



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

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΑΓΩΓΟΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ  
ΣΕ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗ ΜΕ ΕΝΕΡΓΑ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΡΗΓΜΑΤΑ:  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ  
ΤΟΥ ΡΟΛΟΥ ΤΩΝ ΙΖΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΔΙΑΡΡΗΞΗ ΤΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΝ  
ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ



**ΑΣΠΑΣΙΑ ΜΑΛΙΑΓΚΑ**

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

Συνεπιβλέπων: Πρόδρομος Ψαρρόπουλος, Ε.Δ.Ι.Π., Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2017



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Φτάνοντας στο τέλος της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου, ολοκληρώνεται ο κύκλος φοίτησής μου στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με την αφορμή αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην προσπάθειά μου αυτή.

Πρώτα και σημαντικότερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. κ. Μαρίνο Καττή και Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, επιβλέποντες της διπλωματικής εργασίας μου, που με τίμησαν με την εμπιστοσύνη τους και μου έδωσαν την ευκαιρία να εκπονήσω αυτή την εργασία υπό την επίβλεψή τους. Οι άριστες επιστημονικές τους γνώσεις, μαζί με τη διαρκή και υποδειγματική καθοδήγηση, ιδιαίτερα από τον κ. Ψαρρόπουλο, συνέβαλαν καταλυτικά στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Για την πρόθυμη βοήθειά τους σε θέματα λογισμικού, ευχαριστώ τον κ. Σπύρο Καραμάνο, Καθηγητή στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας και στο Πανεπιστήμιο του Εδιμβούργου, καθώς και τον μεταπτυχιακό φοιτητή του Γρηγόρη Σαρβάνη, Πολιτικό Μηχανικό και υποψήφιο Διδάκτορα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη διαρκή στήριξή της σε όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.



## Περιεχόμενα

|  |    |
|--|----|
| Περίληψη .....   | 7  |
| Abstract .....   | 8  |
| Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Εισαγωγή .....   | 9  |
| Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : Υποθαλάσσιοι Αγωγοί.....   | 11 |
| 2.1 Γενικά χαρακτηριστικά υποθαλάσσιων αγωγών.....   | 11 |
| 2.2 Οι μεγαλύτεροι υποθαλάσσιοι αγωγοί στην Ευρώπη και τον κόσμο.....  | 12 |
| 2.3 Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί στη Μεσόγειο .....  | 16 |
| 2.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υποθαλάσσιων αγωγών .....   | 20 |
| Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : Υποθαλάσσιοι Γεωκίνδυνοι.....  | 23 |
| 3.1 Εισαγωγή.....  | 23 |
| 3.2 Σημαντικότεροι γεωκίνδυνοι.....  | 23 |
| 3.2.1 Σεισμοί.....   | 24 |
| 3.2.2 Ηφαίστεια.....   | 25 |
| 3.2.3 Κατολισθήσεις .....  | 28 |
| 3.3 Γεωκίνδυνοι στη Μεσόγειο.....  | 29 |
| 3.3.1 Υποθαλάσσια ηφαίστεια της Μεσογείου.....   | 30 |
| 3.3.2 Σεισμική δραστηριότητα στη Μεσόγειο .....  | 31 |
| 3.3.3 Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις στη Μεσόγειο .....  | 33 |
| Κεφάλαιο 4ο: Διάρρηξη σεισμικών ρηγμάτων .....   | 37 |
| 4.1 Σεισμικά ρήγματα .....   | 37 |
| 4.2 Κατηγοριοποίηση ρηγμάτων.....  | 38 |
| 4.3 Διάρρηξη ρήματος.....  | 39 |
| 4.4 Διάδοση ενεργού ρήματος διαμέσου εδαφικού επιφανειακού στρώματος .....                                       | 43 |
| 4.5 Τα σημαντικότερα ρήγματα στην Ανατολική Μεσόγειο .....   | 45 |
| Κεφάλαιο 5. Υπολογιστική προσομοίωση της διάρρηξης ενεργού σεισμικού ρήματος διαμέσου ιζηματογενούς στρώσης..... | 51 |
| 5.1 Περιγραφή του προσομοιώματος της ιζηματογενούς στρώσης.....  | 51 |
| 5.2 Επιφανειακές μετατοπίσεις με το ίδιο πάχος στρώσης (κανονικό ρήγμα).....                                     | 55 |
| 5.3 Επιφανειακές μετατοπίσεις με το ίδιο υλικό στρώσης (κανονικό ρήγμα) .....                                    | 58 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.4 Επιφανειακές μετατοπίσεις με την ίδια γωνία διάρρηξης του ρήγματος (κανονικό ρήγμα). 61   | 61  |
| 5.5 Επιφανειακές μετατοπίσεις με ίδιο πάχος στρώσης (ανάστροφο ρήγμα) .....   | 64  |
| 5.6 Επιφανειακές μετατοπίσεις με το ίδιο υλικό στρώσης (ανάστροφο ρήγμα) .....  | 67  |
| 5.7 Επιφανειακές μετατοπίσεις με την ίδια γωνία διάρρηξης του ρήγματος (ανάστροφο ρήγμα)<br>.....   | 70  |
| Κεφάλαιο 6. Παραμετρική ανάλυση για την αλληλεπίδραση αγωγού και ρήγματος με ή χωρίς την<br>ύπαρξη ιζηματογενούς στρώσεως.....                      | 75  |
| 6.1 Περιγραφή του προσομοιώματος του αγωγού .....   | 75  |
| 6.2 Προσομοίωση του ρήγματος και της ιζηματογενούς στρώσης με την χρήση εδαφικών<br>ελατηρίων .....   | 78  |
| 6.2.1 Υπολογισμός εδαφικών ελατηρίων σύμφωνα με τον Διεθνή Κανονισμό American<br>Lifelines Alliance (A.L.A.).....                                   | 80  |
| 6.2.2 Υπολογισμός των ελατηρίων σύμφωνα με την θεωρία των O'Rourke & Liu.....   | 88  |
| 6.3 Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων υποθαλασσίου αγωγού που βρίσκεται σε απευθείας<br>επαφή με κανονικό σεισμικό ρήγμα.....                         | 92  |
| 6.4 Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων υποθαλασσίου αγωγού και κανονικού ρήγματος όπου<br>μεταξύ τους παρεμβάλλεται αργιλική ιζηματογενής στρώση ..... | 95  |
| 6.5 Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων υποθαλασσίου αγωγού και κανονικού ρήγματος όπου<br>μεταξύ τους παρεμβάλλεται αμμώδης ιζηματογενής στρώση .....  | 99  |
| 6.6 Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων υποθαλασσίου αγωγού που βρίσκεται σε απευθείας<br>επαφή με ανάστροφο σεισμικό ρήγμα .....                       | 103 |
| Συμπεράσματα και προτάσεις για έρευνα .....   | 109 |
| Βιβλιογραφία.....   | 111 |

## Περίληψη

Στην σημερινή εποχή η επιτακτική ανάγκη εξόρυξης υδρογονανθράκων και μεταφοράς αυτών μεταξύ των χωρών έχει δημιουργήσει την απαίτηση για την κατασκευή και τη λειτουργία παγκοσμίως όχι μόνο χερσαίων, αλλά και υποθαλάσσιων αγωγών που χαρακτηρίζονται από αξιοπιστία. Γι' αυτό το λόγο όλο και περισσότεροι υποθαλάσσιοι αγωγοί αναμένεται να κατασκευαστούν μελλοντικά και ιδιαίτερα στην περιοχή της Μεσογείου όπου το δίκτυο των υποθαλάσσιων αγωγών είναι μικρό σε σχέση με την Βόρεια Θάλασσα όπου εκεί παρατηρείται ένα αρκετά πυκνό δίκτυο. Επειδή οι υποθαλάσσιοι αγωγοί διανύουν εκτενείς περιοχές, είναι πιθανόν να αντιμετωπίσουν διάφορους γεωκινδύνους και ιδιαίτερα στη Μεσόγειο Θάλασσα η οποία αποτελεί μία από τις πλέον σεισμογενείς περιοχές στον κόσμο. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι γεωκίνδυνοι ενδέχεται να απειλήσουν την ακεραιότητα του αγωγού.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της επιρροής των σεισμικών ρηγμάτων σε υποθαλάσσιους αγωγούς φυσικού αερίου. Μετά από μία βιβλιογραφική αναφορά στους υποθαλάσσιους αγωγούς που υπάρχουν ανά τον κόσμο, πραγματοποιείται μία εκτενή αναφορά στους γεωκινδύνους με μεγαλύτερη έμφαση στα ενεργά σεισμικά ρήγματα της ευρύτερης περιοχής της Μεσογείου. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS ώστε να προσομοιωθεί (α) η διάρρηξη κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων μέσω ιζηματογενών στρώσεων και οι συνεπακόλουθες μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις στον πυθμένα της θάλασσας και (β) η καταπόνηση του αγωγού όταν αυτός υπόκειται στις προαναφερθείσες εδαφικές παραμορφώσεις. Μελετούνται διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν το πρόβλημα, όπως ιδιότητες των ρηγμάτων, γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των ιζηματογενών στρώσεων, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού, η υδροστατική πίεση κ.α.

Τέλος, καταβάλλεται προσπάθεια αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της μελέτης προκειμένου να εκτιμηθεί το μέγεθος του προβλήματος και να προταθούν επιγραμματικά διάφορα μέτρα αντιμετώπισής του, καθώς επίσης και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

## Abstract

Nowadays the major need for hydrocarbon extraction and transportation between countries has created the requirement for the construction and operation of reliable onshore and offshore pipelines worldwide. For this reason, more offshore pipelines are expected to be constructed in the future, especially in the Mediterranean region where the pipeline network is relatively small compared to the North Sea where there exists a fairly dense pipeline network. Since offshore pipelines usually cross extensive areas, they may experience various geohazards especially in the Mediterranean Sea which is one of the most seismic regions in the world. Note that in some cases the geohazards may threaten the integrity of the pipeline.

The present thesis focuses on the influence of seismic faults in offshore gas pipelines. After a literature review of offshore pipelines worldwide, the thesis is involved with the potential geohazards with greater emphasis on the active seismic faults of the wider Mediterranean region. Afterwards, the finite element software ABAQUS is utilized in order to simulate (a) the rupture of normal and reverse faults through sedimentary layers and the subsequent permanent ground deformations on the seafloor, and (b) the distress of the pipeline when it is subjected to the aforementioned ground deformations. Factors, such as the properties of the fault, the geometrical and mechanical properties of the ruptured sedimentary formations, the pipeline characteristics and the hydrostatic pressure are analysed.

Finally, the thesis makes an effort to evaluate the study results in order to assess the magnitude of the problem and to briefly propose some mitigation measures, as well as suggestions for further research.



## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή

Η σύγχρονη κοινωνία είναι ενεργειακά εξαρτημένη σε μεγάλο βαθμό από τα ορυκτά καύσιμα. Λόγω αυτής της εξάρτησης έχουν ανακαλυφθεί τεχνολογίες και μέσα μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου τόσο σε επίπεδο χερσαίας μεταφοράς, όσο και σε υποθαλάσσιες. Πρόκειται για αγωγούς μεταφοράς που διατρέχουν την Ευρώπη με σημεία έναρξης την Ασία και την Αφρική. Είναι σαφές ότι η κατασκευή και λειτουργία αυτών των αγωγών συνδέεται με οικονομικά και πολιτικά συμφέροντα. Συνεπώς, όσο σημαντική είναι η κατασκευή υποθαλάσσιων αγωγών προκειμένου να επιτυγχάνεται η ασφαλής και χαμηλού κόστους παράδοση πετρελαίου, φυσικού αερίου και νερού, τόσο ανησυχητική είναι η όλη διαδικασία λόγω της έκθεσης αυτών των έργων σε κινδύνους και τις εξαιρετικά σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε ένα ενδεχόμενο ατύχημα.

Αν αναλογιστεί κανείς ότι η νότια Ευρώπη και ειδικότερα η λεκάνη της Μεσογείου στο ύψος της Ελλάδας και της Ιταλίας είναι ιδιαίτερος σεισμολογικός, λόγω της ύπαρξης ρηγμάτων, τεχνικά έργα τέτοιας κατηγορίας απαιτούν σωστό σχεδιασμό και τακτικό έλεγχο κατά την λειτουργία τους.

Σε αυτή την εργασία αρχικά δίνεται έμφαση στη λεκάνη της Μεσογείου καθώς εξετάζονται οι υφιστάμενοι υποθαλάσσιοι αγωγοί και οι γεωκίνδυνοι της ευρύτερης περιοχής. Καθώς η διάρρηξη σεισμικών ρηγμάτων ενδέχεται να προκαλέσει παραμορφώσεις στον αγωγό, στην συνέχεια πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις οι οποίες πραγματεύονται ζητήματα της μελέτης υποθαλάσσιων αγωγών και των προβλημάτων που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά την κατασκευή τους που είναι κατά κύριο λόγο η σεισμικότητα μίας περιοχής και ειδικά στην περιοχή της Μεσογείου.

Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε προσομοίωμα που αντιπροσωπεύει την διάρρηξη ενός ρήγματος σε ελεύθερο πεδίο όπου πάνω σε αυτό βρίσκεται ιζηματογενής στρώση. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση η οποία οδήγησε στην εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν τις επιφανειακές μετατοπίσεις της στρώσης. Οι βασικές παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν το πάχος και το υλικό της στρώσης, η γωνία διάρρηξης του ρήγματος, καθώς και το είδος του. Συγκεκριμένα στο τελευταίο εξετάστηκε μόνο το κανονικό και το ανάστροφο σεισμικό ρήγμα διότι το οριζοντιολισθητικό απαιτούσε προσομοίωμα τριών διαστάσεων, ενώ το προσομοίωμα που κατασκευάστηκε ήταν δύο διαστάσεων.

Στην συνέχεια δημιουργήθηκε ένα προσομοίωμα υποθαλάσσιου χαλύβδινου αγωγού φυσικού αερίου σταθερής εσωτερικής πίεσης και εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις:

- α) απευθείας επαφή του αγωγού με το ενεργό σεισμικό ρήγμα
- β) επαφή του αγωγού με την ιζηματογενή στρώση (χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης στο ελεύθερο πεδίο) όπου η τελευταία βρίσκεται πάνω σε ενεργό σεισμικό ρήγμα.

Και οι δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις αφορούν την διάρρηξη του ρήγματος αυτού, είτε βρίσκεται απευθείας κάτω από τον αγωγό, είτε κάτω από την ιζηματογενή στρώση

και εξετάζεται κατά πόσο επηρεάζεται ο αγωγός, πόσο δηλαδή παραμορφώνεται με την ύπαρξη ή μη της ιζηματογενούς στρώσης. Στόχος είναι να εξεταστεί εάν η ιζηματογενής στρώση μειώνει ή αυξάνει την παραμόρφωση σε έναν υποθαλάσσιο αγωγό ανάλογα με την γωνία διάρρηξης του ρήγματος, το πάχος της στρώσης, το είδος του ρήγματος, το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο αγωγός και γι' αυτό το λόγο εξετάζεται το πρόβλημα με διαφορετικές τιμές για όλες αυτές τις παραμέτρους. Επίσης, η αλληλεπίδραση μεταξύ του ρήγματος και του αγωγού, καθώς και του αγωγού και της ιζηματογενούς στρώσης προσομοιώθηκε με την χρήση εδαφικών ελατηρίων.

Το τεχνικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι να μελετήσει το πρόβλημα που υφίσταται σήμερα, δηλαδή τη δυσκολία κατασκευής υποθαλάσσιων αγωγών σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από έντονη σεισμικότητα και να εξεταστεί η δυνατότητα κατασκευής ενός υποθαλάσσιου αγωγού ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο αστοχίας του.

Για τη συγγραφή μελετήθηκαν επιστημονικά συγγράμματα, βιβλία, καθώς και διατριβές ανάλογης θεματολογίας. Επίσης, αντλήθηκαν πληροφορίες από επίσημες ιστοσελίδες σχετικές με τα ζητήματα που ερευνώνται. Στο τέλος της εργασίας παρατίθεται η βιβλιογραφία προκειμένου να ανατρέξει ο αναγνώστης, εφόσον το επιθυμεί.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Υποθαλάσσιοι Αγωγοί

### 2.1 Γενικά χαρακτηριστικά υποθαλάσσιων αγωγών

Ένας υποθαλάσσιος αγωγός, στα αγγλικά γνωστός με τις ορολογίες submarine/ marine/ subsea/ offshore pipeline, είναι ένας αγωγός που τοποθετείται επάνω στον πυθμένα της θάλασσας ή κάτω από αυτόν μέσα σε μια τάφρο. Οι αγωγοί αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μεταφορά πετρελαίου ή φυσικού αερίου, αλλά και τη μεταφορά νερού γεγονός εξίσου σημαντικό (Dean, 2010). Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί ανήκουν σε τρεις κύριες κατηγορίες (Harris, 2016):

- Αγωγοί εντός-πεδίου, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο από το σημείο εξόρυξης στο πεδίο συλλογής, επεξεργασίας και της περαιτέρω μεταφοράς.
- Αγωγοί εξαγωγής, οι οποίοι μεταφέρουν το αέριο και το πετρέλαιο στη ξηρά.
- Αγωγοί μεταφοράς, οι οποίοι δεν έχουν απαραίτητα σχέση με το πεδίο λειτουργίας, αλλά μεταφέρουν φυσικό αέριο ή πετρέλαιο μεταξύ δύο χερσαίων σημείων.

Συχνά οι αγωγοί μεταφοράς ταυτίζονται με τους αγωγούς εξαγωγής με την έννοια ότι καλύπτουν τη λειτουργία και των δυο κατηγοριών.

Κατά την κατασκευή σημαντικών αγωγών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πλήθος παραγόντων, όπως η υπεράκτια οικολογία, οι γεωκίνδυνοι και η περιβαλλοντική επιβάρυνση. Συχνά, για να συμπεριληφθούν επιτυχώς στη διαδικασία έργου, που αφορά υποθαλάσσιους αγωγούς, οι παραπάνω παράγοντες, απαιτείται η συνεργασία διεθνών διεπιστημονικών ομάδων.

Η διάμετρος των υποθαλάσσιων αγωγών κυμαίνεται γενικά, από 3 in (76 mm) για αγωγούς αερίου, έως 72 in (1800 mm) για γραμμές υψηλής χωρητικότητας. Το πάχος του τοιχώματος τυπικά, κυμαίνεται από 10 mm (0,39 in) έως 75 mm (3,0 in). Επίσης, το τοίχωμα του αγωγού πρέπει να είναι κατασκευασμένο από χάλυβα αντοχή υψηλής απόδοσης (350-500 MPa /50.000-70.000 psi), ενώ η συγκολλησιμότητα είναι ένα από τα βασικά κριτήρια επιλογής υλικού. Ο σωλήνας είναι σχεδιασμένος για ρευστά υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Η δομή είναι συχνά θωρακισμένη με επικαλύψεις ειδικών υλικών με στόχο τη προστασία του αγωγού από την εξωτερική διάβρωση. Επίσης, η επίστρωση από σκυρόδεμα ή υαλοβάμβακα (fiberglass) παρέχει περαιτέρω προστασία κατά της διάβρωσης. Επιπλέον, η προσθήκη επένδυσης σκυροδέματος είναι χρήσιμη διότι αντισταθμίζει την αρνητική άνωση του αγωγού, όταν μεταφέρει ουσίες χαμηλότερης πυκνότητας (Gerwick, 2007, Palmer & King, 2008).

Εσωτερικά δεν υπάρχει επικάλυψη του αγωγού για τη διευκόλυνση της ροής του πετρελαίου. Ωστόσο, στις περιπτώσεις μεταφοράς θαλασσινού νερού ή διαβρωτικών ουσιών, μπορεί να επικαλύπτεται με εποξικό υλικό, πολυουρεθάνη ή πολυαιθυλένιο. Μπορεί επίσης, να φέρει επένδυση από τσιμέντο. Στη βιομηχανία πετρελαίου, όπου οι

διαρροές είναι μη επιτρεπτές και οι αγωγοί υπόκεινται σε εσωτερικές πιέσεις, τυπικά της τάξης των 10 MPa (1500 psi), τα τμήματα ενώνονται με συγκολλήσεις πλήρους διείδυσης. Επίσης, χρησιμοποιούνται μηχανικές αρθρώσεις. Η ράβδος χυτού μετάλλου είναι μια συσκευή πρότυπο για αγωγό μεταφοράς, είτε στην ξηρά είτε στη θάλασσα. Χρησιμοποιείται για ελέγχους, υδροστατικής πίεσης, χτυπημάτων και πτυχώσεων επί των τοιχωμάτων στο εσωτερικό του σωλήνα, και για τη διεξαγωγή περιοδικού καθαρισμού και μικροεπισκευών (Gerwick, 2007, Palmer & King, 2008).

## 2.2 Οι μεγαλύτεροι υποθαλάσσιοι αγωγοί στην Ευρώπη και τον κόσμο

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι υποθαλάσσιοι αγωγοί είναι εξαιρετικής σημασίας τεχνικά έργα. Η ύπαρξή τους σχετίζεται με την επίτευξη μεταφοράς τριών στοιχείων:

- φυσικού αερίου
- πετρελαίου
- νερού

Είναι αντιληπτό λοιπόν ότι η επιλογή της διαδρομής είναι το κρισιμότερο σημείο στο σχεδιασμό ενός τέτοιου έργου και αυτό διότι σχετίζεται με τεράστια πολιτικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά ζητήματα και γεωκινδύνους. Όταν λοιπόν ξεκινάει ένα έργο τέτοιου χαρακτήρα και πριν την έναρξη της κατασκευής προηγείται ενδελεχής έρευνα που περιλαμβάνει τη μελέτη γεωλογικών χαρτών, βαθυμετρίας, διαγραμμάτων, αεροφωτογραφιών και δορυφορικών εικόνων, καθώς και πληροφορίες από τις αρχές πλοήγησης (Dean, 2010).

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν οι σπουδαιότεροι μέχρι σήμερα αγωγοί που βρίσκονται στην Ευρώπη και τον κόσμο. Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί μεταφοράς που χρησιμοποιούνται ειδικά για τη μεταφορά του φυσικού αερίου βρίσκονται κυρίως γύρω από τη Μεσόγειο, τη Βαλτική και τη Βόρεια Θάλασσα. Το εναρκτήριο έτος πολλών από αυτούς είναι το 2000.

Από τις παλαιότερες συνδέσεις βρίσκεται Βόρεια στην Ευρώπη, μεταξύ της Σκωτίας και της Βόρειας Ιρλανδίας, το 1996. Δύο χρόνια αργότερα, το 1998, ένα σύστημα διασύνδεσης κατασκευάστηκε μεταξύ του Βελγίου και του Ηνωμένου Βασιλείου. Προχωρώντας σε πιο σύγχρονες κατασκευές, το 2006, ο αγωγός Balgazand / Bacton Line (BBL) συνέδεσε τις Κάτω Χώρες και το Ηνωμένο Βασίλειο.

Τέλος, ο αγωγός Nord Stream (Εικ. 2.1) του οποίου τμήματα ολοκληρώθηκαν το 2011 και 2012, συνδέει μέσω της Βαλτικής, την Vyborg στη Ρωσική Ομοσπονδία και το Greifswald στη Γερμανία. Αυτός είναι και ο μεγαλύτερος αγωγός μεταφοράς φυσικού αερίου στον κόσμο (μήκος 1.222 km). Κατά τις διαπραγματεύσεις πολλά ζητήματα τέθηκαν σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω του μεγάλου όγκου του, ενώ ιδιαίτερα προβλήματα προέκυψαν και έπρεπε άμεσα να αντιμετωπιστούν λόγω των

πυρομαχικών που είχαν αποθεθεί κατά το Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο στη Βαλτική (Simcock & Wang, 2016).



**Εικόνα 2.1:** Ο χάρτης διαδρομής του υποθαλάσσιου αγωγού Nord Stream

**Πηγή:** (<https://arcticecon.wordpress.com/2012/07/14/the-nord-stream-pipeline-bringing-russian-natural-gas-to-europe/>)

Η συμφωνία για τον αγωγό Blue Stream επεγράφη το 1998. Το μήκος του προβλεπόμενου υποθαλάσσιου αγωγού ήταν μήκους 396 km ο οποίος θα διέρχεται από τη Μαύρη Θάλασσα συνδέοντας άμεσα το ρωσικό με το τουρκικό δίκτυο φυσικού αερίου. Η ολοκλήρωση του έργου πραγματοποιήθηκε το 2005. Η ετήσια παραγωγική ικανότητα του αγωγού ήταν 16 δις.  $m^3$  ετησίως το 2014 με πρόβλεψη να φτάσει τα 19. Η μέγιστη μεταφορική ικανότητα του αγωγού υπολογιζόταν για το 2010 ότι θα ανερχόταν στα 16 δις  $m^3$  ετησίως, στόχος που επετεύχθη. Με τον συγκεκριμένο αγωγό η θέση της Ρωσίας ισχυροποιήθηκε στην ραγδαία αναπτυσσόμενη τουρκική αγορά φυσικού αερίου, και ενισχύθηκε έναντι ανταγωνιστών, όπως το Ιράν και τις χώρες της Κασπίας και της Κεντρικής Ασίας (Tricarico, 2001).

Ο αγωγός αερίου του Νοτίου Καυκάσου συνδέει τα υποθαλάσσια κοιτάσματα του Αζερμπαϊτζάν στην Κασπία με τη Γεωργία και την Τουρκία. Ο αγωγός λειτουργεί από το 2006 και τροφοδοτεί την Τουρκία με 8,8 δις  $m^3$  ετησίως (Tricarico, 2001).

Υπάρχουν επίσης, μια σειρά από αγωγούς φυσικού αερίου που συνδέουν τη νορβηγική παραγωγή φυσικού αερίου με τις εξαγωγικές αγορές της. Το ανάντη νορβηγικό σύστημα μεταφοράς φυσικού αερίου αναπτύχθηκε ήδη από τη δεκαετία του 1970, και εξακολουθεί να αναπτύσσεται και να μεριμνά για τη μεταφορά του φυσικού αερίου που παράγεται στη νορβηγική υφαλοκρηπίδα. Η Νορβηγική εγχώρια κατανάλωση φυσικού αερίου είναι περιορισμένη. Σχεδόν όλο το αέριο που παράγεται εξάγεται (101.000 εκατομμύρια  $m^3$ ) στις ευρωπαϊκές αγορές φυσικού αερίου μέσω των τερματικών εκφόρτωσης στο Βέλγιο,

τη Γαλλία, τη Γερμανία και το Ηνωμένο Βασίλειο. Αυτό το δίκτυο αγωγών, το 2014, αποτελούνταν από 7.980 km ολοκληρωμένου συστήματος, που μεταφέρουν αέριο από σχεδόν 60 υπεράκτια πεδία και τρία μεγάλα σημεία επεξεργασίας φυσικού αερίου στη νορβηγική ηπειρωτική χώρα, προς τις ευρωπαϊκές αγορές φυσικού αερίου. Η τελευταία κύρια προσθήκη στο σύστημα είναι ο αγωγός Langeled (Εικ. 2.2), με έτος έναρξης της λειτουργίας του το 2007. Ο αγωγός αυτός συνδέει το χερσαίο εργοστάσιο επεξεργασίας φυσικού αερίου Ormen Lange, στη Νορβηγία, με το Ηνωμένο Βασίλειο, μέσω μιας πλατφόρμας ανύψωσης στο πεδίο Sleipner. R. (Bruschi et al., 2008).



**Εικόνα 2.2:** Ο χάρτης διαδρομής του υποθαλάσσιου αγωγού Langeled

**Πηγή:** ([http://en.hartcomm.org/hcp/tech/applications/applications\\_success\\_statoil\\_clip\\_image008.jpg](http://en.hartcomm.org/hcp/tech/applications/applications_success_statoil_clip_image008.jpg))

Ο αγωγός έχει μήκος 1.166 km (745 mi) και παρέχει 26 δισεκατομμύρια  $m^3$  (900 δισεκατομμύρια  $ft^3$ ) φυσικού αερίου στο Ηνωμένο Βασίλειο κάθε χρόνο. Η κατασκευή του αγωγού ήταν μια τεράστια τεχνολογική πρόκληση. Ο πυθμένας της Βόρειας Θάλασσας δεν είναι επίπεδος, αλλά περιλαμβάνει μια σειρά από επικίνδυνα για ένα τέτοιο εγχείρημα χαρακτηριστικά, όπως είναι μια σειρά από κανάλια, τάφρους, και κορυφογραμμές και σεισμογενή δραστηριότητα λόγω της κυκλικής τεκτονικής πλάκας, για να μην αναφερθούν μια σειρά υφιστάμενων αγωγών που αποτελούν επιπλέον πρόβλημα. Τέλος, υπάρχουν αγωγοί μεταφοράς πετρελαίου μεταξύ της Ινδονησίας και της Σιγκαπούρης διαμέσου των Στενών της Malacca, και στην Κίνα, που συνδέει το νησί της Χαϊνάν στο Χονγκ Κονγκ. Σε γενικές γραμμές, αυτοί οι υποθαλάσσιοι αγωγοί μεταφοράς έχουν κατασκευαστεί και χρηματοδοτηθεί από φορείς εκμετάλλευσης πετρελαίου και φυσικού αερίου (συμπεριλαμβανομένων και των εθνικών εταιρειών πετρελαίου και φυσικού αερίου), μερικές φορές κατασκευάζονται από κοινοπραξίες μεταξύ ιδιωτικών εταιρειών και το δημόσιο.

### Υποθαλάσσιοι αγωγοί μεταφοράς νερού

Λόγω του υψηλού κόστους και των δυσκολιών συντήρησης, οι υποθαλάσσιοι αγωγοί χρησιμοποιούνται μόνο για την παροχή νερού σε μικρά νησιά κοντά σε ηπείρους ή μεγαλύτερα νησιά, όπου τα φυσικά αποθέματα του νερού των νησιών δεν επαρκεί για τις ανάγκες των κατοίκων. Το σημαντικότερο διεθνές παράδειγμα αγωγών αυτής της περίπτωσης αγωγών είναι αυτοί της Μαλαισίας προς τη Σιγκαπούρη από τη Μαλαισία (PUB, 2014). Άλλα παραδείγματα είναι της Κίνας (όπου τα νησιά Xiamen δέχεται κάποια ποσότητα νερού, από την ηπειρωτική χώρα μέσω υποθαλάσσιου αγωγού 2,3 km), των νησιών Φίτζι (όπου τα πολλά μικρά τουριστικά νησιά λαμβάνουν τις προμήθειες τους σε νερό, μέσω υποθαλάσσιων αγωγών), της Μαλαισία (όπου η Penang λαμβάνει μέρος του απαιτούμενου νερού από τη χέρσα Μαλαισία, μέσω 3,5 km υποβρυχίων αγωγών), των Σεϋχέλλων (όπου η προμήθεια νερού των πέντε μικρών νησιών γίνεται μέσω υποθαλάσσιων αγωγών μήκους μέχρι 5 km) και σημαντικότερο παράδειγμα αυτό του πυκνοκατοικημένου Χονγκ Κονγκ, το οποίο λαμβάνει νερό από την ηπειρωτική Κίνα μέσω υποθαλάσσιων αγωγών 1,3 km (UNESCO, 1991). Τέλος, ενδιαφέρον είναι το παράδειγμα του νησιού της Κύπρου, ένα από τα πιο προβληματικά σε σχέση με το νερό νησιά παγκοσμίως.



**Εικόνα 2.3:** Αγωγός μεταφοράς νερού από την Τουρκία στην Κατεχόμενη Κύπρο

**Πηγή:** ([https://anatolikotera.files.wordpress.com/2015/10/kkcnin-50-yillik-suyunu-karsilayacak-projedersona-gelindi\\_4548\\_dhaphoto8.jpg](https://anatolikotera.files.wordpress.com/2015/10/kkcnin-50-yillik-suyunu-karsilayacak-projedersona-gelindi_4548_dhaphoto8.jpg))

Συγκεκριμένα, η Τουρκία επιχείρησε, με ένα αγωγό μήκους 107 km, να αντλήσει νερό από τον ποταμό Ντράγκον (Dragon) και να ενώσει την τουρκική ενδοχώρα με την κατεχόμενη Κύπρο μέσω της Μεσογείου Θάλασσας. Το έργο ολοκληρώθηκε το 2015 και αποτελεί μέχρι στιγμής τον μεγαλύτερο υποθαλάσσιο αγωγό μεταφοράς νερού



παγκοσμίως. Αν και το συγκεκριμένο έργο δεν εμπίπτει στην κατηγορία αγωγών που μελετούνται εδώ, καθώς δεν εδράζεται στον θαλάσσιο πυθμένα, αλλά βρίσκεται 280 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, αξίζει να αναφερθεί λόγω του μεγέθους του.

### 2.3 Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί στη Μεσόγειο

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δοθούν πληροφορίες σε σχέση με τους υποθαλάσσιους αγωγούς που βρίσκονται στη περιοχή της Μεσογείου. Οι αγωγοί αυτοί, έξι στον αριθμό, λειτουργούν ή βρίσκονται στο στάδιο της κατασκευής. Πρόκειται για αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου από την Αλγερία και τη Λιβύη στην Ιταλία και την Ισπανία και μέσω αυτών στην υπόλοιπη Ευρώπη (Εικ. 2.4).



**Εικόνα 2.4:** Ο χάρτης διαδρομής των κυριότερων υποθαλάσσιων αγωγών στη Μεσόγειο  
 Πηγή: (<https://s3.amazonaws.com/pgj-wp-media/wp-content/uploads/sites/2/2014/12/fig1.jpg>)



### **Αγωγός Trans-Mediterranean**

Στη Μεσόγειο, ο παλαιότερος αγωγός φυσικού αερίου είναι ο αγωγός Trans-Mediterranean (TransMed), που από το 2000 πήρε τη ονομασία Enrico Mattei. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 1983 με στόχο να συνδέσει την Αλγερία και την ιταλική ενδοχώρα, μέσω της Σικελίας. Η δεύτερη φάση κατασκευής διήρκησε από το 1991 έως το 1994. Ο TransMed το 2011 ήταν δυναμικότητας φυσικού αερίου 24 bcm, με στόχο τα 33,5 bcm για το 2012 (Mark, 2004).

Το πολύ μεγάλο τμήμα εξόρυξης φυσικού αερίου Hassi R'mel, αποτελεί αφετηρία του αλγερινού τμήματος του αγωγού και η εξάπλωση του είναι για 550 km μέχρι τα σύνορα με την χώρα της Τυνησίας, όπου εκεί υπάρχει ένας σταθμός συμπίεσης και δύο γραμμές διαμέτρου 48 ιντσών. Η Αλγερινή εταιρία Sonatrach έχει την εποπτεία της λειτουργίας αυτού του τμήματος, ενώ το τμήμα αγωγού της Τυνησίας ανήκει στην εταιρία Sotugat, με μήκος 370 km.

Το υποθαλάσσιο τμήμα του αγωγού, 155 km, ξεκινά από το Στενό της Σικελίας με 3 γραμμές διαμέτρου 20 in και 2 γραμμές διαμέτρου 26 in. Την ευθύνη για το λειτουργικό μέρος αυτού του τμήματος, την έχουν η κοινοπραξία της ιταλικής ENI (Ente Nazionale Idrocarburi) και της αλγερινής Sonatrach και ονομάζεται TMPC (Trans Mediterranean Pipeline Company). Η έναρξη του συγκεκριμένου τμήματος είναι στην πόλη El Haouaria, στην περιοχή της χερσονήσου Cap Bon (ή Sharik) στο βορειοανατολικό άκρο της Τυνησίας και η αφετηρία του στην πόλη Mazara del Vallo στο νοτιοδυτικό τμήμα της Σικελίας.

Στη Σικελία ο αγωγός περιέχει και ένα ακόμα θαλάσσιο τμήμα μήκους 15 km στα Στενά της Μεσσήνας (15 km) εξακολουθεί να πορεύεται, μέχρι την κοιλάδα του ποταμού Πάδου (Po Valley) στο βόρειο τμήμα της Ιταλίας, στις εγκαταστάσεις της εταιρίας Po Valley Energy, αυστραλιανών συμφερόντων (Mark, 2004).

### **Αγωγός φυσικού αερίου Maghreb–Europe**

Τον Νοέμβριο του 1996, ξεκίνησε τη λειτουργία του, ο ευρωπαϊκός αγωγός Maghreb (MEG) ούτως ώστε να συνδεθεί το Μαρόκο με την Ισπανία μέσω του Στενού του Γιβραλτάρ. Μεταφέρει φυσικό αέριο, είναι μήκους 1.450 km και συνδέει το πεδίο εξόρυξης Hassi R'mel, με την περιοχή Κόρντομπα στην Ανδαλουσία της Ισπανίας, με σημείο σύνδεσης το Μαρόκο. Έπειτα, ακολουθεί η σύνδεση με ισπανικά και πορτογαλικά δίκτυα διανομής φυσικού αερίου.

Διαθέτει ετήσια δυναμικότητά 8,6 bcm φυσικού αερίου, ενώ το κόστος κατασκευής του ανήλθε στα 2,3 δισεκατομμύρια δολάρια. Το υποθαλάσσιο τμήμα, που είναι και το αντικείμενο ενδιαφέροντος της εργασίας, διαθέτει αγωγό διαμέτρου 22 in και αποτελεί τμήμα σύνδεσης των δυο ακτών του Στενού του Γιβλαρτάρ, μήκους 45 km και του Μαρόκο (Mark, 2004).

### **Αγωγός φυσικού αερίου Greenstream**

Η ιδέα του φυσικού αερίου από τη Λιβύη προς την Ιταλία ξεκίνησε από τη δεκαετία του 1970 και στη συνέχεια μελέτες σκοπιμότητας και εφικτότητας πραγματοποιήθηκαν στη δεκαετία του 1980 και του 1990.

Ο συγκεκριμένος αγωγός Greenstream, αποτελεί τμήμα του έργου Western Libyan Gas που είναι το κύριο πρόγραμμα εκμετάλλευσης του φυσικού αερίου που παράγεται στη Λιβύη μέσω της εξαγωγής στην Ευρώπη. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα υποθαλάσσιο αγωγό από τη Λιβύη προς την Ιταλία. Κατασκευάστηκε στη Μεσόγειο και κατατάσσεται πρώτος στη λίστα των μεγαλύτερων σε μήκος υποθαλάσσιων αγωγών.

Ο αγωγός Greenstream είναι μήκους 540 km (340 mi), διατρέχει την απόσταση από τη Mellitah στη Λιβύη μέχρι τη Gela, στη Σικελία. Υποθαλάσσια βρίσκεται σε βάθος νερού άνω των 1.100 m (3.600 ft). Η διάμετρος του είναι 32 in και η δυναμικότητα του 8 bcm ετησίως.

Η μεταφορά του φυσικού αερίου από τον συγκεκριμένο αγωγό Greenstream, γίνεται από δύο λιβυκά πεδία εξόρυξης: το Bahr Essalam, σε θαλάσσια περιοχή 110 χιλιομέτρων από την μεσογειακή ακτή και το Wafa, κοντά σε αλγερινά σύνορα αλγερινών συνόρων, σε απόσταση 530 km από τη Mellitah. Η έναρξη των εργασιών σημειώθηκε το 2003, ενώ η ολοκλήρωση του έργου το Φεβρουάριο του 2004 (Slaughter, 2009).

### **Αγωγός φυσικού αερίου Medgaz**

Ο αγωγός Medgaz αποτελεί έργο μεγάλης σημασίας και αυτό διαφαίνεται από το πλήθος των εταιριών που εμπλέκονται στην εκμετάλλευση του. Η εταιρία CEPSA της Ισπανίας και η αλγερινή Sonatrach, διαθέτουν το 20% η κάθε μια των μετοχών, ενώ συμμετέχουν ακόμα οι γαλλικές TOTAL και Gaz de France, η ισπανικές Endesa και Iberdrola και η βρετανική BP, με 12% για την κάθε μία. Επίσης, η Ευρωπαϊκή Ένωση αποδέχθηκε το σχέδιο κατασκευής του Medgaz χαρακτηρίζοντάς το «Έργο κοινού ενδιαφέροντος στο πλαίσιο των διευρωπαϊκών δικτύων στον τομέα της ενέργειας» (Medgaz, 2011).

Η κατασκευή του υποθαλάσσιου αγωγού στοχεύει στη σύνδεση της ακτής της Αλγερίας με την απέναντι ακτή της Ισπανίας. Το μήκος αυτού είναι 200 km περίπου και διαμέτρου 24 in, σε μέγιστο βάθος 2.160 m. Αρχικά προβλεπόταν πως η δυναμικότητα του αγωγού θα ήταν 8 bcm φυσικού αερίου το χρόνο.

Το 2004, έπειτα από τη συνεννόηση μεταξύ χωρών και εταιριών και ύστερα από μελέτη του βυθού, που χαρακτηρίζεται υψίστης σημασίας, προκειμένου να συνταχθούν τα σχετικά σχέδια, πάρθηκε η απόφαση για το κατασκευαστικό σημείο του υποθαλάσσιου τμήματος. Το 2007 ξεκίνησαν οι εργασίες και ολοκληρώθηκαν μετά από δυο χρόνια (Medgaz, 2011).

### **Αγωγός φυσικού αερίου GALSI**

Το 2009 ξεκίνησε τη λειτουργία του ο αγωγός φυσικού αερίου GALSI (Gas-pipeline Algeria-Sardinia-Italy) για να καταστεί δυνατή η σύνδεση της Αλγερίας με την Ιταλία διαμέσου της Σαρδηνίας. Έχει διάμετρο 22 έως 48 in, ενώ η αρχική δυναμικότητά του είναι 9-10 bcm φυσικού αερίου το χρόνο. Ξεκινά από το αλγερινό πεδίο Hassi R'mel, και έπειτα από 640 χιλιόμετρα φτάνει στο λιμάνι El Kala στη μεσογειακή ακτή, 16 km δυτικά των τунησιακών συνόρων, ακριβώς απέναντι από τη νότια ακτή της Σαρδηνίας.

Όσον αφορά το υποθαλάσσιο τμήμα του αγωγού, έχει μήκος 310 km και αποτελείται από δύο σκέλη. Επιπλέον, το μέγιστο βάθος του φτάνει τα 1.950 m και ενώνει το λιμάνι El Kala με το Κάλιαρι της Σαρδηνίας. Από το σημείο εκείνο και για 300 km ο αγωγός διατρέχει τη νήσο από το νότο μέχρι το βορρά, έως την Όλμπια. Γίνεται γνωστό, πως αυτό το τμήμα που συνδέει τη Σαρδηνία με την ιταλική ενδοχώρα, έχει μήκος 280 km, μέγιστου βάθους 900 m με τελικό προορισμό την κομμόπολη Castiglione della Pescaia της Τοσκάνης. Από εκεί διοχετεύεται στη Βόρεια Ιταλία και στη συνέχεια στις αγορές της Ευρώπης (Edison, 2007).

### **Αγωγός φυσικού αερίου NIGAL: από την υπο-Σαχάρα Αφρική στη Μεσόγειο**

Ο αγωγός NIGAL, ή αλλιώς και Trans-African και Trans-Saharan, συνδέει την πόλη Warri νότια της Νιγηρίας, με την μεσογειακή ακτή της Αλγερίας. Είναι μια κατάλληλη περίπτωση για να διαφοροποιεί τις προμήθειες φυσικού αερίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Με μήκος 4.400 km διασχίζει το έδαφος της Νιγηρίας σε μήκος περίπου 1.300 km, το έδαφος του Νίγηρα σε μήκος 750 km και της Αλγερίας σε μήκος 2.500 km. Η ετήσια δυναμικότητα του αγωγού θα είναι έως και 30 δισεκατομμύρια m<sup>3</sup> φυσικού αερίου. Η διάμετρος του αγωγού θα κυμανθεί από 48 έως 56 in (1,220 έως 1.420 mm). Η επένδυση του αγωγού θα είναι περίπου US \$ 10 δις και για τα κέντρα συγκέντρωσης αερίου περίπου 3 δισεκατομμύρια \$ (R. Fabi, 2009)

Ο αγωγός όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ξεκινά από την περιοχή Warri στη Νιγηρία μέχρι το πεδίο Hassi R'Mel στην Αλγερία. Εκεί ο αγωγός θα συνδεθεί με τους υπάρχοντες αγωγούς, Trans-Mediterranean, Maghreb-Europe, Medgaz και Galsi (Binniyat, 2008).

Ο προτεινόμενος αγωγός φυσικού αερίου θα αποτελείται από 1037 χιλιάδες km από τη Νιγηρία στα σύνορα του Νίγηρα, 841 km από το Νίγηρα στην Αλγερία, 2303 χιλιόμετρα σε όλη την Αλγερία και 220 km από την Αλγερία στην Ισπανία (Africa progress panel, 2013). Αναμένεται να τεθεί σε λειτουργία το 2018. Αρχικά, ο στόχος ήταν το 2015, αλλά οι εργασίες δεν προχωρούν με τον προβλεπόμενο ρυθμό, λόγω πολιτικής αστάθειας και των τρομοκρατικών κινημάτων που επικρατούν συχνά την περιοχή.

## 2.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υποθαλάσσιων αγωγών

Σήμερα, στην εξαρτώμενη από τα ορυκτά καύσιμα κοινωνία μας, η μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου μέσω υποθαλάσσιων αγωγών αποτελεί σημαντικό κρίκο στην αλυσίδα της βιομηχανίας πετρελαίου και αερίου. Όσο σημαντική είναι για μία μερίδα, η κατασκευή υποθαλάσσιων αγωγών προκειμένου να επιτυγχάνεται η ασφαλής και χαμηλού κόστους παράδοση πετρελαίου και φυσικού αερίου, τόσο ανήσυχο είναι το αντίπαλο δέος, σε σχέση με τους δυνητικούς κινδύνους μιας περιβαλλοντικής καταστροφής από την κατασκευή ενός αγωγού. Να σημειωθεί εδώ, ότι ενώ οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις με την κατασκευή αγωγού είναι εν γένει σχετικά χαμηλές, η εκμετάλλευση των αγωγών έχει στη συνέχεια ένα δυναμικό υψηλού κινδύνου που συνδέεται με βλάβες του αγωγού.

Η κατασκευή αγωγού είναι μια περίπλοκη διαδικασία και έχει τεράστια αρνητική επίδραση στη θαλάσσια ζωή κατά μήκος των αγωγών (χιλιάδες χιλιόμετρα). Κατά τη διαδικασία της εγκατάστασής τους, είτε τοποθετούνται απευθείας πάνω στο βυθό της θάλασσας, είτε θάβονται σε τάφρους. Δηλαδή, σκάβονται τάφροι για την ταφή του αγωγού διαταράσσοντας ταυτόχρονα τη θαλάσσια ζωή κατά τη διαδικασία της εγκατάστασης. Σε περιοχές με μαλακά ιζήματα τα οικοσυστήματα χρειάζονται ένα ή δύο χρόνια ώστε να ανακάμψουν. Ωστόσο, σε σκληρό υπόστρωμα αυτή η διαδικασία μπορεί να διαρκέσει έως και 10 έτη. Ο αριθμός αυτός αυξάνεται με την αύξηση του βάθους και τη μείωση της θερμοκρασίας.

Από τη άλλη, υπάρχει η άποψη ότι μακροπρόθεσμα, οι αγωγοί χρησιμεύουν ως καταφύγιο για την ανάπτυξη νέας θαλάσσιας ζωής και ως βιότοπος νέων ειδών υδρόβιων οργανισμών. Ωστόσο, είναι γεγονός ότι ακόμη και οι μικρότερες αλλαγές στα οικοσυστήματα πλανητικού μπορούν να οδηγήσουν σε μεταβολή της τροφικής αλυσίδας και να εμποδίσουν την οικονομική ανάπτυξη των παράκτιων κοινοτήτων που εξαρτώνται από την αλιεία. Σημαντικότερο των παραπάνω είναι ότι η κατασκευή χερσαίων αγωγών θα μπορούσε να οδηγήσει σε αποψίλωση των δασών, υποβάθμιση της βλάστησης και διατάραξη της παράκτιας άγριας ζωής (Akhmetkaliyeva, 2015).

Ενώ οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω των διεργασιών κατασκευής του αγωγού είναι αρκετά σημαντικές, το χειρότερο σενάριο σχετίζεται με τη αστοχία αγωγού η οποία θα μπορούσε να προκαλέσει διαρροή πολλών βαρελιών πετρελαίου στα θαλάσσια ύδατα, με όσο μεγαλύτερο σωλήνα, τόσο μεγαλύτερο κίνδυνο περιβαλλοντικής καταστροφής. Οι παράγοντες που επιδρούν δραματικά σε ένα φαινόμενο θραύσης αγωγού είναι η πίεση και οι αποκλίσεις της θερμοκρασίας.

Η χημική σύνθεση του πεπιεσμένου αερίου και νερού θα μπορούσε να οδηγήσει σε διάβρωση των σωλήνων. Για παράδειγμα, τα νερά της Μαύρης Θάλασσας σε βάθη από 100 έως 200 m περιέχουν διαλυμένο υδρόθειο, το οποίο θα μπορούσε να διαβρώσει τον χάλυβα των αγωγών (Tricarico, 2001). Επιπλέον, ο γεωλογικός σχηματισμός του βυθού είναι ένα άλλο θέμα που απασχολεί. Για παράδειγμα, η Μαύρη Θάλασσα έχει απότομες κλίσεις, υψηλή σεισμική δραστηριότητα και σε συνδυασμό με την απειλή της εξαέρωσης

των ένυδρων αερίων δημιουργούν δυνητικά κίνδυνο για την υδραυλική σφράγιση του αγωγού. Ομοίως, η αλλοίωση της τοπογραφίας του βυθού και οι αρχικές ανωμαλίες αυτού θα μπορούσαν, λόγω έλλειψης στήριξης, να οδηγήσουν σε ανάπτυξη ελεύθερων ανοιγμάτων, σε περιοχές όπου η επιφάνεια του αγωγού βρίσκεται σε τάφρο. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για μαλακά ιζήματα.

Σε περίπτωση αγωγού μεταφοράς συμπιεσμένου αερίου υπάρχει κίνδυνος έκρηξης μεγάλης κλίμακας. Περισσότερο να αναφερθεί ότι τυχόν εκπομπές αερίων οδηγούν σε υποβάθμιση της ποιότητας του νερού, του αέρα και των οικοσυστημάτων. Στην περίπτωση του αγωγού Blue Stream, αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο για τα πρώτα 80-90 km του σωλήνα στη Ρωσική ακτή, όπου η πίεση του αερίου υπερβαίνει την υδροστατική πίεση (Tricarico, 2001). Ενώ η διαρροή αερίου κοντά σε παράκτιες περιοχές οδηγεί σε εκπομπές αερίων και εκρήξεις, η καταστροφή του αγωγού σε βαθιά τμήματα της θάλασσας οδηγεί στο σχηματισμό ένυδρων αερίων λόγω της υψηλής υδροστατικής πίεσης. Αποτέλεσμα είναι να τεθούν σε κίνδυνο η ανθρώπινη υγεία και η ασφάλεια σε περιπτώσεις διαφυγής αερίου. Ως εκ τούτου, είναι σημαντική η πρόληψη ατυχημάτων και όχι η αντιμετώπιση των συνεπειών της καταστροφής.

Η γνώση και η αναγνώριση του προβλήματος είναι το πρώτο βήμα σε μια δράση μετριασμού των κινδύνων που σχετίζονται με αστοχία αγωγού. Καταρχάς, η υλοποίηση του έργου κατασκευής του αγωγού ξεκινά με τη Μελέτη Εκτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων και τη Μελέτη Κοινωνικών και Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων ώστε να εκτιμηθεί η σημαντικότητα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων λόγω του έργου, προτού αυτό εγκριθεί. Επιπλέον, υπάρχουν διάφοροι τρόποι μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την κατασκευή του αγωγού, όπως για παράδειγμα η επιλογή των διαδρομών του αγωγού, λαμβάνοντας υπόψη τα γεωλογικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του βυθού, με στόχο την ελάχιστη δυνατή διαταραχή της παράκτιας και θαλάσσιας ζωής και βλάστησης. Ομοίως, η εφαρμογή των νέων τεχνολογιών κατασκευής αγωγών μειώνει τον κίνδυνο αστοχίας τους κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσής τους. Σήμερα η εγκατάσταση αγωγών υψηλής ποιότητας που κατασκευάζονται από ανθεκτικά στη διάβρωση κράματα χάλυβα έχουν την ικανότητα να αντέχουν σε υψηλές ασκούμενες πιέσεις. Ένας άλλος τρόπος μετριασμού είναι η ενίσχυση των αγωγών που βρίσκονται κοντά στην ακτή με επικάλυψη σκυροδέματος, προκειμένου να αποφευχθούν εξωτερικές ζημιές από πλοία και διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες. Λόγω της εφαρμογής αυτών των νέων τεχνολογιών, οι βλάβες ή αστοχίες αγωγών γίνονται όλο και σπανιότερα. Ωστόσο, το συνολικό μήκος των αγωγών αυξάνεται κατά 6% ετησίως, με αποτέλεσμα την αύξηση του κινδύνου μίας καταστροφής (Williams, 2012). Τέλος, ο αριθμός εκπομπών αερίου ανά μονάδα μήκους των αγωγών μειώνεται, γεγονός ελπιδοφόρο για την ασφάλεια των υποθαλάσσιων αγωγών.



## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Υποθαλάσσιοι Γεωκίνδυνοι

### 3.1 Εισαγωγή

Ως γεωλογικοί κίνδυνοι ή γεωκίνδυνοι ορίζεται το σύνολο των γεωλογικών ή τεκτονικών συνθηκών, διεργασιών, φαινομένων ή δραστηριοτήτων που θέτουν σε κίνδυνο την ασφάλεια και την ακεραιότητα τμήματος ή του συνόλου μιας περιοχής.

Πλήθος γεωκινδύνων συνδέεται με τη μηχανική του θαλάσσιου πυθμένα και η εμφάνιση των συνεπειών τους είναι πιο έντονη σε μεγάλα βάθη. Μια αρχική κατηγοριοποίηση των γεωκινδύνων είναι η ακόλουθη (Randolph & Gourvenec, 2011):

- α) Ακαριαία φαινόμενα: Πρόκειται για σπάνια, αλλά επεισοδιακού χαρακτήρα, φαινόμενα. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι σεισμοί και τα συνδεδόμενα με αυτούς φαινόμενα, όπως οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, οι τυρβώδεις ροές και η αποβολή αερίων.
- β) Μακροχρόνια φαινόμενα: Αφορά συνθήκες που ευνοούν αργές διαδικασίες προοδευτικού χαρακτήρα, όπως είναι ο ερπυσμός για παράδειγμα.

Οι γεωλογικοί κίνδυνοι μπορούν να διακριθούν σε φυσικούς ή ανθρωπογενείς. Οι φυσικοί γεωκίνδυνοι χαρακτηρίζονται από την ένταση και τη χρονική κατανομή, δηλαδή τη συχνότητα εκδήλωσής τους, δύναται να υπάρχει συσχετισμός μεταξύ τους ή να προκληθούν χάρη στην ύπαρξη κάποιων άλλων (Sakellariou et al., 2011). Οι ανθρωπογενείς γεωκίνδυνοι προκύπτουν από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και των τρόπο που αυτές αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, αυτές οι αλληλεπιδράσεις μπορούν να προκαλέσουν επιτάχυνση ή μεταβολή των φυσικών γεωλογικών συστημάτων. Το χαρακτηριστικό των ανθρωπογενών γεωκινδύνων είναι ότι πρόκειται για βραδείας εξέλιξης φαινόμενα και συνήθως ελεγχόμενα, με αποτέλεσμα τον περιορισμό, εξάλειψη ή αποφυγή τους.

Η συχνότητα εκδήλωσης ενός γεωκινδύνου εξαρτάται κυρίως από τη μορφολογία του πυθμένα και τις επικρατούσες συνθήκες σε αυτόν. Συγκεκριμένα, ο κίνδυνος εμφάνισης ενός φαινομένου σε μια περιοχή μπορεί να είναι χαμηλού επιπέδου, μέχρι ενεργοποίησής του από ανθρώπινες δραστηριότητες. Επίσης, οι συνθήκες του πυθμένα πιθανόν να ευνοούν κινδύνους υψηλού επιπέδου εξαιτίας συχνών μετακινήσεων, αλλά αν δεν υπάρχει ανάπτυξη του φαινομένου στη γύρω περιοχή, σημειώνεται μείωση της πιθανότητας εμφάνισης (Randolph & Gourvenec, 2011).

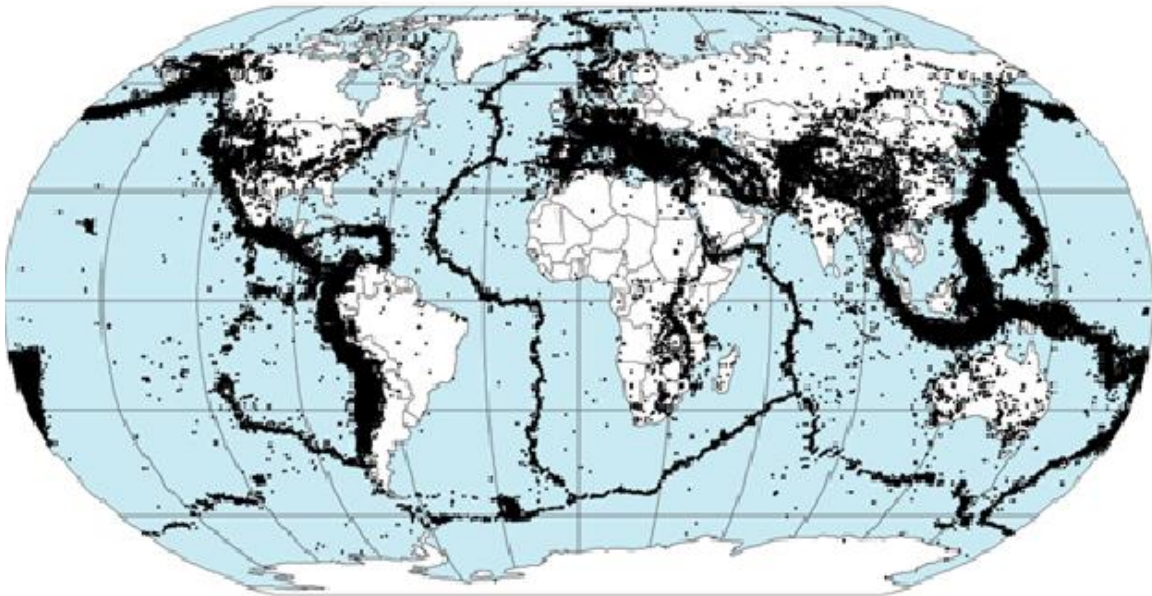
### 3.2 Σημαντικότεροι γεωκίνδυνοι

Στην κατηγορία των υποθαλάσσιων γεωκινδύνων περιλαμβάνονται αστοχίες πρανών, τεκτονικές και μη τεκτονικές αστοχίες, ισχυρές σεισμικές δονήσεις του πυθμένα και ρευστοποιήσεις των ιζημάτων αυτού, ηφαίστεια λάσπης, αέρια και υδρίτες αερίων. Οι

υδροδυναμικές δυνάμεις λόγω τσουνάμι, δράσεως των κυμάτων και του είδους των υλικών του πυθμένα μπορούν επίσης να προκαλέσουν προβλήματα σε θαλάσσια τεχνικά έργα (Randolph & Gourvenec, 2011). Ακολούθως θα αναφερθούν μερικοί από τους σημαντικότερους γεωκινδύνους και συγκεκριμένα οι σεισμοί, τα ηφαίστεια και οι κατολισθήσεις.

### 3.2.1 Σεισμοί

Ένας σεισμός είναι η «εκτόνωση» της τάσης δηλαδή της πίεσης που εφαρμόζεται στην επιφάνεια ενός ρήγματος. Η συχνότητα του φαινομένου αυξάνεται διαμήκους των ορίων των τεκτονικών πλακών, ωστόσο δεν αποκλείεται η εμφάνισή τους οπουδήποτε αλλού. Το εν λόγω φαινόμενο εκδηλώνεται συνήθως απροειδοποίητα χωρίς δυνατότητα αποτροπής. Οι σεισμοί, παρά τη μικρή τους διάρκεια, μπορούν να προκαλέσουν ανυπολόγιστες ζημιές σε κάθε είδους κατασκευή που θα υποβληθεί στη σεισμική καταπόνηση, καθώς και τεράστιες απώλειες ζωών. Επίσης, υπάρχει πιθανότητα πρόκλησης άλλων φυσικών κινδύνων υψηλής επικινδυνότητας (π.χ. τσουνάμι) (Papadopoulos, et al., 2007).



**Εικόνα 3.1:** Παγκόσμια σεισμική δραστηριότητα 1963-1998

**Πηγή:** ([https://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake#/media/File:Quake\\_epicenters\\_1963-98.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake#/media/File:Quake_epicenters_1963-98.png))

Η Μεσόγειος αποτελεί μία σεισμογενή περιοχή και η Ελλάδα είναι μία ιδιαίτερος σεισμογενής χώρα. Στην Ευρώπη κατατάσσεται στην πρώτη θέση, ενώ στον κόσμο έκτη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη σύγκλιση της Αφρικανικής με την Ευρω-ασιατική λιθοσφαιρική πλάκα.



### Εκδήλωση φαινομένου

Ο φλοιός της Γης κινείται συνεχώς, αλλά αργά. Οι σεισμοί εκδηλώνονται όταν η τάση (πίεση) υπερβεί το όριο αντοχής των υλικών της Γης. Το παραπάνω συναντάται συχνότερα στα όρια των τεκτονικών πλακών.

Η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών, υποστηρίζει ότι 10 μεγάλες άκαμπτες πλάκες και 20 πιο μικρές αποτελούν τον φλοιό της Γης, οι οποίες κινούνται συνεχώς. Καθώς λοιπόν αυτό συμβαίνει οι πλάκες, είτε έρχονται σε σύγκρουση, είτε απομακρύνονται μεταξύ τους, ή ακόμα γλιστρούν η μία κάτωθεν ή παραλλήλως της άλλης. Η κίνηση των πλακών προκαλεί παραμόρφωση των πετρωμάτων πλησίον των ορίων των πλακών γεγονός που δημιουργεί ζώνες ρηγμάτων γύρω τους. Σε κάποια ρήγματα το πέτρωμα εγκλωβίζεται κατά μήκος αυτών και δεν μπορεί να ολισθήσει κατά την κίνηση των πλακών. Η εφαρμοζόμενη τάση και στις δύο πλευρές του ρήγματος οδηγεί στη θραύση του πετρώματος και τη μετακίνησή του. Αυτή η μετατόπιση είναι και η αιτία των σεισμών. Κατά την εκδήλωση ενός σεισμού απελευθερώνονται μεγάλες ποσότητες ενέργειας, εντός της Γης με τη μορφή ταλαντώσεων, τα λεγόμενα σεισμικά κύματα (Sakellariou et al., 2011).

Η διάδοση των σεισμικών κυμάτων γίνεται προς όλες τις κατευθύνσεις, ενώ, όσο απομακρυνόμαστε από την εστία, τόσο μικρότερη είναι και η αίσθηση αυτού. Η συχνότητα του φαινομένου εξαρτάται κάθε φορά από τις γεωτεκτονικές συνθήκες που επικρατούν στην κάθε περιοχή. Η επιστημονική κοινότητα προκειμένου να προσδιορίσει την επαναληψιμότητα μεγάλων σεισμών, ώστε να καθοριστεί η σεισμική επικινδυνότητα μίας συγκεκριμένης περιοχής, συνδυάζει όλα τα μέσα: σεισμολογικά, γεωλογικά, αρχαιολογικά και άλλα δεδομένα.

### 3.2.2 Ηφαίστεια

Ως ηφαίστεια ορίζονται τα ανοίγματα της γήινης επιφάνειας από όπου εξέρχονται μάγμα, αέρια και έτερα υλικά. Τα ηφαίστεια εντοπίζονται εντονότερα στα όρια των τεκτονικών πλακών, αλλά και σε περιοχές με την ονομασία "θερμές κηλίδες" (hot spots), που αποτελούν θέσεις κάτω του γήινου φλοιού όπου τον συναντούν ρεύματα θερμού υλικού από το μανδύα. Η έκρηξη των ηφαιστειών γίνεται είτε βίαια, είτε με πιο βραδύ ρυθμό. Σύμφωνα με την αναφορά (Παπαχαρισίου, 2008), τα ηφαίστεια κατηγοριοποιούνται αναλόγως της:

- Γεωτεκτονικής θέσης
- Εκρηξιμότητας
- Μορφής ηφαιστειακού κώνου

Ενεργά ηφαίστεια, σύμφωνα με τους επιστήμονες, είναι όσα εμφανίζουν κάποιας μορφής σύγχρονη δραστηριότητα. Στο πλαίσιο αυτής της δραστηριότητας περιλαμβάνεται η εκρηκτική, η σεισμική ή ακόμη και απλή έκλυση αερίων. Στην περίπτωση της εκρηκτικής

δραστηριότητας εκτινάσσεται ή καταρρέει ο κώνος του ηφαιστείου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας κεντρικής κοιλότητας της επονομαζόμενης καλδέρα.



**Εικόνα 3.2:** Υποθαλάσσιο ηφαιστειο

**Πηγή:** (<http://www.crystalinks.com/volcanosubmarine.html>)

Οι καταστροφικές συνέπειες της ηφαιστειακής δραστηριότητας οφείλονται στα ακόλουθα (Παπαχαρισίου, 2008):

- **Ροές λάβας.** Πρόκειται για το γνωστότερο προϊόν της ηφαιστειακής δραστηριότητας με μεγαλύτερες ή μικρότερες ταχύτητες κίνησης αναλόγως της σύστασής τους. Συνήθως ωστόσο οι ταχύτητες είναι τέτοιες ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αντίδρασης.
- **Πυροκλαστικά προϊόντα.** Τα προϊόντα αυτά συνδέονται με την άνοδο και τη βίαιη απελευθέρωση των αερίων που βρίσκονται εντός του μάγματος. Η κατάστασή τους μπορεί να είναι ρευστή ή στερεή.
- **Αέρια.** Κατά την ηφαιστειακή δραστηριότητα, αλλά και στις ενδιάμεσες περιόδους, σημειώνεται έκλυση αερίων, κυρίως διοξειδίου του άνθρακα, μονοξειδίου του άνθρακα και υδρόθειου. Από αυτά, τα βαρύτερα επικάθονται στα κατώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα, πλησίον του εδάφους, με αποτέλεσμα την πρόκληση θανάτων.
- **Λασποροές.** Οι ραγδαίες μετακινήσεις στα κατάντη, μεγάλων όγκων προϊόντων, λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας, κορεσμένων σε νερό, ονομάζονται λασποροές. Θεωρείται ένα φαινόμενο με εξόχως σημαντικές επιπτώσεις τόσο για τον άνθρωπο όσο και το περιβάλλον.

**Εκδήλωση φαινομένου**

Το ρευστό πέτρωμα κάτωθεν του φλοιού ονομάζεται μάγμα. Αυτό είναι πιο ελαφρύ από το στερεό πέτρωμα του περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα, λόγω της άνωσης και της πίεσης των αερίων, να οδηγείται προς τα πάνω με δυνατότητα διείσδυσης εντός ζωνών ασυνεχειών (ρήγματα) στο φλοιό της Γης. Αυτή είναι και η έναρξη της ηφαιστειακής έκρηξης (Dominey-Howes et al, 2000).



**Εικόνα 3.3:** Τμήματα φλεγόμενου μάγματος υποθαλάσσιου ηφαιστείου

**Πηγή:** (<http://www.crystalinks.com/volcanosubmarine.html>)

Στην περίπτωση λεπτόρρευστου μάγματος, η διαφυγή των αερίων από αυτό είναι εύκολη προκαλώντας την έξοδο του μάγματος από το ηφαίστειο. Σε περίπτωση παχύρρευστου μάγματος, είναι αδύνατη η εύκολη διαφυγή των αερίων από το ηφαίστειο, με αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης μέχρι η δίοδος των αερίων να καταστεί δυνατή με τη μορφή βίαιης διαφυγής. Σε αυτό το είδος έκρηξης ηφαιστείου, το μάγμα εκρήγνυται και σπάει σε μικρότερα τμήματα, την τέφρα. Το μέγεθος της τέφρας παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση, από πολύ μικρά σωματίδια στάχτης έως ογκόλιθους σε μέγεθος αρκετών κυβικών μέτρων. Αν και πολύ συχνά στις βίαιες ηφαιστειακές εκρήξεις δεν υπάρχουν προειδοποιήσεις ερχομού του φαινομένου, συνήθως παρατηρούνται μερικά πρόδρομα φαινόμενα του συγκεκριμένου γεωκινδύνου.

### 3.2.3 Κατολισθήσεις

Ως κατολίσθηση ορίζεται η διατάραξη της ισορροπίας μιας εδαφικής ή βραχώδους μάζας. Πρόκειται για φυσικές διεργασίες εξέλιξης του ανάγλυφου της Γης, συνδυασμένων δράσεων μορφολογικών, γεωλογικών, γεωτεχνικών, περιβαλλοντικών συνθηκών, που όμως μπορούν να προκληθούν ή να ενταθούν λόγω εξωτερικών παρεμβάσεων οι οποίες σχετίζονται πολύ συχνά με ανθρώπινες δραστηριότητες. Αν ο βράχος ή το έδαφος κινηθεί αποκλειστικά με κατακόρυφη διεύθυνση, το φαινόμενο ονομάζεται καθίζηση, κατάρρευση ή κατάπτωση. Αν σημειώνεται και κίνηση κατά την οριζόντια διεύθυνση, τότε γίνεται χρήση του γενικού όρου κατολίσθηση (Camerlenghi et al., 2010).

#### Εκδήλωση φαινομένου

Οι φυσικές και ανθρωπογενείς διεργασίες που επιδρούν εντονότερα ως προς την εμφάνιση του φαινομένου στην ξηρά είναι οι ακόλουθες (Παπαχαρισίου, 2008):

- Διάβρωση της βάσης μιας πλαγιάς λόγω της δράσης υδροφόρων οριζόντων (ποταμών, λιμνών, θαλασσών).
- Έντονες κατακρημνίσεις και απότομο λιώσιμο χιονιού.
- Άνοδος της στάθμης των υπογείων υδροφορέων.
- Αύξηση πιέσεων στις πλαγιές λόγω εξωτερικών φορτίων.
- Ηφαιστειακές εκρήξεις.
- Ανθρωπογενείς δραστηριότητες (εκσκαφές, ανατινάξεις κ.α.).
- Καταστροφή των δασών.



Εικόνα 3.4: Χερσαία κατολίσθηση

Η εκδήλωση μίας κατολίσθησης μπορεί να είναι αιφνίδια και διάρκειας μόλις λίγων δευτερολέπτων, αλλά και πολύ περισσότερο αναλόγως των συνθηκών και παραγόντων του περιβάλλοντος. Ο υπολογισμός της συχνότητας του φαινομένου δεν είναι εύκολος, ενώ οι σημαντικότεροι παράγοντες που οδηγούν σε τέτοια φαινόμενα είναι (Παπαχαρισίου, 2008):

- Η αφαίρεση της υποστήριξης του πρανούς
- Η επιπλέον φόρτιση του πρανούς
- Η δράση της χλωριδοπανίδας
- Η αποσάθρωση
- Η παρουσία ύδατος
- Η γεωλογική δομή

Τα εν λόγω φαινόμενα μπορεί να είναι της τάξεως του ενός κυβικού χιλιομέτρου ή και λιγότερο, όταν πρόκειται για σχετικά μικρές παράκτιες κατολισθήσεις, έως χιλιάδες κυβικά χιλιόμετρα υλικού σε περιπτώσεις πολύ μεγάλων κατολισθήσεων.

Η μεγαλύτερη υποθαλάσσια κατολίσθηση που έχει μελετηθεί εις βάθος είναι η Storegga στη Βόρεια Θάλασσα, ανοικτά της Νορβηγίας. Το ενδιαφέρον αυτής της περίπτωσης είναι ότι το οικόπεδο φυσικού αερίου Ogmén Lange βρίσκεται στην πλευρική προεξοχή του (Bugge, et al., 1998α), (Bryn, et al., 1999β).

Χρονολογικά οι εκτιμήσεις τοποθετούν το φαινόμενο 8000 χρόνια πριν, φέρεται ότι υπήρχαν 5600 km<sup>3</sup> υλικού, ενώ η περιοχή που σημειώθηκε το φαινόμενο σημείωνε μέση κλίση μικρότερη από 2°. Η επίδραση της κατολίσθησης εκτεινόταν σε μια έκταση άνω των 30000 km<sup>3</sup> με αποστάσεις εκτροπής που φτάνουν έως και 800 km (Kvalstad, et al., 2001).

### 3.3 Γεωκίνδυνοι στη Μεσόγειο

Οι περιοχές με σεισμική και ηφαιστειακή δραστηριότητα ή κατολισθήσεις είναι αυτές που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη επιρρέπεια στην εμφάνιση θαλάσσιων καταστροφών. Πολλά τέτοια γεγονότα είναι γνωστά και έχουν αναφερθεί για τη Μεσόγειο, μια περιοχή όπου η εμφάνιση υψηλών συχνοτήτων της σεισμικής και ηφαιστειακής δραστηριότητας συμπίπτει με μερικές από τις πιο πυκνοκατοικημένες παράκτιες περιοχές παγκοσμίως.

Τα περισσότερα θαλάσσια επικίνδυνα γεγονότα γενικά, και στη Μεσόγειο ειδικότερα, μπορεί να σχετίζονται με γεωλογικές διαδικασίες που συνδέονται με τα όρια των πλακών και τα ενεργά ρήγματα ή την αστοχία των πρανών, με αποτέλεσμα τη βύθιση ηπειρωτικών παράκτιων περιοχών (Sakellariou et al., 2011).

Ο σημερινός σχηματισμός της Μεσογείου, οφείλεται στη καταβύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική πλάκα. Οι πάμπολλες γεωλογικές διεργασίες του παρελθόντος, οδήγησαν όχι μόνο σε διάκριση της ηφαιστειακής δραστηριότητας του

τόξου, αλλά και στην ενίσχυση της σεισμικότητας σε διακριτές περιοχές (Papadopoulos et al, 2007).

### 3.3.1 Υποθαλάσσια ηφαιστειακή δραστηριότητα της Μεσογείου

Η καταβύθιση της Μεσογείου σχετίζεται με την ηφαιστειακή δραστηριότητα που εμφανίζεται στο Τυρρηνικό πέλαγος και τις θάλασσες του Αιγαίου με αντίστοιχα το Τόξο του Αιόλου και τα Ελληνικά Ηφαιστειακά Τόξα. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα κατά μήκος αυτών των τόξων έχει γίνει γνωστή από τους προϊστορικούς χρόνους και είναι ακόμη σε εξέλιξη. Περίπου το 5% των γνωστών τσουνάμι σε όλο τον κόσμο έχουν δημιουργηθεί από διαδικασίες που συνδέονται με τα ηφαιστειακά.

Σε γενικές γραμμές, οι ηφαιστειακοί μηχανισμοί που προκαλούν τσουνάμι μπορεί να σχετίζονται με το σχηματισμό της καλντέρας, την κατάρρευση του ηφαιστειακού οικοδομήματος, των πυροκλαστικών ροών, τα ζεστά κύματα που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της έκρηξης, ακόμα και στην αστοχία των ηφαιστειακών κοιτασμάτων αμέσως μετά την εναπόθεσή τους στο βυθό (Sakellariou et al., 2011).

Στο Τυρρηνικό Πέλαγος, το Αιολικό Ηφαιστειακό Τόξο περιλαμβάνει επτά νησιά και πολλά ηφαιστειακά όρη που δεν φτάνουν στην επιφάνεια της θάλασσας. Μερικά από τα ηφαιστειακά του Αιολικού νησιού είναι γνωστό ότι είναι ενεργά, όπως για παράδειγμα το γνωστό ηφαιστειακό Stromboli, που λόγω των συνεχιζόμενων διαλειπόντων εκρήξεων του ήταν γνωστό στην αρχαιότητα ως «Φάρος της Μεσογείου». Πέρα από την έντονη δραστηριότητα του παρελθόντος, το 2002 ξεκίνησε μια περίοδος «αναταραχής» γεγονός που αποδεικνύει την ύπαρξη κινδύνου και σήμερα.

Μια περαιτέρω ενεργή ηφαιστειακή περιοχή βρίσκεται στο Στενό της Σικελίας. Εδώ, οι ιστορικές αναφορές για υποθαλάσσια ηφαιστειακή δραστηριότητα είναι συχνές. Οι πιο πρόσφατες που περιγράφονται αντιστοιχούν στις εκρήξεις που οδήγησαν στο σχηματισμό του εφήμερου νησιού Ferdinandea το 1831 και του Foerstener το 1891.

Το Ελληνικό Ηφαιστειακό Τόξο αναπτύχθηκε λόγω της ενεργούς καταβύθισης και τήξης της Αφρικανικής λιθόσφαιρας κάτω από το Αιγαίο Πέλαγος. Το ίχνος του ηφαιστειακού τόξου είναι παράλληλο και βρίσκεται περίπου 150 χιλιομέτρων βόρεια της Ελληνικής Τάφρου, και οριοθετείται από τέσσερα κύρια ηφαιστειακά πεδία στο Νότιο Αιγαίο και συγκεκριμένα τα Πόρο-Μέθανα-Αίγινα, Μήλος, Σαντορίνη-Κολούμπος, και Νισύρου-Κως.

Σημαντικές εκρήξεις στο ηφαιστειακό πεδίο της Σαντορίνης-Κολούμπου έχουν καταγραφεί στην ιστορία. Η πιο πρόσφατη σημαντική έκρηξη ήταν η μινωική έκρηξη του ηφαιστειακού της Σαντορίνης, που έλαβε χώρα τον 17ο αιώνα π.Χ. (περίπου 3600 χρόνια από σήμερα) και έχει θεωρηθεί ότι ήταν ο κύριος λόγος για την παρακμή του Μινωικού πολιτισμού στην Κρήτη (Sakellariou et al., 2011).

Μια πιο πρόσφατη υποθαλάσσια έκρηξη έλαβε χώρα τον Σεπτέμβριο του 1650 και σχετίζεται με το υποθαλάσσιο ηφαιστειακό Κολούμπος που βρίσκεται λίγα μίλια

βορειοανατολικά της Σαντορίνης. Δεκάδες θύματα από τα ηφαιστειακά αέρια αναφέρθηκαν, ενώ μετά την έκρηξη ακολούθησε τσουνάμι.

Το ηφαιστειακό πεδίο Κολούμπο αποτελείται από περίπου 20 μικρούς, υποβρύχιους ηφαιστειακούς κώνους. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι αυτοί οι κώνοι μπορεί να είναι νεότεροι από το κύριο οικοδόμημα Κολούμπο και μπορεί ως εκ τούτου να αποτελούν εν δυνάμει κέντρα μελλοντικών υποθαλάσσιων εκρήξεων (Dominey-Howes et al., 2000)

### 3.3.2 Σεισμική δραστηριότητα στη Μεσόγειο

Οι σεισμοί αποτελούν τα συχνότερα και πιο επικίνδυνα γεγονότα στην περιοχή της Μεσογείου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η κύρια γεωδυναμική διαδικασία, η οποία ελέγχει τη σεισμικότητα στη Γη, είναι η συνεχής κίνηση των άκαμπτων λιθοσφαιρικών πλακών. Ο μηχανισμός αυτός είναι αρκετά δραστήριος στην περιοχή της Μεσογείου, όπου σημειώνονται πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής πλάκας, και πολλών μικροπλακών και συσχετίζονται με μια ποικιλία από σεισμοτεκτονικά φαινόμενα: συμπίεση λόγω λιθοσφαιρικής σύγκλισης στην Ιβηρική χερσόνησο, τη Βόρεια Αλγερία, το τόξο Καλαβρίας στην Ιταλία, του Ελληνικού τόξου στην Ελλάδα, του Κυπριακού τόξου στην λεκάνη της Λεβαντίνης, καθώς και σε πιο περίπλοκες περιοχές όπως στα Απέννινα και το Στενό της Μεσίνα στην Ιταλία, και στη διώρυγα της Κορίνθου στην Κεντρική Ελλάδα (Sakellariou et al., 2011).

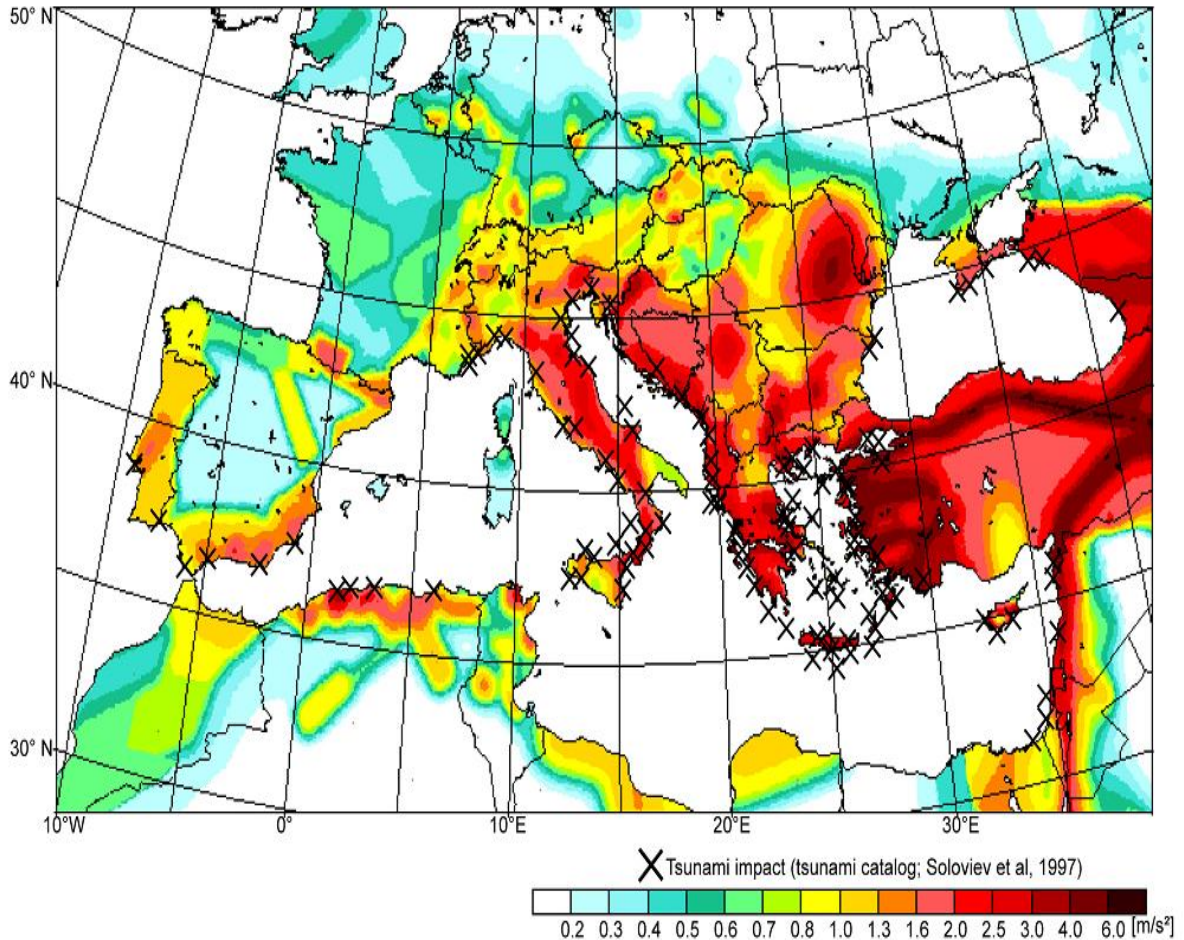
Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της σεισμικότητας είναι σχετικά ρηχό και εμφανίζεται στο ανώτερο 30 με 40 χιλιόμετρα της λιθόσφαιρας. Ωστόσο, βαθύτεροι σεισμοί έχουν καταγραφεί στην Ισπανία (μέχρι περίπου 660 km), καθώς και στις ζώνες καταβύθισης της Καλαβρίας (έως ~ 350 χιλιόμετρα), στο Ελληνικό τόξο (έως ~ 180 χιλιόμετρα), και στο Κυπριακό (έως ~ 120 km).

Τέλος, περιοχές που είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα των σεισμών, λόγω σύγκλισης της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής πλάκας κατά μήκος του Τόξου της Μεσογείου, είναι οι διαμορφωμένες παράκτιες ζώνες της Ρόδου και της Κρήτης (Stiros, 2010).

Τα τσουνάμι συνδέονται άρρηκτα με τη σεισμική δραστηριότητα (Εικ. 3.5). Δεδομένου ότι στα περισσότερα η πηγή τους βρίσκονται κοντά στην ακτή στην περιοχή της Μεσογείου, ο ελάχιστος χρόνος προετοιμασίας για ένα τσουνάμι είναι πολύ σύντομος.

Τα υψηλότερα κύματα μπορούν να φτάσουν στην κοντινότερη ακτή σε λίγα μόνο λεπτά. Το τσουνάμι στο Στρόμπολι το 2002 που προκλήθηκε από 15 εκατομμύρια κυβικά μέτρα υποβρύχιας κατολίθησης κατά μήκος της Sciara del Fuoco, πήρε λιγότερο από τρία λεπτά για να επιτεθεί στο σύνολο της ακτής του νησιού, και πέντε λεπτά για να χτυπήσει τις ακτές Panarea σε απόσταση 20 χιλιομέτρων από την πηγή.



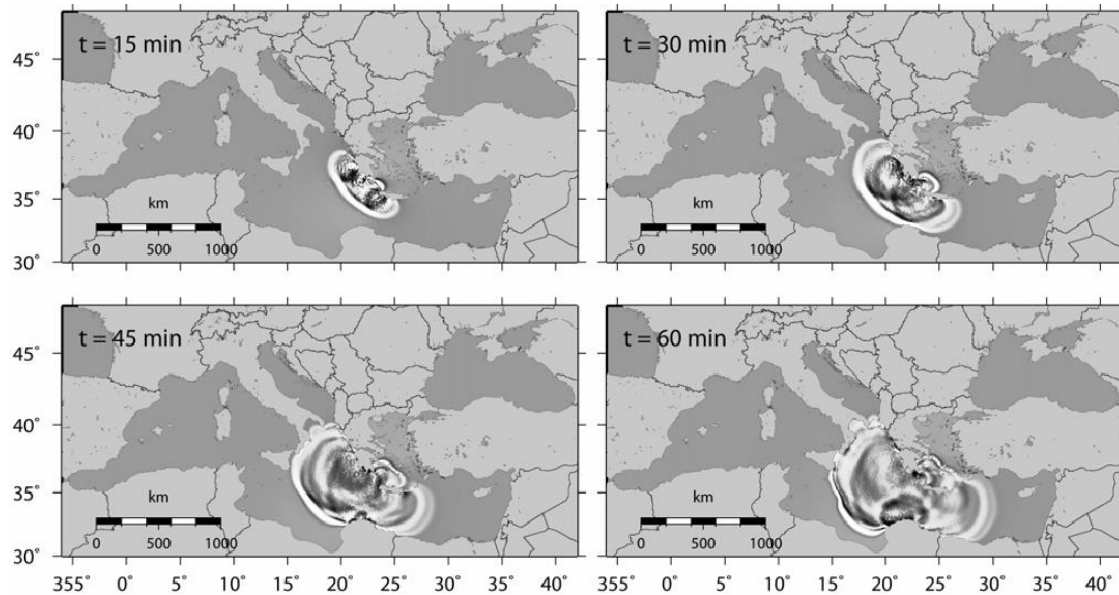


**Εικόνα 3.5:** Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Μεσογείου χρωματισμένα βάσει της μέγιστης επιτάχυνσης του εδάφους με πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 χρόνια και σηματοδότηση (X) περισσότερων από 250 ανιχνεύσιμων τσουνάμι στην περιοχή της Μεσογείου για το διάστημα 1500-1990 (Strozyk, 2009)

Το 1956 στο Νότιο Αιγαίο το τσουνάμι έφτασε στα κοντινά νησιά μέσα σε λιγότερο από 10 λεπτά. Το τσουνάμι του 2003 που παρήχθει στη Βόρεια Αλγερία πήρε 70-80 λεπτά για να φτάσει στην ακτή της Νότιας Γαλλίας.

Η Μεσόγειος είναι μια μικρή λεκάνη σε σύγκριση με τους μεγάλους ωκεανούς. Κατά συνέπεια, τα τσουνάμι που δημιουργούνται κοντά σε μια ακτή μπορούν να φτάσουν την αντίπερα όχθη της λεκάνης σε περίπου 1-2 ώρες. Για παράδειγμα στην μελέτη τους οι Tinti et al. (2005), δίνοντας τιμές σε παραμέτρους, όπως το μήκος (190 km), την ολίσθηση (5m), το βάθος (1000m) κ.α. μελέτησαν την πιθανή εξέλιξη του τσουνάμι στο Ελληνικό Τόξο και σε άλλα σημεία της Μεσογείου, όπως τα ακραία επίπεδα ανύψωσης του νερού και την εξέλιξη του φαινομένου σε συνάρτηση με τον χρόνο (Εικ 3.6).





**Εικόνα 3.6:** Στιγμιότυπα από τα υπολογιζόμενα πεδία ανύψωσης τσουνάμι για το Δυτικό Ελληνικό Τόξο (Tinti et al., 2005)

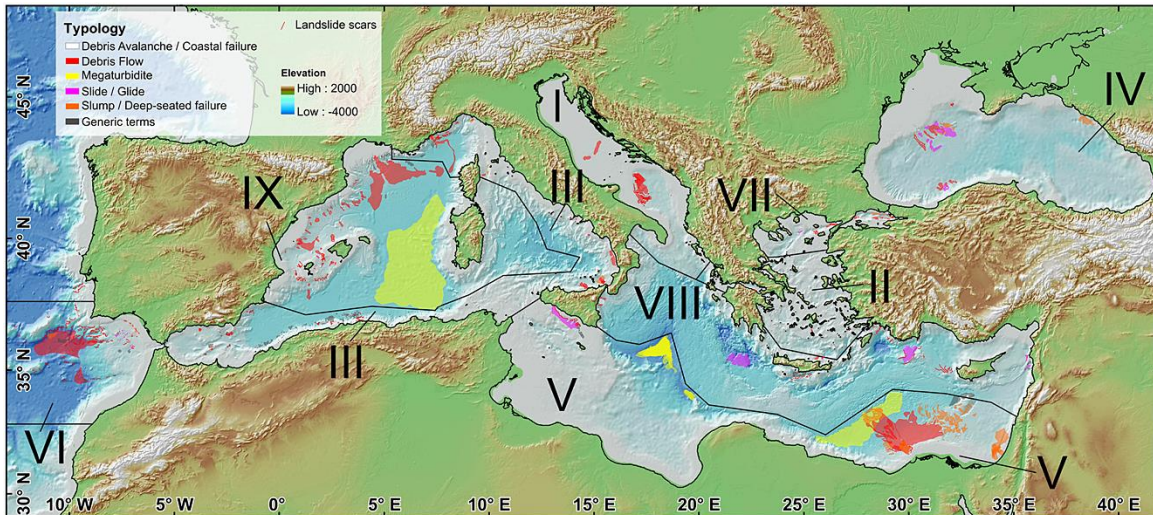
Συνεπώς, σε λιγότερο από μία ώρα τα εν δυνάμει τσουνάμι που παράγονται στην Ιταλία φτάνουν στις ελληνικές ακτές του Ιονίου και αντίστροφα, και χρειάζεται περίπου μία ώρα για το τσουνάμι που δημιουργείται στο Ανατολικό Ελληνικό Τόξο να φθάσει στην αιγυπτιακή ακτή. Ο χρόνος διάδοσης είναι φυσικά ακόμη μικρότερος για τα τσουνάμι που εμφανίζονται σε μικρότερες λεκάνες, όπως στη θάλασσα του Μαρμαρά ή σε στενούς κόλπους, όπως στον Κόλπο της Κορίνθου και της Πάτρας, ή τον Κόλπο του Izmit.

### 3.3.3 Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις στη Μεσόγειο

Στη Μεσόγειο, οι απότομες και στενές ηπειρωτικές όχθες, που είναι τεκτονικά ενεργές στην πλειοψηφία τους, και περιέχουν μικρά βουνά που διατρέχονται από ποτάμια, επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από διάφορες διαδικασίες ανεπάρκειας κλίσης. Μέχρι σήμερα αναφέρονται στη βιβλιογραφία, περίπου 600 σημεία που σχετίζονται με υποθαλάσσιες κατολισθήσεις και σχεδόν τον ίδιο αριθμό μαζικής αστοχίας ιζημάτων γύρω από ολόκληρη τη λεκάνη της Μεσογείου (Camerlenghi et al., 2010). Αυτά τα σημεία βρίσκονται τόσο σε τεκτονικά ενεργές, όσο και ήσυχες περιοχές, και έχουν συνήθως ενεργοποιηθεί σε ρηχά νερά (περίπου 50-100 m) έως βάθους 2 km. Ο όγκος των ιζημάτων κυμαίνεται από λιγότερο από  $0.001 \text{ km}^3$  σε περισσότερο από  $1.000 \text{ km}^3$ .

Μόνο λίγες υποθαλάσσιες κατολισθήσεις έχουν χρονολογηθεί με ακρίβεια μέχρι σήμερα, με ηλικίες που κυμαίνονται από τα τελευταία 100.000 χρόνια έως πολύ πρόσφατα. Ως εκ τούτου, η συχνότητα της ενεργοποίησης και της σχέσης με πιθανά εμπρόθεσμα γεγονότα, όπως οι σεισμοί, είναι ακόμα ένα θέμα που απασχολεί τους ερευνητές. Επιπλέον, εξακολουθεί να υπάρχει έλλειψη ενημέρωσης για τις σύγχρονες "ενεργές" αστοχίες, όπως

της Καλαβρίας που επηρέασε το Ιόνιο (Ceramicola et al., 2010 & Planinsek et al., 2011), από τις οποίες θα μπορούσαν να εξαχθούν πολύτιμες παράμετροι που θα βοηθούσαν στην καλύτερη κατανόηση των κατολισθήσεων.



**Εικόνα 3.7:** Χάρτης κατανομής κατολισθήσεων στη Μεσόγειο Θάλασσα σύμφωνα με την τυπολογία του βαθυμετρικά σκιασμένου ανάγλυφου (Urgeles & Camerlenghi, 2013)

Στο πέρασμα της ιστορίας έχουν σημειωθεί περιστατικά κατά τα οποία μια υποβρύχια κατολίσθηση αναλόγως του όγκου των ιζημάτων, προκάλεσε κύματα τσουνάμι με τις γνωστές επιπτώσεις κατά μήκος της ακτογραμμής. Η διαφορά του τσουνάμι λόγω κατολίσθησης από το τσουνάμι λόγω σεισμού είναι ότι στην πρώτη περίπτωση το φαινόμενο είναι αρκετά τοπικό με ακτίνα επιρροής μερικές δεκάδες χιλιόμετρα, ενώ στη δεύτερη περίπτωση το τσουνάμι μπορεί να επηρεάσει μια ολόκληρη λεκάνη (Papadopoulos et al., 2007 & Ioualalen et al., 2010).

Τρεις είναι οι βασικοί τύποι ενεργοποίησης μηχανισμών που μπορούν να δράσουν στο χώρο και το χρόνο ώστε να προκαλέσουν αστοχία υποθαλάσσιων πρानών (Sakellariou et al., 2015):

1. Τεκτονικοί παράγοντες που σχετίζονται με τη τεκτονική αναδιοργάνωση της πλάκας της Μεσογείου (τελευταία 5 χρόνια), όπως στο τόξο Καλαβρίας και την κατολίσθηση της κορυφογραμμής της Μεσογείου.
2. Ευστατικές κινήσεις στο επίπεδο της θάλασσας, όπως κατά τη διάρκεια της Μεσσηνιακής κρίσης αλατότητας και αλλαγές λόγω περιόδων παγετώνων όπου το επίπεδο της θάλασσας μειώνεται της τάξεως εκατοντάδων μέτρων.
3. Μεγάλα κύματα θύελλας που προκαλούν υπερφόρτωση ρηχών ενοποιημένων ιζημάτων

Από τα παραπάνω είναι αντιληπτό ότι οι γεωκίνδυνοι είναι φαινόμενα τα οποία ο άνθρωπος στον μεγαλύτερο βαθμό τους δεν μπορεί να προβλέψει και ανάλογα την έντασή τους να αντιμετωπίσει. Για αυτό τον λόγο όταν αποφασίζει να δραστηριοποιηθεί με

τρόπους που μπορεί να υποβοηθήσουν ή να επιτείνουν έναν γεωκίνδυνο οφείλει να είναι εξαιρετικά προσεκτικός. Παράδειγμα είναι οι υποθαλάσσιοι αγωγοί που αναφέρονται στην παρούσα εργασία. Σε μια περιοχή, όπως η Λεκάνη της Μεσογείου, η κατασκευή ενός τέτοιου έργου συνδέεται με υψηλή επικινδυνότητα.

Η Μεσόγειος είναι η πλέον σεισμογενής περιοχή στην Ευρώπη, βρίσκεται επάνω από ρήγματα και επίσης περιέχει στην λεκάνη της υποθαλάσσια ηφαίστεια. Επομένως, πρέπει να γίνει εξαιρετικός σχεδιασμός του έργου και συνεχής έλεγχος των εργασιών κατά την εκτέλεσή τους. Το σημείο χωροθέτησης ενός έργου είναι από τα σημαντικότερα ζητήματα, σε περιοχές υψηλής πίεσης κοντά σε ρήγματα η τοποθέτηση αγωγού είναι απαγορευτική.



## Κεφάλαιο 4ο: Διάρρηξη σεισμικών ρηγμάτων

### 4.1 Σεισμικά ρήγματα

Σύμφωνα με τη θεωρία του Reid (1910), η δημιουργία επιφανειακού σεισμού αποδίδεται στη συνεχή ελαστική παραμόρφωση των πετρωμάτων εξαιτίας της συσσώρευσης μεγάλης ποσότητας δυναμικής ενέργειας (ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης). Τη στιγμή που οι τάσεις αυτές ξεπερνούν την αντοχή του πετρώματος σημειώνεται θραύση και μετακίνηση των δύο τεμαχών πάνω σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια και με καθορισμένη διεύθυνση. Η περιοχή που συμβαίνει η συγκέντρωση των τάσεων ονομάζεται 'σεισμογόνος χώρος', ενώ η επιφάνεια ολίσθησης ονομάζεται 'ρήγμα' (Kramer, 1996). Το ρήγμα λοιπόν, ορίζεται ως η αιφνίδια διακοπή της συνέχειας των πετρωμάτων, εξαιτίας θραύσεως διαμήκους της επιφάνειας διάρρηξης. Η επιφάνεια αυτή συνοδεύεται από σχετική μετακίνηση των δύο «πλευρών» εκατέρωθεν της. Η μετατόπιση γίνεται άνωθεν της διαρρηγνυόμενης επιφάνειας, οι δε δύο «πλευρές» ονομάζονται ρηξιτεμάχη (fault blocks) ή απλώς τεμάχη (blocks). Η δημιουργία ρηγμάτων συνδέεται άρρηκτα με την εμφάνιση σεισμών. Παρόλα αυτά, οι πλέον ισχυροί σεισμοί δεν οφείλονται στη δημιουργία νέων ρηγμάτων, αλλά στις συσσωρευμένες τάσεις γύρω από παλαιά. Επιφανειακά ίχνη ρηγμάτων που προκάλεσαν ισχυρούς σεισμούς, παρέχοντας συνάμα τη δυνατότητα επιτόπιας μελέτης, υπάρχουν, όπως για παράδειγμα το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα στην Καλιφόρνια, αλλά και το γνωστό ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας στη Τουρκία (Σπυράκος & Τουτουδάκη, 2010).



**Εικόνα 4.1:** Επιφανειακό ίχνος του ρήματος του Αγίου Ανδρέα (Καλιφόρνια).

**Πηγή:** ([http://www.geodifhs.com/uploads/3/1/6/8/3168846/6313744\\_orig.jpg](http://www.geodifhs.com/uploads/3/1/6/8/3168846/6313744_orig.jpg))

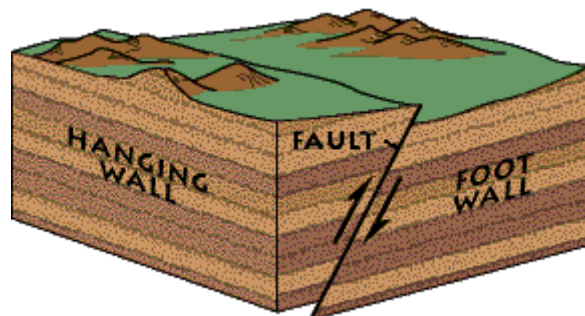
Ωστόσο, ως επί τω πλείστον δεν εμφανίζεται επιφανειακό ίχνος και η μελέτη στηρίζεται σε μεθόδους καταγραφής και μελέτης διαφόρων τύπων σεισμικών κυμάτων, μέσω των οποίων εξάγονται συμπεράσματα τα σχετικά με το επίπεδο του ρήγματος, τη διεύθυνση και το είδος της διάρρηξης, καθώς και του μεγέθους μετάθεσης.

## 4.2 Κατηγοριοποίηση ρηγμάτων

Η μελέτη και ανάλυση των ρηγμάτων είναι μια σύνθετη διαδικασία που περιλαμβάνει πλήθος σταδίων, διαφορετικών προσεγγίσεων και συνδυασμό διαφόρων ειδών ταξινόμησης. Ωστόσο, σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν οι βασικές αρχές και μέθοδοι. Αρχικά, η μελέτη των ρηγμάτων διακρίνεται σε τέσσερις γενικές κατηγορίες αναλύσεων που είναι οι ακόλουθες (Σπυράκος & Τουτουδάκη, 2010):

1. Γεωμετρική ανάλυση
2. Κινηματική ανάλυση
3. Δυναμική ανάλυση
4. Χρονική ανάλυση

Συνολικά, οι παραπάνω αναλύσεις περιλαμβάνονται στο γνωστικό πεδίο της Τεκτονικής Γεωλογίας. Όπως έχει αναφερθεί, το ρήγμα διαχωρίζει τον όγκο των πετρωμάτων που τέμνει σε δύο ρηξιτεμάχη (fault blocks) ή απλά τεμάχη. Το τεμάχος που βρίσκεται προς τη φορά κλίσης του ρήγματος («υπέρκειται») είναι το υπερκείμενο τεμάχος ή οροφή ή στέγη (hanging wall). Το τεμάχος αντίθετης φοράς από τη αυτή της κλίσης του ρήγματος («υπόκειται») ονομάζεται υποκείμενο τεμάχος ή δάπεδο (footwall) (Kramer, 1996).



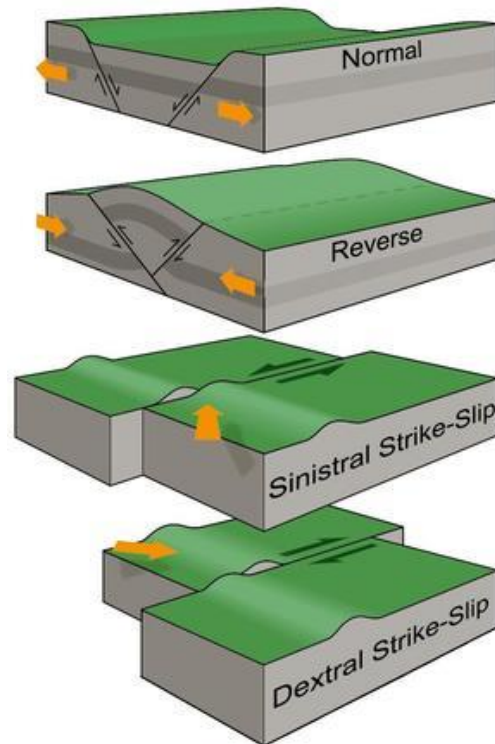
**Εικόνα 4.2:** Διαχωρισμός πετρώματος σε υπερκείμενο και υποκείμενο τεμάχος

Η μελέτη των ρηγμάτων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, επομένως το ίδιο ισχύει και για την ταξινόμηση αυτών. Σε αυτό το σημείο θα αναφερθεί μια ευρύτατα χρησιμοποιούμενη ταξινόμηση η οποία βασίζεται στη σχετική θέση που έχουν αποκτήσει τα ρηξιτεμάχη μετά τη διάρρηξη. Οι πλέον αποδεκτές κατηγορίες είναι οι ακόλουθες (Kramer, 1996):

- Κανονικά ρήγματα (Normal faults): ρήγματα όπου το υπερκείμενο τεμάχος φαίνεται να έχει κατέλθει σε σχέση με το υποκείμενο.



- Ανάστροφα ρήγματα (Reverse faults): ρήγματα όπου το υπερκείμενο τέμαχος φαίνεται να έχει ανέλθει σε σχέση με το υποκείμενο.
- Οριζοντιολισθητικά ρήγματα (Strike-slip faults), τα οποία διακρίνονται σε αριστερόστροφα (left-lateral/sinistral) και δεξιόστροφα (right-lateral/dextral), όπου παρατηρείται οριζόντια μετατόπιση των τεμαχών τους.



**Εικόνα 4.3:** Ταξινόμηση ρηγμάτων

Συγκεκριμένα, δεξιόστροφα είναι αυτά στα οποία, αν θεωρηθεί το ένα τέμαχος σταθερό, το άλλο έχει μετατοπιστεί προς τα δεξιά του. Ενώ το αντίθετο ισχύει για τα αριστερόστροφα ρήγματα.

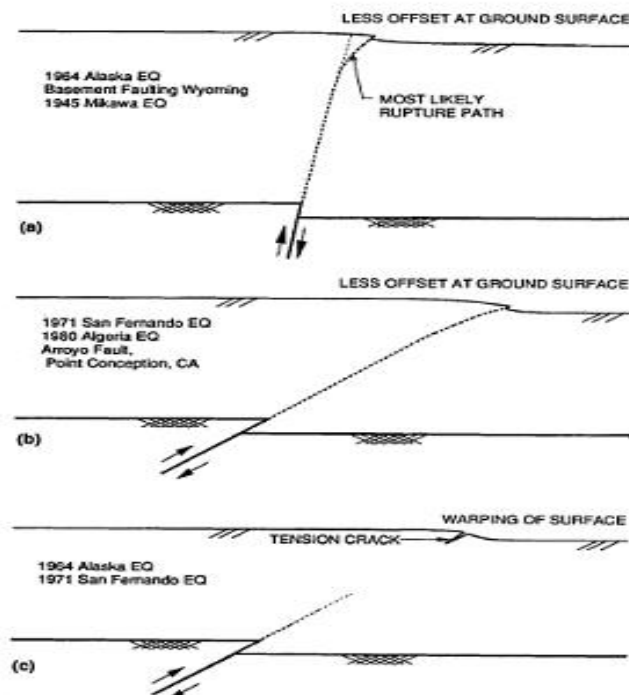
### 4.3 Διάρρηξη ρήγματος

Η διάρρηξη ενός σεισμικού ρήγματος παράγει δύο τύπους μετατόπισης του εδάφους: τη μόνιμη οιονεί-στατική μετατόπιση στο ρήγμα αυτό καθ' αυτό, και τις παροδικές δυναμικές ταλαντώσεις μακριά από αυτό (Ambraseys & Jackson, 1984). Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αφορούν τα ρήγματα είναι η πρόβλεψη της θέσης και του μεγέθους της ρήξης της επιφάνειας που προκαλείται από τη δράση του ρήγματος στα πετρώματα. Κατά μήκος της επιφάνειας θραύσης των ρηγμάτων, οι ρήξεις δεν είναι ούτε συνεχείς, ούτε ακολουθούν ακριβώς την επιφάνεια προεξοχής των προϋπαρχόντων ρηγμάτων. Αντ' αυτού, ακολουθούν τα επίπεδα αδυναμίας εντός μιας μάλλον ευρείας

ζώνης διάτμησης. Έτσι, η πρόβλεψη της ακριβούς τοποθεσίας της επιφάνειας, στο σημείο που θα δημιουργηθεί το ρήγμα είναι ένα δύσκολο έργο, ακόμα και όταν η γραμμή του ρήγματος απεικονίζεται με σαφήνεια σε ένα χάρτη μεγάλης κλίμακας. Η διάδοση της διάρρηξης του ρήγματος από τη βάση προς την επιφάνεια του εδάφους γενικά εξαρτάται από:

- Τον προσανατολισμό του επιπέδου του ρήγματος
- Τους τύπους κίνησης του ρήγματος
- Το ποσό της μετατόπισης του ρήγματος
- Το βάθος και το χαρακτήρα των υπερκείμενων κοιτασμάτων της γης

Από τη στιγμή λοιπόν που δεν υπάρχουν πρότυπα συμπεριφοράς των ρηγμάτων και κυρίως του τρόπου διάδοσης αυτών, είναι αναγκαία η επανεξέταση και μελέτη σχετικών ιστορικών υποθέσεων. Παρά το γεγονός ότι μπορεί να υπάρχουν εξαιρέσεις, η πλειοψηφία των αποδεικτικών στοιχείων αποδεικνύει, κάνοντας μια σειρά από κύριες παρατηρήσεις, τα σχετικά με αυτό που αποκαλείται "τυπικά" πρότυπα συμπεριφοράς. Υπάρχουν διαγράμματα που απεικονίζουν αυτά τα τυπικά χαρακτηριστικά της διάδοσης της διάρρηξης ενός ρήγματος, με βάση τις παρατηρήσεις που έγιναν σε ανάλογα περιστατικά κατά το παρελθόν, όπως τα παρακάτω (Διαγρ.4.1). Σύμφωνα με τους Bray et al. (1994), τα στοιχεία αυτά επικεντρώνονται σε μόνο τρεις από τις πιο σημαντικές μεταβλητές: το είδος της κίνησης ρήγματος, τη κλίση του επιπέδου ρήγματος, καθώς και τη φύση του υπερκείμενου κοιτάσματος του εδάφους.



**Διάγραμμα 4.1:** Διαδρομή διαρρηγμένου αναστροφου ρήγματος μέσω του εδάφους (α) Δύσκαμπτο επίπεδο, Απότομο βάθος (b) Δύσκαμπτο επίπεδο, Ρηχό βάθος (c) Όλκιμο επίπεδο

**Πηγή:** (Bray et al., (1994))



Κατά τη διάρρηξη κανονικών ρηγμάτων, το υποκείμενο τέμαχος παραμένει άθικτο με το μεγαλύτερο μέρος της παραμόρφωσης να συγκεντρώνεται εντός του υπερκείμενου τεμάχους. Η διάθλαση λαμβάνει χώρα στη διαχωριστική επιφάνεια του εδάφους-υποβάθρου και καθώς η ρήξη διαδίδεται στην επιφάνεια, κάμπτεται άνωθεν του υπερκείμενου τεμάχους, αυξάνοντας περαιτέρω το βάθος. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να προεξέχουν κάθετα, ή να παράγουν μικρά βυθίσματα βαρύτητας (gravity grabens). Όταν η γωνία βάθους ρήγματος  $\theta$  είναι μικρή:  $\theta \leq 45^\circ + \psi / 2$ , διαμορφώνεται μια αντιθετική δευτεροβάθμια διάρρηξη και μικρά βυθίσματα βαρύτητας. Όσο αυξάνει η διαστολή, το πλάτος της τάφρου τείνει να μειώνεται. Μόλις συμβεί θραύση, εντοπίζεται ισχνή διαφορική κίνηση και διακριτά επίπεδα αστοχίας. Όταν όμως το περιβάλλον είναι όλκιμο, η παραμόρφωση έχει την τάση να εξαπλώνεται σε ευρύτερες ζώνες με αξιοσημείωτη κίνηση και μπορούν να φιλοξενήσουν σημαντική κίνηση λόγω στρέβλωσης χωρίς πραγματική ανάπτυξη διακριτών επιφανειών κοπής (Kramer, 1996).

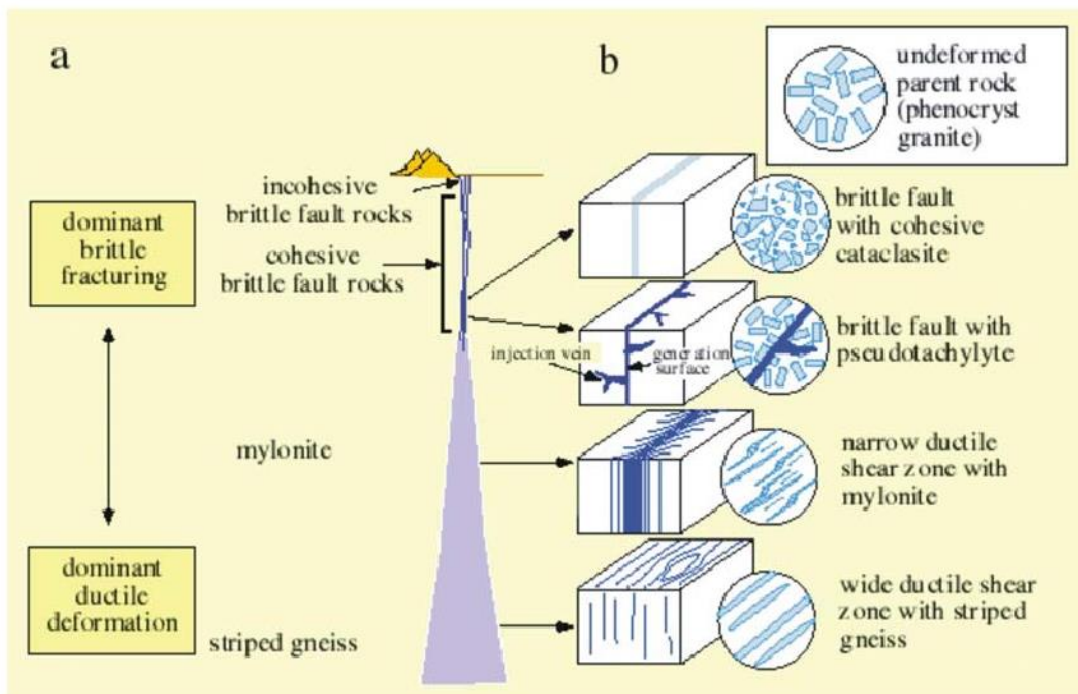
Στη διάρρηξη τους τα ανάστροφα ρήγματα τείνουν να κάμπτουν το υποκείμενο τέμαχος ενώ μεταδίδονται προς την επιφάνεια, μειώνοντας το βάθος τους. Ακολουθως, στην περίπτωση διάρρηξης κανονικών ρηγμάτων, τα όλκιμα υποστρώματα, κάμπτονται πάνω από τη γραμμή ολίσθησης, με διάδοση της παραμόρφωσης σε ευρύτερες ζώνες. Στη μέγιστη θέση κάμψης, παρατηρούνται ρωγμές λόγω εφελκυσμού και δευτερογενείς διαρρήξεις κανονικού τύπου.

Παρά το γεγονός ότι τα οριζοντιολισθητικά ρήγματα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές σε σχέση με το μηχανισμό βάθους ολίσθησης της διάρρηξης, διαθέτουν ποιοτικά παρόμοια χαρακτηριστικά. Στις περισσότερες περιπτώσεις η γωνία βάθους είναι πρακτικά κάθετη, και η παραμόρφωση διανέμεται σε δύο πλευρές. Μικρές αποκλίσεις στη γωνία προσανατολισμού και του βάθους του ρήγματος μπορεί να οδηγήσουν σε πραγματικά περίπλοκα μοτίβα. Δευτεροβάθμιες παραμορφώσεις βραχιδών υποστρωμάτων είναι γενικά λιγότερο πιθανό να συμβεί σε οριζοντιολισθητικά ρήγματα. Παρόλα αυτά, κάποια ποσότητα δευτερογενών μετακινήσεων μπορεί να συμβεί σε υπάρχοντα επίπεδα της αδυναμίας σε βραχώδεις επιφάνειες κατά τη διάρκεια κίνησης όλων των τύπων ρηγμάτων. Σε όλες τις περιπτώσεις ρήγματος, η σχετική μετατόπιση απότομης κατωφέρειας τείνει να είναι μικρότερη από το εκτόπισμα του βραχώδους υποστρώματος λόγω ρήγματος. Πράγματι, σε ορισμένες περιπτώσεις, η διάρρηξη δεν μπορεί να φτάσει ακόμη και την επιφάνεια. Εξαιρέση σε αυτό, μόνο στις κανονικές διαρρήξεις, είναι η περίπτωση όπου διαμορφώνονται αντιθετική δευτεροβάθμια ρήξη και μικρά βυθίσματα βαρύτητας. Στη συνέχεια, η μετατόπιση στην επιφάνεια μπορεί να είναι ακόμη υψηλότερη από ό, τι στο βραχώδες υπόστρωμα.

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις πεδίου και τα αποτελέσματα δοκιμών φυσικού μοντέλου, η διαφορική μετακίνηση κατά μήκος της διαδρομής διάρρηξης του ρήγματος, μειώνεται καθώς η διάρρηξη διαδίδεται προς τα πάνω προς την επιφάνεια μέσω μη ενοποιημένων υλικών. Λιγότερη κίνηση υποστρώματος ρήγματος απαιτείται για τη διάδοση τη ρήξη

διάτμηση προς την επιφάνεια του εδάφους μέσω ενός στρώματος από σχετικά εύθραυστο έως όλκιμο υλικό (Bray et al., 1994).

Η πλειοψηφία των εδαφών που υπερκαλύπτουν το αδιατάρακτο φυσικό πέτρωμα δίπλα στο ρήγμα δεν συμμετέχει στη διαδικασία ρήξης. Το μεγαλύτερο μέρος του εδάφους παραμένει σχετικά ανενόχλητο, και η σχετική κίνηση είναι κυρίως συγκεντρωμένη σε μια αρκετά στενή ζώνη γύρω από το βραχώδες υπόστρωμα του ρήγματος. Μόλις συμβεί διάρρηξη, το μεγαλύτερο μέρος της διαφορικής κίνησης συνήθως εντοπίζεται στο λεπτό, διακριτό επίπεδο της αστοχίας. Τα όλκιμα πετρώματα, ωστόσο, δύναται να φιλοξενήσουν σημαντική κίνηση ρήγματος με συνέπεια τη στρέβλωση χωρίς ωστόσο να συμβεί θραύση. Η διάκριση των ζωνών διάτμησης γίνεται σε θραυσιγενείς (brittle) ζώνες (ή ρηξιγενείς ζώνες – ρήγματα) και σε όλκιμες (ductile), εξαρτάται από τον χαρακτηριστικό τύπο της παραμόρφωσης (θραυσιγενής ή όλκιμη). Στη βιβλιογραφία εντοπίζεται και ένας ενδιάμεσος τύπος (brittle-ductile shear zones), που αναφέρεται στην ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ των προαναφερθέντων (Εικ.4.5)



**Εικόνα 4.5:** Κατανομή των κύριων κατηγοριών πετρωμάτων ρηξιγενών ζωνών σε μια μεγάλης κλίμακας διατμητική ζώνη

**Πηγή:** (<http://labtect.geol.uoa.gr/pages/pdfs/Microtectonics/ch5.pdf>)

Από τη μια πλευρά, η πλειοψηφία του διαφορικού κίνησης σε μια ζώνη ρήγματος είναι πιθανό να συγκεντρώνεται σε ένα μόνο σπάσιμο, το πρόβλημα τότε είναι πιθανό να εντοπιστεί. Από την άλλη πλευρά, το υπόλοιπο της κίνησης μπορεί να προκαλέσει δευτερεύοντα κατάγματα ή ρήγματα σε κάποια απόσταση από τον κεντρικό ίχνος, έτσι ώστε ο μηχανικός να μην έχει την πολυτέλεια να επικεντρωθεί αποκλειστικά στο κύριο

ίχνος του ρήγματος. Ο Bonilla (1970) διαπίστωσε ότι η μετατόπιση δευτερογενούς θραύσης ή ρήγματος θα μπορούσε να είναι όσο το 20% του ποσού της μετατόπισης στο κύριο ρήγμα σε απόσταση ίση με 12 χιλιόμετρα από το κύριο ρήγμα. Έτσι, σε σεισμικές περιοχές, δεν μπορεί να αγνοηθεί το ενδεχόμενο δευτερογενών μετακινήσεων σε ανενεργά ρήγματα, υποστρώματα, ή τα υπάρχοντα θραύσματα. Εν ολίγοις, κάθε υπάρχον επίπεδο αδυναμίας μπορεί να είναι ύποπτο κατά την αξιολόγηση των δυνατοτήτων κίνησης του εδάφους.

#### **4.4 Διάδοση ενεργού ρήγματος διαμέσου εδαφικού επιφανειακού στρώματος**

Η κατεύθυνση διάρρηξης μπορεί να εκτραπεί από την παρουσία ενός τεχνικού έργου, όπως η αυτή διαδίδεται στην εδαφική επιφάνεια, καθώς επίσης μπορεί να προκληθεί αλλαγή του προφίλ μετατόπισης της επιφάνειας, λόγω της επικείμενης διάρρηξης ρήγματος. Πρόκειται λοιπόν, για έναν διπλό και εξόχως σημαντικό, στην κατασκευή τεχνικών έργων, μηχανισμό αλληλεπίδρασης, που ονομάζεται «Δομή Αλληλεπίδρασης Διάρρηξης Ρήγματος – Εδάφους – Θεμελίωσης – Ανωδομής».

Η διάδοση ρηγμάτων σε επιφανειακά εδαφικά στρώματα εμφανίζει έντονη πολυπλοκότητα εξαιτίας των πολλών παραγόντων που επιδρούν σε αυτόν. Παράμετροι αυτού του φαινομένου είναι η εδαφική μη ομοιογένεια και ανισοτροπία. Η σημαντική αλλοίωση της μορφής διάρρηξης σημειώνεται εξαιτίας των διαστρώσεων των αποθέσεων αρκετά χαλαρότερων αλλά και πυκνότερων από το περιβάλλον έδαφος. Επίσης, ο τρόπος απόκρισης της εδαφικής στρώσης μεταβάλλεται από τη σεισμική διέγερση που συμβαίνει στον ίδιο χρόνο με τη διάρρηξη, σε συνδυασμό με τον δυναμικό χαρακτήρα της κίνησης του υποβάθρου.

Οι βασικότεροι παράμετροι που επιδρούν επί του συγκεκριμένου προβλήματος είναι οι ακόλουθοι:

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

Κατά την εκδήλωση ενός σεισμικού φαινομένου παρατηρούνται μια μέχρι δυο κύριες αστοχίες, ωστόσο συνήθως η εικόνα είναι πολυπλοκότερη αφού γύρω από το ίχνος του κύριου ρήγματος σημειώνεται πλήθος δευτερευουσών ασυνεχειών εντός μιας ευρύτερης ζώνη διάτμησης.

Όπως αναφέρει στη μελέτη του ο Scott (1987), δεν είναι καθόλου σπάνιος ο εντοπισμός γεωλογικών ρηγμάτων κατά την διενέργεια ερευνών πεδίου και γεωλογικών χαρτογραφήσεων πριν την κατασκευή τεχνικών έργων όπως πυρηνικών μονάδων παραγωγής ενέργειας, φραγμάτων, εγκαταστάσεων αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού

αερίου, παράκτιων πλατφόρμων καθώς και στην κατασκευή αγωγών μεταφοράς ενέργειας. Στις εν λόγω έρευνες αυτό που πρωτίστως μελετάται είναι το κατά πόσο τα ρήγματα αυτά είναι ενεργά, συγκεκριμένα το ρυθμό μετακίνησης του σήμερα ή το πλήθος των μετακινήσεων του τα τελευταία 104 ή 107 έτη, εν συνεχεία ακολουθεί ο υπολογισμός της συχνότητας, του μεγέθους και της πιθανότητας μετακίνησης του τα επόμενα 50 με 100 έτη, αναλόγως της θεωρούμενης διάρκειας ζωής του έργου. Τελικά, ο υπεύθυνος, για το σχεδιασμό της κατασκευής, μηχανικός οφείλει να συνυπολογίσει δυο πρόσθετα αίτια αστοχίας τα οποία αναφέρονται κάτωθεν:

- Την ενισχυμένη εξαιτίας του φαινομένου κατευθυντικότητας δόνηση λόγω θραύσης του ρήματος και
- Το πεδίο των μόνιμων μετατοπίσεων που δημιουργούνται γύρω από την θραύση ή την διαφορική μετακίνηση στην περίπτωση που το τεχνικό έργο περατώνεται ακριβώς άνωθεν του επιφανειακού ίχνους του ρήματος.

Σχετικά με τη διάδοση της αστοχίας εντός του εδαφικού στρώματος, η διάδοση της μετατόπισης πραγματοποιείται καθ' ύψος και εμφανίζεται επιφανειακά ως αναβαθμός ή ως ένα σύνολο μικρορωγμών και αλλοιώσεων του ανάγλυφου, το παραπάνω εντοπίζεται ακόμα και σε περιπτώσεις που το επιφανειακό στρώμα του εδάφους είναι βάθους αρκετών χιλιομέτρων.

Παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης είναι ο σεισμός της περιοχής Imperial Valley στην Καλιφόρνια όπου οι αλλουβιακές προσχώσεις έφταναν σε βάθος τα 6km.

Ωστόσο, η πιθανότητα η επιφάνεια θραύσεως που εμφανίζεται να σταματάει σε κάποιο ύψος εντός του εδαφικού στρώματος χωρίς να σημειώνεται καμία διαταραχή επιφανειακά δεν είναι μικρή. Δύο είναι οι υποθέσεις για την προαναφερθείσα περίπτωση:

1. Ότι υπάρχει ένα παλαιό ρήγμα που είναι ανενεργό πια. Συγκεκριμένα, το μέρος του εδαφικού στρώματος που δεν σημειώνεται αστοχία προήλθε από πιο σύγχρονες αποθέσεις, από τη στιγμή που το ρήγμα σταμάτησε να είναι ενεργό και δεν πραγματοποιήθηκαν νεότερες μετακινήσεις.
2. Ότι υπάρχει ενεργό ρήγμα μεν, αλλά η μετατόπιση στο βραχώδες υπόβαθρο δεν είναι ικανή, συναρτήσει των εδαφικών χαρακτηριστικών, να επιφέρει την παραμόρφωση του υποβάθρου έως την επιφάνεια («τυφλό ρήγμα»).

Επομένως, ο χαρακτηρισμός ρηγμάτων ως "μη ενεργών" πιθανόν κάποιες φορές να είναι εσφαλμένος στην περίπτωση που βασίζεται αποκλειστικά στην παρατήρηση αποτελεσμάτων γεωτρήσεων ή γεωφυσικών μεθόδων που φανερώνουν ότι το ρήγμα σταματάει σε κάποιο ύψος εντός του εδαφικού στρώματος.

Οι Duncan & Lefebvre (1973) ήταν οι πρωτοπόροι διότι πρώτοι εφάρμοσαν πεπερασμένα στοιχεία με στόχο τον προσδιορισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων στην έδραση μιας κατασκευής που βρίσκεται πλησίον ρήματος οριζόντιας ολίσθησης, εξαιτίας της μετακίνησης του.

Μετά την επεξεργασία τα αποτελέσματα παρουσίασαν τον σχηματισμό ζωνών παθητικών και ενεργητικών τάσεων διευθύνσεως περίπου 45° σε σχέση με την διεύθυνση κίνησης

των τεμαχών. Εν συνεχεία, έγινε ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από τα υπό κλίμακα εργαστηριακά μοντέλα.

Στη μελέτη τους οι Scott & Schoustra (1974) ασχολήθηκαν με το πρόβλημα, όπου ένα στρώμα αλουβιακών αποθέσεων πάχους 800m βρίσκεται άνωθεν βραχώδους υποβάθρου με κατακόρυφο εν ενεργεία ρήγμα.

Σε υπερκείμενη στρώση αλουβιακών αποθέσεων πάχους 6m ανάστροφου ρήγματος εκτέλεσαν ανάλογα πειράματα οι Roth et al. (1981).

Οι ερευνητές Walters & Thomas (1982) στόχευσαν στην απόδειξη ότι το χαρακτηριστικό της εδαφικής χαλάρωσης συναρτώμενο της παραμόρφωσης ήταν κρίσιμο για τον εντοπισμό και τον καθορισμό της γεωμετρίας της επιφάνειας θραύσεως. Σε σχέση ωστόσο με την απαιτούμενη μετατόπιση του υπεδάφους στην διάδοση του ρήγματος έως την ελεύθερη επιφάνεια οι αναλυτές δεν μπόρεσαν να διενεργηθούν ικανοποιητικές προβλέψεις.

Τον εντοπισμό και τον καθορισμό της γεωμετρίας της επιφάνειας αστοχίας μελέτησαν και οι Cole & Lade (1984) καθώς επίσης και το εύρος της επηρεαζόμενης ζώνης σε αλλούβια, επιφανειακά ρήγματα κατακόρυφης μετατόπισης.

Ο Scott (1987) ασχολήθηκε με την υπολογιστική προσομοίωση διαφόρων ειδών αστοχιών εδάφους, ενώ ένα τμήμα της έρευνάς του αφορούσε τα γεωλογικά ρήγματα και τη συσχέτιση τους με τα υπερκείμενα τεχνικά έργα.

Εφτά χρόνια αργότερα, οι Bray et al. (1994) μελέτησαν το ζήτημα της διάδοσης ρήγματος σε συνεκτικά υλικά, μέσω αριθμητικών αναλύσεων χρησιμοποιώντας πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Να σημειωθεί ότι και στον ελλαδικό χώρο έχουν γίνει ανάλογες μελέτες, όπως στην περίπτωση του Αναστασόπουλου (2005), ο οποίος μελέτησε την αλληλεπίδραση μιας κατασκευής με την εδαφική παραμόρφωση και την επιφανειακή διάρρηξη του ρήγματος.

Είναι λοιπόν κατανοητό ότι στην περίπτωση κατασκευής ενός τεχνικού έργου ο κίνδυνος της επιφανειακής εκδήλωσης ενός μεγάλου σεισμικού ρήγματος στο σημείο έδρασης του έργου είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επιδρά στην λήψη αποφάσεων που σχετίζονται με το σχεδιασμό, κατασκευή και λειτουργία του έργου.

#### **4.5 Τα σημαντικότερα ρήγματα στην Ανατολική Μεσόγειο**

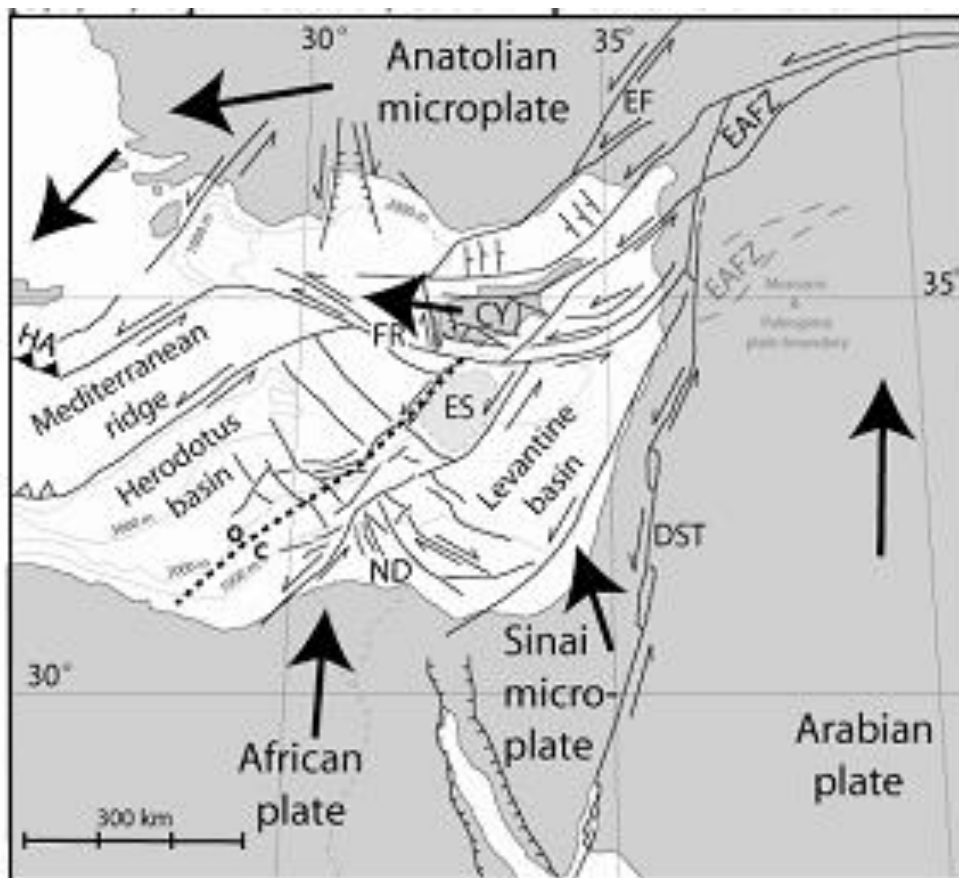
Η λεκάνη της Μεσογείου χαρακτηρίζεται από μέτρια έως υψηλή σεισμικότητα, και ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός και η κατασκευή αγωγών μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι πολύ πιο απαιτητική (Εικ.4.5).

Η περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου ορίζει την περιοχή που βρίσκεται μεταξύ της Κασπίας Θάλασσας και της Αδριατικής Θάλασσας, της Ανατολίας, του Αιγαίου και της Ελλάδας και είναι μία από τις πιο σεισμικά ενεργές περιοχές παγκοσμίως (Kramer, 1996).

Η τεκτονική της περιοχής της Μεσογείου είναι πολύπλοκη καθώς υπήρχαν οι τεκτονικές διασπάσεις και στη συνέχεια η σύγκρουση των πλακών της Αφρικής και της Ευρασίας στη περιοχή της λεκάνης της Μεσογείου.

Η γεωμορφολογία της Μεσογείου, η πολυπλοκότητα της γεωλογικής δομής της και η ενεργή τεκτονική της έχουν καθορίσει την σεισμικότητα της περιοχής, ενώ έχουν οδηγήσει σε συμβάντα φυσικών καταστροφών με υψηλό ποσοστό απωλειών ζώων και περιουσιών.

Η ακόλουθη εικόνα (Εικ. 4.6) παρουσιάζει τις λιθосφαιρικές πλάκες στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου (Harrison, 2008).

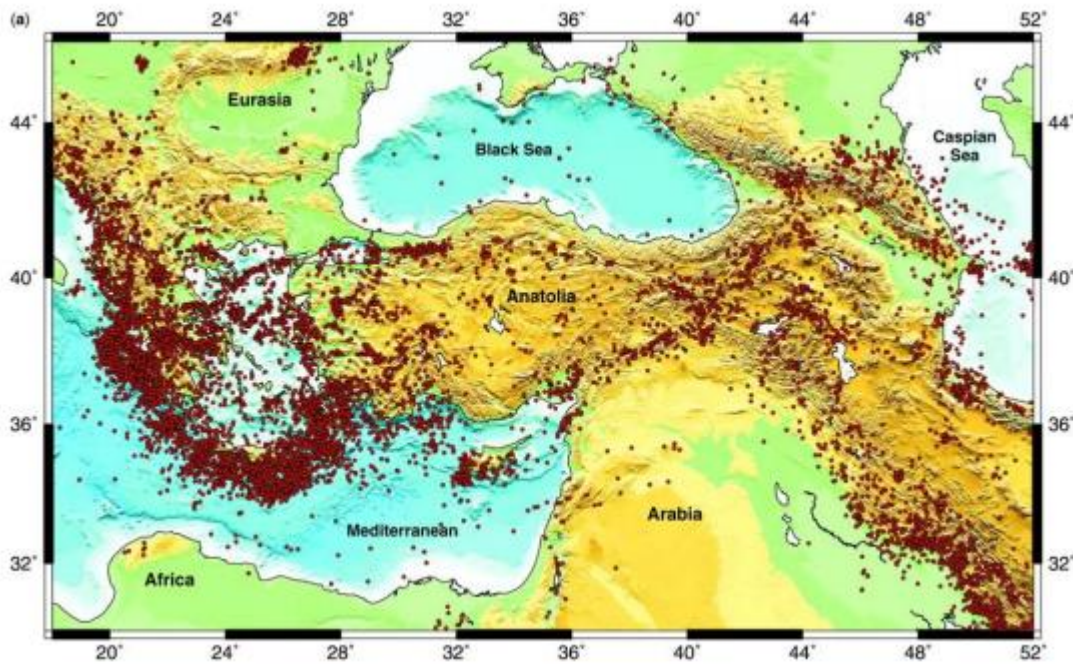


**Εικόνα 4.6:** Παρούσα κατάσταση του τεκτονικού χάρτη της Ανατολικής Ευρώπης  
**Πηγή:** (Harrison, 2008)





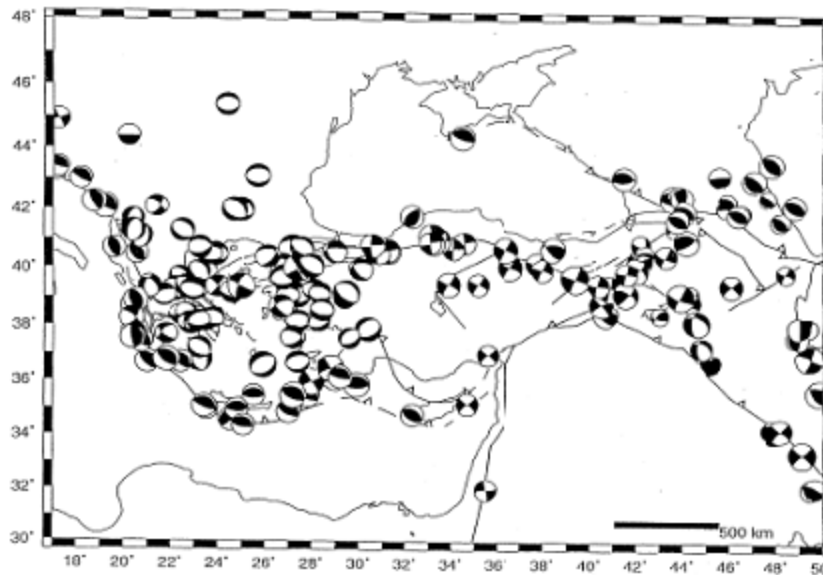
**Εικόνα 4.7:** Γεωδυναμικός χάρτης της περιοχής της Μεσογείου  
**Πηγή:** (Barrier et al., 2005)



**Εικόνα 4.8:** Σεισμικότητα της περιοχής της Ανατολικής Μεσογείου και των περιχώρων με βάση την αναφορά από USGS-NEIC για το διάστημα 1973-2007 με μεγέθη για  $M > 3$ . (Ο συγκεντρωτικός χάρτης της βαθυμετρίας και ρηγμάτων της περιοχής σχεδιάστηκε με βάση τις παρατηρήσεις των Le Pichon & Angelier (1981), Taymaz (1990), Taymaz et al. (1990, 1991a, b); S,arog˘lu et al. (1992), Papazachos et al. (1998), McClusky et al. (2000) and Tan & Taymaz (2006))  
**Πηγή:** (Taymaz et al., 2007)

Είναι προφανές ότι η Ελλάδα και η Τουρκία χαρακτηρίζονται από την υψηλότερη σεισμικότητα, λόγω των τεκτονικών πλακών στην Ανατολική Μεσόγειο, και συγκεκριμένα (Taymaz et al. 2007):

- α) Η βύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική πλάκα προκαλεί την πλειοψηφία των σεισμικών γεγονότων στην ελληνική επικράτεια.
- β) Η οριζόντια κίνηση της πλάκας της Ανατολίας προς τα δυτικά προκαλεί την οριζοντιολισθητικό ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας και, κατά συνέπεια, την υψηλή σεισμικότητα στη βόρεια Τουρκία.



**Εικόνα 4.9:** Η κατανομή των ρημάτων της Ανατολικής Μεσογείου κατά McKenzie (1972, 1978).

**Πηγή:** (Barka & Reilinger, 1997)

Τα κύρια τεκτονικά στοιχεία στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου αναφέρονται παρακάτω (Barka & Reilinger, 1997):

#### 1. Η ζώνη του ρήγματος της Ανατολίας βορειοανατολικά

Η ζώνη ρήγματος βορειοανατολικά της Ανατολίας εκτείνεται από πλησίον της πόλης Ερζερούμ, έως την Τουρκία βόρειο-ανατολικά προς τα όρη του Καυκάσου. Αυτή η ζώνη του ρήγματος αποτελείται από διάφορα τμήματα συνολικού μήκους περίπου 350 χιλιομέτρων.

#### 2. Η Γωνία Isparta

Η Γωνία Isparta αποτελεί τη σύνδεση μεταξύ της Κύπρου και του Ελληνικού τόξου και αποτελεί μια τεκτονική συνάθροιση με σύνθετη τεκτονική ιστορία. Η ζώνη αυτή αποτελείται από πολλές διαφορετικές τεκτονικές οντότητες.



### 3. Το τόξο της Κύπρου

Η καταβύθιση κατά μήκος του τόξου της Κύπρου είναι ένα αμφιλεγόμενο θέμα στη βιβλιογραφία. Η ακρίβεια της καταβύθισης δεν είναι σαφής νότια της Κύπρου.

### 4. Δυτική Ανατολία

Στη Δυτική Ανατολία, η τάση δημιουργίας μικρών βυθισμάτων και τα σχετικά κανονικά ρήγματα είναι τα κυρίαρχα νεο-τεκτονικά χαρακτηριστικά. Μια σειρά σημαντικών γεγονότων σχετικά με κανονικά ρήγματα συνέβη κατά μήκος αυτών των ρηγμάτων, για παράδειγμα το 1899 στο Büyük Menderes, το 1928 στο Torbali, το 1955 στο Balat, το 1969 στο Alaşehir το 1969 στο Simav, το στο 1970 Gediz και το 1995 οι σεισμοί στο Dinar (π.χ. Ambrasseys, 1988).

### 5. Το Ελληνικό τόξο

Το ελληνικό τόξο είναι ένα τοξοειδές τεκτονικό χαρακτηριστικό της Ανατολικής Μεσογείου που σχετίζεται με την καταβύθιση της αφρικανικής πλάκας κάτω από την πλάκα του Αιγαίου. Αποτελείται από μια θαλάσσια τάφρο, την Ελληνική τάφρο, στην εξωτερική πλευρά του, δύο τόξα-ένα μη ηφαιστειακό τόξο εξωτερικό και ένα εσωτερικό ηφαιστειακό τόξο, το Ηφαιστειακό Τόξο Νότιου Αιγαίου, και μια θάλασσα οριακά στην εσωτερική του πλευρά.



## Κεφάλαιο 5. Υπολογιστική προσομοίωση της διάρρηξης ενεργού σεισμικού ρήγματος διαμέσου ιζηματογενούς στρώσης

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η διάρρηξη ενός ρήγματος όπου πάνω σε αυτό βρίσκεται μία ιζηματογενής στρώση σε ελεύθερο πεδίο και η παραμόρφωση της επιφάνειας αυτού. Καθώς το πρόβλημα είναι πολυπαραμετρικό, οι παράμετροι που εξετάζονται είναι η γωνία του ρήγματος, το πάχος της στρώσης, το υλικό του ιζήματος (αργιλικό και αμμώδες) και το είδος του ρήγματος (κανονικό και ανάστροφο).

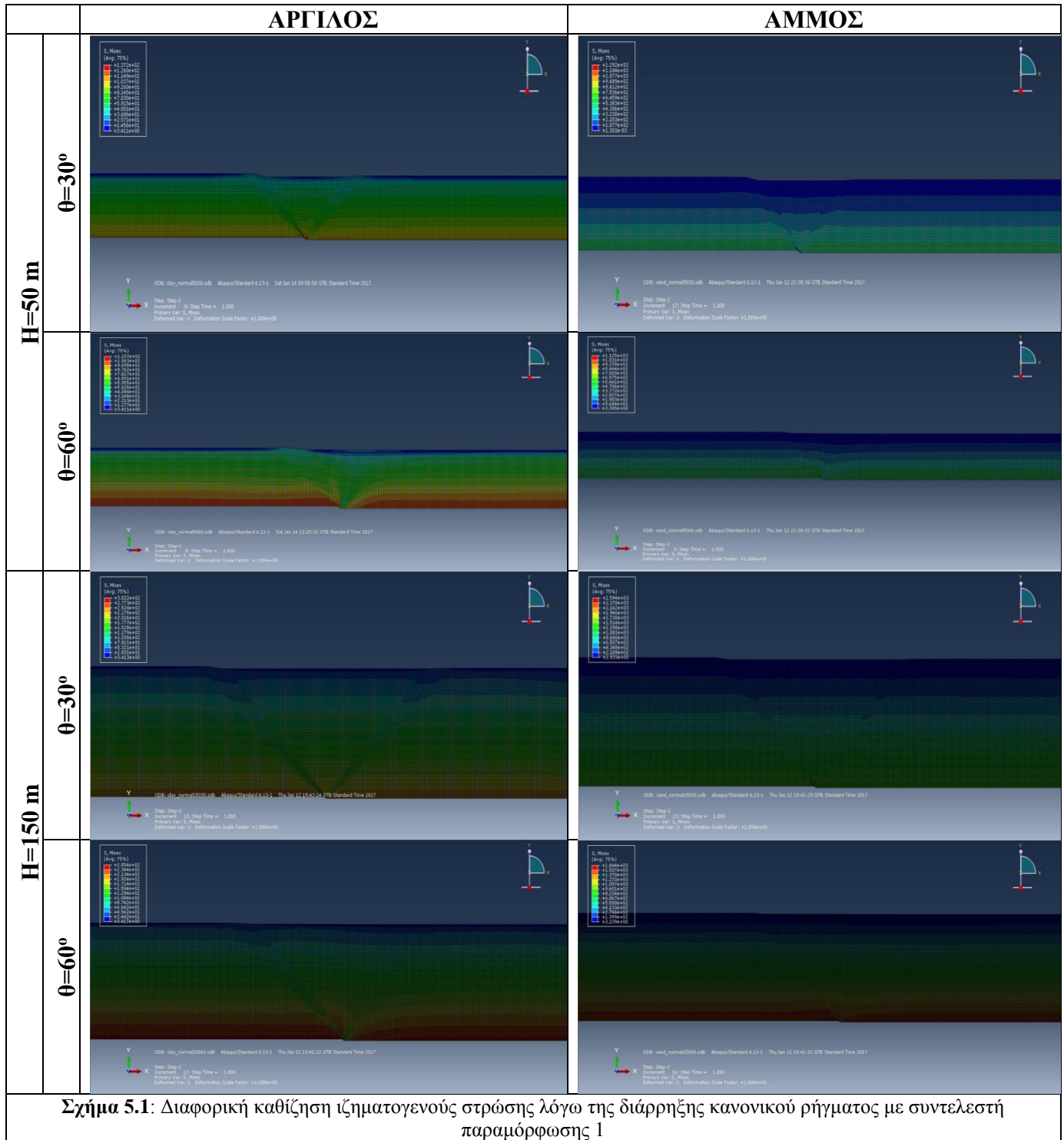
Η πραγματοποίηση των αναλύσεων πραγματοποιήθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον του ABAQUS. Το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS είναι ένα από τα πιο αξιόπιστα προγράμματα για την προσομοίωση σύνθετων γεωτεχνικών προβλημάτων και διαθέτει μία μεγάλη βιβλιοθήκη με πεπερασμένα στοιχεία με σκοπό να εξετασθεί υπολογιστικά ένα σύνθετο πρόβλημα όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Αρχικά, ο αντικειμενικός σκοπός είναι η σύνταξη ενός αρχείου όπου περιγράφονται τα δεδομένα και τα ζητούμενα του προβλήματος. Το αρχείο αυτό αναφέρεται στο εξής ως 'αρχείο εισόδου'. Είναι προφανές πως πολύπλοκα προβλήματα απαιτούν ένα εκτεταμένο αρχείο εισόδου, το οποίο δεν είναι δύσκολο να συνταχθεί αν ακολουθηθεί η κατάλληλη μέθοδος κάθε φορά. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε ABAQUS/Cae για τη γένεση του δικτύου και τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση είναι τετραπλευρικά στοιχεία δύο διαστάσεων.

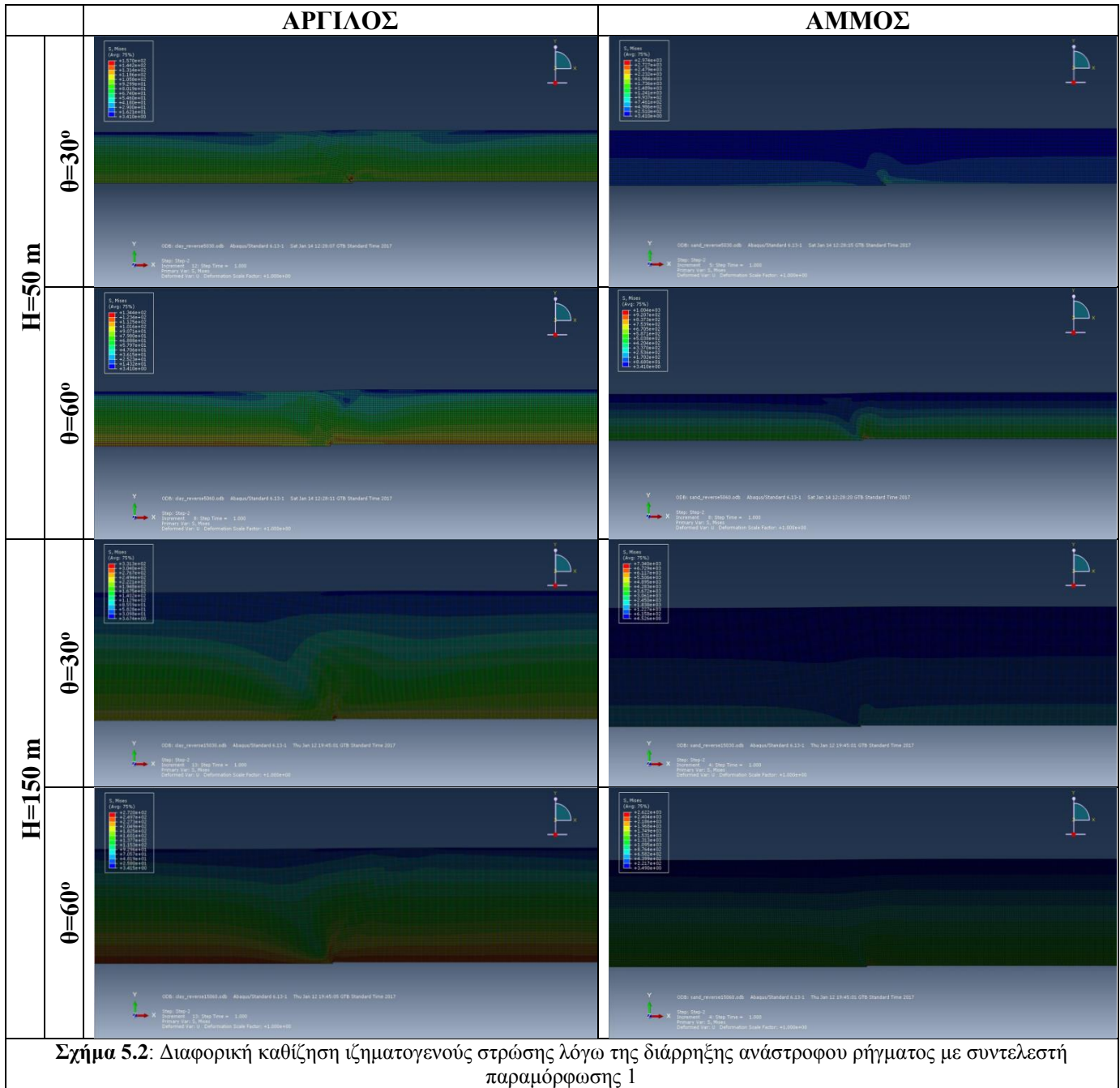
### 5.1 Περιγραφή του προσομοιώματος της ιζηματογενούς στρώσης

Με σκοπό την μελέτη της σχέσης ιζημάτων και ρήγματος πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση της διάρρηξης ενός ρήγματος στο ελεύθερο πεδίο πάνω στο οποίο βρίσκεται ιζηματογενής στρώση με το προγραμματιστικό περιβάλλον του ABAQUS. Η ιζηματογενής στρώση θεωρήθηκε ότι είναι 1000 m κατά μήκος όπου χρησιμοποιήθηκαν 1000 ίσου μεγέθους στοιχεία τύπου CPE4 με 1 m μήκος το καθένα και η διάρρηξη του ρήγματος γίνεται στο μέσον της ιζηματογενούς στρώσης δηλαδή στα 500 m. Επιπλέον για το συγκεκριμένο προσομοίωμα χρησιμοποιήθηκε πυκνότητα υλικού  $\rho=2 \text{ tn/m}^3$ , μέτρο ελαστικότητας  $E_0=10000 \text{ MPa}$  και λόγος Poisson  $\nu=0,3$ . Στην αρχή χρησιμοποιήθηκαν αρχικές γεωστατικές τάσεις δηλαδή το βάρος των υπερκείμενων και έπειτα ασκήθηκε διαφορική καθίζηση στην ιζηματογενή στρώση στα 500 m απ' αρχής προκειμένου να προσομοιωθεί η διάρρηξη του ρήγματος. Οι περιπτώσεις που αναλύθηκαν είναι οι εξής:

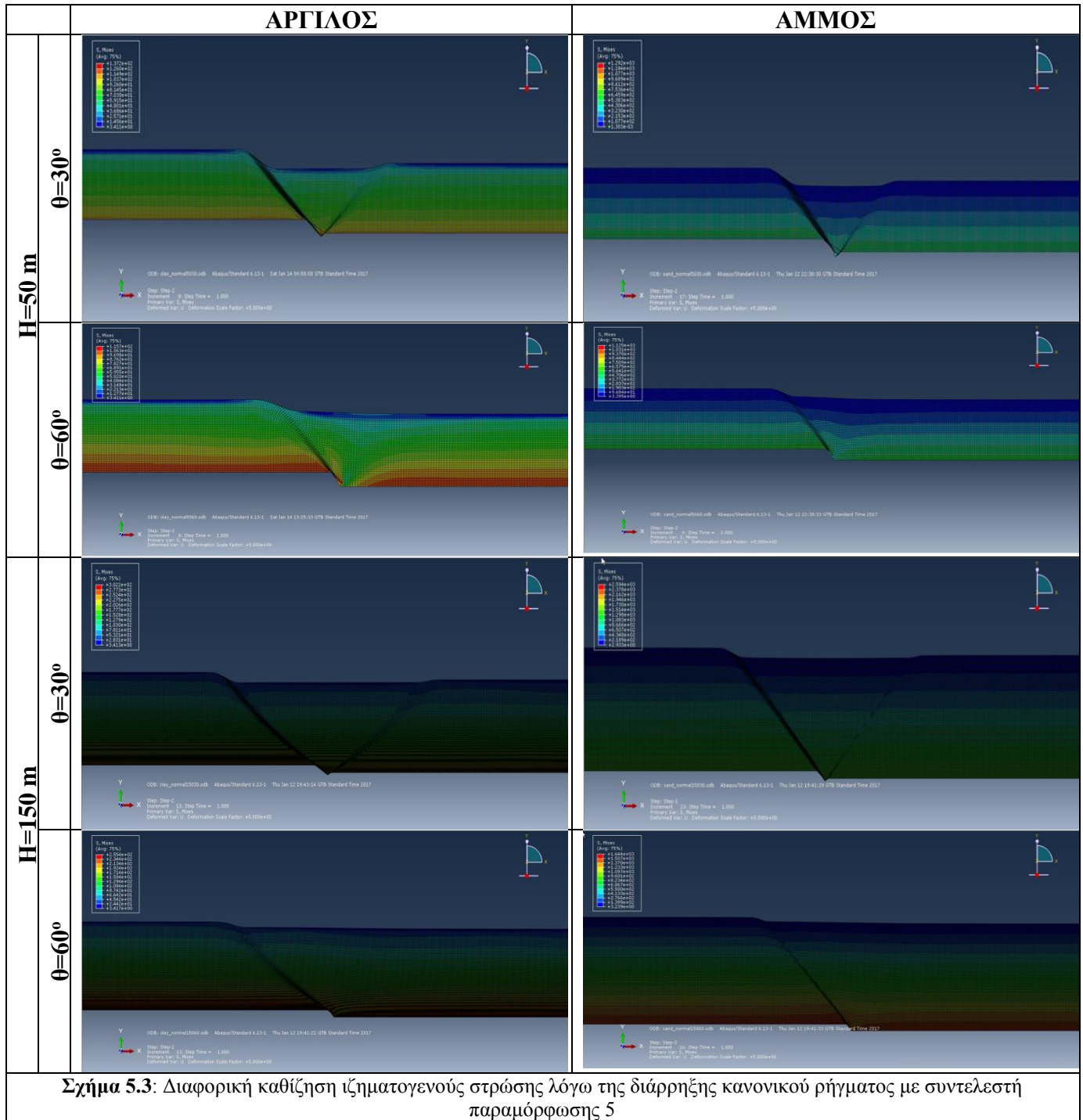
- Πάχος ιζηματογενούς στρώσης H, 50 m και 150 m
- Γωνία διάρρηξης ρήγματος  $\theta$ ,  $30^\circ$  και  $60^\circ$
- Αργιλικό και αμμώδες υλικό ιζηματογενούς στρώσης
- Κανονικό και ανάστροφο ρήγμα

Επισημαίνεται ότι το αργιλικό ιζηματογενές υλικό έχει γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi=2^\circ$ , γωνία διασταλτικότητας  $\psi=0,2^\circ$  και συνοχή  $c=20$  kPa, ενώ το αμμώδες ιζηματογενές υλικό έχει γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi=20^\circ$ , γωνία διασταλτικότητας  $\psi=3^\circ$  και συνοχή  $c=1$  kPa.

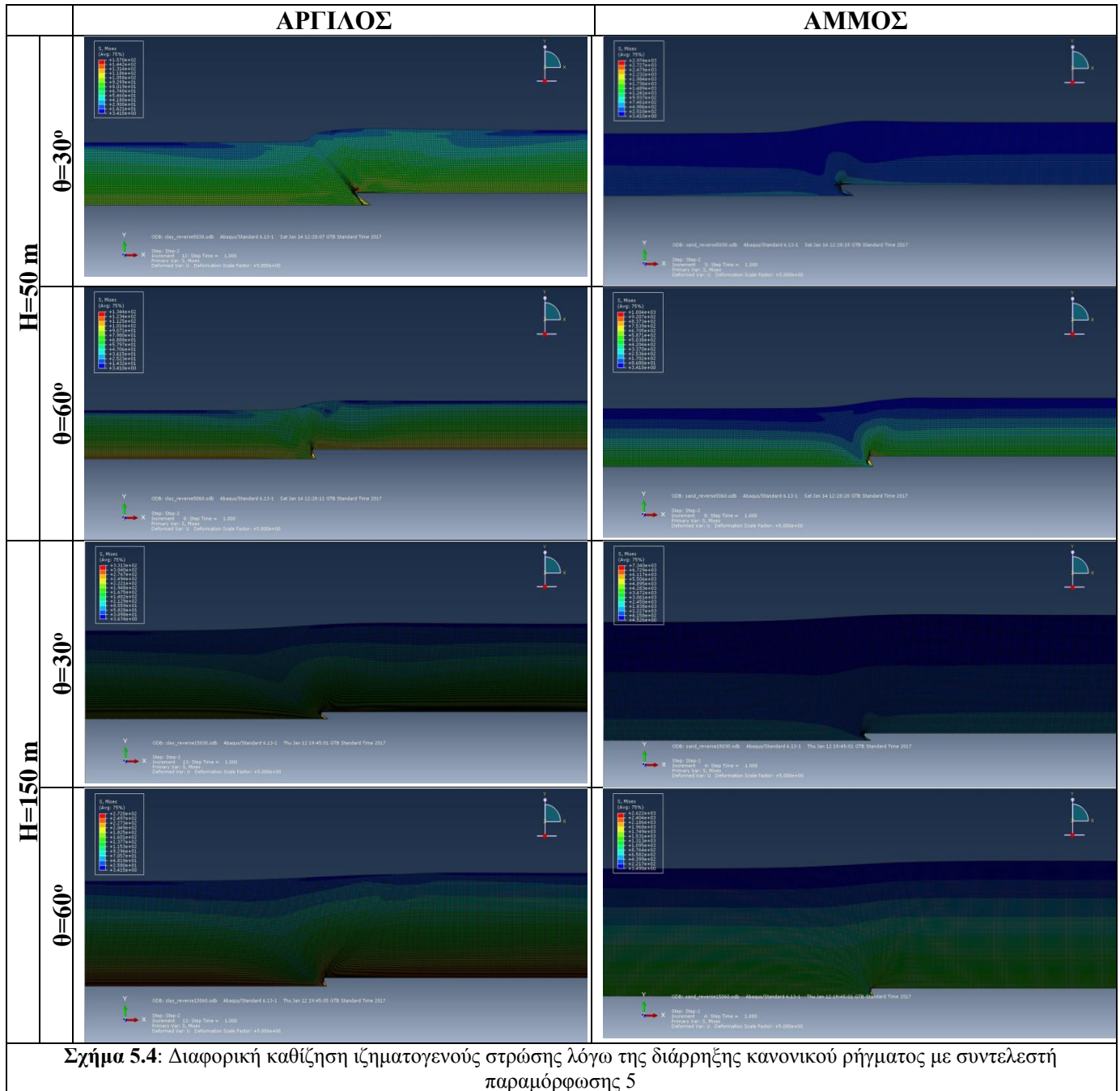




Στα Σχήματα 5.1 και 5.2 παρατίθενται τα προσομοιώματα των ιζηματογενών στρώσεων για κάθε περίπτωση όπως εξήχθησαν από το προγραμματιστικό περιβάλλον του ABAQUS/Cae. Στην παραπάνω περίπτωση ο συντελεστής παραμόρφωσης 1 αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα αφού οι εικόνες δεν διαθέτουν καμία παραμόρφωση. Στα Σχήματα 5.3 και 5.4 ο συντελεστής παραμόρφωσης 5 είναι ένας συντελεστής όπου δείχνει πιο έντονα τις παραμορφώσεις για να διακριθούν καλύτερα τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης.

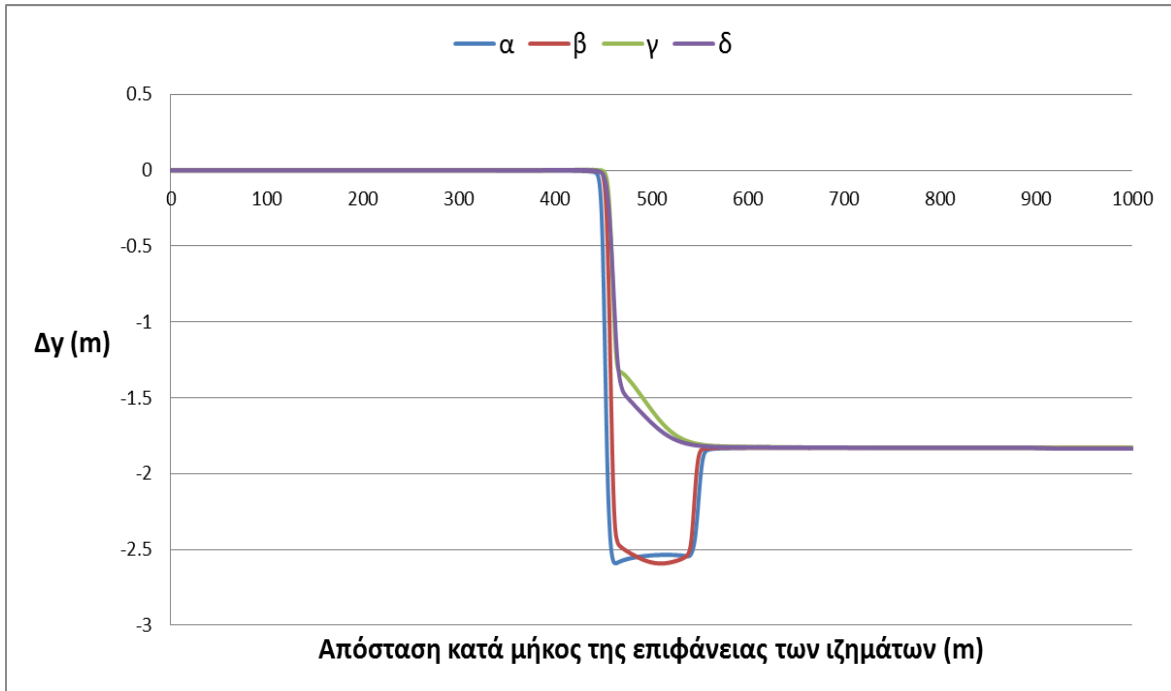




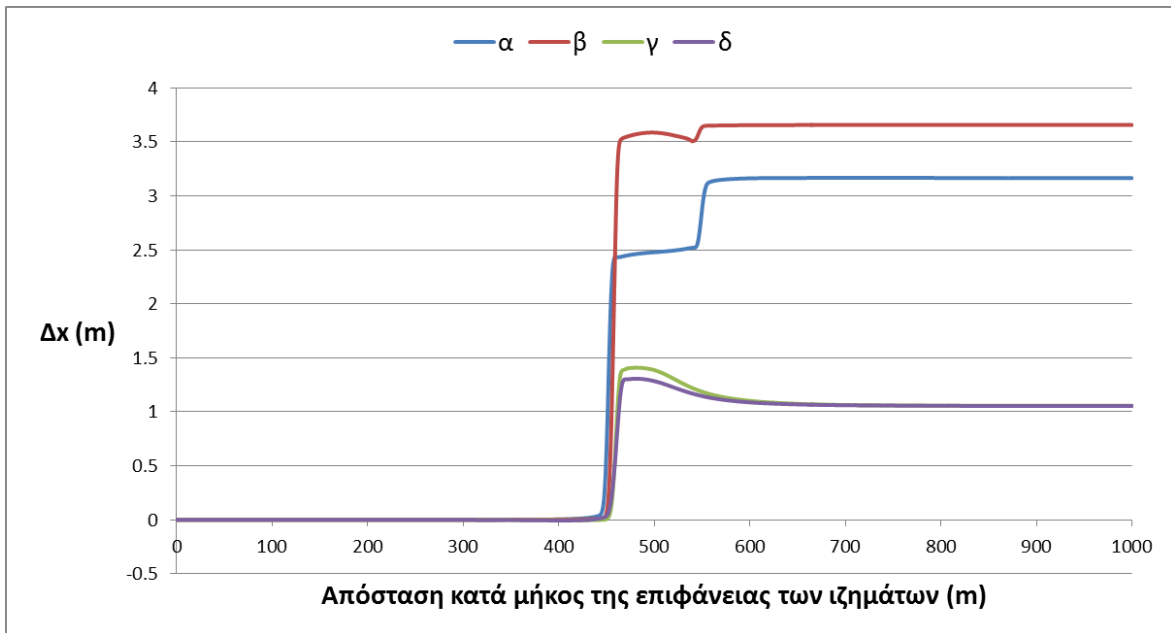


## 5.2 Επιφανειακές μετατοπίσεις με το ίδιο πάχος στρώσης (κανονικό ρήγμα)

Στο παρόν υποκεφάλαιο συγκρίνονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης με βάση την γωνία διάρρηξης του ρήγματος  $\theta$ , και το υλικό της στρώσης (αργιλικό και αμμώδες) για το ίδιο πάχος  $H$  αυτής. Τα συμπεράσματα παρατίθενται στην συνέχεια.

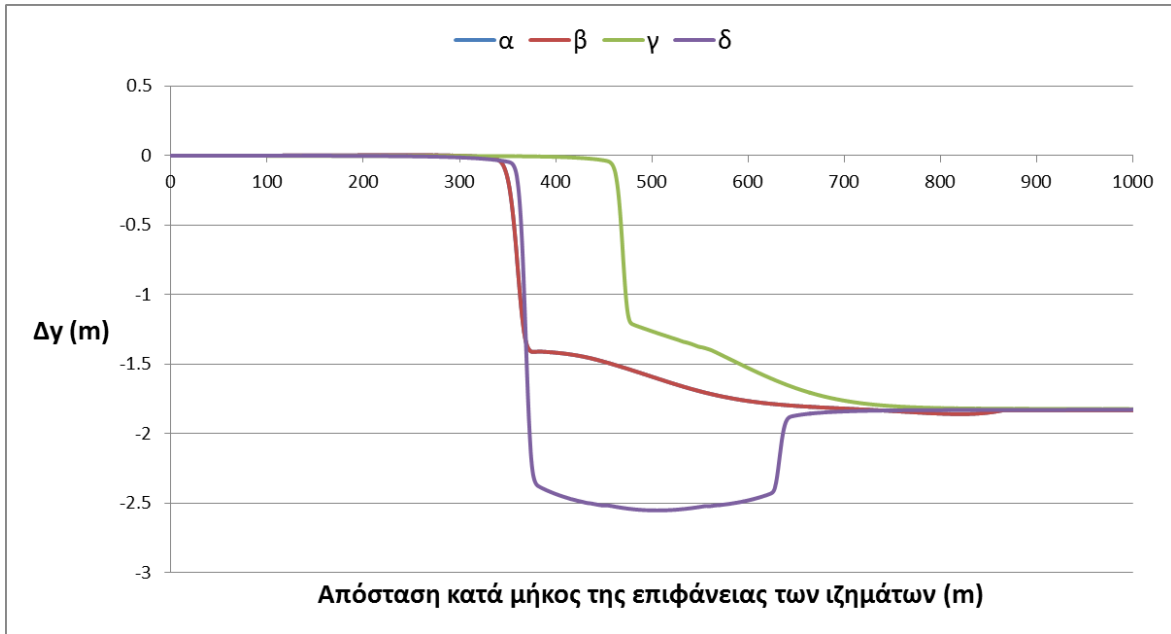


**Διάγραμμα 5.1:** Κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta y$ ) με  $H=50$  m η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α) αργιλικά ιζήματα με  $\theta=30^\circ$ , β) αμμώδη ιζήματα με  $\theta=30^\circ$ , γ) αργιλικά ιζήματα με  $\theta=60^\circ$ , δ) αμμώδη ιζήματα με  $\theta=60^\circ$



**Διάγραμμα 5.2:** Οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta x$ ) με  $H=50$  m η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α) αργιλικά ιζήματα με  $\theta=30^\circ$ , β) αμμώδη ιζήματα με  $\theta=30^\circ$ , γ) αργιλικά ιζήματα με  $\theta=60^\circ$ , δ) αμμώδη ιζήματα με  $\theta=60^\circ$





**Διάγραμμα 5.3:** Κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta y$ ) με  $H=150\text{ m}$  η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α) αργιλικά ιζήματα με  $\theta=30^\circ$ , β) αργιλικά ιζήματα με  $\theta=60^\circ$ , γ) αμμώδη ιζήματα με  $\theta=60^\circ$ , δ) αμμώδη ιζήματα με  $\theta=30^\circ$



**Διάγραμμα 5.4:** Οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta x$ ) με  $H=150\text{ m}$  η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α) αργιλικά ιζήματα με  $\theta=30^\circ$ , β) αργιλικά ιζήματα με  $\theta=60^\circ$ , γ) αμμώδη ιζήματα με  $\theta=60^\circ$ , δ) αμμώδη ιζήματα με  $\theta=30^\circ$

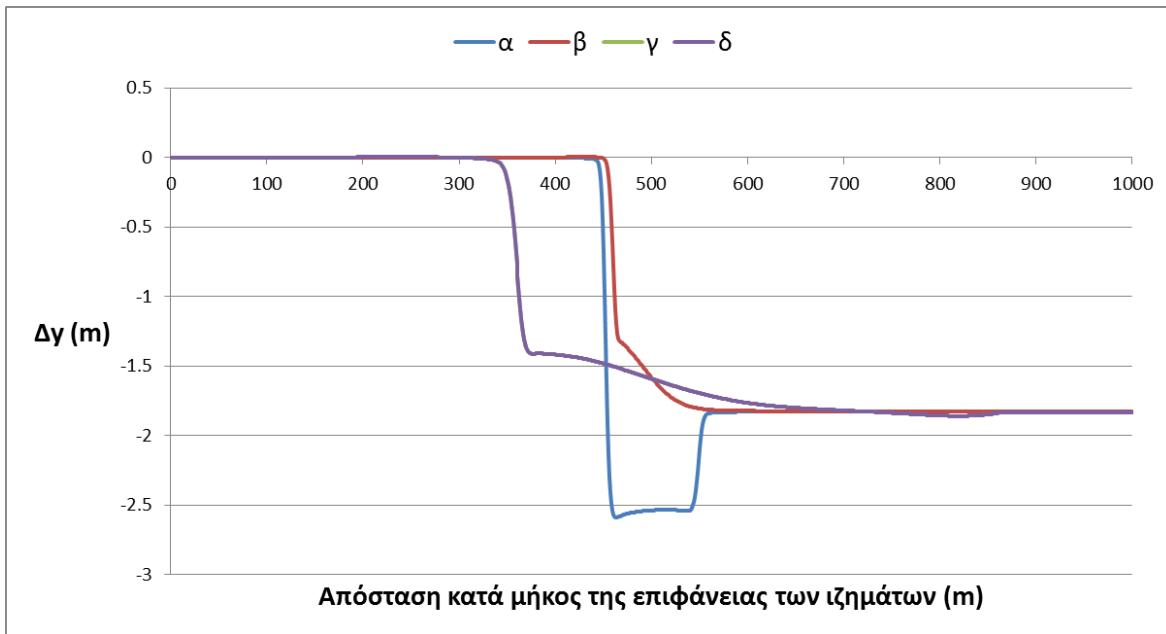
Από το διάγραμμα 5.1 συμπεραίνεται ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας της αργιλικής και της αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης πάχους 50 m είναι της τάξης των 2.6 m για γωνία διάρρηξης ρήγματος  $30^\circ$  ενώ για γωνία διάρρηξης

ρήγματος  $60^\circ$  η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας των ανωτέρων είναι της τάξης των 1.8 m. Παρατηρείται ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση παίζει μεγάλο ρόλο η γωνία διάρρηξης του ρήγματος αφού και με διαφορετικά υλικά ιζήματος όταν η γωνία είναι κοινή δεν παρατηρούνται οι διαφορές ενώ όταν η γωνία αυξηθεί (ή μειωθεί) παρατηρείται μία αισθητή μείωση (ή αύξηση) της μετατόπισης της επιφάνειας της ιζηματογενούς στρώσης. Το υλικό φαίνεται να μην επηρεάζει την κατακόρυφη μετατόπιση αφού και στις δύο γωνίες διάρρηξης του ρήγματος συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι και στις τέσσερις περιπτώσεις η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται στα 500 m περίπου απ' αρχής. Για τις ίδιες περιπτώσεις όσον αφορά την οριζόντια μετατόπιση σύμφωνα με το διάγραμμα 5.2 για γωνία διάρρηξης ρήγματος  $30^\circ$  οι ιζηματογενείς αμμώδεις και αργιλικές στρώσεις έχουν μέγιστη οριζόντια μετατόπιση 3.4 m και 3.8 m περίπου, αντίστοιχα. Για γωνία διάρρηξης ρήγματος  $60^\circ$  τα προαναφερθέντα έχουν μέγιστη οριζόντια μετατόπιση της τάξης του 1 m. Στην πρώτη περίπτωση η μέγιστη μετατόπιση παρουσιάζεται στα 550 m περίπου απ' αρχής ενώ στην δεύτερη περίπου στα 500 m απ' αρχής. Τα συμπεράσματα εδώ είναι παρόμοια με πριν μόνο που στην περίπτωση της γωνίας διάρρηξης των  $30^\circ$  φαίνεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα και το υλικό της ιζηματογενούς στρώσης αφού η διαφορά μεταξύ της μέγιστης οριζόντια μετατόπισης του αργιλικού υλικού και του εδαφικού υλικού είναι μεγάλη (περίπου 1 m).

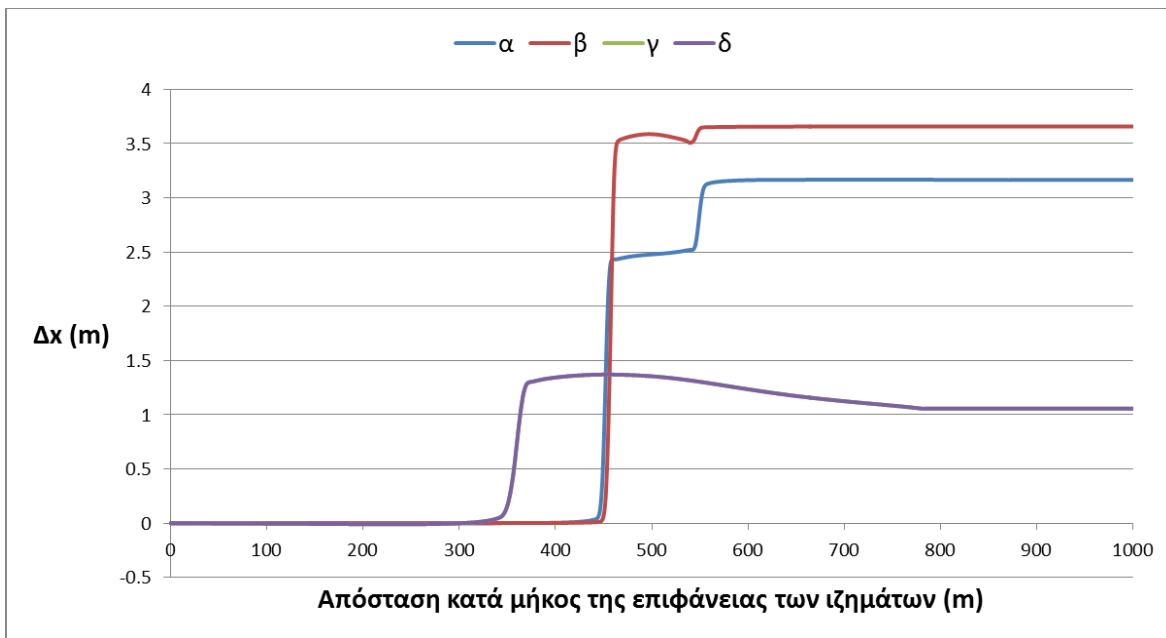
Από το διάγραμμα 5.3 συμπεραίνεται ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας της αργιλικής στρώσης πάχους 150 m είναι της τάξης των 1.8 m και για τις δύο γωνίες διάρρηξης ενώ της αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης στις  $60^\circ$  η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση είναι της τάξης των 1.8 m ίδια δηλαδή με το αργιλικό υλικό, στις  $30^\circ$  παρατηρείται μία αύξηση περίπου στην τιμή των 2.5 m. Στην τελευταία περίπτωση η μέγιστη τιμή παρατηρείται στα 500 m, ενώ οι υπόλοιπες κοντά στα 600 m. Συμπεραίνεται ότι η γωνία διάρρηξης παίζει ρόλο στα αμμώδη ιζήματα λόγω της προαναφερθείσας διαφοράς που παρατηρείται όπως και το υλικό όπου για γωνία διάρρηξης  $30^\circ$  παρατηρείται μεγαλύτερη επιφανειακή μετατόπιση στο αμμώδες υλικό. Η ίδια συμπεριφορά και τα ίδια συμπεράσματα παρατηρούνται και στην οριζόντια μετατόπιση από το διάγραμμα 5.4 με μέγιστη τιμή αμμώδους υλικού για γωνία διάρρηξης  $30^\circ$  στα 3 m ενώ τα υπόλοιπα βρίσκονται περίπου στα 1.8 m.

### **5.3 Επιφανειακές μετατοπίσεις με το ίδιο υλικό στρώσης (κανονικό ρήγμα)**

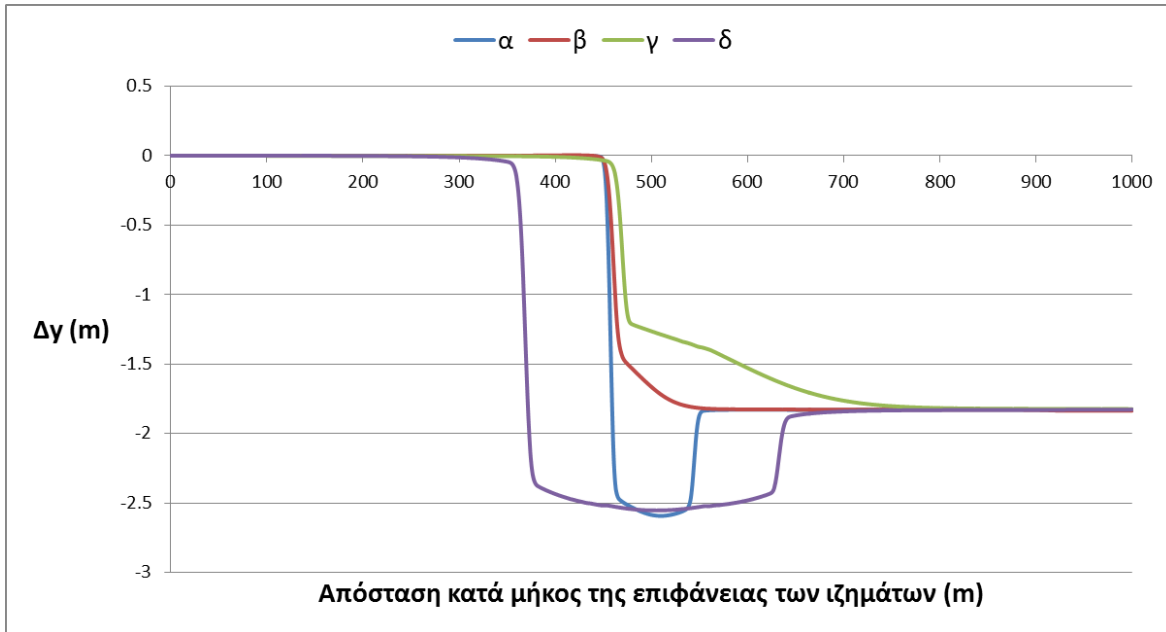
Στο παρόν υποκεφάλαιο συγκρίνονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης με βάση την γωνία διάρρηξης του ρήγματος  $\theta$ , και το πάχος  $H$  της στρώσης για το ίδιο υλικό αυτής. Τα συμπεράσματα παρατίθενται στην συνέχεια.



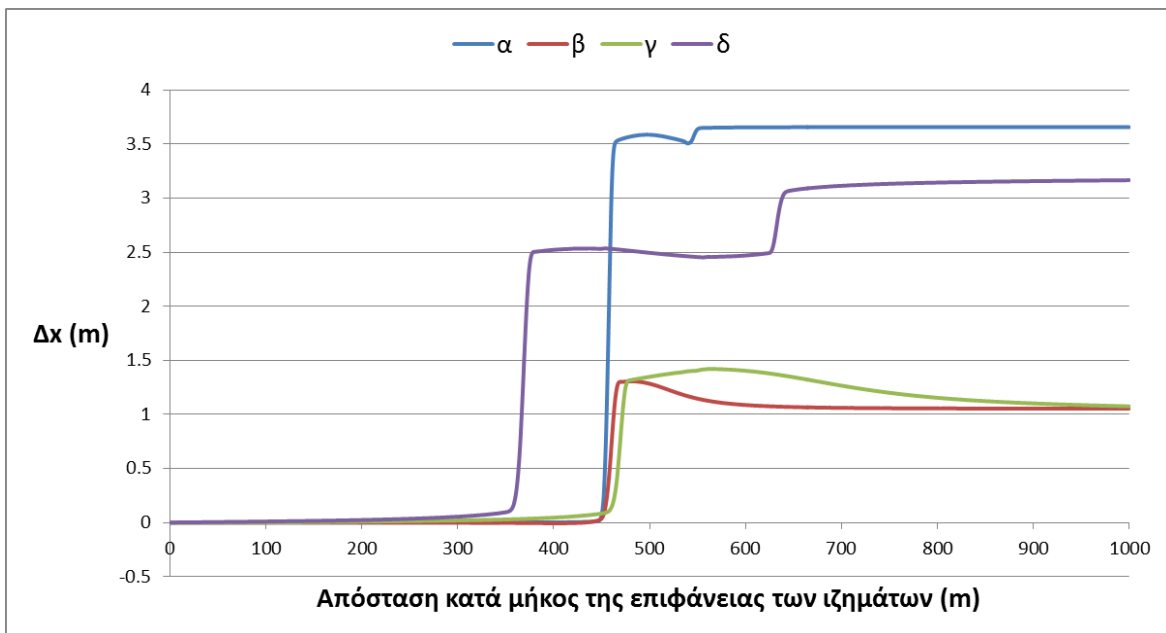
**Διάγραμμα 5.5:** Κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας αργιλικής ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta y$ ) η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α)  $H=50\text{ m}$  και  $\theta=30^\circ$ , β)  $H=50\text{ m}$  και  $\theta=60^\circ$ , γ)  $H=150\text{ m}$  και  $\theta=30^\circ$ , δ)  $H=150\text{ m}$  και  $\theta=60^\circ$



**Διάγραμμα 5.6:** Οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας αργιλικής ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta x$ ) η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α)  $H=50\text{ m}$  και  $\theta=30^\circ$ , β)  $H=50\text{ m}$  και  $\theta=60^\circ$ , γ)  $H=150\text{ m}$  και  $\theta=30^\circ$ , δ)  $H=150\text{ m}$  και  $\theta=60^\circ$



**Διάγραμμα 5.7:** Κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta y$ ) η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α)  $H=50\text{ m}$  και  $\theta=30^\circ$ , β)  $H=50\text{ m}$  και  $\theta=60^\circ$ , γ)  $H=150\text{ m}$  και  $\theta=60^\circ$ , δ)  $H=150\text{ m}$  και  $\theta=30^\circ$



**Διάγραμμα 5.8:** Οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta x$ ) η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α)  $H=50\text{ m}$  και  $\theta=30^\circ$ , β)  $H=50\text{ m}$  και  $\theta=60^\circ$ , γ)  $H=150\text{ m}$  και  $\theta=60^\circ$ , δ)  $H=150\text{ m}$  και  $\theta=30^\circ$

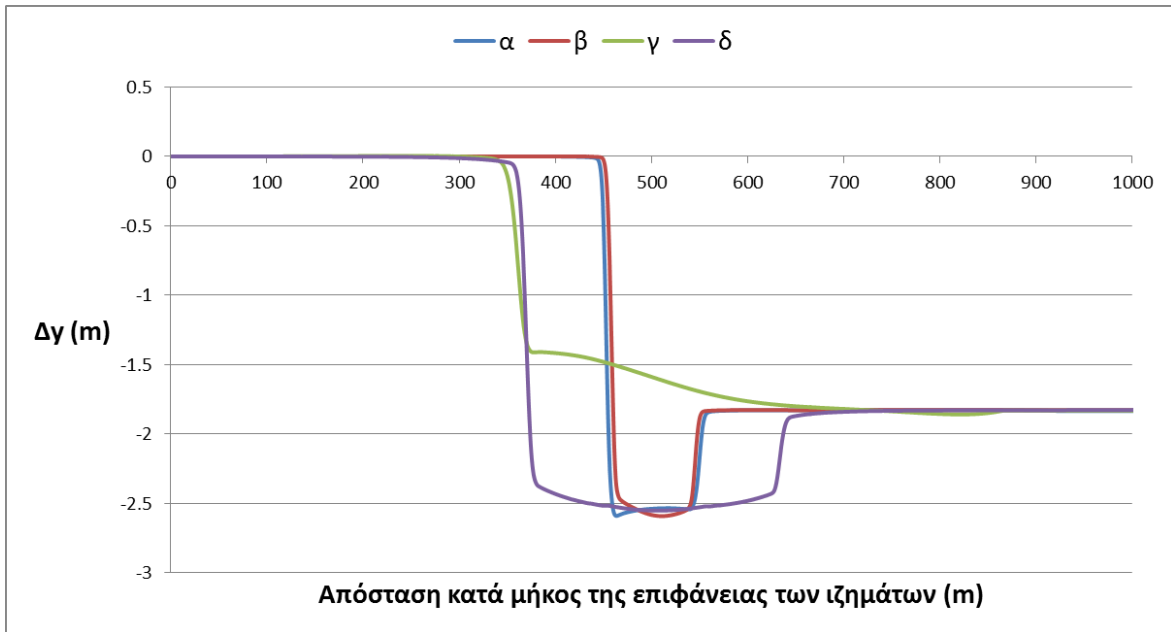
Από το διάγραμμα 5.5 συμπεραίνεται ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας της αργιλικής ιζηματογενούς στρώσης πάχους 50 m για γωνίες διάρρηξης  $30^\circ$   $60^\circ$  είναι της τάξης των 2.5 m και 1.8 m, αντίστοιχα. Εδώ φαίνεται ότι παίζει μεγάλο ρόλο

η γωνία διάρρηξης λόγω αυτής της αισθητής διαφοροποίησης στην επιφανειακή μετατόπιση. Όσον αφορά την στρώση πάχους 150 m, η γωνία δεν παίζει ρόλο αφού και στις δύο περιπτώσεις η μέγιστη επιφανειακή μετατόπιση είναι της τάξης των 1.8 m. Σε όλες τις περιπτώσεις οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα 500 m περίπου απ' αρχής. Παρατηρούμε ότι το πάχος της στρώσης επηρεάζει την επιφανειακή μετατόπιση μόνο στην περίπτωση όπου η γωνία διάρρηξης είναι  $60^\circ$  ενώ στις  $30^\circ$  το πάχος της ιζηματογενούς στρώσης δεν φαίνεται να παίζει κάποιο ρόλο στην μετατόπιση λόγω των μικρών διαφοροποιήσεων. Όσον αφορά την οριζόντια μετατόπιση, από το διάγραμμα 5.6 συμπεραίνεται ότι στα 50 m πάχους της στρώσης η γωνία διάρρηξης του ρήγματος επηρεάζει σημαντικά την επιφανειακή μετατόπιση αφού στις  $30^\circ$  η μέγιστη είναι 3.6 m ενώ στις  $60^\circ$  στα 3.2 m περίπου. Στην περίπτωση των 150 m πάχους στρώσης η γωνία δεν παίζει ρόλο αφού η μέγιστη μετατόπιση για γωνία διάρρηξης  $30^\circ$  και  $60^\circ$  είναι ίδια με τιμή 1.4 m περίπου. Το πάχος της ιζηματογενούς στρώσης φαίνεται ότι παίζει και εδώ σημαντικό ρόλο αυτή την φορά και για τις δύο γωνίες διάρρηξης. Σε όλες τις περιπτώσεις και εδώ οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα 500 m περίπου απ' αρχής.

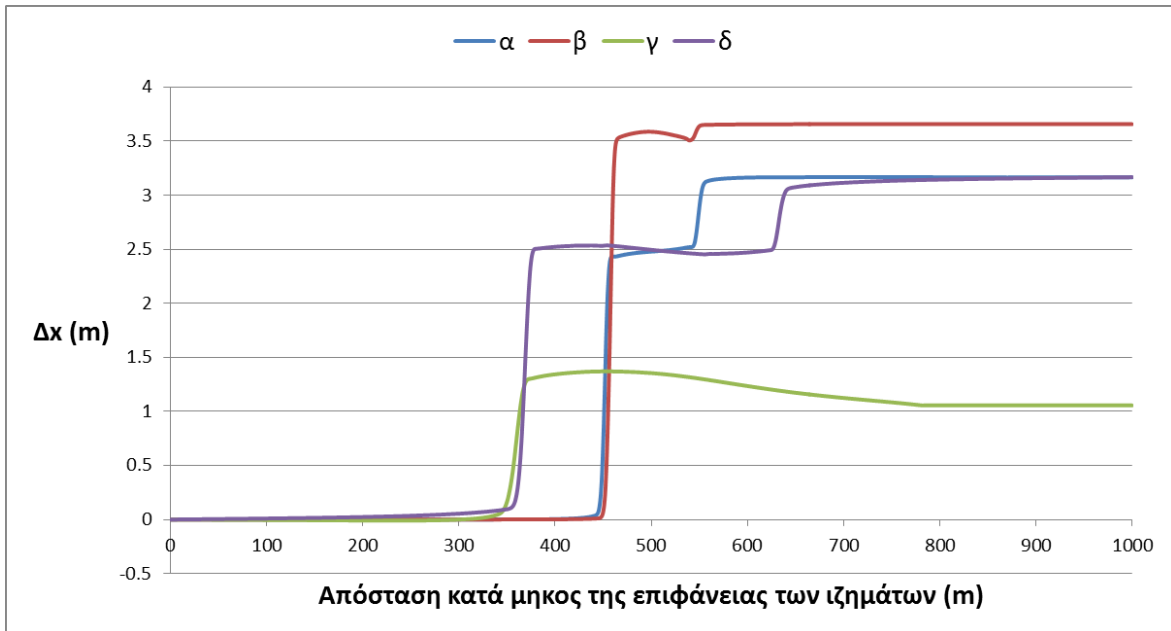
Από το διάγραμμα 5.7 συμπεραίνεται ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας της αμμώδους στρώσης πάχους 50 m για γωνίας διάρρηξης  $30^\circ$  και  $60^\circ$  είναι της τάξης των 2.5 m και 1.8 m αντίστοιχα. Εδώ φαίνεται ότι παίζει μεγάλο ρόλο η γωνία διάρρηξης λόγω αυτής της αισθητής διαφοροποίησης στην επιφανειακή μετατόπιση. Όσον αφορά την στρώση πάχους 150 m, η γωνία παίζει και εδώ ρόλο αφού για γωνία διάρρηξης  $60^\circ$  και  $30^\circ$  η μέγιστη επιφανειακή μετατόπιση είναι της τάξης των 1.8 m και 2.5 m αντίστοιχα. Σε όλες τις περιπτώσεις οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα 500 m περίπου απ' αρχής. Εδώ συμπεραίνουμε ότι το πάχος της εδαφικής στρώσης και η γωνία διάρρηξης παίζουν σημαντικό ρόλο. Όσον αφορά την οριζόντια μετατόπιση από το διάγραμμα 5.8 συμπεραίνουμε ότι στα 50 m πάχους της στρώσης η γωνία διάρρηξης του ρήγματος επηρεάζει σημαντικά την μέγιστη επιφανειακή μετατόπιση αφού στις  $30^\circ$  είναι 3.6 m ενώ στις  $60^\circ$  στο 1 m περίπου. Στην περίπτωση των 150 m πάχους στρώσης η γωνία παίζει και εδώ σημαντικό ρόλο αφού η μέγιστη μετατόπιση για γωνία διάρρηξης  $30^\circ$  και  $60^\circ$  είναι 3.1 και 1.4 m περίπου αντίστοιχα. Το πάχος της ιζηματογενούς στρώσης φαίνεται ότι παίζει και εδώ σημαντικό ρόλο αυτή την φορά μόνο για γωνία διάρρηξης  $30^\circ$  υπάρχει μία σχετικά μεγάλη διαφοροποίηση σε σχέση με τις  $60^\circ$  όπου η διαφορά είναι αμελητέα. Σε όλες τις περιπτώσεις και εδώ οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα 500 m περίπου απ' αρχής.

#### **5.4 Επιφανειακές μετατοπίσεις με την ίδια γωνία διάρρηξης του ρήγματος (κανονικό ρήγμα)**

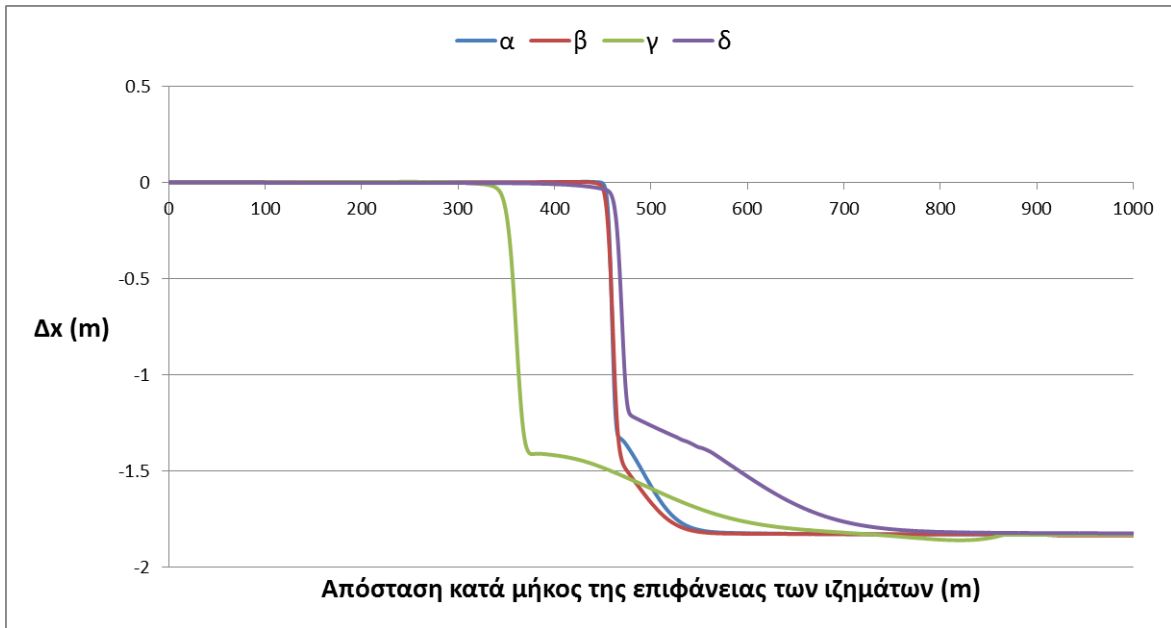
Στο παρόν υποκεφάλαιο συγκρίνονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης με βάση το υλικό του ιζήματος (αργιλικό και αμμώδες) και το πάχος  $H$  της στρώσης για την ίδια γωνία διάρρηξης ρήγματος  $\theta$ . Τα συμπεράσματα παρατίθενται στην συνέχεια.



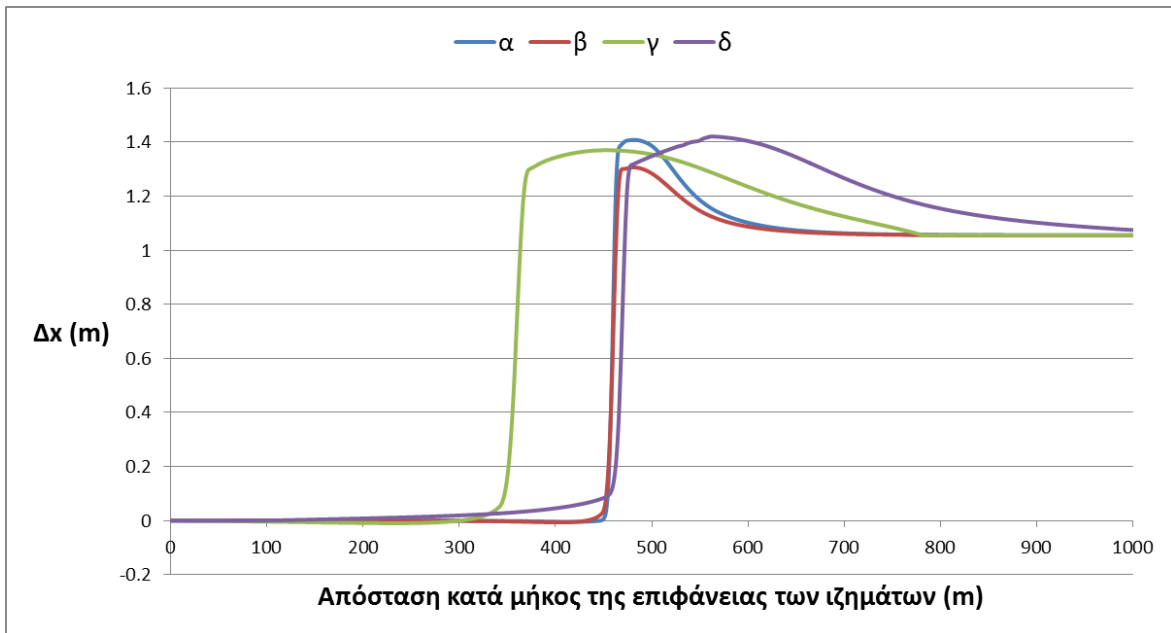
**Διάγραμμα 5.9:** Κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta y$ ) η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται με  $\theta=30^\circ$  υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α) αργιλικά ιζήματα με  $H=50\text{ m}$ , β) αμμώδη ιζήματα με  $H=50\text{ m}$ , γ) αργιλικά ιζήματα με  $H=150\text{ m}$ , δ) αμμώδη ιζήματα με  $H=150\text{ m}$



**Διάγραμμα 5.10:** Οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta x$ ) η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται με  $\theta=30^\circ$  υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α) αργιλικά ιζήματα με  $H=50\text{ m}$ , β) αμμώδη ιζήματα με  $H=50\text{ m}$ , γ) αργιλικά ιζήματα με  $H=150\text{ m}$ , δ) αμμώδη ιζήματα με  $H=150\text{ m}$



**Διάγραμμα 5.11:** Κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta y$ ) η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται με  $\theta=60^\circ$  υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α) αργιλικά ιζήματα με  $H=50\text{ m}$ , β) αμμώδη ιζήματα με  $H=50\text{ m}$ , γ) αργιλικά ιζήματα με  $H=150\text{ m}$ , δ) αμμώδη ιζήματα με  $H=150\text{ m}$



**Διάγραμμα 5.12:** Οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta x$ ) η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται με  $\theta=60^\circ$  υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α) αργιλικά ιζήματα με  $H= 50\text{ m}$ , β) αμμώδη ιζήματα με  $H=50\text{ m}$ , γ) αργιλικά ιζήματα με  $H=150\text{ m}$ , δ) αμμώδη ιζήματα με  $H=150\text{ m}$

Από το διάγραμμα 5.9 συμπεραίνεται ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας για γωνία διάρρηξης ρήγματος  $30^\circ$  αργιλικής και αμμώδους ιζηματογενούς

στρώσης πάχους 50 m είναι της τάξης των 2.5 m ενώ για πάχος στρώσης 150 m η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση είναι της τάξης του 1,8 m για γωνία διάρρηξης 30° ενώ για 60°. είναι της τάξης των 2.5 m. Εδώ φαίνεται ότι παίζει μεγάλο ρόλο μόνο η διαφορά στο πάχος της ιζηματογενούς στρώσης λόγω αυτής της αισθητής διαφοροποίησης στην επιφανειακή μετατόπιση ενώ το υλικό αυτής την επηρεάζει μόνο για πάχος 150 m και σε σχέση με τα 50 m βλέπουμε και έντονη διαφορά στο εύρος των μέγιστων επιφανειακών μετατοπίσεων. Σε όλες τις περιπτώσεις οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα 500 m περίπου απ' αρχής. Όσον αφορά την οριζόντια μετατόπιση, από το διάγραμμα 5.10 συμπεραίνουμε ότι στα 50 m πάχους της στρώσης η διαφορά στο υλικό της ιζηματογενούς στρώσης επηρεάζει σημαντικά την επιφανειακή μετατόπιση αφού η μέγιστη στο αργιλικό υλικό είναι 3.6 m ενώ στο αμμώδες στα 3.2 m περίπου. Και στα 150 m πάχους στρώσης ισχύει το ίδιο για το υλικό αφού για το αργιλικό υλικό η μέγιστη επιφανειακή μετατόπιση είναι της τάξης των 1.4 m ενώ το αμμώδες με σημαντική διαφορά της τάξης των 3.2 m. Μεταξύ των διαφορετικών παχών στρώσης φαίνεται ότι παίζει σημαντικό ρόλο και το πάχος αλλά και το υλικό με βάση το διάγραμμα έχουμε έντονες διαφοροποιήσεις ακόμη και στο εύρος των μέγιστων τιμών των επιφανειακών μετατοπίσεων.

Σε όλες τις περιπτώσεις και εδώ οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα 500 m περίπου απ' αρχής.

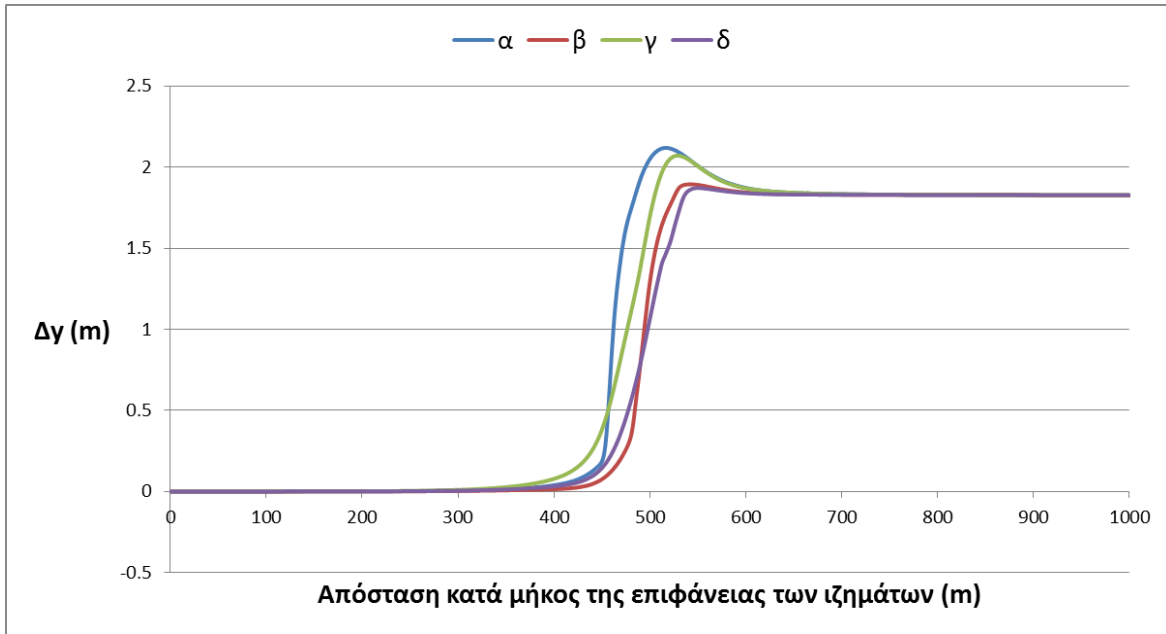
Από το διάγραμμα 5.11 συμπεραίνεται ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας για γωνία διάρρηξης ρήγματος 60° αργιλικής και αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης πάχους 50 m και 150 m είναι της τάξης 1.8 m και για τα δύο υλικά. Σε αυτό το σημείο φαίνεται ότι οι διαφοροποιήσεις είναι μικρές για όλες τις περιπτώσεις δηλαδή και για τα διαφορετικά πάχη και για τα διαφορετικά υλικά. Στο μοναδικό που φαίνεται να διαφέρουν αρκετά είναι στο εύρος των μέγιστων τιμών με μεγαλύτερο να είναι για το πάχος των 150 m. Αυτό βέβαια δημιουργεί στις καμπύλες των 50 m πιο απότομη κλίση. Σε όλες τις περιπτώσεις οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα 500 m περίπου απ' αρχής. Όσον αφορά την οριζόντια μετατόπιση από το διάγραμμα 5.12 εξάγουμε τα ίδια συμπεράσματα με τα παραπάνω με μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις για πάχος στρώσης 50 m και 150 m της τάξης του 1.4m σε όλες τις άλλες περιπτώσεις αντίστοιχα.

Σε κάθε περίπτωση και εδώ οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα 500 m περίπου απ' αρχής.

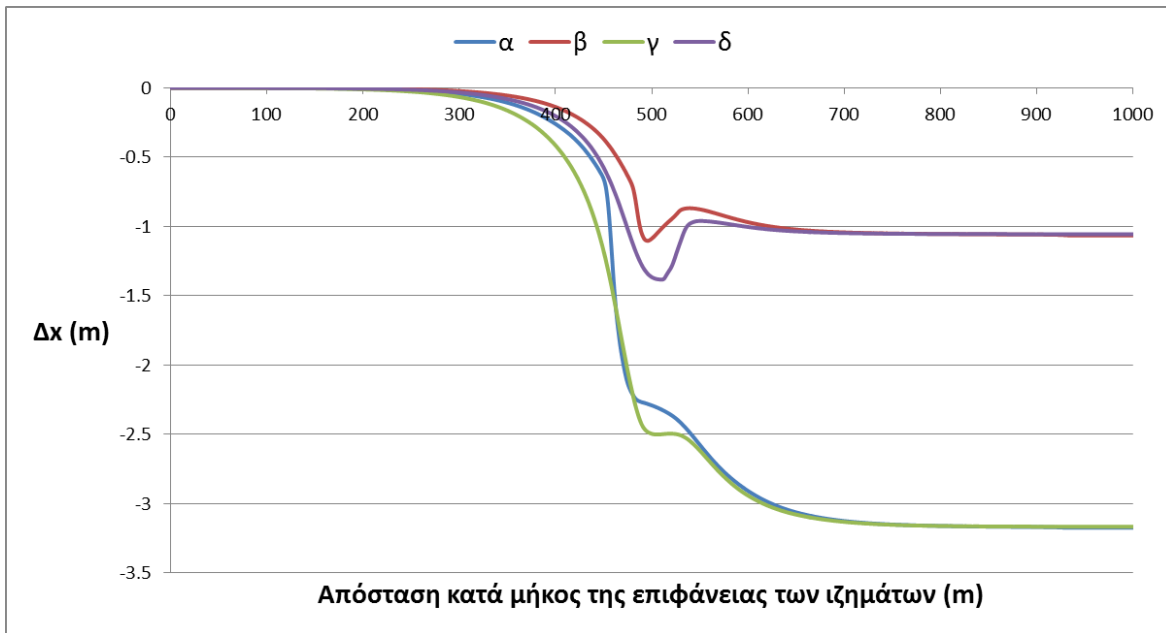
### **5.5 Επιφανειακές μετατοπίσεις με ίδιο πάχος στρώσης (ανάστροφο ρήγμα)**

Στο παρόν υποκεφάλαιο συγκρίνονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης με βάση την γωνία διάρρηξης ρήγματος  $\theta$  και το υλικό της στρώσης (αργιλικό και αμμώδες) για το ίδιο πάχος  $H$  αυτής. Τα συμπεράσματα παρατίθενται στην συνέχεια.

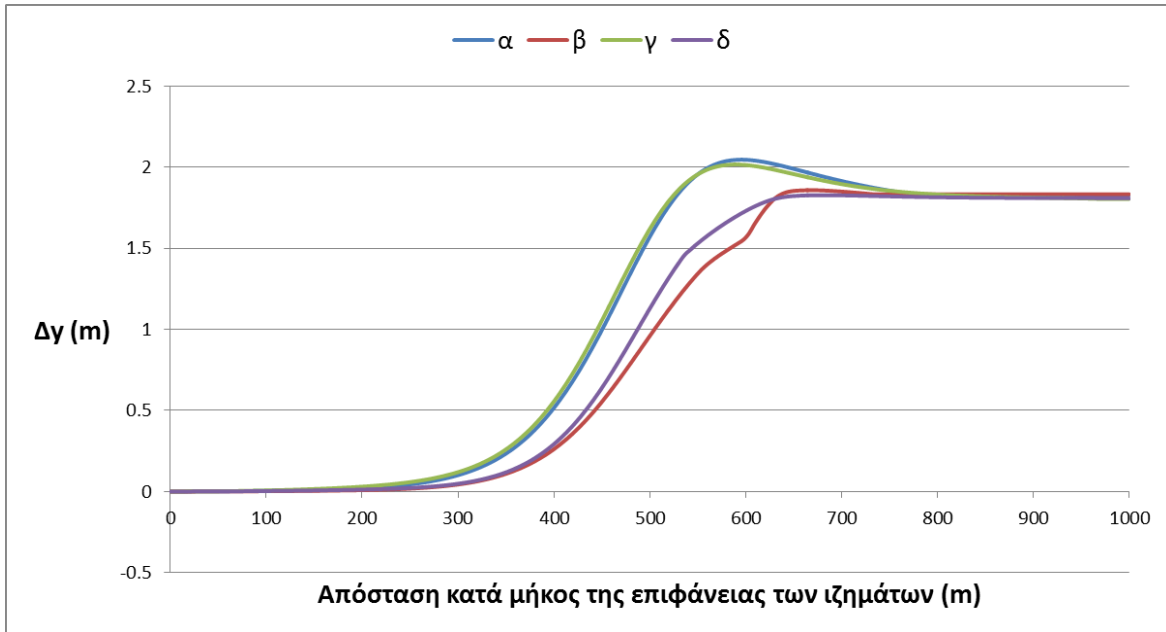




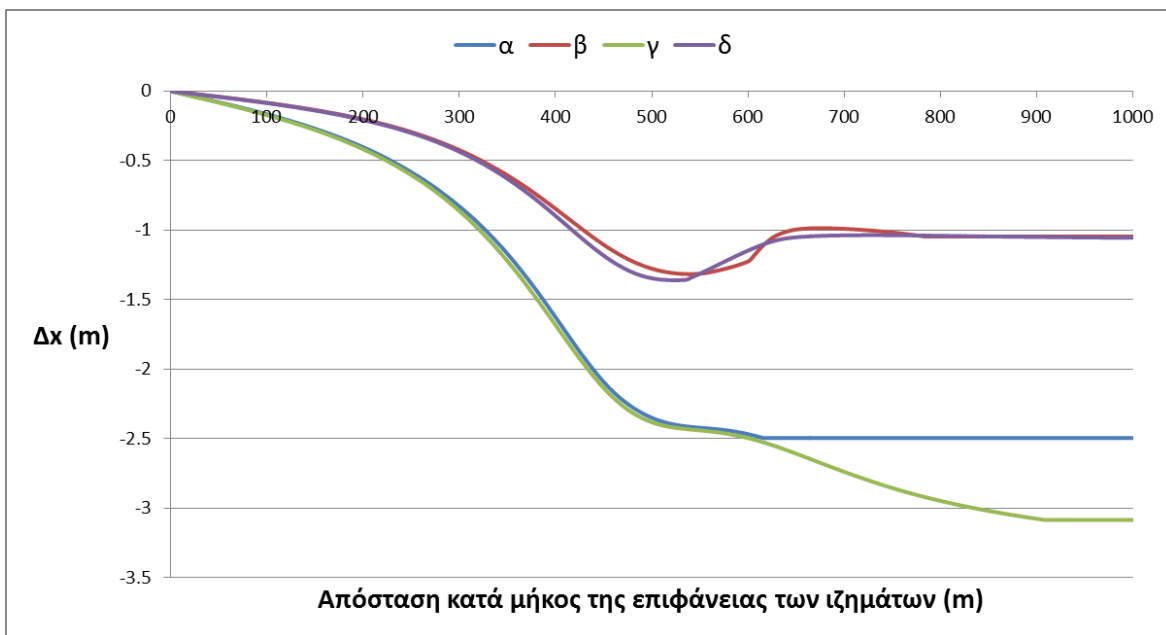
**Διάγραμμα 5.13:** Κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta y$ ) πάχους 50 m η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α) αργιλικά ιζήματα με  $\theta=30^\circ$ , β) αργιλικά ιζήματα με  $\theta=60^\circ$ , γ) αμμώδη ιζήματα με  $\theta=30^\circ$ , δ) αμμώδη ιζήματα με  $\theta=60^\circ$



**Διάγραμμα 5.14:** Οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta x$ ) πάχους 50 m η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α) αργιλικά ιζήματα με  $\theta=30^\circ$ , β) αργιλικά ιζήματα με  $\theta=60^\circ$ , γ) αμμώδη ιζήματα με  $\theta=30^\circ$ , δ) αμμώδη ιζήματα με  $\theta=60^\circ$



**Διάγραμμα 5.15:** Κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta y$ ) πάχους 150 m η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α) αργιλικά ιζήματα με  $\theta=30^\circ$ , β) αργιλικά ιζήματα με  $\theta=60^\circ$ , γ) αμμώδη ιζήματα με  $\theta=30^\circ$ , δ) αμμώδη ιζήματα με  $\theta=60^\circ$



**Διάγραμμα 5.16:** Οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta x$ ) πάχους 150 m η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α) αργιλικά ιζήματα με  $\theta=30^\circ$ , β) αργιλικά ιζήματα με  $\theta=60^\circ$ , γ) αμμώδη ιζήματα με  $\theta=30^\circ$ , δ) αμμώδη ιζήματα με  $\theta=60^\circ$

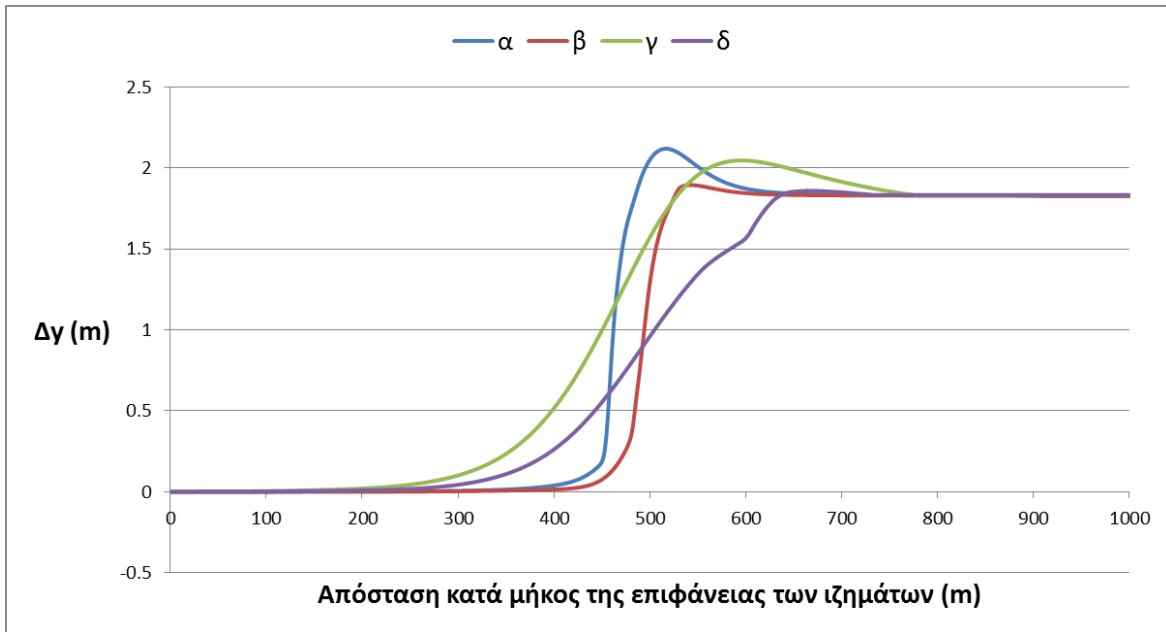
Από το διάγραμμα 5.13 συμπεραίνεται ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας της αργιλικής όπως και της αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης πάχους 50 m

είναι της τάξης των 2.2 m για γωνία διάρρηξης ρήγματος  $30^\circ$  ενώ για γωνία διάρρηξης ρήγματος  $60^\circ$  η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας των ανωτέρων είναι της τάξης των 1.80 m. Παρατηρείται ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση παίζει μεγάλο ρόλο η γωνία διάρρηξης του ρήγματος αφού και με διαφορετικά υλικά ιζήματος όταν η γωνία είναι κοινή δεν παρατηρούνται οι διαφορές ενώ όταν η γωνία αυξηθεί (ή μειωθεί) παρατηρείται μία αισθητή μείωση (ή αύξηση) της μετατόπισης της επιφάνειας της ιζηματογενούς στρώσης. Το υλικό φαίνεται να μην επηρεάζει την κατακόρυφη μετατόπιση αφού και στις δύο γωνίες διάρρηξης του ρήγματος συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο. Τέλος πρέπει να τονιστεί ότι και στις τέσσερις περιπτώσεις η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται στα 500 m περίπου απ' αρχής. Για τις ίδιες περιπτώσεις όσον αφορά την οριζόντια μετατόπιση σύμφωνα με το διάγραμμα 5.14 για γωνία διάρρηξης ρήγματος  $30^\circ$  οι ιζηματογενείς αμμόδεις και αργλικές στρώσεις έχουν μέγιστη οριζόντια μετατόπιση 3.35 m ενώ για γωνία διάρρηξης ρήγματος  $60^\circ$  είναι της τάξης του 1m. Σε όλες τις περιπτώσεις η μέγιστη μετατόπιση παρουσιάζεται 500 m περίπου απ' αρχής. Τα συμπεράσματα εδώ είναι ίδια με τα προηγούμενα.

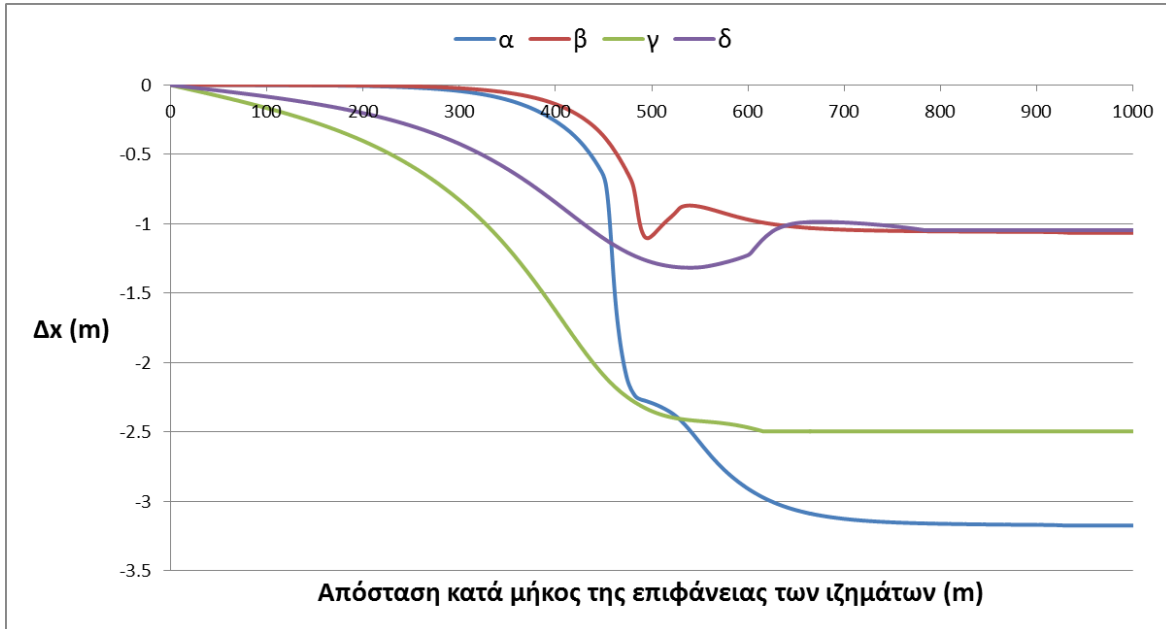
Από το διάγραμμα 5.15 συμπεραίνεται ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας της αργλικής και της αμμόδους ιζηματογενούς στρώσης πάχους 150 m είναι της τάξης των 2 m για γωνία διάρρηξης ρήγματος  $30^\circ$  ενώ για γωνία διάρρηξης ρήγματος  $60^\circ$  η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας των ανωτέρων είναι της τάξης των 1.80 m. Παρατηρείται ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση παίζει μεγάλο ρόλο η γωνία διάρρηξης του ρήγματος αφού με διαφορετικά υλικά ιζήματος όταν η γωνία είναι κοινή δεν παρατηρούνται διαφορές ενώ για διαφορετικές γωνίες παρατηρούνται διαφοροποιήσεις. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι και στις τέσσερις περιπτώσεις η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται στα 500 m περίπου απ' αρχής. Για τις ίδιες περιπτώσεις όσον αφορά την οριζόντια μετατόπιση σύμφωνα με το διάγραμμα 5.16 για γωνία διάρρηξης ρήγματος  $30^\circ$  οι ιζηματογενείς αμμόδεις και αργλικές στρώσεις έχουν μέγιστη οριζόντια μετατόπιση 2,5 m και 3.1 m αντίστοιχα, ενώ για γωνία διάρρηξης ρήγματος  $60^\circ$  τα προαναφερθέντα έχουν μέγιστη οριζόντια μετατόπιση της τάξης του 1.35 m. Σε όλες τις περιπτώσεις η μέγιστη μετατόπιση παρουσιάζεται 500 m περίπου απ' αρχής. Τα συμπεράσματα εδώ είναι ότι στην περίπτωση των  $30^\circ$  η διαφορά στο υλικό φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο ενώ στην περίπτωση των  $60^\circ$  όχι. Επίσης, η γωνία και εδώ δημιουργεί σημαντικές διαφοροποιήσεις και στην περίπτωση της άμμου και στην περίπτωση της αργίλου. Τέλος πρέπει να τονιστεί και στην οριζόντια μετατόπιση ότι η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται στα 500 m περίπου απ' αρχής εκτός από την περίπτωση της άμμου με γωνία διάρρηξης  $30^\circ$  όπου παρατηρείται κοντά στα 700 m απ' αρχής.

## 5.6 Επιφανειακές μετατοπίσεις με το ίδιο υλικό στρώσης (ανάστροφο ρήγμα)

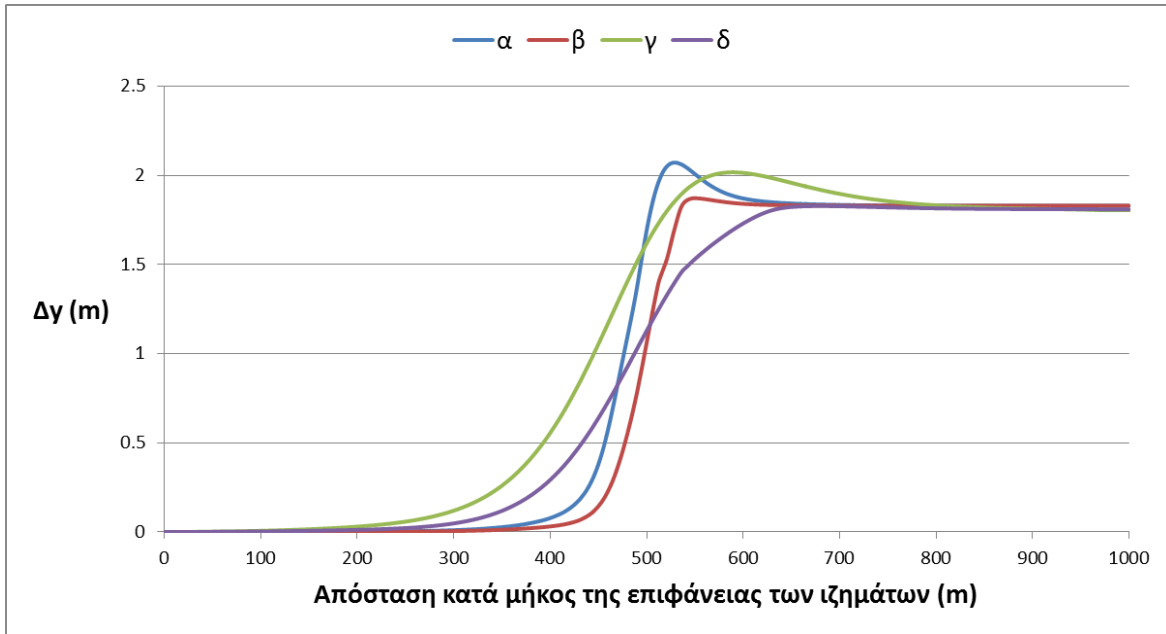
Στο παρόν υποκεφάλαιο συγκρίνονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης με βάση την γωνία διάρρηξης ρήγματος  $\theta$  και το πάχος  $H$  της στρώσης για το ίδιο υλικό αυτής. Τα συμπεράσματα παρατίθενται στην συνέχεια.



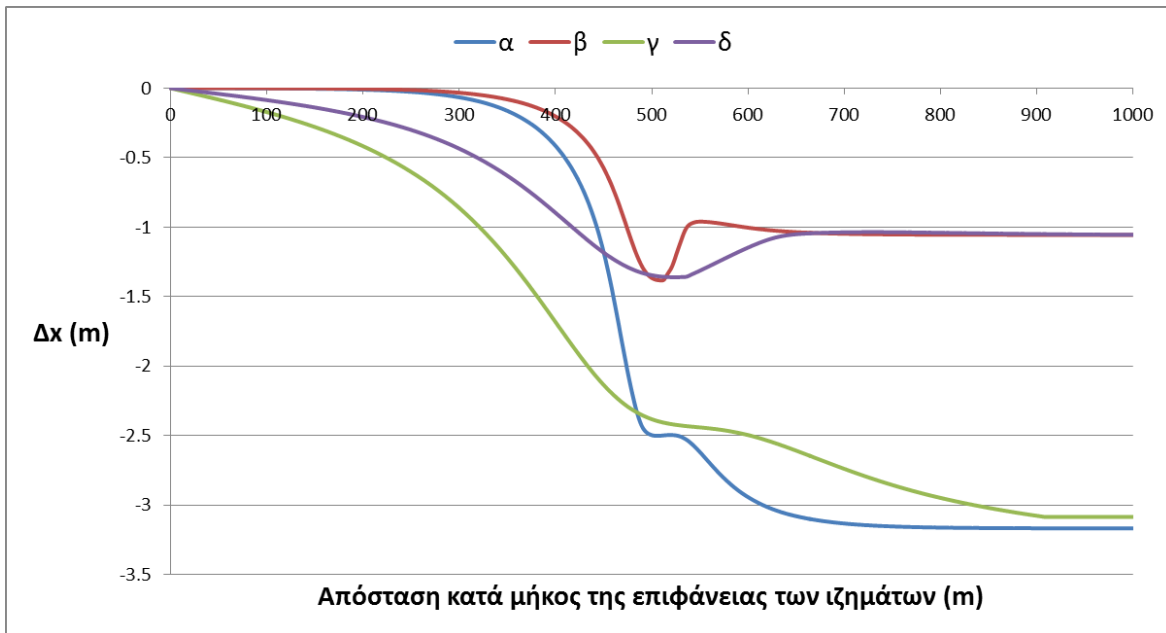
**Διάγραμμα 5.17:** Κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας αργιλικής ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta y$ ) η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α)  $H=50\text{ m}$  και  $\theta=30^\circ$ , β)  $H=50\text{ m}$  και  $\theta=60^\circ$ , γ)  $H=150\text{ m}$  και  $\theta=30^\circ$ , δ)  $H=150\text{ m}$  και  $\theta=60^\circ$



**Διάγραμμα 5.18:** Οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας αργιλικής ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta x$ ) η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α)  $H=50\text{ m}$  και  $\theta=30^\circ$ , β)  $H=50\text{ m}$  και  $\theta=60^\circ$ , γ)  $H=150\text{ m}$  και  $\theta=30^\circ$ , δ)  $H=150\text{ m}$  και  $\theta=60^\circ$



**Διάγραμμα 5.19:** Κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta y$ ) η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α)  $H=50\text{ m}$  και  $\theta=30^\circ$ , β)  $H=50\text{ m}$  και  $\theta=60^\circ$ , γ)  $H=150\text{ m}$  και  $\theta=30^\circ$ , δ)  $H=150\text{ m}$  και  $\theta=60^\circ$



**Διάγραμμα 5.20:** Οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta x$ ) η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α)  $H=50\text{ m}$  και  $\theta=30^\circ$ , β)  $H=50\text{ m}$  και  $\theta=60^\circ$ , γ)  $H=150\text{ m}$  και  $\theta=30^\circ$ , δ)  $H=150\text{ m}$  και  $\theta=60^\circ$

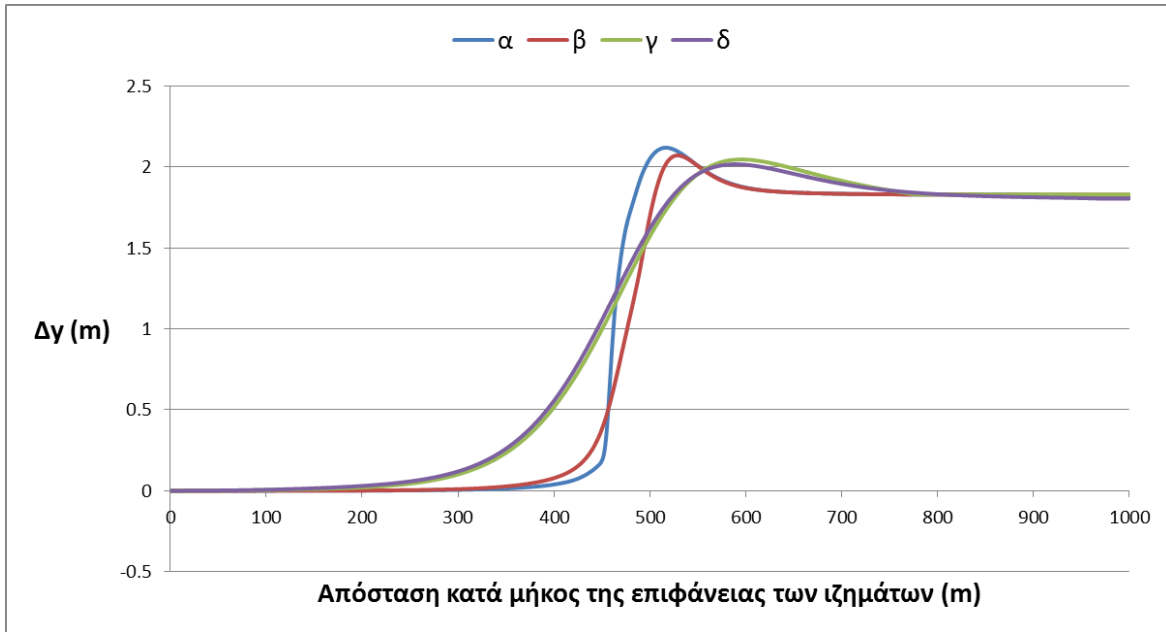
Από το διάγραμμα 5.17 συμπεραίνεται ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας της αργιλικής ιζηματογενούς στρώσης πάχους 50 m για γωνίας διάρρηξης  $30^\circ$  και  $60^\circ$  είναι της τάξης των 2.2 m και 1.80 m αντίστοιχα. Εδώ φαίνεται ότι παίζει μεγάλο ρόλο η γωνία διάρρηξης λόγω αυτής της αισθητής διαφοροποίησης στην επιφανειακή

μετατόπιση. Όσον αφορά την στρώση πάχους 150 m, η γωνία παίζει και εδώ σημαντικό ρόλο αφού και στις 30° και 60° γωνίας διάρρηξης του ρήγματος η μέγιστη επιφανειακή μετατόπιση είναι της τάξης των 2.01 m και 1.80 m περίπου αντίστοιχα. Σε όλες τις περιπτώσεις οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα 500 m περίπου απ' αρχής. Παρατηρούμε ότι το πάχος της στρώσης δεν επηρεάζει την επιφανειακή μετατόπιση. Όσον αφορά την οριζόντια μετατόπιση από το διάγραμμα 5.18 συμπεραίνουμε ότι στα 50 m πάχους της στρώσης η γωνία διάρρηξης του ρήγματος επηρεάζει σημαντικά την επιφανειακή μετατόπιση αφού στις 30° η μέγιστη είναι 3.2 m ενώ στις 60° στο 1m περίπου. Στην περίπτωση των 150 m πάχους στρώσης η γωνία παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο αφού η μέγιστη μετατόπιση για γωνία διάρρηξης 30° και 60° είναι 2.5 m και 1.40 m περίπου, αντίστοιχα. Το πάχος της ιζηματογενούς στρώσης φαίνεται ότι παίζει και εδώ σημαντικό ρόλο αυτή την φορά και για τις δύο γωνίες διάρρηξης αλλά μόνο για τα 50 m ενώ στα 150 m φαίνεται ότι είναι πολύ μικρή η διαφοροποίηση. Σε όλες τις περιπτώσεις και εδώ οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα 500 m περίπου απ' αρχής.

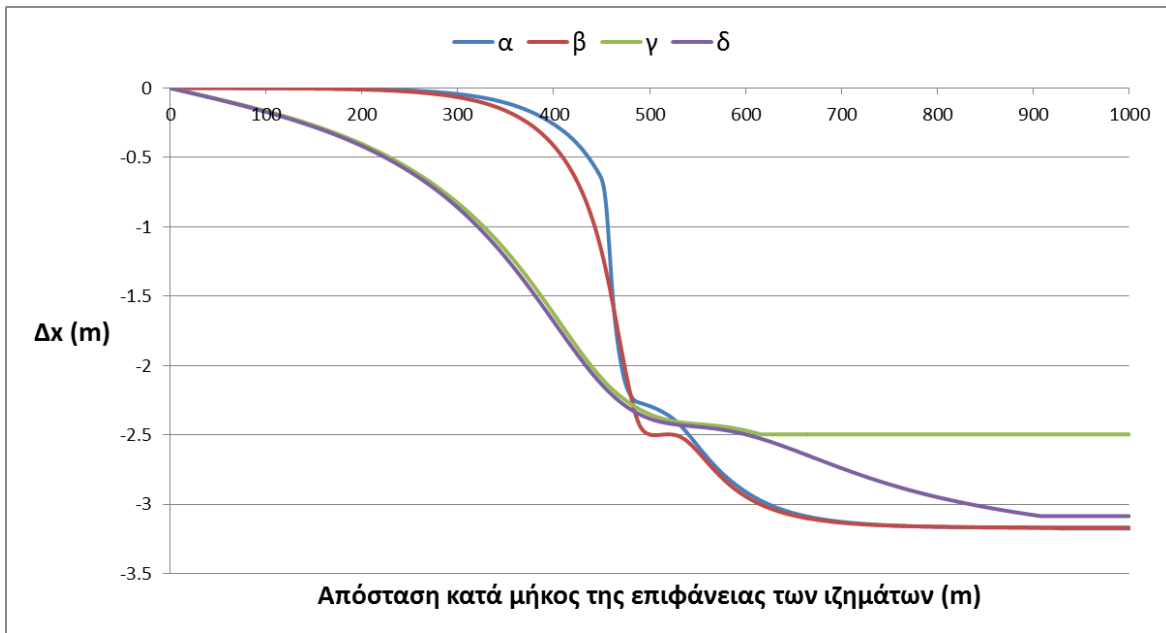
Από το διάγραμμα 5.19 συμπεραίνεται ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας της αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης πάχους 50 m και γωνίας διάρρηξης 30° είναι της τάξης των 2.1 m ενώ για γωνία διάρρηξης 60° η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση είναι της τάξης των 1.80 m. Εδώ φαίνεται ότι παίζει μεγάλο ρόλο η γωνία διάρρηξης λόγω αυτής της αισθητής διαφοροποίησης στην επιφανειακή μετατόπιση. Όσον αφορά την στρώση πάχους 150 m η γωνία δεν παίζει εδώ σημαντικό ρόλο αφού και στις 30° και στις 60° γωνίας διάρρηξης του ρήγματος η μέγιστη επιφανειακή μετατόπιση είναι της τάξης των 1,80 m. Σε όλες τις περιπτώσεις οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα 500 m περίπου απ' αρχής. Παρατηρείται ότι το πάχος της στρώσης δεν επηρεάζει την επιφανειακή μετατόπιση σε καμία περίπτωση λόγω των πολύ μικρών διαφοροποιήσεων που παρατηρούνται. Όσον αφορά την οριζόντια μετατόπιση, από το διάγραμμα 5.20 συμπεραίνουμε ότι στα 50 m πάχους της στρώσης η γωνία διάρρηξης του ρήγματος επηρεάζει σημαντικά την επιφανειακή μετατόπιση αφού στις 30° η μέγιστη είναι 3.2 m ενώ στις 60° στα 1.40 m περίπου. Στην περίπτωση των 150 m πάχους στρώσης η γωνία παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο αφού η μέγιστη μετατόπιση για γωνία διάρρηξης 30° και 60° είναι 3.1 m και 1,40 m περίπου, αντίστοιχα. Το πάχος της ιζηματογενούς στρώσης φαίνεται ότι δεν παίζει εδώ σημαντικό ρόλο. Σε όλες τις περιπτώσεις και εδώ οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα 500 m περίπου απ' αρχής.

### **5.7 Επιφανειακές μετατοπίσεις με την ίδια γωνία διάρρηξης του ρήγματος (ανάστροφο ρήγμα)**

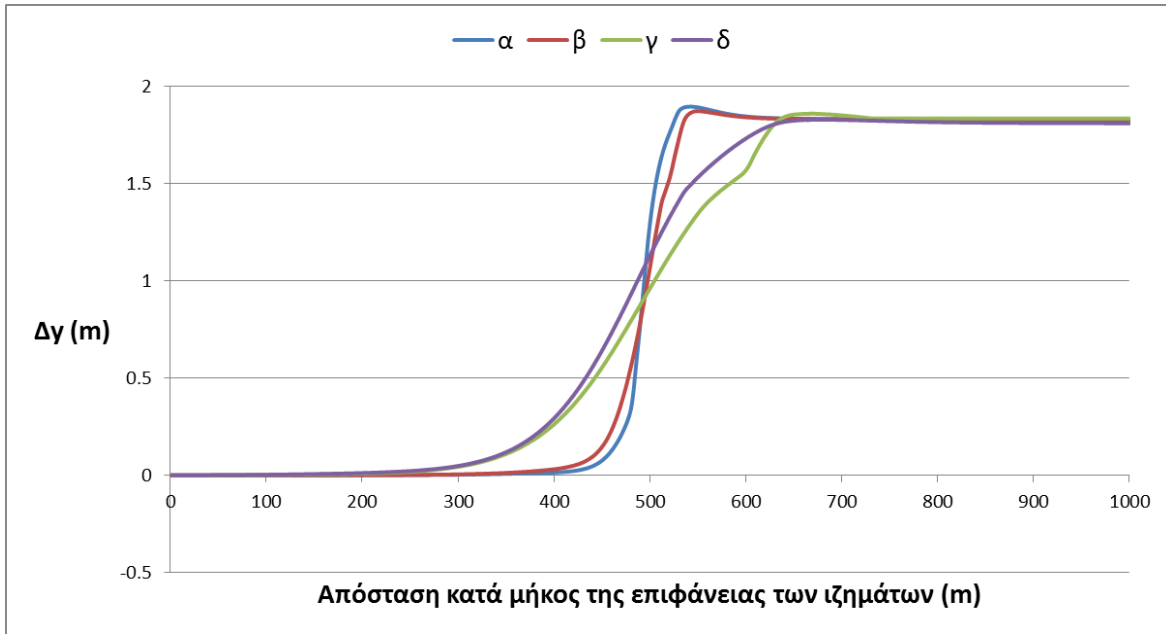
Στο παρόν υποκεφάλαιο συγκρίνονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης με βάση το υλικό του ιζήματος και το πάχος της στρώσης για την ίδια γωνία διάρρηξης ρήγματος. Τα συμπεράσματα παρατίθενται στην συνέχεια.



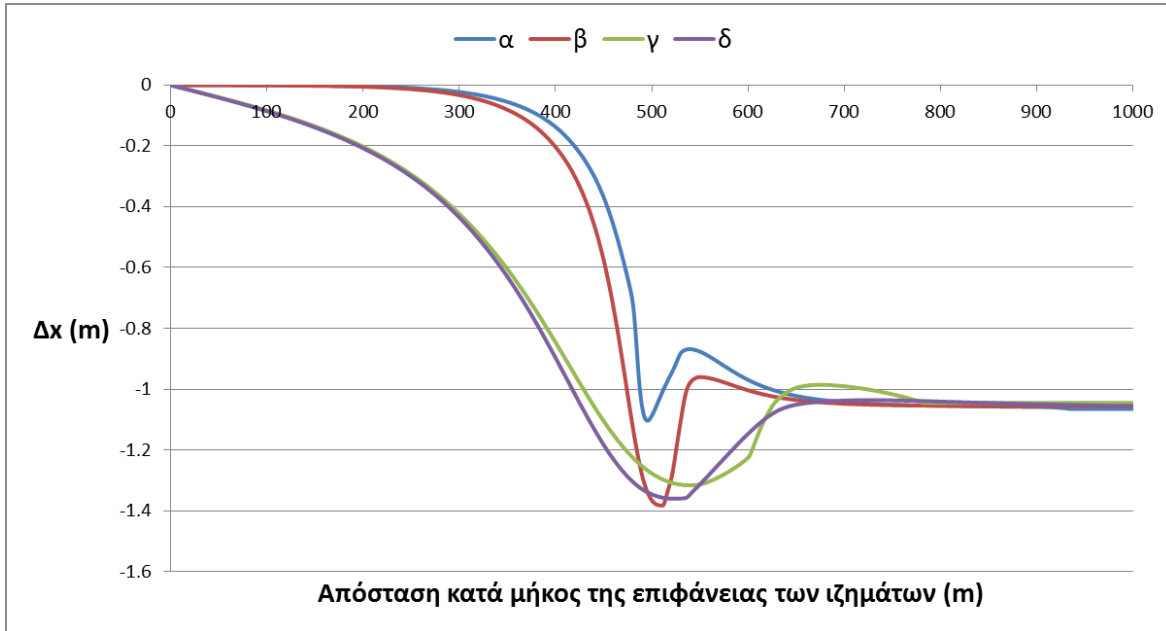
**Διάγραμμα 5.21:** Κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta y$ ) η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται με  $\theta=30^\circ$  υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α) αργιλικά ιζήματα με  $H=50\text{ m}$ , β) αμμώδη ιζήματα με  $H=50\text{ m}$ , γ) αργιλικά ιζήματα με  $H=150\text{ m}$ , δ) αμμώδη ιζήματα με  $H=150\text{ m}$



**Διάγραμμα 5.22:** Οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta x$ ) η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται με γωνία  $30^\circ$  υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α) αργιλικά ιζήματα με  $H=50\text{ m}$ , β) αμμώδη ιζήματα με  $H=50\text{ m}$ , γ) αργιλικά ιζήματα με  $H=150\text{ m}$ , δ) αμμώδη ιζήματα με  $H=150\text{ m}$



**Διάγραμμα 5.23:** Κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta y$ ) η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται με γωνία  $60^\circ$  υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α) αργιλικά ιζήματα με  $H=50\text{ m}$ , β) αμμώδη ιζήματα με  $H=50\text{ m}$ , γ) αργιλικά ιζήματα με  $H=150\text{ m}$ , δ) αμμώδη ιζήματα με  $H=150\text{ m}$



**Διάγραμμα 5.24:** Οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας ιζηματογενούς στρώσης ( $\Delta x$ ) η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα όπου διαρρηγνύεται με γωνία  $60^\circ$  υποθέτοντας 4 περιπτώσεις: α) αργιλικά ιζήματα με  $H=50\text{ m}$ , β) αμμώδη ιζήματα με  $H=50\text{ m}$ , γ) αργιλικά ιζήματα με  $H=150\text{ m}$ , δ) αμμώδη ιζήματα με  $H=150\text{ m}$



Από το διάγραμμα 5.21 συμπεραίνεται ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας για γωνία διάρρηξης ρήγματος  $30^\circ$  αργλικής και αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης πάχους 50m είναι της τάξης των 2.01 m ενώ για πάχος στρώσης 150 m η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση είναι της τάξης των 2.2 m εξίσου και για τα δύο υλικά. Εδώ φαίνεται να μην παίζει ρόλο ούτε το πάχος ούτε το είδος του υλικού της ιζηματογενούς στρώσης λόγω των πολύ μικρών διαφορών μεταξύ τους. Σε όλες τις περιπτώσεις οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα 500 m περίπου απ' αρχής. Όσον αφορά την οριζόντια μετατόπιση από το διάγραμμα 5.22 συμπεραίνουμε ότι στα 50 m πάχους της στρώσης η διαφορά στο υλικό της ιζηματογενούς στρώσης δεν επηρεάζει την επιφανειακή μετατόπιση αφού η μέγιστη στο αργλικό υλικό αλλά και το αμμώδες είναι της τάξης των 3.2 m. Στην περίπτωση των 150 m πάχους το υλικό της στρώσης φαίνεται να παίζει κάποιο ρόλο αφού και στην άργιλο η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση είναι της τάξης των 2.5 m ενώ στην άμμο άργιλο η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση είναι της τάξης των 3.1 m. Μεταξύ των διαφορετικών παχών στρώσης βλέπουμε ότι παίζει σημαντικό ρόλο το πάχος με βάση το διάγραμμα έχουμε έντονες διαφοροποιήσεις μόνο στην περίπτωση της αργίλου. Σε όλες τις περιπτώσεις και εδώ οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα 500 m περίπου απ' αρχής εκτός της περίπτωσης του αμμώδους ιζήματος πάχους 150 m όπου εμφανίζεται περίπου στα 900 m.

Από το διάγραμμα 5.23 συμπεραίνεται ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας για γωνία διάρρηξης ρήγματος  $60^\circ$  αργλικής και αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης πάχους 50 m είναι της τάξης 1.80 m ενώ για πάχος στρώσης 150 m η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση είναι της τάξης των 1,70 m αντίστοιχα για τα δύο υλικά. Σε αυτό το σημείο φαίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις δεν παίζει κανένα ρόλο το διαφορετικό υλικό, αλλά ούτε και το πάχος της στρώσης. Σε όλες τις περιπτώσεις οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα 500 m περίπου απ' αρχής. Όσον αφορά την οριζόντια μετατόπιση από το διάγραμμα 5.24 παρατηρείται ότι οι μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις για πάχος στρώσης 50 m αμμώδους υλικού 1.2 m και 1.4 m αντίστοιχα ενώ για πάχος 150 m οι μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις είναι της τάξης των 1.3 m και 1.4 m αντίστοιχα. Άρα, από τα προαναφερθέντα εξάγεται το συμπέρασμα ότι έχουμε μικρή επίδραση γωνίας και πάχους μεταξύ τους. Σε όλες τις περιπτώσεις και εδώ οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα 500 m περίπου απ' αρχής.

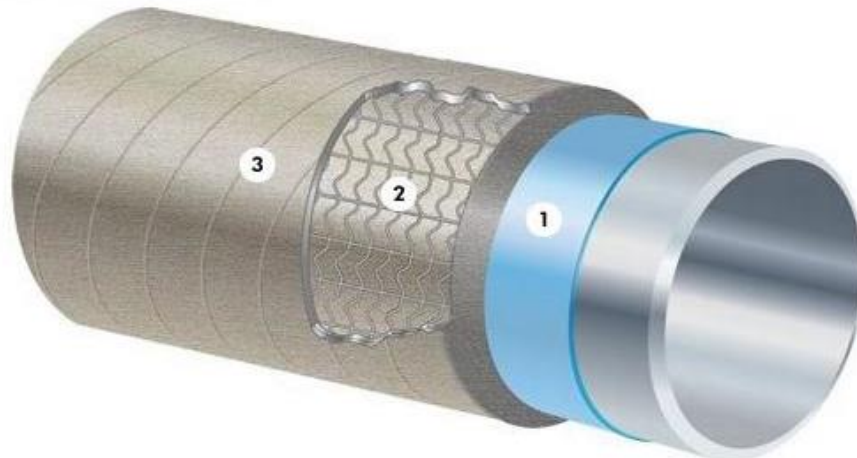


## Κεφάλαιο 6. Παραμετρική ανάλυση για την αλληλεπίδραση αγωγού και ρήγματος με ή χωρίς την ύπαρξη ιζηματογενούς στρώσεως

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η αλληλεπίδραση ενός μεταλλικού υποθαλάσσιου αγωγού με την διάρρηξη ενός ρήγματος (κανονικού και ανάστροφου) που βρίσκεται σε διασταύρωση με αυτόν, στην μία περίπτωση με απευθείας επαφή αγωγού και ρήγματος και στην άλλη με την ύπαρξη ιζηματογενούς στρώσης. Ελέγχεται πόσο επιδρά η ύπαρξη ιζηματογενούς στρώσης για τις διάφορες περιπτώσεις που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, δηλαδή πόσο καταπονείται (παραμορφώνεται) ο αγωγός στις δύο διαφορετικές περιπτώσεις σε συνδυασμό με την ύπαρξη σταθερής εσωτερικής και μεταβλητής εξωτερικής πίεσης (υδροστατικής) στον αγωγό. Όλες οι αναλύσεις και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν πραγματοποιήθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον του ABAQUS.

### 6.1 Περιγραφή του προσομοιώματος του αγωγού

Το προσομοίωμα του αγωγού που δημιουργήθηκε είναι ένας τυπικός υποθαλάσσιος υψηλής πίεσης αγωγός φυσικού αερίου με εξωτερική διάμετρο 0.9144 m και πάχος 0.027 m. Επίσης, ο αγωγός είναι εξωτερικά επενδεδυμένος με σκυρόδεμα πάχους 0.055 m και με ένα λεπτότερο στρώμα επένδυσης (coating) πάχους 0.003 m για προστασία από την διάβρωση όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1.

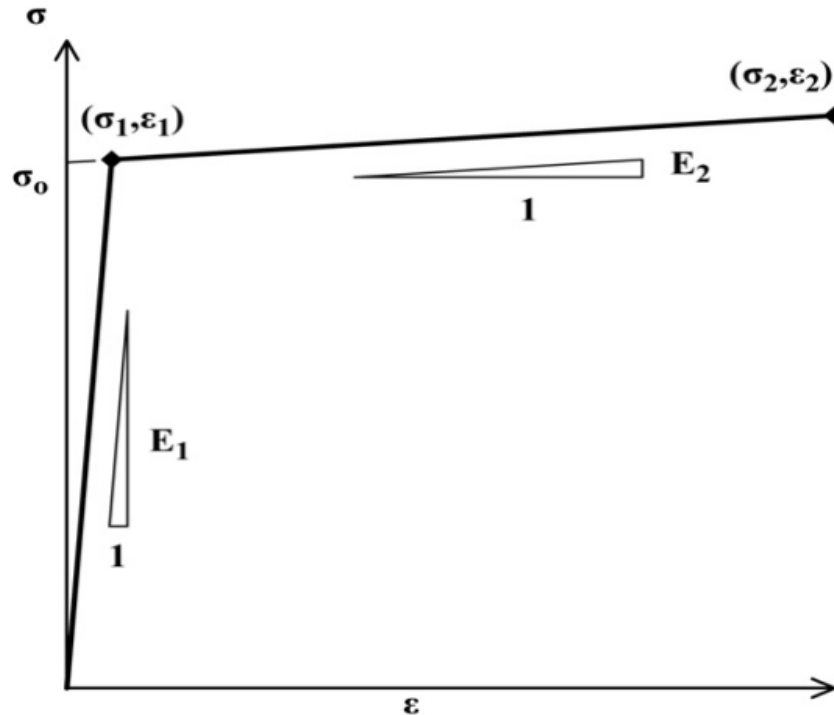


1. Επένδυση κατά της διάβρωσης
2. Σκυρόδεμα
3. Εξωτερική επένδυση

**Σχήμα 6.1:** Αναπαράσταση εξωτερικής επένδυσης μεταλλικού αγωγού

Το μήκος του αγωγού είναι 1000 m και διασταυρώνεται με το ρήγμα (με την ύπαρξη ή μη της ιζηματογενούς στρώσης) στο μέσο του με γωνία 90°. Ο αγωγός διακριτοποιείται σε

1000 ίσου μήκους στοιχεία (elbow elements), 1 m το καθένα. Το προσομοίωμα του αγωγού είναι φτιαγμένο από χάλυβα τύπου API-X65, με διγραμμική ελαστο-πλαστική συμπεριφορά τάσης και παραμόρφωσης όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2 με τις ιδιότητες του υλικού να παρατίθενται στον πίνακα 6.1.



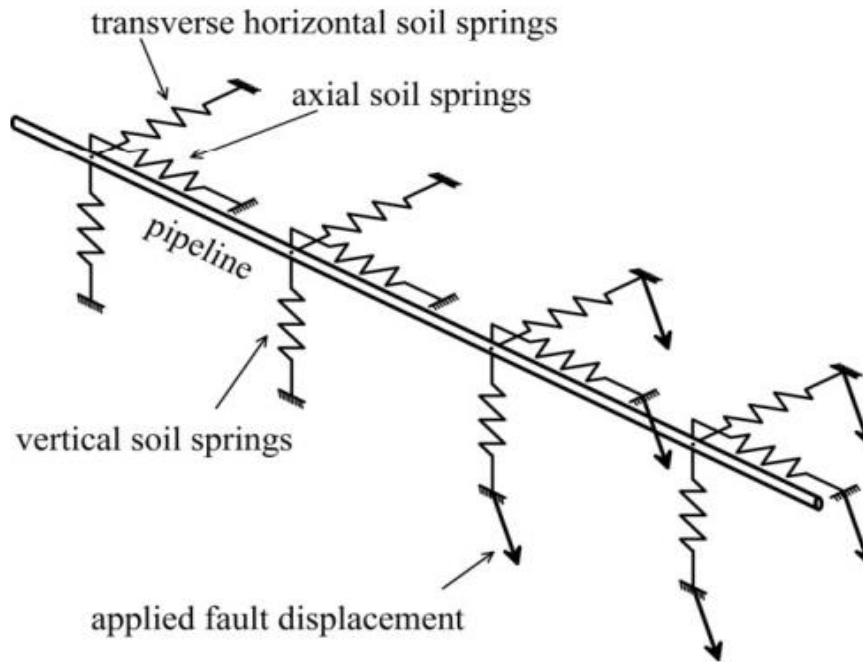
Σχήμα 6.2: Διγραμμική ελαστο-πλαστική συμπεριφορά του χάλυβα

Πίνακας 6.1: Ιδιότητες του υλικού του μεταλλικού αγωγού X65

| <u>API5L-X65 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ</u>                              |           |
|---|-----------|
| Τάση Διαρροής ( $\sigma_1$ )                            | 490 MPa   |
| Τάση Αστοχίας ( $\sigma_2$ )                            | 531 MPa   |
| Παραμόρφωση στο σημείο Διαρροής ( $\epsilon_1$ )        | 0.233%    |
| Παραμόρφωση στο σημείο Αστοχίας ( $\epsilon_2$ )        | 4%        |
| Μέτρο Ελαστικότητας Young στο σημείο Διαρροής ( $E_1$ ) | 210 GPa   |
| Μέτρο Ελαστικότητας Young στο σημείο Αστοχίας ( $E_2$ ) | 1.088 GPa |

Με σκοπό να προσομοιωθεί η αλληλεπίδραση ρήγματος και αγωγού και ρήγματος με την ιζηματογενή στρώση, κάθε κόμβος του αγωγού συνδέθηκε με ελατήριο (spring) στην κάθετη, την οριζόντια και εγκάρσια οριζόντια διεύθυνση. Τα ελατήρια αναλύονται εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο. Η μετακίνηση του ρήγματος επιβάλλεται στον αγωγό στατικά μετακινώντας τα ελεύθερα άκρα των αντίστοιχων κάθε φορά ελατηρίων. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι στην περίπτωση της απευθείας επαφής ρήγματος και αγωγού η διάρρηξη του ρήγματος εφαρμόζεται με ομοιόμορφη καθίζηση (μετακίνηση)

στα αντίστοιχα ελατήρια ενώ όταν υπάρχει ιζηματογενής στρώση η καθίζηση δεν είναι ομοιόμορφη αφού η επιφάνεια της ιζηματογενούς στρώσης όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι διαφορετική για κάθε κόμβο οπότε και εφαρμόζεται αυτή που αντιστοιχεί σε κάθε περίπτωση και στον αγωγό όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3.



**Σχήμα 6.3:** Σχηματική αναπαράσταση του προσομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή της παραμετρικής ανάλυσης

Η μετακίνηση που επιβάλλεται στον αγωγό μέσω των ελατηρίων στην κατακόρυφο άξονα είναι δύο φορές η ακτίνα του αγωγού δηλαδή  $2 \cdot D = 1,8288$  m σε κάθε περίπτωση της γωνίας διάρρηξης του ρήγματος ( $30^\circ$  και  $60^\circ$ ). Ο αγωγός επίσης διαθέτει σταθερή εσωτερική πίεση 11000 kPa και ελέγχεται η αλληλεπίδραση του με το ρήγμα και την ιζηματογενή στρώση για διαφορετικές υδροστατικές πιέσεις στα 10 m, 100 m και 1000 m βάθος. Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με τις διάφορες περιπτώσεις βαθών όπου βρίσκεται ο αγωγός και της αντίστοιχης υδροστατικής πίεσης.

**Πίνακας 6.2:** Υδροστατικές εξωτερικές πιέσεις για τα διάφορα βάθη που βρίσκεται ο αγωγός με σταθερή εσωτερική πίεση

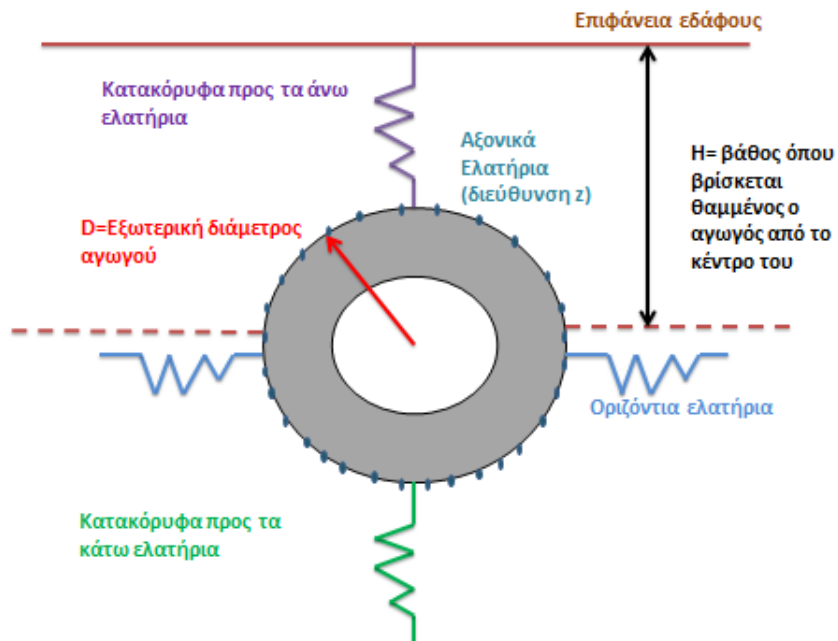
| Επίπεδο πίεσης | Εσωτερική πίεση (kPa) | Εξωτερική πίεση (kPa) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|
| Βάθος 10 m     | 11000                 | 98                    |
| Βάθος 100 m    | 11000                 | 980                   |
| Βάθος 1000 m   | 11000                 | 9800                  |

Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι οι υποθαλάσσιοι αγωγοί συνήθως βρίσκονται πάνω στον βυθό της θάλασσας όπου στις περιοχές όπου έχουμε κατολισθήσεις οι αγωγοί μπορεί σε κάποια σημεία να καλύπτονται από ιζηματογενή υλικά. Προφανώς, επειδή ο αγωγός βρίσκεται πάνω στον βυθό της θάλασσας, κάποια από τα παραπάνω ελατήρια μπορεί να μην λαμβάνονται υπόψη αναλόγως των συνθηκών.

## 6.2 Προσομοίωση του ρήγματος και της ιζηματογενούς στρώσης με την χρήση εδαφικών ελατηρίων

Προκειμένου να εκφραστεί η αλληλεπίδραση μεταξύ του αγωγού και του ρήγματος όπως και η σχέση του αγωγού και της ιζηματογενούς στρώσης όπου βρίσκονται το πρώτο κάτω ακριβώς από τον αγωγό και η δεύτερη μεταξύ του αγωγού και του ρήγματος στην προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε συνδέθηκαν όλοι οι κόμβοι του αγωγού με ελατήρια στην κάθετη, την οριζόντια και εγκάρσια οριζόντια διεύθυνση. Ο υπολογισμός αυτών έγινε με βάση την θεωρία των O'Rourke & Liu για την αξονική, εγκάρσια και κάθετη μετατόπιση ενός υποθαλάσσιου αγωγού.

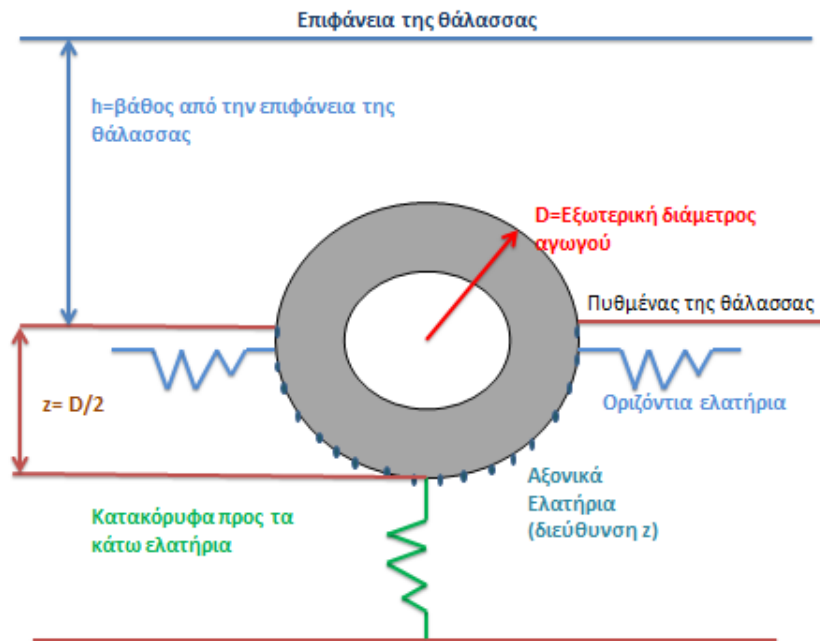
Πριν γίνει εκτενέστερη αναφορά στον υπολογισμό των δυνάμεων αυτών που ασκούνται στον αγωγό για να του προκαλέσουν αξονική, εγκάρσια και κάθετη μετατόπιση πρέπει να αναφερθεί ότι στον διεθνή κανονισμό ALA αναλύεται με ποιο τρόπο υπολογίζονται ελατήρια που αντιπροσωπεύουν τις δυνάμεις που προαναφέρθηκαν αλλά με την διαφορά ότι ο αγωγός είναι θαμμένος με βάση τον διεθνή κανονισμό. Ο κανονισμός δεν αναφέρεται σε υποθαλάσσιο αγωγό όταν υπολογίζει τα εν λόγω ελατήρια.



Σχήμα 6.4: Αναπαράσταση αλληλεπίδρασης θαμμένου αγωγού με το έδαφος

Με βάση το παραπάνω σχήμα γίνεται κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο ο διεθνής κανονισμός ALA θεωρεί την αλληλεπίδραση εδάφους και αγωγού και με βάση αυτή την θεώρηση (θαμμένος αγωγός) υπολογίζει τις δυνάμεις που δέχεται αυτός αναπαριστώντας την προαναφερθείσα αλληλεπίδραση και κατ' επέκταση δύναμη με εδαφικά ελατήρια σε όλες τις διευθύνσεις.

Όμως στην παρούσα εργασία ο αγωγός που μελετήθηκε είναι υποθαλάσσιος που βρίσκεται πάνω στον πυθμένα της θάλασσας. Η θεωρία των O'Rourke & Liu ισχυρίζεται αυτή την εκδοχή και υπολογίζει τα ελατήρια με τον τρόπο που σχηματικά παρατίθεται στην συνέχεια.



Σχήμα 6.5: Αναπαράσταση αλληλεπίδρασης υποθαλάσσιου αγωγού με τον πυθμένα της θάλασσας

Επομένως θεωρήθηκε πιο ρεαλιστικό να χρησιμοποιηθεί η θεωρία τους παρά ο διεθνής κανονισμός ALA αφού η πρώτη βασίζεται σε υπολογισμό ελατηρίων που αφορούν υποθαλάσσιο αγωγό που βρίσκεται στον πυθμένα της θάλασσας. Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων παρατίθεται η θεωρία του κανονισμού ALA καθώς και η θεωρία των O'Rourke & Liu και ο εκτενής υπολογισμός των ελατηρίων και με τις δύο μεθόδους για να γίνει αντιληπτό πως μπορεί να επηρεάσει η διαφορετικότητα των δύο μεθόδων τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης.

Στο συγκεκριμένο σημείο πρέπει να τονιστεί ότι παρόλο που ο αγωγός δεν είναι θαμμένος στην παρούσα μελέτη λόγω των ρευμάτων της θάλασσας και των υλικών που μεταφέρει πολλές φορές κάποια τμήματα του καλύπτονται ολικώς ή μερικώς. Για μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση του θέματος στην συγκεκριμένη περίπτωση θεωρήθηκε ότι ο αγωγός είναι ο μισός βυθισμένος στην βυθό και το υπόλοιπο κομμάτι του είναι εκτεθειμένο στον βυθό της θάλασσας άρα δεν είναι θαμμένος. Επιπλέον, η εξωτερική ακτίνα που λαμβάνεται



υπόψη για τον υπολογισμό των ελατηρίων και για τις δύο μεθόδους περιλαμβάνει και τις εξωτερικές επενδύσεις του αγωγού.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι και στις δύο μεθόδους ο αγωγός θεωρείται υποθαλάσσιος. Για τον διεθνή κανονισμό ALA έγιναν οι κατάλληλες προσαρμογές στις εξισώσεις που παρατίθενται στην συνέχεια προκειμένου να υπολογιστούν αριθμητικά και με αυτή την μέθοδο τα ελατήρια.

### **6.2.1 Υπολογισμός εδαφικών ελατηρίων σύμφωνα με τον Διεθνή Κανονισμό American Lifelines Alliance (ALA)**

Σύμφωνα με τον διεθνή κανονισμό ALA, η δύναμη που ασκεί το έδαφος στον αγωγό αναπαριστάται από διακεκριμένα μη γραμμικά ελατήρια. Οι μέγιστες δυνάμεις των ελατηρίων και οι αντίστοιχες μετατοπίσεις όπου είναι απαραίτητες για να παραχθούν αυτές οι δυνάμεις υπολογίστηκαν με τις εξισώσεις που θα δοθούν στην συνέχεια.

Οι ιδιότητες του εδάφους που αντιπροσωπεύουν την επίχωση του αγωγού χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι αξονικές εδαφικές δυνάμεις των ελατηρίων. Οι ιδιότητες του εδάφους της επίχωσης του αγωγού είναι κατάλληλες για να υπολογίζουν τις οριζόντιες και προς τα άνω δυνάμεις των εδαφικών ελατηρίων μόνο όταν η μετακίνηση του αγωγού η οποία σχετίζεται με το έδαφος της επίχωσης δεν επηρεάζεται από το έδαφος εκτός της τάφρου όπου βρίσκεται ο αγωγός.

Παρόλο που τα πειράματα έχουν δείξει ότι η μέγιστη εδαφική δύναμη του αγωγού μειώνεται σε μεγάλες σχετικές μετατοπίσεις, ο κανονισμός αυτός βασίζεται στην υπόθεση ότι η εδαφική δύναμη διατηρείται σταθερή από την στιγμή φτάνει την μέγιστη τιμή του. Η μέγιστη τιμή της δύναμης των εδαφικών ελατηρίων εκφράζεται ως δύναμη ανά μονάδα μήκους του αγωγού. Οι εξισώσεις που παρατίθενται στην συνέχεια αφορούν θαμμένους αγωγούς σε ομοιόμορφες συνθήκες εδάφους.

Για θαμμένους αγωγούς σε μεγάλα βάθη με ποικίλες εδαφικές ιδιότητες μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και του βόθρου του αγωγού, οι παρακάτω εξισώσεις μπορεί να μην αντιπροσωπεύουν πραγματικές συνθήκες φόρτισης εδάφους.

Οι οριζόντιες εδαφικές φορτίσεις για υποθαλάσσιους αγωγούς που βρίσκονται στην επιφάνεια του βυθού της θάλασσας αυξάνονται σταδιακά λόγω των σχηματισμών εδαφικών αναχωμάτων που περιτριγυρίζουν τον αγωγό. Η ερμηνεία των χαρακτηριστικών αυτών των εδαφικών ελατηρίων για αυτές τις συνθήκες απαιτεί ειδικό χειρισμό από έμπειρους επιστήμονες και δεν καλύπτεται από αυτόν τον κανονισμό.

Η ανταπόκριση του αγωγού στις μέγιστες δυνάμεις των εδαφικών ελατηρίων βασίζονται σε εργαστηριακή πειραματική έρευνα και έρευνα πεδίου πάλι σε πειραματικό επίπεδο όπως και σε γενικές γεωτεχνικές αναλύσεις που σχετίζονται με κατασκευές όπως πάσσαλοι, αγκυρωμένα πλάκα σε πασσάλους (πασαλλόμπηξη) και πεδιλοδοκοί. Πολλές από αυτές τις εξισώσεις έχουν εξαχθεί για να μπορούν να δημιουργηθούν πιο εύκολα τα αντίστοιχα παράγωγα διαγράμματα (με βάση τις μεταβλητές της καθεμίας εξίσωσης) και

να μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα σε προγραμματιστικά περιβάλλοντα όπως για παράδειγμα το excel ή άλλου είδους προγραμματιστικού περιβάλλοντος.

Στην συνέχεια παρατίθεται η θεωρία του κανονισμού καθώς και ο υπολογισμός των εδαφικών ελατηρίων με τα δεδομένα της παρούσας εργασίας. Πρέπει να τονιστεί ότι τα ελατήρια αυτά δεν χρησιμοποιήθηκαν στην παραμετρική ανάλυση παρά μόνο σε θεωρητικό επίπεδο προκειμένου να τονιστεί η διαφορά μεταξύ τους κανονισμού και της μεθόδου των O'Rourke & Liu που παρατίθεται στην συνέχεια και χρησιμοποιήθηκε για την παραμετρική ανάλυση και την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων.

- Αξονικά εδαφικά ελατήρια

Η μέγιστη αξονική δύναμη του εδάφους ανά μονάδα μήκους του αγωγού που μεταβιβάζεται σε αυτόν δίνεται από την σχέση:

$$T_u = \pi \cdot D \cdot \alpha \cdot c + \pi \cdot D \cdot H \cdot \bar{\gamma} \cdot \frac{1+K_o}{2} \cdot \tan \delta \quad (5.1)$$

όπου:

D= εξωτερική διάμετρος του αγωγού

c= συνοχή του εδαφικού υλικού

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

$\bar{\gamma}$ = ενεργό ειδικό βάρος

$K_o$ = συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων

$$\alpha = \text{συντελεστής συνοχής} = 0.608 - 0.123 \cdot c - \frac{0.274}{c^2 + 1} + \frac{0.695}{c^3 + 1}$$

$\delta$ = γωνία τριβής μεταξύ της επιφάνειας του αγωγού και του εδάφους =  $f \cdot \phi$

$\phi$ = γωνία εσωτερικής τριβής

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

Ο συντελεστής  $f$  επιλέγεται κάθε φορά ανάλογα με την εξωτερική επένδυση από τον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 6.3:** Συντελεστής τριβής  $f$  για διαφορετικές εξωτερικές επενδύσεις

| Επένδυση αγωγού (εξωτερική)        | $f$ |
|------------------------------------|-----|
| Σκυρόδεμα                          | 1.0 |
| Πίσσα                              | 0.9 |
| Σκληρός χάλυβας                    | 0.8 |
| Μαλακός χάλυβας                    | 0.7 |
| Εποξειδικό υλικό (αστάρι και βαφή) | 0.6 |
| Πολυαιθυλένιο                      | 0.6 |

$\Delta_t$ = μετακίνηση για δύναμη  $T_u$   
 = 3 mm για πυκνή άμμο  
 = 5 mm για χαλαρή άμμο  
 = 8 mm για σκληρή άργιλο  
 = 10 mm για μαλακή άργιλο

Στην παρούσα εργασία σύμφωνα με τον διεθνή κανονισμό ALA έχουμε:

Για αργιλικό υπόβαθρο του αγωγού ισχύει:

$$T_u = 59.89 \text{ kN/m}$$

για  $D' = D/2 = 0.5152 \text{ m}$  (ο αγωγός είναι κατά το ήμισυ θαμμένος στον πυθμένα της θάλασσας)

$$c = 20 \text{ kPa}$$

$$H = 0 \text{ m (δεν υπάρχει υπερκείμενο έδαφος)}$$

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\bar{\gamma} = \gamma - 10 = 20 - 10 = 10 \text{ kN/m}^3$$

$$K_o = 1 - \sin\phi = 0.97$$

$$\alpha = 1.85$$

$$\delta = 2$$

$$\phi = 2^\circ$$

$$f = 1 \text{ (εξωτερική επένδυση του αγωγού με σκυρόδεμα)}$$

και η μετακίνηση του αγωγού για την συγκεκριμένη δύναμη είναι  $\Delta_t = 10 \text{ mm}$

Για αμμώδες υπόβαθρο του αγωγού ισχύει:

$$T_u = 1.13 \text{ kN/m}$$

για  $D = D/2 = 0.5152 \text{ m}$  (ο αγωγός είναι κατά το ήμισυ θαμμένος στον πυθμένα της θάλασσας)

$$c = 1 \text{ kPa}$$

$$H = 0 \text{ m (δεν υπάρχει υπερκείμενο έδαφος)}$$

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\bar{\gamma} = \gamma - 10 = 20 - 10 = 10 \text{ kN/m}^3$$

$$K_o = 1 - \sin\phi = 0.66$$

$$\alpha = 0.6955$$

$$\delta = 20$$

$$\varphi = 20^\circ$$

$f = 1$  (εξωτερική επένδυση του αγωγού με σκυρόδεμα)

και η μετακίνηση του αγωγού για την συγκεκριμένη δύναμη είναι  $\Delta_t = 5 \text{ mm}$

- Πλευρικά εδαφικά ελατήρια

Η μέγιστη πλευρική δύναμη του εδάφους ανά μονάδα μήκους του αγωγού που μεταβιβάζεται σε αυτόν δίνεται από την σχέση:

$$P_u = N_{ch} \cdot c \cdot D + N_{qh} \cdot \bar{\gamma} \cdot H \cdot D \quad (5.2)$$

όπου:

$N_{ch}$  = συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας της αργίλου (0 για  $c=0$ )

$$= \alpha + b \cdot x + \frac{c}{(x+1)^2} + \frac{d}{(x+1)^3} \leq 9$$

$N_{qh}$  = συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας της άμμου (0 για  $\varphi=0^\circ$ )

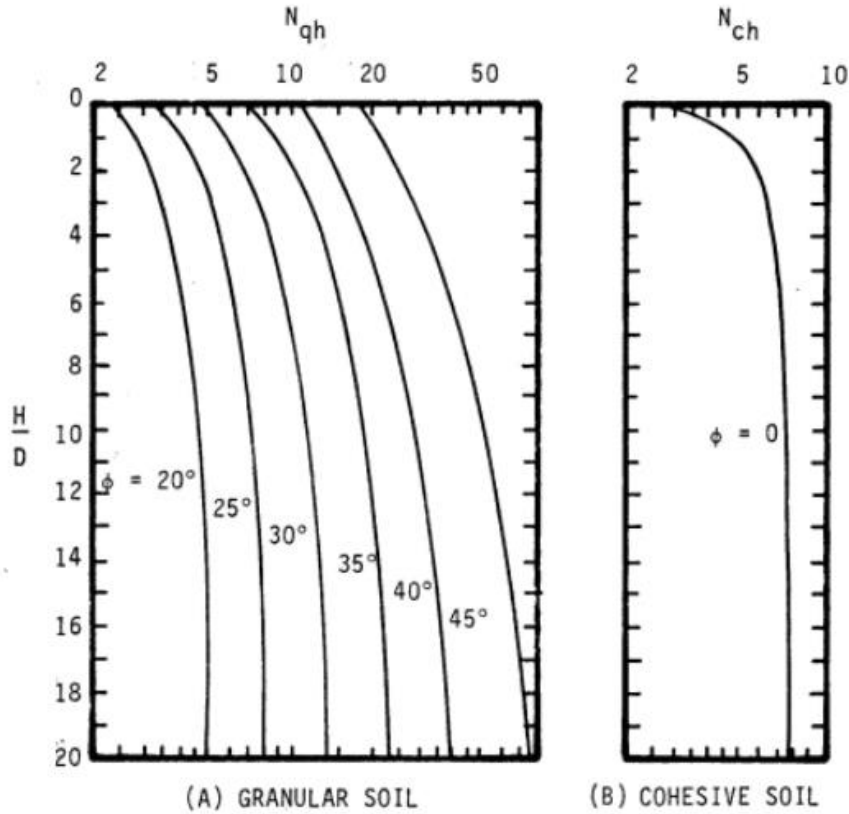
$$= \alpha + b(x) + c(x^2) + d(x^3) + e(x^4)$$

**Πίνακας 6.4:** Συντελεστές για την οριζόντια φέρουσα ικανότητα

| Factor   | $\phi$     | $x$   | $a$    | $b$   | $c$     | $d$               | $e$               |
|----------|------------|-------|--------|-------|---------|-------------------|-------------------|
| $N_{ch}$ | $0^\circ$  | $H/D$ | 6.752  | 0.065 | -11.063 | 7.119             | --                |
| $N_{qh}$ | $20^\circ$ | $H/D$ | 2.399  | 0.439 | -0.03   | $1.059(10)^{-3}$  | $-1.754(10)^{-5}$ |
| $N_{qh}$ | $25^\circ$ | $H/D$ | 3.332  | 0.839 | -0.090  | $5.606(10)^{-3}$  | $-1.319(10)^{-4}$ |
| $N_{qh}$ | $30^\circ$ | $H/D$ | 4.565  | 1.234 | -0.089  | $4.275(10)^{-3}$  | $-9.159(10)^{-5}$ |
| $N_{qh}$ | $35^\circ$ | $H/D$ | 6.816  | 2.019 | -0.146  | $7.651(10)^{-3}$  | $-1.683(10)^{-4}$ |
| $N_{qh}$ | $40^\circ$ | $H/D$ | 10.959 | 1.783 | 0.045   | $-5.425(10)^{-3}$ | $-1.153(10)^{-4}$ |
| $N_{qh}$ | $45^\circ$ | $H/D$ | 17.658 | 3.309 | 0.048   | $-6.443(10)^{-3}$ | $-1.299(10)^{-4}$ |

Στις ενδιάμεσες τιμές των γωνιών εσωτερικής τριβής οι συντελεστές υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή.

Εκτός από τον παραπάνω πίνακα οι τιμές των συντελεστών  $N_{ch}$  και  $N_{qh}$  μπορούν να υπολογιστούν ποιοτικά από τα παρακάτω σχήματα σύμφωνα με τον ALA.



Σχήμα 5.5: Τιμές των συντελεστών  $N_{qh}$  και  $N_{ch}$

$\Delta_p =$  μετακίνηση στο  $P_u$   
 $= 0.04 \cdot (H + \frac{D}{2}) \leq 0.10 \cdot D$  έως  $0.15 \cdot D$

Στην παρούσα εργασία σύμφωνα με τον διεθνή κανονισμό ALA έχουμε:

Για τον υπολογισμό των συντελεστών  $N_{ch}$  και  $N_{qh}$  στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα σχήματα και προσεγγιστικά θεωρήθηκαν οι τιμές των συντελεστών.

Για αργιλικό υπόβαθρο του αγωγού ισχύει:

$P_u = 41.22 \text{ kN/m}$

για  $D = 1.0304 \text{ m}$

$c = 20 \text{ kPa}$

$H = 0 \text{ m}$

$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

$\bar{\gamma} = \gamma - 10 = 20 - 10 = 10 \text{ kN/m}^3$

$\phi = 2^\circ$

$N_{ch} = 2$

$N_{qh} = 0$

και η μετακίνηση του αγωγού για την συγκεκριμένη δύναμη είναι  $\Delta_p = 1 \text{ mm}$

Για αμμώδες υπόβαθρο του αγωγού ισχύει:

$$P_u = 0 \text{ kN/m}$$

$$\text{για } D = 1.0304 \text{ m}$$

$$c = 1 \text{ kPa}$$

$$H = 0 \text{ m}$$

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\bar{\gamma} = \gamma - 10 = 20 - 10 = 10 \text{ kN/m}^3$$

$$\varphi = 20^\circ$$

$$N_{ch} = 0$$

$$N_{qh} = 2$$

και η μετακίνηση του αγωγού για την συγκεκριμένη δύναμη είναι  $\Delta_p = 0 \text{ mm}$

- Κατακόρυφα προς τα άνω εδαφικά ελατήρια

Οι εξισώσεις που καθορίζουν τις προς τα άνω δυνάμεις των εδαφικών ελατηρίων βασίζονται σε μικρής κλίμακας εργαστηριακών πειραμάτων και θεωρητικών μοντέλων. Γι' αυτό το λόγο η εφαρμογή των εξισώσεων είναι περιορισμένη σε σχετικά μικρά βάθη όπως εκφράζεται από το πηλίκο του βάθους του αγωγού από το κέντρο του με την εξωτερική διάμετρο του αγωγού ( $H/D$ ). Σε συνθήκες όπου το συγκεκριμένο πηλίκο είναι μεγαλύτερο από το όριο που έχει οριστεί, χρειάζεται ανάλογα με την περίπτωση γεωτεχνική περαιτέρω μελέτη για την τιμή της δύναμης των εδαφικών ελατηρίων και της σχετικής μετακίνησης η οποία απαιτείται για να αναπτυχθεί η συγκεκριμένη δύναμη.

$$Q_u = N_{cv} \cdot c \cdot D + N_{qv} \cdot \bar{\gamma} \cdot H \cdot D \quad (5.3)$$

όπου:

$N_{cv}$  = συντελεστής κατακόρυφης ανύψωσης για την άργιλο (0 για  $c=0$ )

$$= 2 \cdot \frac{H}{D} \leq 10, \text{ εφαρμόζεται όταν } \frac{H}{D} \leq 10$$

$N_{qv}$  = συντελεστής κατακόρυφης ανύψωσης για την άμμο (0 για  $\varphi=0^\circ$ )

$$= \frac{\varphi \cdot H}{44 \cdot D} \leq N_q$$

$\Delta_{qu}$  = μετακίνηση για  $Q_u$

$$= 0.01 \cdot H \text{ μέχρι } 0.02 \cdot H \text{ για πυκνή έως χαλαρή άμμο } < 0.1 \cdot D$$

$$= 0.1 \cdot H \text{ μέχρι } 0.2 \cdot H \text{ για σκληρή έως μαλακή άργιλο } < 0.2 \cdot D$$

Στην παρούσα εργασία σύμφωνα με τον διεθνή κανονισμό ALA έχουμε:

Για αργιλικό υπόβαθρο του αγωγού ισχύει:

$$Q_u = 0 \text{ kN/m}$$

$$\text{για } D = 1.0304 \text{ m}$$

$$c = 20 \text{ kPa}$$

$$H = 0 \text{ m}$$

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\bar{\gamma} = \gamma - 10 = 20 - 10 = 10 \text{ kN/m}^3$$

$$N_{cv} = 0$$

$$N_{qv} = 0$$

και η μετακίνηση του αγωγού για την συγκεκριμένη δύναμη είναι  $\Delta_{qu} = 0 \text{ mm}$

Για αμμώδες υπόβαθρο του αγωγού ισχύει:

$$Q_u = 0 \text{ kN/m}$$

$$\text{για } D = 1.0304 \text{ m}$$

$$c = 1 \text{ kPa}$$

$$H = 0 \text{ m}$$

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\bar{\gamma} = \gamma - 10 = 20 - 10 = 10 \text{ kN/m}^3$$

$$N_{cv} = 0$$

$$N_{qv} = 0$$

και η μετακίνηση του αγωγού για την συγκεκριμένη δύναμη είναι  $\Delta_{qu} = 0 \text{ mm}$

- Κατακόρυφα προς τα κάτω εδαφικά ελατήρια

$$Q_d = N_c \cdot c \cdot D + N_q \cdot \bar{\gamma} \cdot H \cdot D + N_\gamma \cdot \gamma \cdot \frac{D^2}{2} \quad (5.4)$$

όπου:

$N_c, N_q, N_\gamma$  = συντελεστές φέρουσας ικανότητας εδάφους

$$N_c = [ \cot(\varphi + 0,001) ] \{ \exp[ \pi \tan(\varphi + 0,001) ] \tan^2(45 + (\varphi + 0,001)/2) - 1 \}$$

$$N_q = \exp(\pi \cdot \tan\varphi) \tan^2(45 + \varphi/2)$$

$$N_\gamma = e^{(0,18 \cdot \varphi - 2,5)}$$

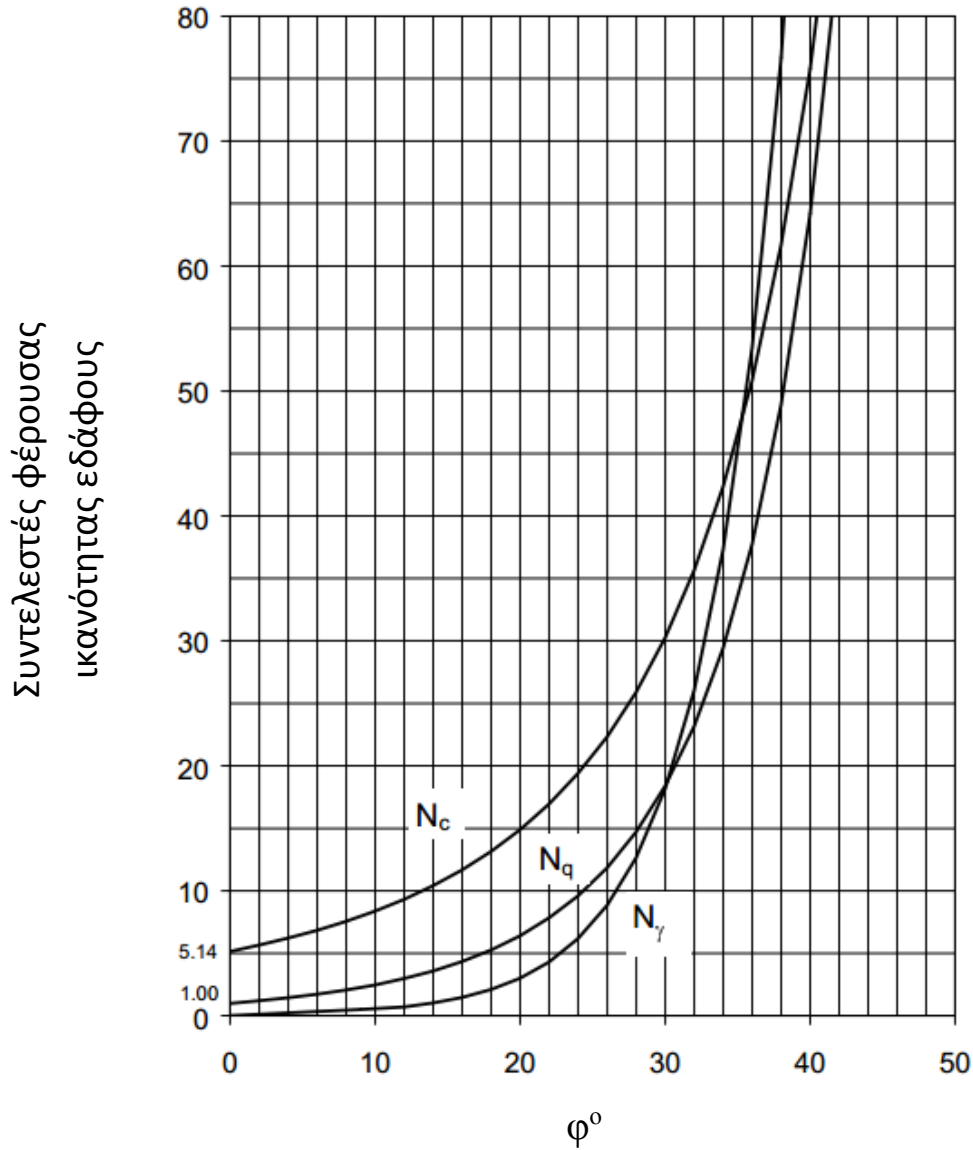
$\gamma$  = ειδικό βάρος εδάφους

$\Delta_{qd}$  = μετακίνηση για  $Q_d$

$$= 0,1 \cdot D \text{ για κοκκώδη υλικά}$$

$$= 0,2 \cdot D \text{ για συνεκτικά υλικά}$$

Για να υπολογιστούν οι συντελεστές της φέρουσας ικανότητας του εδάφους  $N_c, N_q$  και  $N_\gamma$  υπάρχει και δεύτερος τρόπος σύμφωνα με τον ALA και είναι η ποιοτική προσέγγισή τους σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.6: Τιμές των συντελεστών φέρουσας ικανότητας του εδάφους  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$

Στην παρούσα εργασία σύμφωνα με τον διεθνή κανονισμό ALA έχουμε:

Για αργιλικό υπόβαθρο του αγωγού ισχύει:

$$Q_d = 106.34 \text{ kN/m}$$

$$\text{για } D = 1.0304 \text{ m}$$

$$c = 20 \text{ kPa}$$

$$H = 0 \text{ m}$$

$$\phi = 2^\circ$$

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\bar{\gamma} = \gamma - 10 = 20 - 10 = 10 \text{ kN/m}^3$$



$$N_c = 5.16$$

$$N_q = 1$$

$$N_\gamma = 0$$

και η μετακίνηση του αγωγού για την συγκεκριμένη δύναμη είναι  $\Delta_{qd} = 0.1 \cdot D = 0.10 \text{ mm}$

Για αμμώδες υπόβαθρο του αγωγού ισχύει:

$$Q_d = 26.07 \text{ kN/m}$$

$$\text{για } D = 1.0304 \text{ m}$$

$$c = 1 \text{ kPa}$$

$$H = 0 \text{ m}$$

$$\varphi = 20^\circ$$

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\bar{\gamma} = \gamma - 10 = 20 - 10 = 10 \text{ kN/m}^3$$

$$N_c = 15$$

$$N_q = 5.16$$

$$N_\gamma = 1$$

και η μετακίνηση του αγωγού για την συγκεκριμένη δύναμη είναι  $\Delta_{qd} = 0.2 \cdot D = 0.21 \text{ mm}$

### 6.2.2 Υπολογισμός των ελατηρίων σύμφωνα με την θεωρία των O'Rourke & Liu

Με βάση την θεωρία των O'Rourke & Liu υπολογίστηκαν τα εξής στοιχεία:

Καταρχάς με βάση την προαναφερθείσα θεωρία το βάρος του αγωγού εφόσον είναι υποθαλάσσιος λαμβάνεται υπόψη το βυθισμένο βάρος του αγωγού το οποίο υπολογίστηκε ως εξής:

Αρχικά το βάρος του αγωγού χωρίς την επένδυση υπολογίστηκε με βάση την εξωτερική ακτίνα (0.9144 m), το πάχος του αγωγού (0.027 m) καθώς και το ειδικό του βάρος (78.5 kN/m<sup>3</sup>) και είναι ίσο με 5.91 kN/m. Το βάρος του σκυροδέματος με βάση την εξωτερική ακτίνα (1.0304 m), το πάχος του (0.055 m) καθώς και το ειδικό του βάρος (25 kN/m<sup>3</sup>) είναι ίσο με 4.22 kN/m. Το βάρος της στρώσης της εξωτερικής επένδυσης δεν συμπεριλήφθηκε στο βάρος αφού είναι πάρα πολύ μικρό και δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα. Επομένως το συνολικό βάρος του επενδεδυμένου αγωγού είναι 10.13 kN/m. Στην συνέχεια υπολογίστηκε η άνωση που υπάρχει λόγω ότι ο αγωγός είναι βυθισμένος και είναι ίση με 8.39 kN/m όπου η πυκνότητα του θαλασσινού νερού είναι 1.025 kg/m<sup>3</sup>. Άρα το βυθισμένο βάρος του αγωγού είναι η διαφορά του πραγματικού του βάρους με την άνωση και είναι ίσο με 1.74 kN/m. Στην συνέχεια στον υπολογισμό των δυνάμεων χρησιμοποιήθηκε αυτό το βάρος σε όλους τους υπολογισμούς βάσει της προαναφερθείσας θεωρίας.

Για τον υπολογισμό των αξονικών δυνάμεων και μετατοπίσεων για τα αμμώδη ελατήρια ισχύει ότι:

$$t_u = w_s \cdot \tan k \cdot \varphi \quad (5.5)$$

όπου  $w_s$  είναι το βυθισμένο βάρος του αγωγού,  $\varphi$  είναι η γωνία εσωτερικής τριβής της άμμου όπου είναι ίση με  $20^\circ$  και  $k$  είναι ο συντελεστής τριβής όπου θεωρήθηκε ίσος με 1 με βάση τον παρακάτω πίνακα των O'Rourke & Liu:

**Πίνακας 6.5:** Συντελεστής τριβής  $k$  για την μέγιστη αντίσταση ενός υλικού χωρίς συνοχή στην οριζόντια διεύθυνση

| Υλικό αγωγού/Επένδυση   | $k$ |
|---|-----|
| Σκυρόδεμα<br>Επένδυση για χάλυβα με τσιμέντο<br>Επένδυση για χυτοσίδηρο με τσιμέντο | 1.0 |
| Πίσσα   | 0.9 |
| Σκληρός χάλυβας<br>Χυτοσίδηρος  | 0.8 |
| Μαλακός χάλυβας   | 0.7 |
| Επένδυση πολυαιθυλενίου με εποξειδικό υλικό   | 0.6 |

Ο συντελεστής θεωρήθηκε ίσος με 1 με βάση την αρχική θεώρηση που έγινε ότι ο αγωγός είναι επενδεδυμένος με σκυρόδεμα. Τελικά η τιμή της αξονικής δύναμης που ασκείται στον αγωγό προέκυψε ίση με 0.63 kN/m και η μετατόπιση του ίση με 0.005 m λόγω ότι οι O'Rourke & Liu δίνουν μία συγκεκριμένη μετατόπιση για αμμώδες υπόβαθρο.

Για τον υπολογισμό των αξονικών δυνάμεων και μετατοπίσεων για τα αργιλικά ελατήρια ισχύει ότι:

Επειδή σε αυτήν την περίπτωση δεν υπήρχαν διαφορές με τον ALA κανονισμό και την θεωρία των O'Rourke & Liu και στον πρώτο υπήρχε πιο σαφής και διατυπωμένος τύπος οι υπολογισμοί γίνανε με βάση αυτόν. Επομένως η αξονική δύναμη που ασκείται στον αγωγό όταν το υπόβαθρό του είναι αργιλικό υλικό σύμφωνα με τον ALA είναι η εξής:

$$t_u = \pi \cdot D \cdot \alpha \cdot c \quad (5.6)$$

όπου  $D$  είναι η εξωτερική διάμετρος αλλά επειδή εδώ ο μισός αγωγός είναι βυθισμένος στο βυθό θεωρούμε  $D' = D/2$ ,  $\alpha = 1$  όπου  $\alpha$  είναι ο συντελεστής τριβής όπως προαναφέρθηκε και  $c = 20$  kPa η συνοχή του αργιλικού υλικού. Η τιμή αυτού όπως προέκυψε από τα παραπάνω είναι ίση με 32.37 kN/m. Επίσης αναφέρεται ότι η μετατόπιση του αγωγού για την συγκεκριμένη δύναμη είναι ίση με 0.010 m.

Όσον αφορά τις εγκάρσιες οριζόντιες δυνάμεις για τα αμμώδη ελατήρια οι O'Rourke και Jack X. Liu θεωρούν τον τύπο:

$$p_u = \tan(k \cdot \varphi) \cdot w_s + (4,5 - 0,11 \cdot \frac{\bar{\gamma} \cdot D^2}{w_s}) \cdot (\gamma \cdot D^2) \cdot \left(\frac{z}{D}\right)^{1,25} \quad (5.7)$$

$$y_u = 0,2 \cdot D \text{ έως } 0,5 \cdot D$$

όπου το ειδικό βάρος  $\gamma$  είναι ίσο με  $20 \text{ kN/m}^3$ ,  $D$  είναι η εξωτερική διάμετρος και είναι ίση με  $1.0304 \text{ m}$  και  $z$  είναι το τμήμα του αγωγού που είναι βυθισμένο στο βυθό της θάλασσας και είναι ίσο με  $\frac{1}{2}$  του  $D$ . Επομένως η δύναμη αυτή είναι ίση με  $34.82 \text{ kN/m}$  και η μετατόπιση του αγωγού για την δύναμη αυτή λαμβάνεται ίση με μία μέση τιμή της παραπάνω σχέσης ( $y_u$ ) οπότε είναι ίση με  $0.35 \cdot D = 0.36 \text{ m}$ .

Για τα αργιλικά ελατήρια από την άλλη θεωρούν τον τύπο:

$$p_u = 0,2 \cdot w_s + 3 \cdot z \cdot \sqrt{D \cdot \bar{\gamma} \cdot S_u} \quad (5.8)$$

$$y_u = 0,1 \cdot D$$

όπου  $S_u = c = 20 \text{ kPa}$  (συνοχή αργίλου). Η συγκεκριμένη τιμή προέκυψε ίση με  $22.54 \text{ kN/m}$  και η μετατόπιση  $y_u$  για την συγκεκριμένη δύναμη ίση με την παραπάνω σχέση  $0.103 \text{ m}$ .

Για την κάθετη διεύθυνση έχουμε δύο ειδών ελατήρια: αυτά που ακούν δύναμη στον αγωγό προς τα κάτω (downward) και αυτά που ασκούν δύναμη προς τα άνω (upward).

Για εκείνα που ασκούν δύναμη προς τα άνω οι O'Rourke & Liu ισχυρίζονται πως για τα αμμώδη ελατήρια εφόσον ο αγωγός δεν είναι ολικά θαμμένος η μοναδική δύναμη που μπορεί να αντισταθεί στον αγωγό είναι το ίδιο του το βάρος άρα σαν δύναμη ελατηρίου προς τα άνω θεωρεί δύναμη ίση με  $1.74 \text{ kN/m}$  και μετατόπιση του αγωγού για αυτή την δύναμη είναι ίση με  $0,001 \text{ m}$ .

Για τα αργιλικά ελατήρια θεωρούν ότι η δύναμη που ασκείται στον αγωγό δίνεται με βάση τον τύπο:

$$q_u = w_s + \alpha \cdot S_u \cdot D \cdot \sin\theta \quad (5.9)$$

όπου  $\theta = \sin^{-1}(1 - 2 \cdot \frac{z}{D}) \leq 90^\circ$ . Άρα, η τιμή αυτής της δύναμης προκύπτει ίση με  $22.35 \text{ kN/m}$  και η μετατόπιση του αγωγού για την συγκεκριμένη δύναμη είναι ίση με  $0.002 \text{ m}$ .

Τέλος, για τα ελατήρια που ασκούν στον αγωγό στην κάθετη διεύθυνση δύναμη προς τα κάτω με βάση την θεωρία των O'Rourke & Liu έχουμε τα εξής:

Για τα αμμώδη ελατήρια η δύναμη που ασκείται στον αγωγό δίνεται από τον τύπο:

$$q_u = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot N_\gamma \cdot B^2 \quad (5.10)$$

όπου  $B = D \cdot \sin\theta$  και  $N_y = e^{(0,18 \cdot \varphi - 2,5)} = 3.0042$  σύμφωνα με τον διεθνή κανονισμό ALA. Άρα, η τιμή αυτής της δύναμης προκύπτει ίση με 31.90 kN/m και η μετατόπιση του αγωγού για την συγκεκριμένη δύναμη είναι ίση με  $0.1 \cdot D = 0.103$  m.

Για τα αργιλικά ελατήρια η δύναμη που ασκείται στον αγωγό δίνεται από τον τύπο:

$$q_u = N \cdot D \cdot S_u \quad (5.11)$$

όπου  $N = \pi + 2 = 5.14$ . Η τιμή αυτή θεωρήθηκε ίδια με την τιμή που ισχύει για επιφανειακά θεμέλια. Επομένως η δύναμη αυτή ισούται με 105.93 kN/m και η μετατόπιση του αγωγού με βάση αυτή την δύναμη ισούται με 0.21 m.

Τελικά, με βάση τις δύο προαναφερθείσες θεωρίες καταλήγουμε στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα:

**Πίνακας 6.6:** Τιμές εδαφικών ελατηρίων

|          | Είδος ελατηρίου (kN/m)    | ALA    | O'Rourke & J. X. Liu |
|----------|---------------------------|--------|----------------------|
| ΑΡΓΙΛΙΟΣ | Αξονικό                   | 59.89  | 32.37                |
|          | Πλευρικό                  | 41.22  | 22.54                |
|          | Κατακόρυφο (προς τα άνω)  | 0      | 22.35                |
|          | Κατακόρυφο (προς τα κάτω) | 106.34 | 105.93               |
| ΑΜΜΟΣ    | Αξονικό                   | 1.13   | 0.63                 |
|          | Πλευρικό                  | 0      | 34.82                |
|          | Κατακόρυφο (προς τα άνω)  | 0      | 1.74                 |
|          | Κατακόρυφο (προς τα κάτω) | 26.07  | 31.9                 |

Παρατηρούμε ότι οι διαφορές μεταξύ του κανονισμού και της θεωρίας των O'Rourke & Liu έχουν έντονες διαφοροποιήσεις στις τιμές τους. Η μεγάλη διαφορά των κατακόρυφων προς τα άνω ελατηρίων οφείλεται στο γεγονός ότι οι O'Rourke & Liu λαμβάνουν υπόψη τους το βάρος του ποντισμένου αγωγού. Οι προαναφερθείσες διαφορές προφανώς στην εφαρμογή θα έχει και αποτελέσματα αρκετά διαφορετικά μεταξύ των δύο μεθόδων. Επομένως, τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με τα ελατήρια και οποιαδήποτε αλλαγή και να πραγματοποιηθεί στις τιμές αυτών θα υπάρξουν και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που σίγουρα θα διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους. Στην συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε για τον αγωγό για τις δύο περιπτώσεις που προαναφέρθηκαν με την μία να είναι σε απευθείας επαφή με το ρήγμα και την άλλη να

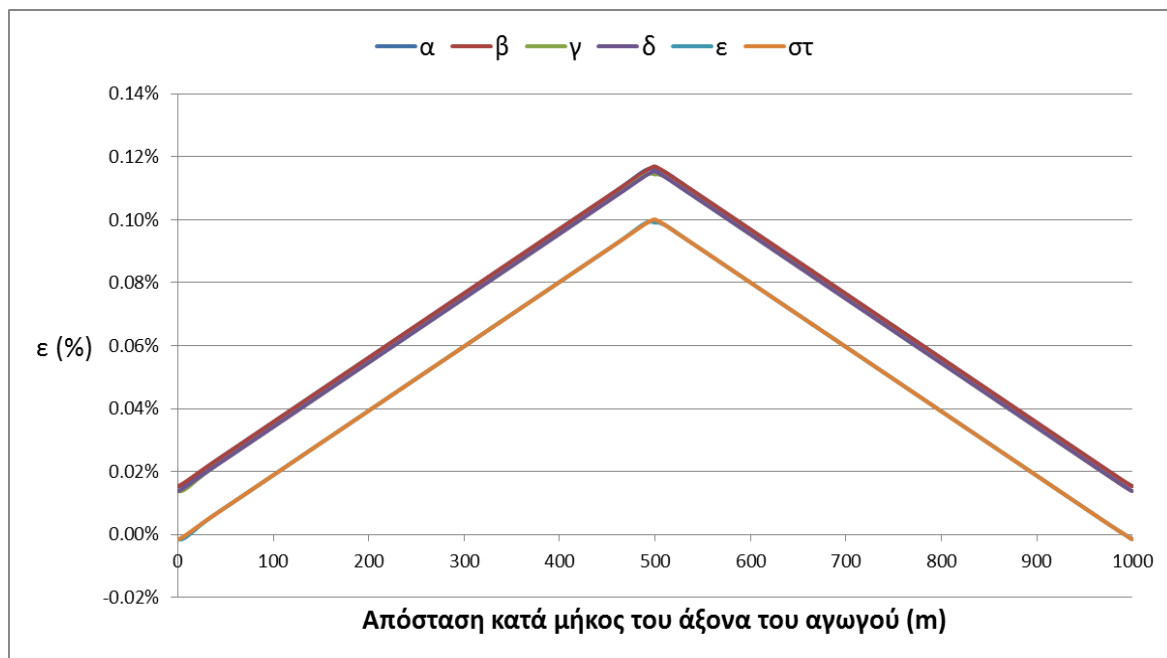
παρεμβάλλεται μεταξύ τους αργιλική και αμμώδης ιζηματογενής στρώση. Τα ελατήρια χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό να προσομοιώσουν τις προαναφερθείσες περιπτώσεις σύμφωνα πάντα με την θεωρία των O'Rourke & Liu.

### 6.3 Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων υποθαλασσίου αγωγού που βρίσκεται σε απευθείας επαφή με κανονικό σεισμικό ρήγμα

Στο παρόν υποκεφάλαιο εξετάζεται ο αγωγός όταν αυτός θεωρείται ότι βρίσκεται σε απευθείας επαφή με κανονικό ρήγμα, αγνοώντας ουσιαστικά την επίδραση της ιζηματογενούς στρώσης που παρεμβάλλεται μεταξύ αγωγού και ρήγματος, αλλά λαμβάνοντας υπόψη τα εδαφικά ελατήρια. Συνεπώς, οι παράμετροι που εξετάζονται είναι:

- α) η γωνία διάρρηξης  $\theta$  του ρήγματος ( $30^\circ$  και  $60^\circ$ )
- β) το βάθος  $h$  του αγωγού από την επιφάνεια της θάλασσας (10 m, 100 m και 1000 m)
- γ) το είδος των εδαφικών ελατηρίων (αργιλικά και αμμώδη)

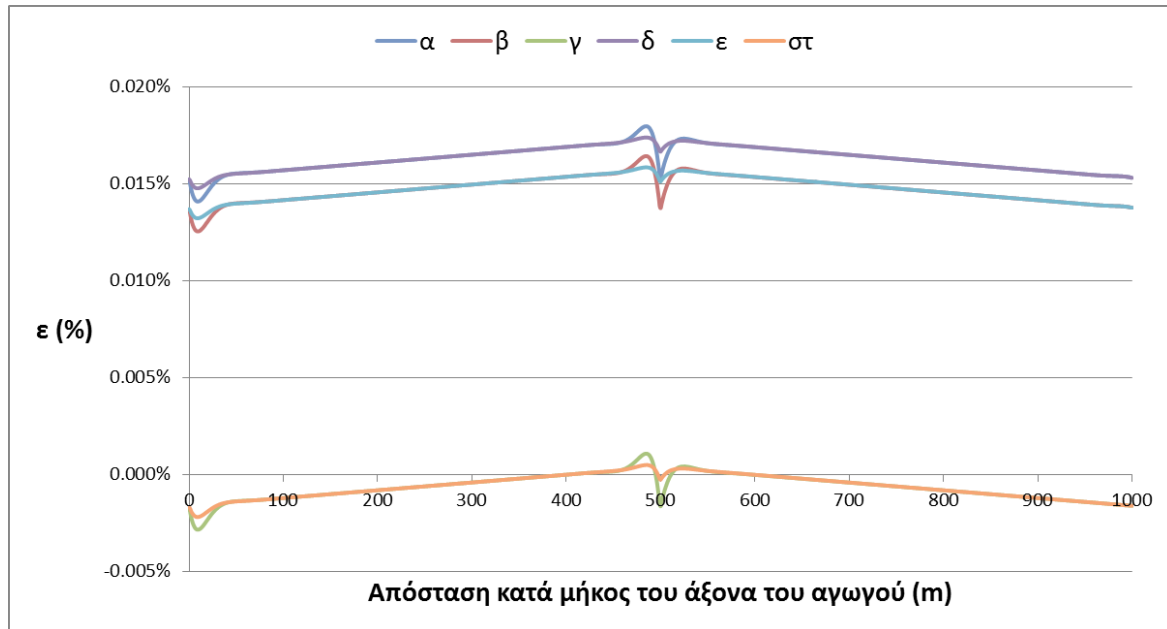
Τα αποτελέσματα καθώς και τα συμπεράσματα παρατίθενται στην συνέχεια.



**Διάγραμμα 6.1:** Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που βρίσκεται σε απευθείας επαφή με κανονικό ρήγμα (αργιλικά ελατήρια) για διαφορετικές περιπτώσεις  $\theta$  και  $h$ : α)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m, β)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m, γ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m, δ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m, ε)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m, στ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m

Παρατηρείται ότι μέγιστες αξονικές παραμορφώσεις εμφανίζονται στα 500 m απ' αρχής με τιμές 0.12% περίπου για τις περιπτώσεις όπου το βάθος όπου βρίσκεται ο αγωγός είναι στα 10 m και 100 m από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ στην περίπτωση των 1000 m είναι στο 0.10%. Η συγκεκριμένη διαφορά μπορεί να αποδοθεί στην προσεγγιστική εξισορρόπηση μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής πίεσης στην περίπτωση των 1000 m

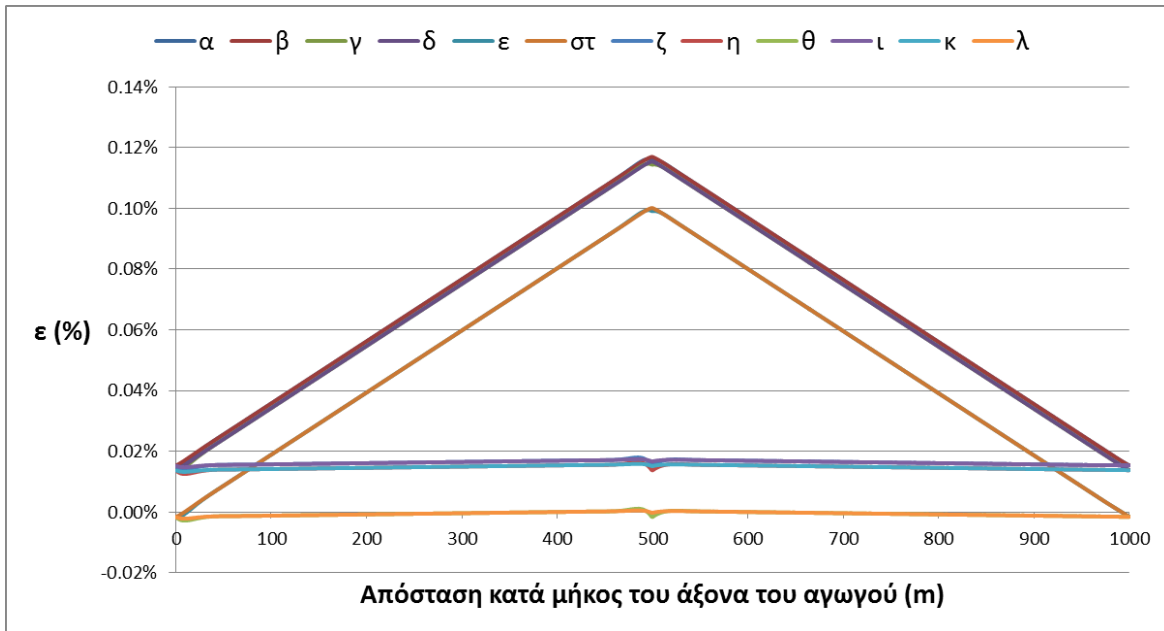
(βλ. Πίνακα 6.2). Φαίνεται ότι στην περίπτωση των αργιλικών ελατηρίων δεν παίζει κανένα ρόλο η γωνία διάρρηξης του ρήγματος παρά μόνο το βάθος όπου βρίσκεται ο αγωγός αφού και για  $30^\circ$  αλλά και για  $60^\circ$  τα διαγράμματα που εξήχθησαν για την ίδια υδροστατική πίεση συμπίπτουν. Επίσης η διαφορά των αξονικών παραμορφώσεων είναι μόνο στα 1000 m βάθος όπου παρατηρείται αυτή η αισθητή μείωση της.



**Διάγραμμα 6.2:** Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που βρίσκεται σε απευθείας επαφή με κανονικό ρήγμα (αμμώδη ελατήρια) για διαφορετικές περιπτώσεις  $\theta$  και  $h$ : α)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m, β)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m, γ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m, δ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m, ε)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m, στ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m

Παρατηρείται ότι μέγιστες αξονικές παραμορφώσεις έχουμε στα 500 m απ' αρχής με τιμές 0.02% περίπου για τις περιπτώσεις όπου το βάθος όπου βρίσκεται ο αγωγός είναι στα 10 και 100 m από την επιφάνεια της θάλασσας ενώ στην περίπτωση των 1000 m είναι στο 0.001%. Φαίνεται ότι στην περίπτωση των αμμωδών ελατηρίων δεν παίζει κανένα ρόλο η γωνία διάρρηξης του ρήγματος παρά μόνο το βάθος όπου βρίσκεται ο αγωγός αφού και για  $30^\circ$  αλλά και για  $60^\circ$  τα διαγράμματα που εξήχθησαν για την ίδια υδροστατική πίεση συμπίπτουν. Επίσης η διαφορά των αξονικών παραμορφώσεων είναι μόνο στα 1000 m βάθος όπου παρατηρείται αυτή η αισθητή μείωση της. Γενικότερα παρατηρείται ότι σε τέτοια βάθη με αυτό το είδος του ρήγματος η καταπόνηση του αγωγού από την διάρρηξη του είναι αμελητέα. Είναι ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα καθώς βλέπουμε και στις δύο περιπτώσεις ότι οι παραμορφώσεις τείνουν στον μηδέν (πρακτικά σαν να μην υπάρχουν). Σε σχέση με το προηγούμενο διάγραμμα όπου θα δούμε και στην συνέχεια σε σύγκριση τα δύο αποτελέσματα τα ελατήρια και όχι τόσο το βάθος παίζουν καθοριστικό ρόλο στην όποια δύναμη και κατ' επέκταση παραμόρφωση προκαλείται στον αγωγό. Οι τιμές των δύο ειδών ελατηρίων των αργιλικών και των αμμωδών φαίνεται να απέχουν πολύ σύμφωνα με το κεφάλαιο 6.2.2 (αξονικά, πλευρικά

και κατακόρυφα) με αποτέλεσμα να δίνουν αρκετά διαφορετικά αποτελέσματα και να υπάρχει αυτή η μεγάλη διαφορά μεταξύ τους. Τα εδαφικά ελατήρια ιδιαίτερα στο βυθό της θάλασσας είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την προσομοίωση τέτοιων προβλημάτων και συνεπώς τέτοιες διαφορές στην καταπόνηση του αγωγού είναι αναμενόμενες να παρατηρηθούν.



**Διάγραμμα 6.3:** Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που βρίσκεται σε απευθείας επαφή με ρήγμα για διαφορετικές περιπτώσεις  $\theta$  και  $h$ : α)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m, άργιλος, β)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m, άργιλος, γ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m, άργιλος, δ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m, άργιλος, ε)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m, άργιλος, στ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m, άργιλος, ζ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m, άμμος, η)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m, άμμος, θ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m, άμμος, ι)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m, άμμος κ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m, άμμος, λ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m, άμμος

Παρατηρείται ότι όσον αφορά τα αργιλικά ελατήρια όπως ήταν και αναμενόμενο φαίνεται ότι δημιουργούν στον αγωγό μεγαλύτερη καταπόνηση σε σχέση με τα αμμώδη αφού σε όλα τα βάθη όπου βρίσκεται ο αγωγός έχουν μεγάλη διαφορά στις αξονικές παραμορφώσεις της τάξης του 0.10%. Γενικά οι παραμορφώσεις και στα δύο είδη ρήγματος δεν είναι σε καμία περίπτωση ανησυχητικές αφού είναι πάρα πολύ μικρές για να προκαλέσουν αστοχία στον αγωγό καθώς οι επιτρεπόμενες παραμορφώσεις μπορεί να είναι πολλαπλάσιες. Επίσης συμπεραίνεται ότι σε μεγαλύτερα βάθη η αξονική παραμόρφωση μειώνεται αρκετά και στις δύο περιπτώσεις όπως και ότι το διαφορετικό υλικό σαν υπόβαθρο για τον αγωγό παίζει καθοριστικό ρόλο στην παραμόρφωση που προκαλείται. Το κύριο συμπέρασμα εδώ αφορά τα ελατήρια όπου διαπιστώθηκε ότι με διαφορετικές τιμές εξάγονται διαφορετικά σε μεγάλο βαθμό αποτελέσματα. Επομένως σε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν ο κύριος παράγοντας διαφοροποίησης τους είναι ο ρόλος των διαφορετικών εδαφικών ελατηρίων όπως φαίνεται και στην συνέχεια.

#### 6.4 Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων υποθαλασσίου αγωγού και κανονικού ρήγματος όπου μεταξύ τους παρεμβάλλεται αργιλική ιζηματογενής στρώση

Στο παρόν υποκεφάλαιο εξετάζεται ο αγωγός όταν αυτός θεωρείται ότι βρίσκεται πάνω σε αργιλική ιζηματογενή στρώση η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα.

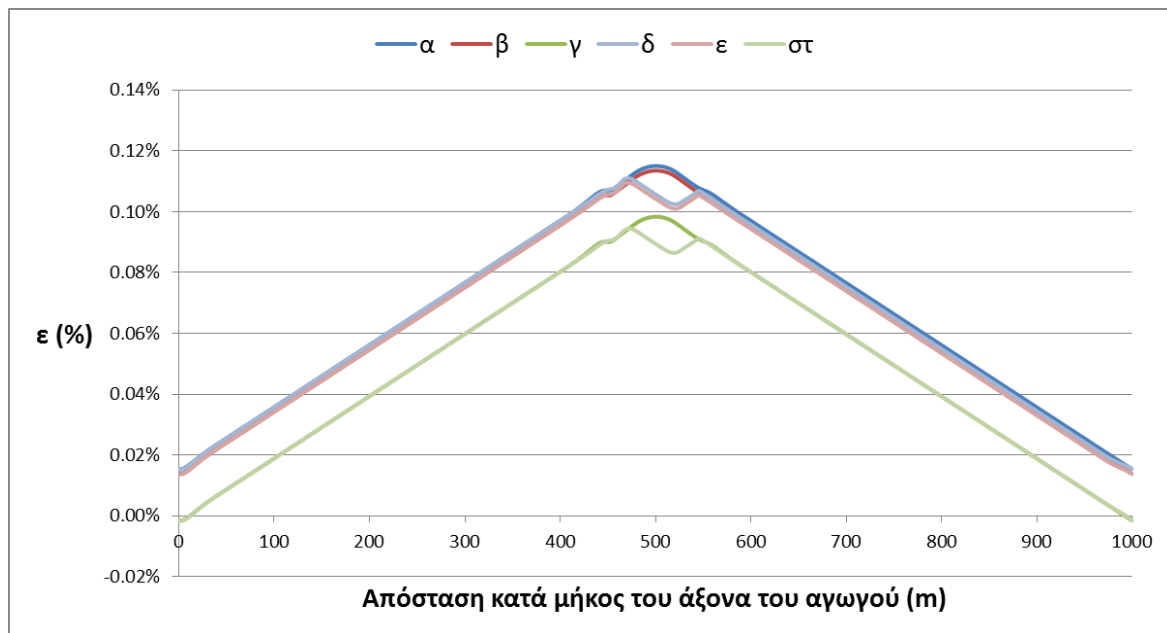
Συνεπώς, οι παράμετροι που εξετάζονται είναι:

α) η γωνία διάρρηξης  $\theta$  του ρήγματος ( $30^\circ$  και  $60^\circ$ )

β) το βάθος  $h$  του αγωγού από την επιφάνεια της θάλασσας (10 m, 100 m και 1000 m)

γ) το πάχος της ιζηματογενούς στρώσης (50 m και 150 m)

Τα αποτελέσματα καθώς και τα συμπεράσματα παρατίθενται στην συνέχεια.



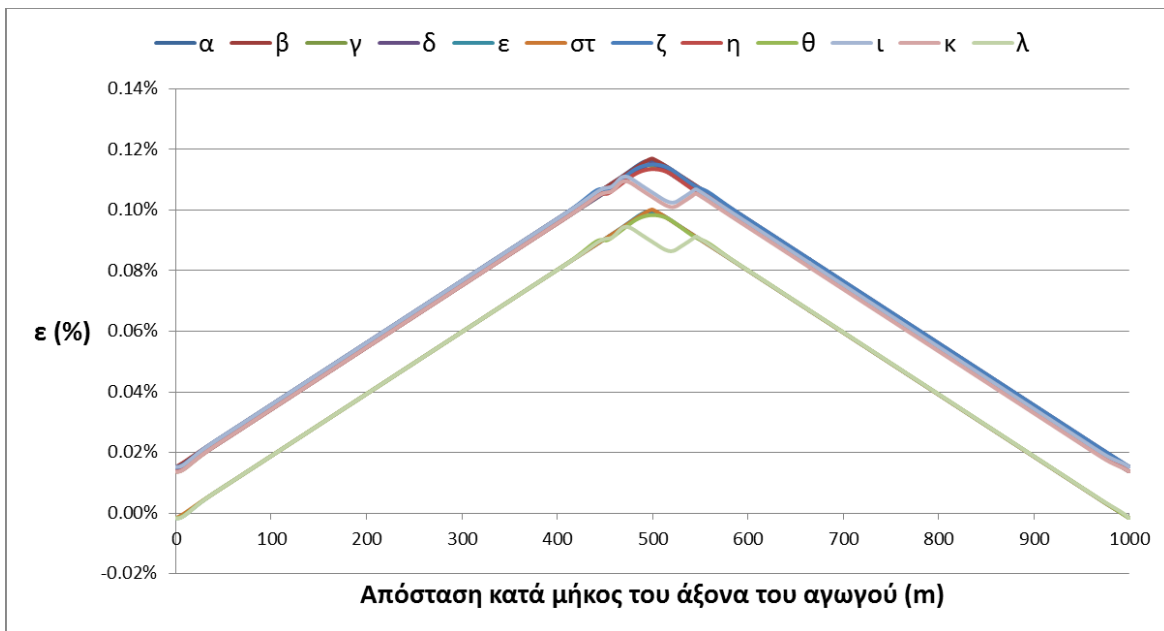
**Διάγραμμα 6.4:** Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που βρίσκεται πάνω σε αργιλική ιζηματογενή στρώση με  $H=50$  m η οποία προκαλείται από διάρρηξη κανονικού ρήγματος για διαφορετικές περιπτώσεις  $\theta$  και  $h$ : α)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m, β)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m, γ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m, δ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m, ε)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m, στ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m

Από το διάγραμμα 6.4 συμπεραίνεται ότι στις περιπτώσεις όπου το βάθος που βρίσκεται ο αγωγός είναι 10 m και 100 m ανεξαρτήτως γωνίας διάρρηξης του ρήγματος (και στις  $30^\circ$  αλλά και στις  $60^\circ$  παρουσιάζεται η ίδια συμπεριφορά στο ίδιο βάθος) η αξονική παραμόρφωση του αγωγού είναι της τάξης του 0.12% ενώ στα 1000 m είναι της τάξης του 0.10%. Οι διαφορές που παρουσιάζονται μεταξύ των διαφορετικών γωνιών διάρρηξης του ρήγματος είναι πάρα πολύ μικρές και εδώ θεωρούνται αμελητέες.

Φαίνεται να παίζει ρόλο το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο αγωγός και συγκεκριμένα η διαφορά στην αξονική παραμόρφωση εντοπίζεται στα 1000 m σε ένα αρκετά μεγάλο βάθος.



Όλες οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται στα 500 m απ' αρχής. Και πάλι οι παραμορφώσεις είναι πολύ μικρές προκειμένου να προκαλέσουν αστοχία στο αγωγό.

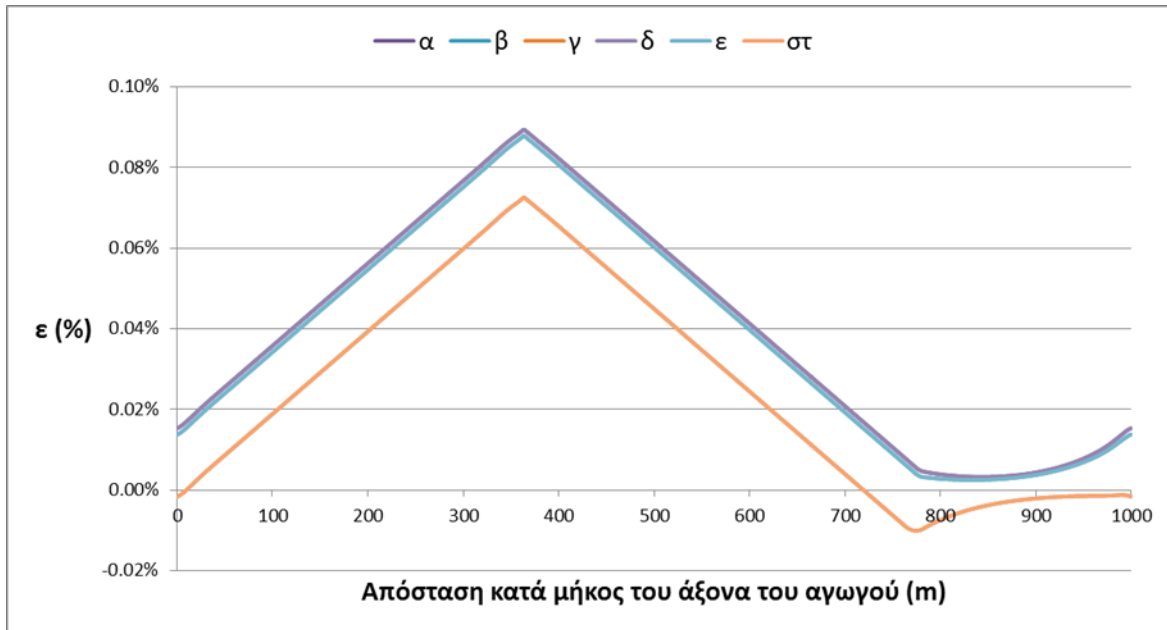


**Διάγραμμα 6.5:** Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που βρίσκεται πάνω σε αργιλική ιζηματογενή στρώση με  $H=50$  m λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος σε σύγκριση με την αξονική παραμόρφωση του αγωγού σε απευθείας επαφή με το ρήγμα (αργιλικά ελατήρια) για διαφορετικές περιπτώσεις  $\theta$  και  $h$ : α)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m (απευθείας επαφή), β)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m (απευθείας επαφή), γ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m (απευθείας επαφή), δ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m (απευθείας επαφή), ε)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m (απευθείας επαφή), στ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m (απευθείας επαφή), ζ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m (ύπαρξη στρώσης), η)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m (ύπαρξη στρώσης), θ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m (ύπαρξη στρώσης), ι)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m (ύπαρξη στρώσης), κ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m (ύπαρξη στρώσης), λ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m (ύπαρξη στρώσης)

Συγκρίνοντας τις περιπτώσεις σύμφωνα με το διάγραμμα 6.5 όπου ο αγωγός έχει άμεση επαφή με το ρήγμα και την περίπτωση όπου μεταξύ αγωγού και ρήγματος υπάρχει αργιλική ιζηματογενής ζώνη πάχους 50 m παρατηρείται ότι δεν υπάρχει καμία διαφορά μεταξύ τους στα διαφορετικά βάθη. Και στις δύο περιπτώσεις η γωνία δεν παίζει κανένα ρόλο αφού στα διάφορα βάθη για γωνία διάρρηξης  $30^\circ$  και για γωνία διάρρηξης  $60^\circ$  οι καμπύλες δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές και επίσης και οι δύο έχουν κοινή μέγιστη τιμή παραμόρφωσης.

Επίσης στα 10 m και 100 m βάθος αγωγού οι καμπύλες είναι παρόμοιες και στις δύο περιπτώσεις όπως και στα 1000 m παρατηρείται η ίδια μείωση εξίσου και για τις δύο περιπτώσεις.

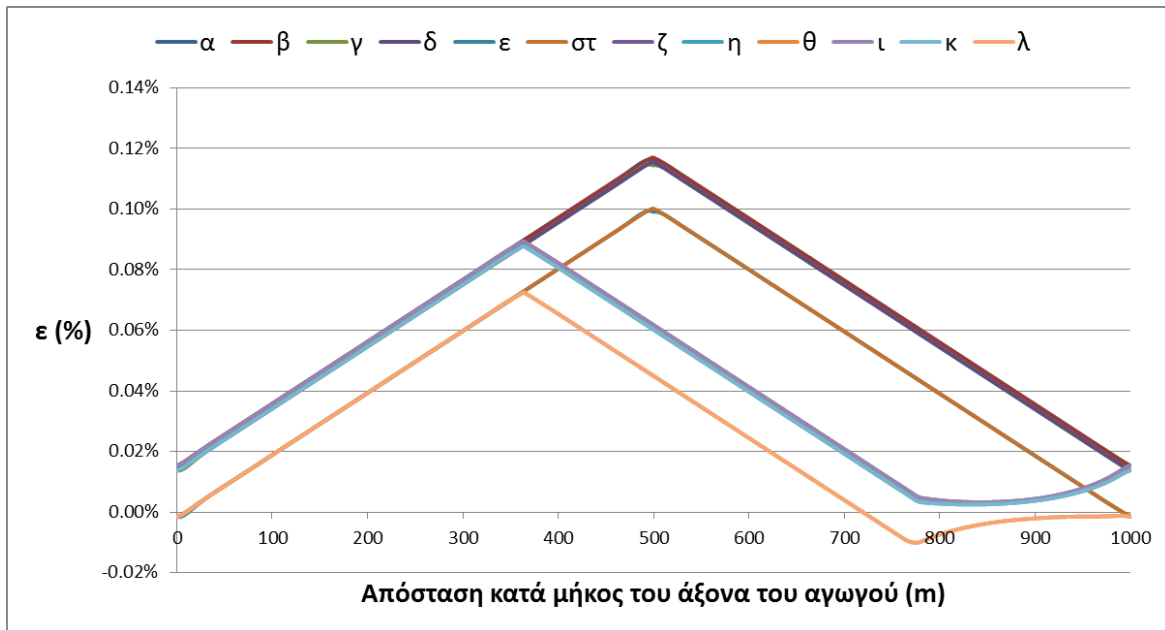
Συμπερασματικά, φαίνεται ότι την αξονική παραμόρφωση του αγωγού την επηρεάζει μόνο το βάθος όπου βρίσκεται ο αγωγός και πιο συγκεκριμένα στα πολύ μεγάλα βάθη όπου μειώνεται αισθητά η αξονική παραμόρφωση και ελάχιστα έως καθόλου η ύπαρξη ή μη της αργιλικής ιζηματογενούς ζώνης πάχους 50 m.



**Διάγραμμα 6.6:** Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που βρίσκεται πάνω σε αργιλική ιζηματογενή στρώση με  $H=150$  m η οποία προκαλείται από διάρρηξη κανονικού ρήγματος για διαφορετικές περιπτώσεις  $\theta$  και  $h$ : α)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m, β)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m, γ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m, δ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m, ε)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m, στ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνεται ότι στις περιπτώσεις όπου το βάθος είναι 10 m και 100 m ανεξαρτήτως γωνίας διάρρηξης του ρήγματος (και στις  $30^\circ$  αλλά και στις  $60^\circ$  παρουσιάζεται η ίδια συμπεριφορά στο ίδιο βάθος) η αξονική παραμόρφωση του αγωγού είναι της τάξης του 0.09% ενώ στα 1000 m είναι της τάξης του 0.07%. Οι διαφορές που παρουσιάζονται μεταξύ των διαφορετικών γωνιών διάρρηξης του ρήγματος είναι πάρα πολύ μικρές και εδώ θεωρούνται αμελητέες. Φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο αγωγός και συγκεκριμένα η διαφορά στην αξονική παραμόρφωση εντοπίζεται στα 1000 m σε ένα αρκετά μεγάλο βάθος. Όλες οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται στα 350 m απ' αρχής. Και πάλι οι παραμορφώσεις είναι πολύ μικρές προκειμένου να προκαλέσουν αστοχία στο αγωγό. Φαίνεται ότι στην περίπτωση των 150 m πάχους ιζηματογενούς στρώσης σε σχέση με τα 50 m (διάγραμμα 6.4) να υπάρχουν διαφορές και ως προς το μέγεθος της παραμόρφωσης και ως προς το εύρος των μέγιστων παραμορφώσεων. Παρόλο που είναι πολύ μικρές οι παραμορφώσεις στον αγωγό παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το πάχος μειώνεται η παραμόρφωση και ότι η καμπύλη για μεγαλύτερο πάχος στρώσης έχει πιο απότομη κλίση παρά το μικρότερο μέγεθος της παραμόρφωσης.

Επίσης το εύρος των μέγιστων τιμών στην περίπτωση των 150 m δείχνει να εμφανίζεται αρκετά πιο πριν από την μέση του αγωγού και αυτό υποδεικνύει ότι παίζει σημαντικό ρόλο το πάχος της στρώσης για την εμφάνιση του ρήγματος στην επιφάνεια της και κατ' επέκταση στο σημείο μέγιστης καταπόνησης (παραμόρφωσης) του αγωγού.



**Διάγραμμα 6.7:** Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που βρίσκεται πάνω σε αργιλική ιζηματογενή στρώση με  $H=150$  m λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος σε σύγκριση με την αξονική παραμόρφωση του αγωγού σε απευθείας επαφή με το ρήγμα (αργιλικά ελατήρια) για διαφορετικές περιπτώσεις  $\theta$  και  $h$ : α)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m (απευθείας επαφή), β)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m (απευθείας επαφή), γ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m (απευθείας επαφή), δ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m (απευθείας επαφή), ε)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m (απευθείας επαφή), στ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m (απευθείας επαφή), ζ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m (ύπαρξη στρώσης), η)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m (ύπαρξη στρώσης), θ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m (ύπαρξη στρώσης), ι)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m (ύπαρξη στρώσης), κ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m (ύπαρξη στρώσης), λ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m (ύπαρξη στρώσης)

Συγκρίνοντας τις περιπτώσεις σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα όπου ο αγωγός έχει άμεση επαφή με το ρήγμα και την περίπτωση όπου μεταξύ αγωγού και ρήγματος υπάρχει αργιλική ιζηματογενής ζώνη πάχους 150 m παρατηρείται ότι όπως ήταν αναμενόμενο με την ύπαρξη της αργιλικής ιζηματογενούς στρώσης σε κάθε βάθος όπου βρίσκεται ο αγωγός να έχει μικρότερη αξονική παραμόρφωση απ' ότι στην περίπτωση όπου έχει άμεση επαφή με το ρήγμα. Πιο συγκεκριμένα, στα 10 m και 100 m παρατηρείται μία μείωση της αξονικής παραμόρφωσης στην περίπτωση ύπαρξης της ιζηματογενούς στρώσης της τάξης του 0.04% και στα 1000 m της τάξης του 0.03%. Συμπεραίνεται επομένως ότι η ύπαρξη ιζηματογενούς στρώσης μειώνει την παραμόρφωση που δέχεται ο αγωγός και επίσης ότι και πάλι σε μεγάλα βάθη παρατηρείται μία αισθητή μείωση και στις δύο περιπτώσεις της παραμόρφωσης. Τέλος, η γωνία διάρρηξης του ρήγματος και πάλι δεν παίζει κάποιο ρόλο στην παραμόρφωση αφού εντοπίζεται η ίδια συμπεριφορά στα ίδια βάθη όπου βρίσκεται ο αγωγός.

## 6.5 Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων υποθαλασσίου αγωγού και κανονικού ρήγματος όπου μεταξύ τους παρεμβάλλεται αμμώδης ιζηματογενής στρώση

Στο παρόν υποκεφάλαιο εξετάζεται ο αγωγός όταν αυτός θεωρείται ότι βρίσκεται πάνω σε αμμώδη ιζηματογενή στρώση η οποία βρίσκεται πάνω σε κανονικό ρήγμα.

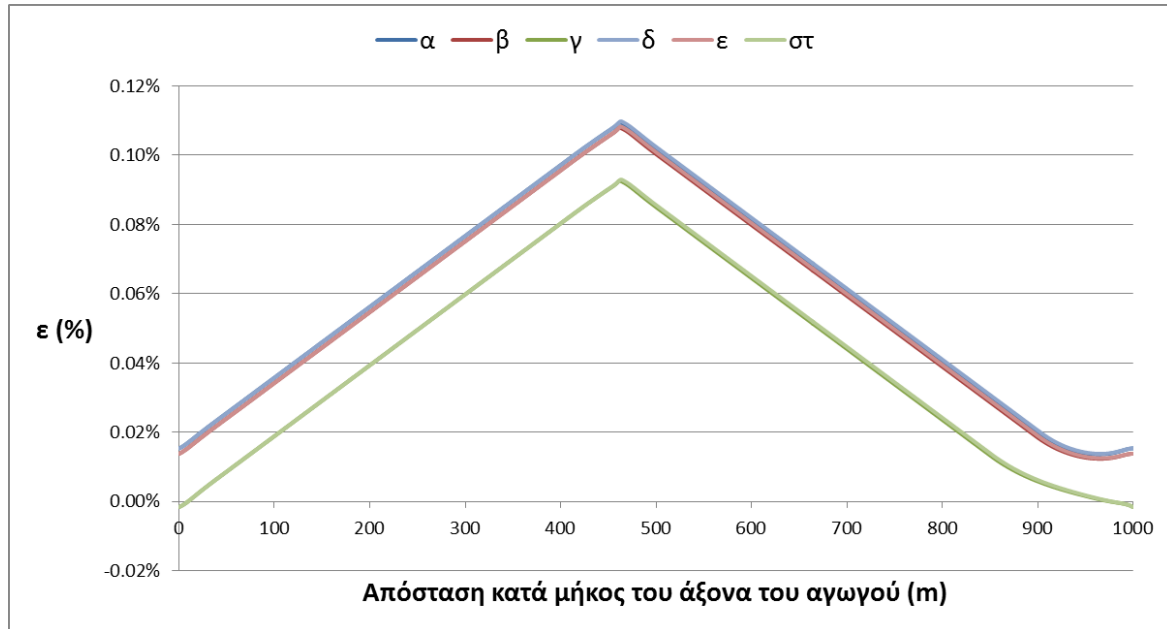
Συνεπώς, οι παράμετροι που εξετάζονται είναι:

α) η γωνία διάρρηξης  $\theta$  του ρήγματος ( $30^\circ$  και  $60^\circ$ )

β) το βάθος  $h$  του αγωγού από την επιφάνεια της θάλασσας (10 m, 100 m και 1000 m)

γ) το πάχος της ιζηματογενούς στρώσης (50 m και 150 m)

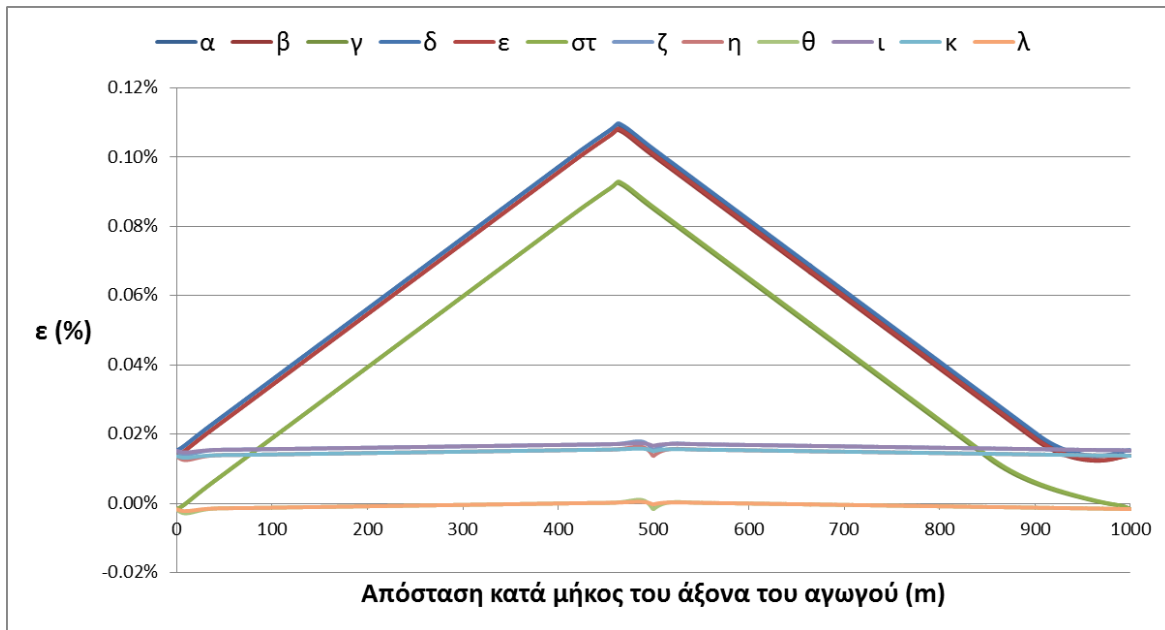
Τα αποτελέσματα καθώς και τα συμπεράσματα παρατίθενται στην συνέχεια.



**Διάγραμμα 6.8:** Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που βρίσκεται πάνω σε αμμώδη ιζηματογενή στρώση με  $H=50$  m η οποία προκαλείται από διάρρηξη κανονικού ρήγματος για διαφορετικές περιπτώσεις  $\theta$  και  $h$ : α)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m, β)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m, γ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m, δ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m, ε)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m, στ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m

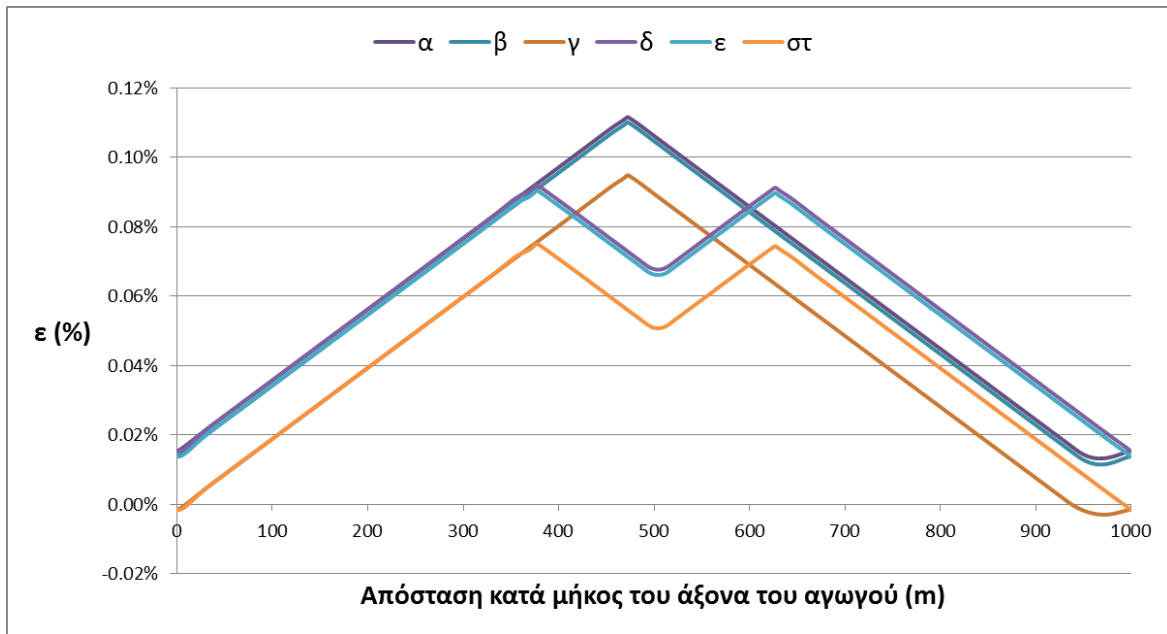
Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνεται ότι στις περιπτώσεις όπου το βάθος που βρίσκεται ο αγωγός είναι 10 m και 100 m ανεξαρτήτως γωνίας διάρρηξης του ρήγματος (και στις  $30^\circ$  αλλά και στις  $60^\circ$  παρουσιάζεται η ίδια συμπεριφορά στο ίδιο βάθος) η αξονική παραμόρφωση του αγωγού είναι της τάξης του 0.11% ενώ στα 1000 m είναι της τάξης του 0.09%. Οι διαφορές που παρουσιάζονται μεταξύ των διαφορετικών γωνιών διάρρηξης του ρήγματος είναι πάρα πολύ μικρές και εδώ θεωρούνται αμελητέες. Φαίνεται να παίζει ρόλο το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο αγωγός και συγκεκριμένα η διαφορά στην

αξονική παραμόρφωση εντοπίζεται στα 1000 m σε ένα αρκετά μεγάλο βάθος. Όλες οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται στα 500 m απ' αρχής. Και πάλι οι παραμορφώσεις είναι πολύ μικρές προκειμένου να προκαλέσουν αστοχία στο αγωγό.



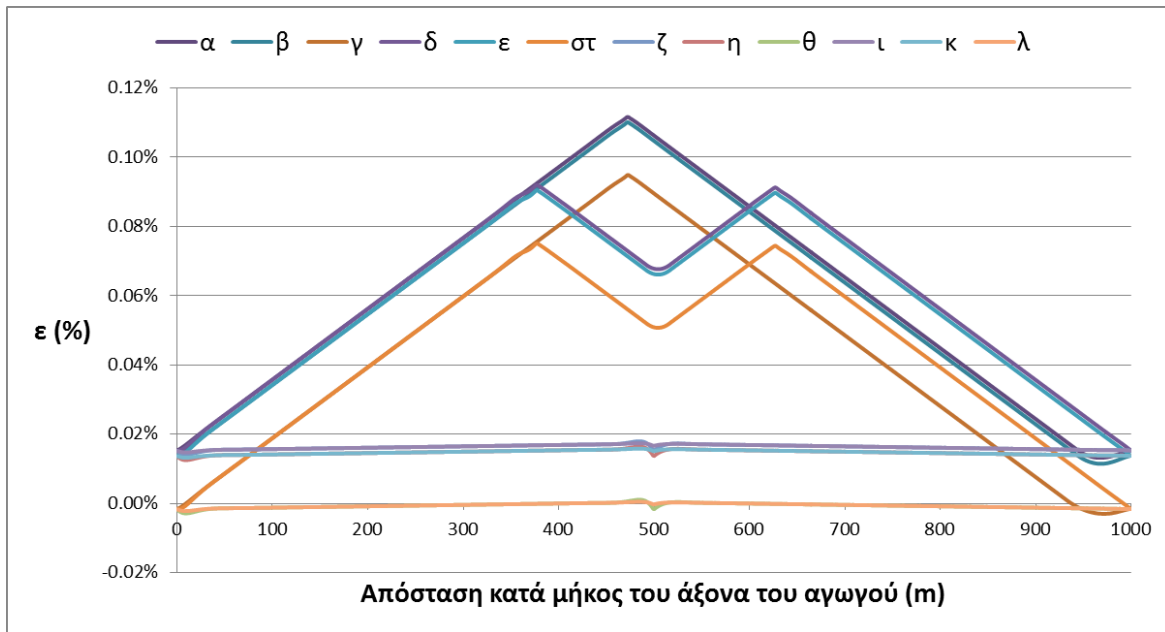
**Διάγραμμα 6.9:** Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που βρίσκεται πάνω σε αμμώδη ιζηματογενή στρώση με  $H=50$  m λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος σε σύγκριση με την αξονική παραμόρφωση του αγωγού σε απευθείας επαφή με το ρήγμα (αμμώδη ελατήρια) για διαφορετικές περιπτώσεις  $\theta$  και  $h$ : α)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m (ύπαρξη στρώσης), β)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m (ύπαρξη στρώσης), γ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m (ύπαρξη στρώσης), δ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m (ύπαρξη στρώσης), ε)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m (ύπαρξη στρώσης), στ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m (ύπαρξη στρώσης), ζ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m (απευθείας επαφή), η)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m (απευθείας επαφή), θ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m (απευθείας επαφή), ι)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m (απευθείας επαφή), κ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m (απευθείας επαφή), λ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m (απευθείας επαφή)

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η ύπαρξη αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης δημιουργεί μεγαλύτερη αξονική παραμόρφωση στον αγωγό σε σχέση με την άλλη περίπτωση όπου ο αγωγός έχει άμεση επαφή με το ρήγμα. Πιο συγκεκριμένα η διαφορά σε όλα τα βάθη όπου βρίσκεται ο αγωγός είναι της τάξης του 0.10% και στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει η εδαφική στρώση οι παραμορφώσεις τείνουν στο μηδέν. Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι το βάθος όπου βρίσκεται αγωγός παίζει ρόλο στην αξονική παραμόρφωση σε σχέση με την γωνία διάρρηξης του ρήγματος όπου εδώ φαίνεται να μην παίζει κανένα ρόλο λόγω των πάρα πολύ μικρών διαφοροποιήσεων αλλά τον καθοριστικότερο ρόλο παίζει η ύπαρξη της ιζηματογενούς στρώσης. Σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση δηλαδή με την αργιλική ιζηματογενή στρώση βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα είναι αντίθετα. Άρα ένα σημαντικό συμπέρασμα που εξάγεται εδώ είναι ότι παίζει καθοριστικό ρόλο η τιμή των εδαφικών ελατηρίων όπως προαναφέρθηκε.



**Διάγραμμα 6.10:** Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που βρίσκεται πάνω σε αμμώδη ιζηματογενή στρώση με  $H=150\text{ m}$  λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος σε σύγκριση με την αξονική παραμόρφωση του αγωγού σε απευθείας επαφή με το ρήγμα (αμμώδη ελατήρια) για διαφορετικές περιπτώσεις  $\theta$  και  $h$ : α)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10\text{ m}$ , β)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100\text{ m}$ , γ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000\text{ m}$ , δ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10\text{ m}$ , ε)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100\text{ m}$ , στ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000\text{ m}$

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι για πάχος αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης 150 m η αξονική παραμόρφωση του αγωγού που προκαλείται λόγω διάρρηξης ρήγματος που βρίσκεται κάτω από την στρώση στα 10 m και 100 m βάθος όπου βρίσκεται ο αγωγός είναι της τάξης του 0,11% για  $60^\circ$  και 0,09% για  $30^\circ$  ενώ για 1000 m βάθος 0,09% για  $60^\circ$  και 0,07% για  $30^\circ$ . Το συμπέρασμα εδώ είναι ότι όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι και εδώ στα πολύ μεγάλα βάθη και συγκεκριμένα στα 1000 m η αξονική παραμόρφωση μειώνεται αισθητά σε όλες τις περιπτώσεις. Εδώ παράλληλα παρατηρείται ότι η γωνία διάρρηξης του ρήγματος παίζει και αυτή το ρόλο της αφού παρατηρούνται διαφοροποιήσεις μεταξύ των γωνιών  $30^\circ$  και  $60^\circ$  σε κάθε βάθος όπου βρίσκεται ο αγωγός με μεγάλη διαφορά στο εύρος των μέγιστων παραμορφώσεων. Και πάλι όλες οι μέγιστες αξονικές παραμορφώσεις παρατηρούνται στα 500 m περίπου απ' αρχής. Φαίνεται ότι με την αύξηση του πάχους της στρώσης σε σχέση με το διάγραμμα 6.8 επηρεάζει τις παραμορφώσεις και η γωνία διάρρηξης του ρήγματος άρα αναλόγως το πάχος της στρώσης (μικρό ή μεγάλο) έχουμε και την ανάλογη επίδραση της γωνίας (όσο αυξάνεται το πάχος τόσο πιο πολύ επηρεάζει η γωνία διάρρηξης του ρήγματος και αυτό φαίνεται ότι όσο πιο μεγάλη θα είναι η γωνία αυτή σε μεγάλα πάχη τόσο πιο έντονη παραμόρφωση θα παρατηρείται).



**Διάγραμμα 6.11:** Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που βρίσκεται πάνω σε αμμώδη ιζηματογενή στρώση με  $H=150$  m λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος σε σύγκριση με την αξονική παραμόρφωση του αγωγού σε απευθείας επαφή με το ρήγμα (αμμώδη ελατήρια) για διαφορετικές περιπτώσεις  $\theta$  και  $h$ : α)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m (ύπαρξη στρώσης), β)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m (ύπαρξη στρώσης), γ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m (ύπαρξη στρώσης), δ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m (ύπαρξη στρώσης), ε)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m (ύπαρξη στρώσης), στ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m (ύπαρξη στρώσης), ζ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m (απευθείας επαφή), η)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m (απευθείας επαφή), θ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m (απευθείας επαφή), ι)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m (απευθείας επαφή), κ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m (απευθείας επαφή), λ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m (απευθείας επαφή)

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η ύπαρξη αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης δημιουργεί μεγαλύτερη αξονική παραμόρφωση στον αγωγό σε σχέση με την άλλη περίπτωση όπου ο αγωγός έχει άμεση επαφή με το ρήγμα. Πιο συγκεκριμένα η διαφορά σε όλα τα βάθη όπου βρίσκεται ο αγωγός είναι της τάξης του 0.10% περίπου και στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει η εδαφική στρώση οι παραμορφώσεις τείνουν στο μηδέν. Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι το βάθος όπου βρίσκεται αγωγός παίζει μεγάλο ρόλο στην αξονική παραμόρφωση αλλά και η γωνία διάρρηξης του ρήγματος όπου για μεγάλο πάχος ιζηματογενούς στρώσης φαίνεται να παίζει κάποιο ρόλο λόγω των διαφοροποιήσεων που παρατηρούνται αλλά τον καθοριστικότερο ρόλο παίζει η ύπαρξη της ιζηματογενούς στρώσης. Σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση δηλαδή με την αργιλική ιζηματογενή στρώση (διάγραμμα 6.7) βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα είναι αντίθετα και σε αυτό το πάχος ιζηματογενούς στρώσης (150 m). Άρα το συμπέρασμα που και πάλι εξάγεται εδώ είναι ότι παίζει ρόλο τόσο η ύπαρξη της στρώσης όσο και τα εδαφικά ελατήρια.



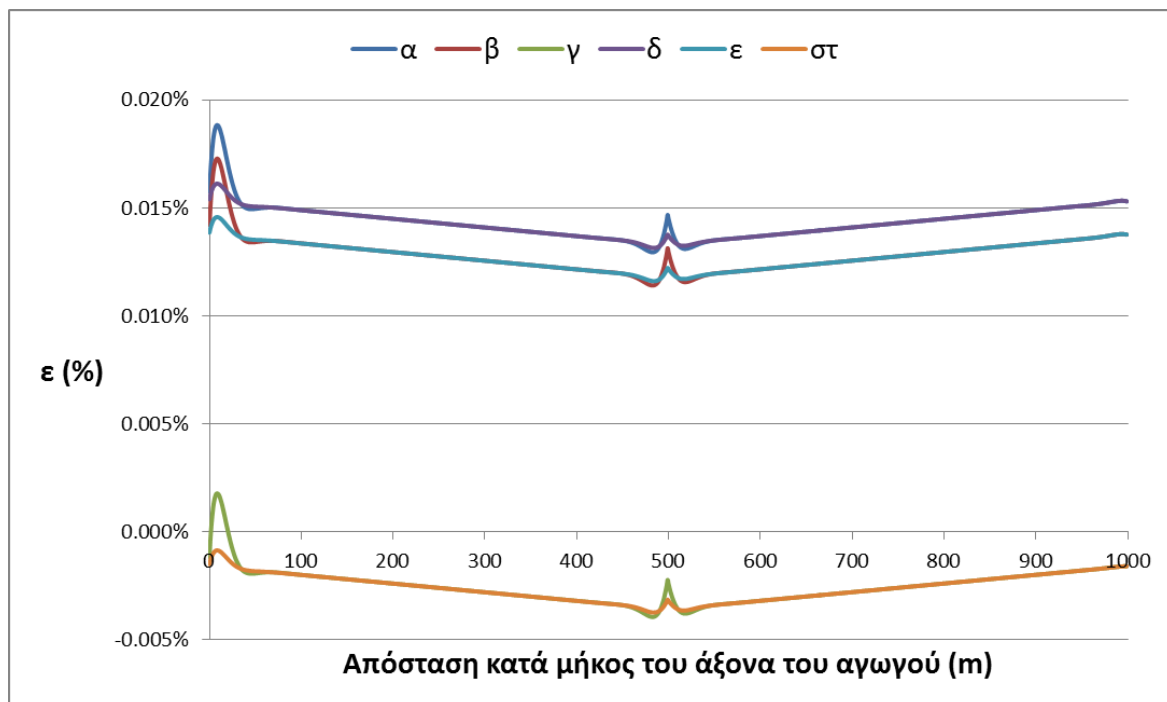
## 6.6 Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων υποθαλασσίου αγωγού που βρίσκεται σε απευθείας επαφή με ανάστροφο σεισμικό ρήγμα

Στο παρόν υποκεφάλαιο εξετάζεται ο αγωγός όταν αυτός θεωρείται ότι βρίσκεται σε απευθείας επαφή με κανονικό ρήγμα, αγνοώντας ουσιαστικά την επίδραση της αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης που παρεμβάλλεται μεταξύ αγωγού και ρήγματος, αλλά λαμβάνοντας υπόψη τα εδαφικά αμμώδη ελατήρια αλλά και η περίπτωση όπου ο αγωγός βρίσκεται πάνω σε αμμώδη ιζηματογενή στρώση η οποία βρίσκεται πάνω σε ανάστροφο ρήγμα.

Συνεπώς, οι παράμετροι που εξετάζονται είναι:

- α) η γωνία διάρρηξης  $\theta$  του ρήγματος ( $30^\circ$  και  $60^\circ$ )
- β) το βάθος  $h$  του αγωγού από την επιφάνεια της θάλασσας (10 m, 100 m και 1000 m)
- γ) το πάχος της ιζηματογενούς στρώσης (50 m και 150 m)

Τα αποτελέσματα καθώς και τα συμπεράσματα παρατίθενται στην συνέχεια.

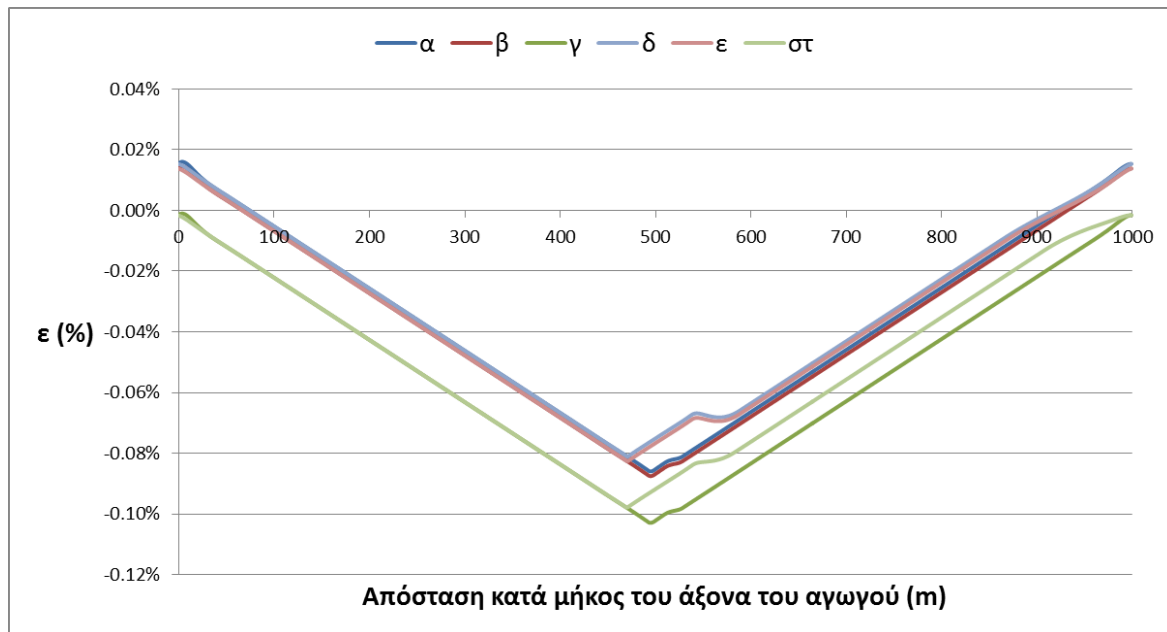


**Διάγραμμα 6.12:** Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που βρίσκεται σε απευθείας επαφή με ανάστροφο ρήγμα (αμμώδη ελατήρια) για διαφορετικές περιπτώσεις  $\theta$  και  $h$ : α)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m, β)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m, γ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m, δ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m, ε)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m, στ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m

Παρατηρείται ότι μέγιστες αξονικές παραμορφώσεις είναι στα 500 m απ' αρχής με τιμές 0.015% στις  $30^\circ$  γωνίας διάρρηξης ρήγματος και 0.013% για  $60^\circ$  περίπου για τις περιπτώσεις όπου το βάθος όπου βρίσκεται ο αγωγός είναι στα 10 και 100 m από την

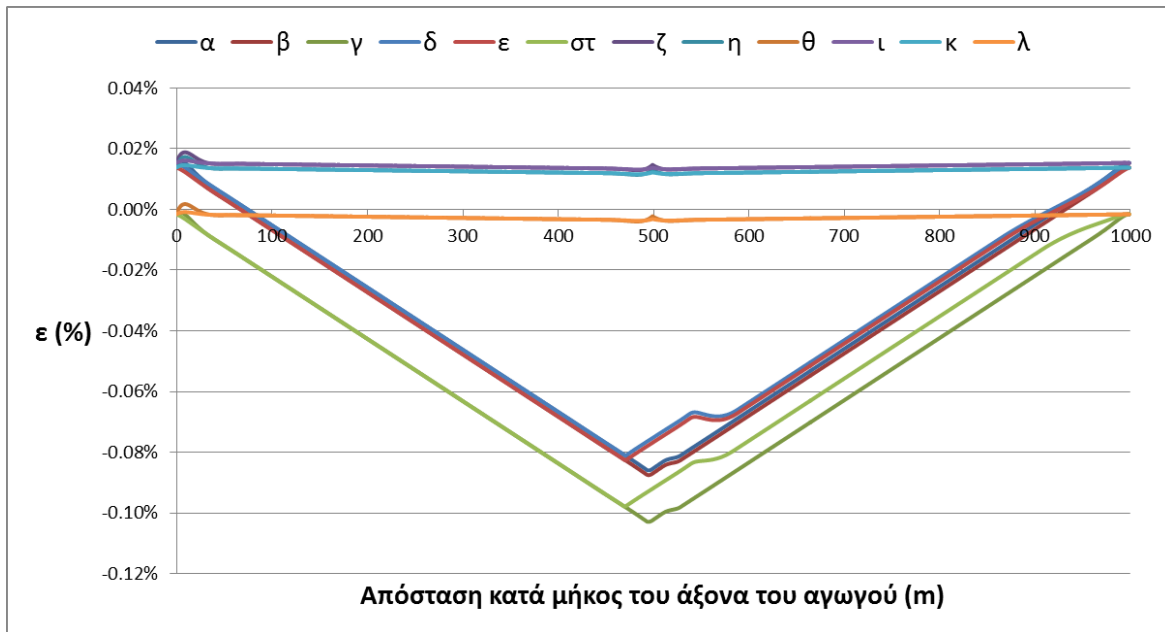


επιφάνεια της θάλασσας ενώ στην περίπτωση των 1000 m είναι στο 0.002%. Φαίνεται ότι στην περίπτωση των αμμωδών ελατηρίων δεν παίζει σημαντικό ρόλο η γωνία διάρρηξης του ρήγματος παρά μόνο το βάθος όπου βρίσκεται ο αγωγός αφού και για 30° αλλά και για 60° τα διαγράμματα που εξήχθησαν για την ίδια υδροστατική πίεση έχουν αμελητέες διαφοροποιήσεις. Επίσης η διαφορά των αξονικών παραμορφώσεων είναι μόνο στα 1000 m βάθος όπου παρατηρείται αυτή η αισθητή μείωση της. Γενικότερα παρατηρείται ότι σε τέτοια βάθη με αυτό το είδος του ρήγματος η καταπόνηση του αγωγού από την διάρρηξη του είναι αμελητέα.



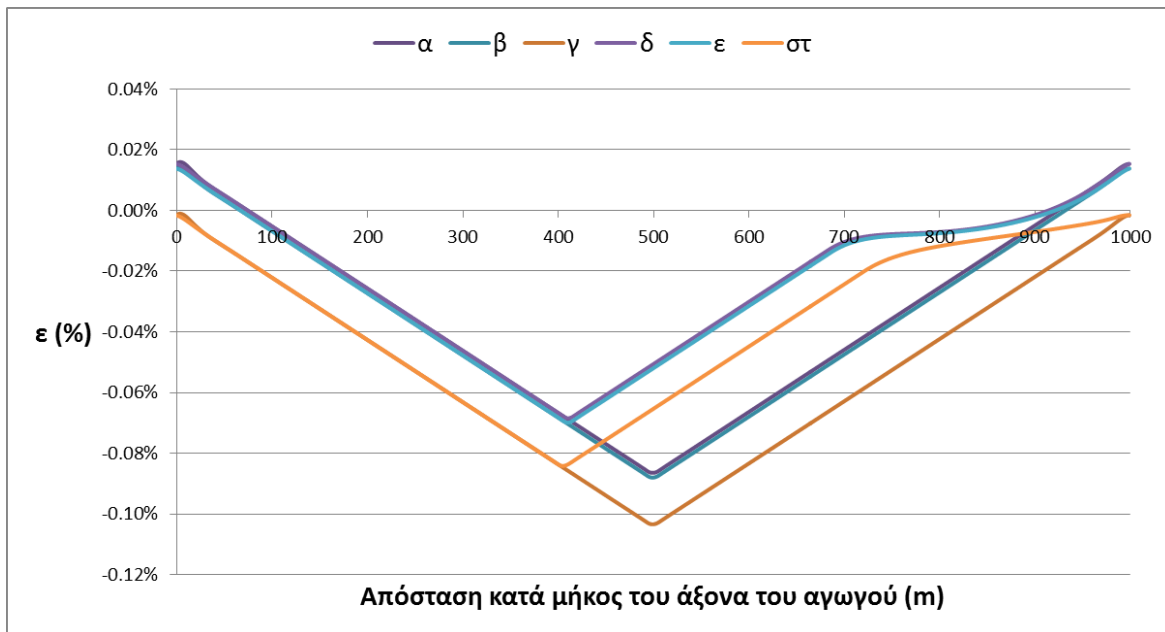
**Διάγραμμα 6.13:** Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που βρίσκεται πάνω σε αμμώδη ιζηματογενή στρώση με  $H=50$  m η οποία προκαλείται από διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος για διαφορετικές περιπτώσεις  $\theta$  και  $h$ : α)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m, β)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m, γ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m, δ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m, ε)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m, στ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m

Από το διάγραμμα 6.13 συμπεραίνεται ότι στις περιπτώσεις όπου το βάθος που βρίσκεται ο αγωγός είναι 10 m και 100 m ανεξαρτήτως γωνίας διάρρηξης του ρήγματος η αξονική παραμόρφωση του αγωγού είναι της τάξης του 0.08% ενώ στα 1000 m είναι της τάξης του 0.11%. Οι διαφορές που παρουσιάζονται μεταξύ των διαφορετικών γωνιών διάρρηξης του ρήγματος είναι πάρα πολύ μικρές και εδώ θεωρούνται αμελητέες. Φαίνεται να παίζει ρόλο το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο αγωγός και συγκεκριμένα η διαφορά στην αξονική παραμόρφωση εντοπίζεται στα 1000 m σε ένα αρκετά μεγάλο βάθος. Όλες οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται στα 500 m απ' αρχής. Και πάλι οι παραμορφώσεις είναι πολύ μικρές προκειμένου να προκαλέσουν αστοχία στο αγωγό. Εδώ σε σχέση με το κανονικό ρήγμα (διάγραμμα 6.8) η τιμή της αξονικής παραμόρφωσης σε πολύ μεγάλα βάθη αυξάνεται σε σχέση με το κανονικό όπου παρατηρείται το αντίθετο (μειώνεται).



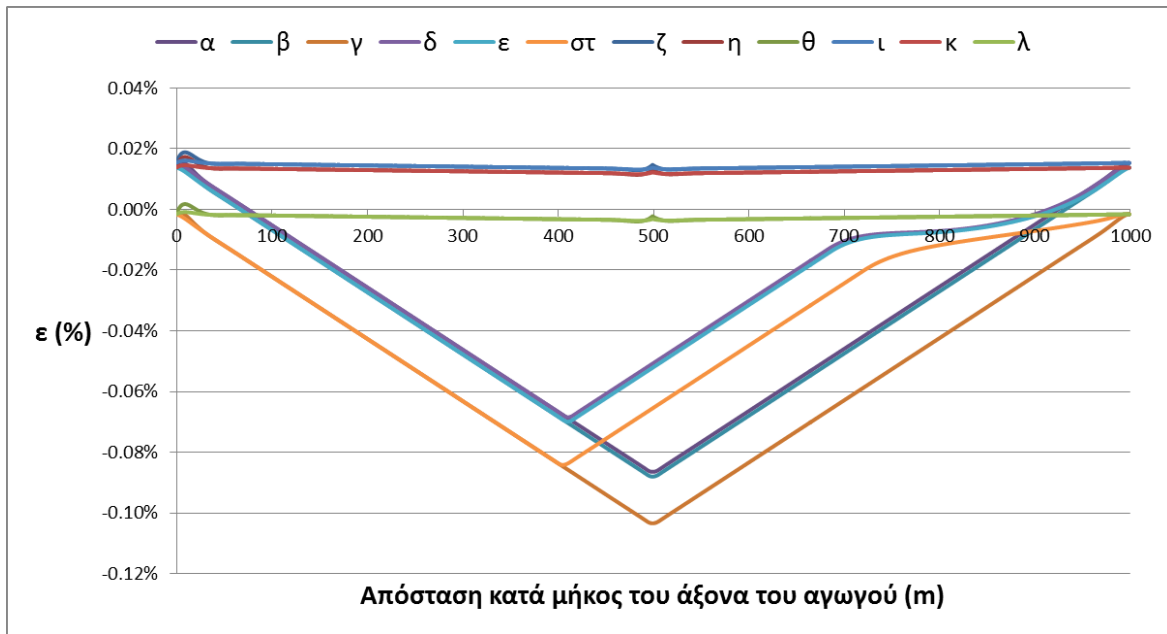
**Διάγραμμα 6.14:** Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος υποθαλάσσιου αγωγού που βρίσκεται πάνω σε αμμώδη ιζηματογενή στρώση με  $H=50$  m λόγω διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος σε σύγκριση με την αξονική παραμόρφωση του αγωγού σε απευθείας επαφή με το ρήγμα (αμμώδη ελατήρια) για διαφορετικές περιπτώσεις  $\theta$  και  $h$ : α)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m (ύπαρξη στρώσης), β)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m (ύπαρξη στρώσης), γ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m (ύπαρξη στρώσης), δ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m (ύπαρξη στρώσης), ε)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m (ύπαρξη στρώσης), στ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m (ύπαρξη στρώσης), ζ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m (απευθείας επαφή), η)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m (απευθείας επαφή), θ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m (απευθείας επαφή), ι)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m (απευθείας επαφή), κ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m (απευθείας επαφή), λ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m (απευθείας επαφή)

Στην συνέχεια σύμφωνα με το διάγραμμα 6.14 παρατηρείται ότι η ύπαρξη αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης δημιουργεί μεγαλύτερη αξονική παραμόρφωση στον αγωγό σε σχέση με την άλλη περίπτωση όπου ο αγωγός έχει άμεση επαφή με το ρήγμα. Πιο συγκεκριμένα η διαφορά σε όλα τα βάθη όπου βρίσκεται ο αγωγός είναι της τάξης του 0.10% περίπου ενώ στην άλλη περίπτωση οι παραμορφώσεις τείνουν στο μηδέν. Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι το βάθος όπου βρίσκεται αγωγός παίζει ρόλο στην αξονική παραμόρφωση σε σχέση με την γωνία διάρρηξης του ρήγματος όπου εδώ φαίνεται να μην παίζει κανένα ρόλο, αλλά τον καθοριστικότερο ρόλο παίζει η ύπαρξη της ιζηματογενούς στρώσης. Παρόμοια φαίνονται να είναι τα συμπεράσματα με την περίπτωση του κανονικού ρήγματος (Διάγραμμα 6.9).



**Διάγραμμα 6.15:** Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος υποθαλάσσιου αγωγού που βρίσκεται πάνω σε αμμώδη ιζηματογενή στρώση με  $H=150$  m η οποία προκαλείται από διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος για διαφορετικές περιπτώσεις  $\theta$  και  $h$ : α)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10$  m, β)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100$  m, γ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000$  m, δ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10$  m, ε)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100$  m, στ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000$  m

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι για πάχος αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης 150 m η αξονική παραμόρφωση του αγωγού που προκαλείται λόγω διάρρηξης ρήγματος που βρίσκεται κάτω από την στρώση στα 10 m και 100 m βάθος όπου βρίσκεται ο αγωγός είναι της τάξης του 0.09% για  $30^\circ$  και 0.07% για  $60^\circ$  ενώ για 1000 m βάθος 0.10% για  $30^\circ$  και 0.08% για  $60^\circ$ . Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το βάθος που βρίσκεται ο αγωγός και στην περίπτωση διάρρηξης ρήγματος  $30^\circ$  αλλά και στις  $60^\circ$  η αξονική παραμόρφωση αυξάνεται κάτι που έρχεται να αντιτεθεί με το κανονικό ρήγμα όπου μειώνεται (Διάγραμμα 6.10). Επίσης βλέπουμε ότι η γωνία διάρρηξης του ρήγματος παίζει ρόλο στην παραμόρφωση αφού όσο αυξάνεται (από  $30^\circ$  σε  $60^\circ$ ) μειώνεται η αξονική παραμόρφωση (εδώ παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με το κανονικό ρήγμα αφού σύμφωνα με το διάγραμμα 6.10 συμβαίνει το ίδιο για μεγαλύτερη γωνία διάρρηξης του ρήγματος). Τέλος οι μέγιστες αξονικές παραμορφώσεις στις  $30^\circ$  γωνίας διάρρηξης ρήγματος παρατηρούνται στα 500 m ενώ για  $60^\circ$  στα 350 m. Φαίνεται ότι και πάλι οι παραμορφώσεις δεν είναι ανησυχητικές για αστοχία του αγωγού.



**Διάγραμμα 6.16:** Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος υποθαλάσσιου αγωγού που βρίσκεται πάνω σε αμμώδη ιζηματογενή στρώση με  $H=150\text{ m}$  λόγω διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος σε σύγκριση με την αξονική παραμόρφωση του αγωγού σε απευθείας επαφή με το ρήγμα (αμμώδη ελατήρια) για διαφορετικές περιπτώσεις  $\theta$  και  $h$ : α)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10\text{ m}$  (ύπαρξη στρώσης), β)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100\text{ m}$  (ύπαρξη στρώσης), γ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000\text{ m}$  (ύπαρξη στρώσης), δ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10\text{ m}$  (ύπαρξη στρώσης), ε)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100\text{ m}$  (ύπαρξη στρώσης), στ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000\text{ m}$  (ύπαρξη στρώσης), ζ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=10\text{ m}$  (απευθείας επαφή), η)  $\theta=30^\circ$  για  $h=100\text{ m}$  (απευθείας επαφή), θ)  $\theta=30^\circ$  για  $h=1000\text{ m}$  (απευθείας επαφή), ι)  $\theta=60^\circ$  για  $h=10\text{ m}$  (απευθείας επαφή), κ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=100\text{ m}$  (απευθείας επαφή), λ)  $\theta=60^\circ$  για  $h=1000\text{ m}$  (απευθείας επαφή)

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η ύπαρξη αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης δημιουργεί μεγαλύτερη αξονική παραμόρφωση στον αγωγό σε σχέση με την άλλη περίπτωση όπου ο αγωγός έχει άμεση επαφή με το ρήγμα. Πιο συγκεκριμένα η διαφορά σε όλα τα βάθη όπου βρίσκεται ο αγωγός είναι της τάξης του 0.10% περίπου και στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει η εδαφική στρώση οι παραμορφώσεις τείνουν στο μηδέν. Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι το βάθος όπου βρίσκεται αγωγός παίζει μεγάλο ρόλο στην αξονική παραμόρφωση και συγκεκριμένα τα πολύ μεγάλα βάθη όπου όσο αυξάνονται τόσο μεγαλύτερες παραμορφώσεις εμφανίζονται. Επιπλέον παίζει ρόλο και η γωνία διάρρηξης του ρήγματος λόγω των αισθητών διαφοροποιήσεων που παρατηρούνται και όπως παρατηρείται και από το διάγραμμα 6.13 όσο αυξάνεται το πάχος της ιζηματογενούς στρώσης τόσο μεγαλύτερη είναι και η επιρροή της γωνίας διάρρηξης του ρήγματος.



## Συμπεράσματα και προτάσεις για έρευνα

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα διπλωματική εργασία είναι τα εξής:

- Η κατασκευή υποθαλάσσιων αγωγών αποτελεί επιτακτική ανάγκη σήμερα, ενώ πρόκειται να κατασκευαστούν περισσότεροι αγωγοί στο εγγύς μέλλον.
- Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία υποθαλάσσιων αγωγών είναι οι γεωκίνδυνοι.
- Καθώς η Μεσόγειος είναι μία από τις πλέον σεισμογενείς περιοχές παγκοσμίως, χαρακτηρίζεται από ποικίλους γεωκινδύνους, μεταξύ των οποίων τα ενεργά σεισμικά ρήγματα.
- Με βάση τη βιβλιογραφία και τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, η παρουσία ιζηματογενών στρώσεων επηρεάζει την διάρρηξη ενός ρήγματος και κατ' επέκταση καθορίζει τις μόνιμες παραμορφώσεις στον πυθμένα της θάλασσας. Πιο συγκεκριμένα:
  - ❖ Τα κανονικά ρήγματα έχουν διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τα ανάστροφα ρήγματα.
  - ❖ Το πάχος των ιζηματογενών στρώσεων αποτελεί σημαντική παράμετρο, καθώς, όσο αυτό αυξάνεται, οι εδαφικές παραμορφώσεις στην επιφάνειά τους μειώνονται.
  - ❖ Η γωνία διάρρηξης (και για τα κανονικά, αλλά και για τα ανάστροφα ρήγματα) παίζει δευτερεύοντα ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα, δηλαδή δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τις εδαφικές παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης.
  - ❖ Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών των ιζηματογενών στρώσεων είναι σημαντικές παράμετροι καθώς η άργιλος σε σχέση με την άμμο παρουσιάζει αρκετά διαφορετική συμπεριφορά.
- Όσον αφορά την αλληλεπίδραση αγωγού και εδαφικών παραμορφώσεων λόγω διάρρηξης ρήγματος, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι τα εξής:
  - ❖ Τα εδαφικά ελατήρια επηρεάζουν άμεσα και καθοριστικά τις αξονικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε έναν υποθαλάσσιο αγωγό.

- ❖ Η διάρρηξη σεισμικού ρήγματος προκαλεί διαφορετικές αξονικές παραμορφώσεις στον αγωγό όταν αυτός βρίσκεται σε απευθείας επαφή με το ρήγμα σε σχέση με την ύπαρξη ιζηματογενούς στρώσης μεταξύ αγωγού και ρήγματος. Η διαφορά εξαρτάται σημαντικά από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών της ιζηματογενούς στρώσης.
- ❖ Διερευνήθηκε ο ρόλος της εξωτερικής υδροστατικής πίεσης για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις βάθους (10m, 100m, 1000m). Στην περίπτωση του μεγάλου βάθους παρατηρείται αισθητή μείωση της αξονικής παραμόρφωσης του αγωγού λόγω της ουσιαστικής εξισορρόπησης εσωτερικής και εξωτερικής πίεσης.
- ❖ Στην περίπτωση όπου εξετάζεται ο αγωγός όταν αυτός θεωρείται ότι βρίσκεται σε απευθείας επαφή με κανονικό ή και ανάστροφο ρήγμα, αγνοώντας ουσιαστικά την επίδραση της αμμώδους ιζηματογενούς στρώσης που παρεμβάλλεται μεταξύ αγωγού και ρήγματος, αλλά λαμβάνοντας υπόψη τα εδαφικά αμμώδη ελατήρια οι αξονικές παραμορφώσεις τείνουν στο μηδέν. Αυτό οφείλεται στις πολύ μικρές τιμές των αξονικών και κατακόρυφων ελατηρίων που προέκυψαν για τα εδαφικά αμμώδη ελατήρια.
- ❖ Η γωνία διάρρηξης του ρήγματος και σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζει πολύ μικρές διαφοροποιήσεις που για την αξονική παραμόρφωση του αγωγού θεωρούνται αμελητέες.

Με βάση τα προαναφερθέντα, οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα είναι οι παρακάτω:

- Προσπάθεια βελτίωσης της αξιοπιστίας των εδαφικών ελατηρίων για τους υποθαλάσσιους αγωγούς μέσω πειραματικών και αριθμητικών προσομοιώσεων.
- Δημιουργία κανονισμού για εδαφικά ελατήρια που αφορούν αποκλειστικά υποθαλάσσιους αγωγούς.
- Πραγματοποίηση παραμετρικής ανάλυσης υποθαλάσσιου αγωγού σε περίπτωση όπου αυτός βρεθεί υπό μηδενική εσωτερική πίεση για οποιοδήποτε λόγο.
- Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ρήγματος και αγωγού σε τρεις διαστάσεις και πραγματοποίηση της αντίστοιχης παραμετρικής ανάλυσης και για οριζοντιολισθητικό ρήγμα.

## Βιβλιογραφία

1. Ambraseys, N. & Jackson, J., (1984), *Seismic Movements, Ground Movements and their Effects on Structures*, Ed. P. B. Attewell and R.K. Taylor, New York: *Surrey University Press*, pp. 353-380.
2. Akhmetkaliyeva, S. (2015), *General Environmental Impacts of Subsea Pipelines*  
Διαθέσιμο στο:  
[http://eurasianresearch.org/en/research/comments/environment/general\\_environmental\\_impacts-subsea-pipelines](http://eurasianresearch.org/en/research/comments/environment/general_environmental_impacts-subsea-pipelines)
3. Alexander' s gas and oil connections, (2005). *Nigeria and Algeria begin study of \$ 6 bn Trans-Saharan gas, pipeline*. Διαθέσιμο στο:  
<http://www.gasandoil.com/news/africa/f7d252f5abd5d7f074fdfa90f5c34467>
4. Barka A. and Reilinger R., (1997). *Active tectonics of the Eastern Mediterranean region:deduced from GPS, neotectonic and seismicity data*, *Annali di Geofisica*, Vol. XL, N. 3,
5. Binniyat, Luka (2008). *14tcf of gas reserved for Trans-Sahara gas pipeline*. *Vanguard*
6. Bray, J. D., R. B. Seed, L. S. Cluff and H. B. Seed (1994). *Earthquake Fault Rupture Propagation through Soil*, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 120(3), 543- 561.
7. Bruschi R, L. Vitali, E. Torselletti and D. Zenobi, (2008). *Langeled: Pipe Capacity vs. Wall Thickness Selection, The International Society of Offshore and Polar Engineers* Vol. 18, No. 3, September 2008, pp. 188–195.
8. Bryn, P. και συν., 1999β. *Slope stability in deep water areas off mid Norway*. Houston, Texas, s.n.
9. Bugge, T., Belderson, R. & Kenyon, N., 1998α. *The Storrega slide*. *Phil. Trans. Royal Soc.*, 325(1586), p. 357–388.
10. Dean, E.T.R. (2010). *Offshore Geotechnical Engineering - Principles and Practice*, Thomas Telford, Reston, VA, U.S.A., p.520
11. Duncan, J.M., and Lefebvre, G., (1973), *Earth Pressure on Structures Due to Fault Movement*, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE*, Vol. 99, pp. 1153-1163
12. Fabi, R. (2009). *Nigeria, Algeria agree to build Sahara gas link*. Reuters
13. Gerwick, B.C. (2007). *Construction of marine and offshore structures*. CRC Press, New York



14. Harrison W. R., (2008), *A Model for the Plate Tectonic Evolution of the Eastern Mediterranean Region that Emphasizes the Role of Transform (Strike-Slip) Structures*, U.S. Geological Survey
15. Kvalstad, T., 2007. What is current “Best Practice” in offshore geohazard investigations? A state-of-the-art review. Houston, Texas, s.n.
16. Mark H. (2004). *Algerian Gas to Europe: The Transmed Pipeline and Early Spanish Gas Import Projects. Geopolitics of Natural Gas Study*. Stanford University: Program on Energy and Sustainable Development
17. Harris P. ( 2016), Chapter 21. *Offshore Hydrocarbon Industries*, United Nations [http://www.un.org/depts/los/global\\_reporting/WOA\\_RPROC/Chapter\\_21.pdf](http://www.un.org/depts/los/global_reporting/WOA_RPROC/Chapter_21.pdf)
18. Palmer A. C. & King R. A. (2008). *Subsea Pipeline Engineering* (2nd ed.). Tulsa, USA: Pennwell,
19. PUB (Singapore Public Utilities Board) (2014). *The Singapore Water Story Water: From Vulnerability to Strength*. <http://www.pub.gov.sg/water/Pages/singaporewaterstory.aspx>
20. Simcock & J. Wang, (2016). Chapter 19. *Submarine Cables and Pipelines, United Nations Available at:* [http://www.un.org/depts/los/global\\_reporting/WOA\\_RPROC/Chapter\\_19.pdf](http://www.un.org/depts/los/global_reporting/WOA_RPROC/Chapter_19.pdf)
21. Simcock & J. Wang, (2016). Chapter 24. *Solid Waste Disposal United Nations* [http://www.un.org/depts/los/global\\_reporting/WOA\\_RPROC/Chapter\\_24.pdf](http://www.un.org/depts/los/global_reporting/WOA_RPROC/Chapter_24.pdf)
22. Glenn Simonelli, *γγ* Tectonics of the Aegean/Anatolian region, Indiana University
23. Taymaz T., Yilmaz Y., Dilek Y, (2007), The geodynamics of the Aegean and Anatolia: introduction, Department of Geology, Miami University, Oxford, OH 45056, USA
24. Tricarico, A. (2001). *The Blue Stream – Black Sea gas pipeline project*. ECA Watch: International NGO Campaign on Export Credit Agencies.
25. UNESCO (1991). United Nations Education Scientific and Cultural Organization,
26. Hydrology and Water Resources of Small Islands, A Practical Guide. Studies and Reports on Hydrology No. 49, UNESCO, Paris.
27. Williams, T. (2012). Pipelines: Environmental considerations. Parliament of Canada
28. Slaughter (2009). *Pipeline & Specialty Services (P&SS) Mark Slaughter Global Product Line Manager A Pipeline Inspection Case Study: Design Improvements on a New Generation UT In-line Inspection Crack Tool* Weatherford. Διαθέσιμο στο: <http://www.ppsa-online.com/papers/12-Aberdeen/2012-01-Weatherford-slides.pdf>

29. BBC (2009), *Sahara gas pipeline gets go-ahead*. Διαθέσιμο στο:  
<http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/8132823.stm>
30. Edison, (2007). *GALSI PROJECT THE NEW ROUTE FOR ALGERIAN GAS TO ITALY AND EUROPE*, Διαθέσιμο στο  
<http://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Presentations/CBP-Galsi.pdf>
31. Medgaz pipeline, (2011). Διαθέσιμο στο <http://9f50f0311489b2d45830-9c9791daf6b214d0c0094462a66ea80c.r0.cf3.rackcdn.com/Medgaz-pipeline.pdf>
32. USGS, (2016). *Geology and national parks* Διαθέσιμο στο  
<https://geomaps.wr.usgs.gov/parks/deform/ghangft.html>
33. GNS Science *Different-types-of-Faults*. Διαθέσιμο στο  
<https://www.gns.cri.nz/gns/Home/Learning/Science-Topics/Earthquakes/Earthquakes-and-Faults/Different-types-of-Faults>
34. Countries of the world, (2008). *Europe Pipelines map - Crude Oil (petroleum) pipelines - Natural Gas pipelines - Products pipelines*. Διαθέσιμο στο:  
[http://www.theodora.com/pipelines/europe\\_oil\\_gas\\_and\\_products\\_pipelines.html](http://www.theodora.com/pipelines/europe_oil_gas_and_products_pipelines.html)
35. Africa progress panel, (2013). *A shared agenda for change could transform Africa's future*. Διαθέσιμο στο: <http://www.gasandoil.com/news/africa>
36. Camerlenghi, A., Urgelers, R., & Fantoni L (2010 )- *A database on submarine landslides of the Mediterranean Sea*. In: DC Mosher, L Moscardelli, RC Shipp, JD Chaytor, CDP Baxter, HJ Lee, R Urgeles (eds)- *Submarine mass movements and their consequences, advances in natural and technological hazards research*. Springer. 28 491–501.
37. Ceramicola S., Caburlotto, A., Coste, M., Cova A, Migeon, S., Forlin, E. Praeg, D., Diviacco, P., Cotterle, D., Romeo, R., Facchin, L., Civile, D., Ramella, R., Critelli, S. & Chiocci, F. L. (2010). - *Seabed features in relation to geohazards on the Ionian Calabrian margin: results from the MAGIC Project*. IN: 39TH CIESM CONGRESS. ISSN: 0373-434X
38. Dominey-Howes, D., Papadopoulos, G.A. & Dawson, A.G. (2000). *Geological and historical investigation of the 1650 Mt. Columbo (Thera Island) eruption and tsunami, Aegean Sea, Greece*, Nat. Hazards, 21, 83-96.
39. Hayes, Mark H. (2004). *Algerian Gas to Europe: The Transmed Pipeline and Early Spanish Gas Import Projects. Geopolitics of Natural Gas Study*. Stanford University: Program on Energy and Sustainable Development

40. Lade, P.V., and Cole, D.A., Jr. (1984), Multiple failure surfaces over dip-slip faults, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 5, pp. 616-627.
41. Ioualalen, M., Migeon, S. & Sardoux, O., (2010). *Landslide tsunami vulnerability in the Ligurian Sea: case study of the 1979 October 16 Nice international airport submarine landslide and of identified geological mass failures*, *Geophys. J. Int.*, 181(2), 724–740.
42. Papadopoulos, G. A., Daskalaki, E., Fokaefs, A. & Giraleas, N., (2007). *Tsunami Hazard in the Eastern Mediterranean: Strong Earthquakes and Tsunamis in the East Hellenic Arc and Trench System*, *Nat. Hazard Earth Sys. Sc* 7, 57–64.
43. Peter Harris & et al, (2016), Chapter 21. Offshore Hydrocarbon Industries, United Nations [http://www.un.org/depts/los/global\\_reporting/WOA\\_RPROC/Chapter\\_21.pdf](http://www.un.org/depts/los/global_reporting/WOA_RPROC/Chapter_21.pdf)
44. Planinsek P., S. Ceramicola, I. Marson, F. Zaniboni, S. Tinti & G. Pagnoni, D. PRAEG, E. Forlin, E. Colizza, (2011) - *Reconstruction of a submarine landslide and related tsunami from morpho-bathymetry and subbottom data on the Ionian Calabrian margin (Medit. Sea)* The Second World Landslide Forum, Rome, September 2011.
45. Randolph, M. & Gourvenec, S., 2011. *Offshore Geotechnical Engineering*. s.l.:Spon Press.
46. Roth, W.H, Scott, R.F, and Austin, I. (1981), Centrifuge modelling of fault propagation through alluvial soils, *Geophysical Research Letters*, Voi. 8, No. 6, pp. 561-564.
47. Sakellariou, D., Ceramicola, S., De Martini, P. M. & Briand, F., (2011), *Marine geohazards in the Mediterranean: Executive Summary*, CIESM Workshop Monographs No 42
48. Stiros, Stathis C. (2010), *The 8.5+ magnitude, AD365 earthquake in Crete: Coastal uplift, topography changes, archaeological and historical signature*, *Quaternary International*, Volume 216, Issues 1–2, 1 April 2010, Pages 54–63
49. Frank Strozzyk, (2009), *Submarine landslides in active margin environments -Slope stability vs. neotectonic activity on the northeastern margin of Crete, eastern Mediterranean*, Bremen University
50. Stefano Tinti, Alberto Armigliato, Gianluca Pagnoni and Filippo Zaniboni, (2005), *Scenarios of giant tsunamis of tectonic origin in the Mediterranean*, *ISET Journal of Earthquake Technology*, Paper No. 464, Vol. 42, No. 4, pp. 171-188
51. Scott, R.F (1987), *Failure*, *Geotechnique*, Voi. 37, No,4, pp. 423-466.
52. Scott, R.F, and Schoustra, J.J. (1974), *Nuclear power plant sitting on deep alluvium*, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 100, No. GT4, April, pp. 449-459.

53. Roger Urgeles, Angelo Camerlenghi, (2013), Submarine landslides of the Mediterranean Sea: Trigger mechanisms, dynamics, and frequency-magnitude distribution, DOI: 10.1002/2013JF002720, Volume 118, Issue 4
54. Walters, J.V., and Thomas, J.N (1982), Shear Zone Development In Granular Materials, Proceedings of the 4th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics Edomnton, Canada, May 31 - June 4, Vol. I, pp. 263-274.
55. Αναστασόπουλος Ι.Χ., (2005), Διδακτορική Διατριβή: Αλληλεπίδραση Επιφανειακής Διαρρήξεως – Εδάφους –Θεμελίου – Ανωδομής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
56. Σπυράκος, Κ. & Τουτουδάκη, Ε. 2010. Βασικές έννοιες σεισμολογίας, Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Διαθέσιμο στο: [http://lee.civil.ntua.gr/pdf/mathimata/antiseismikes\\_kataskeves/simeioseis/simeioseis\\_ak.pdf](http://lee.civil.ntua.gr/pdf/mathimata/antiseismikes_kataskeves/simeioseis/simeioseis_ak.pdf)
57. Παπαχαρισίου Στ., (2008), *Διπλωματική: Φυσικοί κίνδυνοι- Διαχείριση φυσικών κινδύνων- Εφαρμογή εκτίμησης κατολισθητικής επικινδυνότητας*, Κεφ. 2ο, Σελ: 30-41, Α.Π.Θ.
58. ABAQUS, Users' Manual, Simulia, Providence, RI, USA, 2014.
59. American Lifelines Alliance – ASCE, Guidelines for the design of buried steel pipe, 2001.
60. O'Rourke MJ, Liu X., (2012), Seismic design of buried and offshore pipelines, Monograph Series, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, (MCEER).