



ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:

“ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ”

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

# ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡΑΚΤΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ

---

ΠΑΠΑΜΑΛΑΜΑ ΕΙΡΗΝΗ-ΧΡΥΣΟΒΑΛΑΝΤΟΥ

Επιβλέπων Καθηγητής: Εφραιμίδης Γεώργιος

ΙΟΥΝΙΟΣ 2019

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Εφραιμίδης Γεώργιος,

Επίκουρος Καθηγητής

Καλλιόγλου Πολυξένη,

Λέκτορας

Γραμμένος Θεοφάνης

Επίκουρος Καθηγητής

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Εφραιμίδη για τις χρήσιμες παρατηρήσεις, καθοδήγηση και υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους ώστε να ολοκληρωθεί με επιτυχία η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας του μεταπτυχιακού προγράμματος. Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα δύο μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής την Λέκτορα κα. Πολυξένη Καλλιόγλου και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Θεοφάνη Γραμμένο για τις πολύτιμες παρατηρήσεις τους και την βοήθειά τους. Θα ήθελα, τέλος, να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξη της όλο αυτό το διάστημα μέχρι την ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

© Copyright Protected 2019, Papamalama E.

Η έγκριση της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2). Οι απόψεις και τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας ανήκουν αποκλειστικά στη συγγραφέα.

**Σελίδα 3 από 112**

# ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡΑΚΤΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών *‘Ανάλυση και Σχεδιασμών Κατασκευών Ενεργειακών Υποδομών’* πραγματεύεται με το φαινόμενο των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων καθώς και την επίδρασή τους στις υπεράκτιες κατασκευές ενεργειακών υποδομών. Αρχικά, στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στα φαινόμενα βαρυτικών ροών και ειδικότερα στο φαινόμενο της κατολίσθησης. Ειδικότερα, περιγράφεται το φαινόμενο των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων και η αλληλεπίδρασή τους με τον θαλάσσιο πυθμένα και άλλους γεωκινδύνους. Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι διάφοροι μηχανισμοί γένεσης υποθαλάσσιων κατολισθήσεων, οι διαφορές με τις χερσαίες κατολισθήσεις καθώς και η επίδραση των γεωμορφολογικών παραγόντων στα υποθαλάσσια εδάφη. Στο κεφάλαιο 3, αναφέρονται μελέτες περιπτώσεων (case studies), από τις σημαντικότερες υποθαλάσσιες κατολισθήσεις που έχουν συμβεί στην υφήλιο. Στο κεφάλαιο 4, περιγράφονται αρχικά οι υπεράκτιες υποδομές και στη συνέχεια η επίδραση που επιφέρουν σε αυτές οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις. Τέλος περιγράφονται οι μαθηματικές προσεγγίσεις και τα μοντέλα που εφαρμόζονται για την αντιμετώπιση των αναπτυσσόμενων φορτίσεων.

# **SUBMARINE LANDSLIDES AND OFFSHORE CONSTRUCTIONS OF ENERGY INFRASTRUCTURES**

## **ABSTRACT**

The present diploma thesis of the postgraduate study program "Analysis and Design of Energy Infrastructure Constructions" deals with the phenomenon of submarine landslides as well as their impact on offshore constructions of energy infrastructure. Initially, Chapter 1 introduces the phenomena of gravitational flows and especially the phenomenon of landslides. In particular, it is described the phenomenon of submarine landslides and their interaction with the seabed and other geohazards. Subsequently, Chapter 2 describes the various mechanisms of submarine landslides, their differences with land-based landslides as well as the effect of geomorphological factors on the seabed soils. On chapter 3, there are some references and case studies of the most important submarine landslides that had ever happened on Earth. On chapter 4, initially there is a description of the offshore infrastructures and afterwards, the impact that submarine landslides have on them. Finally, there is a description of some mathematical approach methods and models used to deal with the generated loads on the offshore constructions.

## Πίνακας Περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	2
ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡΑΚΤΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ .....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	4
SUBMARINE LANDSLIDES AND OFFSHORE CONSTRUCTIONS OF ENERGY INFRASTRUCTURES .....	5
ABSTRACT .....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	9
ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ .....	9
2.1 Ο ΘΑΛΑΣΣΙΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑΣ .....	9
2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΠΥΘΜΕΝΑ - ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ .....	11
2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΩΝ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ .....	14
2.4 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ .....	17
2.5 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΙ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ .....	20
2.6 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΝΑΡΞΗΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ .....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	45
3. CASE STUDIES .....	45
3.1 ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ STOREGGA .....	45
3.2 ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ FINNEIDFJORD .....	49
3.3 ΚΟΛΠΟΣ ΤΟΥ ΜΕΞΙΚΟΥ – ΧΑΡΑΔΡΑ SIGSBEE .....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	56
Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥΣ ΣΤΙΣ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ .....	57
4.1 ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΕΞΕΔΡΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ .....	57
4.2 ΑΓΩΓΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ .....	80
4.3 ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΑ ΚΑΛΩΔΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ .....	91
4.4 ΑΙΟΛΙΚΑ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΑΡΚΑ .....	92

4.4.1 ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΗΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ .....	96
4.5 ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΣΤΙΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΥΠΟΔΟΜΕΣ ΛΟΓΩ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΔΡΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΡΑΣΗΣ ΡΕΥΜΑΤΩΝ.....	97
4.5.1 ΒΑΡΥΤΙΚΕΣ ΡΟΕΣ ΜΑΖΑΣ.....	99
4.5.2 ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ .....	103
4.5.3 ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ .....	104
4.5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΑΓΩΓΩΝ .....	105
ΕΠΙΛΟΓΟΣ / ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	106
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	108
ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	109



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κατολίσθηση είναι ένα έντονο γεωλογικό φαινόμενο, μια γεωλογική καταστροφή, ένας γεωκίνδυνος που απαντάται τόσο στα χερσαία όσο και στα υποθαλάσσια περιβάλλοντα. Ουσιαστικά πρόκειται για τη μετακίνηση, την ολίσθηση, την ανατροπή, τη ροή και γενικότερα τη μεταφορά βραχωδών και εδαφικών μαζών, υπό την επίδραση της βαρύτητας [1].

Επειδή το φαινόμενο της κατολίσθησης εντάσσεται σε ένα ευρύ πεδίο βαρυτικών ροών μάζας, είναι αναγκαίος ένας ποσοτικός ορισμός της κατολίσθησης, ο οποίος έχει ως εξής: στη κατολίσθηση, ο κύριος όγκος του μετακινούμενου υλικού, πρέπει να έχει πυκνότητα τουλάχιστον 10% μεγαλύτερη από τη πυκνότητα του νερού [2].

Οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις και γενικότερα οι υποθαλάσσιες βαρυτικές μετακινήσεις μαζών διαφέρουν ως προς τη μηχανική τους ισορροπία, τη κινηματική και τη δυναμική τους σε σχέση με τις χερσαίες, ενώ ακόμη δεν έχουν γίνει κατανοητοί όλοι οι μηχανισμοί που σχετίζονται με την έναρξη του φαινομένου αυτού [3].

Ο κύριος λόγος που οι κατολισθήσεις αποτελούν ένα εντατικό αντικείμενο μελέτης από άλλα πεδία επιστημών είναι η αναγκαιότητα αφενός της κατανόησης του φαινομένου και του προσδιορισμού του γεωλογικού υποβάθρου του και αφετέρου η πρόληψη, η αποτελεσματική αντιμετώπιση και η μείωση, αν όχι εξάλειψη, των καταστροφών και της επικινδυνότητας που αυτές επιφέρουν.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Στη παρούσα εργασία συνδυάζονται οι επιστημονικές γνώσεις της τεχνικής και θαλάσσιας γεωλογίας, της γεωτεχνικής μηχανικής και της αλληλεπίδρασης ρευστών με υποθαλάσσιες και υπεράκτιες κατασκευές, καθώς και οι βασικές αρχές της μηχανικής και της ρευστομηχανικής, ούτως ώστε να παρουσιαστούν οι μηχανισμοί που διέπουν τις υποθαλάσσιες κατολισθήσεις. Το φαινόμενο των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων, ανήκει στην κατηγορία των υποθαλάσσιων γεωκινδύνων, οι οποίοι λαμβάνουν χώρα στο θαλάσσιο περιβάλλον και έχουν άμεση επίπτωση στο πυθμένα της θάλασσας και κατ' επέκταση στις υπεράκτιες και υποθαλάσσιες κατασκευές ενεργειακών υποδομών.

#### 2.1 Ο ΘΑΛΑΣΣΙΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑΣ

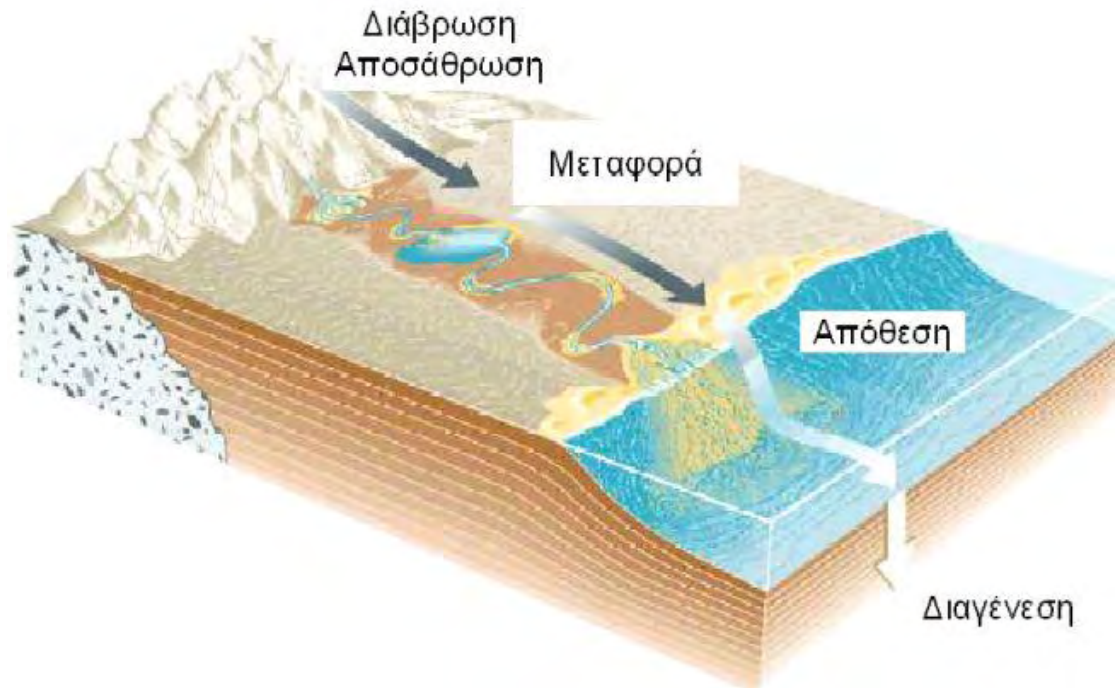
Στην υποθετική περίπτωση όπου ο υδάτινος όγκος θα μπορούσε να αφαιρεθεί ολόκληρος από την υδρόγειο σφαίρα, τότε θα αποκαλυπτόταν ο θαλάσσιος πυθμένας, ο οποίος θα φαινόταν πολύ διαφορετικός από το τοπίο που συνηθίζεται πάνω στην χερσαία επιφάνεια της Γης. Το πρώτο πράγμα που θα παρατηρούσε κανείς είναι ένα πιο ήπιο τοπίο, με μεγάλες επίπεδες επιφάνειες, ενώ τοπικά θα εμφανίζονταν λόφοι με κλίσεις μεγαλύτερες των 5°. Εξαιρέση θα αποτελούσαν τα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών όπου εκεί θα παρατηρούνταν πολύ έντονες διακυμάνσεις της μορφολογίας του πυθμένα με πολύ μεγάλες κλίσεις και βάρη. Η επιφάνεια του θαλάσσιου πυθμένα θα εμφάνιζε μια χαρακτηριστική επικράτηση κλαστικών ιζηματογενών πετρωμάτων, σύμφωνα με την διαδικασία της απόθεσης φερτών υλικών από περιοχές της ξηράς και της ακολουθούμενης ιζηματογένεσης.[2]

Ιζηματογενή πετρώματα είναι εκείνα τα οποία σχηματίζονται από την απόθεση (ή καταβύθιση) υλικών που βρίσκονται σε αιώρηση ή διάλυση μέσα σε ένα ρευστό μέσο (νερό ή αέρας) και τη μετέπειτα συμπαγοποίηση των υλικών που αποτέθηκαν. Χαρακτηρίζονται από τη στρώση των υλικών τους σε διαδοχικά επίπεδα και παρουσία απολιθωμάτων, τα οποία βρίσκονται μόνο μέσα σε ιζήματα. Για το σχηματισμό των ιζηματογενών πετρωμάτων λαμβάνουν χώρα οι εξής διεργασίες [4]:

1. Διάβρωση και αποσάθρωση, που είναι οι φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες που υφίστανται τα προϋπάρχοντα πετρώματα με αποτέλεσμα τη καταστροφή τους.
2. Μεταφορά των υλικών που προέκυψαν από την αποσάθρωση, με τον άνεμο και το νερό των ποταμών και των θαλασσών.
3. Απόθεση των υλικών που βρίσκονται σε αιώρηση ή διάλυση. Η απόθεση γίνεται σε διαδοχικά στρώματα.

4. Διαγένεση, που είναι η διαδικασία με την οποία ένα χαλαρό ίζημα μετατρέπεται σε συμπαγές πέτρωμα, με τη βοήθεια της πίεσης των υπερκείμενων στρωμάτων και της φυσικής συνδετικής ύλης.

Στην εικόνα 1 αναπαρίσταται η διαδικασία σχηματισμού ιζηματογενών πετρωμάτων. Στην εικόνα 2 απεικονίζονται οι πυθμένες των Ωκεανών στην περίπτωση που έχει αφαιρεθεί ο υδάτινος όγκος των θαλασσών.



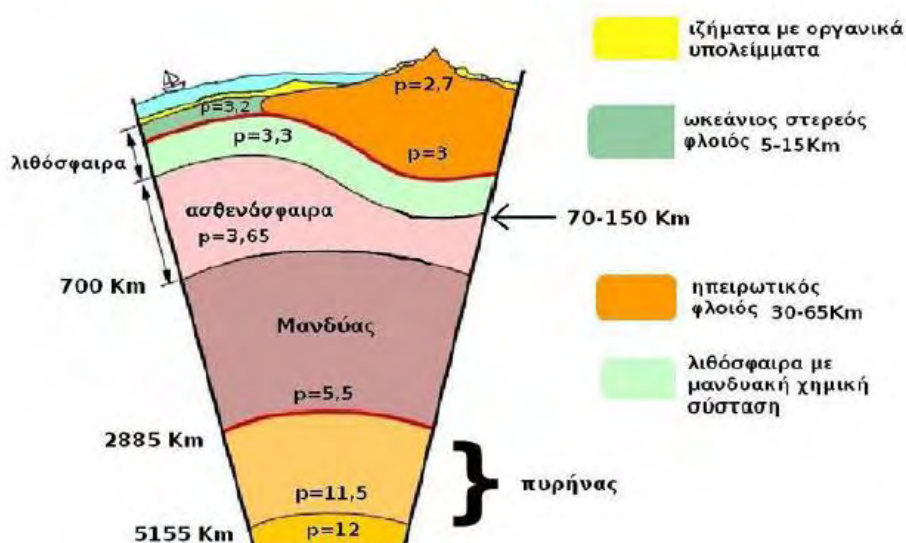
Εικόνα 1. Η διαδικασία σχηματισμού ιζηματογενών πετρωμάτων



Εικόνα 2. Οι πυθμένες των Ωκεανών

## 2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΠΥΘΜΕΝΑ - ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Ο φλοιός της Γης, ο οποίος αποτελεί τμήμα της λιθόσφαιρας, χωρίζεται σε δύο τύπους, τον ωκεάνιο φλοιό με πάχος που κυμαίνεται από 5-15 km και τον ηπειρωτικό φλοιό με σημαντικά μεταβαλλόμενο πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 30-65 km [5]. Στην εικόνα 3 απεικονίζονται η δομή και η σύσταση της γήινης σφαίρας.



Εικόνα 3. Δομή και σύσταση της γήινης σφαίρας.

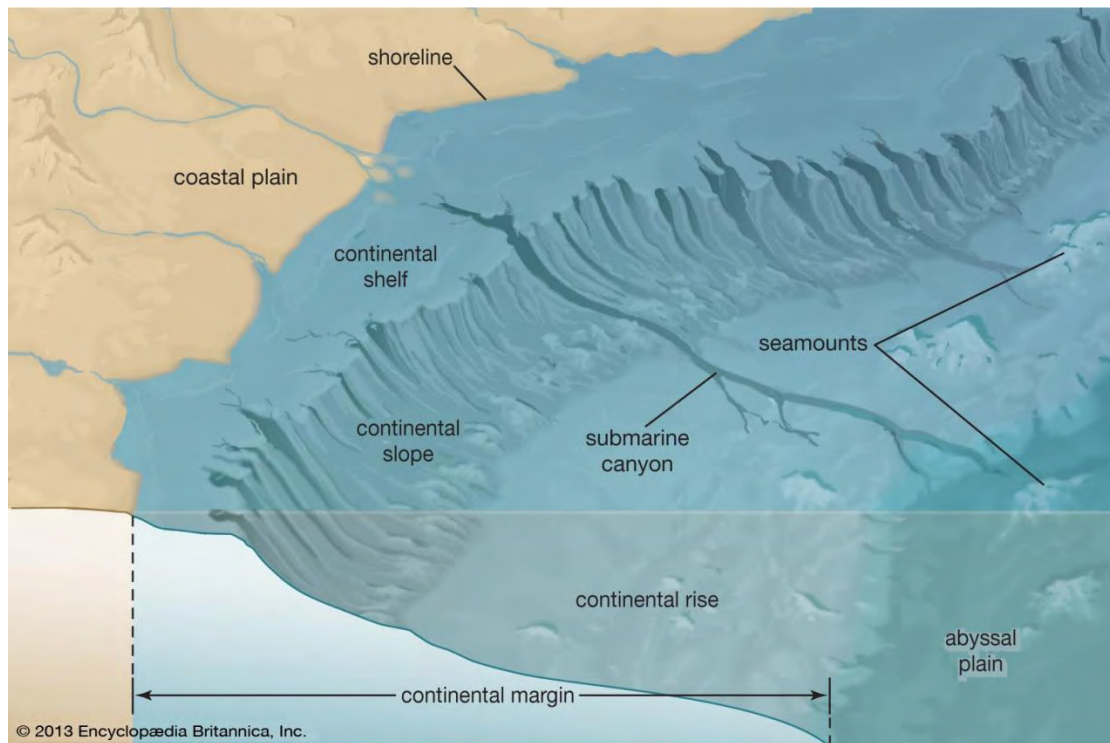
Ο θαλάσσιος πυθμένας χωρίζεται στα εξής κύρια τμήματα [6]:

- ✚ Ηπειρωτική κρηπίδα ή υφαλοκρηπίδα, η οποία είναι η ζώνη πλησίον μιας ηπείρου ή ενός νησιού η οποία εκτείνεται από την κατώτατη στάθμη παλίρροιας ως το βάθος στο οποίο σημειώνεται αξιοσημείωτη αύξηση της κλίσης του πυθμένα, το λεγόμενο ηπειρωτικό κενό, προς μεγαλύτερα βάθη.
- ✚ Ηπειρωτική κατωφέρεια ή υφαλοπρανές, που είναι η κατωφέρεια από την άκρη της υφαλοκρηπίδας προς μεγαλύτερα βάθη. Κύριο χαρακτηριστικό της είναι η έντονη κλίση.
- ✚ Ηπειρωτική ανύψωση, η περιοχή μετά της ηπειρωτικής κατωφέρειας, είναι μια μεταβατική περιοχή με μικρότερη κλίση από το υφαλοπρανές, λόγω της απόθεσης υλικών μέσω των κάννων (χαραδρών).
- ✚ Ωκεάνιες λεκάνες, οι οποίες είναι ουσιαστικά βυθίσματα του θαλάσσιου πυθμένα.

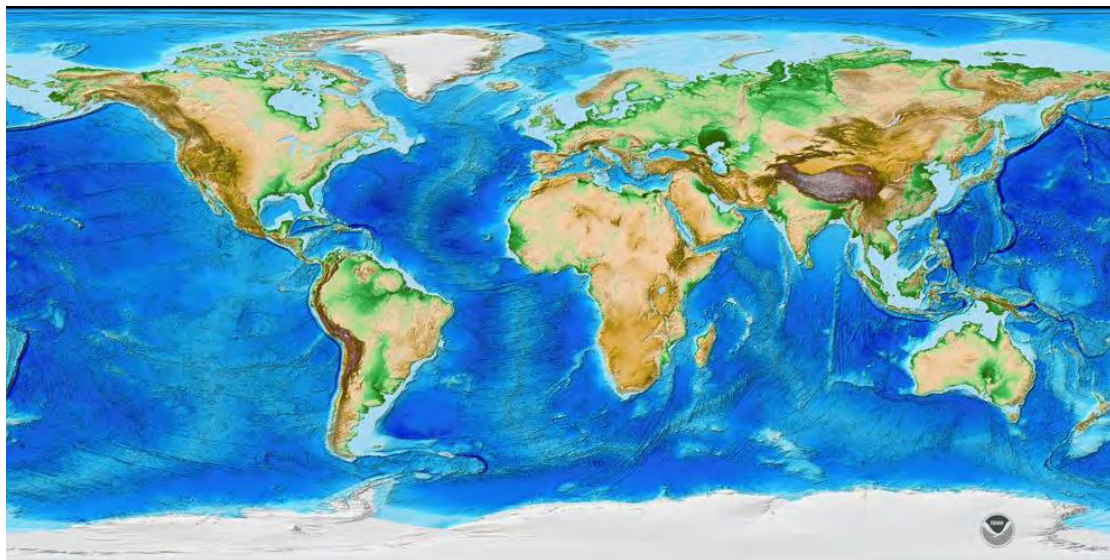
Στις ωκεάνιες λεκάνες συναντώνται οι παρακάτω γεωμορφολογικές δομές:

- Αβυσσικά πεδία, τα οποία είναι ομαλές / επίπεδες περιοχές με πολύ μικρή ή και καθόλου κλίση.
- Θαλάσσια όρη και αβυσσικοί λόφοι, τα οποία είναι μεμονωμένες ανυψώσεις από τον θαλάσσιο πυθμένα.
- Τάφροι, δηλαδή στενά, επιμήκη απότομα βυθίσματα τα οποία προκύπτουν από την ολίσθηση μιας ωκεάνιας πλάκας κάτω από μια ηπειρωτική ή και το αντίστροφο.
- Μέσο-ωκεάνιες ράχες, τα οποία είναι τμήματα από υποθαλάσσιες οροσειρές τεκτονικού τύπου. Λόγω της έντονης ηφαιστειογενούς δράσεώς τους είναι υπεύθυνες για τη εξάπλωση των ωκεάνιων πλακών και την δημιουργία περιθωρίων Ατλαντικού τύπου.
- Εγκάρσια ράχη (sill), που είναι το χαμηλότερο τμήμα μιας ράχης που χωρίζει δύο θαλάσσιες λεκάνες μεταξύ τους ή μία θαλάσσια λεκάνη από τον παρακείμενο ωκεάνιο πυθμένα. Τέτοιου είδους δομές αποτελούν φυσικά θαλάσσια φράγματα που περιορίζουν την κίνηση του νερού μεταξύ των θαλάσσιων λεκανών.
- Τραπεζοειδή Όρη (Guyots), τα όποια είναι υποθαλάσσια όρη και νησιά, ως επί το πλείστον ηφαιστειακής προέλευσης λόγω του μάγματος που εξέρχεται από τις ρηξιγενείς ζώνες (μεσοωκεάνιες ράχες). Σταδιακά απομακρύνονται από τις μεσοωκεάνιες ράχες και καθώς μετακινούνται στην ωκεάνια λιθοσφαιρική πλάκα, βυθίζονται στην ασθενόσφαιρα. Η μορφολογία τους οφείλεται στην δράση των κυματισμών της θάλασσας.
- Ατόλες, οι οποίες ακολουθούν την ίδια πορεία με τα υποθαλάσσια όρη και νησιά, όμως βρίσκονται σε περιοχές όπου είναι δυνατή η ανάπτυξη κοραλλιών. Συνεπώς εάν ο ρυθμός βύθισης του ηφαιστειακού νησιού είναι μικρότερος από τον ρυθμό γένεσης κοραλλιών, τότε τα κοράλλια αναπτύσσονται δημιουργώντας ένα δακτυλιοειδές νησί. Το δακτυλιοειδές αυτό νησί, στο εσωτερικό του εσωκλείει μια εξωτική λιμνοθάλασσα.

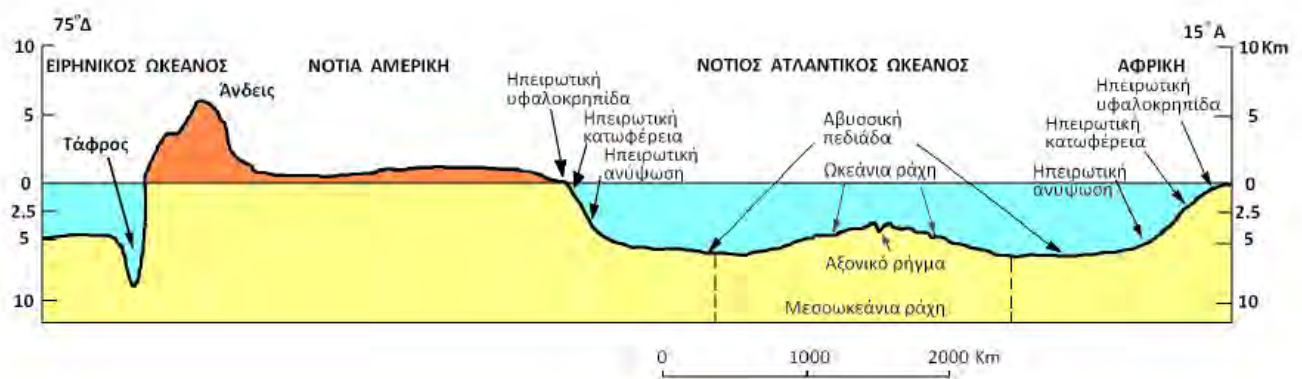
Στην εικόνα 4 απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά ενός τυπικού θαλάσσιου πυθμένα. Στην εικόνα 5 παρατηρούνται τα βαθυμετρικά και υψομετρικά χαρακτηριστικά της Γης. Στην εικόνα 6 παρουσιάζεται η τοπογραφική τομή με διεύθυνση Νότια Αφρική-Νότιος Ατλαντικός Ωκεανός – Νότια Αμερική – Νότιος Ειρηνικός Ωκεανός, στην οποία φαίνεται η γεωμορφολογική διαφορά μεταξύ Ειρηνικού και Ατλαντικού Ωκεανού, μεταξύ ενεργών και παθητικών περιθωρίων αντίστοιχα. Γενικά παρατηρείται ότι στις περιοχές του Ατλαντικού Ωκεανού υπάρχει μία ομαλή μετάβαση (με μικρές κλίσεις) προς τον ωκεάνιο πυθμένα, ειδικότερα από την πλευρά της αφρικανικής ηπείρου.



Εικόνα 4. Απεικόνιση των χαρακτηριστικών ενός τυπικού θαλάσσιου πυθμένα. Coastal plain = παράκτια πεδιάδα, shoreline = ακτογραμμή, continental shelf = ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα, continental slope = ηπειρωτική κατώφεια, submarine canyons = υποθαλάσσια κáννον, continental rise = ηπειρωτική ανύψωση, seamounts = θαλάσσια όρη, abyssal plain = αβυσσικό πεδίο.



Εικόνα 5. Βαθυμετρικά και υψομετρικά χαρακτηριστικά της Γης.



Εικόνα 6. Τοπογραφική τομή, όπου φαίνεται η γεωμορφολογική διαφορά μεταξύ Ειρηνικού και Ατλαντικού Ωκεανού, μεταξύ ενεργών και παθητικών περιθωρίων αντίστοιχα.

## **2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΩΝ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ**

Οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις συγκαταλέγονται ανάμεσα στις φυσικές καταστροφές του πλανήτη. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι συμβαίνουν κατά μήκος όλων των ηπειρωτικών περιθωρίων (ενεργών και παθητικών) και σε διάφορα βάθη. Οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις μπορούν να ενεργοποιηθούν σε πλαγιές και λόφους με πολύ μικρές κλίσεις, μικρότερες των δύο μοιρών ( $<2^{\circ}$ ), και εκτείνονται σε αποστάσεις πολύ μεγάλες, της τάξεως των χιλίων χιλιομέτρων και άνω ( $>1000$  km).

Οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, είναι υπαίτιες για την μετακίνηση ιζημάτων στη Γη σε πολύ μεγάλη κλίμακα. Αυτό συμβαίνει, διότι ο όγκος της κατολισθαίνουσας μάζας σε μία υποθαλάσσια κατολίσθηση ξεπερνά τον όγκο των αντίστοιχων χερσαίων κατά τρεις φορές. Έχουν την δυνατότητα να δημιουργήσουν ή να ενισχύσουν καταστροφικά κύματα όπως τα tsunami, με αποτέλεσμα να αποτελούν ένα σοβαρό κίνδυνο για το παράκτιο πληθυσμό. Επιπροσθέτως, οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις έχουν την δυνατότητα να επιφέρουν μεγάλες καταστροφές στις υποθαλάσσιες υποδομές, όπως είναι οι υποθαλάσσιοι αγωγοί μεταφοράς καυσίμων, τα υποθαλάσσια καλώδια επικοινωνίας και τα θεμέλια από τις υπεράκτιες εξέδρες άντλησης υδρογονανθράκων ή θαλάσσιων αιολικών πάρκων.

Έχει αποδειχθεί, ότι οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στο καθορισμό της τοποθεσίας και της γεωμετρίας των κοιτασμάτων υδρογονανθράκων, λόγω της ανάπτυξης των γνωστών παγίδων συσσώρευσης υδρογονανθράκων.

Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις λαμβάνουν χώρα τόσο σε ενεργά όσο και σε παθητικά ηπειρωτικά περιθώρια, μπορούν να συμβούν στο εσωτερικό υποθαλάσσιων κώνων, φιορντ και υποθαλάσσιων απολήξεων ποτάμιων συστημάτων όπως δέλτα και εκβολές ποταμών καθώς και σε θαλάσσια νησιά ηφαιστειακής προέλευσης.

Η μεγαλύτερη καταγεγραμμένη υποθαλάσσια κατολίσθηση είναι η Κατολίσθηση Agulhas, στην θαλάσσια περιοχή της Ν. Αφρικής. Ο όγκος της υπολογίζεται περίπου στα  $20000 \text{ km}^3$ , που τη καθιστά μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από τη γνωστή κατολίσθηση Storegga, στο παγωμένο ηπειρωτικό περιθώριο της υπεράκτιας περιοχής της νότιας Νορβηγίας.

Από το 1980 και μετά, έχουν γίνει πολυάριθμα διεθνή προγράμματα που έχουν σαν στόχο την κατανόηση του φαινομένου των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων. Ενδεικτικά μερικά από αυτά είναι: 1) NATO, (Workshop on marine slides and other mass movements -1980), 2) ADFEX (Arctic Delta Failure Experiment, 1989-1992), 3) GLORIA (1984-1991), 4) STEAM (Sediment Transport on European Atlantic Margins, 1993-1996), 5) ENAM II (1996-1999), 6) STRATIFORM (1995-2001), 7) COSTA (Continental Slope Stability, 2000-2002). Η τελευταία από αυτές τις επιστημονικές πρωτοβουλίες είναι η S4SLIDE (2015-2020) που χρηματοδοτείται από το πρόγραμμα UNESCO IGCP-640 [7].

Όπως και στις χερσαίες κατολισθήσεις, έτσι και στις υποθαλάσσιες, ο όρος κατολίσθηση, αναφέρεται στη μετακίνηση ή τη μεταφορά μιας βραχώδους ή εδαφικής μάζας. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα όταν οι δρώσες δυνάμεις (π.χ. βάρος, σεισμικά φορτία κλπ.) που ασκούνται πάνω στη μάζα και προκαλούν την αστοχία κατά μήκος μιας επιφάνειας ολίσθησης είναι μεγαλύτερες από τις αντιδρώσες δυνάμεις (δηλ τις δυνάμεις αντίστασης στην ολίσθηση όπως π.χ. η διατμητική αντοχή κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης) με αποτέλεσμα την αστοχία του υποθαλάσσιου πρανούς. Ουσιαστικά, η υποθαλάσσια κατολίσθηση είναι η μετακίνηση των ιζημάτων σε βαθύτερες περιοχές του θαλάσσιου πυθμένα υπό την επίδραση της βαρύτητας. Σε πολλές περιπτώσεις οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις συνδέονται με υποθαλάσσιες εδαφικές ροές οι οποίες περιλαμβάνουν και βραχώδη μέρη μεταβλητού μεγέθους. Υπάρχουν πολλά είδη υποθαλάσσιων εδαφικών ροών, τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους λόγω κάποιων ιδιαίτερων χαρακτηριστικών, όπως η ταχύτητα με την οποία μετακινούνται ή ολισθαίνουν τα υλικά, η συνοχή των κόκκων της ροής καθώς και ο λόγος ιζήματος/βράχου ως προς το ρευστό. Στην συνέχεια ακολουθεί ο διαχωρισμός ανάμεσα στις βαρυτικές μετακινήσεις ιζημάτων, όπως είναι οι πτώσεις, οι ολισθήσεις, οι λασποροές και οι ροές κορημάτων, οι ροές κόκκων, οι ρευστοποιημένες ροές, τα τουρβιδιτικά ρεύματα, ο εδαφικός ερπυσμός και οι εξαπλώσεις [8,9]:

✚ Χιονοστιβάδα κορημάτων - debris avalanche (καταστροφικές κατολισθήσεις). Η γρήγορη ροή από μη συνεχή τμήματα βράχων και ογκόλιθων, όπου η μετατροπή της δυναμικής ενέργειας σε κινητική προκαλεί πολύ μεγάλες ταχύτητες μεταφοράς και περιστροφής με καταστροφικές συνέπειες. Τέτοιου είδους



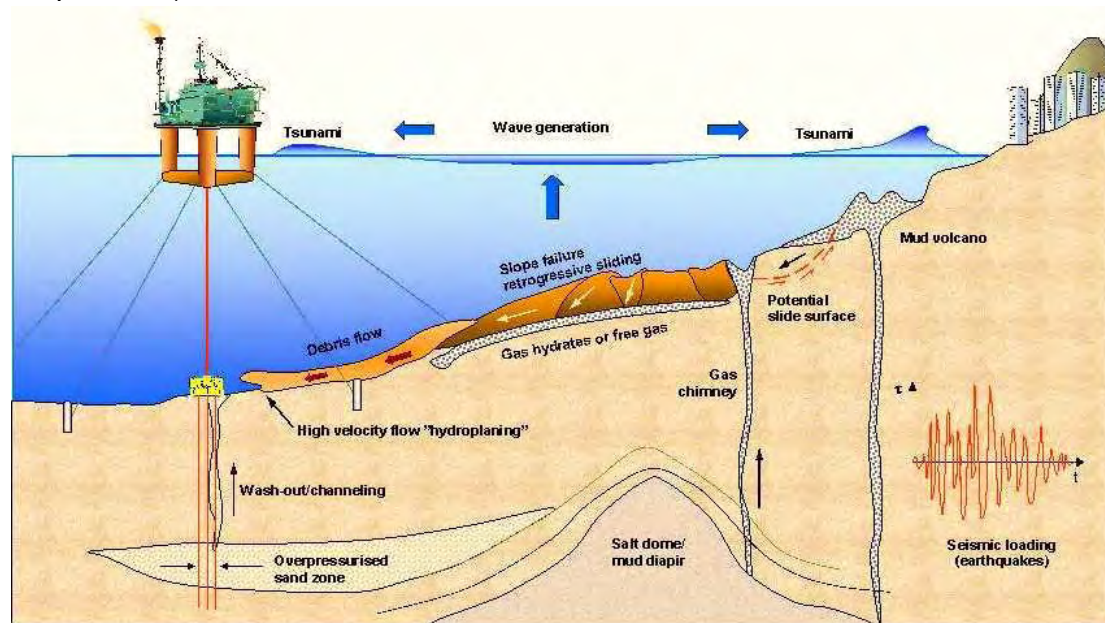
μετακινήσεις ευνοούνται σε υποθαλάσσιες περιοχές με σχετικά μεγάλες κλίσεις (π.χ. υποθαλάσσιες χαράδρες).

- ✚ Ολίσθηση - slide. Η μετακίνηση μιας συνεκτικής μάζας ιζημάτων, η οποία μπορεί να είναι είτε μεταφορική, είτε περιστροφική.
- ✚ Ροή κορημάτων και λασποροή - debris flow and mud flow. Προκαλείται στρωτή, συνεκτική ροή ιζημάτων λεπτόκοκκης μάζας. Το χονδρόκοκκο υλικό διατηρείται σε αιώρηση από τις ανωστικές δυνάμεις της ρέουσας μάζας.
- ✚ Ροή κόκκων-grain flow. Ροή σε αιώρηση μη συνεκτικών ιζημάτων.
- ✚ Ρευστοποιημένη/υγροποιημένη ροή – liquefied / fluidized flow. Ροή μη συνεκτικών ιζημάτων, τα οποία βρίσκονται σε κατάσταση αιώρησης λόγω της εκτόπισης του νερού προς τα πάνω.
- ✚ Τουρβιδιτικά ρεύματα - turbidity currents. Ιδιαίτερη περίπτωση βαρυντικής ροής, όπου οι κόκκοι του ιζήματος διατηρούνται σε αιώρηση, λόγω της τυρβώδους ροής.
- ✚ Ερπυσμός - creep. Σταδιακή, αργή, σχεδόν ανεπαίσθητη μετακίνηση ιζημάτων. Η παραμόρφωση είναι ελαστοπλαστική.
- ✚ Εξαπλώσεις - spreads. Διαμητική αστοχία ή ρευστοποίηση κατά μήκος σχεδόν οριζοντίων εδαφικών στρώσεων.

Ένα υποθαλάσσιο πρανές είναι ευσταθές όσο η συνισταμένη των αντιδρωσών δυνάμεων είναι μεγαλύτερη από την συνισταμένη των δρωσών δυνάμεων. Δηλαδή ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Οι δρώσες δυνάμεις περιλαμβάνουν τη στατική φόρτιση του ιζήματος (η οποία μεταβάλλεται καθώς η γωνία του πρανούς αλλάζει), ιζηματογενή φορτία, τεκτονικά φορτία, κυκλικά φορτία (λόγω σεισμών) και τα φορτία των κυμάτων προερχόμενα από καταγιγίδες ή tsunamí. Οι αντιδρώσες δυνάμεις (δυνάμεις αντίστασης στην ολίσθηση) περιλαμβάνουν την εσωτερική τριβή ανάμεσα στους κόκκους, τις δυνάμεις συνοχής και τη τσιμεντοποίηση λόγω διαγένεσης. Οι δυνάμεις αντίστασης, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό στη πίεση πόρων των ιζημάτων. Όταν η πίεση των πόρων υπερβεί την υδροστατική πίεση, τότε ασκείται μια δύναμη στους κόκκους του εδάφους, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του. Σε κοκκώδη και μη τσιμεντοποιημένα ιζήματα, η αντίσταση του ιζήματος είναι μηδενική, συνεπώς το ίζημα ρευστοποιείται όταν η πίεση των πόρων εξισωθεί με την λιθοστατική πίεση. Μια οποιαδήποτε διαδικασία που θα οδηγήσει στην αύξηση της πίεσης των πόρων, όπως είναι, λόγου χάρη, η ταχεία εναπόθεση ιζήματος, η τεκτονική φόρτιση, η δημιουργία ελεύθερων αερίων και η μετανάστευσή τους καθώς και πληθώρα άλλων παραγόντων, διαταράσσει το κλάσμα των ενεργών και των δυνάμεων αντίστασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός πρανούς που είναι επιρρεπές σε αστοχία. Ένα απρόσμενο εξωτερικό γεγονός, όπως ένας σεισμός, μπορεί να ενεργοποιήσει την αστάθεια του πρανούς, με αποτέλεσμα την εδαφική μετακίνηση της μάζας, λόγω βαρύτητας[7]. Στη συνέχεια αναλύονται οι διεργασίες ενεργοποίησης μιας υποθαλάσσιας κατολίσθησης.

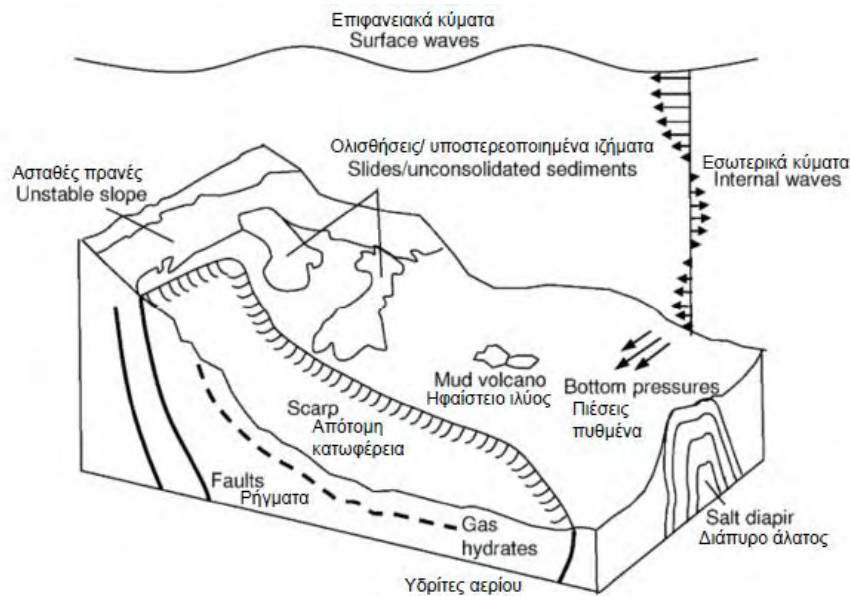
## 2.4 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Σε ένα θαλάσσιο περιβάλλον, οι εδαφικές μάζες μπορούν να γίνουν ασταθείς και να αστοχήσουν, λόγω μιας σειράς διαδικασιών. Παρ'όλα αυτά οι περισσότερες εδαφικές αστοχίες σχετίζονται με ένα γεγονός ενεργοποίησης. Οι μηχανισμοί δημιουργίας των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων, μπορούν να είναι ξαφνικές ή σταδιακές φυσικές αλλά και ανθρωπογενείς διαδικασίες. Οποιαδήποτε διεργασία, φυσική ή ανθρωπογενής, τείνει να προκαλέσει μια αύξηση στις εδαφικές τάσεις ή μια μείωση στην εδαφική αντοχή, οδηγώντας περεταίρω στην αστοχία της εδαφικής μάζας. Η κατανόηση της πίεσης των πόρων καθώς και των μηχανισμών που οδηγούν στην αύξηση της πίεσης των πόρων είναι ζωτικής σημασίας για την εκτίμηση της δημιουργίας πιθανών αστοχιών. Στην εικόνα 7 απεικονίζονται διάφορα είδη υπεράκτιων γεωκινδύνων.



Εικόνα 7. Απεικόνιση των υπεράκτιων γεωκινδύνων. Mud volcano = ηφαιστειο ιλύος, gas hydrates = ένυδρα αέρια (υδρίτες), salt diapir = διάπυρο άλατος, high velocity flow “hydroplaning” = ροή υψηλής ταχύτητας, “υδρολίσθηση”, earthquakes = σεισμοί, gas chimney = καμινάδες έκλυσης αερίων, potential slide surface = η δυναμική επιφάνεια ολίσθησης.

Στην εικόνα 8 παρουσιάζονται οι κυριότεροι γεωκίνδυνοι στο θαλάσσιο περιβάλλον, οι οποίοι είναι οι ακόλουθοι: 1) Ασταθή πρανή, 2) απότομες κατωφέρειες, 3) σεισμικά ρήγματα, 4) υδρίτες αερίου, 5) ηφαιστεια ιλύος, 6) διάπειρα άλατος, 7) υπερπίεσεις πυθμένα, 8) ολισθήσεις υποστερεοποιημένων ιζημάτων, 9) εωτερικά κύματα, 10) επιφανειακά κύματα.



Εικόνα 8. Παρουσίαση των κυριότερων γεωκινδύνων στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Στη συνέχεια, αναφέρονται συνοπτικά οι κυριότερες φυσικές και ανθρωπογενείς διεργασίες που οδηγούν στη δημιουργία υποθαλάσσιων κατολισθήσεων [10].

#### ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

- ✚ Γρήγορη απόθεση που οδηγεί σε υπέρβαση της πίεσης των πόρων, υποστερεοποίηση και αύξηση διατμητικών τάσεων σε ένα πρηνές.
- ✚ Διάβρωση πόδα ή απόθεση κορυφής, που επιφέρει υψηλότερη κλίση του πρηνούς, μεγαλύτερες βαρυντικές δυνάμεις και διατμητικές τάσεις κατά μήκος δυνητικών επιφανειών αστοχίας.
- ✚ Τήξη των ένυδρων αερίων, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας ή μείωσης της πίεσης που επιφέρουν αυξημένη πίεση πόρων και μείωση εδαφικής αντοχής. Όπως θα αναλυθεί παρακάτω τα ένυδρα αέρια είναι ενώσεις αερίου (μεθανίου) και νερού τα οποία είναι σταθερά μόνο υπό ορισμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.
- ✚ Ενεργός ροή υγρών ή ροή αερίων και εκτίναξη τους.
- ✚ Εκρήξεις ηφαιστειών ιλύος και διάπειρων άλατος, τα οποία οδηγούν σε μαζικές διαρρήξεις και μετακινήσεις εδαφών.
- ✚ Μετατοπίσεις τεκτονικών ρηγμάτων, οι οποίες προκαλούν σεισμούς, μετατοπίσεις στο εγγύς πεδίο και εδαφικές αστοχίες.
- ✚ Ισχυρές αναταράξεις του εδάφους λόγω σεισμού, οι οποίες προκαλούν βραχυπρόθεσμα δυνάμεις αδρανείας και αύξηση της πίεσης των πόρων.
- ✚ Κύμα φόρτισης μεγάλου μήκους.
- ✚ Εσωτερικά κύματα ή σολιτόνια, λόγω διαφοράς πυκνότητας, ειδικότερα στα ρηγά νερά.
- ✚ Ευαίσθητα εδάφη με αυξημένη επικινδυνότητα παλινδρομικής ολίσθησης καθώς και αυξημένη τοπική έκταση των ζωνών αστοχίας.

- ✚ Μείωση της στάθμης της θάλασσας κατά τη διάρκεια παγετωδών περιόδων, το οποίο οδηγεί σε χαμηλότερη υδροστατική πίεση, εκτόνωση των ελεύθερων αερίων και προ-διάλυση των ένυδρων αερίων.
- ✚ Αυξημένη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού στο επίπεδο του πυθμένα, λόγω αλλαγών των ρευμάτων, η οποία προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας της εδαφικής μάζας και προ-διάλυση των ένυδρων αερίων.

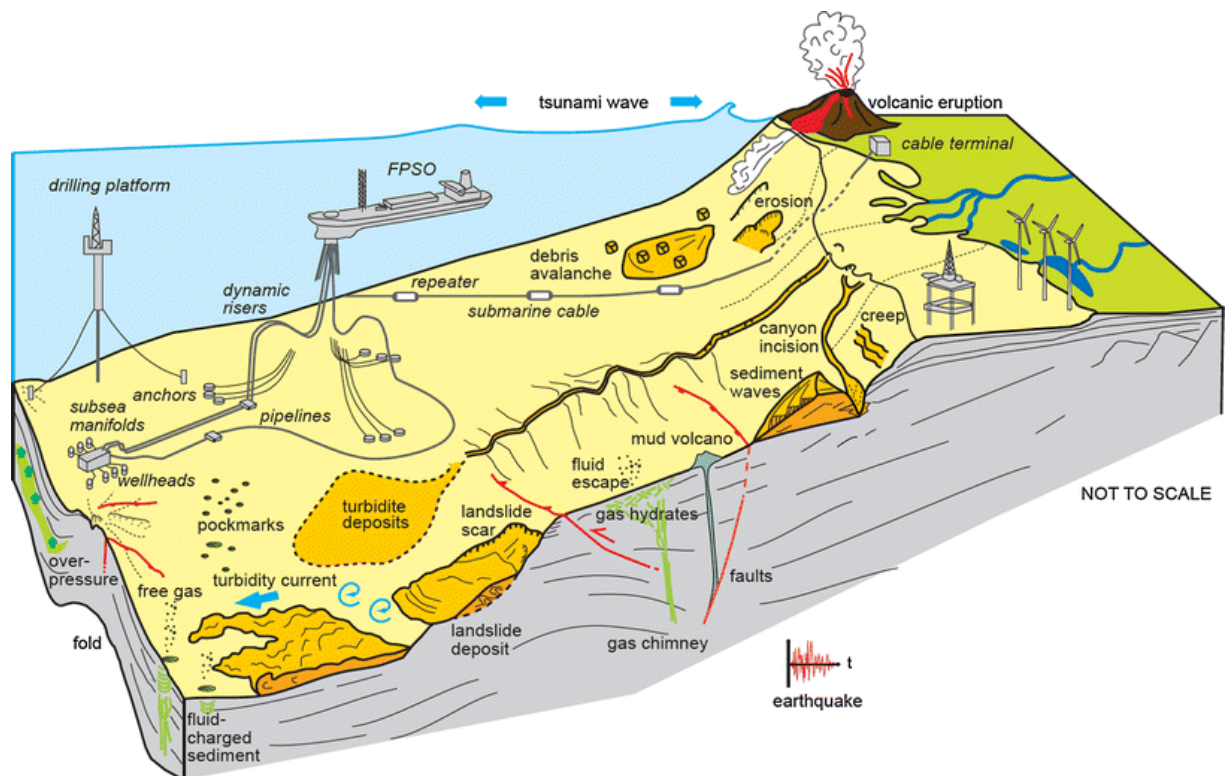
#### ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

- ✚ Γεωτρήσεις, δημιουργώντας εκρήξεις και κρατήρες στο βυθό της θάλασσας.
- ✚ Υπόγειες εκρήξεις, οι οποίες αλλάζουν το καθεστώς της πίεσης πόρων σε ρηχά υποστρώματα, δημιουργώντας δυνητικά αστάθεια σε κεκλιμένες περιοχές.
- ✚ Αύξηση της ροής θερμότητας και της θερμοκρασίας γύρω από τα φρεάτια άντλησης πετρελαίου. Αυτό το φαινόμενο, οδηγεί στη προ-διάλυση των ένυδρων αερίων, αυξημένη πίεση πόρων και απώλεια αντοχής του παράπλευρου εδάφους.
- ✚ Μείωση της πίεσης δεξαμενής, οδηγεί σε καθίζηση δεξαμενής και σε αλλαγές στις τάσεις των υπερκείμενων στρωμάτων.
- ✚ Δραστηριότητες εγκαταστάσεων ενεργειακών υποδομών, που επιφέρουν αύξηση των βαρυτικών δυνάμεων.
- ✚ Εγκαταστάσεις ελλιμενισμού και αγκυρώσεων του πυθμένα, οι οποίες επιφέρουν βραχυπρόθεσμες καθώς και μακροπρόθεσμες πλευρικές δυνάμεις.

Μια απλή κατάσταση ενεργοποίησης ενός γεωκινδύνου, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ένα μεμονωμένο συμβάν γεωκινδύνου ή μια αλληλουχία συμβάντων που σχετίζονται μεταξύ τους.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα θα μπορούσε να είναι το ακόλουθο: θερμοκρασιακές μεταβολές λόγω της λειτουργίας ενός αγωγού μπορεί να οδηγήσουν σε διαχωρισμό των ένυδρων αερίων ή σε προ-διάλυση των ελεύθερων αερίων, προκαλώντας αυξημένη πίεση πόρων και συνεπώς αστοχία πρανούς. Αυτή η αστοχία πρανούς, έχει ως αποτέλεσμα την ταχεία εναπόθεση υλικού στη κατωφέρεια, δημιουργώντας πλεόνασμα πίεσης πόρων σε υποστερεοποιημένα εδάφη, τα οποία με τη σειρά τους οδηγούνται σε μια ακόμη αστοχία πρανούς. Η αρχική αστοχία πρανούς, μπορεί να δώσει έναυσμα σε μια παλινδρομική ολίσθηση, η οποία με τη σειρά της θα μειώσει τη πίεση πίσω από τη κεφαλή της κατωφέρειας, αποσταθεροποιώντας για μια ακόμη φορά την ευρύτερη περιοχή [10].

Για τους παραπάνω λόγους καθίσταται επιτακτική η ανάγκη για λεπτομερή χαρτογράφηση του θαλάσσιου πυθμένα για την εκτίμηση των πιθανών γεωκινδύνων (εικόνα 9).

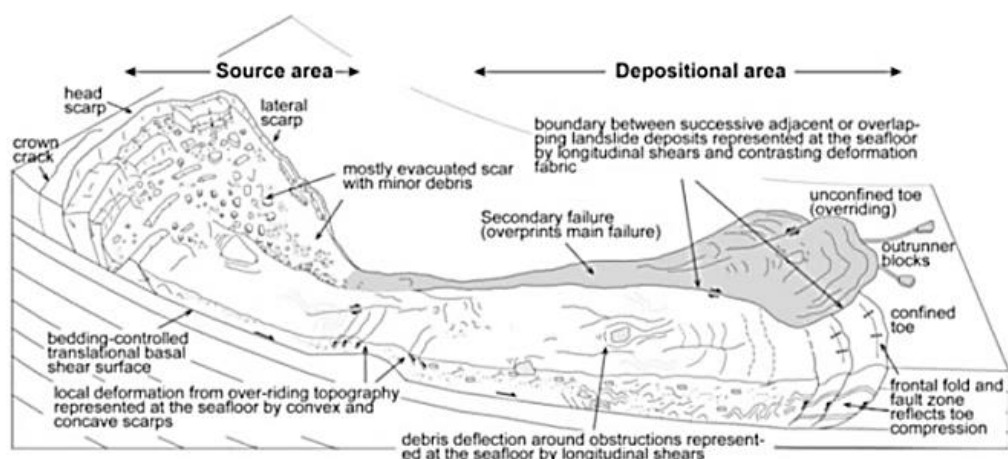


Εικόνα 9. Χαρτογράφηση του θαλάσσιου πυθμένα για την εκτίμηση των γεωκινδύνων. Drilling platform = πλατφόρμα εξόρυξης, pipelines = αγωγοί, rockmarks = κρατήρες λόγω έκρηξης υγρών ή αερίων ανάμεσα στα ιζήματα, turbidity currents = τουρβιδιτικά ρεύματα, landslide deposits = αποθέσεις κατολισθήσεως, debris avalanche = χιονοστιβάδα κορημάτων, erosion = διάβρωση, mud volcano = ηφαίστεια ιλύος, faults = ρήγματα, creep = ερπυσμός, mud volcano = ηφαίστεια ιλύος, earthquake = σεισμός.

## **2.5 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΙ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ**

Όλες οι διεργασίες των κατολισθήσεων, έχουν κάποια διακριτά χαρακτηριστικά, που σχετίζονται με την παρουσία τμημάτων βράχων ή με τη ροή του μαλακού ιζήματος. Παρ'όλα αυτά οι κατολισθήσεις στο σύνολό τους (χερσαίες και υποθαλάσσιες) μοιράζονται πολλά κοινά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την περιγραφή τους. Το κύριο χαρακτηριστικό τόσο των χερσαίων όσο και των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων, είναι η εκτεταμένη παραμόρφωση εφελκυστικού τύπου του άνω μέρους της ολίσθησης. Καθώς το υλικό μετακινείται και διαφεύγει της ζώνης πηγής (source zone), παραμορφώνεται θλιπτικά στη ζώνη απόθεσης (deposition zone). Κατά μήκος αυτής της διαδρομής, η ταχύτητα μειώνεται, προκαλώντας επανειλημμένη συσσώρευση του υλικού της κατολίσθησης. Πολλές φορές, φυσικά, αυτή η εξιδανικευμένη συμπεριφορά δεν εφαρμόζεται, ενώ παρατηρείται μια σειρά από εφελκυστικά και θλιπτικά φαινόμενα, όπως φαίνεται στην εικόνα 10.

Στο παρακάτω διάγραμμα, φαίνονται όλες οι γεωμορφολογικές παρατηρήσεις του φαινομένου της κατολίσθησης. Διαφαίνεται η ζώνη πηγής με την απότομη πλαγιά (γκρεμό) της κεφαλής του πρανούς αλλά και πλαγίως του πρανούς, οι οποίες μπορούν να ξεπεράσουν τα 100m σε ύψος. Η κεφαλή της κατολίσθησης (scarp), καθορίζει την επαφή μεταξύ του πρανούς που δεν έχει αστοχήσει (ίζημα ή βράχος) και του μετατοπισμένου υλικού. Στη μακρινή περιοχή της κατολίσθησης, όπου το υλικό έχει προσκρούσει σε ανέπαφη στρωματογραφία, σημειώνονται ανυψώσεις, κάθετες στη διεύθυνση της κατεύθυνσης της κατολίσθησης. Αξίζει να σημειωθεί, ότι τμήματα βράχου, πλάτους αρκετών χιλιομέτρων μπορούν να μετακινηθούν, πέρα από τη ζώνη απόθεσης του υλικού [7].



Εικόνα 10. Γεωμορφολογική ανατομία μιας υποθαλάσσιας κατολίσθησης, source area = ζώνη πηγής, depositional area = ζώνη απόθεσης, lateral scarp = απότομη πλευρική κατοφέρεια, crown crack = ρήγμα κορυφής (στέψης), head scarp = απότομη κατοφέρεια κεφαλής, secondary failure = δευτερογενής αστοχία, fault zone = ζώνη ρήγματος outrunner blocks = μετακινούμενα τμήματα βράχων [7].

Για να διακριθούν οι διαφορές μεταξύ χερσαίων και υποθαλάσσιων κατολισθήσεων, είναι σημαντικό να θυμάται κανείς ότι τα διαφορετικά περιβάλλοντα (χερσαία και υποθαλάσσια), επηρεάζουν αναλόγως την συμπεριφορά των κατολισθήσεων [2]. Στην συνέχεια αναφέρονται οι παράγοντες οι οποίοι αναδεικνύουν τις διαφορές μεταξύ των δύο αναφερόμενων μεγάλων κατηγοριών κατολισθήσεων.

### Η γωνία κλίσης του πρανούς

Στο υποθαλάσσιο περιβάλλον, η μέση γωνία κλίσης  $\beta$  του πρανούς για την ενεργοποίηση μιας κατολίσθησης, είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη γωνία για τις χερσαίες κατολισθήσεις. Επομένως, η κινούσα συνιστώσα βαρυτική δύναμη, ανάλογη του  $\sin \beta$ , είναι σαφώς μικρότερη στις υποθαλάσσιες κατολισθήσεις [2]. Το γεγονός αυτό αυξάνει την επικινδυνότητά τους.

### Ο διαθέσιμος όγκος

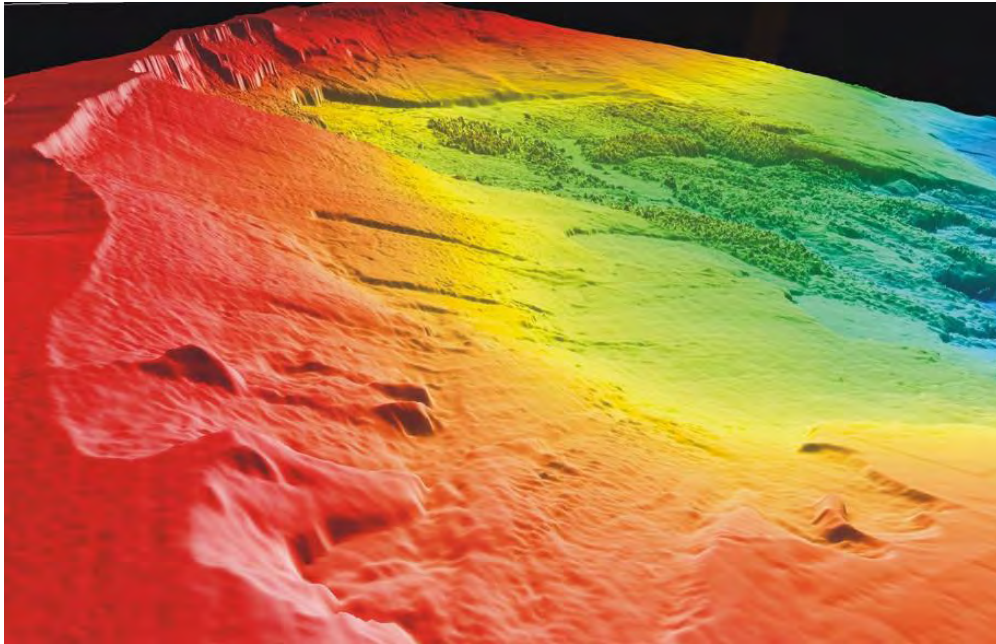
Στο χερσαίο τμήμα της γήινης επιφάνειας, ο όγκος του υλικού που κατολισθαίνει είναι περιορισμένος, για πολλούς λόγους. Πρώτον, επειδή τα χερσαία πρανά είναι πιο απότομα απ'ότι τα θαλάσσια, η πιθανότητα συσσώρευσης μεγάλης ποσότητας

ιζημάτων, σε πυκνά τμήματα, είναι μικρή. Αντιθέτως, στο θαλάσσιο περιβάλλον ηπιότερες κλίσεις συμβάλλουν στη σταθεροποίηση των ιζημάτων. Δεύτερον, στη στεριά, κυριαρχεί το φαινόμενο της διάβρωσης, παρά της ιζηματογένεσης. Τοπικά, ισχυρή ιζηματογένεση, μπορεί να συμβεί σε ποτάμια συστήματα ή παγετώνες, όμως τα ιζήματα αυτά είναι σχετικά μικρού πάχους. Αντίθετα, στο υποθαλάσσιο περιβάλλον, μεγάλες ποσότητες ιζημάτων, αποθηκεύονται (στοιβάζονται) λ.χ. στα δέλτα των ποταμών. Η συνεχής αυτή ιζηματογένεση σε συνδυασμό με την μικρή γωνία του πυθμένα, είναι ικανή να οδηγήσει στην απόθεση τεράστιων ποσοτήτων κλαστικών ιζημάτων, τα οποία συχνά είναι υποστερεοποιημένα και υπό πίεση λόγω της γρήγορης ιζηματογένεσης.

Σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, όπως κοντά στον Αρκτικό Ωκεανό, παγετώδη συστήματα αντικαθιστούν τα ποτάμια παράγοντας τεράστιες αποθέσεις υλικού σε ρηγά νερά. Η αστοχία τέτοιων πελώριων εδαφικών μαζών, μπορεί να οδηγήσει στις μεγαλύτερες κατολισθήσεις πάνω στη Γη, της τάξεως εκατοντάδων κυβικών χιλιομέτρων  $km^3$ , όπως συνέβη με την γνωστή κατολίσθηση Storegga, στην υπεράκτια περιοχή της Νότιας Νορβηγίας, (εικόνες 11,12), [2].



Εικόνα 11. Η περιοχή της κατολίσθησης Storegga.



Εικόνα 12. Η περιοχή έναρξης της υποθαλάσσιας κατολίσθησης Storegga.

### Το υλικό

Στο χερσαίο περιβάλλον, ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα, όπως ο πηλόλιθος και οι τόφοι συναντώνται συχνά. Στον ωκεανό, υπάρχουν αλλά όχι σε σημαντικές ποσότητες, ενώ άμμοι και άργιλοι μεταφερόμενες από ποτάμια βρίσκονται σαφώς σε μεγαλύτερες ποσότητες. Τα βραχώδη υλικά που σχετίζονται με τις υποθαλάσσιες αστοχίες βράχων, είναι συνήθως βασαλτικά πετρώματα, κύριο συστατικό των θαλάσσιων όρεων και νησιών. Αστοχίες βραχών, μπορούν να συμβούν και κατά μήκος της ηπειρωτικής ακτής και περιλαμβάνουν μια μεγάλη ποικιλία πετρωμάτων. Σε αντίθεση, οι χερσαίες κατολισθήσεις δεν έχουν περιορισμό στο είδος του βράχου, αν και είναι προφανές ότι μόνο οι ασθενέστεροι βράχοι θα αστοχήσουν προς κατολίσθηση [2].

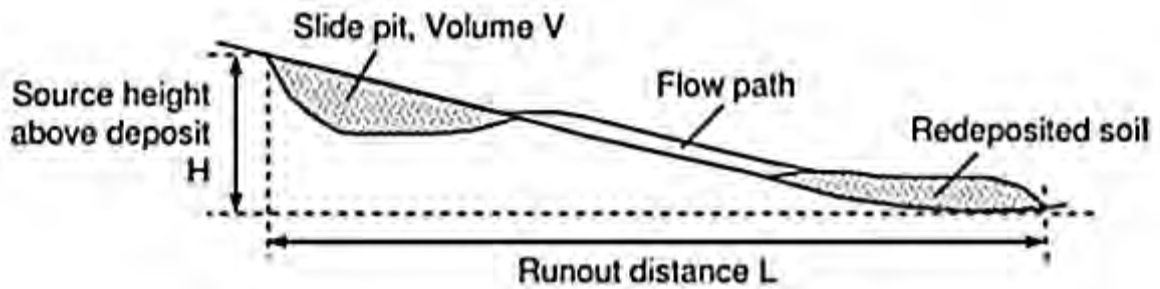
### Η παρουσία του νερού

Το νερό μεταβάλλει σημαντικά την συμπεριφορά της ολίσθησης, τόσο στην αστοχία (πίεση του νερού των πόρων) όσο και κατά τη διάρκεια της ροής. Το νερό εξασκεί πολύ περισσότερη οπισθέλκουσα από τον αέρα. Επιπροσθέτως, η επιπλευσιμότητα μειώνει την κινούσα βαρυτική δύναμη στο ολισθαίνον υλικό. Παρόλα αυτά, το νερό ενισχύει τη ροή των κατολισθήσεων [2].

### Ο λόγος τελειώματος (run-out ratio)

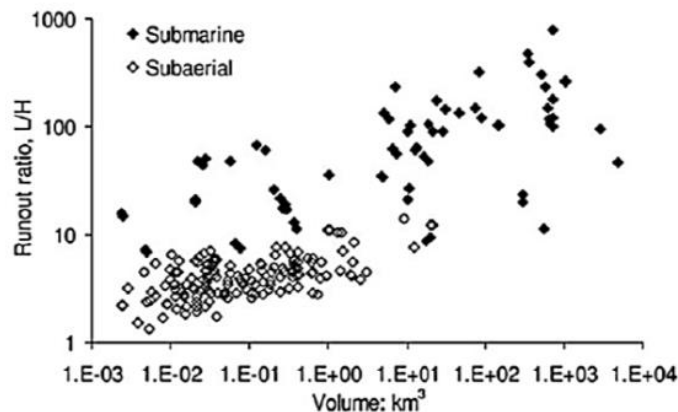
Η κινητικότητα των κατολισθήσεων, χαρακτηρίζεται γεωμετρικά από τον λόγο τελειώματος ή run-out ratio  $L/H$ , όπου  $L$  είναι η οριζόντια απόσταση από την πηγή μέχρι την απόθεση και  $H$  είναι η κατακόρυφη απόσταση (υψομετρική διαφορά) μεταξύ της πηγής της ροής κορημάτων και αποσαθρωμάτων και της θέσης απόθεσης, όπως φαίνεται και στη παρακάτω εικόνα 13, [9].





Εικόνα 13. Ο λόγος  $L/H$ , slide pit volume  $V$  = πυρήνας της ολίσθησης, όγκου  $V$ , flow path = διαδρομή της ροής, redeposited soil επανα-αποθετημένο έδαφος.

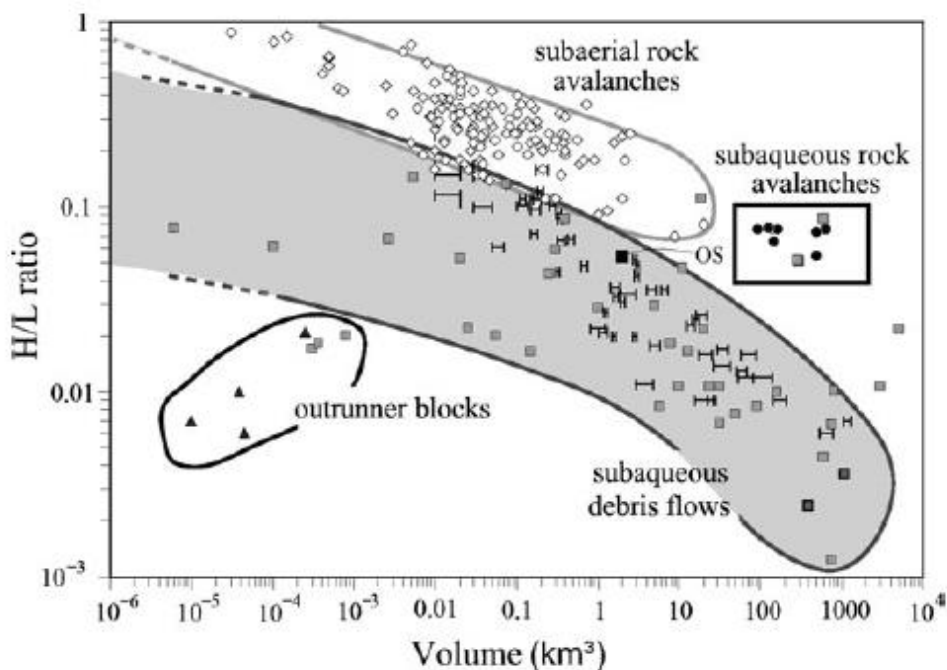
Ο λόγος  $L/H$ , υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το ενεργειακό ισοζύγιο μιας ξηρής μάζας που ολισθαίνει. Όπως παρατηρείται από την εικόνα 14, οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, είναι μεγαλύτερες σε όγκο από τις χερσαίες και έχουν μεγαλύτερο λόγο τελειώματος ( $L/H$ ) για τον ίδιο όγκο ολισθαίνοντας υλικού. Αυτό επιβεβαιώνει ότι είχε ειπωθεί παραπάνω, ότι δηλαδή το νερό ενισχύει τη ροή των κατολισθήσεων.



Εικόνα 14. Μεταβολή του λόγου τελειώματος  $L/H$  ως προς τον όγκο, μεταξύ υποθαλάσσιων και χερσαίων κατολισθήσεων.

Το διάγραμμα του λόγου  $H/L$  συναρτήσει του όγκου της κατολισθαίνουσας μάζας

Το παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 15, απεικονίζει τον λόγο  $H/L$  σε σχέση με τον όγκο για όλα τα είδη των βαρυντικών ροών. Το συμπέρασμα είναι ότι το νερό αυξάνει την κινητικότητα των κατολισθήσεων, αντί να τις παρεμποδίζει, λόγω της αυξημένης οπισθέλκουσας και των ήπιων κλίσεων του πυθμένα. Η εξήγηση αυτού του φαινομένου, βρίσκεται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας.



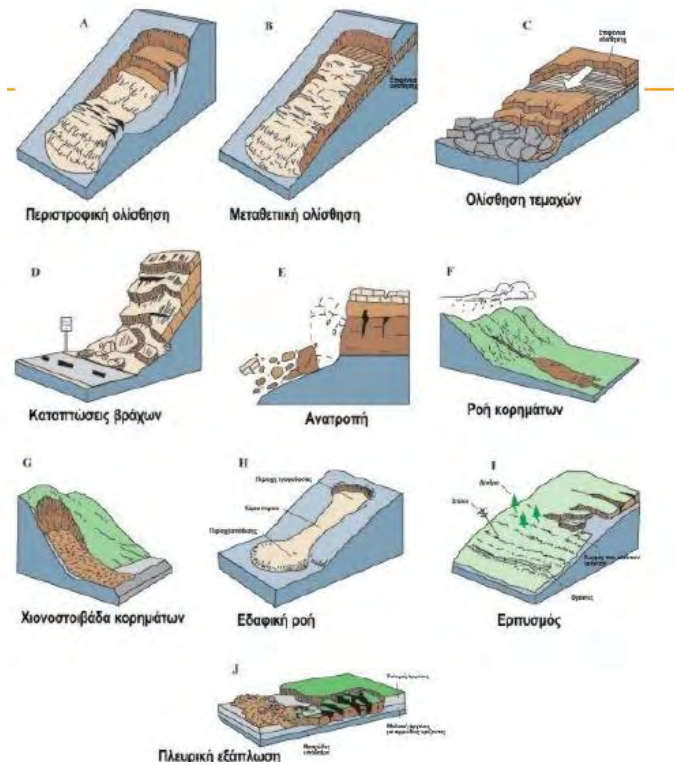
Εικόνα 15. Συγκριτική απεικόνιση του λόγου  $H/L$  ως προς τον όγκο για διάφορα είδη βαρυντικής ροής, outrunner blocks = μετακινούμενα τμήματα βράχων, subaqueous debris flow = υποθαλάσσια ροή κορημάτων, subaerial rock avalanches = χερσαίες χιονοστιβάδες βράχων, subaqueous rock avalanches υποθαλάσσιες χιονοστιβάδες βράχων.

## **2.6 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΝΑΡΞΗΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ**

Για την ανάλυση της ευστάθειας των πρανών, χρησιμοποιούνται κυρίως δύο μέθοδοι: α) η μέθοδος του πρανού απείρου μήκους για ρηχές αστοχίες και β) η μέθοδος κυκλικής ολίσθησης σε καμπύλη επιφάνεια για βαθιές αστοχίες. Μια εναλλακτική μέθοδος για τις βαθιές αστοχίες, είναι εκείνη του μηχανισμού ολισθαίνοντος μπλοκ ή σφηνοειδούς ανάλυσης. Για να υπολογιστούν αναλυτικά οι κινηματικοί μηχανισμοί καθώς και η οριακή αντοχή έναντι αστοχίας σε σύνθετες γεωμετρίες (π.χ. στο πυθμένα της θάλασσας), χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι και λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων [10].

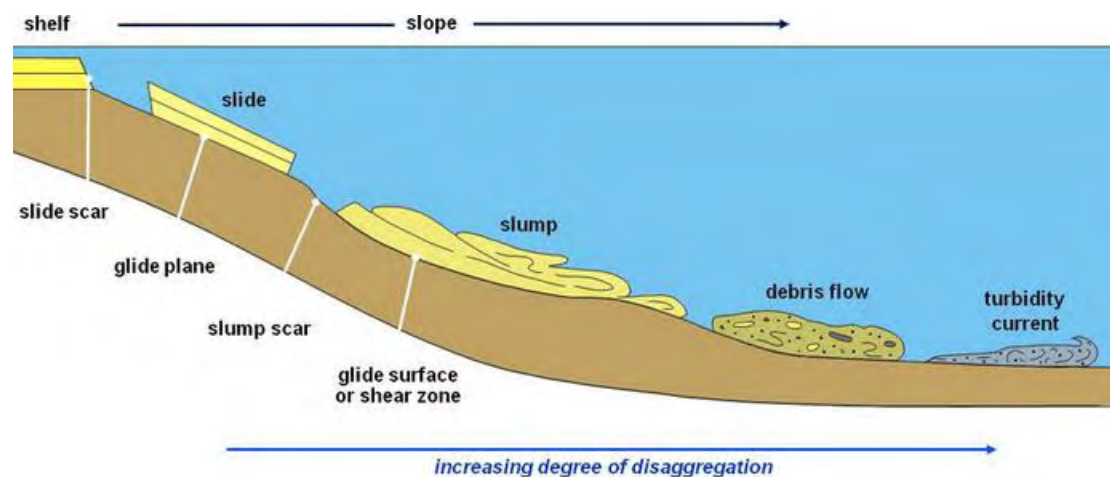
Για να γίνει η τελική επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ανάλυσης ευστάθειας, πρέπει να γίνει η αναγνώριση του μηχανισμού εκδήλωσης της αστοχίας. Δηλαδή, πρέπει να γίνει αναγνώριση των γεωμετρικών, γεωλογικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών της αστοχίας. Επιπροσθέτως πρέπει να προσδιορισθούν οι φυσικομηχανικές παράμετροι των εδαφικών σχηματισμών. Μετά την επιλογή της μεθόδου ανάλυσης ευστάθειας, πραγματοποιείται μια συσχέτιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με τις επιτόπου παρατηρήσεις, οπότε γίνεται και έλεγχος της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων [11].

## ΤΑ ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΕΙΔΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ



Εικόνα 16. Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes (1978).

Όσον αφορά τις υποθαλάσσιες βαρυτικές ροές (εικόνα 17), ο συνήθεις τρόπος όπου ολισθαίνει κι αστοχεί μια μάζα, υπό την επίδραση της βαρύτητας, στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι η πτώση βράχων, η ολίσθηση, η ροή κορημάτων, η λασποροή, η ροή κόκκων, η ρευστοποιημένη ροή, τα τουρβιδιτικά ρεύματα, οι εξαπλώσεις και ο εδαφικός ερπυσμός. Αναλυτική περιγραφή των βαρυτικών ροών αναπτύσσεται στο κεφάλαιο 4.5.1.



Εικόνα 17. Απεικόνιση των τύπων των υποθαλάσσιων βαρυτικών ροών. Η συνοχή μειώνεται από αριστερά προς τα δεξιά με ταυτόχρονη αύξηση του βαθμού διάσπασης (disaggregation). Slide = ολίσθηση, slump = κατάπτωση, debris flow = ροή κορημάτων, turbidity current = τουρβιδιτικό ρεύμα.

Ανεξάρτητα του τρόπου αστοχίας, υπάρχουν τρεις κύριες συνθήκες που πρέπει να ληφθούν υπ'όψιν στην εκτίμηση ευστάθειας πρανών και αυτές είναι οι χαρακτηριστικές καταστάσεις της συμπεριφοράς του εδάφους κατά τη φόρτισή του (όπου  $\Delta u$  η μεταβολή της πίεσης του νερού των πόρων και  $\Delta V$  η μεταβολή όγκου του εδάφους):

- ✚ Αστράγγιστες συνθήκες, αν ο μηχανισμός πρόκλησης της αστοχίας είναι τόσο γρήγορος ώστε να μην γίνεται στράγγιση του εδάφους, δηλαδή το νερό παρεμποδίζεται της διαφυγής του,  $\Delta u \neq 0, \Delta V = 0$ .
- ✚ Πλήρως στραγγιζόμενες συνθήκες, αν ο μηχανισμός πρόκλησης της βαρυντικής ροής είναι αρκετά αργός, ώστε η επίδραση της φόρτισης στη πίεση του νερού των πόρων να είναι αμελητέα,  $\Delta u = 0, \Delta V \neq 0$ .
- ✚ Μερικώς στραγγιζόμενες συνθήκες, όπου υπάρχει ακόμα περίσσεια φόρτισης στη πίεση του νερού των πόρων.

Οι αστράγγιστες συνθήκες, σχετίζονται με περίσσεια της πίεσης του νερού των πόρων του εδάφους λόγω σεισμογενούς δράσης. Οι πλήρως στραγγιζόμενες συνθήκες σχετίζονται με τον αργό ρυθμό παραμόρφωσης του πρανούς ούτως ώστε η πίεση του νερού των πόρων να ισούται με την υδροστατική, συνεπώς να μην υπάρχει καθόλου ροή νερού από το έδαφος. Οι μερικώς στραγγιζόμενες συνθήκες, δύναται να προκύψουν από πληθώρα γεωλογικών, γεωφυσικών και γεωτεχνικών διεργασιών, που αυξάνουν την πίεση του νερού των πόρων, συνεπώς το πρανές βρίσκεται σε μια δυναμική ισορροπία λόγω ταυτόχρονης στερεοποίησης αλλά και αύξησης της πίεσης του νερού των πόρων [10]. Για παράδειγμα, αυξημένη πίεση του νερού των πόρων, υπάρχει σε περιοχές με υψηλούς ρυθμούς ιζηματογένεσης, ενώ αυτά τα ιζήματα αποτελούν τεχνικά κανονικά στερεοποιημένα (normally consolidated) εδάφη. Συχνά, αυτά τα εδάφη αναφέρονται και ως υποστερεοποιημένα (under consolidated), επειδή ακόμα διαμορφώνονται. Αυξημένη πίεση του νερού των πόρων μπορεί επίσης να οφείλεται στη προ-διάλυση των ένυδρων αερίων που βρίσκονται μέσα στο έδαφος. Ο βαθμός υπερστερεοποίησης OCR ονομάζεται ο λόγος,

$$OCR = \frac{\sigma'_{vmax}}{\sigma'_v} \quad , \quad 2.1$$

όπου  $\sigma'_v$  είναι η γεωστατική ενεργός κατακόρυφη τάση, ενώ  $\sigma'_{vmax}$  είναι η μέγιστη γεωστατική ενεργός κατακόρυφη τάση που έχει ασκηθεί στο έδαφος [12].

Τονίζεται ότι στην ανάλυση ευστάθειας των πρανών, σημαντικό ρόλο παίζει η εκτίμηση του βαθμού της αύξησης της πίεσης του νερού των πόρων που έχει παραμείνει στο έδαφος διότι αποτελεί επιβαρυντικό παράγοντα για την ενεργοποίηση αστοχίας σε ένα πρανές [9]. Η ευστάθεια των πρανών εξαρτάται από την διατμητική αντοχή του εδάφους (ή βράχου). Η διατμητική αντοχή του εδάφους, εκφράζει την αντίσταση του εδάφους σε αστοχία καθώς αυτό παραμορφώνεται κατά την φόρτιση ή και την αποφόρτισή του. Η διατμητική αντοχή του εδάφους προσδιορίζεται βάση τα κριτήρια αστοχίας, όπως λόγου χάρη το κριτήριο της μέγιστης διατμητικής τάσης,

του μέγιστου λόγου των κυρίων τάσεων, της αντοχής που οδηγεί σε καθορισμένη παραμόρφωση, της οριακής και της παραμένουσας αντοχής [11].

Η κατολίσθηση εκδηλώνεται λόγω της διατμητικής αστοχίας του εδάφους, κατά μήκος μιας επιφάνειας ολίσθησης σε συγκεκριμένο βάθος μέσα στην εδαφική μάζα. Αυτό συμβαίνει διότι η συνολική διατιθέμενη διατμητική αντοχή εξισώνεται με τις επιβαλλόμενες, εξωγενείς ή φυσικές διατμητικές τάσεις [10]. Η ευστάθεια πρανών, εκφράζεται με τον συντελεστή ασφαλείας  $F$ , ο οποίος εκφράζει το πηλίκο της (μέγιστης) διατμητικής αντοχής του εδάφους,  $\tau_{ult} = \tau_f$ , ως προς την διατμητική τάση που προκαλεί την ολίσθηση,  $\tau_{mob} = \tau$ , [10]:

$$F = \frac{\tau_{ult}}{\tau_{mob}} = \frac{\text{μέγιστη τάση αντίστασης}}{\text{τάση κινητικότητας}} \quad 2.2$$

Η μέγιστη διατμητική αντοχή μπορεί να οριστεί, είτε με ένα κριτήριο αστοχίας ολικών τάσεων, όπου

$$\tau_{ult} = s_u + \sigma_n \tan \varphi, \quad 2.3$$

για αστράγγιστες συνθήκες, είτε με ένα κριτήριο αστοχίας ενεργών τάσεων, όπου

$$\tau_{ult} = \tau'_f = c' + \sigma'_n \tan \varphi', \quad 2.4$$

για στραγγιζόμενες συνθήκες, όπου  $s = c$  είναι η εγγενής συνοχή και  $\varphi$  η εγγενής γωνία τριβής του εδάφους,  $\sigma'_n$  η ενεργή ορθή τάση στο επίπεδο αστοχίας,  $s_u$  η αστράγγιστη διατμητική αντοχή. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με την αρχή της ενεργού τάσης, ισχύει ο ακόλουθος τύπος,

$$\sigma' = \sigma - u, \quad 2.5$$

όπου  $\sigma$  η ολική τάση και  $u$  η πίεση του νερού των πόρων. Η πίεση του νερού των πόρων  $u$ , ισούται με την αρχική πίεση πόρων συν την αύξησή της  $\Delta u$  λόγω σεισμού, ένυδρων αερίων, διάβρωσης, υποστερεοποίησης, κυματικής φόρτισης κ.α.,

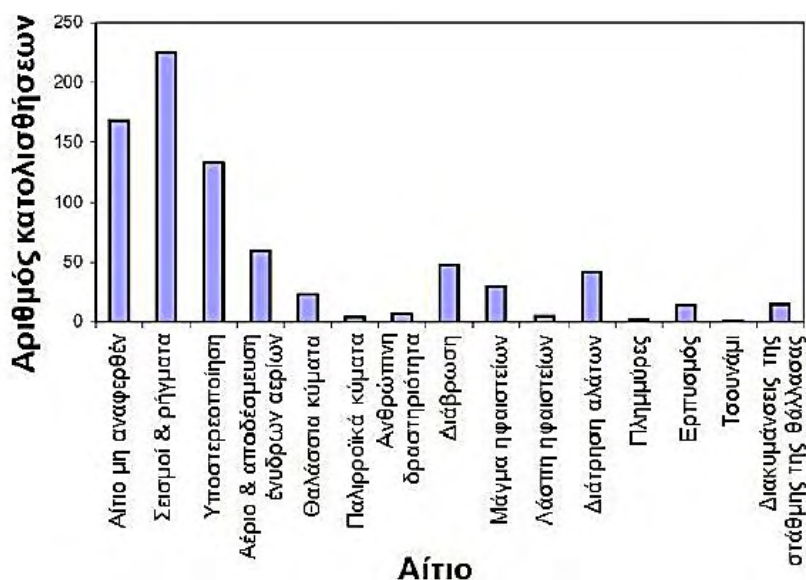
$$u = u_o + \Delta u. \quad 2.6$$

Για αστοχία πρανούς που συμβαίνει για πρώτη φορά, η μακροχρόνια ευστάθειά του υπολογίζεται από την οριακή αντοχή του εδάφους. Αν έχει υπάρξει στο παρελθόν κάποια ολίσθηση, τότε η ευστάθεια του πρανούς υπολογίζεται από την παραμένουσα αντοχή, τουλάχιστον στις περιοχές όπου η επιφάνεια αστοχίας, μπορεί να συμπίσει με την επιφάνεια της προηγούμενης ολίσθησης [10]. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι η διατμητική αντοχή δεν είναι μονοσήμαντη ιδιότητα του εδάφους και ότι εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων, όπως:

- ✚ Την ορυκτολογική σύσταση των κόκκων.
- ✚ Το σχήμα, το μέγεθος και τη διάταξη των κόκκων.
- ✚ Το δείκτη πόρων και την υγρασία.
- ✚ Την ιστορία της φόρτισης.
- ✚ Το καθεστώς των τάσεων πεδίου.

Στην εικόνα 18, παρατίθενται ενδεικτικά τα αίτια των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων και ο αριθμός εμφάνισης του κάθε αιτίου. Στατιστικά το πιο κοινό αίτιο πρόκλησης υποθαλάσσιων κατολισθήσεων είναι οι σεισμοί και τα ρήγματα, ενώ ακολουθούν η

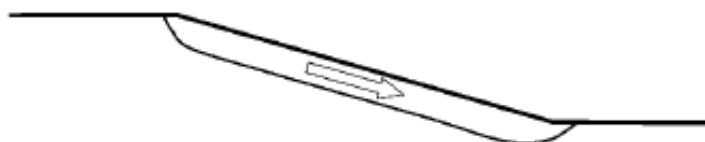
υποστερεοποίηση, η διάβρωση, η αποδέσμευση ένυδρων αερίων και αερίων, τα διάλυρα άλατος, ο εδαφικός ερπυσμός. Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι οι διακυμάνσεις της στάθμης της θάλασσας, η ανθρώπινη δραστηριότητα και τα παλιρροιακά κύματα αποτελούν μικρό ποσοστό των αιτιών δημιουργίας υποθαλάσσιων κατολισθήσεων. Δυστυχώς μη αναφερθέντα αίτια πρόκλησης υποθαλάσσιων κατολισθήσεων δυσχεραίνουν τη στατιστική ανάλυση αυξάνοντας το ποσοστό λάθους.



Εικόνα 18. Ενδεικτική παράθεση των αιτιών των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων.

## ΡΗΧΗ ΑΣΤΟΧΙΑ ΠΡΑΝΟΥΣ

Ρηχή αστοχία πρανούς είναι το είδος της αστοχίας όπου η επιφάνεια της αστοχίας βρίσκεται λίγα μέτρα κάτω από την επιφάνεια του πρανούς και η αστοχία λαμβάνει χώρα παράλληλα με το μέτωπο του πρανούς. Σε αυτή τη περίπτωση είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η θεωρία πρανούς απείρου μήκους. Η θεωρία πρανούς απείρου μήκους είναι πολύ χρήσιμη για ρηχές μεταθετικές κατολισθήσεις (translational slides) και είναι η καταλληλότερη μέθοδος για ήπιες κλίσεις πρανών, όπου η αστοχία συμβαίνει επίπεδα και παράλληλα με το πρανές, όπως φαίνεται από την εικόνα ν.18.



Εικόνα 19. Απεικόνιση ρηχής αστοχίας πρανούς

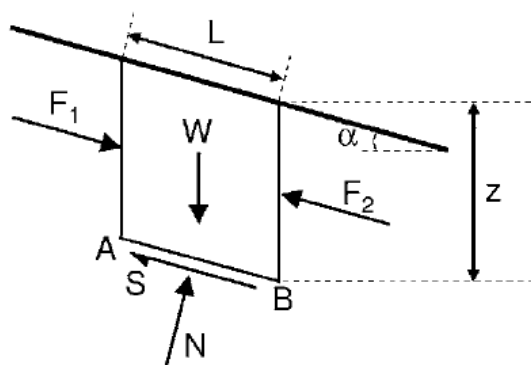
## ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΠΡΑΝΟΥΣ ΑΠΕΙΡΟΥ ΜΗΚΟΥΣ

Θεωρώντας αστοχία ενός εδαφικού τμήματος μήκους  $L$ , και αναλύοντας τις δυνάμεις σε κάθετες και εφαπτομενικές, προκύπτουν κάθετες δυνάμεις και δυνάμεις διάτμησης στο έδαφος  $N$  και  $S$ , αντίστοιχα, συναρτήσει του βάρους του εδαφικού τμήματος  $W$  (δρουν κάθετα και παράλληλα προς το επίπεδο ολίσθησης), [10].

Οι δυνάμεις  $F_1, F_2$  αλληλοεξουδετερώνονται, εκτός από την πίεση των πόρων, η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$u = \gamma_w z L \sin \alpha \cos \alpha \quad 2.7$$

η οποία δρα από τα δεξιά προς τα αριστερά [10]. Η γωνία κλίσης του πρανού είναι η  $\alpha$  (εικόνα 20).



Εικόνα 20. Απεικόνιση των δυνάμεων σε ένα εδαφικό τμήμα πρανού απείρου μήκους.

Αναλυτικότερα, το βάρος του εδαφικού τμήματος δίνεται από την σχέση:

$$W = \gamma z L \cos \alpha. \quad 2.8$$

Οι ενεργές τάσεις  $N'$  και  $S'$  στην επιφάνεια ολίσθησης εκφράζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$N' = W \cos \alpha - \gamma_w z L \cos^2 \alpha = \gamma' z L \cos^2 \alpha, \quad 2.9$$

$$S = W \sin \alpha - \gamma_w z L \sin \alpha \cos \alpha = \gamma' z L \sin \alpha \cos \alpha, \quad 2.10$$

όπου  $\gamma$  και  $\gamma'$  είναι το ολικό και βυθισμένο ειδικό βάρος του εδάφους και συνδέονται με τη σχέση,

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w. \quad 2.11$$

Οι ονομαστικές τάσεις (ορθές και διατμητικές) που δρουν πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης A (μοναδιαίου πλάτους), δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$\sigma'_s = \frac{N'}{A} = \gamma' z \cos^2 \alpha, \quad 2.12$$

$$\tau_s = \frac{S}{A} = \gamma' z \sin \alpha \cos \alpha. \quad 2.13$$

Για αστράγγιστες συνθήκες, ο συντελεστής ασφαλείας  $F$  μπορεί να εκφραστεί με ένα κριτήριο ολικής αστοχίας,  $\tau_{ult} = s_u$ , συνεπώς:

$$F = \frac{2s_u}{\gamma' z \sin \alpha \cos \alpha} = \frac{2s_u}{\gamma' z \sin 2\alpha} \quad 2.14$$

Η εξίσωση 2.14, για οριακή ισορροπία πρανών και  $F=1$ , μπορεί να εκφραστεί με την κρίσιμη γωνία πρανούς  $\alpha_{ult}$ :

$$\alpha_{ult} = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{2s_u}{\gamma'z}\right) \quad 2.15$$

Εάν  $k$ , είναι ο λόγος της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ( $k=s_u/\sigma'_{v0}$ ),  $\sigma'_{v0}$ = η ενεργή κατακόρυφη γεωστατική τάση πεδίου, τότε, οι εξισώσεις 2.14 και 2.15 παίρνουν την εξής μορφή:

$$F = \frac{2k}{\sin 2\alpha}, \quad 2.16$$

$$\alpha_{ult} = \frac{1}{2} \arcsin(2k). \quad 2.17$$

Μία μαλακή θαλάσσια απόθεση κανονικά στερεοποιημένη, θα έχει λόγο αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $k \sim 0.2$ , συνεπώς κρίσιμη γωνία  $\alpha_{ult} = 12^\circ$ . Έτσι, ένα πρανές που είχε ήδη αστοχήσει, θα είχε μικρότερη διατμητική αντοχή και συνεπώς μικρότερη κρίσιμη κλίση πρανούς [10].

Η κρίσιμη γωνία ενός αστράγγιστου πρανούς εξαρτάται από το βάθος της επιφάνειας ολίσθησης. Αν αυτό το βάθος είναι σχετικά μεγάλο, τότε η προσέγγιση της αστοχίας με ολίσθηση παράλληλα προς την επιφάνεια ολίσθησης δεν είναι πλέον έγκυρη και πρέπει να ληφθεί υπόψη μια αστοχία με μεγάλο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης.

Σε στραγγιζόμενες συνθήκες με υδροστατικές πιέσεις πόρων, το κριτήριο αστοχίας για ενεργές τάσεις γίνεται:

$$\tau_{ult} = \sigma' \tan \varphi_{crit}. \quad 2.18$$

Συνεπώς ο συντελεστής ασφαλείας  $F$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F = \frac{\gamma'z \cos^2 \alpha \tan \varphi_{crit}}{\gamma'z \sin \alpha \cos \alpha} = \frac{\tan \varphi_{crit}}{\tan \alpha}. \quad 2.19$$

Συνεπώς η οριακή τιμή της γωνίας που μπορεί να πάρει ένα υποθαλάσσιο πρανές χωρίς υπέρβαση της πίεσης των πόρων, είναι:

$$\alpha_{ult} = \varphi_{crit}. \quad 2.20$$

Επειδή συνήθως η κρίσιμη γωνία τριβής  $\varphi_{crit}$ , είναι μεγαλύτερη των  $20^\circ$ , η αστοχία με στραγγιζόμενες συνθήκες, όπου μόνο οι δυνάμεις βαρύτητας επιδρούν στο πρανές, αποτελεί έναν λιγότερο πιθανό μηχανισμό αστοχίας [10].

Η ενεργός κάθετη τάση που ασκείται στο επίπεδο αστοχίας σε ένα βάθος  $z$  κάτω από τον θαλάσσιο πυθμένα, μειώνεται λόγω της υπερπίεσης των πόρων  $u_e$  και είναι ίση με:



$$\sigma'_n = \gamma' z \cos^2 a - u_e . \quad 2.21$$

Η υπερπίεση του νερού των πόρων προκύπτει λόγω υποστερεοποίησης (γρήγοροι ρυθμοί ιζηματογένεσης), και συνεπώς η τελική διατμητική τάση θα είναι ίση με:

$$\tau_{ult} = k\sigma'_n = k(\gamma' z \cos^2 a - u_e) , \quad 2.22$$

όπου ο λόγος της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $k$ , κυμαίνεται μεταξύ του 0.2-0.3 για εδάφη όπου ακόμη υπόκεινται σε στερεοποίηση. Συνεπώς, ο συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας σε αστράγγιστες συνθήκες είναι ίσος με:

$$F = \frac{k(\gamma' z \cos^2 a - u_e)}{\gamma' z \sin a \cos a} . \quad 2.23$$

Μια εναλλακτική μορφή του συντελεστή ασφαλείας  $F$  είναι η χρήση ενός κριτηρίου αστοχίας για ενεργές τάσεις, όπου  $\tau_{ult} = \sigma'_n \tan \varphi_{crit}$ , η οποία δίνει για τον  $F$  την ακόλουθη μορφή:

$$F = \frac{(\gamma' z \cos^2 a - u_e) \tan \varphi_{crit}}{\gamma' z \sin a \cos a} . \quad 2.24$$

Θεωρώντας σταθερό λόγο υπερπίεσης πόρων  $r_u = u_e / \gamma' z$  η κάθετη τάση επί του επιπέδου διάτμησης είναι η ακόλουθη:

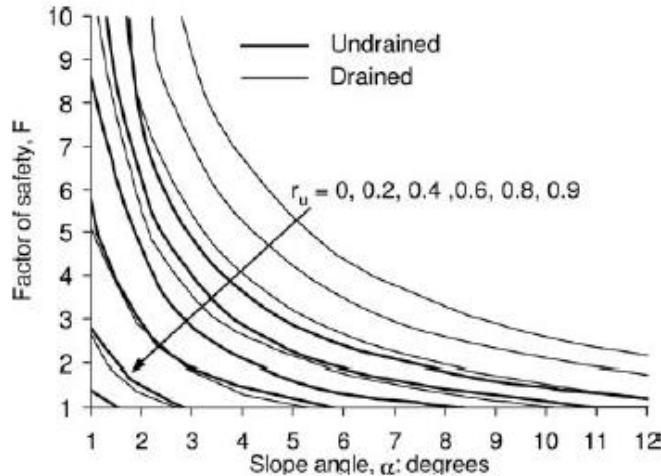
$$\sigma_s = \gamma' z (\cos^2 a - r_u) \quad 2.25$$

Αυτό οδηγεί στους συντελεστές ασφαλείας  $F$ , για κριτήρια αστοχίας ολικής και ενεργής τάσης, αντίστοιχα, οι οποίοι παίρνουν τις εξής μορφές:

$$F = \frac{k(\gamma' z \cos^2 a - u_e)}{\gamma' z \sin a \cos a} = k \frac{\cos^2 a - r_u}{\sin a \cos a} , \quad 2.26$$

$$F = \frac{\gamma' z (\cos^2 a - r_u) \tan \varphi_{crit}}{\gamma' z \sin a \cos a} = \frac{\cos^2 a - r_u \tan \varphi_{crit}}{\sin a \cos a} . \quad 2.27$$

Η εικόνα 21 δείχνει τον συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας πρανούς ως συνάρτηση της γωνίας πρανούς και του λόγου της υπερπίεσης πόρων  $r_u = u_e / \gamma' z$  για αστράγγιστες και στραγγιζόμενες συνθήκες με λόγο  $k = s_u / \sigma'_v = 0.25$  και γωνία τριβής  $\varphi_{crit} = 25^\circ$ , αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι ο συντελεστής ασφαλείας για στραγγιζόμενες συνθήκες είναι σχεδόν ο διπλάσιος απ'ότι για αστράγγιστες συνθήκες [10].



Εικόνα 21. Συντελεστές ασφαλείας για την ανάλυση απείρου πρανού, (Οι παχιές μαύρες γραμμές αντιστοιχούν στις αστράγγιστες συνθήκες, ενώ οι λεπτές μαύρες γραμμές αντιστοιχούν στις στραγγιζόμενες συνθήκες).

Η θεώρηση ισορροπίας δυνάμεων, οι οποίες δρουν σε ένα μερικώς στραγγιζόμενο εδαφικό στοιχείο, δείχνει ότι η γωνία κλίσης του πρανού μεταβάλλεται σε σχέση με τον λόγο της υπερπίεσης πόρων σχεδόν γραμμικά και δίνεται από την εξής σχέση:

$$\alpha_{ult} = \varphi_{crit}(1 - r_u), \quad 2.28$$

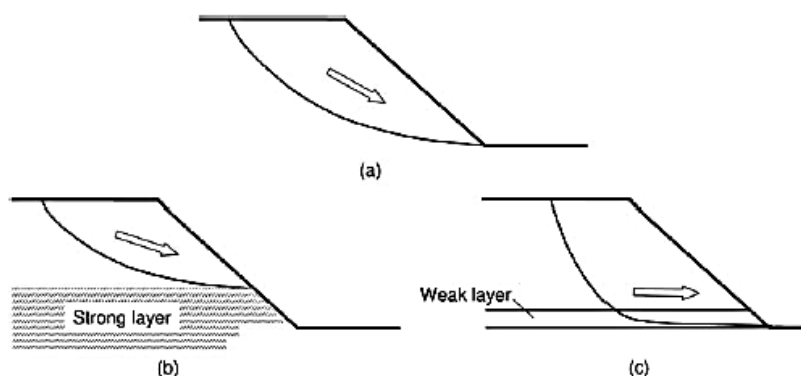
όπου  $r_u$  ο λόγος της υπερπίεσης πόρων.

Η ανάλυση πρανού απείρου μήκους είναι κατάλληλη για μεγάλο μήκος, ομοιόμορφα πρανή, όμως πολλά πρανή δεν μπορούν να θεωρηθούν ιδανικά ως μεγάλο μήκος και ομοιόμορφα. Συχνά είναι επίσης σημαντικό να γίνεται ανάλυση τοπικά αποσταθεροποιητικών παραγόντων, στην κορυφή ή στον πόδα του πρανού, π.χ. η κατασκευή μιας πλατφόρμας ή το επίχωμα για έναν αγωγό. Στις προκειμένες περιπτώσεις η ανάλυση πρανού απείρου μήκους δεν είναι ικανοποιητική και χρησιμοποιείται η μέθοδος ανάλυσης αστοχίας βαθέως καθίσματος (deep seated failure analysis) [10].

Ένας μηχανισμός ενεργοποίησης που λειτουργεί σε ένα τμήμα ενός μεγάλου μήκους πρανού μπορεί να οδηγήσει σε τοπική αστοχία που στη συνέχεια διαδίδεται πάνω και κάτω από της επιφάνεια του πρανού με την χαλάρωση (εξασθένηση) του υλικού να παρατηρείται στην επιφάνεια ολίσθησης. Τέτοιες συνθήκες που οδηγούν στην ανάπτυξη διατμητικών ζωνών και πιθανές καταστροφικές αστοχίες βοηθούν στην ερμηνεία υποθαλάσσιων ολισθήσεων σε πρανή με σχετικά μικρές γωνίες κλίσης.

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΠΡΑΝΗ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΒΑΘΟΥΣ (DEEP SEATED FAILURE ANALYSIS) [10]

Τέτοιου είδους αστοχίες πρανούς, συνήθως συμβαίνουν με περιστροφική κίνηση κατά μήκος ολισθαίνοντων (ή κυκλικών) επιφανειών όπως φαίνεται στην εικόνα 22. Κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης συνήθως σχετίζονται με ομογενείς αποθέσεις ιζημάτων και μη κυκλικές καμπύλες με ανομοιογενείς αποθέσεις ιζημάτων. Αν υπάρχουν ισχυρά (strong layer) ή ασθενή (weak layer) στρώματα, τότε η αστοχία λαμβάνει χώρα υπό μια συνδυασμένη μορφή, όπως φαίνεται στην εικόνα 22 (22b και 22c).



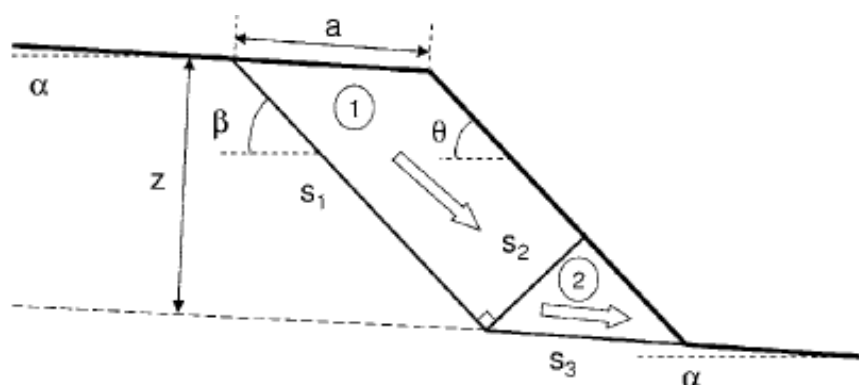
Εικόνα 22. Μηχανισμοί αστοχίας deep seated, περιστροφική αστοχία και συνδυασμένη.

Συνήθως χρησιμοποιούνται μέθοδοι οριακής ισορροπίας για την ανάλυση αστοχιών με επιφάνεια ολίσθησης μεγάλου βάθους (deep seated). Η αστοχία θεωρείται ότι συμβαίνει κατά μήκος μιας γνωστής επιφάνειας αστοχίας. Για τη διατήρηση της οριακής ισορροπίας συγκρίνεται η απαιτούμενη διατμητική αντοχή με τη διαθέσιμη διατμητική αντοχή του εδάφους, δίνοντας έναν μέσο όρο για το συντελεστή ασφαλείας, κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης. Για την προσέγγιση ολικών τάσεων, η κατάσταση είναι στατικά ευσταθής και η λύση είναι σχετικά εύκολη. Για την προσέγγιση των ολικών τάσεων, το πρόβλημα είναι στατικά απροσδιόριστο και απαιτεί κάποιες απλουστεύσεις για να λυθεί. Οι αναλύσεις οριακής ισορροπίας είναι κατά κύριο λόγο επαναληπτικές διαδικασίες, με τον συντελεστή ασφαλείας να ορίζεται ως η χαμηλότερη τιμή από όλες τις επαναλήψεις για την επίλυση του προβλήματος.

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ/ΜΠΛΟΚ (BLOCK MECHANISM ANALYSIS) [10]

Σε κάποιες περιπτώσεις, ο μηχανισμός εδαφικού μπλοκ κυριαρχεί στην αστοχία του πρανούς, ειδικότερα εάν υπάρχει κάποιο στρώμα ασθενούς εδάφους στη βάση του πρανούς. Τέτοια περίπτωση είναι όταν ένα πρανές αποτελείται από δύο ή περισσότερα μπλοκ (σφήνες) εδάφους ή βράχου. Το Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI) ανέπτυξε την απλή μέθοδο των δύο σφηνών η οποία εφαρμόζεται

ως επί το πλείστον στις παλινδρομικές (retrogressive) κατολισθήσεις. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι σχετικά εύκολη και γρήγορη στη λύση της. Παρόλα αυτά πρέπει να διερευνηθούν διάφορες επιφάνειες ολίσθησης για να βρεθεί ο κρίσιμος μηχανισμός αστοχίας. Η διάταξη των δύο σφηνών φαίνεται στην εικόνα 23, όπου διακρίνονται η πίσω/ενεργή σφήνα (back wedge) ή σφήνα 1 και η σφήνα πόδα/παθητική (toe wedge) ή σφήνα 2. Η κλίση του θαλάσσιου πυθμένα  $\alpha$ , θεωρείται η ίδια τόσο πάνω όσο και κάτω από το πρανές και καθορίζει την κλίση της βάσης του επιπέδου ολίσθησης της σφήνας πόδα. Η κλίση του πρανούς  $\theta$  δεν είναι απαραίτητο να ισούται με την γωνία της πίσω σφήνας  $\beta$ . Τα επίπεδα ολίσθησης της πίσω σφήνας  $s_1$  και  $s_2$  είναι κάθετα μεταξύ τους και σχηματίζουν ένα ορθογώνιο τρίγωνο.



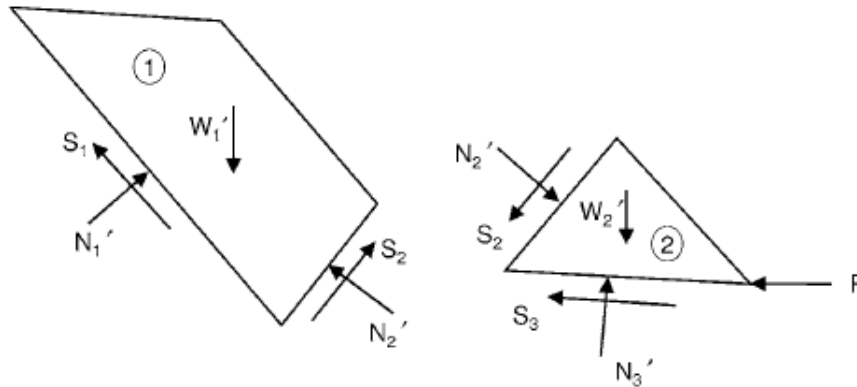
Εικόνα 23. Ο μηχανισμός των δύο σφηνών.

Η απόσταση μεταξύ της έναρξης του επιπέδου ολίσθησης της πίσω σφήνας πίσω από την κορυφή του πρανούς, καθορίζεται από την παράμετρο  $a$ . Το κάθετο ύψος του πρανούς ή αλλιώς το βάθος του ασθενούς στρώματος, ορίζεται από τον πυθμένα ως το παράλληλο επίπεδο στο επίπεδο του πόδα, ή στο επίπεδο του ασθενούς στρώματος και καθορίζεται από την παράμετρο  $z$ , όπως φαίνεται από την εικόνα 23.

Η ισορροπία των δύο σφηνών, φαίνεται από την εικόνα 24. Οι ορθές δυνάμεις  $N'_1, N'_2, N'_3$  αποτελούν τις κάθετες ενεργές δυνάμεις που δρουν κάθετα στα επίπεδα ολίσθησης. Οι  $S_1, S_2, S_3$  είναι οι διατμητικές δυνάμεις κατά μήκος των ολισθαίνοντων επιπέδων. Οι διατμητικές δυνάμεις ισούνται με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $s_u$  επί το μήκος του επιπέδου ολίσθησης  $s_i$ . Τα βυθισμένα βάρη των δύο σφηνών είναι αντίστοιχα τα  $W'_1, W'_2$  για τις σφήνες 1 και 2. Το  $P$ , αναπαριστά οποιαδήποτε παθητική πλευρική αντίσταση στο πόδα του πρανούς. Λαμβάνοντας υπ'όψιν ισορροπία στις δύο σφήνες και υποθέτοντας τον ίδιο συντελεστή ασφαλείας  $F$  για όλα τα επίπεδα ολίσθησης, προκύπτει η ακόλουθη λύση κλειστού τύπου για τον συντελεστή ασφαλείας:

$$F = \frac{S_1^{max} + S_2^{max} \sin(\beta - \alpha) + S_3^{max} \cos((\beta - \alpha) + P \cos \alpha}{W'_1 \sin \alpha + W'_2 \sin \beta \cos(\beta - \alpha)} \quad 2.29$$

Οι κάθετες δυνάμεις στο επίπεδο ολίσθησης αλληλοαναιρούνται, όπως φαίνεται από την εικόνα ν.24, συνεπώς δεν εμφανίζονται στον υπολογισμό. Ο αριθμητής δίνει τις συνιστώσες των μέγιστων διατμητικών δυνάμεων που μπορούν να ενεργοποιηθούν στα επίπεδα ολίσθησης που δρουν παράλληλα με τον θαλάσσιο πυθμένα. Ο παρονομαστής δίνει τις συνιστώσες των διατμητικών δυνάμεων που δρουν παράλληλα στον θαλάσσιο πυθμένα λόγω ίδιου βάρους των σφηνών [10].



Εικόνα 24. Ισορροπία των δύο σφηνών, στον ομώνυμο μηχανισμό.

Στην απλή περίπτωση όπου η γωνία του πίσω ολισθαίνοντος μπλοκ  $\beta$  ισούται με την κλίση πρανούς  $\theta$ , τότε ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις για τα μήκη των ολισθαίνοντων επιπέδων και για τις επιφάνειες των σφηνών:

$$s_1 = a, \quad 2.30$$

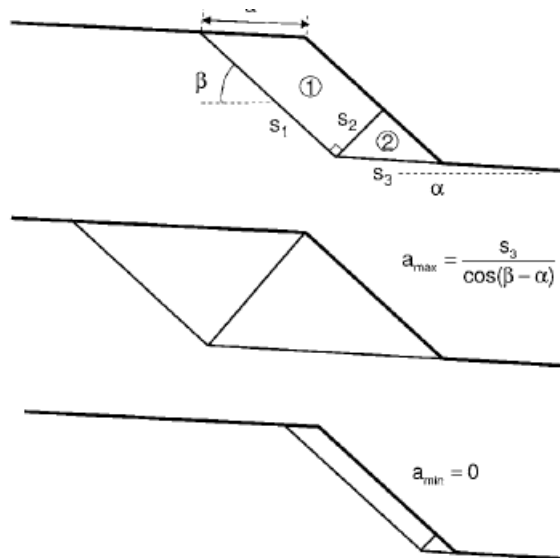
$$s_2 = a \sin(\beta - a), \quad 2.31$$

$$s_3 = \frac{z}{\sin(\beta - a)}, \quad 2.32$$

$$A_1 = \frac{s_2^2}{2 \tan(\beta - a)}, \quad 2.33$$

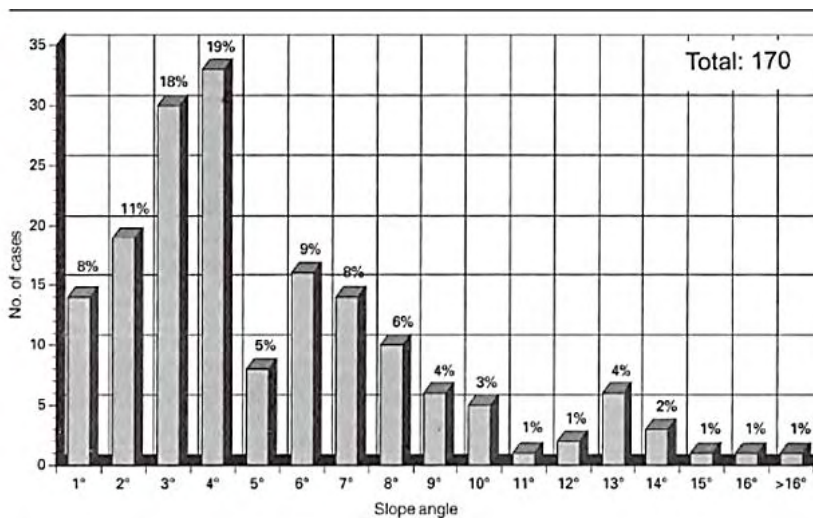
$$A_2 = az - A_1. \quad 2.34$$

Κινηματικοί περιορισμοί επιβάλλουν όρια στον μηχανισμό των δύο σφηνών, όπως φαίνεται από την παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 25. Τα όρια του μηχανισμού των δύο σφηνών.

Στην εικόνα 26 απεικονίζεται ο αριθμός των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων (άξονας y) σε σχέση με την κλίση του υποθαλάσσιου πρανού (άξονας x). Παρατηρείται ότι η πλειονότητα των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων συμβαίνει σε πολύ μικρές κλίσεις, μικρότερες των 5 μοιρών.



Εικόνα 26. Η πλειονότητα των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων, παρατηρείται σε ήπιες κλίσεις μέχρι 10 μοίρες.

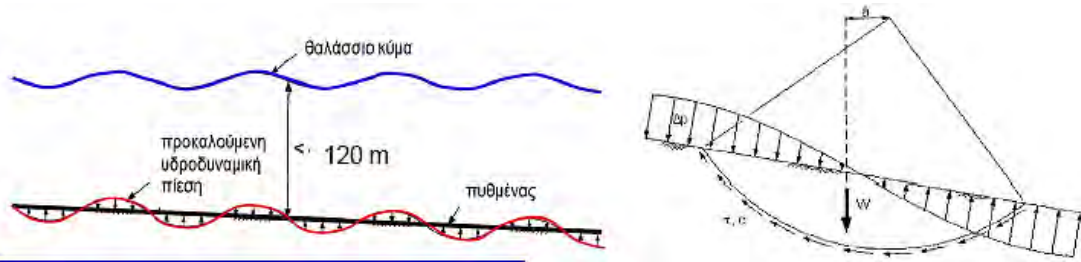
Ο θαλάσσιος πυθμένας αποτελεί έναν χώρο ανάπτυξης φυσικών γεωκινδύνων λόγω της εγγενούς του ευαισθησίας. Ειδικότερα, έχει παρατηρηθεί ότι ο θαλάσσιος πυθμένας αποσταθεροποιείται πολύ εύκολα, αστοχώντας υπό μορφή κατολισθήσεων και βαρυτικών ροών. Ως εκ τούτου, ακόμη και σε πολύ μικρές κλίσεις, της τάξεως των 0.5-5°, παρατηρείται η πλειονότητα των κατολισθήσεων. Αυτές οι αστοχίες, έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν αστοχίες υπό τη μορφή παλινδρομικών ολισθήσεων, να αυξήσουν τη τοπική έκταση των ζωνών αστοχίας καθώς και να αποσταθεροποιήσουν την περιοχή πίσω από την κεφαλή της κατωφέρειας.

## ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΚΥΜΑΤΑ

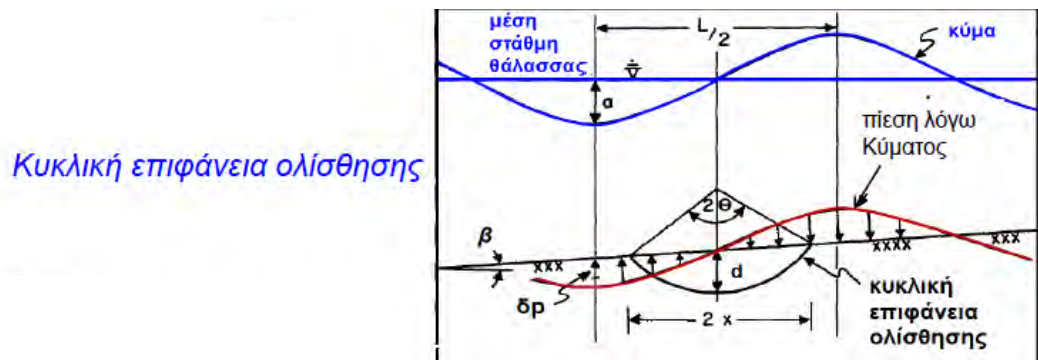
Τα επιφανειακά κύματα ασκούν κυκλικές υδραυλικές πιέσεις και διατμητικές τάσεις στο πυθμένα της θάλασσας. Η επιβαλλόμενη φόρτιση, προκαλεί αύξηση στη πίεση πόρων στα ιζήματα που βρίσκονται κάτω από το πυθμένα. Το μέγεθος των κυκλικών πιέσεων εξαρτάται από το ύψος των κυμάτων, το μήκος κύματος και το βάθος της θάλασσας. Το πλάτος της ασκούμενης πίεσης μειώνεται με την αύξηση του βάθους του νερού, συνεπώς η υδροδυναμική κυκλική πίεση είναι πιο σημαντική στα ρηγά νερά, περίπου σε λιγότερο από 150m βάθος, παρά στα βαθιά νερά. Παρ'όλα αυτά μεγάλα κύματα λόγω καταιγίδας και ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως κυκλώνες και τυφώνες μπορούν να επηρεάσουν τα ιζήματα του βαθύτερου πυθμένα. Το πρώτο καταγεγραμμένο περιστατικό αστάθειας πυθμένα λόγω κυμάτων ακραίων καιρικών φαινομένων συνέβη το 1969, στο κόλπο του Μεξικού, ενώ 35 χρόνια αργότερα, πάλι στην ίδια περιοχή ο τυφώνας Ivan, προκάλεσε αστάθεια πυθμένα λόγω λασποροής. Επιπροσθέτως, tsunami, λόγω σεισμού, μπορούν να αποσταθεροποιήσουν υποθαλάσσια πρανή αλλά και υποθαλάσσιες κατολισθήσεις μπορούν να ενεργοποιήσουν tsunami, επηρεάζοντας σημαντικά τις υπεράκτιες κατασκευές με την επαγόμενη φόρτισή τους, όπως θα αναλυθεί και παρακάτω.

Τα εσωτερικά κύματα ή σολιτόνια, επηρεάζουν την αντοχή των ιζημάτων του πυθμένα με παρόμοιο τρόπο. Τα σολιτόνια ταλαντώνονται εντός της κατακόρυφης στήλης του νερού και προκαλούνται από διαφορές πυκνότητας εντός της στήλης νερού, οι οποίες δημιουργούνται λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς ή διαφοράς στην αλατότητα του νερού. Η τάση που ασκείται στον ωκεάνιο πυθμένα λόγω των εσωτερικών κυμάτων, μειώνεται με την αύξηση του βάθους, συνεπώς, όπως και στα επιφανειακά κύματα, και τα εσωτερικά κύματα έχουν μεγαλύτερη επίδραση στα ρηγά νερά.

Οι ωκεάνιες μάζες που κινούνται κατά μήκος του ωκεάνιου πυθμένα, μεταφέρουν ιζήματα σε κατάσταση αιώρησης, λόγω τουρβιδιτικών ρευμάτων. Εάν η ταχύτητα στο πυθμένα είναι αρκετά υψηλή, τα ρεύματα του πυθμένα μπορούν να αλλάξουν τη ροή της ιζηματογένεσης, παρεμποδίζοντάς τη μέχρι η ταχύτητα να μειωθεί και πάλι, οπότε τα αιωρούμενα σωματίδια κατακαθίσουν και πάλι στο πυθμένα σχηματίζοντας μικρά βουναλάκια. Τα ιζήματα που επηρεάζονται από αυτά τα ρεύματα, ονομάζονται κοντουρίτες (contourites) επειδή ακολουθούν το περίγραμμα (contour) των υποθαλάσσιων πρανών, ενώ τα ρεύματα του πυθμένα ονομάζονται ρεύματα περιφέρειας ή περιγράμματος σε ελεύθερη μετάφραση (contour currents) [7].



Εικόνα 27. Απεικόνιση της μεταβολής της φόρτισης στον θαλάσσιο πυθμένα, λόγω της κυματικής φόρτισης.



Εικόνα 28. Απεικόνιση του μηχανισμού αστοχίας υποθαλάσσιου πρανούς με κυκλική επιφάνεια ολίσθησης.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως τα θαλάσσια κύματα προκαλούν μια ημιτονοειδή υδροδυναμική πίεση στο πυθμένα της θάλασσας (εικόνα 27). Στη περίπτωση υποθαλάσσιου πρανούς μικρής κλίσης και για κυκλική επιφάνεια ολίσθησης, αναπτύσσονται δύο ροπές, η κινούσα ροπή και η ροπή αντίστασης, (εικόνα 28) [9]. Έτσι για τη πρόκληση αστοχίας στο πυθμένα θα πρέπει η κινούσα ροπή να είναι μεγαλύτερη από την ροπή αντίστασης. Η κινούσα ροπή  $M_d$  δίνεται από τον τύπο 2.33, [20],

$$M_d = \frac{2}{3} x^3 \beta \gamma' + \frac{L^2 \Delta p}{2\pi^2} (\sin \alpha - a \cos \alpha), \quad 2.33$$

όπου  $x$  είναι το μισό μήκος (εύρος) της πιθανούς ολίσθησης,  $\beta$  η γωνία κλίσης του υποθαλάσσιου πρανούς,  $L$  το μήκος κύματος,  $\Delta p$  η μεταβολή της ημιτονοειδούς πίεσης λόγω κύματος. Το τμήμα της ημιτονοειδούς φόρτισης που ασκείται πάνω στο επιλεγόμενο μήκος της ολίσθησης ορίζεται από τη γωνία,  $\alpha = 2\pi x/L$ .

Η ροπή αντίστασης  $M_r$  δίνεται από τη σχέση (2.34), [20],

$$M_r = 2x^3 \left( \frac{c_u}{\gamma' z} \right) \gamma' \left( \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{\sin^3 \theta} \right), \quad 2.34$$

όπου  $2\theta$  είναι η γωνία του τόξου της ολίσθησης,  $c_u$  η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του γεωλικού σε βάθος  $z$ . Η σχέση μεταξύ της γωνίας  $\theta$  του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης  $d$  και του μήκους  $x$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση:



$$\frac{d}{x} = \left( \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} \right) \quad (2.34a)$$

Κατά την οριακή ισορροπία θα ισχύει,

$$M_d = M_r \rightarrow F = 1, \quad (2.35)$$

ενώ όταν η ολίσθηση λαμβάνει χώρα θα ισχύει,

$$M_d > M_r \rightarrow F < 1, \quad (2.36)$$

όπου  $F$  ο συντελεστής ασφαλείας. Από την περαιτέρω διερεύνηση της κατάστασης οριακής ισορροπίας προκύπτει η ακόλουθη ισοδύναμη σχέση [20],

$$\frac{\Delta p}{m\gamma'L} = 4\pi^2 \left(\frac{x}{L}\right)^3 \frac{1}{A} \left(B - \frac{\beta}{3m}\right), \quad (2.37)$$

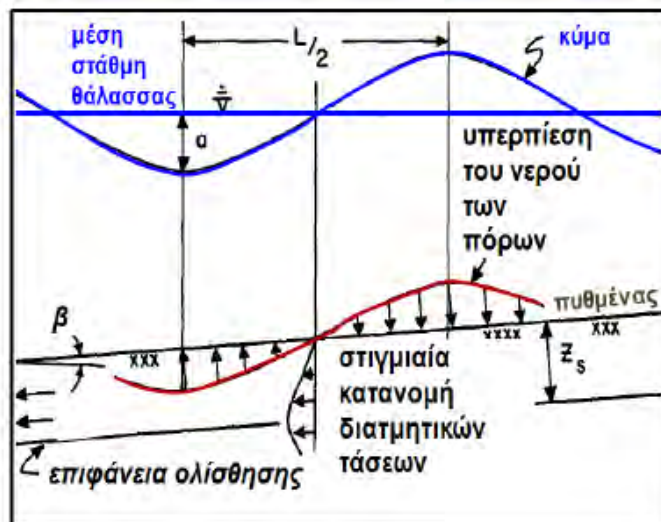
όπου,

$$A = \sin \alpha - \alpha \cos \alpha, \quad (2.38)$$

$$B = \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{\sin^3 \theta}, \quad (2.39)$$

$$m = \frac{c_u}{\gamma'z}. \quad (2.40)$$

Για υποθαλάσσιο πρανές απείρου μήκους η επιφάνεια ολίσθησης είναι επίπεδη και η ολίσθηση προκαλείται λόγω μιας ημιτονοειδούς υπερπίεσης του νερού των πόρων  $\Delta u$ . Λόγω της υπερπίεσης του νερού των πόρων αναπτύσσεται σε διεύθυνση κατακόρυφη (και στα σημεία του πυθμένα όπου ισχύει  $\Delta u = 0$ ) στιγμιαία κατανομή διατμητικών τάσεων με μέγιστη τιμή σε βάθος  $z_s$  από τον θαλάσσιο πυθμένα. Το βάθος  $z_s$  αντιστοιχεί στο βάθος της επίπεδης επιφάνειας ολίσθησης (εικόνα 29).



Εικόνα 29. Απεικόνιση του μηχανισμού αστοχίας υποθαλάσσιου πρανούς με επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης.

Η υπερπίεση του νερού των πόρων:  $\Delta u = \Delta p$  για θαλάσσιο κύμα με μήκος κύματος  $L$ , ύψος κύματος  $H$  και βάθος νερού,  $d$  ισούται με [21]

$$\Delta p = \frac{H \cosh[\lambda(z + d)]}{z \cosh(\lambda d)} \cos(\lambda x - \omega t), \quad 2.41$$

όπου  $x$  η απόσταση,  $t$  ο χρόνος,  $\lambda$  ο κυματαριθμός και  $\omega$  η κυκλική (γωνιακή) συχνότητα,

$$\lambda = \frac{2\pi}{L}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}, \quad 2.42$$

και  $z$  το βάθος κάτω από τον πυθμένα. Στο βάθος  $d$  από τον πυθμένα ισχύει  $z = -d$ , και συνεπώς η υπερπίεση του νερού των πόρων παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\Delta p = K_p n, \quad 2.43$$

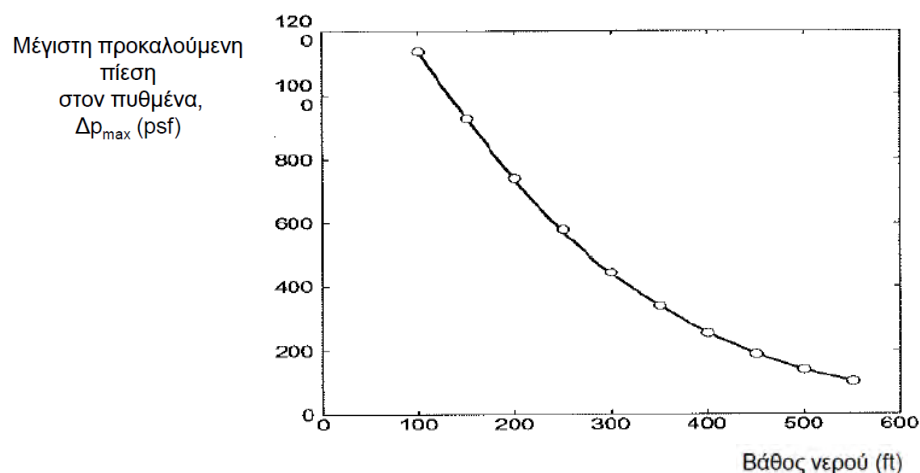
όπου

$$K_p = \frac{1}{\cosh(\lambda z)}, \quad n = \frac{H}{z} \cos(\lambda x - \omega t). \quad 2.44$$

Σύμφωνα με τους Mitchell et al., (1999) ο συντελεστής ασφαλείας θα δίνεται από την ακόλουθη σχέση,

$$F_{static} = \frac{2c_u}{\gamma' z \sin 2\beta}. \quad 2.45$$

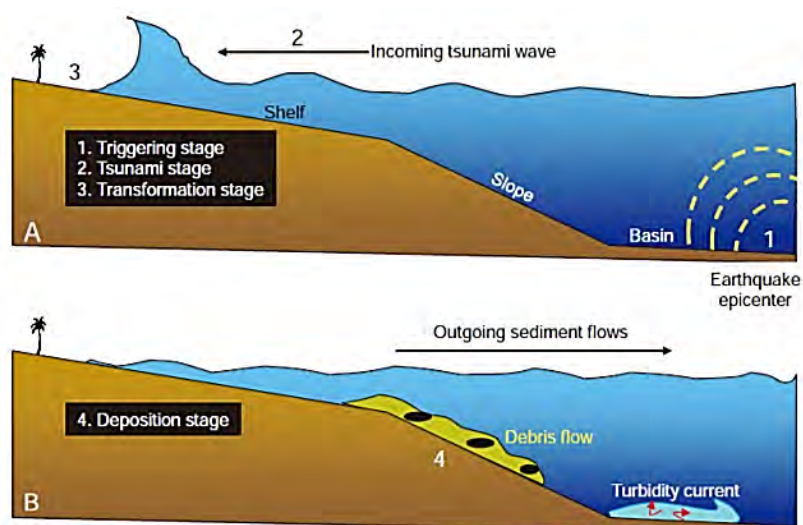
Συμπερασματικά, όπως φαίνεται και από την εικόνα 30, η μέγιστη πίεση που ασκείται στον θαλάσσιο πυθμένα λόγω κυματικής δράσης μειώνεται με την αύξηση του βάθους του νερού. Συνεπώς, σε ρηχά νερά η μέγιστη προκαλούμενη πίεση  $\Delta p_{max}$  στον πυθμένα θα είναι πολύ μεγαλύτερη απ'ότι στα βαθιά νερά.



Εικόνα 30. Κατανομή της μέγιστης πίεσης πυθμένα σε σχέση με το βάθος.

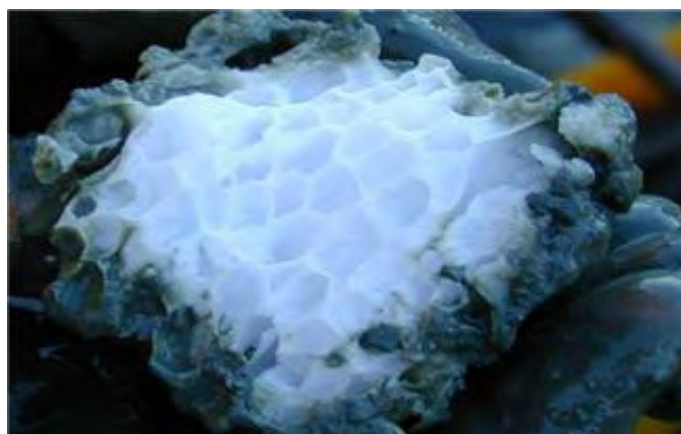
Στην εικόνα 31, φαίνεται ενδεικτικά ένα μοντέλο που δείχνει την σύνδεση μεταξύ σεισμογενούς δράσης, δημιουργίας tsunami και υποθαλάσσιας κατολίσθησης. Ένας σεισμός στη λεκάνη του υποθαλάσσιου πυθμένα (basin) δημιουργεί tsunami, το οποίο διαβρώνει την υφαλοκρηπίδα (shelf) και προκαλεί αστάθεια στο πρανές (slope). Στη

συνέχεια η ροή ιζήματος μεταπίπτει από ροή κορημάτων (debris flow) σε τουρβιδιτικά ρεύματα (turbidity currents).



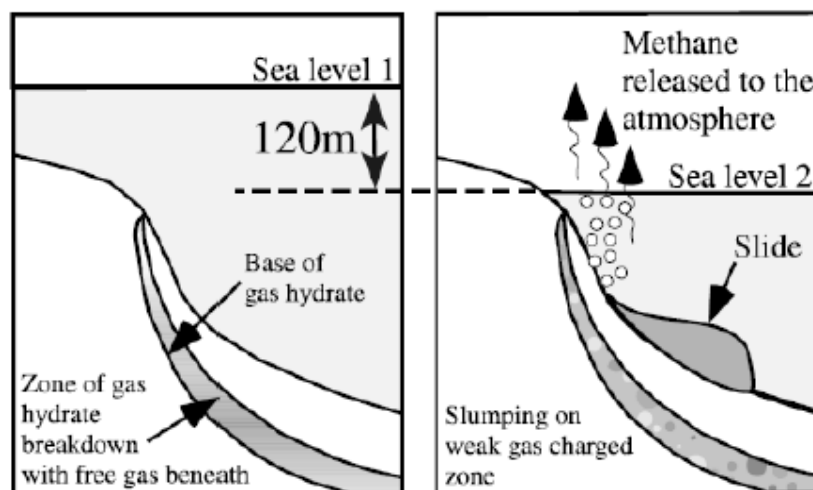
Εικόνα 31. Ενδεικτικό μοντέλο που δείχνει την σύνδεση μεταξύ tsunami και απόθεση ιζημάτων. 1) Στάδιο έναρξης (triggering stage), λόγω σεισμού. 2) Στάδιο tsunami (tsunami stage), όπου το ύψος κύματος αυξάνεται καθώς το κύμα πλησιάζει στην ακτή. 3) Στάδιο μετασχηματισμού (transformation stage), όπου το tsunami διαβρώνει το πρανές και ενσωματώνει τα ιζήματα. 4) Στάδιο απόθεσης (deposition stage), όπου η ροή κορημάτων μεταπίπτει σε τουρβιδιτικό ρεύμα και μετά γίνεται απόθεση των ιζημάτων στον θαλάσσιο πυθμένα.

Όπως έχει ήδη συζητηθεί, υπάρχουν πολλές ακόμη επιδράσεις (της γεωμορφολογίας, της τεκτονικής δραστηριότητας κλπ.), οι οποίες οδηγούν σε υποθαλάσσιες βαρυτικές ροές. Οι πιο σημαντικές από αυτές είναι τα ένυδρα αέρια, οι σεισμικές δράσεις, η διάβρωση, η υποστερεοποίηση και η ηφαιστειακή δραστηριότητα. Τα ένυδρα (ή υγροποιημένα) αέρια αποτελούν στερεές ενώσεις διαλυμάτων αερίων, (διάλυμα νερού με κάποιο άλλο συστατικό όπως μεθάνιο, αιθάνιο, φυσικό αέριο και άλλα μείγματα υδρογονανθράκων). Τα ένυδρα αέρια εγκλωβίζονται και αποκτούν μια πολύ στερεή ένωση (άκαμπτη δομή πάγου) υπό συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης (εικόνα 32).



Εικόνα 32. Φυσικό αέριο ή μεθάνιο παγιδευμένο σε μόρια νερού, υπό τη μορφή πάγου ή αλλιώς ένυδρο αέριο. Εξαιρετικά εύφλεκτο.

Όταν όμως αυτές οι συνθήκες διαταραχθούν, τότε λαμβάνει χώρα η διάσπασή τους ή αλλιώς η εκ-διάλυσή τους στα συστατικά από τα οποία αποτελούνται. Μία περίπτωση είναι η αλλαγή των περιβαλλοντικών συνθηκών, π.χ. μείωση της πίεσης λόγω της πτώσης της στάθμης της θάλασσας ή αύξηση της θερμοκρασίας (εικόνα 33). Τότε εκλύονται μεγάλες ποσότητες αερίων στο εσωτερικό του εδάφους και ως αποτέλεσμα αυξάνεται η πίεση πόρων του εδάφους και μειώνεται η διατμητική ικανότητά του, με συνεπακόλουθο την αστοχία του εδάφους, ειδικότερα αν ο συντελεστής στερεοποίησης  $C_v$ , είναι μικρός.



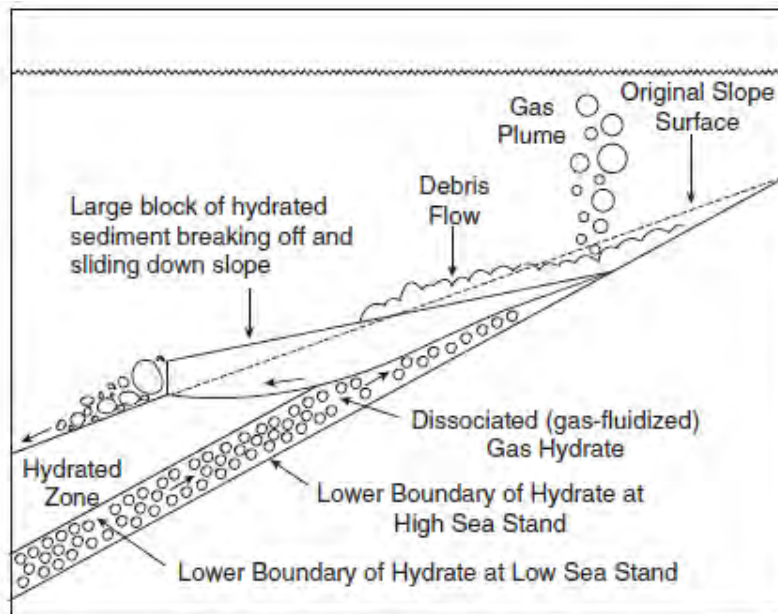
Εικόνα 33. Αποδέσμευση ένυδρων αερίων λόγω πτώσης της στάθμης της θάλασσας και πρόκληση κατολίσθησης.

Ο μηχανισμός αποδέσμευσης των ένυδρων αερίων έχει αποδοθεί στις κλιματικές αλλαγές και έχει προκαλέσει πολλές υποθαλάσσιες κατολίσθησεις. Στη εικόνα 33, φαίνεται ένας κοινός μηχανισμός αποδέσμευσης των ένυδρων αερίων. Λόγω της πτώσης της στάθμης της θάλασσας, η πίεση που ασκείται στον πυθμένα μειώνεται. Συνεπώς τα ένυδρα αέρια διασπώνται και απελευθερώνονται υπό τη μορφή φυσαλίδων στην θάλασσα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποσταθεροποίηση του εδάφους, που αστοχεί με τη μορφή υποθαλάσσιας κατολίσθησης. Στην εικόνα 34 φαίνεται η ζώνη κατάρρευσης των ένυδρων αερίων, η βάση των ένυδρων αερίων καθώς και η ολίσθηση που προκλήθηκε, λόγω του αποδεσμευμένου μεθανίου. Από τα προαναφερθέντα, προκύπτει πως είναι πολύ σημαντική η σωστή ανάλυση της ευστάθειας των υποθαλάσσιων πρανών, καθώς υπάρχει πληθώρα γεωλογικών, τοπογραφικών, υδρολογικών, σεισμολογικών, γεωμορφολογικών και άλλων παραγόντων, που επηρεάζουν την ευαισθησία τους.

Στην εικόνα 34.1 αποτυπώνεται ένα υποθετικό μοντέλο δημιουργίας tsunami, το οποίο προκλήθηκε από αστάθεια υποθαλάσσιου πρανούς.

Για την έγκυρη διαπίστωση της ευστάθειας ενός υποθαλάσσιου πρανούς, απαιτούνται συνδυαστικές μελέτες από τις επιστήμες της γεωτεχνικής μηχανικής, της γεωλογίας και της γεωφυσικής. Απαιτούνται χρονοβόρες μελέτες όπου αποσκοπούν στη λεπτομερή βυθομετρική ανάλυση και στη χαρτογράφηση της περιοχής που μας ενδιαφέρει, ούτως ώστε να βρεθούν πιθανά σημεία αστάθειας, όπως παλαιο-

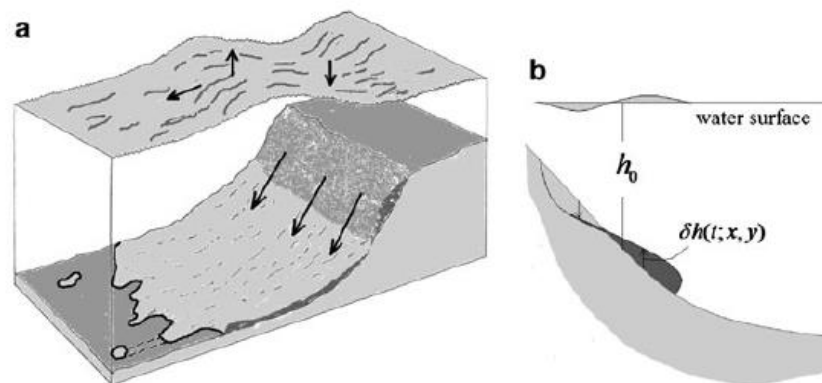
ολισθήσεις, ρήγματα, ρωγμές ή οποιουδήποτε τύπου παραμορφώσεις και ατέλειες δομής του πυθμένα.



Εικόνα 34. Υποθετικό μοντέλο βαρυτικής ροής σε ολισθαίνον πρανές με ένυδρα αέρια.

Σημειώνεται ότι, για την ορθή πρόβλεψη των μηχανισμών αστάθειας ενός υποθαλάσσιου πρανούς, είναι απαραίτητες, οι επιτόπου και οι εργαστηριακές δοκιμές γεωτεχνικής μηχανικής (π.χ. δοκιμές CPT και SPT, χημικής ανάλυσης, διατμητικής αντοχής, συμπιεστότητας), μέσω ακριβούς και προσεκτικής δειγματοληψίας.

Επίσης, η πρόοδος στη ανάπτυξη λογισμικών για την τρισδιάστατη βαθυμετρική απεικόνιση του πυθμένα σε συνδυασμό με τη χρήση πολυδεσμικών βυθομέτρων και τομογράφων υποδομής πυθμένα έχουν συμβάλλει σημαντικά στην λεπτομερέστερη εκτίμηση των υποθαλάσσιων γεωκινδύνων.



Εικόνα 34.1. Υποθετικό μοντέλο δημιουργίας tsunami λόγω αστάθειας πρανούς.

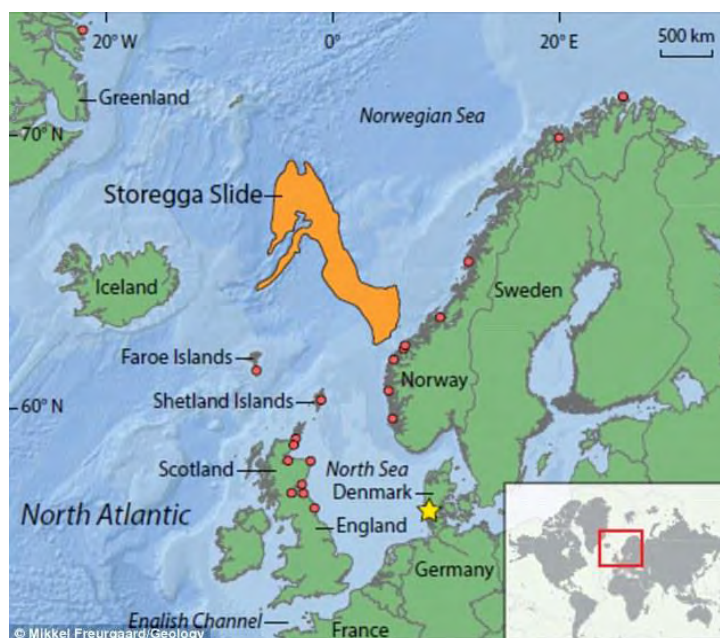
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3. CASE STUDIES

Στο παρόν κεφάλαιο, θα συζητηθούν μερικές από τις σημαντικότερες υποθαλάσσιες κατολισθήσεις που έχουν συμβεί παγκοσμίως. Επίσης θα παρουσιαστούν εκτενείς μελέτες και αναφορές σχετικά με τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους, καθώς και τα αίτια πρόκλησής τους.

#### 3.1 ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ STOREGGA

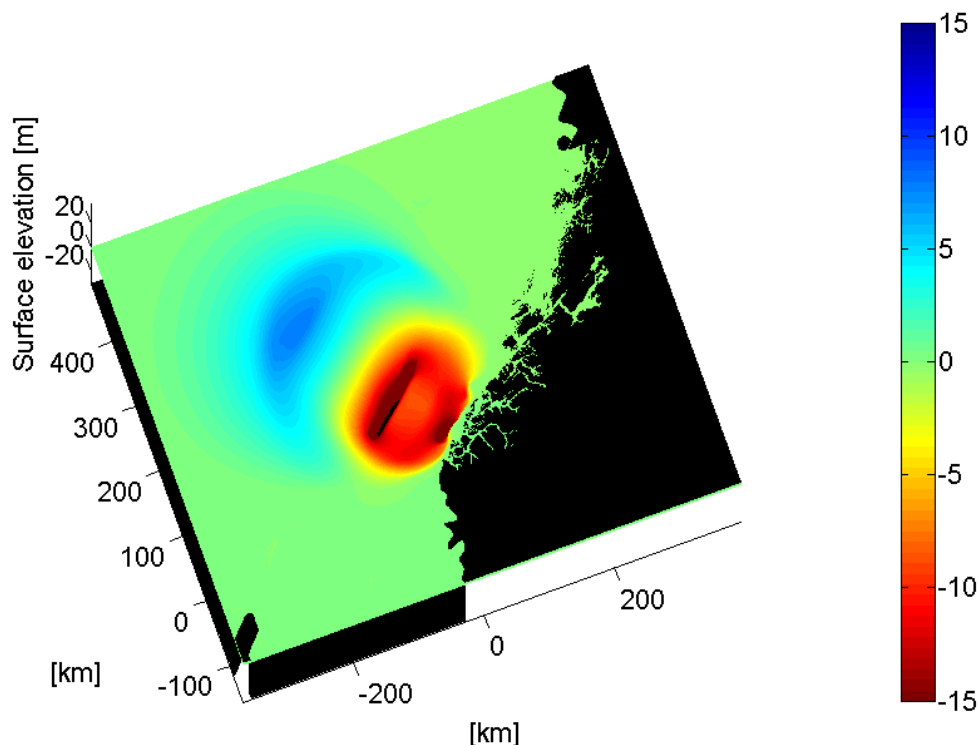
Η κατολίσθηση Storegga, είναι η πιο μελετημένη παγκοσμίως υποθαλάσσια κατολίσθηση (εικόνα 35). Συνέβη πριν 8200 χρόνια στην υπεράκτια περιοχή της Νορβηγίας, εκεί που ο Βόρειος Ατλαντικός Ωκεανός συναντά τον Αρκτικό Ωκεανό. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά της την καθιστούν μοναδική στο είδος της.



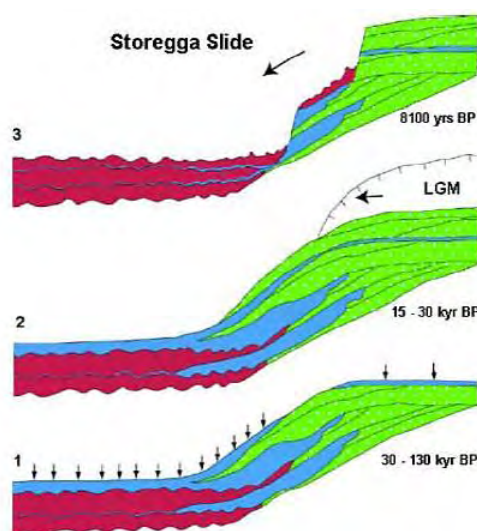
Εικόνα 35. Η περιοχή της κατολίσθησης Storegga.

Ειδικότερα, η κατολίσθηση συνέβη σε κλίση πυθμένα μόλις 1°, κάλυψε μια έκταση της τάξης των  $95,000\text{km}^2$ , ενώ ο όγκος του μεταφερόμενου υλικού εκτιμάται στα  $3,300\text{km}^3$ . Συνέβη σε βάθος μεταξύ 850-1100m, είχε απόσταση τελειώματος, (run-out distance), ίση με 810km και κατακόρυφη απόσταση Η, ίση με 310km. Ο λόγος

L/H ισούται με  $810/310=2.61$ . Στην περιοχή βρίσκονται σημαντικά κοιτάσματα φυσικού αερίου, ενώ από τις μελέτες, προκύπτει πως η κατολίσθηση προκάλεσε ένα τσουνάμι τεραστίων διαστάσεων (εικόνα 36).



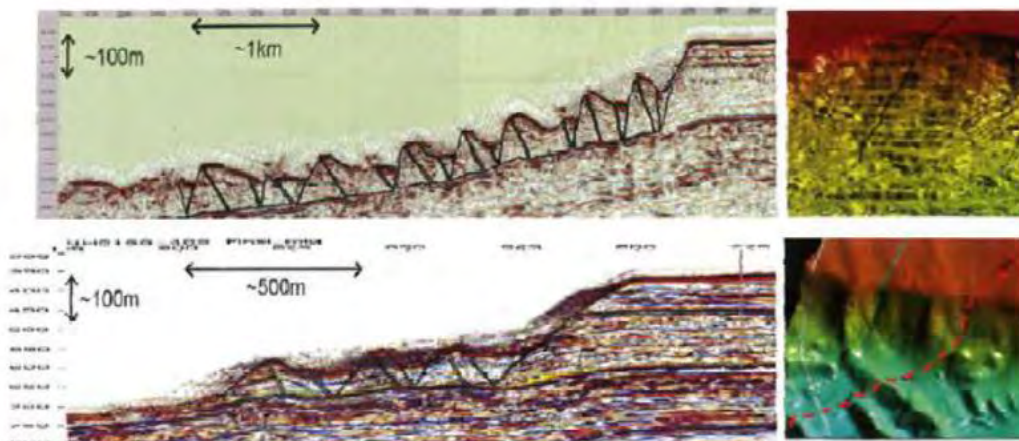
Εικόνα 36. Απεικόνιση της ανύψωσης της θαλάσσιας επιφάνειας λόγω της κατολίσθησης.



Εικόνα 37. Κατολίσθηση Storegga. Με πράσινο χρώμα, οι παγετώδεις αποθέσεις, με κόκκινο τα κατολισθαίνοντα υλικά και με μπλε οι θαλάσσιες αποθέσεις.

Τα κυριότερα αίτια ενεργοποίησης αυτής της κατολίσθησης, συνοψίζονται ως εξής, όπως φαίνεται και από την εικόνα 37: Έντονη σεισμογενής δραστηριότητα, προκάλεσε αστοχία στα απότομα πρανή του θαλάσσιου πυθμένα. Η αστοχία μεταδόθηκε οπισθοδρομικά (εικόνα 38), προς το άνω τμήμα του πρανού, παρ'όλη τη μικρή του κλίση (μέση κλίση  $0.7^\circ$ ). Αυτό συνέβη διότι η ταχεία εναπόθεση ιζημάτων

από την περίοδο των παγετώνων, είχε αυξήσει σε σημαντικά μεγάλο βαθμό την πίεση του νερού των πόρων, με αποτέλεσμα, σε συνδυασμό με την αποδέσμευση ενυδρών αερίων από το έδαφος και την ενδεχόμενη προοδευτική εδαφική χαλάρωση, η ολική αστοχία να ήταν αναπόφευκτη [9].



Εικόνα 38. Οπισθοδρομική εξέλιξη της αστοχίας στο άνω τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης.

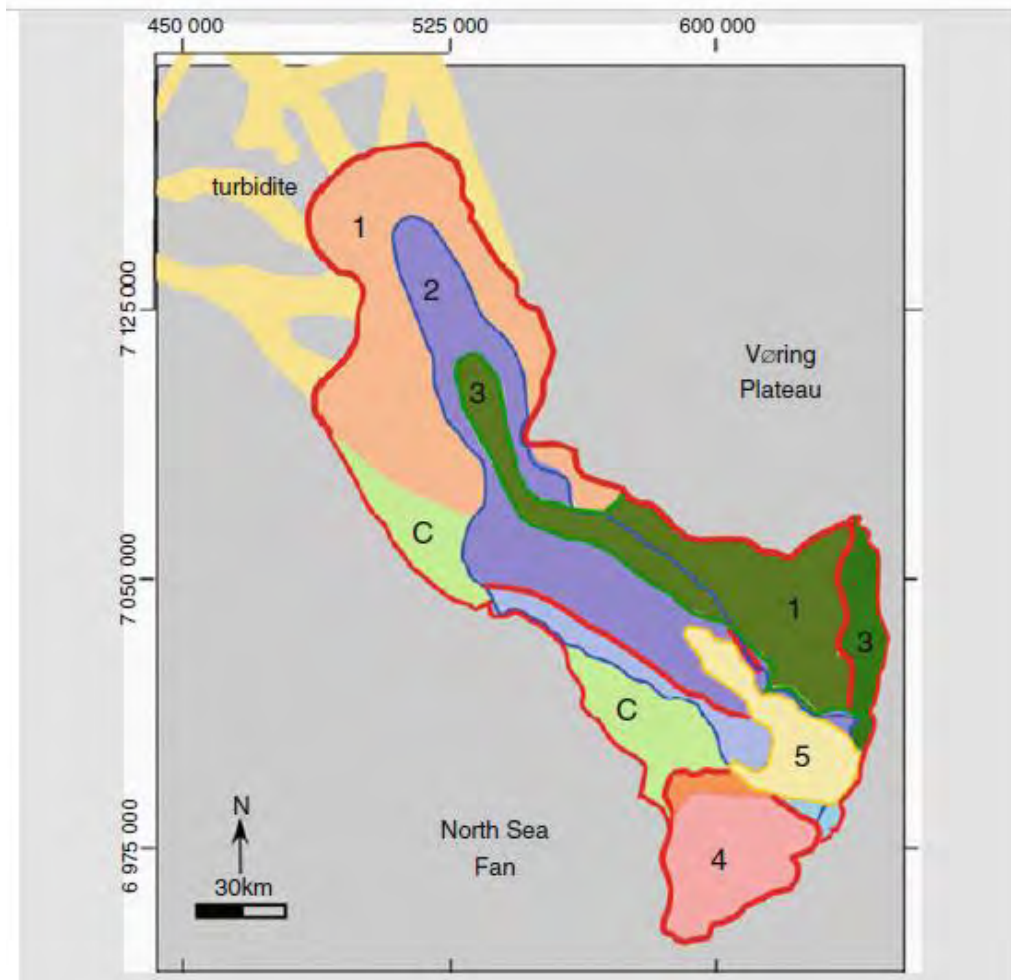
Τα θαλάσσια ιζήματα είναι πλούσια σε άργιλο, έχουν περίπου 50-60% περιεκτικότητα αργίλου, σε σχέση με τα παγετώδη ιζήματα όπου έχουν 30-40% περιεκτικότητα αργίλου. Η παρουσία θαλάσσιας αργίλου προκάλεσε αύξηση της πίεσης των πόρων κατά τη διάρκεια γρήγορης ιζηματογένεσης στην αιχμή των παγετωδών περιόδων. Ενδεικτικό της υπερπίεσης που δημιουργήθηκε στην κατολίσθηση Storegga, είναι οι μετρήσεις κοντά στη περιοχή της κατολίσθησης, όπου σημειώθηκαν πιέσεις του νερού των πόρων 20% υψηλότερες της υδροστατικής πίεσης. Εάν ληφθεί υπ' όψιν η υψηλή ευαισθησία της θαλάσσιας αργίλου και η μειωμένη της σταθερότητα, είναι λογικό που η κατολίσθηση Storegga εξελίχθηκε σε μία από τις μεγαλύτερες υποθαλάσσιες κατολισθήσεις στη Γη.

Το πιθανότερο σενάριο ενεργοποίησης της κατολίσθησης, όπως σημειώθηκε και προηγουμένως, είναι η έντονη σεισμική δραστηριότητα κατά τη διάρκεια της απόψυξης. Η αστοχία επήλθε κατά μήκος ενός από τα ασθενή στρώματα της θαλάσσιας αργίλου. Η κατολίσθηση συνέβη σε αρκετές φάσεις, ενώ εξελίχθηκε και οπισθοδρομικά. Η πρώτη φάση της κατολίσθησης είναι αυτή που έφτασε τη μέγιστη απόσταση των 400-450km. Μετά τη πρώτη φάση, ακολούθησε ένα σμήνος από μικρότερους λωβούς, σαν εκείνους που βρίσκονται στη περιοχή Omen Lange, (περιοχή 3 / εικόνα 39). Η ροή των κορημάτων των λοβών, παρουσιάζει μικρότερο μήκος τελειώματος, (runout length) ίσο με 10-15km.

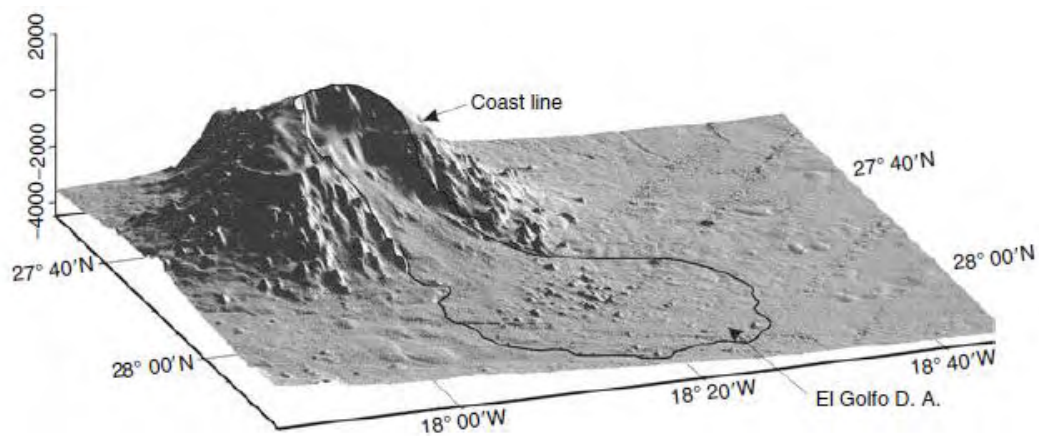
Συνεπώς οι κατολισθήσεις που συνέβησαν διέφεραν κατά πολύ όσον αφορά τη κλίμακά τους. Τα παχιά ιζήματα παγετώδους αργίλου, όπως αυτά της κατολίσθησης Storegga, παρουσιάζουν υψηλότερη διατμητική αντοχή λόγω συμπίεσης, (περιοχή C / εικόνα 39). Όπως είναι φυσικό, στη περιοχή C, λόγω υψηλής συμπίεσης των



εδαφικών στρωμάτων και της ήπιας κλίσης του θαλάσσιου πυθμένα, η κινητικότητα της κατολίσθησης περιορίζεται κατά πολύ.



Εικόνα 39. Κατολίσθηση Storegga. Τα νούμερα από 1-5 απεικονίζουν διαφορετικές φάσεις της κατολίσθησης. Το C, σημαίνει ζώνη συμπίεσης. Παρατηρούνται και τουρβιδιτικές αποθέσεις στο τελείωμα της κατολίσθησης της φάσης 1.

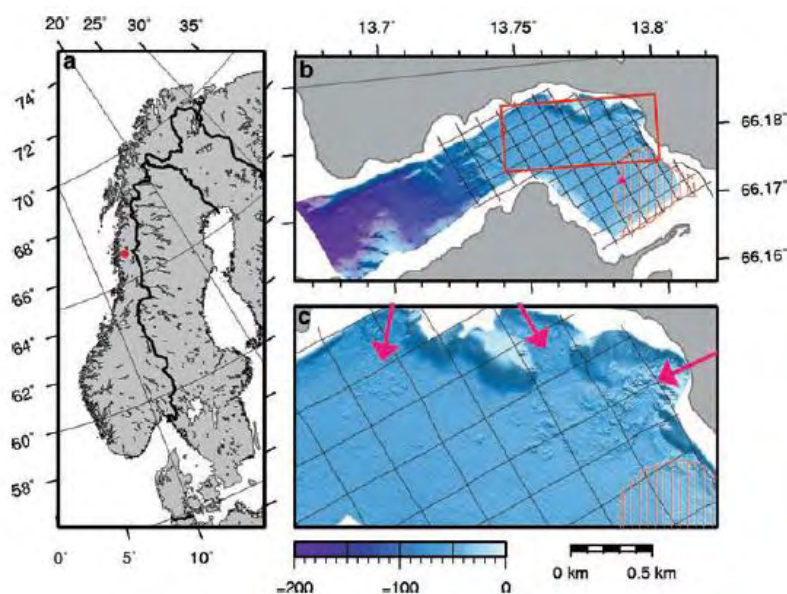


Εικόνα 39.1. Ενδεικτική διαδρομή της κατολίσθησης στα Κανάρια Νησιά.

### **3.2 ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ FINNEIDFJORD**

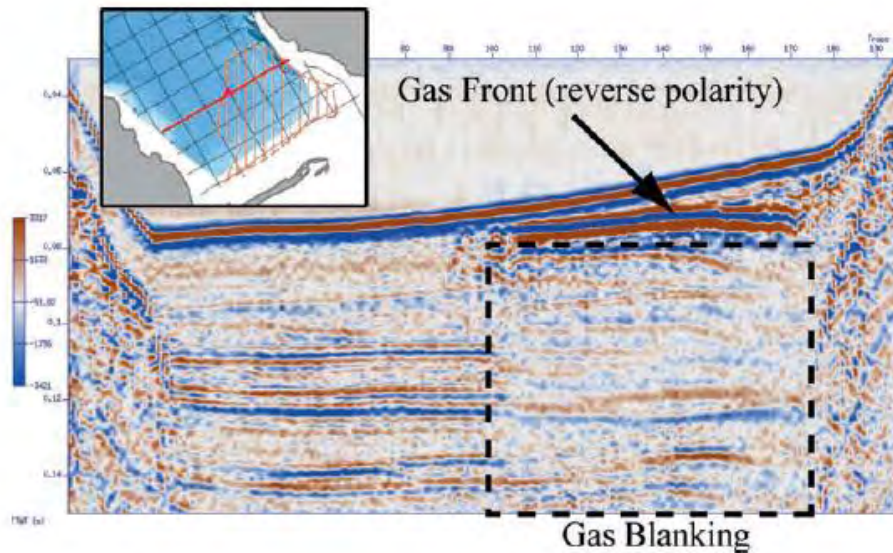
Τον Ιούνιο του 1996, προκλήθηκε μια κατολίσθηση πολλαπλών φάσεων όπου ξεκίνησε υποθαλάσσια και εξελίχθηκε οπισθοδρομικά πάνω στη στεριά, επηρεάζοντας την περιοχή Finneidfjord της Νορβηγίας (εικόνα 40). Η συγκεκριμένη περιοχή είναι γνωστή για τις κατολισθήσεις της, οι οποίες προκαλούνται λόγω των ολοκαινικών, τεταρτογενών ευαίσθητων αποθέσεων της. Η συγκεκριμένη κατολίσθηση, κινητοποίησε ένα εκατομμύριο κυβικών μέτρων ιζήματος, και είναι υπεύθυνη για την απώλεια τεσσάρων ατόμων, πολλών σπιτιών και ένα τμήμα αυτοκινητοδρόμου. Η κατολίσθηση συνέβη σε πέντε στάδια, όπως φαίνεται από την εικόνα 40, με το πρώτο στάδιο να συμβαίνει στο πιο απότομο πρηνές, όπως δείχνει ο βαθυμετρικός χάρτης αλλά και μαρτυρίες της εποχής.

Η αρχική αστοχία συνέβη σε ιλυώδη άργιλο τεταρτογενούς αποθέσεως, αλλά τα επόμενα στάδια περιελάμβαναν μαλακή ευαίσθητη άργιλο παγετώδους περιόδου. Πιθανοί παράγοντες που συνέβαλαν στην αστοχία, είναι η προοδευτική αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων λόγω συσσώρευσης ελεύθερων αερίων, διαρροή υπόγειων υδάτων, ανθρώπινες δραστηριότητες κατασκευής έργων και μια ξαφνική αύξηση της πίεσης των πόρων του παράκτιου εδάφους, λόγω επιχωματώσεων στην ακτή της περιοχής. Σεισμικές αναλύσεις αποκάλυψαν ιστορικό αστοχίας πρηνών στην περιοχή που χρονολογείται από την μεσοπαγετώδη περίοδο, συνεπώς είναι πολύ πιθανό να συμβούν παρόμοια φαινόμενα αστοχίας και στο μέλλον, με δεδομένο ότι τις προηγούμενες δεκαετίες είχαν σημειωθεί παρόμοια φαινόμενα [3].

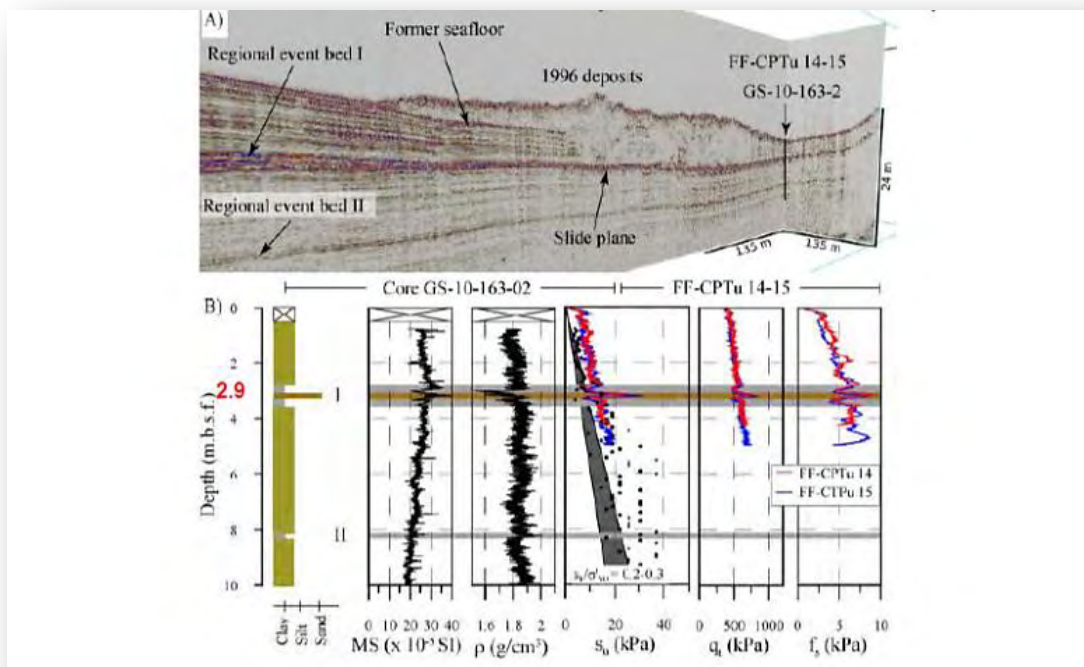


Εικόνα 40. Η περιοχή Finneidfjord, βαθυμετρικά χαρακτηριστικά και ενδείξεις παλαιότερων ολισθήσεων .

Τα κυριότερα αίτια ενεργοποίησης αυτής της κατολίσθησης, συνοψίζονται ως εξής: Η συσσώρευση ελεύθερου αερίου στα ρηγά του θαλάσσιου πυθμένα, όπως άλλωστε επιβεβαιώνεται και από την σεισμική ανάλυση, έπαιξε σημαντικό ρόλο στην ενεργοποίηση και εξέλιξη της κατολίσθησης (εικόνες 41,42).

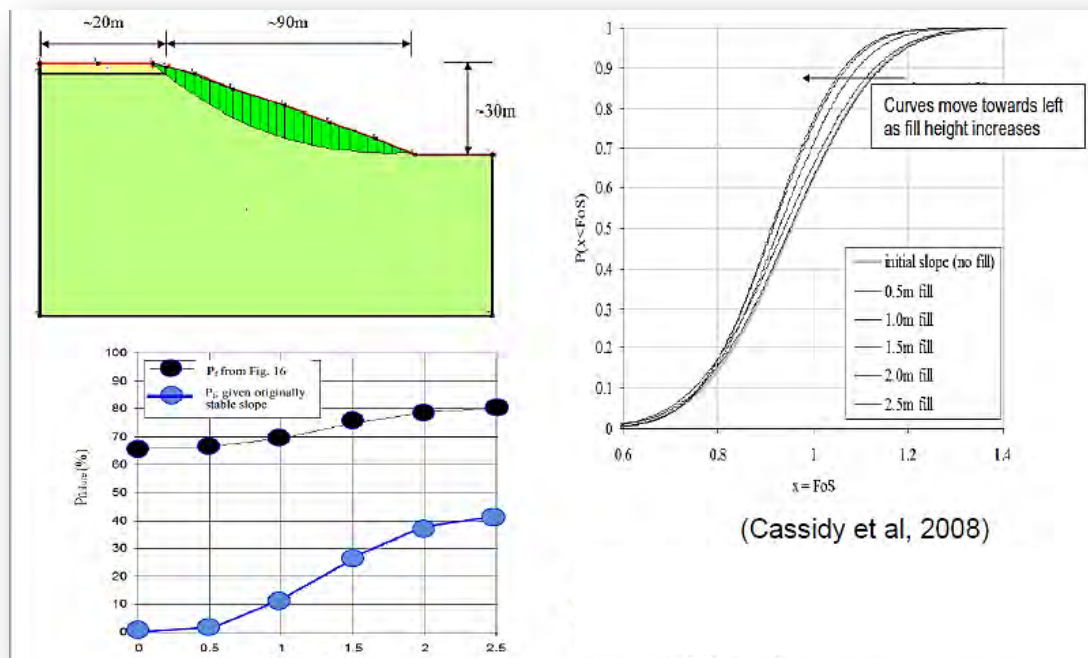


Εικόνα 41. Σεισμικό προφίλ της ζώνης ελεύθερου αερίου. Το αέριο εμφανίζεται ως αντανάκλαση, ανεστραμμένης πολικότητας. Κάτω από το μέτωπο των ελεύθερων αερίων εμφανίζεται μια αραιώση. Παρατηρούνται οι διαφορές στη συχνότητα και το πλάτος πάνω και κάτω από το μέτωπο ελεύθερων αερίων.

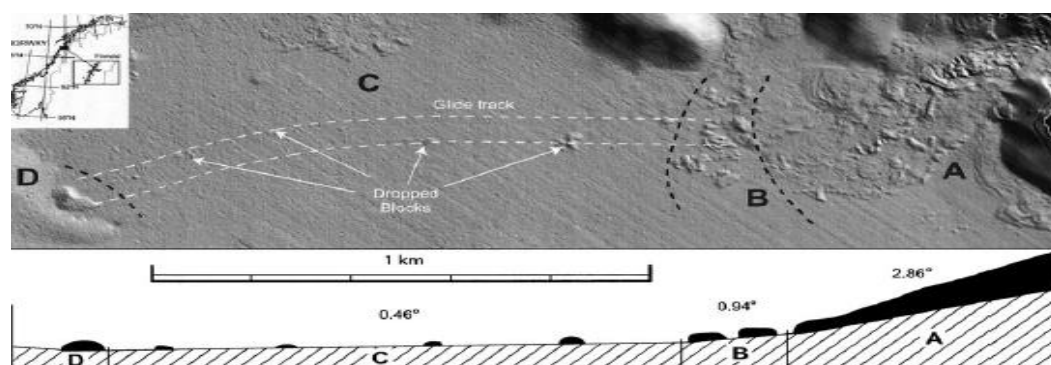


Εικόνα 42. Σεισμικό προφίλ, βαθυμετρική ανάλυση της κατολίσθησης.

Αναλυτικότερα, η υπερπίεση του νερού των πόρων που θα μπορούσε να ενεργοποιήσει την αστοχία, ανέρχεται περίπου στα 5kPa. Μελέτες έδειξαν ότι στην πιο ρηχή πλευρά των υποθαλάσσιων πρανών, αναπτύσσονταν πιέσεις που υπερέβαιναν αυτή την τιμή, ενώ στα βαθύτερα πρανά οι πιέσεις δεν ξεπερνούσαν τα 3.3kPa [3]. Οι αργλικές εδαφικές στρώσεις χαμηλής διατμητικής αντοχής, συνέβαλαν καθοριστικά στην εξέλιξη της οπισθοδρομικής κατολίσθησης, ενώ ο συνδυασμός των επιχωματώσεων και λοιπών ανθρωπογενών κατασκευαστικών διεργασιών (εκρήξεις κ.α.) δημιούργησαν αυτή τη κατολίσθηση (εικόνα 43). Είναι αξιοσημείωτο ότι τα κυριότερα στάδια της κατολίσθησης περιελάμβαναν πρώτα κάποια μεταφορική εδαφική κίνηση και μετέπειτα μια εδαφική ροή, καθώς η στέψη της προχώρησε προς την ακτή και πέραν αυτής (εικόνα 43.1).



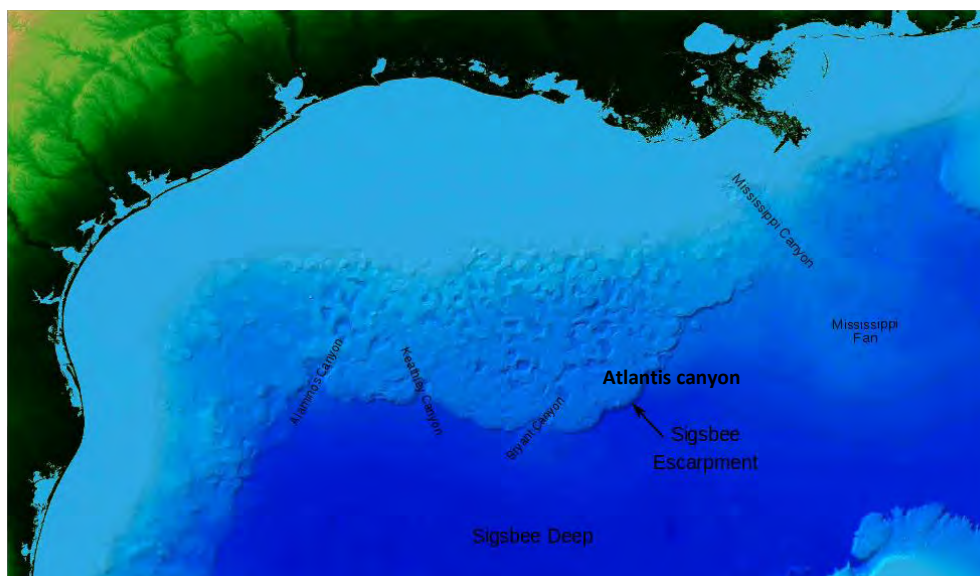
Εικόνα 43. Ανάλυση της εδαφικής αστοχίας, η κατολίσθηση ήταν οριακά ευσταθής με  $FOS=0.95$ , προτού τοποθετηθεί το επίχωμα. Καθώς το ύψος του επιχώματος αυξάνεται, οι καμπύλες μετατοπίζονται προς τα αριστερά, μειώνοντας τον συντελεστή ασφαλείας.



Εικόνα 43.1. Εξέλιξη της κατολίσθησης Finneidfjord από το σημείο A στο σημείο D.

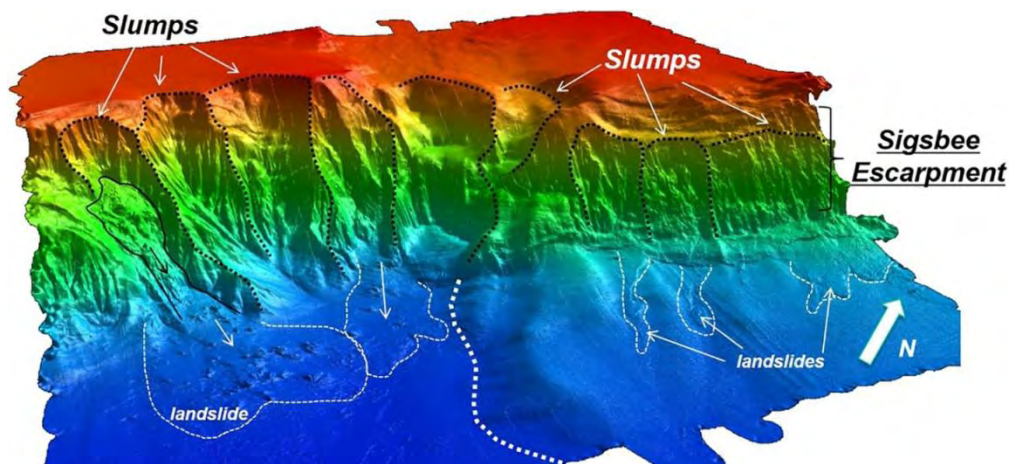
### **3.3 ΚΟΛΠΟΣ ΤΟΥ ΜΕΞΙΚΟΥ - ΧΑΡΑΔΡΑ SIGSBEE**

Η χαράδρα του Sigsbee, στο κόλπο του Μεξικού και ειδικότερα οι περιοχές Atlantis και Mad Dog, είναι περιοχές με ιστορικό πολυάριθμων αστοχιών υποθαλάσσιων πρυνών οι οποίες εξελίχθηκαν σε ροές κορημάτων και τουρβιδιτικών ρευμάτων. Στην εικόνα 44 φαίνεται η περιοχή της χαράδρας Sigsbee, με το κάννυον Atlantis, όπου υπάρχει έντονη ροή τουρβιδιτικών ρευμάτων.



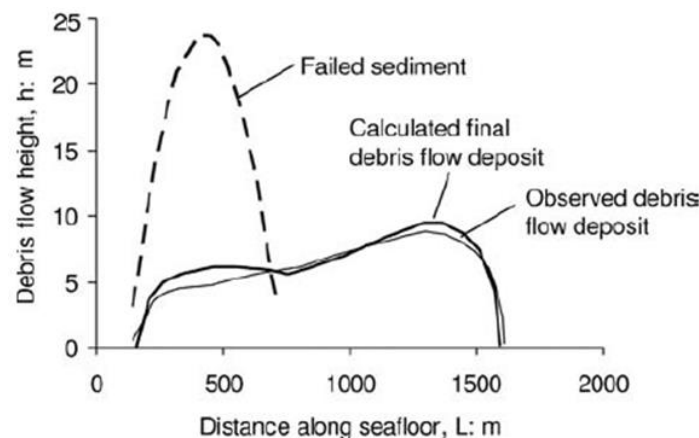
Εικόνα 44. Απεικόνιση της περιοχής της χαράδρας Sigsbee.

Χρησιμοποιώντας τεχνικές της γεωφυσικής αλλά και βιντεοσκοπήσεις από τηλεχειριζόμενα υποθαλάσσια οχήματα (ROVs), χαρτογραφήθηκαν διάφορες ιζηματογενείς αποθέσεις που είχαν προκληθεί από βαρυτικές ροές. Ο όγκος των προηγούμενων αστοχιών των πρυνών υπολογίστηκε προσεγγιστικά εφαρμόζοντας τις γνωστές θεωρίες περί ευστάθειας πρυνών για ολίσθηση σε καμπύλη επιφάνεια. Στη συνέχεια ο όγκος του αστοχούντος πρυνούς συγκρίθηκε με τον όγκο υλικού στο πόδα της χαράδρας καθώς και με το υλικό των κορημάτων στις χαρτογραφημένες περιοχές. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο όγκος στο πόδα αποτελεί το 25% του συνολικού όγκου του αστοχούντος υλικού. Η απουσία κορημάτων από την πλειοψηφία των χαρτογραφημένων ζωνών υποδηλώνει την παρουσία τουρβιδιτικών ρευμάτων, τα οποία διαβρώνουν και μεταφέρουν μακριά τα ιζήματα από την αρχική περιοχή της βαρυτικής ροής. Επιπλέον, η δράση των τουρβιδιτικών ρευμάτων είναι εμφανής από τη διάβρωση των καναλιών και των κάννυον στο βαθύ πυθμένα. Στην εικόνα 45, φαίνεται η χαράδρα Sigsbee (Sigsbee escarpment) καθώς και οι περιοχές έναρξης της κατολίσθησης, οι εδαφικές καταπτώσεις (slumps) και οι κατολισθήσεις (landslides).



Εικόνα 45. 3D μοντέλο απεικόνισης της χαράδρας.

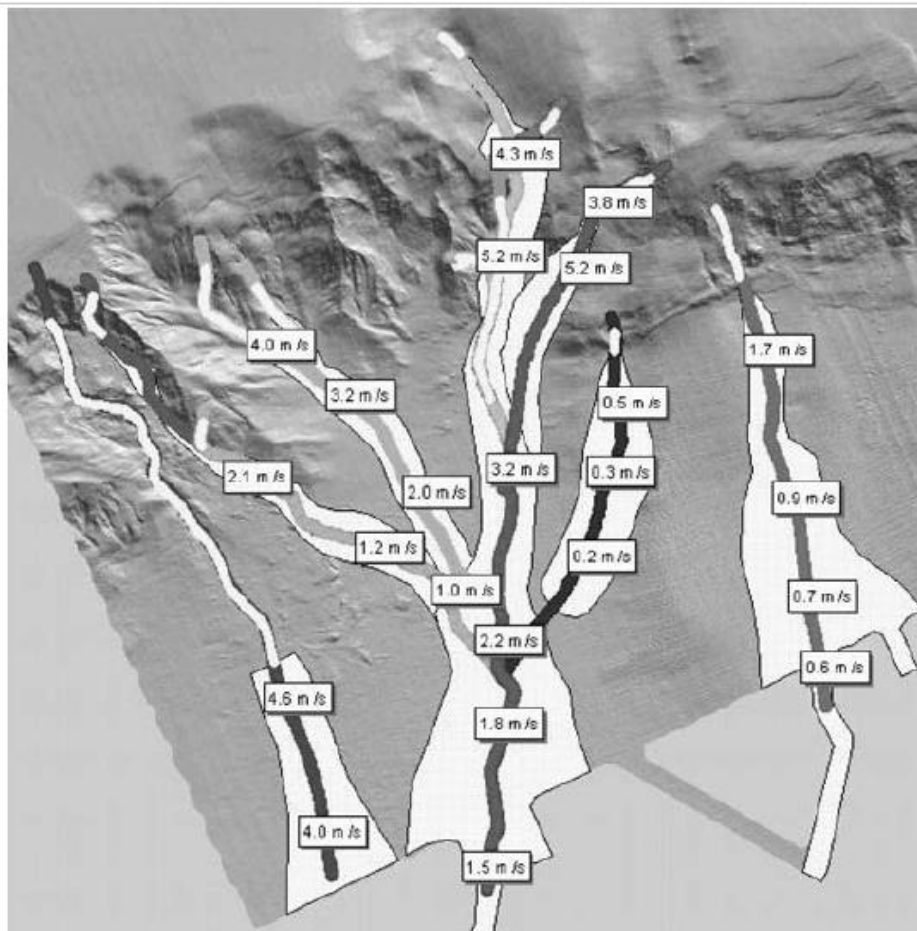
Το μοντέλο BING (Jiang and LeBlond, 1993), χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση κάποιων ροών κορημάτων σε μια προσπάθεια ταυτοποίησης των μηχανισμών ενεργοποίησης της αστοχίας πρηνών και της επακόλουθης κινηματικής των βαρυτικών ροών. Η εικόνα 46 δείχνει μια συσχέτιση ανάμεσα στις αναδρομικές προβλέψεις και τις παρατηρούμενες ροές κορημάτων σε συνδυασμό με τη γεωμετρία τελειώματος (run out geometry) για ένα συγκεκριμένο γεγονός κατολίσθησης. Το διακεκομμένο βουναλάκι υποδεικνύει το σημείο όπου η αρχική αστοχία μάζας μεταλλάσσεται σε εδαφική ροή μη νευτωνικού ρευστού, όπως το ρευστό Bingham.



Εικόνα 46. Μοντελοποιημένες και παρατηρούμενες ροές κορημάτων. Το ίζημα που έχει αστοχήσει (failed sediment), η υπολογισμένη τελική απόθεση ροής κορημάτων (calculated final debris flow deposit) και η παρατηρούμενη απόθεση ροής κορημάτων (observed debris flow deposit).

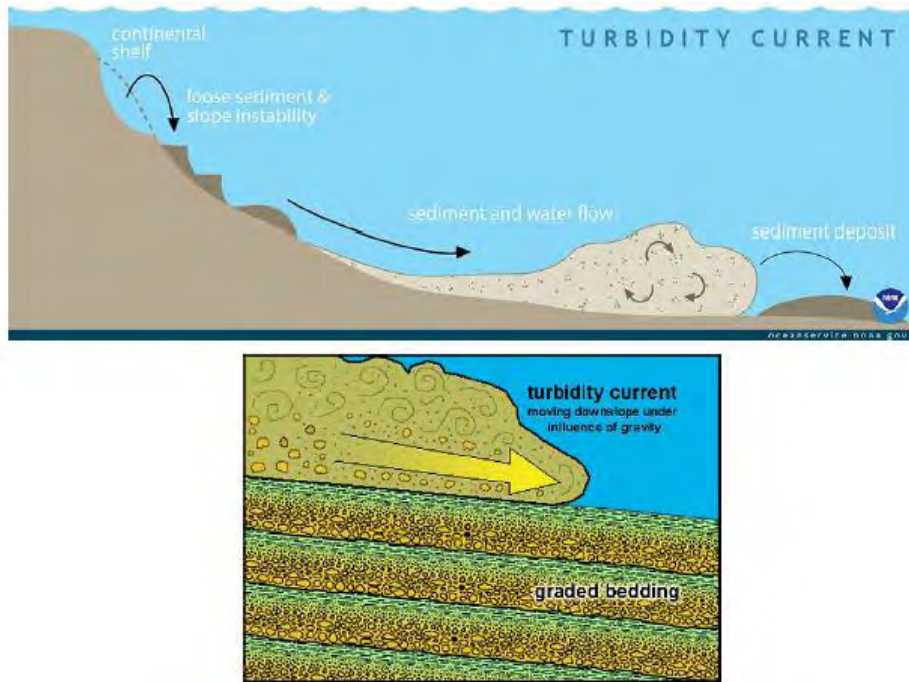
Οι παράμετροι που υπολογίστηκαν με αυτό το μοντέλο, χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη της ταχύτητας, την έκταση και το πάχος μελλοντικών ιζημάτων των βαρυτικών ροών. Τα τουρβιδιτικά ρεύματα δεν μπορούν να προβλεφθούν με τον ίδιο τρόπο όπως οι ροές κορημάτων αφού απουσιάζουν τα απαιτούμενα μοντέλα πρόβλεψης. Αντί αυτού, χρησιμοποιούνται άλλες τεχνικές αξιοποιώντας το βάθος του διαβρωμένου υλικού, μέσα από τις διαδρομές των κάννων. Στη εικόνα 47 φαίνονται

τα προβλεπόμενα μονοπάτια και οι ταχύτητες των τουρβιδιτικών ρευμάτων για τις περιοχές Mad Dog και Atlantis. Η μέγιστη ροή φτάνει τα  $5.2 \text{ m/sec}$  ή  $18.72 \text{ km/hr}$ .



Εικόνα 47. Προβλεπόμενα τουρβιδιτικά ρεύματα και ταχύτητες για τα πεδία Mad Dog και Atlantis.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως κάποιες βαρυντικές εδαφικές ροές που είχαν συμβεί στο παρελθόν στις περιοχές αυτές ήταν αχανείς με χαρτογραφημένες αποστάσεις τελειώματος που ξεπέρασαν τα 7 km και ταχύτητες άνω των 100 km/hr, ενώ κάποια κομμάτια βράχων που βρέθηκαν παγιδευμένα στις ροές ήταν στο μέγεθος σταδίου ποδοσφαίρου. Όπως είναι φυσικό, αν σε αυτή τη περιοχή επαναληφθούν παρόμοιες ροές οι τυχόν υπεράκτιες εγκαταστάσεις ενεργειακών υποδομών (π.χ. εξέδρες πετρελαίου) θα τεθούν σε κίνδυνο και για το λόγο αυτό απαιτείται πολύ προσεκτική παρατήρηση των κινήσεων των υποθαλάσσιων γεωμαζών της περιοχής.

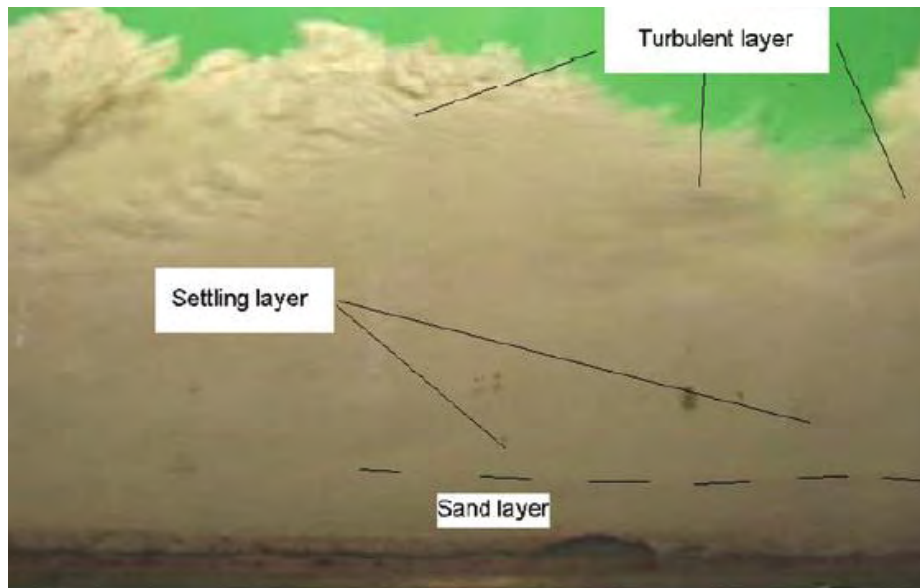


Εικόνα 48. Απεικόνιση της εξέλιξης μιας κατολίσθησης σε τουρβιδιτικό ρεύμα, καθώς και της κίνησης του τουρβιδιτικού ρεύματος στον θαλάσσιο πυθμένα.

Μια τυπική εξέλιξη υποθαλάσσιας βαρυντικής ροής, διαφαίνεται στην εικόνα 48α, όπου μια αστάθεια πρανούς στην υφαλοκρηπίδα (continental shelf), που προκλήθηκε λόγω χαλαρού ιζήματος (loose sediment) προκαλεί υποθαλάσσια κατολίσθηση, η οποία εξελίσσεται από ροή κόκκων και ρευστοποιημένη ροή (water flow) σε τουρβιδιτικά ρεύματα (turbidity current) για να καθιζάνει στη ζώνη απόθεσης, αρκετά χιλιόμετρα μακρύτερα της ζώνης πηγής δημιουργώντας έναν στρωματοποιημένο πυθμένα με διαβαθμισμένες στρώσεις (graded bedding), (εικόνα 48). Αξίζει να σημειωθεί πως μεγαλύτερες ποσότητες ιζήματος μεταφέρονται κατά την ολίσθηση και την κατάπτωση παρά με την ροή τουρβιδιτικών ρευμάτων.

Στη παρακάτω εικόνα, 48.1 απεικονίζεται ένα πείραμα μικρής κλίμακας, όπου στο πάνω μέρος της ροής διαφαίνεται η τυρβώδης ροή και το τυρβώδες στρώμα (turbulent layer), ενώ στη συνέχεια υπάρχει το στρώμα που υπόκειται σε καθίζηση (settling layer) και το στρώμα άμμου (sand layer).





Εικόνα 48.1. Μικρής κλίμακας πείραμα ροής με 15% περιεκτικότητα σε άργιλο. Φαίνονται τα τρία στρώματα ροής, το τυρβώδες στρώμα (turbulent layer), ενώ στη συνέχεια υπάρχει το στρώμα που υπόκειται σε καθίζηση (settling layer) και το στρώμα άμμου (sand layer).

Στο επόμενο κεφάλαιο, θα αναλυθεί η επίδραση των υποθαλάσσιων γεωκινδύνων στις θαλάσσιες ενεργειακές υποδομές, καθώς και κάποιες τεχνικές ανάλυσης για τα φορτία που ασκούνται στις κατασκευές. Οι δύο κύριες προσεγγίσεις που ακολουθούνται περιλαμβάνουν την ρευστομηχανική και την γεωτεχνική προσέγγιση. Οι δύο αυτές προσεγγίσεις είναι σημαντικό να συνδυάζονται με τη δομική ανάλυση των κατασκευών, ούτως ώστε τα αποτελέσματα να επαληθεύονται και να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, όπου οι παράγοντες που συμβάλλουν στην τελική αντοχή των κατασκευών είναι πάρα πολλοί.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥΣ ΣΤΙΣ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ**

Οι υπεράκτιες κατασκευές ποικίλουν σε είδος και σκοπιμότητα. Περιλαμβάνουν πλήθος κατασκευών όπως σταθερές και πλωτές εξέδρες εξόρυξης υδρογονανθράκων, αγωγούς μεταφοράς καυσίμων, καλώδια ηλεκτρικού ρεύματος, αιολικά θαλάσσια πάρκα, τεχνητά νησιά κλπ.. Παρακάτω, θα παρουσιαστούν οι κυριότερες υπεράκτιες κατασκευές που αφορούν ενεργειακές υποδομές.

#### **4.1 ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΕΞΕΔΡΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ**

Η πρώτη υπεράκτια εξέδρα άντλησης πετρελαίου ήταν η επονομαζόμενη “Superior”, η οποία εγκαταστάθηκε το 1947, 18 μίλια από την ακτή της Λουιζιάνα της Βορείου Αμερικής σε βάθος μόλις 6 μέτρων (εικόνα 49). Σήμερα υπάρχουν πάνω από 7000 υπεράκτιες πλατφόρμες εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων, εγκατεστημένες σε βάθη που υπερβαίνουν τα 2000 μέτρα. Τη δεκαετία του 1970, οι εγκαταστάσεις βαθέων υδάτων δεν ξεπερνούσαν τα 100m βάθος, με τη πλειοψηφία αυτών να βρίσκεται στα 50m. Στη σημερινή εποχή χάρη στην τεχνολογική πρόοδο οι υπεράκτιες κατασκευές έχουν φτάσει σε βάθη 500-1500m και ονομάζονται αντίστοιχα εγκαταστάσεις βαθέων και υπερ-βαθέων υδάτων (deep /ultra-deep water) [10].

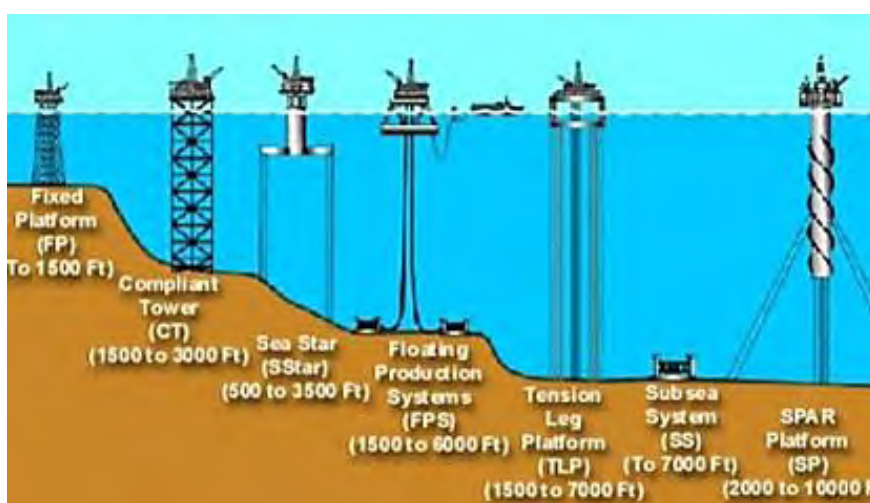


Εικόνα 49. Η πλατφόρμα Superior.

Επειδή τα αποθέματα υδρογονανθράκων στις χερσαίες περιοχές του πλανήτη, σταδιακά εξασθενούν, οι μηχανικοί πετρελαίου στραφήκαν προς το θαλάσσιο περιβάλλον, σε όλο και μεγαλύτερες αποστάσεις από την ακτή και σε συνεχώς αυξανόμενα βάθη. Οι εγκαταστάσεις στα βαθιά ύδατα ποικίλουν αναλόγως με το βάθος του θαλάσσιου πυθμένα και σε γενικές γραμμές είναι οι ακόλουθες:

- ✚ Πλατφόρμες ανύψωσης - Jack-up platforms,
- ✚ Πλατφόρμες με δικτύωμα - Jacket platforms,
- ✚ Εύκαμπτοι πύργοι - Compliant Towers,
- ✚ Πλατφόρμες βαρύτητας - Gravity Based Platforms,
- ✚ Πλατφόρμα ποδών τένοντα (εφελκυσμού) - Tension Leg Platforms,
- ✚ Πλωτά συστήματα Παραγωγής και Αποθήκευσης - Floating Production Storage and Offloading,
- ✚ Πλατφόρμα δοκού - Spar platforms,
- ✚ Υποθαλάσσιο σύστημα - Subsea system.

Όπως παρατηρείται από τις εικόνες 50 και 51, ανάλογα με το βάθος του πυθμένα, επιλέγεται η καταλληλότερη πλατφόρμα για την εξόρυξη υποθαλάσσιων κοιτασμάτων υδρογονανθράκων. Συνεπώς σε ρηχά νερά θα επιλεγεί μια σταθερή πλατφόρμα ή μια πλατφόρμα ανύψωσης, ενώ όσο τα νερά βαθαίνουν, επιλέγονται εύκαμπτοι πύργοι, πλωτά συστήματα παραγωγής, πλατφόρμες τένοντα και δοκού.



Εικόνα 50. Απεικόνιση των πιο κοινών μεθόδων εκμετάλλευσης θαλάσσιων ενεργειακών πόρων και το αντίστοιχο βάθος εγκατάστασης.

Γίνεται σαφές ότι η αγκύρωση και η θεμελίωση αυτών των κατασκευών εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την μορφολογία του θαλάσσιου πυθμένα και όλα τα φαινόμενα που συμβαίνουν μέσα ή πάνω σε αυτόν. Οι υποθαλάσσιοι γεωκίνδυνοι επηρεάζουν κυρίως την ευστάθεια τέτοιων κατασκευών και κατά συνέπεια η συνεχής παρατήρηση των μεταβολών των γεωολογικών του πυθμένα και η έγκαιρη πρόβλεψη καταστροφικών φαινομένων συμβάλουν στην ασφαλή λειτουργία τέτοιων κατασκευών.

Οι ολοένα και αυξανόμενες αποστάσεις από την ακτή, δημιούργησαν την ανάγκη για τοπικές εγκαταστάσεις αποθήκευσης και μεταφόρτωσης σε καράβια-φορηγίδες (tankers) καθώς και στην εγκατάσταση υποθαλάσσιων αγωγών μεταφοράς

υδρογονανθράκων. Οι οικονομικοί παράγοντες συμβάλλουν καθοριστικά στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου δικτύου από την εξόρυξη, αποθήκευση, μεταφορά, επεξεργασία και εξαγωγή των υποθαλάσσιων ενεργειακών κοιτασμάτων. Οι μεγάλες ανάγκες στην αγορά καυσίμων, οδήγησαν στη περαιτέρω ανάπτυξη των υποθαλάσσιων αγωγών καυσίμων, οι οποίοι παίζουν σημαντικό ρόλο στη μεταφορά και διανομή των υδρογονανθράκων, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια.



Εικόνα 51. Απεικόνιση όλων των ειδών των υπεράκτιων εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευση των θαλάσσιων ενεργειακών πόρων.

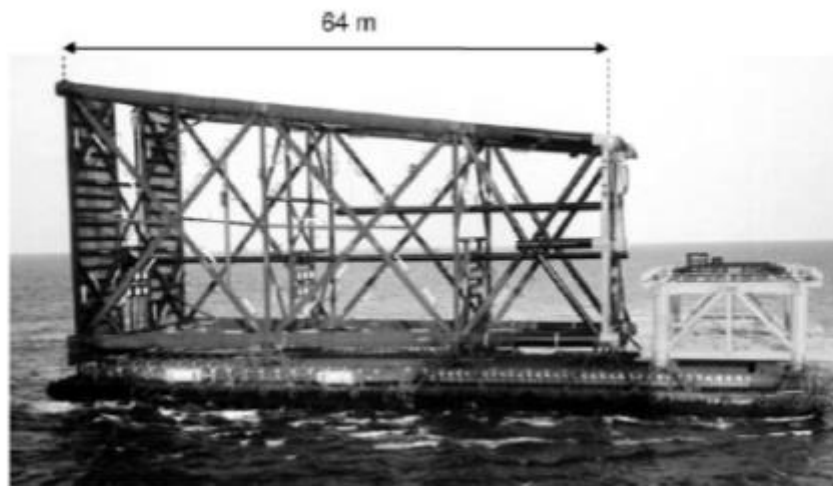
### Εξέδρες ανύψωσης- Jack-up

Οι συγκεκριμένες εξέδρες, χρησιμοποιούνται σε μικρά και ρηχά κοιτάσματα υδρογονανθράκων, στα οποία μια επένδυση σταθερής μόνιμης πλατφόρμας θα ήταν λιγότερο αποτελεσματική οικονομικά για τις εταιρείες εξόρυξης πετρελαίου. Αυτές οι εξέδρες παίζουν ζωτικό ρόλο στην υπεράκτια βιομηχανία, λόγω της ευελιξίας τους, του χαμηλού τους κόστους και της δυνατότητας αυτό-εγκατάστασης που διαθέτουν (εικόνα 52), [10].

Η πλωτή πλατφόρμα της εξέδρας, ρυμουλκείται στην επιθυμητή θέση μέσω πλοίων-φορηγίδων. Στη συνέχεια η κατασκευή χαμηλώνει τα πόδια στήριξης μέχρι το πυθμένα της θάλασσας, ανεβάζοντας την εξέδρα πάνω από την επιφάνεια του νερού. Η πλατφόρμα Jack-up μπορεί να ρυθμιστεί σε διάφορα ύψη μεταβάλλοντας το μήκος των ποδιών της, χρησιμοποιώντας έναν γρύλο ανύψωσης (tire jack), απ' όπου παίρνει και το όνομά της. Παραδοσιακά οι πλατφόρμες Jack-up χρησιμοποιούνται σε ρηχά νερά, λόγω της μη πρακτικότητάς τους σε βαθύτερα. Όμως καινούργια μοντέλα, όπως η κλάση εξεδρών Tarzan rigs χρησιμοποιούνται και σε μεγαλύτερα βάθη. Θεωρούνται ασφαλέστερες κατασκευές σε σύγκριση με άλλα είδη φορητών εξεδρών όπως είναι οι φορηγίδες- γεωτρύπανα επειδή η πλατφόρμα τους είναι υπερυψωμένη από την επιφάνεια του νερού, συνεπώς επηρεάζεται λιγότερο από καιρικά φαινόμενα και κύματα.



Εικόνα 52. Εξέδρα Jack-up.



Εικόνα 53. Η εξέδρα κατά τη μεταφορά της.

Σε κάθε καινούργια τοποθεσία, γίνεται εκτίμηση των δυνατοτήτων της εξέδρας σε τρεις διαφορετικές φάσεις, κατά την εγκατάσταση, την λειτουργία υπό συνθήκες καταιγίδας και κατά την απομάκρυνση της εξέδρας. Επίσης υπάρχει μια προσπάθεια τυποποίησης της εκτίμησης των εξεδρών με κατευθυντήριες γραμμές, όπως το λεγόμενο SNAME (Site Specific Assessment of Mobile Jack-Up Units) όπου σε ελεύθερη μετάφραση στα ελληνικά είναι εκτίμηση ειδικών τοποθεσιών για κινητές αυτό-ανυψούμενες εξέδρες [10].

Κατά τη διάρκεια καταιγίδων η εξέδρα παραλαμβάνει επαναλαμβανόμενα κυματικά φορτία. Τα φορτία αυτά είναι κάθετα, οριζόντια και φορτία ροπής. Για τις εξέδρες jack-up εξετάζεται κυρίως, η κωνική βάση της πλατφόρμας (spudcan). Αυτές οι βάσεις, σε σχήμα ανεστραμμένου κώνου παρέχουν ευστάθεια σε πλευρικές δυνάμεις, καθώς και σταθερότητα στις στρεπτικές ροπές και κάθετα φορτία. Κρίσιμος είναι ο υπολογισμός του ‘αποτυπώματος’ του spudcan, δηλαδή του βάρους που αυτό θα εισχωρήσει στον θαλάσσιο πυθμένα, χωρίς να γίνει διαπεραστική αστοχία (punch through failure).

Ο βαθμός της αποστράγγισης και η επίδραση της στερεοποίησης του spudcan, δίνεται ως συνάρτηση της κανονικοποιημένης ταχύτητας:

$$V = \frac{vD}{c_v} , \quad 4.1$$

όπου  $v$ , η ταχύτητα εισχώρησης του spudcan (περίπου  $1 \text{ m/hr}$ ), και  $c_v$  ο συντελεστής στερεοποίησης,

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad \text{m}^2/\text{sec} \quad 4.2$$

όπου  $k$ , ο συντελεστής διαπερατότητας,  $m_v$  ο συντελεστής όγκου,  $\gamma_w$  το ειδικό βάρος του νερού.

Αστράγγιστες συνθήκες. Στα περισσότερα αργιλώδη εδάφη, η προ-φόρτωση της κωνικής βάσης της πλατφόρμας (spudcan) θα είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζει πλήρως μη στραγγιζόμενες συνθήκες. Η φέρουσα ικανότητα του εδάφους να παραλάβει κάθετες φορτίσεις, σε συγκεκριμένο βάθος δίνεται από την εξής σχέση:

$$V = (s_u N_c + \sigma'_{v0}) A , \quad 4.3$$

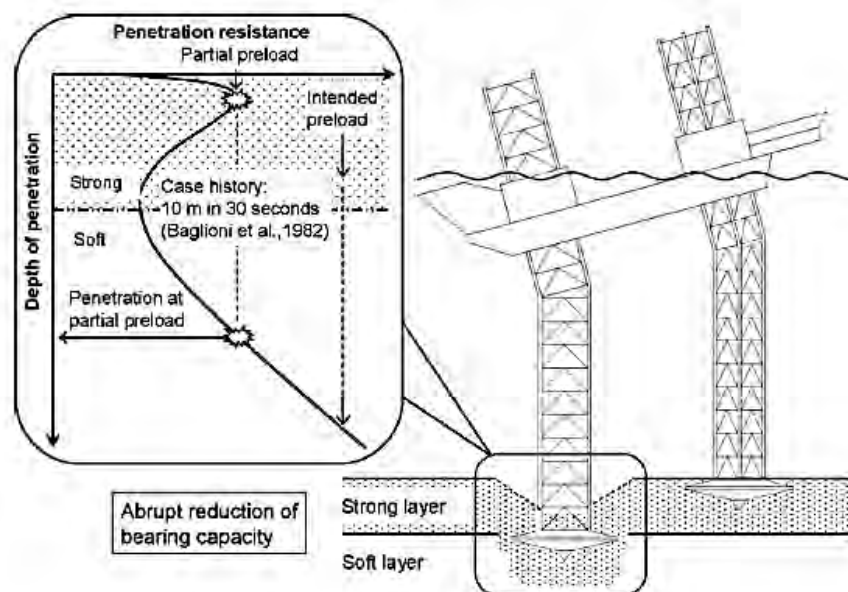
όπου  $s_u$  η ολική διατμητική αντοχή υπό αστράγγιστες συνθήκες,  $N_c$  ο συντελεστής φέρουσας ικανότητας για αστράγγιστες συνθήκες,  $\sigma'_{v0}$  η επί-τόπου (in-situ) ενεργός κάθετη τάση, και  $A$  η διατομή της θεμελίωσης [10].

Στραγγιζόμενες συνθήκες. Η προ-φόρτωση της κωνικής βάσης της πλατφόρμας (spudcan) πραγματοποιείται συνήθως αρκετά αργά για να εξασφαλιστούν οι πλήρως στραγγισμένες συνθήκες σε αμμώδη εδάφη βυθού. Η στραγγιζόμενη μέγιστη κατακόρυφη φέρουσα ικανότητα μιας κυκλικής θεμελίωσης στην επιφάνεια ομοιογενούς υλικού τριβής (χωρίς ενεργή προσαύξηση) μπορεί να εκφραστεί ως:

$$V = \gamma' N_\gamma \pi D^3 / 8 \quad 4.4$$

όπου  $\gamma'$  το ενεργό ειδικό βάρος,  $N_\gamma$  ο συντελεστής φέρουσας ικανότητας για την αξονο-συμμετρική περίπτωση και  $D$  η διάμετρος της θεμελίωσης.

Στην εικόνα 54, απεικονίζεται μια διαπεραστική αστοχία. Αυτού του είδους αστοχία, μπορεί να συμβεί σε στρωματοποιημένα εδάφη, όταν το spudcan, διεισδύει πρώτα σε ένα ισχυρό και μετά σε ένα ασθενές εδαφικό στρώμα [10].



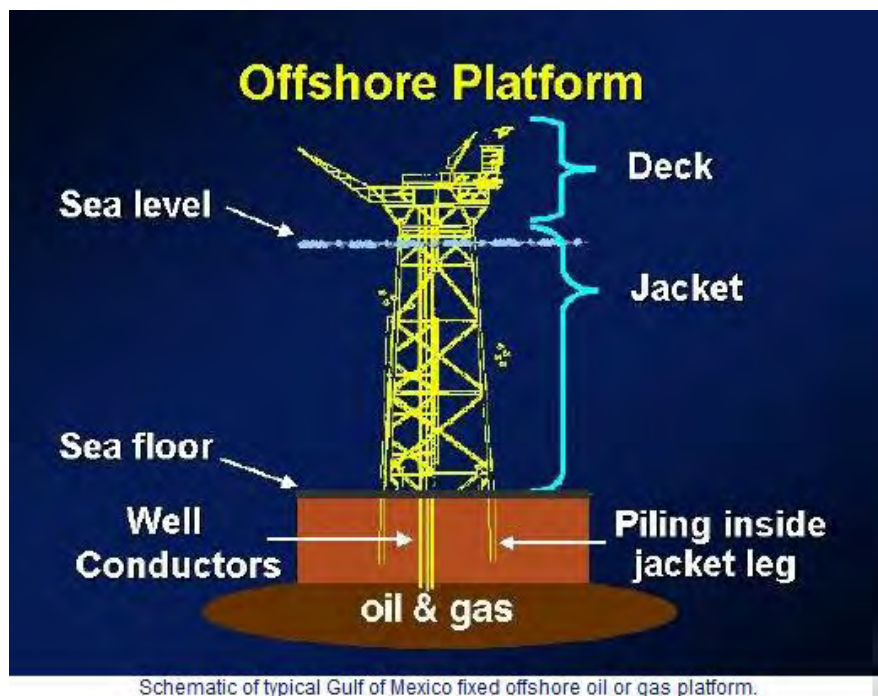
Εικόνα 54. Απεικόνιση διαπεραστικής αστοχίας (punch-through failure). Το spudcan, έχει διαπεράσει το υπερκείμενο ισχυρό εδαφικό στρώμα (strong layer), και έχει εισχωρήσει στο υποκείμενο μαλακό εδαφικό στρώμα (soft layer). Λόγω της αστοχίας αυτής (απότομη μείωση της φέρουσας ικανότητας των εδαφικών στρωμάτων), προκαλείται ένας απότομος λυγισμός των ποδιών της πλατφόρμας jack-up και πιθανή ανατροπή της.

Τέτοιου είδους αστοχίες, μπορούν να οδηγήσουν σε λυγισμό των ποδιών της πλατφόρμας, αχρηστεύοντας την πλατφόρμα προσωρινά ή ακόμα και προκαλώντας την ανατροπή της. Διαπεραστικές αστοχίες συμβαίνουν, κατά μέσο όρο, μία φορά κάθε χρόνο προκαλώντας ζημιά που κυμαίνεται μεταξύ ενός και δέκα εκατομμυρίων δολαρίων [10].

### Εξέδρες Jacket- σωληνωτή κατασκευή από χάλυβα

Είναι μόνιμες σταθερές εξέδρες άντλησης πετρελαίου, αγκυροβολημένες σταθερά στο θαλάσσιο πυθμένα, όπως φαίνεται και από τις εικόνες που ακολουθούν (εικόνες 55, 56). Αποτελούνται από μια ψηλή, χαλύβδινη κατασκευή, γνωστή ως jacket, η οποία ανυψώνεται από τον ωκεανό και υποστηρίζει τη πλατφόρμα της εξέδρας. Η κατασκευή αποτελείται: i) από συγκολλημένους ατσάλινους σωλήνες που συνθέτουν την βάση (jacket) και ii) από το κατάστρωμα μαζί με τις εγκαταστάσεις του [10]. Το jacket παρέχει τη στιβαρή βάση ενώ όλα τα υπόλοιπα μέρη της κατασκευής όπως το τρυπάνι και οι χώροι του πληρώματος βρίσκονται στο κατάστρωμα της εξέδρας. Οι σταθερές εξέδρες προσφέρουν υψηλή σταθερότητα αλλά καθόλου κινητικότητα, συνεπώς χρησιμοποιούνται για την άντληση μακροπρόθεσμων αποθεμάτων. Οι πλατφόρμες τύπου jacket, χρησιμοποιούνται μέχρι και τα 450m βάθος. Σε μεγαλύτερα βάθη, παρουσιάζουν προβλήματα ευστάθειας λόγω της δράσης του ανέμου και των κυμάτων.

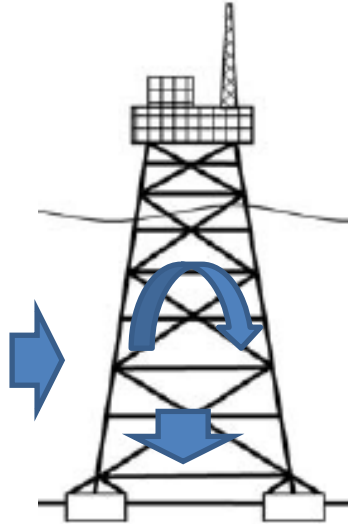
Η βάση των εξεδρών αυτών είναι μια σωληνοειδής δομή υποστήριξης, που αποτελείται από τέσσερις, έξι ή οκτώ σωληνώσεις διαμέτρου δύο έως τεσσάρων μέτρων που συγκολλούνται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας άλλους σωλήνες. Με αυτό τον τρόπο σύνδεσης των σωληνώσεων οι σωλήνες ένωσης σχηματίζουν το γράμμα Χ και η δομή που σχηματίζεται έχει την μορφή ενός σκαμνιού (stoollike structure). Το jacket αγκυρώνεται στον πυθμένα της θάλασσας λόγω ιδίου βάρους σε συνδυασμό με πασσάλους διαμέτρου 2 μέτρων που εισχωρούν από την επιφάνεια του πυθμένα σε βάθος 100 - 150m. Η μεταφορά του jacket στο σημείο ενδιαφέροντος γίνεται με ρυμουλκά πλοία, ενώ αξίζει να σημειωθεί πως το κόστος μιας πλατφόρμας τύπου jacket είναι πολύ υψηλό, γεγονός που την κάνει δημοφιλή μόνο για την άντληση μεγάλων ενεργειακών κοιτασμάτων σε μεσαία βάθη [13,14].



Εικόνα 55. Σχηματική αναπαράσταση τυπικής πλατφόρμας Jacket που χρησιμοποιείται στον Κόλπο του Μεξικού. Sea level=επίπεδο της θάλασσας, deck=κατάστρωμα, sea floor=θαλάσσιος πυθμένας, well conductors=αγωγοί φρεατίου, piling inside jacket leg=πασσαλοθεμελίωση, oil and gas=πετρέλαιο και φυσικό αέριο.

Τα φορτία που ασκούνται σε μια ρηχή κατασκευή περιλαμβάνουν μονοτονικά και κυκλικά φορτία, κατακόρυφα V(είτε σε θλίψη είτε σε εφελκυσμό), οριζόντια H και καμπτικά φορτία M, όπως φαίνεται και από την εικόνα 56. Ο λόγος της ροπής ως προς την οριζόντια συνιστώσα εκφράζει εάν η κατασκευή τείνει να ολισθήσει ή να ανατραπεί [10]. Ένα σημαντικό μέρος της φόρτισης που ασκείται πάνω σε μία υπεράκτια θεμελίωση είναι κυκλικό, συνεπώς υπάρχει μία συσσώρευση της πίεσης των πόρων που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Αυτό το φαινόμενο, οδηγεί σε μία χαλάρωση της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων και σε μείωση της αντοχής στα αργιλώδη εδάφη. Στα αμμώδη εδάφη, μπορεί να επέλθει ρευστοποίηση.





Εικόνα 56. Απεικόνιση των φορτίων στην εξέδρα jacket.

Στη εικόνα 57, φαίνονται οι δυνάμεις κατά την εγκατάσταση θεμελίωσης τύπου περιβλήματος (ή φούστας) (skirt foundation) σε κατασκευές σωληνωτών δομών χάλυβα. Σε περιπτώσεις όπου οι θεμελιώσεις βαρύτητας, έρχονται σε επαφή με μαλακά ιζήματα, τοποθετείται γύρω τους ένα λεπτό περίβλημα το οποίο τις περιορίζει από το υλικό αυτό και ταυτόχρονα συμβάλλει στη μεταφορά των φορτίων θεμελίωσης βαθύτερα εκεί όπου υπάρχει το ανθεκτικό (σκληρότερο) έδαφος. Η ολική αντίσταση σε διείσδυση  $Q$  από την θεμελίωση τύπου περιβλήματος, ορίζεται ως εξής [10]:

$$Q = A_S a \bar{s}_u + A_{tip} (N_c s_u + \gamma' z) \quad 4.3$$

όπου:

$A_S$ : η πλευρική επιφάνεια της θεμελίωσης,

$A_{tip}$ : η επιφάνεια έδρασης της θεμελίωσης,

$a$ : ο συντελεστής συνοχής (δηλ. το ανάστροφο της ευαισθησίας),

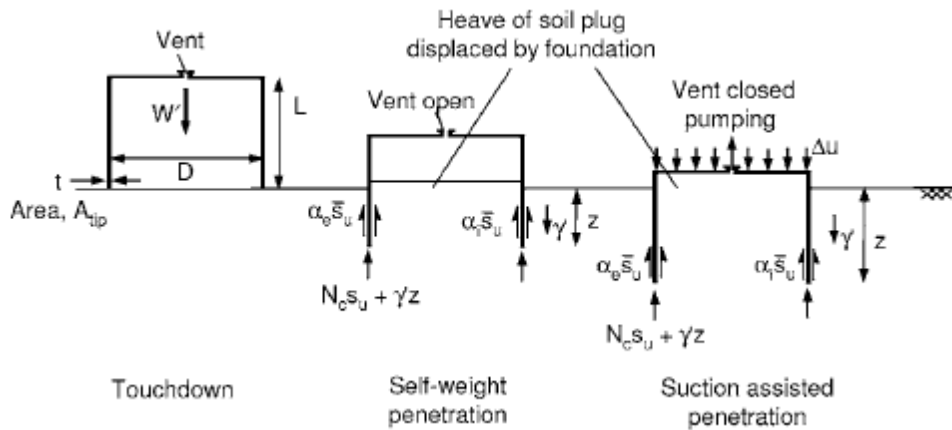
$\bar{s}_u$ : ο μέσος όρος της διατμητικής αντοχής σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης,

$s_u$ : η ολική διατμητική αντοχή υπό αστράγγιστες συνθήκες,

$N_c$ : ο συντελεστής φέρουσας ικανότητας για αστράγγιστες συνθήκες,

$\gamma'$ : το ενεργό ειδικό βάρος,

$z$ : το βάθος της θεμελίωσης.

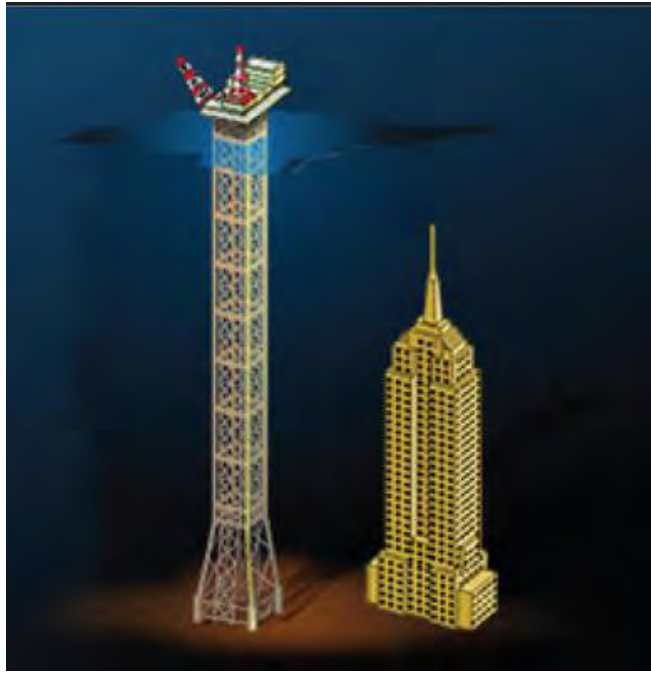


Εικόνα 57. Δυνάμεις που ασκούνται κατά την εγκατάσταση της θεμελίωσης τύπου φούστας.

### Συμβατές Πλατφόρμες-Εύκαμπτοι πύργοι

Οι συμβατές πλατφόρμες (compliant platforms) είναι παρόμοιες με τις σταθερές (εικόνες 58, 59). Χρησιμοποιούν χαλύβδινη σωληνοειδή βάση τύπου jacket για να υποστηρίξουν τις εγκαταστάσεις επιφάνειας και αγκυρώνονται στο θαλάσσιο πυθμένα με πασσαλο-θεμελιώσεις όπως οι σταθερές πλατφόρμες τύπου jacket. Αντίθετα με τις σταθερές πλατφόρμες, οι συμβατές αντιστέκονται στις δυνάμεις του νερού και του αέρα με έναν τρόπο παρόμοιο με τις πλωτές κατασκευές.

Η βάση της συμβατής πλατφόρμας έχει μικρότερες διαστάσεις από εκείνες της σταθερής. Αποτελείται από δύο ή περισσότερα τμήματα εκ των οποίων το επάνω έχει ανοδική τάση λόγω των δεξαμενών ανώσεως που υπάρχουν σε αυτό. Αναλυτικότερα, η βάση (jacket) χωρίζεται σε δύο κομμάτια. Το κάτω σκέλος, είναι ίδιο με των σταθερών πλατφορμών αλλά έχει μικρότερη διάμετρο και το πάνω σκέλος όπου υπάρχουν στεγανές δεξαμενές αέρα. Στο άνω μέρος μπορούν να υπάρξουν μέχρι 12 δεξαμενές, το μέγεθος των οποίων μπορεί να φτάσει τα 6 μέτρα σε διάμετρο και τα 35 μέτρα σε μήκος. Σκοπός των δεξαμενών είναι να μειώνουν το φορτίο που ασκείται στα θεμέλια της δομής μέσω της άνωσης που προκαλούν. Η ποσότητα άνωσης ελέγχεται ηλεκτρονικά, διατηρώντας την κατάλληλη ένταση στα μέλη δομής κατά τη διάρκεια των κινήσεων του ανέμου και των κυμάτων. Οι διαφορές αυτές επιτρέπουν τη χρήση των συμβατών πλατφόρμων σε βάθη νερού που κυμαίνονται μέχρι και στα 3.000ft (914.4m). Η περιοχή αυτή θεωρείται οικονομικά προτιμητέα σε σύγκριση με την περιοχή της σταθερής πλατφόρμας λόγω ύπαρξης μεγαλύτερων κοιτασμάτων, [14].



Εικόνα 58. Σύγκριση μεγεθών για μια τυπική διάταξη εύκαμπτου πύργου.



Εικόνα 59. Απεικόνιση της διάταξης ενός εύκαμπτου πύργου.

Οι κατασκευές αυτές, λόγω του μεγάλου ύψους τους, είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε περιστατικά υποθαλάσσιων κατολισθήσεων και ειδικότερα σε γεωκινδύνους λόγω

**Σελίδα 66 από 112**

ανάπτυξης τουρβιδιτικών ρευμάτων. Για το λόγο αυτό απαιτείται πολύ συχνή και λεπτομερής παρατήρηση των κινήσεων των ιζηματογενών αποθέσεων στον πυθμένα της θάλασσας αλλά και συστηματική μελέτη της γεωμορφολογίας και της νεοτεκτονικής της περιοχής.

### **Εξέδρες Βαρύτητας**

Όπως υποδηλώνει και το όνομά τους, οι εξέδρες βαρύτητας (π.χ. από σκυρόδεμα), βασίζονται στο ίδιο βάρος τους και φυσικά στην αντοχή του εδάφους του θαλάσσιου πυθμένα για να παραμείνουν σταθερές. Είναι σχεδιασμένες ειδικά για ακραίες καιρικές συνθήκες όπως δυνατές καταιγίδες. Όπως και οι υπόλοιπες κατηγορίες εξεδρών πετρελαίου έχουν και αυτές πολλές παραλλαγές. Μπορούν να κατασκευασθούν από σκυρόδεμα, ατσάλι ή ένα συνδυασμό και των δύο υλικών.

Εξέδρες βαρύτητας από σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στη περιοχή Ekofisk της Νορβηγίας [10]. Η μεγάλη ποικιλία στα σχέδια των εξεδρών βαρύτητας οφείλεται αφενός στα διαφορετικές συνθήκες πυθμένα της κάθε θάλασσας, αλλά και αφετέρου στο γεγονός ότι δεν έχει ακόμα βρεθεί ένα βέλτιστο σχέδιο εξέδρας που να πληροί όλες τις συνθήκες στο εκάστοτε μέρος όπου τοποθετείται η εξέδρα.

Η εξέδρα βαρύτητας από σκυρόδεμα, είναι κατασκευασμένη σε κωνοειδές σχήμα, με το μεγαλύτερο μέρος της μάζας και του όγκου της να βρίσκεται όσο πιο κοντά γίνεται στον θαλάσσιο πυθμένα. Προτιμάται η κατασκευή της κοντά στην ακτή, με τις ανώτερες εγκαταστάσεις να βρίσκονται στεγασμένες πριν αρχίσει η ρυμούλκηση στην υπεράκτια περιοχή. Στη συνέχεια το σύνολο της κατασκευής μεταφέρεται στη τελική τοποθεσία με τη βοήθεια πλοίων-φορηγίδων. Η όλη διαδικασία περιλαμβάνει τη μεταφορά της κυβελωτής βάσης τύπου νεοδόχου, με πλωτά μέσα, η οποία γεμίζει με νερό και βυθίζεται στον θαλάσσιο πυθμένα σιγά-σιγά καθώς από επάνω προσαρμίζονται οι κολώνες. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου, είναι ότι η εγκατάστασή της απαιτεί μόνο λίγες ημέρες, πράγμα πολύ σημαντικό ιδιαίτερα σε περιοχές με ακραίες καιρικές συνθήκες. Το βάρος αυτών των κατασκευών κυμαίνεται περίπου σε 300.000 τόνους.

Στις εικόνες 60 και 61, που ακολουθούν, απεικονίζεται η πλατφόρμα βαρύτητας Ninian Central platform, η οποία στη βάση της έχει προσαρμοσμένες μια σειρά από δεξαμενές. Οι δεξαμενές αποθήκευσης, δίνουν στις πλατφόρμες βαρύτητας ένα πλεονέκτημα έναντι στις πλατφόρμες jacket. Εάν μια πλατφόρμα τύπου jacket δεν έχει στο κατάστρωμά της δεξαμενές, κινδυνεύει να χάσει το φορτίο προς εξαγωγή εάν τα πλοία-φορηγίδες δεν φτάσουν στην ώρα τους [10].



Εικόνα 60. Η πλατφόρμα Ninian κατά την κατασκευή της και το υποθαλάσσιο μέρος.



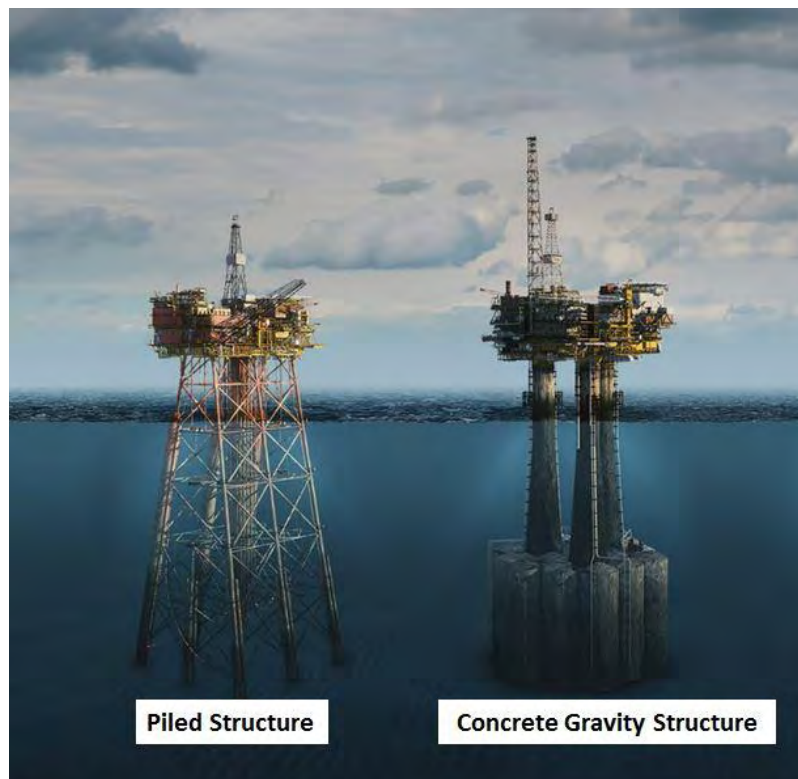
Εικόνα 61. Η πλατφόρμα Ninian κατά τη διάρκεια λειτουργίας της.

Γενικότερα, οι εξέδρες βαρύτητας είναι κατασκευές, οι οποίες εδράζονται στον πυθμένα της θάλασσας και αντιστέκονται στα πλευρικά περιβαλλοντικά φορτία λόγω ιδίου βάρους. Οι πλατφόρμες βαρύτητας είναι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα και το δομικό τους σύστημα αποτελείται από μια κυψελωτή βάση, η οποία περιβάλλει τρεις έως έξι κολώνες, που εκτείνονται έως πάνω από την επιφάνεια του νερού, με σκοπό να στηρίξουν το κατάστρωμα της πλατφόρμας (εικόνα 62). Συνήθως εξέδρες

βαρύτητας κατασκευάζονται σε μικρά βάθη 20-350m. Τις περισσότερες φορές η κατασκευή απλά εδράζεται στο πυθμένα της θάλασσας λόγω ιδίου βάρους, χωρίς να απαιτείται κάποια αγκύρωση ή θεμελίωση με πασσάλους (εικόνα 63).

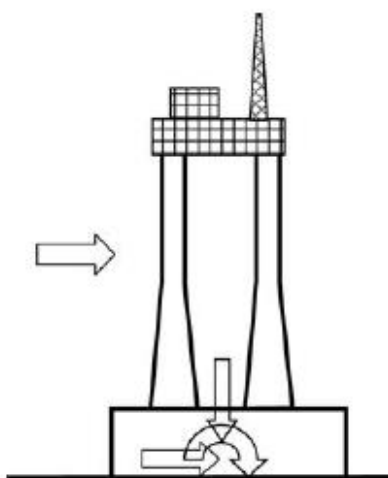


Εικόνα 62. Πλατφόρμα βαρύτητας.



Εικόνα 63. Σύγκριση πλατφορμών, πασσαλο-θεμελίωσης (piled structure) και βαρύτητας από σκυρόδεμα (concrete gravity structure).

Τα φορτία που ασκούνται σε μια ρηχή κατασκευή, όπως φαίνεται και από την εικόνα 64, περιλαμβάνουν μονοτονικά και κυκλικά φορτία, κατακόρυφα  $V$  (είτε σε θλίψη, είτε σε εφελκυσμό), οριζόντια  $H$  και καμπτικά φορτία  $M$ . Ο λόγος της ροπής ως προς την οριζόντια συνιστώσα εκφράζει εάν η κατασκευή τείνει να ολισθήσει ή να ανατραπεί [10]. Ένα σημαντικό μέρος της φόρτισης που ασκείται πάνω σε μία υπεράκτια θεμελίωση είναι κυκλικό, συνεπώς υπάρχει μία συσσώρευση της πίεσης των πόρων που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Αυτό το φαινόμενο, οδηγεί σε μία χαλάρωση, που παρατηρείται στη καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων, και σε μείωση της αντοχής στα αργιλώδη εδάφη. Στα αμμώδη εδάφη, μπορεί να επέλθει ρευστοποίηση.



Εικόνα 64. Απεικόνιση των φορτίων που ασκούνται σε μια εξέδρα βαρύτητας.

Η φέρουσα ικανότητα της μικρού βάθους θεμελίωσης για μια εξέδρα βαρύτητας, σε αστράγγιστες συνθήκες δίνεται από την ακόλουθη σχέση [10]:

$$V_{ult} = A' \left( s_{uo} (N_c + k B' / 4) \frac{FK_c}{\gamma_m} + p'_o \right) \quad 4.4$$

όπου:

$V_{ult}$  : το μέγιστο κατακόρυφο φορτίο,

$A'$  : η ενεργός επιφάνεια παραλαβής των φορτίων (φέρουσα επιφάνεια),

$s_{uo}$  : αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους στο επίπεδο της θεμελίωσης,

$N_c$  : συντελεστής φέρουσας ικανότητας για κατακόρυφη φόρτιση μιας λωρίδας θεμελίωσης σε ομογενές ίζημα,

$k$  : η βαθμίδα (gradient) του προφίλ της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (μηδενική για ομογενή ιζήματα),

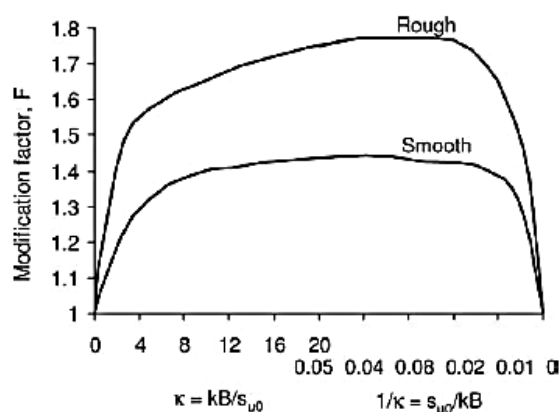
$B'$  : το ενεργό πλάτος θεμελίωσης,

$F$  : διορθωτικός συντελεστής σχετικά με τον βαθμό της ετερογένειας της αντοχής,

$\gamma_m$  : ο συντελεστής του υλικού σχετικά με την διατμητική αντοχή,

$K_C$  : τροποποιητικός συντελεστής για τον προσανατολισμό της φόρτισης και το σχήμα της θεμελίωσης.

Ο διορθωτικός συντελεστής  $F$  δίνεται ως συνάρτηση του αδιάστατου συντελεστή ετερογένειας  $\kappa = kB'/s_{u0}$ , όπως φαίνεται και από την εικόνα 65.



Εικόνα 65. Απεικόνιση της φέρουσας ικανότητας του διορθωτικού συντελεστή  $F$ , για εδάφη με γραμμικά αυξανόμενη αντοχή με το βάθος, rough = σκληρό, smooth = μαλακό, modification factor  $F$ , = διορθωτικός συντελεστής  $F$ .

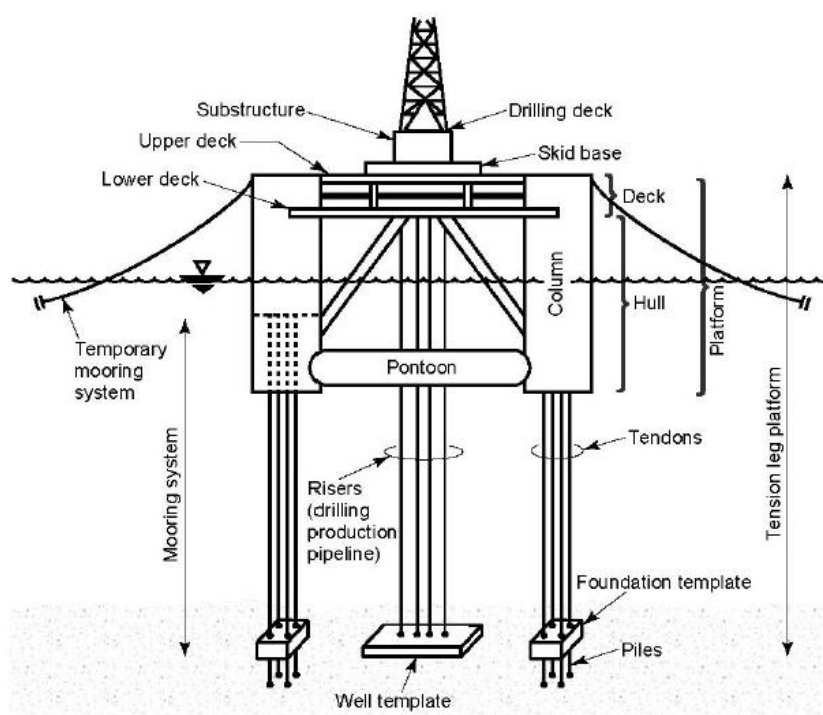
### Πλατφόρμα ποδών τένοντα (Tension-Leg Platform)

Ένας ακόμη τύπος πλατφόρμας άντλησης πετρελαίου είναι η πλατφόρμα Tension-Leg Platform (TLP). Ο συγκεκριμένος τύπος πλατφόρμας περιλαμβάνει πλωτήρες με τένοντες και δοκούς υπό ένταση, οι οποίοι συνδέονται στον θαλάσσιο πυθμένα (εικόνα 66). Οι εξέδρες αυτού του τύπου φθάνουν σε βάθη που κυμαίνονται από 300-1500m, αναλόγως το έτος κατασκευής τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος κατασκευής τους είναι πολύ μεγάλο. Η ειδοποιός διαφορά αυτής της εξέδρας TLP έγκειται στο γεγονός ότι η σταθεροποίησή της βασίζεται στην άντωση του επάνω μέρους της εξέδρας, ενώ τένοντες υπό εφελκυσμό ασκούν δύναμη προς τον θαλάσσιο πυθμένα. Οι τένοντες είναι στην ουσία καλώδια μεγάλου μήκους, που βρίσκονται σε διαρκή εφελκυσμό. Κάθε ομάδα τενόντων ονομάζεται “τεταμένο-πόδι / tension-leg”. Η ονομασία αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η κατασκευή δε στηρίζει το βάρος της στον πυθμένα. Η εφελκυστική δράση των τενόντων, έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη τυχόν κατακόρυφων μετακινήσεων της κατασκευής. Παρόλα αυτά, οι τένοντες επιτρέπουν



μικρές οριζόντιες μετακινήσεις, γεγονός που καθιστά την TLP ανθεκτική σε πλευρικές φορτίσεις χωρίς κίνδυνο αστοχίας των τεταμένων ποδών [13,15].

Στις δύο παρακάτω εικόνες 66, 67, φαίνεται η κύρια διάταξη μιας πλατφόρμας TLP. Στο κεντρικό τμήμα φαίνεται το κατάστρωμα γεώτρησης (drilling deck), το άνω και κάτω κατάστρωμα (upper and lower deck), κάποιο προσωρινό σύστημα αγκύρωσης (temporary mooring system), το υποθαλάσσιο κομμάτι που ευθύνεται για την άντωση ή σχεδία (pontoon), το υποστήριγμα της δοκού (foundation template), το υποστήριγμα του φρεατίου (well template), η πλατφόρμα συνολικά (platform) και το σκάφος της πλατφόρμας (hull).



Εικόνα 66. Σχηματική απεικόνιση πλατφόρμας TLP.

Σε σειсмоγενείς περιοχές θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα κατάλληλα ιστορικά, παλαιοσεισμικά δεδομένα σχετικά με τους επί τόπου συντελεστές σεισμικής επιτάχυνσης της περιοχής εγκατάστασης. Για την απόκριση ενός τένοντα TLP, η κατακόρυφη κίνηση εδάφους είναι πολύ πιο κρίσιμη από την οριζόντια κίνηση. Για τη θεμελίωση σημαντική είναι τόσο η κάθετη όσο και η οριζόντια κίνηση του εδάφους [22].

Σχετικά με την μελέτη πυθμένα και υπό του πυθμένα, θα πρέπει να ληφθούν γεωλογικές και γεωφυσικές πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες που επικρατούν στο βάθος εγκατάστασης της πλατφόρμας. Η γεωλογική έρευνα θα πρέπει να περιλαμβάνει τη χαρτογράφηση και περιγραφή όλων των χαρακτηριστικών της επιφάνειας του θαλάσσιου πυθμένα αλλά και κάτω από αυτόν σύμφωνα με τα ακόλουθα, [22]: α) στρωματογραφία του πυθμένα, β) γεωμορφολογικές δομές του

πυθμένα που μπορεί να ευνοήσουν μία αστοχία, γ) παρουσία αντικειμένων στον πυθμένα όπως π.χ. ογκόλιθοι και μικροί κρατήρες, δ) διαφυγή αερίων, ε) ρήγματα μικρού βάθους, στ) βραχώδη μπλοκ σε απότομες κατωφέρειες που μπορεί να ανατραπούν, ζ) επίδραση στην περιβάλλουσα βραχώμαζα αστοχιών γεωτρήσεων κατά την εγκατάσταση θεμελίωσης, η) επιπτώσεις στον πυθμένα λόγω προηγούμενων χρήσεων από τον άνθρωπο, και θ) υδρίτες αερίου.



Εικόνα 67.Μεταφορά με ρυμούλκηση πλατφόρμας TLP.

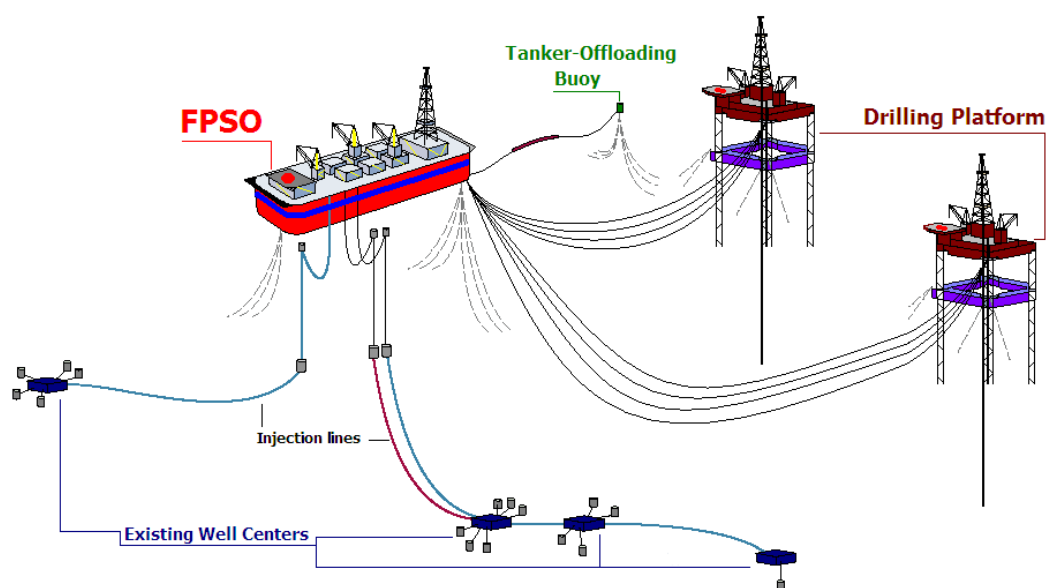
Η γεωφυσική μελέτη θα πρέπει να αξιολογείται στο πλαίσιο ενός γεωλογικού μοντέλου για να προσδιοριστεί η ύπαρξη οποιουδήποτε γεωλογικού στοιχείου που μπορεί να έχει επίδραση στο σχεδιασμό (δηλαδή πρέπει να διενεργείται μελέτη γεωλογικού κινδύνου για την εκτίμηση της επίδρασης των γεωλογικών χαρακτηριστικών στην λειτουργία μιας πλατφόρμας TLP).

Σχετικά με την γεωτεχνική έρευνα, θα πρέπει να αφορά τη περιοχή κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα και θα πρέπει να λαμβάνει γεωτεχνικά δεδομένα σχετικά με τη στρωματογραφία και την πλευρική μεταβλητότητα του εδάφους. Τα διαστήματα δειγματοληψίας και επιτόπια εξέταση πρέπει να διασφαλίζουν την αντιπροσωπευτικότητα σε κάθε γεωλογικό στρώμα. Οι παράμετροι σχεδιασμού του εδάφους σε διάφορα στρώματα θα πρέπει να προσδιορίζονται από ένα πρόγραμμα πεδίου το οποίο ελέγχει με ακρίβεια το εδαφικό και βραχώδες υπόβαθρο. Ο αριθμός και το εύρος των ερευνητικών διατρήσεων θα εξαρτηθεί από τις συνθήκες που επικρατούν στον πυθμένα και την ποιότητα του γεωλογικού υποβάθρου Σε αυτό το σημείο η γεωφυσική έρευνα προσφέρει σημαντικές πληροφορίες στη γεωτεχνική έρευνα. Αν για παράδειγμα διαπιστωθεί έντονη στρωματογραφική μεταβλητότητα κατά μήκος του πυθμένα τότε θα απαιτηθεί η πραγματοποίηση περισσότερων ερευνητικών διατρήσεων. Τα ανακτηθέντα δείγματα, τα οποία πρόκειται να αποσταλούν σε εργαστήριο στην ξηρά (ή πάνω στην εξέδρα αν υπάρχει κατάλληλα

εξοπλισμένο εργαστήριο), θα πρέπει να συσκευάζονται προσεκτικά ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διαταραχές, οι μεταβολές της περιεκτικότητας σε υγρασία και οι μεταβολές της θερμοκρασίας [22]. Σημειώνεται ότι οι παραπάνω γεωλογικές, γεωφυσικές και γεωτεχνικές έρευνες εφαρμόζονται σε όλα τα είδη θαλασσιών εξεδρών υδρογονανθράκων.

## Πλωτά συστήματα παραγωγής

Καθώς οι πετρελαϊκές εταιρείες επεκτείνονται σε ολοένα και βαθύτερα ύδατα, εφαρμόζουν λιγότερο παραδοσιακές μεθόδους για την άντληση πετρελαίου. Αυτό σημαίνει ότι σε υπερ-βαθέα ύδατα, χρησιμοποιούνται πλωτές και ημι-υποβρύχιες κατασκευές (floating production systems), οι οποίες επιπλέουν μερικώς πάνω από τη θάλασσα, καθώς αντλούν πετρέλαιο από πολύ μεγάλα βάθη (εικόνα 68). Ένα τέτοιο σύστημα είναι “δυναμικά τοποθετημένο” στην περιοχή ενδιαφέροντος, χρησιμοποιώντας προωθητήρες (thrusters) οι οποίοι ελέγχονται ηλεκτρονικά. Οι κατασκευές χρησιμοποιούνται σε νερά από 180m έως 2000m και είναι πολύ κοινές στο κόλπο του Μεξικού.



Εικόνα 68. Πλωτά συστήματα παραγωγής (FPSO), drilling platform = πλατφόρμα εξόρυξης, tanker offloading buoy = σημαντήρας εκφόρτωσης δεξαμενόπολιου, existing well centers = υπάρχοντες πηγάδια υδρογονανθράκων

Συχνά είναι εξοπλισμένες με μια μηχανική διάταξη τύπου βαλβίδας που ονομάζεται Blow Out Preventer (BOP), η οποία δρα σαν προστατευτική βαλβίδα για την αποτροπή της ανεξέλεγκτης ροής του πετρελαίου, λόγω διαφοράς πίεσης και συνεπώς για την προστασία του πληρώματος και του εξοπλισμού [13]. Το συγκεκριμένο σύστημα είναι επιρρεπές σε υποθαλάσσιες κατολισθήσεις λόγω της μεγάλης επιφάνειας του πυθμένα στην οποία λειτουργεί. Η επικινδυνότητα αυξάνεται ακόμα και με πολύ μικρές μεταβολές της κλίσης του θαλάσσιου πυθμένα (μισή με μία μοίρα

γωνία). Θεωρητικά ο κίνδυνος να εκτεθεί σε κάποιο καταστροφικό συμβάν μειώνεται εάν η επιφάνεια έδρασής του είναι απολύτως οριζόντια, παρόλα αυτά ακόμα και σε επίπεδη επιφάνεια, η λειτουργία τέτοιων συστημάτων μπορεί να προκαλέσει την απελευθέρωση ένυδρων αερίων λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του θαλάσσιου πυθμένα, συνεπώς μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της αντοχής του εδάφους ή ακόμα και στην ενεργοποίηση υποθαλάσσιων κατολισθήσεων. Χαρακτηριστική περίπτωση καταστροφικής αστοχίας αποτέλεσε η περίπτωση του Deepwater Horizon το 2010 στον κόλπο του Μεξικού.

Στη εικόνα 69, φαίνεται το σύστημα Blow-Out Preventer (BOP) ή σε ελεύθερη μετάφραση παρεμποδιστής εκρήξεων. Το BOP χρησιμοποιείται ως ένα είδος συστήματος ασφαλείας για την αποφυγή ατυχημάτων, το οποίο ουσιαστικά προλαμβάνει την ανεξέλεγκτη ροή υγρών και αερίων κατά τη διάρκεια των γεωτρήσεων. Τα συστήματα αυτά είναι ουσιαστικά μεγάλες βαλβίδες υψηλής πίεσης, οι οποίες μπορούν να ελέγχονται από μακριά. Όταν το γεωτρήσιμο κλείσει τη βαλβίδα, ουσιαστικά δημιουργείται ένα στεγανό λόγω πίεσης στην κορυφή του πηγαδιού (well), παρεμποδίζοντας τα υγρά να διαφύγουν. Τα συγκεκριμένα συστήματα είναι υψίστης σημασίας για την ασφάλεια του πληρώματος αλλά και για την διατήρηση του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την γεώτρηση.



Εικόνα 69. Blow Out Preventer (BOP), παρεμποδιστής εκρήξεων.

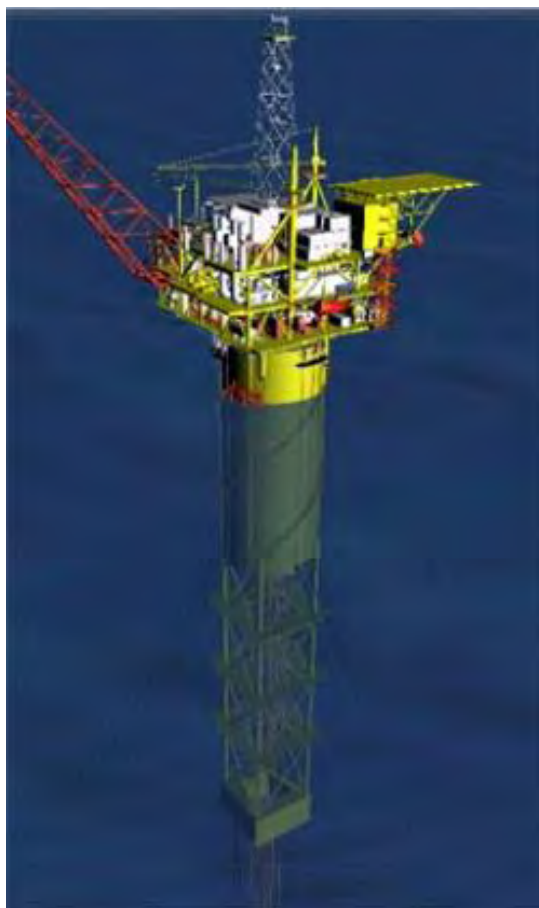
## Πλατφόρμα Δοκού

Οι πλατφόρμες δοκού (spar platforms) χρησιμοποιούν ένα μονό κύλινδρο μεγάλης διαμέτρου για τη στήριξη του καταστρώματος. Μια τυπική διάταξη πλατφόρμας δοκού, περιλαμβάνει ένα κύλινδρο διαμέτρου 40m. Περίπου το 90% της όλης διάταξης βρίσκεται κάτω από το νερό. Οι πλατφόρμες δοκού, αναπτύσσονται σε βάθη των 900m, αλλά με τη σημερινή τεχνολογία μπορούν να φτάσουν ακόμα και σε βάθη των 3000m, και θεωρούνται οι καταλληλότερες διατάξεις για πολύ μεγάλα βάθη [13]. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι πλατφόρμες δοκού χρησιμοποιούν ειδικά διαμορφωμένα προεξέχοντες λωρίδες από τη δοκό (strakes), για τη μείωση των κινήσεων λόγω στροβίλων και τυρβώδους ροής (vortex induced motions). Χαρακτηριστικό της πλατφόρμας δοκού, όπως φαίνεται και από τις εικόνες 70, 71, είναι η κούφια κυλινδρική δοκός. Επιπροσθέτως, στο κάτω μέρος της δοκού έχει προστεθεί έρμα βαρύτερο του νερού, εξασφαλίζοντας ότι το κέντρο βάρους θα βρίσκεται κάτω από το κέντρο πλευστότητας. Το βαθύ τμήμα της δοκού, προσδίδει στη πλατφόρμα δοκού σταθερότητα έναντι ανέμου, θαλάσσιων ρευμάτων και κυμάτων. Το κοίλο μέρος της δοκού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση πετρελαίου ή φυσικού αερίου [18].



Εικόνα 70. Απεικόνιση της πλατφόρμας δοκού, έτσι όπως φαίνεται πάνω από την ίσαλο.

Οι πλατφόρμες δοκού δεν έρχονται σε άμεση επαφή με τον πυθμένα της θάλασσας αλλά έμμεσα μέσω του συστήματος αγκύρωσης που αποτελείται από τένοντες που ξεκινάνε περιμετρικά της δοκού και καταλήγουν στον πυθμένα σε σημεία που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από την προβολή της δοκού πάνω στον πυθμένα. Για τον παραπάνω λόγο είναι περισσότερο επιρρεπείς στην δράση των κυμάτων και λιγότερο σε υποθαλάσσιες ολισθήσεις.



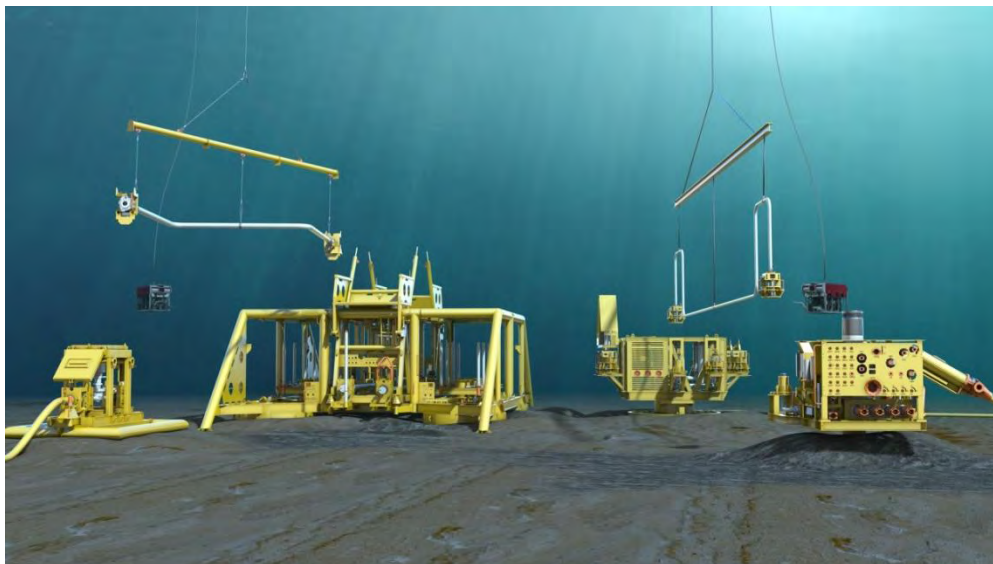
Εικόνα 71. Απεικόνιση της πλατφόρμας δοκού με το υποθαλάσσιο τμήμα της.

### **Υποθαλάσσιο σύστημα**

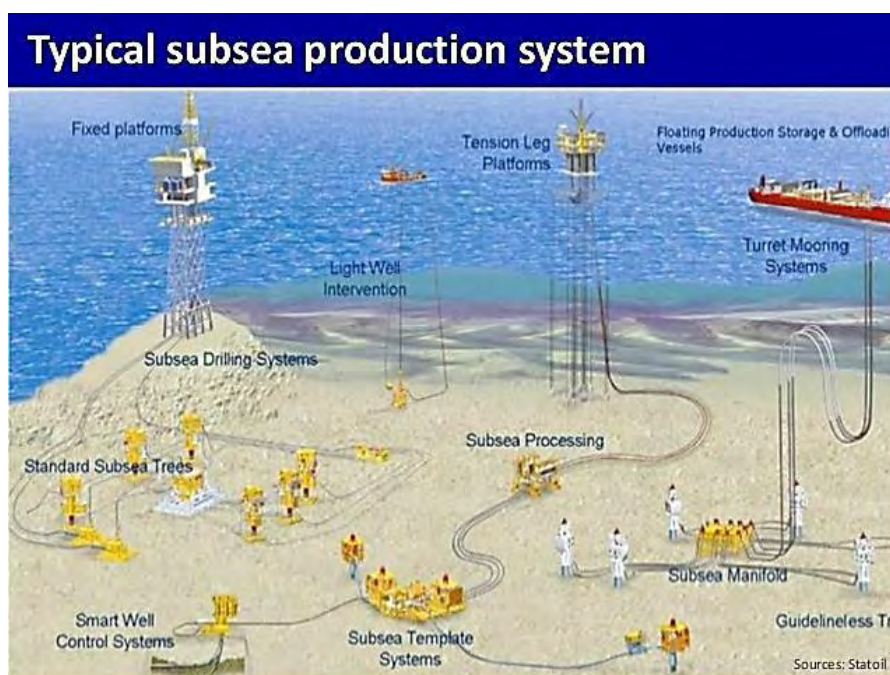
Πλωτές εξέδρες, τρυπάνια και παραδοσιακές πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου, χρησιμοποιούν υποθαλάσσια πηγάδια για να εξάγουν πετρέλαιο και φυσικό αέριο, απευθείας από τον θαλάσσιο πυθμένα. Ένα υποθαλάσσιο σύστημα άντλησης πετρελαίου (sub-sea system) περιλαμβάνει μια μονάδα παραγωγής που βρίσκεται μόνιμα στο θαλάσσιο πυθμένα καθώς και γραμμές μεταφοράς προς τις διάφορες εγκαταστάσεις (εικόνες 72, 73). Το μεγάλο μειονέκτημα αυτού του είδους των κατασκευών είναι ότι υπάρχει μεγάλη δυσκολία διόρθωσης τυχόν διαρροών [13].

Τα υποθαλάσσια συστήματα παραγωγής είναι εξαιρετικά επιρρεπή στους υποθαλάσσιους γεωκινδύνους και ειδικότερα στις υποθαλάσσιες κατολισθήσεις για πολλούς λόγους. Πρώτον, καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή του υποθαλάσσιου πυθμένα, όπου όπως είναι φυσικό ο υποθαλάσσιος πυθμένας δεν θα είναι απολύτως επίπεδος. Επιπροσθέτως, η παρουσία κοντινών πρανών συμβάλλουν στη πιθανή αποσταθεροποίηση του θαλάσσιου πυθμένα με την δημιουργία ακόμα και μιας οπισθοδρομικής κατολίσθησης. Ρήγματα, σεισμοί, διάπυρα άλατος, ένυδρα αέρια, ερπυσμός του εδάφους αλλά και ηφαίστεια ιλύος μαζί με ανθρωπογενείς δραστηριότητες λόγω της εκμετάλλευσης των υποθαλάσσιων κοιτασμάτων, όπως αναφέρονται εκτενώς στο κεφάλαιο 2.4 είναι πολύ πιθανό να προκαλέσουν μια υποθαλάσσια κατολίσθηση. Αναλυτικότερα, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες μπορούν να μειώσουν την πίεση του θαλάσσιου πυθμένα, όπου σε συνδυασμό με την

αύξηση της θερμοκρασίας γύρω από τα φρεάτια εξόρυξης υδρογονανθράκων, προκαλείται προδιάλυση των ένυδρων αερίων, τα οποία όπως έχει ήδη αναφερθεί αποσταθεροποιούν τον υποθαλάσσιο πυθμένα και είναι ευθύνονται για διάφορες κατολισθήσεις στο παρελθόν.

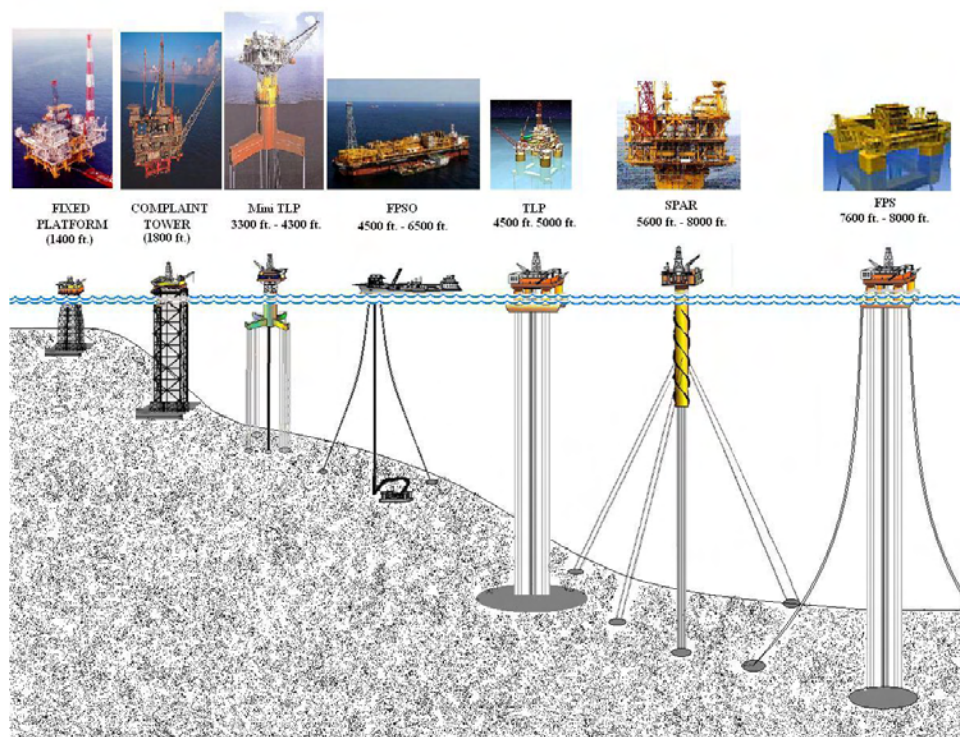


Εικόνα 72. Απεικόνιση ενός υποθαλάσσιου συστήματος παραγωγής κατά την εγκατάστασή του.

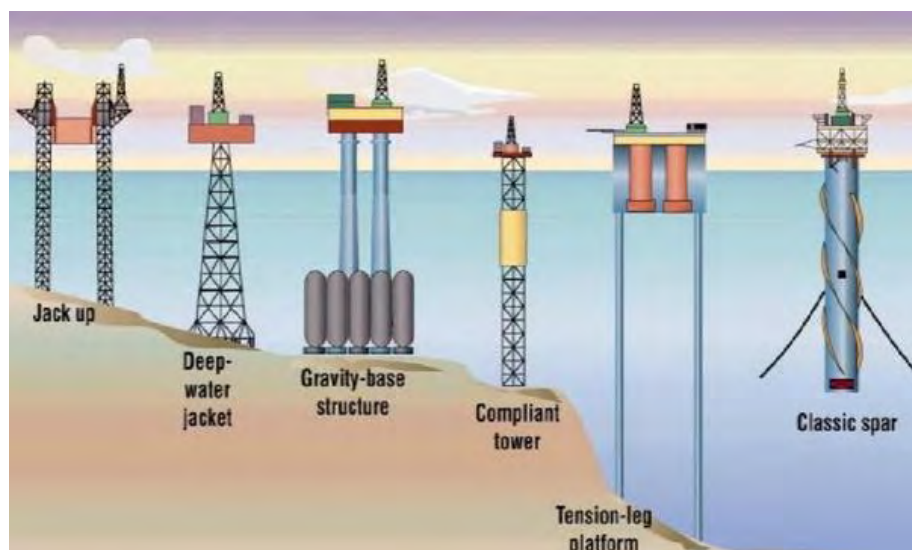


Εικόνα 73. Απεικόνιση ενός τυπικού υποθαλάσσιου συστήματος παραγωγής, σταθερή πλατφόρμα = fixed platform, πλατφόρμα εφελκόμενου πόδα = tension leg platform, πλωτά συστήματα παραγωγής αποθήκευσης και πλοία εκφόρτωσης = floating production storage and offloading vessels, έξυπνα συστήματα ελέγχου φρεατίων = smart well control systems, υποθαλάσσιο σύστημα πολλαπλών αγωγών = subsea manifold subsea template systems, στάνταρ υποθαλάσσιες διακλαδώσεις = standard subsea trees.

Στις εικόνες 74, 75 απεικονίζονται συνολικά πλατφόρμες όλων των ειδών που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο.



Εικόνα 74. Διάφορα είδη πλατφορμών, για αυξανόμενο βάθος από αριστερά προς τα δεξιά. Σταθερή πλατφόρμα, εύκαμπτος πύργος, μινι πλατφόρμα εφελκόμενου πόδα, πλωτό σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης, πλατφόρμα εφελκόμενου πόδα, πλατφόρμα δοκού, πλωτό σύστημα παραγωγής.



Εικόνα 75. Διάφορα είδη πλατφορμών, από αριστερά προς τα δεξιά η αυτό ανυψούμενη, jacket βαθέων νερών, πλατφόρμα βαρύτητας, εύκαμπτος πύργος, πλατφόρμα εφελκόμενου πόδα κλασσική πλατφόρμα δοκού.



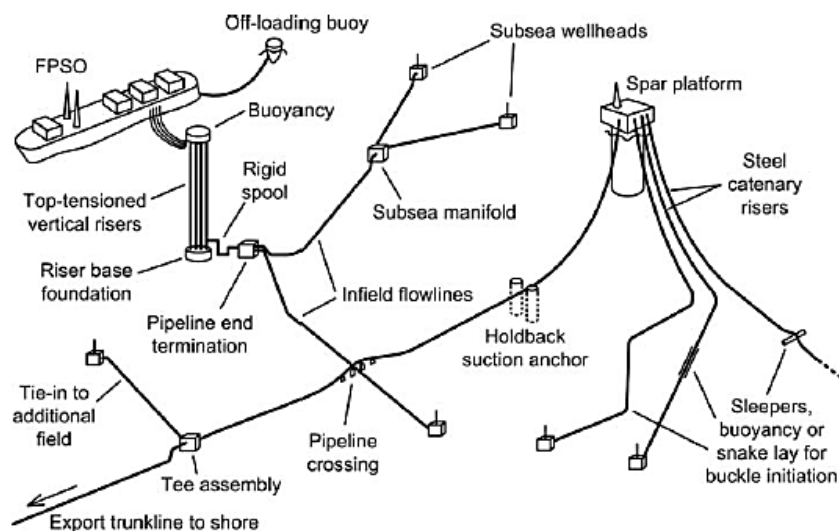
## **4.2 ΑΓΩΓΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ**

Οι αγωγοί μεταφοράς καυσίμων, θεωρούνται ως οι αρτηρίες της βιομηχανίας υδρογονανθράκων. Ουσιαστικά, επιτελούν ένα μεταφορικό έργο, διακινούν δηλαδή, προϊόντα υδρογονανθράκων και λοιπών ρευστών από τα σημεία άντλησης στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας και στην ακτή. Ανάλογα με το είδος των αγωγών και την λειτουργία που επιτελούν, χρησιμοποιείται και διαφορετική ονοματολογία. Μεγάλοι αγωγοί μεταφοράς υδρογονανθράκων λέγονται και σιδηρόδρομοι (trunklines), ενώ μικροί αγωγοί που μέσα τους περικλείουν καλώδια ηλεκτρικού ρεύματος, υδραυλικές γραμμές και χημικά μικρού όγκου, ονομάζονται ομφαλικοί αγωγοί (umbilicals).

Σχετικά άκαμπτοι αγωγοί, είναι φτιαγμένοι από χαλύβδινους σωλήνες με διάφορα εσωτερικά και εξωτερικά στρώματα επικάλυψης κατά της διάβρωσης, προστασία έναντι κρουστικών φορτίων καθώς και για θερμομόνωση. Είναι συνηθισμένη πρακτική, η πρόσθεση βάρους μέσω αυτών των στρωμάτων ούτως ώστε να αυξηθεί η σταθερότητα του αγωγού. Στέρεοι, άκαμπτοι αγωγοί ποικίλουν σε διάμετρο από 0.1m-1.5m. Εύκαμπτοι αγωγοί αποτελούνται από σύνθετα υλικά μετάλλου και πολυμερούς και κυμαίνονται σε διαμέτρους από 0.1m έως 0.5m. Οι εύκαμπτοι αγωγοί είναι πιο ακριβοί στη κατασκευή τους, όμως, τοποθετούνται στον θαλάσσιο πυθμένα πιο γρήγορα, σε σύγκριση με τους μεταλλικούς. Τα ρευστά που μεταφέρουν οι αγωγοί, πρέπει να μεταφερθούν από τον θαλάσσιο πυθμένα σε μία πλωτή εξέδρα. Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιούνται οι ανυψωτήρες (risers). Οι ανυψωτήρες μπορούν να είναι κάθετοι αγωγοί αγκυρωμένοι στον θαλάσσιο πυθμένα (top tensioned risers) ή να βρίσκονται ελεύθεροι στο νερό σαν μια αλυσίδα (catenary risers).

Καθώς οι υπεράκτιες κατασκευές επεκτείνονται σε ολοένα και βαθύτερα νερά μακριά από την ακτή, οι αγωγοί μεταφοράς υδρογονανθράκων, παίζουν ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στην ανάπτυξη των υποδομών ενεργειακών κατασκευών. Το χαρακτηριστικό κόστος αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου είναι ιδιαίτερο μεγάλο. Για παράδειγμα, στην βορειοδυτική υφαλοκρηπίδα της Αυστραλίας ξεπερνά τα 4 εκατομμύρια δολάρια ανά χιλιόμετρο, με ένα σημαντικό ποσοστό αυτών των χρημάτων να αναλογεί στη σταθεροποίηση του αγωγού στον θαλάσσιο πυθμένα. Η σταθερότητα αποτελεί το κυριότερο γεωτεχνικό χαρακτηριστικό σχεδιασμού για τους υποθαλάσσιους αγωγούς μεταφοράς υδρογονανθράκων, οι οποίοι πρέπει να είναι σε θέση να αντέχουν την υδροδυναμική φόρτιση λόγω των κυμάτων και των ρευμάτων της θάλασσας, αλλά και τα φορτία που προκύπτουν λόγω διαστολής και συστολής του αγωγού εξαιτίας θερμοκρασιακών διαφορών και διαφορών πίεσης του περιεχομένου τους. Επιπλέον φορτία που πρέπει να υπολογισθούν, αφορούν την αντοχή σε κρουστικές φορτίσεις λόγω αλληλεπίδρασης με τις άγκυρες των πλοίων, με τους αλιευτικούς μηχανισμούς, λόγω στρατιωτικών ασκήσεων, λόγω μετακινήσεων των παγόβουνων, λόγω μεταφοράς υλικού από τον πυθμένα υπό μορφή υποθαλάσσιων κατολισθήσεων, ροής κορημάτων και τουρβιδιτικών ρευμάτων.

Παρακάτω ακολουθεί μια απεικόνιση ενός ολοκληρωμένου δικτύου αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων και η σχετικές υποδομές [10].



Εικόνα 76. Δίκτυο αγωγών μεταφοράς καυσίμων και υδρογονανθράκων πλωτά συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης (FPSO). κάθετοι ανυψωτήρες = vertical risers, το τέλος των σωληνώσεων = pipeline end termination, συνδεσμολογία στόχου = tee assembly, διασταύρωση σωληνώσεων = pipeline crossing, υποθαλάσσιο σύστημα πολλαπλών αγωγών = subsea manifold, πλατφόρμα δοκού = spar platform, υποθαλάσσια φρεάτια subsea= wellheads.

Ένας αποδεκτός σχεδιασμός αγωγού μεταφοράς υδρογονανθράκων πρέπει να ικανοποιεί ορισμένα κριτήρια οριακής κατάστασης, τα οποία σχετίζονται άμεσα με την ακεραιότητα των αγωγών και των συσχετιζόμενων κατασκευών. Αυτά τα κριτήρια αφορούν την οριακή κατάσταση ισορροπίας και την αστοχία λόγω κόπωσης, ενώ είναι φυσικά άμεσα συσχετισμένα με τα αξονικά και ακτινικά φορτία που δέχεται το τοίχωμα του αγωγού. Επιπρόσθετα κριτήρια σχεδιασμού αφορούν την αλληλεπίδραση μεταξύ των αγωγών και των συνδετικών μελών αυτού. Οι κώδικες που χρησιμοποιούνται είναι από τη νορβηγική εταιρία παροχής υπηρεσιών στον γεωτεχνικό υπεράκτιο τομέα DNV (Der Norske Veritas) και από το αμερικανικό ινστιτούτο πετρελαίου API (American Petroleum Institute), [10]. Σε αντίθεση με τα θεμέλια των συμβατικών κατασκευών, οι αγωγοί του θαλάσσιου πυθμένα μπορούν να ανεχθούν μέτριες κινήσεις του πυθμένα χωρίς να υπερβούν κάποια οριακή κατάσταση αστοχίας, εκτός και αν είναι περιορισμένοι λόγω διαφόρων εμποδίων ή συνδέσεων στον πυθμένα. Είναι αναγκαία η εκτίμηση των αναμενόμενων κινήσεων του αγωγού κατά τη διάρκεια της λειτουργίας για το χρονικό διάστημα που έχει σχεδιαστεί καθώς και ο υπολογισμός επιρροής της οριακής κατάστασης λειτουργίας του αγωγού λόγω αυτών των κινήσεων. Αυτές οι κινήσεις μπορούν να περιλαμβάνουν σταδιακή καθίζηση του πυθμένα στο έδαφος ή κάποια ολίσθηση του αγωγού σε αξονικές ή πλευρικές διευθύνσεις [10].

## ΑΣΤΑΘΕΙΕΣ ΘΕΣΗΣ

Ένας αγωγός εγκαθίσταται σε εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες, όσον αφορά την πίεση και τη θερμοκρασία. Συνήθως βρίσκεται υπό εφελκυσμό για να αποφευχθεί ο λυγισμός κατά την εγκατάστασή του. Στη συνέχεια, όταν ένα θερμό ρευστό με υψηλή πίεση διαπεράσει τον σωλήνα, λόγω θερμικής διαστολής και πίεσης, υπάρχει παραμόρφωση. Λόγω της θερμοκρασίας και πίεσης του ρευστού, η εφελκυστική τάση του αγωγού μειώνεται, ενώ σε μερικές περιπτώσεις, ο αγωγός μπορεί να αρχίσει να δέχεται θλιπτικές τάσεις. Υπάρχουν τρία φαινόμενα που σχετίζονται με την μετακίνηση του αγωγού.

- ✚ Πλευρικός λυγισμός (lateral buckling): ο αγωγός μετακινείται πλευρικά κατά μήκος του θαλάσσιου πυθμένα και συνεπώς κάμπτεται. Αυτή η μετακίνηση μπορεί να είναι μέχρι και 20 ή παραπάνω διαμέτρους του αγωγού και μπορεί να επηρεάσει αρκετές εκατοντάδες μέτρα του δικτύου.
- ✚ Λυγισμός ανύψωσης (upheaval buckling): ο αγωγός κάμπτεται και ανασηκώνεται, βγαίνοντας ακόμα και από τον θαλάσσιο πυθμένα. Με αυτό τον τρόπο, δημιουργεί ελεύθερα τμήματα αγωγού που δεν στηρίζονται πουθενά. Λόγω αυτού του φαινομένου, ο αγωγός δεν είναι πλέον προστατευμένος από διάφορους κινδύνους.
- ✚ Περπάτημα (walking): Σταδιακά, στην αξονική διεύθυνση του αγωγού, οι διαφορές πίεσης και θερμοκρασίας λόγω των ρευστών, προκαλούν ένα κυκλικό φαινόμενο, όπου ο αγωγός διαστέλλεται, μετακινείται αξονικά μπροστά, μετά συστέλλεται και μετακινείται πάλι προς τα πίσω. Λόγω τριβής με το έδαφος δεν επιστρέφει στην αρχική του θέση. Με την πάροδο του χρόνου, ο αγωγός έχει μετακινηθεί ή αλλιώς έχει περπατήσει κατά μήκος.

Οι τρεις αυτοί μηχανισμοί αστάθειας θέσης, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους [10].

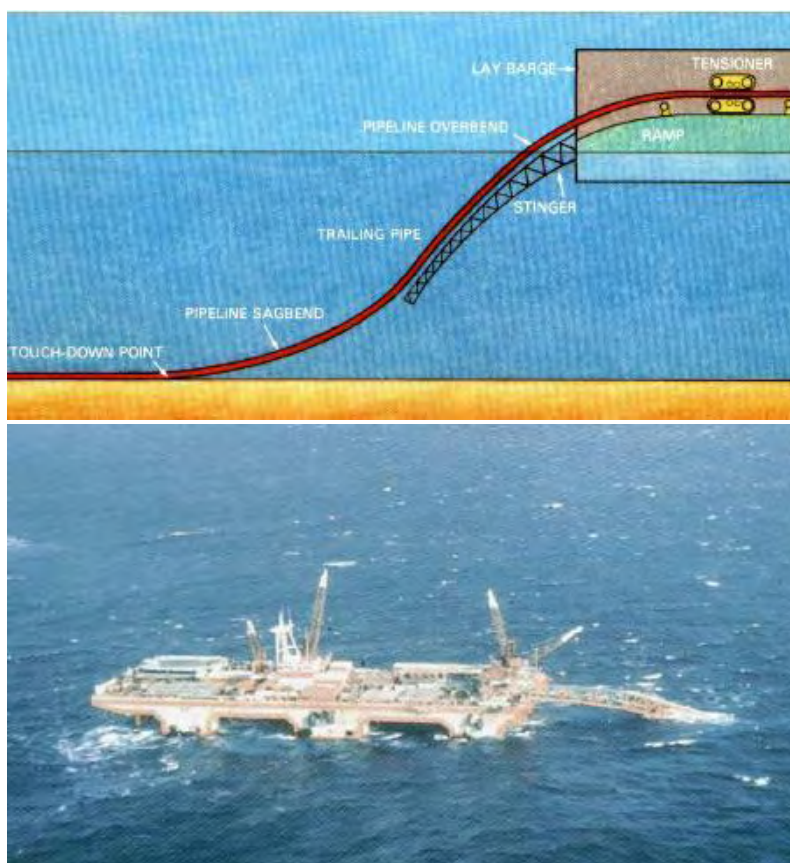


Εικόνα 77. Αστάθειες θέσεως υποθαλάσσιου αγωγού.

Οι αγωγοί εγκαθίστανται στον θαλάσσιο πυθμένα χρησιμοποιώντας κάποια από τις ακόλουθες τεχνικές.

- ✚ Μέθοδος S-lay,
- ✚ Μέθοδος J-lay,
- ✚ Μέθοδος Reel-lay, και
- ✚ Towing methods- μέθοδοι ρυμούλκησης.

Η μέθοδος S-lay, είναι η πιο διαδεδομένη για ρηγά νερά (100m-500m). Όπως φαίνεται στην εικόνα 78, ο αγωγός υπόκειται σε δύο διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας, η πρώτη είναι λόγω της κατασκευής που ρίχνει τον αγωγό στο νερό και ονομάζεται stinger, και η δεύτερη καθώς πλησιάζει και ακουμπά στον θαλάσσιο πυθμένα. Η συγκόλληση και η παραγωγή των αγωγών γίνεται επί τόπου, πάνω στο ειδικά διαμορφωμένο πλοίο, όπως φαίνεται και από την εικόνα 78 [17].

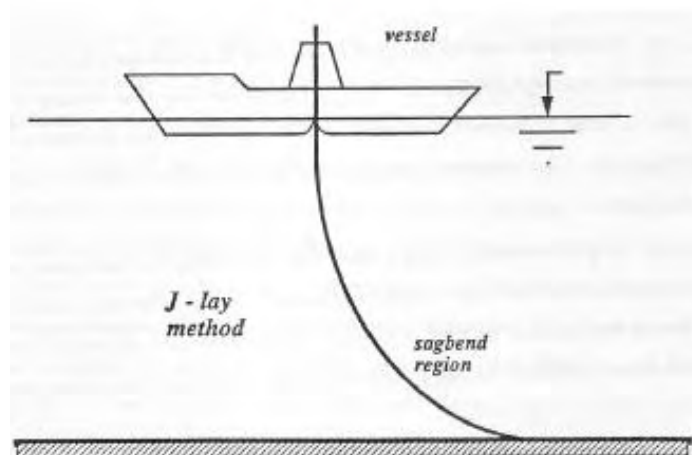


Εικόνα 78. Η μέθοδος S-lay, σημείο επαφής = touchdown point, κάτω καμπυλότητα σωλήνα = pipeline sagbend, συρόμενος σωλήνας = trailing pipe, άνω καμπυλότητα σωλήνα = pipeline overbend, ειδικά διαμορφωμένη φορτηγίδα = lay barge.

Η μέθοδος J-lay, επιφέρει μία και μοναδική καμπυλότητα στον αγωγό λόγω της διαφορετικής διάταξης του stinger και του πλοίου. Χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερα

βάθη ενώ η παραγωγή και η συγκόλληση γίνεται επί τόπου, πάνω στο ειδικά διαμορφωμένο πλοίο, όπως φαίνεται και από την εικόνα 79 [17].

## J-lay barge



## J-lay barge

- Saipem 7000.
- Blue Stream pipeline.
- 2100 meters of water depth.



Εικόνα 79. Η μέθοδος J-lay, με την ειδικά διαμορφωμένη φορηγίδα saipem 7000 της εταιρίας eni, sagbend region = η περιοχή της κάτω καμπυλότητας του αγωγού.

Η μέθοδος Reel-lay, ουσιαστικά τυλίγει τον αγωγό σαν κουβάρι και τον μεταφέρει με ειδικά διαμορφωμένο πλοίο στην τοποθεσία ενδιαφέροντος, όπου και ξετυλίγεται. Δεν απαιτεί συγκόλληση επί τόπου, όμως λόγω του τυλίγματος και ξετυλίγματος του αγωγού, ο αγωγός δέχεται σημαντικές καμπτικές τάσεις και αυτό δημιουργεί κάποιες παραμένουσες τάσεις στα τοιχώματά του. Στην εικόνα 80 φαίνεται η ειδικά διαμορφωμένη φορηγίδα-πλοίο που χρησιμοποιεί την τεχνική Reel-lay.



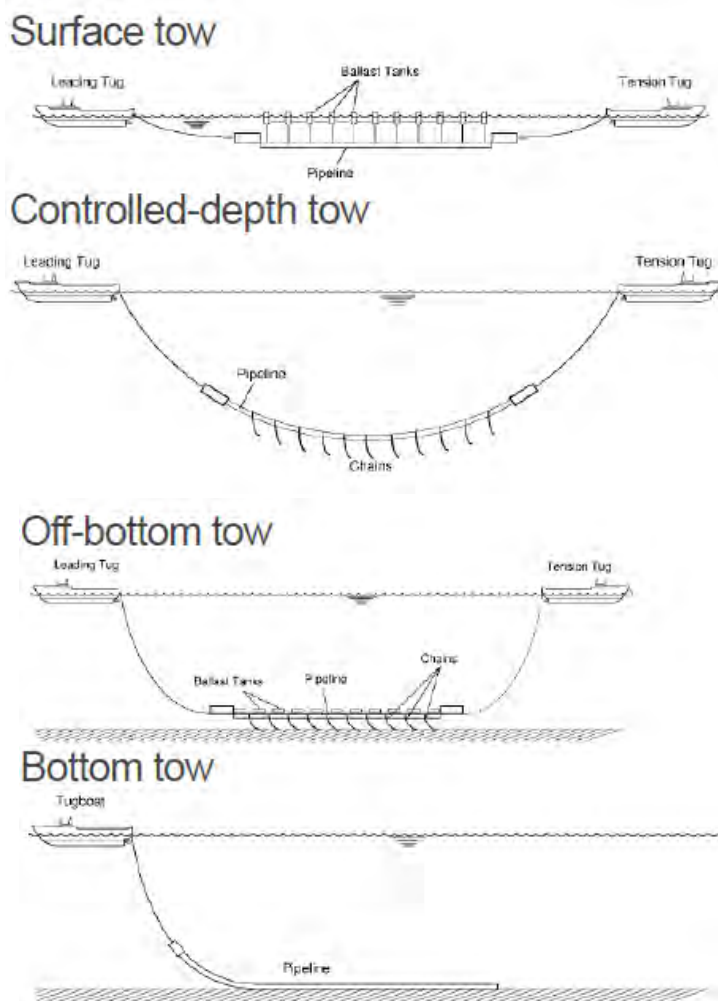
Εικόνα 80. Η μέθοδος Reel- lay.

Οι μέθοδοι ρυμούλκησης, ουσιαστικά μεταφέρουν ή ρυμουλκούν τον αγωγό με ειδικά ρυμουλκά πλοία και τον αφήνουν στον βυθό είτε αλυσίδες ή με δεξαμενές τύπου έρματος (εικόνα 81). Είναι κατάλληλες για βαθιά νερά όμως απαιτούν μικρούς κυματισμούς, όπως φαίνεται από την παρακάτω εικόνα, υπάρχουν 4 βασικές μέθοδοι ρυμούλκησης, η επιφανειακή ρυμούλκηση, η ρυμούλκηση ελεγχόμενου βάθους, η ρυμούλκηση εκ του βάθους και η ρυμούλκηση πυθμένα [17].

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι το πιο κρίσιμο σημείο σε όλη τη διάρκεια ζωής του υποθαλάσσιου αγωγού είναι η διαδικασία εγκατάστασής του στον θαλάσσιο πυθμένα. Η ανάλυση τάσεων του αγωγού περιλαμβάνει ένα μεγάλο μέρος αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευών. Οι αναλύσεις αυτές ενσωματώνουν απλοποιημένης μορφής μοντέλα τύπου καμπύλες φορτίου-μετατοπίσεως p-y. Είναι αναγκαίος ο επανέλεγχος μεταξύ γεωτεχνικής και δομικής ανάλυσης ούτως ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι συνθήκες που έχουν υποτεθεί στη γεωτεχνική ανάλυση είναι συνεπείς με τη δομική ανάλυση του αγωγού. Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα, θα μπορούσε να είναι η μετακίνηση του αγωγού στον θαλάσσιο πυθμένα. Καθώς ο αγωγός μετακινείται, η γεωτεχνική ανάλυση πρέπει να εκτιμήσει τις συνθήκες στράγγισης περί τον αγωγό, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις δυνάμεις μεταξύ σωλήνα και εδάφους και που δεν περιλαμβάνονται στη δομική ανάλυση του αγωγού. Είναι προφανές πως ο αποτελεσματικός σχεδιασμός των υποθαλάσσιων αγωγών περιλαμβάνει στενή συνεργασία μεταξύ μηχανικών διαφορετικών ειδικοτήτων.

Η εσωτερική διάμετρος του υποθαλάσσιου αγωγού, καθορίζεται από τις συνθήκες ροής του ρευστού μέσα σε αυτόν. Η διαδρομή του υποθαλάσσιου αγωγού, μπορεί να επηρεαστεί από γεωτεχνικές συνθήκες, όπως λόγω χάρη η ανάγκη αποφυγής

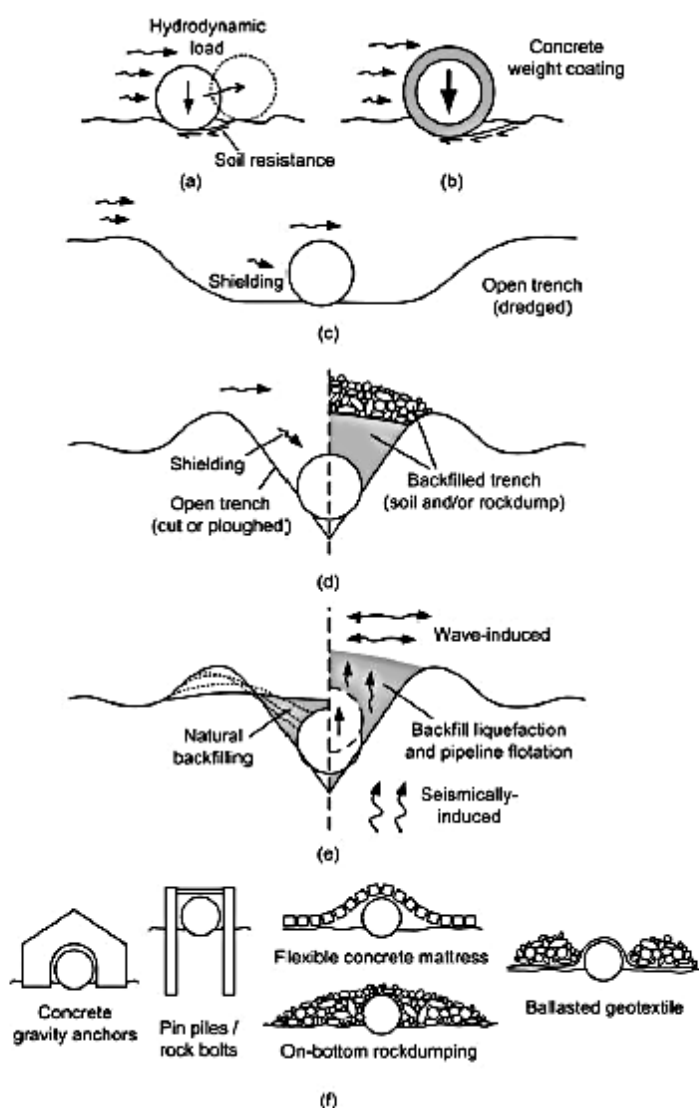
κάποιων γεωκινδύνων, αν και τα σημεία έναρξης και τερματισμού του αγωγού είναι προκαθορισμένα.



Εικόνα 81. Μέθοδοι ρυμούλκησης, επιφανειακή ρυμούλκηση (surface tow), ρυμούλκηση ελεγχόμενου βάθους (controlled-depth tow), ρυμούλκηση εκ του βάθους (off-bottom tow), ρυμούλκηση πυθμένα (bottom tow).

Για να αυξηθεί το βάρος του αγωγού, μπορεί να εφαρμοσθεί κάποια εξωτερική επικάλυψη αν και αυτό εξαρτάται από τα σχετικά μεγέθη της υδροδυναμικής φόρτισης και της γεωτεχνικής αντοχής. Αν ο αγωγός δεν είναι σταθερός στον θαλάσσιο πυθμένα, ή πρόκειται να εκτεθεί σε υπερβολική εξωτερική φόρτιση, τότε είναι αναγκαία κάποια προστασία του αγωγού, όπως φαίνεται από την εικόνα 82. Χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές επικάλυψης του αγωγού για την καλύτερη προστασία του. Ο αγωγός είτε θα μπει σε μια προστατευτική τάφρο ή θα συγκαλυφθεί μέσα στον θαλάσσιο πυθμένα. Σε αυτό το σημείο θα χρειαστεί περαιτέρω γεωτεχνική ανάλυση, διότι, αφενός κατά τη λειτουργία του αγωγού, η γύρω εδαφική περιοχή θα υποστεί διαφοροποιήσεις σε θερμοκρασία και πίεση, αφετέρου το νέο έδαφος που καλύπτει τον αγωγό θα έχει διαφορετικές ιδιότητες όσον αφορά την αντοχή του [10]. Στην εικόνα 82 αναλύονται διεξοδικά οι συνηθέστερες περιπτώσεις φόρτισης των αγωγών αλλά και οι τεχνικές προστασίας τους. Οι φορτίσεις περιλαμβάνουν την αλληλεπίδραση των υδροδυναμικών φορτίων (hydrodynamic loads) με την αντοχή του εδάφους (soil resistance), την επικάλυψη

του αγωγού με τσιμέντο για αύξηση του βάρους του (concrete weight coating), το άνοιγμα μιας τάφρου για προστασία την προστασία του αγωγού από τα φορτία διάφορων γεωκινδύνων αλλά και από απλά φορτία λόγω θαλάσσιων ρευμάτων και κυμάτων (shielding-open trench), την επικάλυψη (γέμισμα) της τάφρου (back-filled trench), την ρευστοποίηση του υλικού επιχωμάτωσης της τάφρου λόγω σεισμού ή κυματικών φορτίων και την επακόλουθη επίπλευση του αγωγού (seismically induced, wave induced backfill liquefaction, pipeline flotation). Περιγράφονται επίσης και άλλοι μέθοδοι προστασίας του αγωγού όπως χρήση τσιμεντένιων αγκυρώσεων (concrete gravity anchors), χρήση ευλύγιστου στρώματος από τσιμέντο (flexible concrete mattress), χρήση βράχων (on-bottom rockdumping) και στήριγμα από γεωύφασμα (ballasted geotextile).



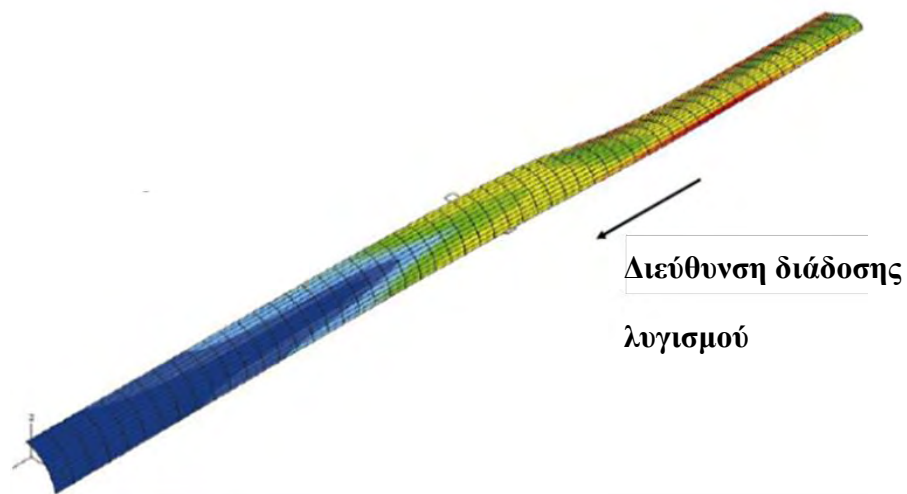
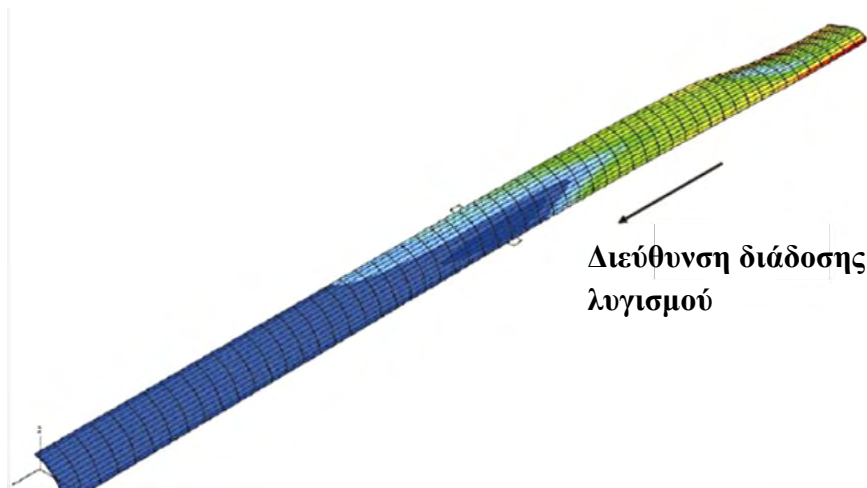
Εικόνα 82. Μέθοδοι σταθεροποίησης αγωγού. α) αστάθεια πυθμένα, β) επικάλυψη με σκυρόδεμα για αύξηση του βάρους, γ,δ) ανοιχτή τάφρος, ε)επιχωματωμένη τάφρος, ς) άλλοι μέθοδοι όπως χρήση τσιμεντένιων αγκυρώσεων, ευλύγιστο στρώμα από τσιμέντο, χρήση βράχων, στήριγμα από γεωύφασμα.



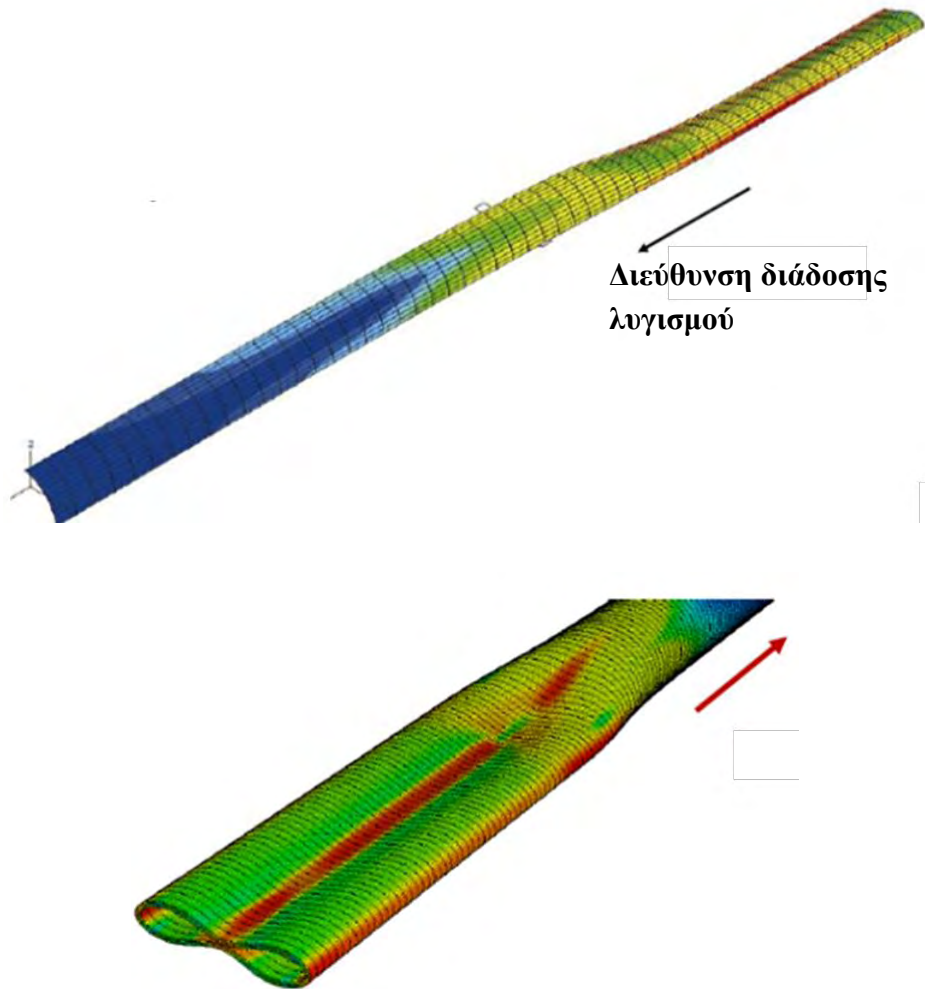
## ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ

Ο αγωγός πρέπει να είναι σε θέση να αντέξει τα φορτία λυγισμού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 4.2, ο αγωγός πρέπει να είναι σε θέση να αντιπαρέλθει τα πλευρικά φορτία, που οδηγούν σε πλευρικό λυγισμό αλλά και τον λυγισμό ανύψωσης. Αρχικά εμφανίζεται μία παραμόρφωση υπό τη μορφή ρυτίδων ή κυματώσεων, οι οποίες μεγαλώνουν και συνενώνονται, σχηματίζοντας τοπικά μια μεγαλύτερη αστοχία, η οποία ονομάζεται λυγισμός. Σε μικρές ακτίνες καμπυλότητας, ο αγωγός κάμπτεται ελαστικά, ενώ ο λόγος της εφαρμοζόμενης ροπής ως προς την καμπυλότητα ισούται με το γινόμενο της καμπτικής δυσκαμψίας (EI). Με την αύξηση της καμπυλότητας πέραν του σημείου διαρροής, η κάμψη περνάει στην πλαστική περιοχή. Η ροπή κάμψης συνεχίζει να αυξάνεται αλλά με μειούμενο ρυθμό λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ της εργοσκήρυσης και της αλλαγής γεωμετρίας της διατομής. Αν η καμπυλότητα συνεχίσει να αυξάνεται, τότε η όλη διαδικασία της κάμψης γίνεται ασταθής, ενώ ο σωλήνας αρχίζει να ρυτιδώνει στην περιοχή της θλίψης. Όταν οι ρυτιδώσεις σχηματίσουν τοπικά μια δίπλωση, τότε ο σωλήνας έχει αστοχήσει υπό τη μορφή λυγισμού.

Ο λυγισμός διαδίδεται κατά μήκος του αγωγού, λόγω της άσκησης εξωτερικής πίεσης. Αναλυτικότερα, μια μικρή ατέλεια στον αγωγό, η οποία είναι πιθανό να υπάρχει λόγω κατασκευαστικών ατελειών ή τυχαίου χτυπήματος του αγωγού, είναι σε θέση να δημιουργήσει τοπικά μια αστοχία λυγισμού, η οποία μπορεί να διαδοθεί κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει, επειδή η εξωτερική πίεση πάντα ασκείται κάθετα στον αγωγό. Συνεπώς καθώς η διατομή του αγωγού παραμορφώνεται και δημιουργείται μία οριζόντια συνιστώσα της πίεσης, η οποία είναι και υπεύθυνη για την διάδοση του λυγισμού. Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να γίνει μια αναφορά στους λεγόμενους αναστολείς λυγισμού (buckling arrestors) οι οποίοι είναι ειδικές διατάξεις, όπου μοιάζουν σαν δαχτυλίδια, οι οποίες καθυστερούν κατά πολύ την επέκταση του λυγισμού. Ο σχεδιασμός του αγωγού, μπορεί να γίνει, είτε χωρίς τους αναστολείς λυγισμού και έτσι η τελική πίεση που μπορεί να παραλάβει ο αγωγός θα είναι ίση με την πίεση διάδοσης του λυγισμού, είτε με τους αναστολείς λυγισμού, με αποτέλεσμα η τελική πίεση του αγωγού να ισούται με την πίεση κατάρρευσής του [10]. Στη συνέχεια απεικονίζεται σχηματικά η διάδοση του λυγισμού κατά μήκος ενός υποθαλάσσιου αγωγού. Ουσιαστικά ο λυγισμός θα ξεκινήσει σαν τοπικό φαινόμενο συσσώρευσης τάσεων λόγω κάποιας γεωμετρικής ατέλειας στον αγωγό.



(συνεχίζεται)



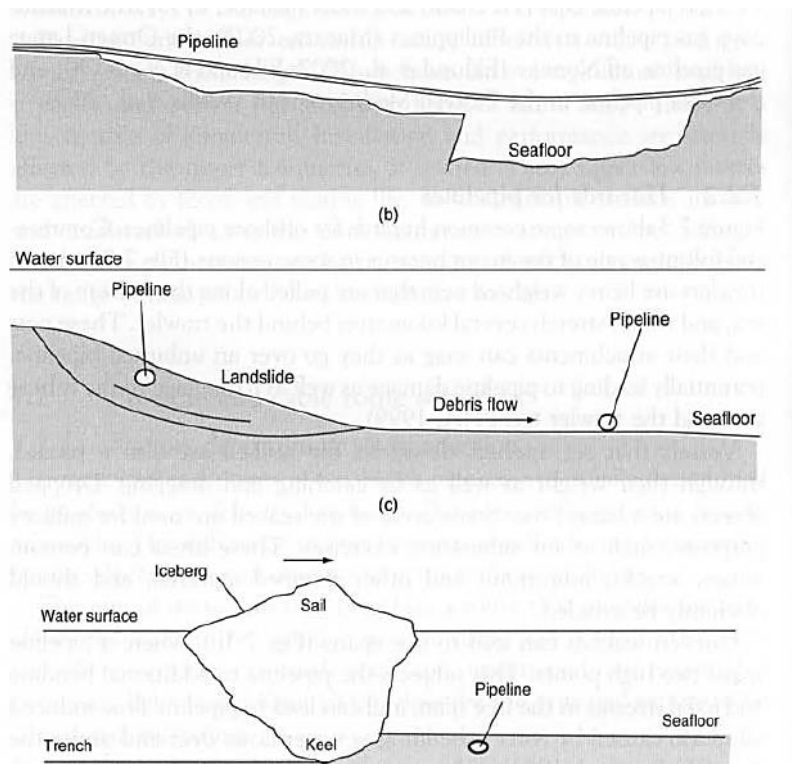
Εικόνα 83. Αλληλουχία της διάδοσης του λυγισμού.

## ΑΠΟΦΥΓΗ ΚΙΝΔΥΝΩΝ

Η επιλογή της διαδρομής ενός υποθαλάσσιου αγωγού, επηρεάζεται από την επιτακτική ανάγκη της αποφυγής διαφόρων κινδύνων που πιθανώς να συναντήσει ο αγωγός (εικόνα 84), όπως οι ακόλουθοι:

- ✚ Ακανόνιστη τοπογραφία πυθμένα, όπου μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μεγάλα κομμάτια αγωγού για τα οποία δεν θα παρέχεται η στήριξη του πυθμένα.
- ✚ Ασταθείς θαλάσσιοι πυθμένες, οι οποίοι μπορούν να ρευστοποιηθούν κατά τη διάρκεια σεισμών και να αποσταθεροποιήσουν τον αγωγό.
- ✚ Απότομα ή ασταθή πρανή, όπου εξαιτίας τους ο αγωγός μπορεί να ολισθήσει ή ακόμα και να αστοχήσει.
- ✚ Περιοχές όπου υπάρχει ροή κορημάτων και τουρβιδιτικών ρευμάτων, προκαλώντας σημαντική φόρτιση στον αγωγό.
- ✚ Ασταθείς διαφυγές υγρών όπως ένυδρα αέρια, διάλυρα άλατος και ηφαίστεια ιλύος, ικανά να αποσταθεροποιήσουν τον αγωγό.

- ✚ Κύματα άμμου, όπου όταν μετακινούνται προκαλούν απώλεια στήριξης του αγωγού.
- ✚ Καρίνες ή κομμάτια από παγόβουνα, όπου μπορούν να ξύσουν τον πυθμένα όταν μετακινούνται, καταστρέφοντας τον αγωγό.

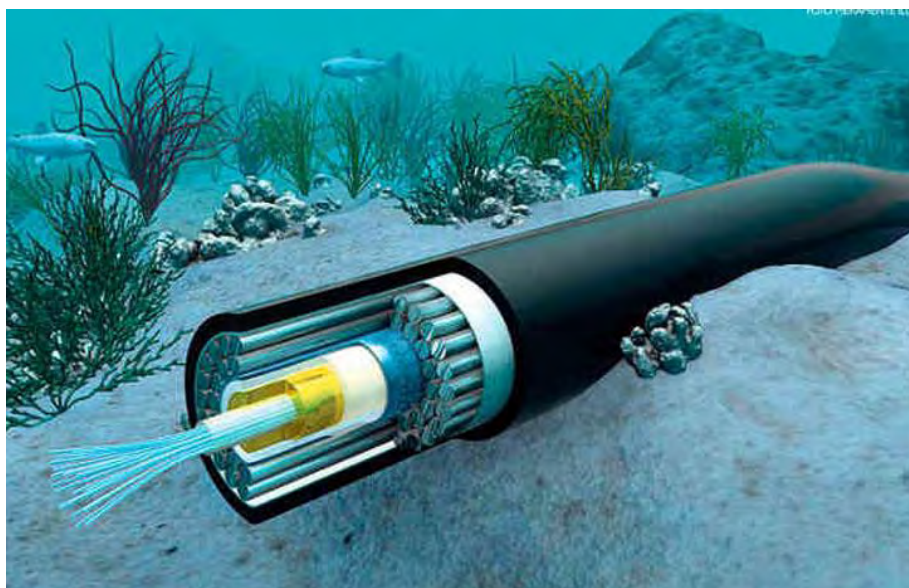


Εικόνα 84. Απεικόνιση διάφορων κινδύνων που ενδέχεται να αντιμετωπίσει ένας υποθαλάσσιος αγωγός. α) άνιση τοπογραφία πυθμένα, β) μια υποθαλάσσια κατολίσθηση που θα επιφέρει πλευρικές φορτίσεις στον αγωγό, γ) κομμάτια από παγόβουνα που μπορούν να καταστρέψουν τον αγωγό.

### 4.3 ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΑ ΚΑΛΩΔΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Τα υποθαλάσσια καλώδια μεταφέρουν ηλεκτρικό ρεύμα μεταξύ πλατφορμών. Επιπροσθέτως, μεταφέρουν τηλεφωνικά και διαδικτυακά σήματα διαμέσου θαλάσσης σε όλο τον κόσμο. Τα υπερατλαντικά τηλεγραφικά καλώδια είναι πάνω 4000km σε μήκος. Η πρώτη απόπειρα για εγκατάσταση υποθαλάσσιων καλωδίων ξεκίνησε το 1857, με τη πρώτη επιτυχημένη εγκατάσταση να είναι το 1866. Μόνο ανάμεσα στην Ευρώπη και το Ηνωμένο Βασίλειο υπάρχουν 16 υποθαλάσσια καλώδια οπτικών ινών. Τα υποθαλάσσια καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος, μεταφέρουν ηλεκτρικό ρεύμα από αιολικά θαλάσσια πάρκα και από τα ανοιχτά της θάλασσας στη ηπειρωτικές περιοχές (εικόνα 85). Αγωγοί και καλώδια, έχουν παρόμοιες μεθόδους εγκατάστασης, ενώ μετά την εγκατάστασή τους στον θαλάσσιο πυθμένα, αντιμετωπίζουν τους ίδιους κινδύνους. Τα υποθαλάσσια καλώδια, μπορούν να εγκατασταθούν απευθείας στον θαλάσσιο πυθμένα ή σε τάφρους ή ακόμα και κάτω από τον θαλάσσιο πυθμένα, όπως ακριβώς συμβαίνει και με τους αγωγούς. Οι τάφροι έχουν το πλεονέκτημα ότι μειώνουν τις πλευρικές μετατοπίσεις. Η τοποθέτηση κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας, παρέχει προστασία έναντι των αλιευτικών

δραστηριοτήτων και των βαρυτικών ροών, ενώ ταυτόχρονα παρέχει και θερμοπροστασία. Είναι απαραίτητη η επιθεώρηση μετά την εγκατάσταση και ανά τακτά χρονικά διαστήματα, τόσο των αγωγών όσο και των υποθαλάσσιων καλωδίων. Οι επιθεωρήσεις αυτές γίνονται με ROV (Remote Operated Vehicle- τηλεκατευθυνόμενο όχημα) ή AUV (Autonomous Underwater Vehicle- αυτόνομο υποθαλάσσιο όχημα) ή με ειδικές συσκευές που οδηγούνται από πλοία. Τα υποθαλάσσια καλώδια, αντιμετωπίζονται σαν λεπτοί αγωγοί μεταφοράς υδρογονανθράκων, συνεπώς υπόκεινται στην ίδια γεωτεχνική ανάλυση με τους υποθαλάσσιους αγωγούς, όπως έχει αναλυθεί στο παραπάνω υποκεφάλαιο.



Εικόνα 85. Υποθαλάσσιο καλώδιο.

#### 4.4 ΑΙΟΛΙΚΑ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΑΡΚΑ

Είναι γνωστό ότι ανανεώσιμη ενέργεια, είναι το είδος τις ενέργειας που προέρχεται από πηγές που αναπληρώνονται λόγω φυσικών διεργασιών. Η επίδραση της θερμότητας του Ήλιου πάνω στη Γη, η περιστροφή της Γης και της Σελήνης, είναι ως επί το πλείστον υπεύθυνες για τις ροές των ρευστών που μπορούν να αξιοποιηθούν για τη παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Αυτές οι ροές ρευστών είναι ο αέρας, τα κύματα, τα ωκεάνια ρεύματα, οι παλίρροιες και οι αλλαγές του καιρού λόγω διαφοράς ατμοσφαιρικής πίεσης. Αυτές οι ροές, μεταξύ των άλλων, συντηρούν και τη ζωή πάνω στη Γη.

Το ενδιαφέρον στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συνεχίζει ολοένα αυξανόμενο, δεδομένου ότι τα αποθέματα των υδρογονανθράκων είναι περιορισμένα αλλά και γιατί οι εκπομπές των αερίων που ευθύνονται για την κλιματική αλλαγή, θα έχουν ολοένα και σοβαρότερο αντίκτυπο σε παγκόσμια κλίμακα. Επιπροσθέτως, η

ενεργειακή αυτάρκεια αποτελεί ένα σημαντικό γεωπολιτικό θέμα. Ανανεώσιμες θαλάσσιες πηγές ενέργειας που είναι βιώσιμες τώρα ή και στο άμεσο μέλλον περιλαμβάνουν:

- ✚ Αιολική ενέργεια,
- ✚ Παλιρροιακή ενέργεια,
- ✚ Ενέργεια λόγω ρευμάτων του ωκεανού, και
- ✚ Κυματική ενέργεια.

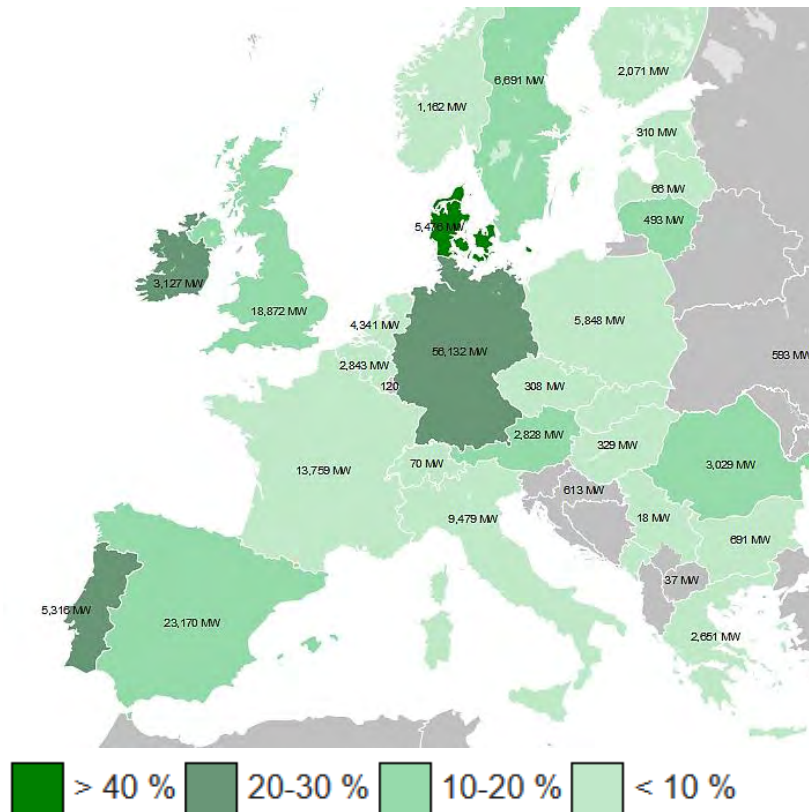
Η αιολική ενέργεια ήταν από τα πρώτα είδη ενέργειας που αναπτύχθηκε σε υπεράκτιες εγκαταστάσεις (εικόνα 86). Οι υπόλοιπες μορφές ανανεώσιμης θαλάσσιας ενέργειας βρίσκονται ακόμα σε δοκιμαστικό στάδιο.



Εικόνα 86. Αιολικό πάρκο.

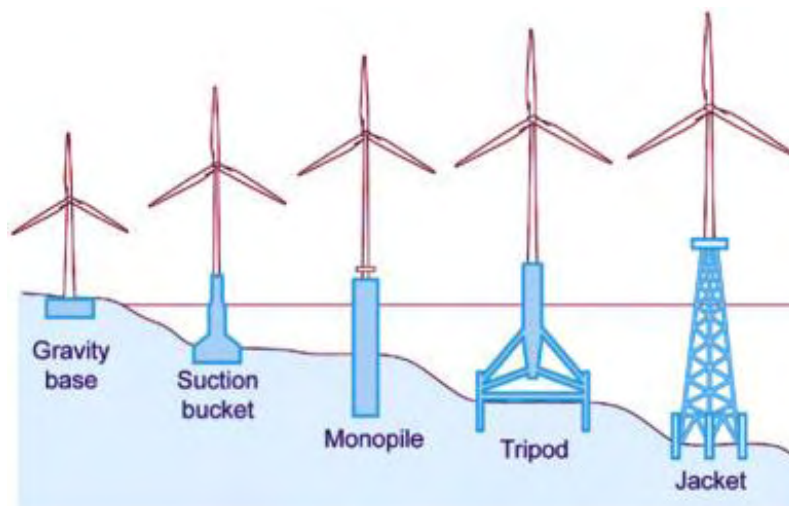
Στη εικόνα 87, απεικονίζεται ο χάρτης της Ευρώπης με την συνολική αιολική ενέργεια που παράγεται ανά χώρα. Η λεζάντα με τις πράσινες διαβαθμίσεις, αναφέρεται στο ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από αιολικά πάρκα σε σχέση με τη ζήτηση. Μέχρι και τον Δεκέμβριο του 2017, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη, έφτανε τα 169.3MW. Ενώ μόνο το 2017, η ηλεκτρική ισχύς αυξήθηκε κατά 55% με την αιολική ενέργεια να παράγει 336TWh ηλεκτρισμού ή το 11.6% της συνολικής κατανάλωσης της ΕΕ.

Ένα αιολικό πάρκο, αποτελείται από έναν αριθμό ανεμογεννητριών, οι οποίες υποστηρίζονται από αντίστοιχους πύργους. Η απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών είναι τέτοια ώστε το απόρρευμα τους να μην επηρεάζει την απόδοσή τους. Στη συνέχεια, η ανεμογεννήτρια μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων σε υπεράκτιους υποσταθμούς και μετασχηματιστές ανύψωσης. Οι σημερινές ανεμογεννήτριες, έχουν ισχύ της τάξης των 2MW έως 5MW, ενώ το ύψος του πύργου μπορεί να φτάσει και τα 80m. Οι λεπίδες της ανεμογεννήτριας, μπορούν να φτάσουν τα 50m σε ακτίνα, ενώ η ανωδομή ζυγίζει περίπου 200 τόνους. Πολλές μονάδες έχουν τη δυνατότητα περιστροφής προς τη διεύθυνση του ανέμου για μέγιστη απόδοση [16].



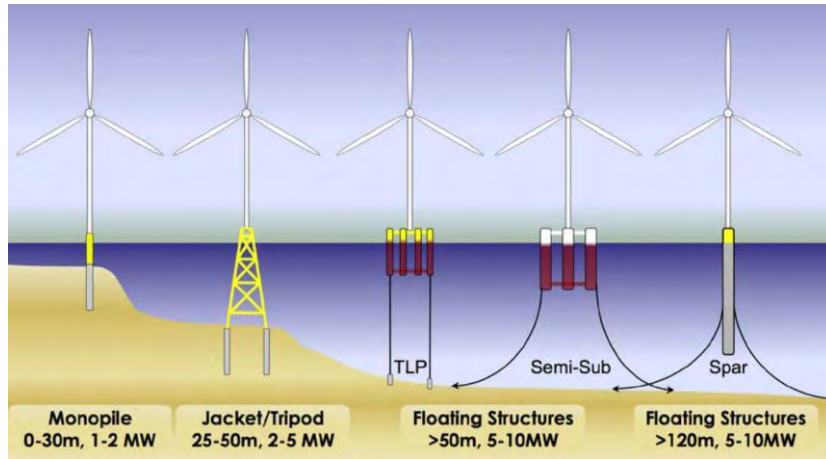
Εικόνα 87. Ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τη ζήτηση.

Οι εικόνες 88,89,90, δείχνουν διάφορους τρόπους θεμελίωσης ανεμογεννητριών, ανάλογα με το βάθος των νερών. Οι μονοί πάσσαλοι και οι θεμελιώσεις βαρύτητας μέχρι σήμερα αποτελούν τις κυριότερες επιλογές. Είναι οικονομικές για ρηχά νερά και έχουν αποδεκτά δυναμικά χαρακτηριστικά για σκληρά και βραχώδη εδάφη.

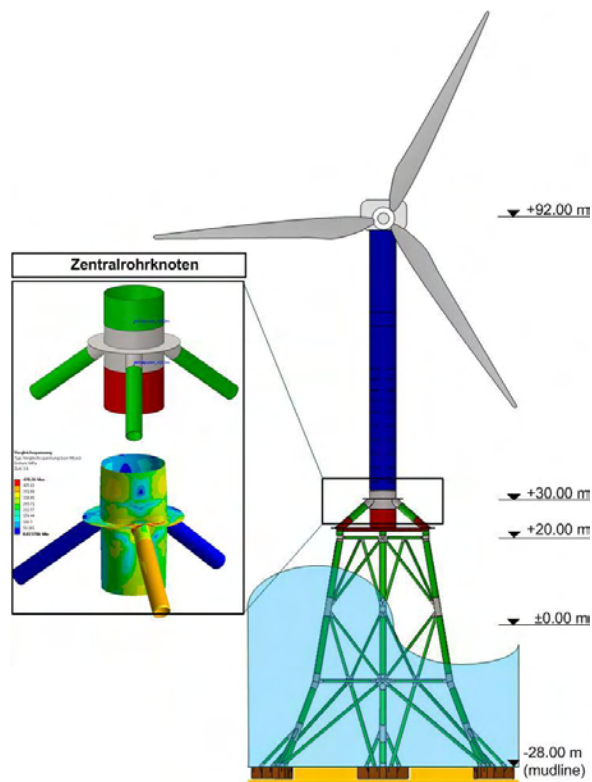


Εικόνα 88. Σχηματική αναπαράσταση διάφορων τρόπων θεμελίωσης. Από αριστερά προς τα δεξιά θεμελίωση βαρύτητας, κάδος αναρρόφησης, τρίποδο, κατασκευή σωληνωτής δομής χάλυβα.

Όσο το βάθος νερού μεγαλώνει, τόσο αλλάζει και ο τρόπος θεμελίωσης. Για μεγαλύτερα βάθη προτιμούνται είδη θεμελίωσης όπως τένοντες, ημι-βυθιζόμενες και επιπλέουσες διατάξεις, διότι είναι πιο εύκολες στην κατασκευή αλλά και πιο οικονομικές.



Εικόνα 89. Σχηματική αναπαράσταση διάφορων τρόπων θεμελίωσης, ανάλογα με το βάθος και την ηλεκτρική ισχύ παραγωγής. Monopile = μονοπάσσαλος, jacket/tripod = κατασκευές σωληνωτών δομών χάλυβα/ τρίποδο, floating structures = επιπλέουσες κατασκευές.



Εικόνα 90. Μοντελοποίηση της θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας από γερμανική κατασκευαστική εταιρεία.



Συνήθως, στη κατασκευή της θεμελίωσης, δίνεται ένα κωνικό σχήμα, ούτως ώστε σε περίπτωση σχηματισμού πάγου, ο πάγος να σπάσει υπό κάμψη, μειώνοντας τα πλευρικά φορτία που πρέπει να παραλάβει η θεμελίωση της κατασκευής. Στη κατασκευή χρησιμοποιείται οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ η θεμελίωση του βάθρου γίνεται με την τεχνική κυτίων αναρρόφησης (suction caissons). Αξίζει να σημειωθεί ότι στην όλη κατασκευή πρέπει να αποφευχθεί η δημιουργία εφελκυστικής τάσης στο έδαφος. Από αυτή την άποψη, αυτές οι κατασκευές μοιάζουν πολύ με τις θεμελιώσεις βαρύτητας [16].

#### 4.4.1 ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΗΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ

Για τη περίπτωση ενός μονού πασσάλου που στηρίζει έναν πύργο ανεμογεννήτριας 3.5MW, το συνολικό βάρος ολόκληρης της κατασκευής ανέρχεται στα 6MN. Για ανεμογεννήτριες 5 MW, το βάρος διπλασιάζεται. Η φόρτιση του ανέμου ανέρχεται στα 1-2 MN, σε ύψος περί των 80m από το υψόμετρο θαλάσσης. Η φόρτιση του κύματος και των ρευμάτων ανέρχεται στα 3 MN, σε απόσταση 10m-20m από τον πυθμένα της θάλασσας. Για θεμελιώσεις βαρύτητας, η κυματική φόρτιση είναι μεγαλύτερη. Αυτά τα μεγέθη, δείχνουν ότι η οριζόντια φόρτιση και η ροπή κυριαρχούν σε αυτού του είδους τις κατασκευές, σε σύγκριση με το κατακόρυφο φορτίο. Αναλυτικότερα, ο λόγος της οριζόντιας ως προς τη κατακόρυφη φόρτιση είναι τέτοιος ώστε οι δυνάμεις τριβής να μην είναι σε θέση να στηρίξουν την κατασκευή, Συνεπώς, πρέπει να προστεθεί επιπλέον βάρος στη κατασκευή ή πρέπει η κατασκευή να αγκυρωθεί στο έδαφος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτές τις περιπτώσεις, ο άνεμος μπορεί να δρα προς μια κατεύθυνση, ενώ η κυματική φόρτιση ή τα ρεύματα προς άλλη. Η φόρτιση λόγω ανέμου προκαλεί τη μεγαλύτερη ροπή ανατροπής, ενώ η κυματική φόρτιση προκαλεί τη μεγαλύτερη οριζόντια δύναμη. Έντονη κυματική φόρτιση μπορεί να δημιουργηθεί από μια μακρινή κατολίσθηση. Σε αυτό το τασικό πεδίο, πρέπει να προστεθεί και η επίδραση των ταλαντώσεων της ανεμογεννήτριας. Για μια ανεμογεννήτρια τριών λεπίδων, η συχνότητα 3P είναι η τριπλάσια της συχνότητας του ρότορα και είναι αυτή η συχνότητα όπου παρουσιάζεται επιπρόσθετη διατμητική τάση λόγω ανέμου, καθώς οι λεπίδες περνάνε μπροστά από τον πύργο της ανεμογεννήτριας.

Μια απλοποιημένη προσέγγιση, για τις ελάχιστες κατακόρυφες τάσεις που ασκούνται σε ένα κυκλικό θεμέλιο βαρύτητας δίνεται από τον παρακάτω τύπο [16]:

$$\sigma_{min} = \frac{V+W'}{\pi B^2/4} - \frac{M}{\pi B^3/32}, \quad 4.5$$

όπου:

$W'$  : είναι το βυθισμένο βάρος της κατασκευής,

$V$  : είναι η κάθετη φόρτιση που ασκείται στη κατασκευή,

$M$  : είναι η ροπή που ασκείται στα θεμέλια, και

$B$  : είναι η διάμετρος του θεμελίου.

Για να αποφευχθεί η δημιουργία εφελκυστικού τασικού πεδίου, πρέπει να ισχύει η ακόλουθη ανίσωση για το βυθισμένο βάρος  $W'$ :

$$W' > \frac{8M}{B} - V . \quad 4.6$$

#### 4.5 ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΣΤΙΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΥΠΟΔΟΜΕΣ ΛΟΓΩ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΔΡΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΡΑΣΗΣ ΡΕΥΜΑΤΩΝ

Για την εκτίμηση της φόρτισης που ασκείται στις υπεράκτιες κατασκευές λόγω κυματικής δράσης ή λόγω της δράσης των ρευμάτων, χρησιμοποιείται η ημι-εμπειρική σχέση Morison (MOJS equation). Έντονη κυματική δράση, tsunami ή έντονα τουρβιδιτικά ρεύματα μπορούν να υπάρξουν λόγω κάποιας μακρινής κατολίσθησης.

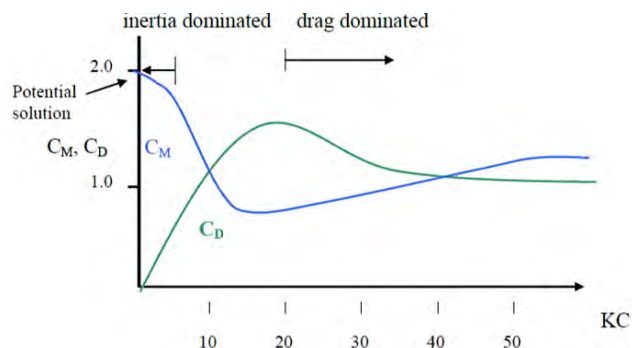
Η εξίσωση Morison, αποτελεί το άθροισμα δύο συνιστωσών δυνάμεων. Μια δύναμη λόγω αδράνειας η οποία βρίσκεται σε φάση με την επιτάχυνση, τοπικά της ροής και μια δύναμη λόγω οπισθέλκουσας, ανάλογη με τη κατεύθυνση και τετράγωνο της στιγμιαίας ταχύτητας της ροής. Η αδρανειακή δύναμη βασίζεται εν μέρει στη δυναμική ροή συνεπώς και στη δυναμική λύση του πεδίου των ταχυτήτων. Αυτό σημαίνει ότι ο μέγιστος συντελεστής αδράνειας  $C_M$  παίρνει τη μέγιστη τιμή του,  $C_M = 2$  για τη περίπτωση της δυναμικής ροής (εικόνα 91). Η δύναμη οπισθέλκουσας αφορά τη δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα, όταν αυτό τοποθετηθεί σε συνθήκες σταθερής ροής και πηγάζει από τη μεταβολή των γραμμών ροής, των ταχυτήτων συνεπώς και των στατικών και δυναμικών πιέσεων που ασκούνται στο σώμα. Ο συντελεστής αδράνειας  $C_M$  και ο συντελεστής οπισθέλκουσας  $C_D$  υπολογίζονται από πειραματικά δεδομένα. Από τη διαστατική ανάλυση, αυτοί οι συντελεστές, εξαρτώνται από:

- ✚ Τον αδιάστατο αριθμό  $KC = UT/D$ , όπου  $U$  η ταχύτητα της ροής,  $T$ , η περίοδος της περιοδικής κίνησης και  $D$  η διάμετρος της κατασκευής.
- ✚ Τον αδιάστατο αριθμό Reynolds,  $Re = \rho UL/\mu = UL/\nu$  όπου  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού,  $\mu$  το δυναμικό ιξώδες σε  $Pa \cdot sec = 10Poise$ ,  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες σε  $m^2/sec = 1 Stokes$ .
- ✚ Την τραχύτητα της επιφάνειας.

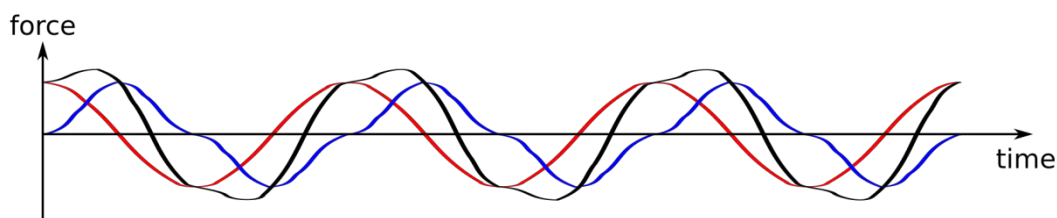
Η εξίσωση Morison, O'Brien, Johnson and Schaaf έχει την ακόλουθη μορφή:

$$F = C_D \frac{1}{2} \rho u |u| D + C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} \left[ \frac{N}{m} \right]. \quad 4.7$$

Για μικρές τιμές του αριθμού  $KC$ , δηλαδή  $KC < 5$  κυριαρχούν οι δυνάμεις αδράνειας, ενώ για μεγάλες τιμές του αριθμού  $KC$ , δηλαδή  $KC > 20$  κυριαρχούν οι δυνάμεις της οπισθέλκουσας [18].



Εικόνα 91. Σχηματική απεικόνιση των συντελεστών  $C_M$  και  $C_D$  ανάλογα με τον αριθμό  $KC$ .



Εικόνα 92. Απεικόνιση της συνολικής δύναμης που ασκείται, σύμφωνα με την εξίσωση Morison. Το μαύρο χρώμα απεικονίζει τη συνολική δύναμη, το κόκκινο την δύναμη αδράνειας και το μπλε τη δύναμη της οπισθέλκουσας. Η ταχύτητα αποτελεί συνάρτηση ημιτόνου, ενώ η επιτάχυνση, συνάρτηση συνημίτονου.

Το τελικό βήμα στην εκτίμηση των γεωκινδύνων που δημιουργούνται από τις υποθαλάσσιες κατολισθήσεις αλλά και γενικότερα από τις διάφορες βαρυντικές ροές υλικού είναι η ποσοτικοποίηση των συνεπειών της επίδρασής τους στις υποθαλάσσιες κατασκευές ενεργειακών υποδομών. Υπάρχουν δύο διαφορετικές πλευρές που πρέπει να ληφθούν υπόψιν.

1. Η αξιολόγηση της δράσης των φορτίων που ασκούνται για ένα συγκεκριμένο συμβάν.
2. Η εκτίμηση της ανταπόκρισης ή της πιθανής ζημιάς, της υποδομής που έχει πληγεί από το συγκεκριμένο συμβάν.

Αυτά τα βήματα είναι κοινά σε πληθώρα διαφορετικών υποδομών, συμπεριλαμβανομένων και των πετρελαιοπηγών, των θεμελιώσεων των εξεδρών αλλά κυρίως των υποθαλάσσιων αγωγών και καλωδίων, που είναι περισσότερο εκτεθειμένοι στους υποθαλάσσιους γεωκινδύνους.

#### 4.5.1 ΒΑΡΥΤΙΚΕΣ ΡΟΕΣ ΜΑΖΑΣ

Οι αστοχίες ενός υποθαλάσσιου πρανούς αρχίζουν με την κίνηση του γεωυλικού προς τα κάτω με τη μορφή μετακίνησης μάζας (run-out) ή ροής μάζας. Το υλικό που εμπλέκεται σε μια ολίσθηση προέρχεται από ένα στερεό υλικό και βαθμιαία μετασχηματίζεται προς μια ρευστή κατάσταση, καθώς αναμορφώνεται και χαλαρώνει κατά τη μεταφορά του προς τα κάτω, λόγω της κλίσης και του επιπρόσθετου νερού. Οι βαρυτικές ροές μάζας ακολουθώντας την αστοχία ενός υποθαλάσσιου πρανούς περιγράφονται γενικά ως ροές κορημάτων και τουρβιδιτικά ρεύματα [10]. Οι ροές κορημάτων, ορίζονται ως μαζικές μετακινήσεις στις οποίες το αρχικό ιζήμα κατεβαίνει τη πλαγιά, και σταματάει όταν η αρχική δυναμική του ενέργεια έχει καταναλωθεί λόγω τριβής. Κατά τη διάρκεια της ροής των κορημάτων, το αρχικό ιζήμα ανασχηματίζεται και ανάλογα με την ποσότητα νερού που κατακρατείται, καθορίζονται και οι ρεολογικές ιδιότητες του ιζήματος. Η εδαφική μάζα μετακινείται ως ένα βισκοπλαστικό υλικό το οποίο έχει διακριτά χαρακτηριστικά του ρυθμού τάσης-παραμόρφωσης και η ροή είναι γενικά στρωτή (laminar flow). Τα τουρβιδιτικά ρεύματα, είναι ιζήματα πλούσια σε ροές βαρέων ρευστών και προέρχονται από τις ροές κορημάτων. Ιζήματα εν αιώρηση, παρέχουν μια διαφορά στην πυκνότητα μεταξύ περιβάλλοντος νερού και τουρβιδιτικού ρεύματος το οποίο προκύπτει από την βαρυτική ενέργεια η οποία κινεί τις ροές. Καθώς τα τουρβιδιτικά ρεύματα κατεβαίνουν το πρανές, συμπαρασύρουν περισσότερα ιζήματα, γίνονται ολοένα και πυκνότερα και επιταχύνουν την ροή. Ως αποτέλεσμα, η ροή είναι κυρίως τυρβώδης. Η πυκνότητα ενός τουρβιδιτικού ρεύματος είναι κατά 2-4% μεγαλύτερη από το περιβάλλον νερό, ενώ η ταχύτητα κυμαίνεται από 1m/s έως και άνω των 10m/s [10].

Όπως είναι φυσικό, διαφορετικά στάδια της βαρυτικής ροής, καθορίζονται από διαφορετικούς μηχανισμούς ή ρεολογικά καθεστώτα και απαιτούν διαφορετικά καταστατικά μοντέλα. Κατά την αστοχία του πρανούς, το ολισθαίνον υλικό χαρακτηρίζεται από γεωτεχνικές ιδιότητες τάσης-παραμόρφωσης. Κατά την μετακίνηση run-out, το υλικό έχει ανασυσταθεί και χαλαρώσει, μεταπίπτοντας σε ροή κορημάτων με βισκο-πλαστικές ιδιότητες. Στη συνέχεια, η ροή μετασχηματίζεται σε ένα βαρύ ρευστό του οποίου η συμπεριφορά περιγράφεται καλύτερα με ρευστομηχανικές ιδιότητες. Αυτό αποτελεί μία ειδική περίπτωση μοντελοποίησης καταστατικής συμπεριφοράς υποθαλάσσιων ολισθήσεων, δεδομένου ότι ένα μοντέλο πρέπει να περιγράψει όλο το εύρος της εν λόγω συμπεριφοράς, από ένα στερεό υλικό ικανό να αντιστέκεται σε διατμητικές τάσεις και χωρίς σημαντική παραμόρφωση, έως ένα μίγμα στερεού-νερού με ιδιότητες ρευστού το οποίο υφίσταται μεγάλες παραμορφώσεις. Τυπικά, μετά την ενεργοποίηση μιας υποθαλάσσιας ολίσθησης, οι γεωτεχνικές ιδιότητες που περιγράφουν την συμπεριφορά του εδαφικού υλικού παραμερίζονται και αντικαθίστανται από τις ιδιότητες του ρευστού, όπως η τάση διαρροής και το ιξώδες. Η ανάλυση των βαρυτικών ροών μάζας εστιάζει στην συμπεριφορά υδαρούς κονίας υψηλής περιεκτικότητας σε νερό (high water content slurry), (αρκετά πάνω από το όριο υδαρότητας του υλικού) με τάση διαρροής περίπου

10 Pa. Το αρχικό στάδιο μετασχηματισμού, όταν το ολισθαίνον υλικό χαλαρώνει από ένα ακέραιο στερεό με διατμητική αντοχή περίπου 10 kPa, επιδέχεται λιγότερη προσοχή, αν και αναμφισβήτητα το ισχυρότερο υλικό μπορεί να δημιουργήσει πιο σημαντικά φορτία πρόσκρουσης σε οποιαδήποτε υποθαλάσσια υποδομή, παρά η ασθενέστερη (αν και πιθανή ταχύτερη κίνηση) ροή ρευστού. Ακολουθούν τα βασικότερα ρεολογικά μοντέλα για την περιγραφή των βαρυτικών ροών μάζας [10].

## ΡΕΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Η συμπεριφορά των βαρυτικών ροών εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων της μάζας (όπως το είδος, η κατανομή μεγέθους, ο τρόπος της αλληλεπίδρασης με το νερό), την συγκέντρωση του στερεού και τον ρυθμό διάτμησης. Υπάρχουν διάφορα διαθέσιμα καταστατικά και ρεολογικά μοντέλα που παράγονται από τις αρχές της εδαφομηχανικής και της ρευστομηχανικής που μπορούν να εφαρμοστούν στις βαρυτικές ροές [10].

## ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Η εδαφομηχανική της κρίσιμης κατάστασης περιγράφει ικανοποιητικά την ποσοτικοποίηση μεταξύ της διατμητικής αντοχής του αναμορφούμενου εδαφικού υλικού και του περιεχομένου νερού, σε ικανοποιητικά υψηλό επίπεδο αντίστοιχο με τις ροές κορημάτων. Το εδαφομηχανικό πλαίσιο, είναι κατάλληλο για την ποιοτική εκτίμηση της ένδειξης εάν ένα συγκεκριμένο έδαφος, υπό δεδομένη ενεργό τάση και περιεχόμενο νερού, θα επιχειρήσει να διασταλεί όταν υπόκειται σε διάτμηση. Εάν παρατηρείται διαστολή κατά τη διάτμηση, τότε αναπτύσσεται αρνητική υπερπίεση των πόρων και στη συνέχεια προκαλείται πιθανή χαλάρωση. Εάν παρατηρείται συστολή κατά τη διάτμηση, τότε αναπτύσσεται θετική υπερπίεση πόρων που ακολουθείται από την σκλήρυνση του γεωλικού. Χαρακτηριστικά του εδάφους όπως η ευαισθησία και ο ρυθμός παραμόρφωσης πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την εφαρμογή ενός εδαφομηχανικού μοντέλου σε μία ροή κορημάτων. Τα περισσότερα φυσικά εδάφη παρουσιάζουν κάποιο βαθμό ευαισθησίας, το οποίο οδηγεί σε μειωμένη διατμητική αντοχή μετά από την ανασύστασή τους. Η ευαισθησία  $S_t$  εκφράζεται ως τη μέγιστη διατμητική αντοχή  $s_{u,p}$  και την πλήρως αναμορφωμένη (remoulded) διατμητική αντοχή  $s_{u,r}$  (με την αρχική ποσότητα νερού του εδάφους):

$$S_t = \frac{s_{u,p}}{s_{u,r}}. \quad 4.8$$

Τα υπεράκτια εδάφη, συνήθως παρουσιάζουν ευαισθησία γύρω στο 2-6 [10]. Η διατμητική αντοχή διατμήσεως του εδάφους επίσης εξαρτάται από το ρυθμό μεταβολής της διατμητικής παραμόρφωσης, που περιγράφεται από την αναλογική μεταβολή της διατμητικής αντοχής πάνω από μία τάξη μεγέθους μεταβολής του

ρυθμού παραμόρφωσης. Η διατμητική αντοχή μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του ρυθμού παραμόρφωσης  $\dot{\gamma}$  σύμφωνα με την ακόλουθη μορφή:

$$s_u = s_{u,ref} \left( 1 + \mu \log \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{ref}} \right), \quad 4.9$$

όπου  $s_{u,ref}$  είναι η διατμητική αντοχή αναφοράς για τον ρυθμό παραμόρφωσης αναφοράς,  $\mu$  είναι το ιξώδες με τυπικές τιμές να κυμαίνονται στο 0.1 - 0.2.

## ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Ρευστά όπου εμπεριέχουν ένα ποσοστό στερεών, περιγράφονται με τον όρο μη-Νευτωνικά ρευστά και χαρακτηρίζονται από: α) την τάση διαρροής  $\tau_y$  κάτω από την οποία ο ρυθμός της διατμητικής παραμόρφωσης είναι πολύ μικρός και β) από μια μη-γραμμική σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και του ρυθμού της διατμητικής παραμόρφωσης. Από την άλλη, τα κοινά νευτωνικά ρευστά υπακούουν στον νόμο του Newton για το ιξώδες, δηλαδή, η εξάρτηση της ιξώδους τάσης από το ρυθμό παραμόρφωσης του ρευστού είναι γραμμική, όπου για μονοδιάστατη, στρωτή ροή ισχύει η ακόλουθη σχέση [19]:

$$\frac{\text{ιξώδης διατμητική τάση}}{\text{ρυθμός γωνιακής παραμόρφωσης}} = \text{δυναμικό ιξώδες } \mu, \tau/\dot{\gamma} = \mu, \quad 4.10$$

όπου  $\mu$  είναι το δυναμικό ιξώδες σε Pa\*sec. Γενικότερα ισχύει το εξής:

$$\tau_{ij} = \mu \dot{\gamma}_{ij}, \forall i \neq j, \quad 4.11$$

και ο ρυθμός παραμόρφωσης  $\dot{\gamma}_{ij}$  δίνεται από την εξίσωση 4.12:

$$\dot{\gamma}_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}. \quad 4.12$$

Συνεπώς η εξίσωση 4.11 γίνεται:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad 4.13$$

όπου για μονοδιάστατη στρωτή ροή ισχύει:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \frac{\partial u_x}{\partial y}. \quad 4.14$$

Τα μη νευτωνικά ρευστά, είναι τα ρευστά στα οποία η εξάρτηση της ιξώδους τάσης από το ρυθμό παραμόρφωσης του ρευστού είναι μη γραμμική [19]. Συνεπώς, αντί για σταθερό ιξώδες, υπάρχει το φαινόμενο ιξώδες που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο

ρυθμό διάτμησης  $\dot{\gamma}_{ij}$ . Συνεπώς η εξίσωση 4.10, του δυναμικού ιξώδους, στη περίπτωση των μη νευτωνικών ρευστών γίνεται:

$$\mu_{\varphi} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \quad 4.15$$

Υπάρχουν οι εξής κατηγορίες μη νευτωνικών ρευστών [19]:

- ✚ Ψευδοπλαστικά, όπου το φαινόμενο ιξώδες μειώνεται με το ρυθμό διάτμησης.
- ✚ Διασταλτικά, όπου το φαινόμενο ιξώδες αυξάνεται με το ρυθμό διάτμησης.
- ✚ Πλαστικά Bingham, όπου απαιτείται η ανάπτυξη κάποιας διατμητικής τάσης, πριν αρχίσει το ρευστό να ρέει.
- ✚ Θιξοτροπικά ρευστά, όπου το ιξώδες μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, όταν υπόκεινται σε διάτμηση.
- ✚ Ρεοπηκτικά ρευστά, όπου το ιξώδες αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, όταν υπόκεινται σε διάτμηση.
- ✚ Ιξωδο-ελαστικά ρευστά όπου είναι τα υλικά σώματα, τα οποία εκτός από χαρακτηριστικά ρευστών, εμφανίζουν και χαρακτηριστικά στερεών.

Οι ροές κορημάτων αναλύονται σαν μη νευτωνικά ρευστά και ειδικότερα, σαν ρευστά Bingham. Το μοντέλο Bingham, είναι παρόμοιο με τα γεωτεχνικά μοντέλα για αστράγγιστη διατμητική αντοχή, με μηδενικό ρυθμό παραμόρφωσης μέχρι τη τάση διαρροής. Μετά τη τάση διαρροής η αντοχή αυξάνεται γραμμικά, με την αύξηση του ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης ως εξής [10]:

$$\dot{\gamma} = \begin{cases} 0 & |\tau| < \tau_y \\ \frac{1}{\mu} \operatorname{sgn}(\tau)(|\tau| - \tau_y) & |\tau| > \tau_y \end{cases}. \quad 4.16$$

Υπάρχουν και μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης και διατμητικής τάσης για τη μοντελοποίηση ροών κορημάτων, οι οποίες επιτρέπουν αλλαγή στο ιξώδες ανάλογα με το ρυθμό διάτμησης. Αυτά τα μοντέλα συνήθως ονομάζονται Casson ή Herschel-Bulkey και ο ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης με βάση αυτά τα μοντέλα είναι [10]:

$$\dot{\gamma} = \begin{cases} 0 & |\tau| < \tau_y \\ \operatorname{sgn}(\tau) \left( \frac{|\tau| - \tau_y}{\mu} \right)^{1/n} & |\tau| > \tau_y \end{cases}, \quad 4.17$$

όπου  $n$ , ο εκθέτης ρεολογικής συμπεριφοράς. Για  $n > 1$  εμφανίζεται διατμητική πάχυνση (shear thickening) και για  $n < 1$ , εμφανίζεται διατμητική λέπτυνση (shear thinning) [10]. Οι ροές τουρβιδιτικών ρευμάτων, συνήθως μοντελοποιούνται ως βαριά ρευστά, δηλαδή ως νευτωνικά ρευστά, χρησιμοποιώντας υπολογιστικά πακέτα ρευστοδυναμικής. Τα χαρακτηριστικά της ροής κορημάτων μαζί με το μέγεθος κόκκου του ιξήματος, χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της διαδρομής της ροής και την ταχύτητα των τουρβιδιτικών ρευμάτων [10].

#### 4.5.2 ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Με δεδομένο ότι η ανάλυση των γεγονότων μεταφοράς μάζας συνήθως επιτυγχάνεται βασισμένη σε ρευστομηχανικές προσεγγίσεις, υπάρχει μια τάση εφαρμογής της ρευστομηχανικής για την αξιολόγηση των δυνάμεων κρούσης. Για έναν αγωγό, οι δυνάμεις που προκαλούνται λόγω χάρη από τουρβιδιτικά ρεύματα εκφράζονται με τους συντελεστές  $C_d$ , για την οπισθέλκουσα κάθετης φόρτισης, σε συνδυασμό με ένα συντελεστή τριβής  $C_f$ , για την αξονική φόρτιση [10].

$$F_d = C_d \left( \frac{1}{2} \rho v_n^2 \right) D, \quad 4.18$$

$$F_f = C_f \left( \frac{1}{2} \rho v_a^2 \right) \pi D, \quad 4.19$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του τουρβιδιτικού ρεύματος. Οι τιμές για το συντελεστή  $C_d$  κυμαίνονται όπως παρακάτω:

$$C_d = 1.2 \rightarrow Re \leq 4 \times 10^5,$$

$$C_d = 0.7 \rightarrow Re \geq 6 \times 10^5.$$

Ανάμεσα σε αυτά τα δύο όρια χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή σε λογαριθμική κλίμακα log-log και υπολογίζεται ότι ο συντελεστής  $C_f$  ισούται με,

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2}. \quad 4.20$$

Για τα τουρβιδιτικά ρεύματα, ο αριθμός Reynolds θα πρέπει να βασίζεται στον αριθμό Reynolds του νερού, εκφρασμένος όπως ακολουθεί:

$$Re = \frac{v_n D}{\nu} \quad 4.21$$

όπου  $\nu = 1.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ , το κινηματικό ιξώδες του νερού.

Μια παρόμοια προσέγγιση έχει προταθεί για ροές κορημάτων, όπου οι συντελεστές οπισθέλκουσας και τριβής είναι εκφρασμένοι ως εκθετικές συναρτήσεις ενός ισοδύναμου αριθμού Reynolds ( $Re$ ), για μη νευτωνικά ρευστά, συσχετίζοντας τα μεγέθη της οπισθέλκουσας με αυτό της διατμητικής αντοχής του υλικού, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση [10]:

$$\text{Johnson number} = Re_{\text{non-Newtonian}} = \frac{\rho v_n^2}{\tau}. \quad 4.22$$



### 4.5.3 ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Μια εναλλακτική προσέγγιση για ροές κορημάτων, περισσότερο συσχετισμένη με τις γεωτεχνικές ιδιότητες του εδάφους, είναι η έκφραση των κάθετων δυνάμεων και των δυνάμεων τριβής σε όρους διατμητικής αντοχής επαυξημένες με υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης, όπως ακολουθεί [10] :

$$F_n = N_p \beta_n s_u D , \quad 4.23$$

$$F_f = a \beta_f s_u \pi D , \quad 4.24$$

όπου τα  $\beta_n, \beta_f$  είναι οι συντελεστές του ρυθμού παραμόρφωσης, ενώ το  $N_p$ , είναι ένας συντελεστής της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, για έδαφος που ρέει γύρω από ένα κυλινδρικό σχήμα και ισούται με  $N_p = 11$ . Ο συντελεστής  $a$  είναι ένας συντελεστής τριβής που συνήθως ισούται με τη μονάδα για τέτοιου είδους εφαρμογές. Κατά τις πρώτες στιγμές της βαρυτικής ροής, ο ρυθμός παραμόρφωσης μπορεί να θεωρηθεί ίσος με  $v_n/D$  ή  $v_a/D$ .

Οι δύο διαφορετικές προσεγγίσεις (ρευστομηχανική και γεωτεχνική) μπορούν να συνδυασθούν μαζί, συνεπώς για τη περίπτωση της κάθετης φόρτισης, προκύπτει:

$$F_n = C_d \left( \frac{1}{2} \rho v_n^2 \right) D + N_p s_{u,nom} D , \quad 4.25$$

όπου ο όρος  $s_{u,nom}$  αντιπροσωπεύει το ρυθμιζόμενο ρυθμό διατμητικής αντοχής, που προσδιορίζεται από τον ρυθμό της ονομαστικής παραμόρφωσης του  $v_n/D$ . Τα σχετικά μεγέθη των δύο παραπάνω όρων είναι συνάρτηση του αδιάστατου λόγου  $\rho v_n^2 / s_{u,nom}$ .

Όταν ο παραπάνω λόγος πέφτει κάτω από τον αριθμό 10, τότε η γεωτεχνική αντίσταση κυριαρχεί στην εξίσωση. Για την συνδυασμένη προσέγγιση ο συντελεστής οπισθέλκουσας  $C_d$ , μπορεί να θεωρηθεί ίσος με 0.8. Για την αξονική φόρτιση, θεωρώντας μια τραχιά διεπιφάνεια μεταξύ αγωγού και εδάφους, η δύναμη τριβής μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$F_f = f_a s_{u,nom} \pi D . \quad 4.26$$

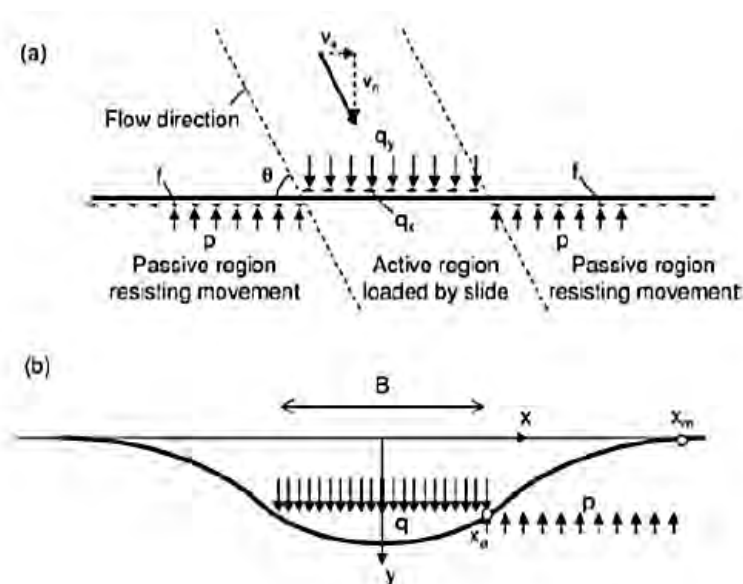
Ενώ για το μοντέλο του εκθετικού νόμου, ο συντελεστής  $f_a$  ισούται με:

$$f_a = \left[ 2 \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right) \right]^\beta , \quad 4.27$$

όπου κυμαίνεται μεταξύ 1.2-1.4 για τυπικές τιμές του  $\beta$ , αντιπροσωπεύοντας ρυθμούς παραμόρφωσης περί τον αγωγό σημαντικά υψηλότερους από την ονομαστική τιμή  $v_a/D$ .

#### 4.5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΑΓΩΓΩΝ

Η συνολική απόκριση ολόκληρου του δικτύου υποθαλάσσιων αγωγών στην φόρτιση που προκαλείται λόγω μιας υποθαλάσσιας κατολίσθησης, μπορεί να εκτιμηθεί θεωρώντας το δίκτυο αγωγών ως ενιαίο δομικό στοιχείο, που παρουσιάζει ικανή καμπτική και αξονική αντίσταση στην παραμόρφωση. Το δίκτυο αγωγών θα είναι ενεργά φορτισμένο σε ένα συγκεκριμένο πλάτος λόγω της κατολίσθησης, ενώ θα έχει μια παθητική αντίσταση, λόγω της αλληλεπίδρασης με τον θαλάσσιο πυθμένα. Επιπροσθέτως, θα δημιουργηθεί αντίσταση τριβής στην αξονική κίνηση καθώς η γραμμή των αγωγών θα παραμορφώνεται με διαφορετικό ρυθμό. Το παραπάνω πρόβλημα υπόκειται σε αναλυτική επίλυση, για δεδομένη γεωμετρία δικτύου αγωγών, υποθαλάσσιας κατολίσθησης και τιμές για ενεργό φόρτιση, παθητική αντίσταση και αντίσταση τριβής. Παραμετρικές λύσεις, επιτρέπουν μια εκτίμηση των τάσεων και παραμορφώσεων που λαμβάνει το δίκτυο των υποθαλάσσιων αγωγών λόγω κάμψης και εφελκυσμού [10].



Εικόνα 93. Σχηματική αναπαράσταση της γενικής φόρτισης που προκαλείται από μία κατολίσθηση σε έναν αγωγό και η ονοματολογία της ανάλυσης για κάθετη φόρτιση στον αγωγό. Flow direction = η κατεύθυνση της ροής, passive region resisting movement = παθητική περιοχή που αντιστέκεται στην μετακίνηση, active region loaded by the slide = ενεργός περιοχή, φορτισμένη από την ολίσθηση.

## ΕΠΙΛΟΓΟΣ / ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα εργασία, αναλύθηκε διεξοδικά το θέμα των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων και η επίδρασή τους στις υπεράκτιες κατασκευές ενεργειακών υποδομών. Αρχικά έγινε μια περιγραφή της έννοιας της κατολίσθησης και στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τα είδη των κατολισθήσεων καθώς και όλα τα πιθανά είδη βαρυτικών ροών. Περιγράφηκαν οι μηχανισμοί αστάθειας ενός υποθαλάσσιου πρανούς, οι αντιδρώσες δυνάμεις που συμβάλλουν στην σταθερότητά του καθώς και οι δρώσες δυνάμεις που προκαλούν εντέλει την αστοχία του. Στη συνέχεια αναλύθηκαν οι διεργασίες και οι μηχανισμοί γένεσης υποθαλάσσιων κατολισθήσεων και αναλύθηκε η διαφορά μεταξύ χερσαίων και υποθαλάσσιων κατολισθήσεων, με τις μεγαλύτερες διαφορές να είναι ο διαθέσιμος όγκος και η γωνία του πρανούς. Το παράδοξο με τις υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, είναι ότι μπορούν να ενεργοποιηθούν σε εξαιρετικά μικρές κλίσεις του θαλάσσιου πυθμένα, σε μόλις  $1^\circ$ , ενώ όπως αναλύεται στο υποκεφάλαιο των βαρυτικών ροών μάζας, το νερό ενισχύει τη ροή των κατολισθήσεων παρόλη την αυξημένη δύναμη οπισθέλκουσας που εξασκεί. Στη συνέχεια έγινε παρουσίαση της ανάλυσης αστοχίας των πρανών με δύο μεθόδους. Αναλύθηκε η μέθοδος πρανούς απείρου μήκους και ο μηχανισμός εδαφικού τμήματος. Επιπροσθέτως αναλύθηκε η επίδραση των θαλάσσιων κυμάτων και των παλιρροιακών κυμάτων καθώς και η επίδραση των ένυδρων αερίων κατά την εκδιάλυση και αποδέσμευσή τους. Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν ως case studies, οι σημαντικότερες κατολισθήσεις, όπως είναι η κατολίσθηση Storegga, που συνέβη σε κλίση πυθμένα μόλις  $1^\circ$ , η κατολίσθηση Finneidfjord που προκλήθηκε από ανθρωπογενείς διαδικασίες, και η χαράδρα Sigsbee με πολυάριθμο ιστορικό κατολισθήσεων σε μια περιοχή που βρίθεται από υπεράκτιες κατασκευές. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφηκαν οι υπεράκτιες κατασκευές ενεργειακών υποδομών, όπως οι τύποι εξεδρών εκμετάλλευσης φυσικών πόρων και οι υποθαλάσσιοι αγωγοί μεταφοράς υδρογονανθράκων. Αναλύθηκαν τα δύο κύρια πλαίσια μέσα από τα οποία υπολογίζονται οι δυνάμεις που ασκούνται στις κατασκευές, τα οποία είναι το γεωτεχνικό και το ρευστομηχανικό πλαίσιο. Η εξακρίβωση των γεωκινδύνων, η δυνητική έναρξή τους, οι τρόποι αστοχίας, η σοβαρότητα των γεγονότων, η συχνότητα των γεγονότων, οι συνέπειες των αστοχιών και η πιθανότητα πρόκλησης αστοχίας απαιτεί διεπιστημονική αντιμετώπιση από γεωτεχνικούς μηχανικούς, γεωλόγους μηχανικούς, σε συνδυασμό με άλλες ειδικότητες μηχανικών.

Τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι τα ακόλουθα. Αρχικά, η εκτίμηση και ανάλυση των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων, πρέπει να βασίζεται σε κατάλληλες τεχνικές και σε επαρκείς τεχνολογίες. Στη συνέχεια είναι αναγκαία η ανάπτυξη των παρακάτω ερευνητικών περιοχών ούτως ώστε να βελτιωθεί ο τομέας της γεωτεχνικής μηχανικής όσον αφορά τις περιοχές που πλήττονται από υποθαλάσσιους γεωκινδύνους:

- ✚ Ανάπτυξη κατάλληλων υπολογιστικών μοντέλων για εδάφη που περιέχουν ένυδρα αέρια και αέρια γενικότερα.

- ✚ Κατάλληλη αξιολόγηση in situ της αντοχής του εδάφους, της πίεσης των πόρων και των ενεργών τάσεων που επικρατούν στα βαθέα ύδατα, σε σημαντικά βάθη κάτω από τον θαλάσσιο πυθμένα μέσω της διερεύνησης του εδάφους και κατάλληλες τεχνικές ανάλυσης όπως είναι οι δοκιμές πεδίου, οι δειγματοληψίες για διάφορες δοκιμές και άλλες τεχνικές της γεωτεχνικής έρευνας και της 3Δ γεωμορφολογικής απεικόνισης.
- ✚ Ανάπτυξη τεχνικών για την εκτίμηση της αστοχίας πρανών που να είναι σε θέση να επεξηγούν τον τρόπο αστοχίας σε ήπιες κλίσεις και καθιέρωση αξιόπιστων μεθοδολογιών για την πρόβλεψη των παλινδρομικών κατολισθήσεων καθώς και την επιφάνεια και τον όγκο που αυτές θα περιλαμβάνουν.
- ✚ Μελέτη για την ακρίβεια και τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με τις τεχνικές και την μεθοδολογία για την αξιολόγηση των άμεσων και έμμεσων συνεπειών των κατολισθήσεων, όπως είναι η απόσταση τελειώματος (run-out distance), η ταχύτητα ροής, η σφοδρότητα της πρόσκρουσης της κατολίθησης καθώς και η πιθανότητα πρόκλησης tsunamí και ο αντίκτυπος αυτού.

Ως μελλοντική έρευνα προτείνεται η προσομοίωση μοντέλων υποθαλάσσιων κατολισθήσεων με την χρήση εξελιγμένων γεωτεχνικών λογισμικών και η παραμετρική διερεύνηση των φαινομένων αυτών αλλά και η χρήση κατάλληλων καταστατικών μοντέλων μηχανικής συμπεριφοράς των γεωυλικών που συνθέτουν τον πυθμένα της θάλασσας.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] [http://greek\\_greek.enacademic.com](http://greek_greek.enacademic.com)
- [2] de Blasio F. V., 2011, Introduction to the Physics of Landslides, Milan & Oslo, Springer
- [3] Mosher D. et al, 2010, Submarine Mass Movements and their Consequences, Canada, Springer
- [4] [http://www.geo.auth.gr/106/theory/pet\\_sedimentary.htm](http://www.geo.auth.gr/106/theory/pet_sedimentary.htm)
- [5] Εφραιμίδης Γ., 2017, Τεχνική και Θαλάσσια Γεωλογία, Σημειώσεις Μαθήματος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
- [6] Δασενάκης Μ., 2015, Χημική Ωκεανογραφία, Αθήνα
- [7] Micallef A. et al, 2018, Submarine Geomorphology, Malta, Springer
- [8] Πούλος Σ., 2018, Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Ωκεανογραφία, Σημειώσεις Μαθήματος, Αθήνα
- [9] Τίκα Θ., Αναγνωστόπουλος Χ., Υποθαλάσσιες Κατολισθήσεις
- [10] Randolph M., Gouvernec S., 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
- [11] Λουπασάκης Κ., 2013, Εδαφομηχανική και Στοιχεία Θεμελιώσεων, Σημειώσεις Μαθήματος, Αθήνα
- [12] Καλλιόγλου Π., 2017 Γεωτεχνική Μηχανική, Σημειώσεις Μαθήματος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- [13] [www.mnn.com](http://www.mnn.com)
- [14] Μπουγάτσας Χ., Πτυχιακή Εργασία, Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού Μακεδονίας
- [15] Κανάκη Ν., 2017, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
- [16] Dean E.T.R., 2010, Offshore Geotechnical Engineering, Thomas Telford, Bristol, UK
- [17] Kyriakides S., Edmundo Corona 2007, Mechanics of Offshore Pipelines, Vol. I, Texas, Austin, USA.
- [18] Κατσαρδή Β., 2017, Σημειώσεις Μαθήματος Αλληλεπίδραση Κυμάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- [19] Παπαϊωάννου Θ. Α., 2002, Μηχανική των Ρευστών, τόμος I, Αθήνα.
- [20] Henkel D. J., 1970, The role of waves in causing submarine landslides, Geotechnique 20, No1., 75-80.
- [21] Wiegel L., 1992, Oceanographical Engineering, Dover Publications Inc., New York.
- [22] American Petroleum Institute, 2010, Planning, Designing, and Constructing Tension Leg Platforms, API Recommended practice 2T 3<sup>rd</sup> edition.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

1. Πηγή : [http://www.geo.auth.gr/106/theory/pet\\_sedimentary.htm](http://www.geo.auth.gr/106/theory/pet_sedimentary.htm)
2. Πηγή : Erickson, J., KuskyMarine T.M., “Geology: Exploring the New Frontiers of the Ocean”, Checkmark Books; Revised edition (March 2003).
3. Πηγή: <https://www.universetoday.com/73597/what-is-lithosphere/>
4. Πηγή: Encyclopedia Britannica
5. Πηγή: <https://earthsky.org/earth/>
6. Πηγή: Δασενάκης Μ, Χημική Ωκεανογραφία
7. Πηγή: NGI.com
8. Πηγή: Offshore geotechnical engineering, Marc Randolph, Susan Gouvernec
9. Πηγή: Seafloor mapping for geohazard assesment, Springer
10. Πηγή: Micallef Aaron et al, 2018, Submarine Geomorphology, Malta, Springer
11. Πηγή: <https://www.bgs.ac.uk/discoveringGeology/hazards/landslides/sea.html>
12. Πηγή: <https://www.bgs.ac.uk/discoveringGeology/hazards/landslides/sea.html>
13. Πηγή: Micallef Aaron et al, 2018, Submarine Geomorphology, Malta, Springer
14. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
15. Πηγή: Micallef Aaron et al, 2018, Submarine Geomorphology, Malta, Springer
16. Πηγή: <https://teara.govt.nz/en/diagram/8782/landslide-types>
17. Πηγή: <https://slideplayer.com/slide/4565885/>
18. Πηγή: Τίκα Θεοδώρα, Αναγνωστόπουλος Χρήστος, Υποθαλάσσιες Κατολισθήσεις
19. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
20. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
21. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
22. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
23. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
24. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
25. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
26. Πηγή: G. Shanmugam, Journal of Palaeography, 2015, University of Texas at Arlington, USA.
27. Πηγή: Τίκα Θεοδώρα, Αναγνωστόπουλος Χρήστος, Υποθαλάσσιες Κατολισθήσεις
28. Πηγή: Τίκα Θεοδώρα, Αναγνωστόπουλος Χρήστος, Υποθαλάσσιες Κατολισθήσεις
29. Πηγή: Τίκα Θεοδώρα, Αναγνωστόπουλος Χρήστος, Υποθαλάσσιες Κατολισθήσεις
30. Πηγή: Τίκα Θεοδώρα, Αναγνωστόπουλος Χρήστος, Υποθαλάσσιες Κατολισθήσεις

31. Πηγή: G. Shanmugam, Journal of Palaeography, 2015, University of Texas at Arlington, USA.
32. Πηγή: howstuffworks.com
33. Πηγή: Mosher David et al, 2010, Submarine Mass Movements and their Consequences, Canada, Springer
34. Πηγή: Finn Lovholt, ResearchGate.net
- 34.1. Πηγή: Fabio Vittorio de Blasio, 2011, Introduction to the Physics of Landslides, Milan & Oslo, Springer
35. Πηγή: www.ngi.com
36. Πηγή: Τίκα Θεοδώρα, Αναγνωστόπουλος Χρήστος, Υποθαλάσσιες Κατολισθήσεις
37. Fabio Vittorio de Blasio, 2011, Introduction to the Physics of Landslides, Milan & Oslo, Springer
38. Πηγή: Mosher David et al, 2010, Submarine Mass Movements and their Consequences, Canada, Springer
39. Πηγή: DailyMail.co.uk
- 39.1 Πηγή: Fabio Vittorio de Blasio, 2011, Introduction to the Physics of Landslides, Milan & Oslo, Springer
40. Πηγή: Mosher David et al, 2010, Submarine Mass Movements and their Consequences, Canada, Springer,
41. Πηγή: Mosher David et al, 2010, Submarine Mass Movements and their Consequences, Canada, Springer,
42. Πηγή: Τίκα Θεοδώρα, Αναγνωστόπουλος Χρήστος, Υποθαλάσσιες Κατολισθήσεις
43. Πηγή: Τίκα Θεοδώρα, Αναγνωστόπουλος Χρήστος, Υποθαλάσσιες Κατολισθήσεις
- 43.1 Πηγή: Fabio Vittorio de Blasio, 2011, Introduction to the Physics of Landslides, Milan & Oslo, Springer
44. Πηγή: howstuffworks.com
45. Πηγή: NGI.com
46. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
47. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
48. Πηγή: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/turbidity.html>
- 48.1 Πηγή: Fabio Vittorio de Blasio, 2011, Introduction to the Physics of Landslides, Milan & Oslo, Springer
49. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
50. Πηγή: mnn.com
51. Πηγή: <http://icfcyprus.blogspot.com/2012/11/oil-platforms.htm>
52. Πηγή: mnn.com
53. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press

54. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
55. Πηγή: <https://www.galvestonlab.sefsc.noaa.gov/platforms/>
56. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
57. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
58. Πηγή: petrowiki.com
59. Πηγή: <https://www.budowle.pl/files/photos/building/baldpate-compliant-tower-5.jpg>
60. Πηγή: drillingformulas.com
61. Πηγή: drillingformulas.com
62. Πηγή: drillingformulas.com
63. Πηγή: drillingformulas.com
64. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
65. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
66. Πηγή: API, 2010, Planning, Designing and Constructing Tension Leg Platforms
67. Πηγή: [revistapetroquimica.com](http://revistapetroquimica.com)
68. Πηγή: [revistapetroquimica.com](http://revistapetroquimica.com)
69. Πηγή: [revistapetroquimica.com](http://revistapetroquimica.com)
70. Πηγή: [petroglobalnews.com](http://petroglobalnews.com)
71. Πηγή: [rigzone.com](http://rigzone.com)
72. Πηγή: [akersolutions.com](http://akersolutions.com)
73. Πηγή: <https://www.slideshare.net/GiuseppeMoricca1/overview-of-subsea-production-systems>
74. Πηγή: <http://icfcyprus.blogspot.com/2012/11>
75. Πηγή: [Researchgate.net](http://Researchgate.net)
76. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
77. Πηγή: <https://anakkelaoutan.wordpress.com>
78. Πηγή: Stelios Kyriakides, Edmundo Corona 007, Mechanics of Offshore Pipelines, Texas, Austin, USA.
79. Πηγή: Stelios Kyriakides, Edmundo Corona 007, Mechanics of Offshore Pipelines, Texas, Austin, USA..
80. Πηγή: Stelios Kyriakides, Edmundo Corona 007, Mechanics of Offshore Pipelines, Texas, Austin, USA.
81. Πηγή: Stelios Kyriakides, Edmundo Corona 007, Mechanics of Offshore Pipelines, Texas, Austin, USA.
82. Πηγή: Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press
83. Πηγή: Π.Θ. Σημειώσεις μαθήματος Μηχανικής Συμπεριφοράς Αγωγών.
84. Πηγή: E.T.R. Dean, 2010, Offshore Geotechnical Engineering, Thomas Telford, Bristol, UK
85. Πηγή: [Independent.ng](http://Independent.ng)



86. Πηγή:Independent.ng
87. Πηγή:Independent.ng
88. Πηγή: Πηγή:windpowerengineering.com
89. Πηγή:windpowerengineering.com
90. Πηγή: windpowerengineering.com
91. Πηγή:Κατσαρδή Βανέσσα, 2017, Σημειώσεις Μαθήματος Αλληλεπίδραση Κυμάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
92. Πηγή: Κατσαρδή Βανέσσα, 2017, Σημειώσεις Μαθήματος Αλληλεπίδραση Κυμάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
93. Πηγή:Marc Randolph, Susan Gouvernec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering, Western Australia, Spon Press