το καλώδιο κατορθώνει να αποφύγει τις δυσμενείς περιοχές ενδεχόμενης ρευστοποίησης, ενώ παράλληλα αποφεύγει στο μεγαλύτερο μήκος του τις περιοχές όπου εμφανίζονται απότομες κλίσεις πυθμένα. Στην εικόνα 5-19 παριστάνονται τα αποτελέσματα της ισοβαρούς υπέρθεσης των κριτηρίων. Στην εικόνα 5-20 φαίνεται η τελική όδευση του υποθαλάσσιου καλωδίου.

Στην εικόνα 5-21 παριστάνονται και οι τρεις χαράξεις του υποθαλάσσιου καλωδίου με φόντο τον ποιοτικό χάρτη των δεδομένων των πιθανών γεωκινδύνων της θαλάσσιας περιοχής μεταξύ Ελλάδας και Ιταλίας.

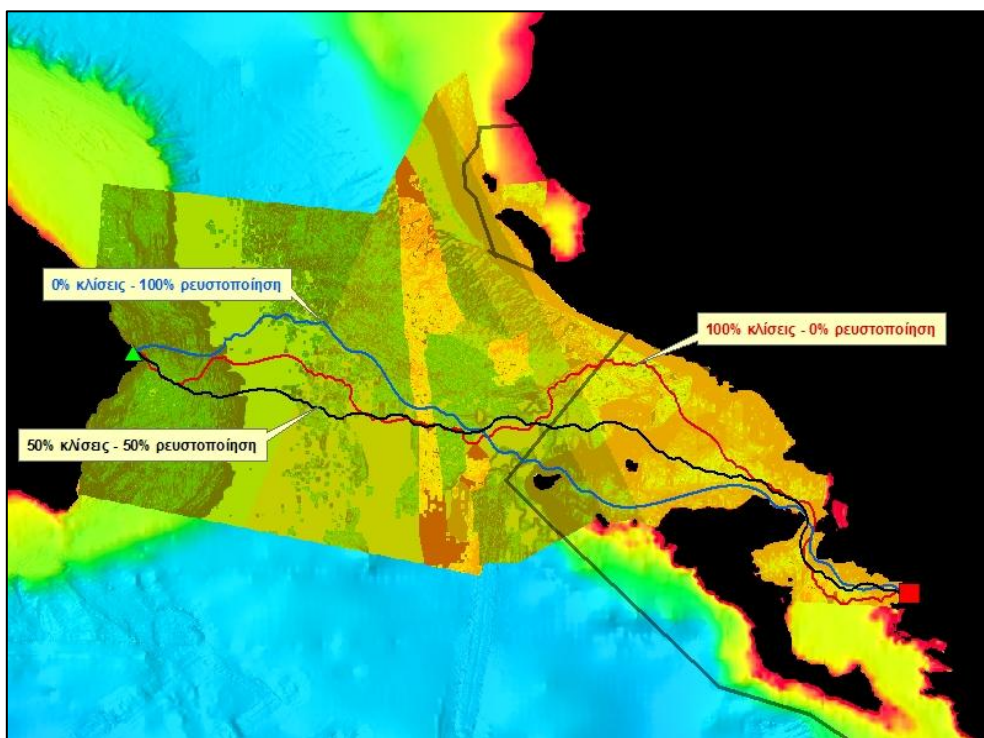
Οι παραπάνω προκύπτουσες εναλλακτικές δρομολογήσεις του καλωδίου υπογραμμίζουν το γεγονός ότι ο μελετητής βάσει των δικών του κριτηρίων μπορεί να καθορίσει το τελικό αποτέλεσμα με μία διαφορετική στάθμιση.



Εικόνα 5-19: Αποφυγή 50% απότομων κλίσεων - 50% ρευστοποίησης: Αποτελέσματα σταθμισμένης υπέρθεσης κριτηρίων και χάραξη όδευσης καλωδίου.



Εικόνα 5-20: Οδευση υποθαλάσσιου καλωδίου στην περίπτωση αποφυγής 50% απότομων κλίσεων - 50% ρευστοποίησης.



Εικόνα 5-21: Συγκεντρωτικός χάρτης με τις τελικές οδεύσεις των υποθαλάσσιων καλωδίων και τους πιθανούς γεωκινδύνους της περιοχής ενδιαφέροντος.

6. Συμπεράσματα και μελλοντικές προεκτάσεις

6.1. Συμπεράσματα και αποτίμηση των αποτελεσμάτων της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δόθηκε έμφαση στη διερεύνηση της δυνατότητας των γεωγραφικών πληροφοριακών συστημάτων στο να διαχειριστούν το πρόβλημα της χάραξης υποθαλάσσιων καλωδίων με κριτήρια που σχετίζονται με πιθανούς υπεράκτιους γεωκινδύνους. Μετά από μια εκτενή αναφορά στην τεχνολογία πόντισης καλωδίων, στη μελέτη της θαλάσσιας περιοχής και στους βασικούς υπεράκτιους γεωκινδύνους, βελτιώθηκε και εφαρμόστηκε ένα ευφυές εργαλείο υποστήριξης λήψης αποφάσεων σε περιβάλλον γεωγραφικών πληροφοριακών συστημάτων. Με τη χρήση του λογισμικού ArcMap παρουσιάστηκε ο τρόπος με τον οποίο οι γεωκίνδυνοι μπορούν να επηρεάσουν την τελική χάραξη ενός καλωδίου, αφού προηγουμένως προσδιορίστηκαν, μέσω απλών μεθόδων, τα όρια των περιοχών πιθανής εμφάνισης των γεωκινδύνων. Ο προσδιορισμός αυτών των περιοχών έγινε βάσει της εφαρμογής μίας αυθαίρετης κλίμακας ποιοτικού κόστους, της οποίας οι τιμές αντιστοιχήθηκαν με την αύξηση του δυνητικά εμφανιζόμενου κινδύνου, όπως προέκυψε από την σταθμισμένη υπέρθεση των επιλεχθέντων κριτηρίων ανάλυσης. Ουσιαστικά, έγινε η προσπάθεια βελτίωσης και εφαρμογής ενός εργαλείου υποστήριξης λήψης αποφάσεων κατά την χάραξη ενός καλωδίου, με βασική εστίαση στην αποφυγή των αναλυθέντων περιοχών.

Κύριος στόχος ήταν η βελτιστοποίηση της χάραξης ενός καλωδίου μέσω ενός εργαλείου υποστήριξης λήψης αποφάσεων, με ιδιαίτερη έμφαση στο θέμα των υπεράκτιων γεωκινδύνων. Κατά την αρχική θεώρηση της ιδέας του εργαλείου, οι προς επίτευξη στόχοι ήταν : ο ορισμός και η αναγνώριση των περιοχών πιθανής εκδήλωσης των γεωκινδύνων, η ποιοτική εκτίμηση του κινδύνου σε κάθε μία εξ αυτών των περιοχών, η βελτιστοποίηση της διαχείρισης και επεξεργασίας των απαραίτητων συλλεχθέντων πληροφοριών – δεδομένων κατά την διαδικασία της χάραξης και, τελικώς, η επιτάχυνση της διαδικασίας επιλογής της χαρακτηρισμένης διαδρομής του καλωδίου μέσω εργαλείου λήψης αποφάσεων. Ειδικότερα, μέσω της ανάπτυξης του εργαλείου σε περιβάλλον ArcMap, επετεύχθησαν η αποτελεσματική αποθήκευση, διαχείριση αλλά και επεξεργασία του διαθέσιμου όγκου πληροφοριών σε βάσεις δεδομένων, καθώς και η μοντελοποίηση της χάραξης του καλωδίου που αποφεύγει αυτόματα τις δυνητικά επικίνδυνες περιοχές, βάσει μίας προκαθορισμένης από τον χρήστη ποιοτικής κλίμακας. Ως αποτέλεσμα της εφαρμογής αυτής της

μεθοδολογίας προέκυψε η τελική διανυσματική χάραξη του καλωδίου, για την οποία προσφέρεται η δυνατότητα εξαγωγής εναλλακτικών διαδρομών για αξιολόγηση, εντός ενός σύντομου διαστήματος εκτέλεσης του εργαλείου (5-10 λεπτών). Επισημαίνεται ότι οι εναλλακτικές διαδρομές προέκυψαν βάσει διαφορετικών σταθμίσεων των κριτηρίων και των επιμέρους τιμών τους, οι οποίες διαφοροποιούνται για κάθε μελετητή βάσει της κριτικής θεώρησής του. Πέραν αυτών, όμως, η έλλειψη των απαραίτητων λεπτομερών δεδομένων, λόγω περιορισμένης διαθεσιμότητας, και της απαραίτητης μαθηματικής διαδικασίας οδήγησε στην αδυναμία ορισμού μίας ποσοτικής κλίμακας εκτίμησης του κινδύνου. Επιπρόσθετα, δεν υπήρξαν διαθέσιμα δεδομένα για την σύγκριση τους με τα τελικά αποτελέσματα, αφήνοντας ένα κενό στην επιβεβαίωση της ορθότητάς τους.

Εκτός των στόχων που δεν επετεύχθησαν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής, η μεθοδολογία της παρούσας διπλωματικής, όπως αναπτύχθηκε βάσει του διαθέσιμου λογισμικού και δεδομένων, παρουσίασε κάποιους περιορισμούς λειτουργικής φύσης. Αυτοί πρέπει να επισημανθούν και είναι οι εξής:

- Απαίτηση μεγάλου όγκου δεδομένων, καθιστώντας δυσκολότερη την εύρεση όλων των προαπαιτούμενων
- Άμεση σύνδεση ακρίβειας αποτελεσμάτων με την ακρίβεια των εισαγόμενων δεδομένων, με κύριο παράδειγμα τις δοθείσες διαστάσεις κελιού του βαθυμετρικού μοντέλου πυθμένα
- Απλοποιημένη θεώρηση των βασικών γεωκινδύνων, λόγω έλλειψης δεδομένων και κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων προς εφαρμογή
- Απώλεια πληρότητας, λόγω απώλειας δεδομένων για την προσθήκη και άλλων γνωστών γεωκινδύνων στη διαδικασία
- Απώλεια ποσοτικής εκτίμησης του γεωκινδύνου

6.2. Μελλοντικές προεκτάσεις μεθοδολογίας

Οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες για την υποστήριξη στην λήψη αποφάσεων κατά την χάραξη υποθαλάσσιων καλωδίων αναδεικνύουν την μεγάλη σημασία της ενεργούς συμμετοχής των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων στην διαδικασία. Ειδικότερα, παρουσιάστηκε ένα πρώιμο στάδιο του εργαλείου υποστήριξης λήψης αποφάσεων, που αποσκοπεί στην βελτιστοποίηση της χάραξης, με σκοπό την διερεύνηση των προσφερόμενων δυνατοτήτων προσάρτησης και

επεξεργασίας δεδομένων σε ένα Γεωγραφικό Πληροφοριακό Σύστημα. Η διερεύνηση αυτή αποκάλυψε ένα μέρος των μελλοντικών προοπτικών του, όπως αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Σύνδεση εργαλείου και παγκόσμιου συστήματος θέσης (GPS):** Ουσιαστικά, το αναπτυχθέν εργαλείο μπορεί να συνδεθεί με σταθμούς μέτρησης συντεταγμένων, οι οποίοι θα το τροφοδοτούν με την απαραίτητη χωρική πληροφορία.
- **Σύνδεση με συστήματα επιτόπιων μετρήσεων και εγκαταστάσεις παρακολούθησης:** Μπορεί να λαμβάνει απευθείας μετρήσεις από κλισιόμετρα, επιταχυνσιογράφους και αισθητήρες παραμόρφωσης, με σκοπό τον καθορισμό των αιτίων μίας φθοράς της κατασκευής, αλλά και των συνεπειών της σε αυτή.
- **Σύνθεση ενός «ευφυούς» εργαλείου:** Μετά τη συλλογή του απαραίτητου μεγάλου όγκου δεδομένων και την επεξεργασία τους, μπορεί να εφαρμοστεί μία αυτόματη μεθοδολογία εκτίμησης της ποσοτικής κλίμακας του ρίσκου. Ειδικότερα, η εκτίμηση του ρίσκου θα συμπεριελάμβανε την πιθανότητα εμφάνισης των βασικών γεωκινδύνων και τις πιθανές επιπτώσεις τους στην κατασκευή.
- **Σύνδεση με εξωτερικά υπολογιστικά εργαλεία:** Με βάση τα δεδομένα του Γεωγραφικού Πληροφοριακού Συστήματος υπάρχει δυνατότητα να αναπτυχθούν αυτόματα αρχεία δεδομένων (input files) τα οποία θα χρησιμοποιηθούν από ένα ή περισσότερα εξωτερικά υπολογιστικά εργαλεία ποσοτικής εκτίμησης του γεωκινδύνου (π.χ. μετακινήσεις ιζημάτων) και ενδεχομένως της συνεπακόλουθης καταπόνησης του καλωδίου (π.χ. επίπεδα παραμόρφωσης). Τα αποτελέσματα του εξωτερικού υπολογιστικού εργαλείου (output files) θα τροφοδοτούν το αρχικό μοντέλο και θα βελτιώνουν την ακρίβεια της πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Βιβλιογραφία

ABB, 2016. *ABB*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://new.abb.com/systems/hvdc/references/italy---greece-hvdc-link>

[Πρόσβαση 2016].

ABS, 2016. *Guidance notes on subsea pipeline route determination*. Houston: American Bureau of Shipping.

Abu-Hamdeh N H et al., 2000. Soil Thermal Conductivity: Effects of Density, Moisture, Salt Concentration, and Organic Matter. *Soil Science Society of America Journal*, Issue 64, p. 1285–1290.

Allan, P. G., 2001. *Hydrographic Information and the Submarine Cable Industry*. Norwich, s.n.

ArcGIS Help, 2016. *ArcGIS Resources*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: www.help.arcgis.com

[Πρόσβαση 2016].

ArcGIS Resource Center, 2012. *ArcGIS Help Library*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

http://help.arcgis.com/EN/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#Welcome_to_the_ArcGIS_Help_Library

[Πρόσβαση 2016].

Assodivers, 2012. *assodivers underwater contractors*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://www.assodivers.gr/en/projects/2012/thasos-keramoti/>

[Πρόσβαση 2016].

Berthelsen, G., 2008. *High Reliability – Low Cost Submarine cable Deployment*.

[Ηλεκτρονικό]

Available at: http://www.subtelforum.com/articles/wp-content/wfn_40.pdf

Bishop, A., 1955. The use of slip circle in the stability analysis of slopes.

Géotechnique, 5(1), p. 7–17.

Boggs, S., 2006. *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. 4 επιμ. s.l.:Prentice-Hall.

Bolt, B., 2005. *Earthquakes*. s.l.:W.H. Freeman.

- Bryn, P. και συν., 1999β. *Slope stability in deep water areas off mid Norway*. Houston, Texas, s.n.
- BSH, 2007. *Bundesamt fur Schifffahrt und Hydrographie*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Vorhersagen/Gezeiteiten/811.jsp>
- Bugge, T., Belderson, R. & Kenyon, N., 1998α. The Storrega slide. *Phil. Trans. Royal Soc.*, 325(1586), p. 357–388.
- Burrough, P., 1986. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assesment*. Oxford: Oxford University Press.
- Calder, B. R., 2006. On the Uncertainty of Archive Hydrographic Data Sets. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, April, Issue 31, p. 249–265.
- Camerlenghi, A. και συν., 1995. Geophysical Evidence of Mud Diapirism on the Mediterranean Ridge Accretionary Complex. *Marine Geophysical Researches*, Τόμος 17, pp. 115-141.
- Campbell, K., Humphrey, G. & Little, R., 2008. *Modern deepwater site investigation: getting it right the first time*. Houston, s.n.
- Canadian Seabed Research Ltd, 2007. *Wolfe Island Cable Route Survey*.
[Ηλεκτρονικό]
Available at:
http://www.canhydro.com/projects/wolfeislandwind/project_docs/CdnSeabed_Report/WI_CdnS aBed Report_Ch4&5.pdf
- Christian, J., 2003. Geotechnical engineering reliability: how well do we know what we are. *J. Geotech. Engng*, Τόμος 10, p. 985–1003.
- Cigré Working Group 21.06, 1986. *Methods to Prevent Mechanical Damage to Submarine Cables*. s.l., s.n.
- Clukey, E., Israel, K., Jones, C. & Ziegler, C., 2007. *Pipeline Risk Assessment in Deep-Sea Furrow Regions*. s.l., s.n.
- Clukey, E., Jackson, C., Vermersch, J. & Lamb, W., 1980. *Natural Densification by Wave Action of Sand Surrounding a Buried Offshore Pipeline*. s.l., s.n.
- CMS, 2013. *County of San Bernardino Geographic Information Services*.
[Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://gis.sbcounty.gov>

[Πρόσβαση 2016].

Coleman, J., Prior, D. & Garrison, L., 1978α. *Submarine Landslides in the Mississippi River Delta*. s.l., s.n.

Dade, B. & Huppert, H., 1998δ. Long-runout rockfalls. *Geology*, 26(9), p. 803–806.

de Blasio, F., Elverhøi, A., Engvik, L. & Issle, 2006ε. Understanding the high mobility of subaqueous debris flows. *Norw. J. Geol.*, Τόμος 86, p. 275–284.

Dobie, T. G., 2003. *Critical Significance of Human Factors in Ship Design*. USA, Large Lakes Observatory, University of Minnesota.

Edgers, L. & Karlsrud, K., 1982β. *Soil flows generated by submarine slides case studies and consequences*. Cambridge, Massachusetts, s.n., p. 425–437.

Elverhøi, A. και συν., 2005α. Emerging insights into the dynamics of submarine debris flows. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Issue 5, p. 633–648.

EMODnet, 2016. *European Marine Observation and Data Network*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://portal.emodnet-bathymetry.eu/mean-depth-full-coverage>

[Πρόσβαση 2016].

EuroAsia Interconnector, 2016. *EuroAsia Interconnector*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://www.euroasia-interconnector.com/Index.aspx>

[Πρόσβαση 2016].

Felix, M. & Peakall, J., 2006. Transformation of debris flows into turbidity currents: mechanisms inferred from laboratory experiments. *Sedimentology*, Τόμος 53, pp. 107-123.

Fellenius, W., 1927. *Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohasion (Adhasion) und unter Annahme Kreiszyklindrischer Gleitflächen (Earth stability calculations assuming friction and cohesion on circular slip surfaces)*. Berlin: W. Ernst.

Geographic data models, 2014. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://gis4uo.blogspot.gr/2014/04/geographic-data-models.html>

[Πρόσβαση 2016].

- Gilbert, R. και συν., 2007β. *Impact of Hurricane-Induced Mudslides on Pipelines*. s.l., s.n.
- Hampton, M., Lee, H. & Locat, J., 1996γ. Submarine landslides. *Rev. Geophys.*, 34(1), p. 33–59.
- Heim, A., 1932. Στο: *Bergsturz und Menschenleben*. Zurich, Switzerland: Fretz und Wasmuth.
- Henkel, D., 1970. The role of waves in causing submarine landslides. *Geotechnique*, 20(1), pp. 75-80.
- Houtz, R. E. et al., 1962. Turbidity Current at Kadavu Passage, Fiji. *Geological Magazine*, Vol.99, No. 1, pp. 57-62.
- Huang, X. & Garcia, M., 1999β. Modeling of non-hydroplaning mudflows on continental slopes. *Mar. Geol.*, Issue 154, p. 131–142.
- Huhnerbach, V. & Masson, D., 2004β. Landslides in the North Atlantic and its adjacent seas: an analysis of their morphology, setting and behaviour. *Marine Geology*, 213(1-4), pp. 343-362.
- Hvidsten S. et al, 2004. *HV Cable Design Applicable for Direct Electrical Heating of Very Long Flowlines*. Kobe, Japan, s.n.
- International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2005. *Geotechnical & Geophysical Investigations for Offshore and Nearshore Developments*. s.l.:Swan Consultants Ltd.
- Janbu, N., 1973. *Slope Stability Computations in Embankment Dam Engineering: Casagrande Memorial Volume*. New York: John Wiley.
- Jeanjean, P. και συν., 2005. *An operator's perspective on offshore risk assessment and geotechnical design in geohazard prone areas*. Perth, Australia, s.n.
- Jewell, R. & Khorshid, M., 2000β. *A historical perspective, 1988 to 1999*. s.l., K.A Al-Shafei, Balkema, pp. 305-312.
- Kolk, H., 2000γ. *Deep foundations in calcareous sediments*. s.l., K.A. Al-Shafei, Balkema, pp. 313-344.
- Kvalstad, T., 2007. *What is current "Best Practice" in offshore geohazard investigations? A state-of-the-art review*. Houston, Texas, s.n.

- Kvalstad, T., Nadim, F. & Harbitz, C., 2001. *Deepwater geohazards: Geotechnical concerns and solutions*. Houston, Texas, s.n.
- Locat, J. & Demers, D., 1988. Viscosity, yield stress, remolded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays. *Can. Geotech. J.*, Issue 25, p. 799–806.
- Longley, P., 2010. *Συστήματα και Επιστήμη Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS)*. Αθήνα: Κλειδάριθμος.
- Lyll, G., 2000. Minimum Standards for Subsea Cable Route Surveys. *Underwater Magazine*, November/December.
- Marathon Data Systems, 2016. *Marathon Data Systems*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://www.marathondata.gr/arcgis.htm>
[Πρόσβαση 2016].
- Masson, D. και συν., 2006γ. Submarine landslides: processes, triggers, and hazard prediction. *Phil. Trans. R. Soc.*, pp. 2009-2039.
- Mesri, G. & Shahien, M., 2003. Residual shear strength mobilized in first-time slope failures. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129(1), p. 12–31.
- Mildenhall, J. & Fowler, S., 2001. Mud volcanoes and structural development of Shah Deniz. *J. Petrol. Sci. Eng.*, Τόμος 28, pp. 189-200.
- Mirza, S., Skinner, J., Mathea, A. & Ekstrom, L., 2006α. *Hurricane Ivan – Pipeline Damage, Integrity Assessment, and On-Bottom Stability Observations*. s.l., s.n.
- Mitchell, J. & Soga, K., 2005. *Fundamentals of Soil Behavior*. s.l.:Wiley.
- Morgenstern, N. & Price, V., 1965. The analysis of the stability of general slip circles. *Géotechnique*, 15(1), p. 79–93.
- Mulder, T. & Cochonat, P., 1996α. Classification of offshore mass movements. *Journal of Sedimentary Research*, 66(1), pp. 43-57.
- Murff, J., 1987α. Pile Capacity in Calcareous Sediments: State of the Art Review. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 113(GT5), pp. 490-507.
- Nadim, F., Kronic, D. & Jeanjean, P., 2003. *Reliability Method Applied to Slope Stability Problems: Estimating Annual Probabilities of Failure*. Houston, Texas, s.n.

- Niedoroda, A. και συν., 2003. *Analysis of past and future debris flows and turbidity currents generated by slope failures along the Sigsbee Escarpment*. Houston, Texas, s.n.
- Parker, E., Moore, R. & Evans, T., 2008α. *Evaluation of Landslide Impact on Deepwater Submarine Pipelines*. s.l., s.n.
- Peuchen, J. & Rapp, J., 2007. *Logging sampling and testing for offshore geohazards*. Houston, s.n.
- Puzrin, A. & Germanovich, L., 2005β. The growth of shear bands in the catastrophic failure of soils. *Proc. Royal Society, A*(461), p. 1199–1228.
- Puzrin, A., Germanovich, L. & Kim, S., 2004α. Catastrophic failure of submerged slopes in normally consolidated sediments. *Géotechnique*, 54(10), p. 631–643.
- Randolph, M. & Gourvenec, S., 2011. *Offshore Geotechnical Engineering*. s.l.:Spon Press.
- Robinson, A., 2002. *Στοιχεία Χαρτογραφίας*. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π..
- Scheidegger, A., 1973α. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mech.*, p. 231–236.
- Schofield, A. & Wroth, C., 1968. *Critical state soil mechanics*. London: McGraw-Hill.
- Shepherd K. et al, 2007. Observatory Cable Laying Systems. *Oceans 2007*, September 29 - October 4, pp. 1-5.
- Slejko, et al., 1999. Seismic hazard assessment for Adria. *Annals of Geophysics*, 42(6), p. 1085 – 1105.
- Templeton, J. I., Murff, J. & Goodwin, R., 1985β. *Evaluating Soils and Hazards in the Mississippi Canyon*. s.l., s.n.
- The CIGRE Paper , 1986. *Methods to Prevent Mechanical Damage to Submarine Cables*. Paris, France, s.n., pp. 21-12.
- Waltham, A., 2000. *Towards a classification of karst ground conditions*. s.l., Balkema, pp. 443-453.

Wiki GIS, 2011. *Wiki.GIS.com*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://wiki.gis.com/wiki/index.php/ArcToolbox>
[Πρόσβαση 2016].

Wikipedia - Jenks natural breaks optimization, 2016. *Wikipedia*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: www.en.wikipedia.org/wiki/Jenks_natural_breaks_optimization
[Πρόσβαση 2016].

Wikipedia - Submarine landslide, 2016. *Wikipedia*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Submarine_landslide
[Πρόσβαση 2016].

Wikipedia- SQL, 2016. *Wikipedia*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/SQL>
[Πρόσβαση 2016].

Willis, N., Parker, E. & Johnson, W., 2008. *Geohazard Assessment and Avoidance on the GAZA Marine Subsea Development*. s.l., s.n.

Worzyk, T., 2009. *Submarine Power Cables*. Berlin: Springer.

Yamamoto, T. et al., 1964. Matsushima Oil-filled Submarine Cable Line Construction. *Sumitomo Electric Technical Review*, No. 4, July.

Zakeri, A. & Nadim, F., 2008β. *Submarine Debris Flow Impact on Pipelines: Drag Forces, Mitigation and Control*. s.l., s.n.

ΑΔΜΗΕ, 2014. *Ηλεκτρική Διασύνδεση των Κυκλάδων με το Σύστημα Μεταφοράς της Ηπειρωτικής Χώρας*, s.l.: s.n.

Αργιαλάς, Δ., 1998. *Ψηφιακή Τηλεπισκόπηση*. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π..

Βικιπαίδεια- Θεωρία γράφων, 2016. *Βικιπαίδεια*. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%98%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%AF%CE%B1_%CE%B3%CF%81%CE%AC%CF%86%CF%89%CE%BD
[Πρόσβαση 2016].

Βικιπαίδεια- Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, 2016. *Βικιπαίδεια*.
[Ηλεκτρονικό]
Available at: www.el.wikipedia.org/wiki/Σύστημα_Γεωγραφικών_Πληροφοριών

Κουτσόπουλος, Κ., 2009. *Πραγματεία Ανάλυσης Χώρου-Τόμος Α': Θεωρία*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.

Ρουσάκης, Γ. Π., 2015. *Γεωλογικές- γεωμορφολογικές έρευνες για την ασφαλή πόντιση υποθαλάσσιων καλωδίων και αγωγών*. s.l.:s.n.

Σωμαράς, Χ., 2013. *Σωμαράς Χρήστος- Προσωπικός Δικτυακός τόπος*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <http://xsomaras.somweb.gr/>, 2013 [Πρόσβαση 2016].

Τσουγκράνης, Σ., 2015. *Ανάπτυξη εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων σε περιβάλλον Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων για την αποφυγή γεωκινδύνων κατά τη χάραξη αγωγών μεγάλου μήκους*. Διπλωματική Εργασία επιμ. Αθήνα: ΕΜΠ.

Τσούλος, Λ., 2015. *Χαρτογραφική Σύνθεση & Απόδοση σε Ψηφιακό Περιβάλλον*. s.l.:Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα.