

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



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ
ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΕΝΕΡΓΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΝ



ΔΑΦΝΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

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

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της περάτωσης των σπουδών μου στο τμήμα των Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Φθάνοντας λοιπόν στο τέλος της φοίτησης μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους με τους οποίους συνεργάστηκα και οι οποίοι διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο, παρέχοντας αμέριστη βοήθεια, για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας .

Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μαρίνο Καττή και τον κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, οι οποίοι ήταν οι επιβλέποντες καθηγητές της διπλωματικής μου εργασίας. Οι επιστημονικές τους γνώσεις μαζί με την υποδειγματική καθοδήγηση τους σε όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας, βοήθησαν στην καλύτερη δυνατή κατάρτιση του αντικειμένου που επέλεξα και ερεύνησα όλο αυτό το διάστημα. Με την εμπιστοσύνη και την εκτίμηση που έδειξαν στο πρόσωπο μου στάθηκαν αρωγοί στη προσπάθειά μου, μεταλαμπαδεύοντας μου πέρα από γνώσεις δύναμη, όρεξη και φιλοδοξίες για την πορεία μου ως μηχανικός.

Σημαντική, ωστόσο, βοήθεια έλαβα σε θέματα λογισμικού και από ορισμένους συμφοιτητές μου. Για την προθυμία και την συνεισφορά τους θέλω να ευχαριστήσω την κα. Ασπασία Μαλιάγκα και τον κ. Δημήτρη Καραδήμο, οι οποίοι είναι απόφοιτοι της σχολής μας, καθώς και την κα. Κωνσταντίνα Ιωάννου και την κα. Μαριάννα Θεοδωράκη οι οποίες είναι τελειόφοιτες. Τα πρόσωπα αυτά, συντέλεσαν στην δημιουργία ενός ομαδικού κλίματος το οποίο ήταν ευχάριστο και παραγωγικό καθόλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου, που με βοήθησε τόσο στην εισαγωγή μου στη τριτοβάθμια εκπαίδευση και στο επιστημονικό ίδρυμα της επιλογής μου, όσο και κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο παρέχοντας μου ανιδιοτελώς κάθε είδους στήριξη. Πέρα από την οικογένεια μου, στο πλευρό μου βρίσκονταν πάντα φιλικά και συγγενικά πρόσωπα που με στήριζαν και με ενθάρρυναν να συνεχίσω αυτό που κάνω και τους οφείλω επίσης ένα «Ευχαριστώ» .

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	4
Abstract	5
Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή	6
Κεφάλαιο 2^ο: Γεωκίνδυνος	
2.1 Εισαγωγή.....	8
2.2.1 Γενική διάκριση γεωκινδύνων.....	9
2.2.2 Κατηγορίες γεωκινδύνων	10
2.2.3 Διάκριση σε ανθρωπογενούς ή φυσικούς γεωλογικούς κινδύνους	10
2.3.1 Σεισμοί	10
2.3.2 Εκδήλωση του φαινομένου	11
2.3.3 Λιθοσφαιρικές πλάκες - Υπαιτιότητα εκδήλωσης σεισμού	13
2.4.1 Κατολισθήσεις.....	14
2.4.2 Ταξινόμηση κατολισθήσεων	15
2.4.3 Εκδήλωση Κατολίσθησης.....	16
2.4.4 Μέγεθος κατολίσθησης	17
2.5.1 Ηφαίστεια.....	17
2.5.2 Εκδήλωση Ηφαιστειών.....	18
2.5.3 Τύποι Ηφαιστειών	19
2.5.4 Τύποι Μάγματος.....	19
2.6.1 Γεωκίνδυνοι στην Ελλάδα και την Μεσόγειο.....	20
2.6.2 Σεισμική δραστηριότητα στην Ελλάδα και την Μεσόγειο.....	21
2.6.3 Υποθαλάσσιες Κατολισθήσεις	22
2.6.4 Κατολισθήσεις στην Ελλάδα.....	24
2.6.5 Υποθαλάσσια Ηφαίστεια στη Μεσόγειο.....	25
Κεφάλαιο 3^ο: Ενεργά σεισμικά ρήγματα	
3.1 Εισαγωγή.....	28
3.2 Ενεργά σεισμικά Ρήγματα.....	28
3.3 Αναγνώριση ρηγμάτων στην ύπαιθρο.....	29
3.4 Εγγενή χαρακτηριστικά των ρηγμάτων.....	30
3.5 Κατηγοριοποίηση Ρηγμάτων.....	32
3.6 Διάρρηξη ρήγματος	34
3.7 Μορφοτεκτονικές εκφράσεις των ρηγμάτων.....	37
3.8 Συνέπειες της ρηγμάτωσης σε γεωλογικές ή στρωματογραφικές ενότητες.....	38

3.9 Διάδοση ενεργού ρήγματος διάμεσου εδαφικού επιφανειακού στρώματος.....	39
3.10 Τα σημαντικότερα ρήγματα στην Ελλάδα και τη Μεσόγειο.....	41
3.11 Ρήγματα μεταξύ Ξάνθης- Κομοτηνής (F-GR-38, F-GR-39).....	44

Κεφάλαιο 4: Εφαρμογές

4.1 Υπολογιστική προσομοίωση διάρρηξης ενεργού ρήγματος διαμέσου εδαφικής ή ιζηματογενής στρώσης.....	49
4.2 Περιγραφή του προσομοιώματος της εδαφικής ή ιζηματογενής στρώσης.....	49
4.3 Βήματα για την δημιουργία προσομοίωσης στο ABAQUS.....	52
4.4 Εφαρμογή	60
4.5 Παραμετρική ανάλυση	64
4.6 Μελέτη δευτερογενών ρηγμάτων.....	68
4.7 Εφαρμογή.....	69
4.8 Εφαρμογή Mohr Coulomb.....	81
4.9 Συνδυαστικές εφαρμογές.....	88

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Πιθανές προεκτάσεις.....92

Κεφάλαιο 6: Βιβλιογραφία – Αναφορές94

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ραγδαία αύξηση των ενεργειακών αναγκών στη σημερινή κοινωνία καθιστά επιτακτική την εξόρυξη υδρογονανθράκων σε πολλαπλάσια ποσότητα σε σχέση με αυτή που πραγματοποιούνταν τις προηγούμενες δεκαετίες. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε ταυτόχρονα η ανάγκη κατασκευής και λειτουργίας παγκοσμίως όχι μόνο χερσαίων, αλλά και υποθαλάσσιων αγωγών, που αποτελούν πλέον, ένα διαδεδομένο τρόπο μεταφοράς υγρών και αέριων καυσίμων. Τα συνθετικά στοιχεία αυτών των αγωγών πρέπει να είναι τέτοια ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή και ασφαλή μεταφορά των ορυκτών καυσίμων, ενώ τα υλικά τους να συνθέτουν μία κατασκευή, η οποία θα χαρακτηρίζεται από αντοχή και αξιοπιστία.

Βαθμιαία, αυξάνεται το ενδεχόμενο της χρήσης αγωγών εκτεταμένου μήκους σε όλο τον κόσμο, ιδιαίτερα στην περιοχή της Μεσογείου που αποτελεί πόλος έλξης για την δημιουργία τέτοιου είδους τεχνικών έργων, λόγω του ότι συνορεύει με τρεις ηπείρους (Ευρώπη, Ασία, Αφρική). Εύλογα επομένως, αναμένεται η κατασκευή υποθαλάσσιων αγωγών στο άμεσο μέλλον, κυρίως 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 εκτενή τμήματα ανά περιοχές, είναι πολύ πιθανόν να έρθουν αντιμέτωποι με διάφορους γεωκινδύνους, ιδιαίτερα στη Μεσόγειο Θάλασσα, η οποία χαρακτηρίζεται ως μία από τις πλέον πιο σεισμογενείς περιοχές στον κόσμο. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι γεωκίνδυνοι ενδέχεται να απειλήσουν την ακεραιότητα του αγωγού, γεγονός που καθιστά τη μελέτη των μηχανικών απαραίτητη.

Βασικό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της επιρροής των σεισμικών ρηγμάτων σε αγωγούς εκτεταμένου μήκους, είτε αυτοί βρίσκονται στο χερσαίο έδαφος, είτε στο πυθμένα της θάλασσας. Μετά από μία βιβλιογραφική αναφορά σχετικά με τους γεωκινδύνους και τις μορφές που μπορούν να λάβουν, πραγματοποιείται μία εκτενή αναφορά στα ενεργά σεισμικά ρήγματα της ευρύτερης περιοχής της Μεσογείου. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, ώστε να προσομοιωθούν σε τρεις διαστάσεις οι διαρρήξεις ρηγμάτων όλων των τύπων, δηλαδή του κανονικού, του ανάστροφου και της οριζόντιας ολίσθησης. Πάνω από τα ρήγματα θεωρείται ότι υπάρχει εδαφική ή ιζηματογενής στρώση για την οποία υπολογίζονται οι συνεπακόλουθες μόνιμες παραμορφώσεις αυτής. Κατά την διάρκεια της μελέτης εξετάζονται διάφοροι παράμετροι που επηρεάζουν το πρόβλημα, όπως ο τύπος και το μήκος του ρήματος, το πάχος στρώσης του εδαφικού υλικού καθώς και τα χαρακτηριστικά του υλικού.

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

The rapid increase of energy demands, in today's society, makes it imperative to extract larger quantities of hydrocarbons than those extracted in the last decades. For this reason, we had to construct and operate on a worldwide basis not only ground pipelines but also submarine ones, which are nowadays a widespread way of transporting liquid and gaseous fuels. The composite elements of these pipelines must be such as to ensure the normal flow and safe transport of fossil fuels while their materials must constitute a structure which is characterized by strength and reliability.

Gradually, the possibility of using long-distance pipelines around the world is growing, especially in the Mediterranean region, which is a center of attraction for creating such projects, because it borders three continents (Europe, Asia, Africa). It is therefore reasonably probable that underwater pipelines will be built in the near future, especially in the Mediterranean, where the network of submarine pipelines is small compared to the North Sea, where there is a rather dense network. Because submarine pipelines are stretching extensively across regions, they are likely to be confronted with various geological hazards, particularly in the Mediterranean Sea, which is characterized as one of the world's most seismic areas. In some cases, geohazards can be devastating for the integrity of the pipeline, and that situation renders the engineering study necessary.

The main objective of this diploma thesis is to investigate the influence of seismic faults on long-distance pipelines, located on the terrestrial ground or on the seabed. After a bibliographic report on geohazards and the types they can have, a comprehensive reference is made to the active seismic faults in the Mediterranean region. The ABAQUS finite element software is then used to simulate three-dimensional ruptures faults of all types, normal, reverse and horizontal sliding. Above the faults, a soil or sedimentary layer is considered to account for the resulting permanent deformations.

Various parameters affecting the problem are examined during the study, such as the type and length of the fault, the layer thickness of the soil material and the characteristics of the material. Finally, an effort is made to evaluate the results of the study in order to assess the magnitude of the problem and propose various ways to address it, as well as proposals for further research.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Καθώς οι απαιτήσεις της σύγχρονης κοινωνίας ως προς τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία στην ενέργεια και την υδροδότηση αυξάνονται ταχύρρυθμα, καθίσταται αναγκαία πλέον η δημιουργία αγωγών εκτεταμένου μήκους. Οι αγωγοί αυτοί είναι δυνατόν να μεταφέρουν πετρέλαιο, φυσικό αέριο ή νερό και η τοποθέτησή τους μπορεί να πραγματοποιηθεί σε χερσαίο επίπεδο είτε σε υποθαλάσσιο, στον πυθμένα δηλαδή της Θάλασσας. Στη σημερινή εποχή, η ζωή των ανθρώπων είναι ενεργειακά εξαρτημένη από τα ορυκτά καύσιμα, για το λόγο αυτό έχουν ήδη κατασκευασθεί αγωγοί τέτοιου είδους που διατρέχουν την Ευρώπη με σημεία έναρξης την Ασία και την Αφρική. Είναι βέβαιο ότι η κατασκευή και η λειτουργία αυτών των αγωγών είναι άμεσα συνδεδεμένη με οικονομικά και πολιτικά συμφέροντα. Το μήκος τους μπορεί να είναι της τάξεως εκατοντάδων χιλιομέτρων, για αυτό είναι σημαντικό η κατασκευή τους να είναι τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται η ασφαλής και χαμηλού κόστους παράδοση πετρελαίου, φυσικού αερίου και νερού, με παράλληλη όμως, βελτίωση των περιβαλλοντικών προτύπων και συνθηκών.

Αρχικά, γίνεται μία γενική αναφορά στους γεωκινδύνους και στις διάφορες μορφές με τις οποίες μπορούν να εντοπισθούν. Στη συνέχεια αναφέρονται οι τρόποι με τους οποίους κατατάσσονται σε κατηγορίες. Οι δύο βασικές κατηγορίες σχετίζονται με τη συχνότητα εμφάνισης των φαινομένων και τον τρόπο από τον οποίο θεωρείται ότι προήλθαν. Σύμφωνα με τον πρώτη κατηγορία διακρίνονται σε ακραία, δηλαδή αυτά που συμβαίνουν σπάνια και σε μακροχρόνια όπου τα φαινόμενα αυτά απαιτούν μεγάλο χρονικό διάστημα για να εκδηλωθούν. Στη δεύτερη περίπτωση διαχωρίζονται σε ανθρωπογενείς και φυσικούς. Στην μεν πρώτη οι δραστηριότητες των ανθρώπων έχουν συμβάλει στην δημιουργία γεωκινδύνων, στη δε δεύτερη συμβαίνουν εξαιτίας της ήδη υπάρχουσας μορφολογίας και των χαρακτηριστικών του εδάφους.

Μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στην περίπτωση των ενεργών σεισμικών ρηγμάτων που αποτελούν το βασικό τμήμα μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο διατυπώνεται η θεωρία κατά την οποία δημιουργείται ένας επιφανειακός σεισμός καθώς και το πώς προκύπτει η επιφάνεια ολίσθησης που ονομάζεται 'ρήγμα'. Αναφορά γίνεται ωστόσο και στο πώς ο παρατηρητής μπορεί να αναγνωρίσει τα ρήγματα στην ύπαιθρο, καθώς επίσης και στα εγγενή χαρακτηριστικά αυτών. Οι κατηγορίες των ρηγμάτων ποικίλουν ανάλογα με την γεωμετρική, την κινηματική, την δυναμική και την χρονική ανάλυση. Ο συνηθέστερος τρόπος ταξινόμησης είναι ο γεωμετρικός σύμφωνα με τον οποίο τα ρήγματα διακρίνονται σε κανονικά, σε ανάστροφα και σε οριζόντιας ολίσθησης.

Εκτενής αναφορά γίνεται επίσης, για το πώς δημιουργείται και πώς διαδίδεται η διάρρηξη ενός ρήγματος. Η μορφολογία του εδάφους σχετίζεται άρρηκτα με την διάρρηξη ρηγμάτων καθώς έχουν σημαντικές επιπτώσεις στα φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής. Οι συνέπειες της ρηγμάτωσης σε γεωμορφολογικές ή στρωματογραφικές ενότητες είναι άμεσες. Η διάδοση ρηγμάτων σε επιφανειακά εδαφικά στρώματα εμφανίζει έντονη πολυπλοκότητα και γι' αυτό αναφέρονται διεξοδικά οι παράμετροι που έχουν άμεση επίδραση στο συγκεκριμένο πρόβλημα.

Η όλη διαδικασία είναι ανησυχητική για τους επιβλέποντες μηχανικούς τόσο λόγω της έκθεσης των έργων αυτών σε κινδύνους όσο και των εξαιρετικά σημαντικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ένα ενδεχόμενο ατύχημα. Οι διάφοροι γεωλογικοί κίνδυνοι που μπορεί να δράσουν στην περιοχή μπορεί να έχουν καταστροφικές συνέπειες σε ένα τέτοιο τεχνικό έργο και ταυτόχρονα να θέσουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές. Είναι γεγονός ότι η νότια Ευρώπη και ειδικότερα η λεκάνη της Μεσογείου στο

ύψος της Ελλάδας και της Ιταλίας είναι ιδιαιτέρως σεισμογενής, λόγω της ύπαρξης ρηγμάτων, γι' αυτό τεχνικά έργα τέτοιας κατηγορίας απαιτούν σωστό σχεδιασμό και τακτικό έλεγχο κατά την λειτουργία τους.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία δίνεται περισσότερο έμφαση στον Ελλαδικό χώρο και στην λεκάνη της Μεσογείου καθώς εξετάζονται τα ενδεχόμενα οι αγωγοί αυτοί να εδράζονται στην πιο σεισμογενή χώρα της Ευρώπης και σε μία πιο τις πιο σεισμογενής χώρες της Γης. Για το λόγο αυτό έγινε περισυλλογή των στοιχείων για το σύνολο των γεωκινδύνων της ευρύτερης περιοχής και ιδιαίτερα των ενεργών ρηγμάτων που αποτελούν το κύριο τμήμα μελέτης της διπλωματικής εργασίας. Μεγάλο πλήθος ενεργών ρηγμάτων υπάρχει τόσο στο χερσαίο τμήμα του Ελλαδικού χώρου που εξετάζεται το ενδεχόμενο κατασκευής χερσαίων αγωγών όσο και στην λεκάνη της Μεσογείου που σχετίζονται άμεσα με το ζήτημα της κατασκευής υποθαλάσσιων αγωγών.

Στην συνέχεια πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις οι οποίες πραγματεύονται ζητήματα της μελέτης αγωγών εκτεταμένου μήκους και των προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν και πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά την κατασκευή τους. Κατά κύριο λόγο προβλήματα μπορεί να υπάρξουν από τη σεισμικότητα μιας περιοχής, πόσο μάλλον αυτή της Ελλάδας και της Μεσογείου που είναι αρκετά έντονη, καθώς και από τη διάρρηξη των ενεργών ρηγμάτων, τα οποία ενδέχεται να προκαλέσουν παραμορφώσεις στον αγωγό.

Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε προσομοίωμα που αντιπροσωπεύει την διάρρηξη ενός ρήγματος σε ελεύθερο πεδίο όπου πάνω σε αυτό βρίσκεται εδαφική ή ιζηματογενής στρώση. Στην πορεία, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση η οποία οδήγησε στην εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν τις επιφανειακές μετατοπίσεις της στρώσης. Οι βασικές παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν το είδος του ρήγματος (κανονικό, ανάστροφο, οριζόντιας ολίσθησης), το πάχος και το υλικό της στρώσης, καθώς και το μήκος του ρήγματος. Για όλες τις περιπτώσεις κατασκευάστηκαν προσομοιώματα τριών διαστάσεων τα οποία έχουν τη μορφή ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου. Η δημιουργία αυτών των προσομοιωμάτων έγινε χρησιμοποιώντας κυβικά στοιχεία τύπου CPE8, δίνοντας τη δυνατότητα 3D απεικόνισης. Σε κάθε προσομοίωμα θεωρείται πως υπάρχει ένα βασικό ρήγμα που εφαρμόζεται κάθε φορά στο μέσο. Σε δεύτερη φάση θεωρείται πως από το βασικό ρήγμα προκύπτουν δευτερογενή ρήγματα τα οποία εκδηλώνονται σε κάθετη διεύθυνση και καταπονούν τον αγωγό που έχει παράλληλο φορέα με αυτόν του βασικού ρήγματος.

Το τεχνικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα αποτελεί ένα αξιόπαινο εργαλείο στα χέρια ενός μηχανικού και είναι το καταλληλότερο για τις αναλύσεις προβλημάτων πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιώντας κυβικά στοιχεία τύπου CPE8 δημιουργήθηκαν τρισδιάστατα προσομοιώματα τα οποία ήταν αναγκαία για την απεικόνιση του οριζοντιολισθητικού ρήγματος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι να μελετήσει το πρόβλημα που υφίσταται σήμερα, δηλαδή τη δυσκολία κατασκευής αγωγών σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από έντονη σεισμικότητα και να εξετάσει τη δυνατότητα κατασκευής ενός αγωγού, ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο αστοχίας του είτε αυτός βρίσκεται στη στεριά είτε υποθαλάσσια.

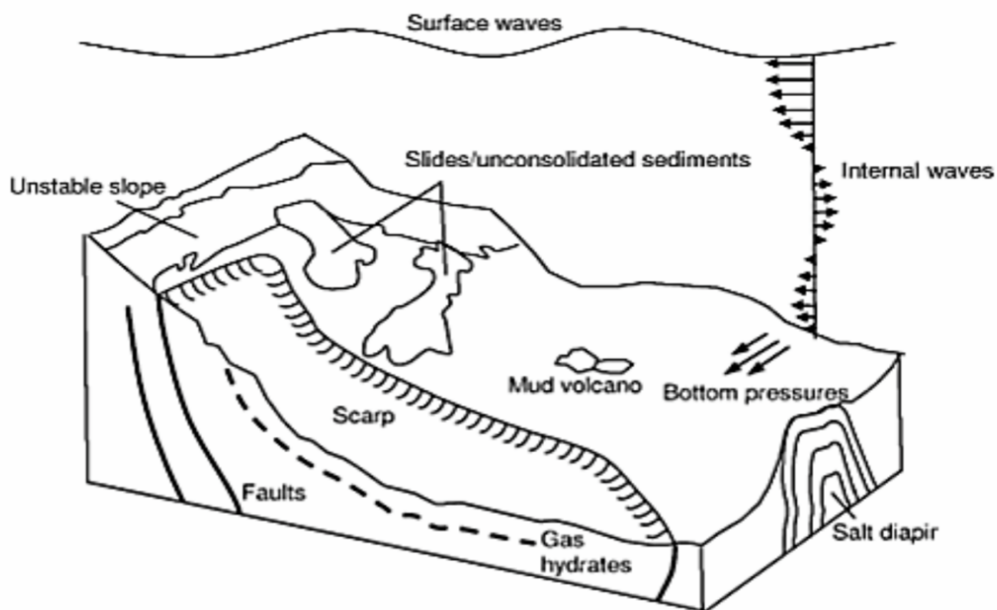
Για τη συγγραφή μελετήθηκαν επιστημονικά συγγράμματα, βιβλία καθώς και διατριβές ανάλογης θεματολογίας. Επίσης, αντλήθηκαν πληροφορίες από επίσημες ιστοσελίδες σχετικές με τα ζητήματα που ερευνώνται. Στο τέλος της εργασίας παρατίθεται η βιβλιογραφία προκειμένου να ανατρέξει ο αναγνώστης, εφόσον το επιθυμεί.

Κεφάλαιο 2: Γεωκίνδυνοι

2.1 Εισαγωγή

Ως γεωλογικοί κίνδυνοι ή γεωκίνδυνοι ορίζεται το σύνολο των υδροδυναμικών ή υδρογεωλογικών συνθηκών, διεργασιών, δραστηριοτήτων ή φαινομένων που δύναται να οδηγήσουν σε μετακινήσεις οι οποίες δημιουργούν κίνδυνο σε ένα μερικό τμήμα ή το σύνολο μιας περιοχής. Οι μετακινήσεις αυτές αφορούν κυρίως εδαφικές μάζες, βραχώδεις μάζες και πετρώματα αλλά ακόμη και υγρά ή αέρια κατά την διάρκεια αιφνίδιων γεγονότων ή σταδιακών παραμορφώσεων. Η διασταύρωση γεωκινδύνων με οποιουδήποτε είδος κατασκευής έχουν ορισμένη πιθανότητα να προκαλέσουν φθορές στην ίδια την κατασκευή ή καταστροφές στο περιβάλλον, τραυματισμούς ή ακόμη και απώλειες ζωών. Γι' αυτό το λόγο η εύρεση, η πρόβλεψη και η πρόληψη για όλους των πιθανούς γεωκινδύνους αποτελούν αναμφισβήτητα ένα από τα πιο σημαντικά θέματα αφοσίωσης και μελέτης του μηχανικού.

Τα επικίνδυνα, σπάνια και αιφνίδια γεγονότα στη φύση, (όπως τα ηφαιστεια και οι σεισμοί) μπορεί να προκαλέσουν κατολισθήσεις όχι μόνο στη ξηρά αλλά και υποθαλάσσια δημιουργώντας ρεύματα και έκλυση αερίων. Η επικινδυνότητα διαφέρει ανάλογα με τη συχνότητα εμφάνισης των γεωλογικών φαινομένων, ανάλογα με την τοποθεσία που λαμβάνει χώρα, την έκταση της περιοχής, τη σοβαρότητα της εκδήλωσης του φαινομένου, καθώς και με την επέμβαση που έχει δεχθεί ο περιβάλλον χώρος από τον άνθρωπο. Ταυτόχρονα οι επικίνδυνες γεωλογικές συνθήκες σχετίζονται άμεσα με τον ερπυσμό των υλικών και την τεκτονική της εκάστοτε περιοχής. Στην περίπτωση που κάνουν την εμφάνιση τους στο θαλάσσιο χώρο τότε οι γεωκίνδυνοι περιλαμβάνουν αστοχίες πρανών, ρευστοποιήσεις, τεκτονικά ή μη ρήγματα, σεισμικές δονήσεις, διαρροές αερίων και αλατιού, ηφαιστεια λάσπης, εσωτερικά ρεύματα όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Σχεδιάγραμμα απεικόνισης γεωκινδύνων.

Πηγή: (ir.lib.uth.gr)

2.2.1 Γενική διάκριση γεωκινδύνων

Είδη χερσαίων γεωκινδύνων:

Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται όλοι οι γεωλογικοί κίνδυνοι που εκδηλώνονται είτε υπό στατικές, είτε υπό σεισμικές συνθήκες σε χερσαίο τμήμα στην επιφάνεια της Γης. Αυτοί οι γεωλογικοί κίνδυνοι μπορεί να είναι ενεργά ρήγματα, διάφορες ρευστοποιήσεις εδαφών, κατολισθήσεις από την μη ευστάθεια πρανών είτε ηφαιστεια (εικόνα 2.2). Όλες αυτές οι μορφές γεωκινδύνων αποτελούν απειλή για κάθε τεχνικό έργο και οποιασδήποτε τύπο κατασκευής.

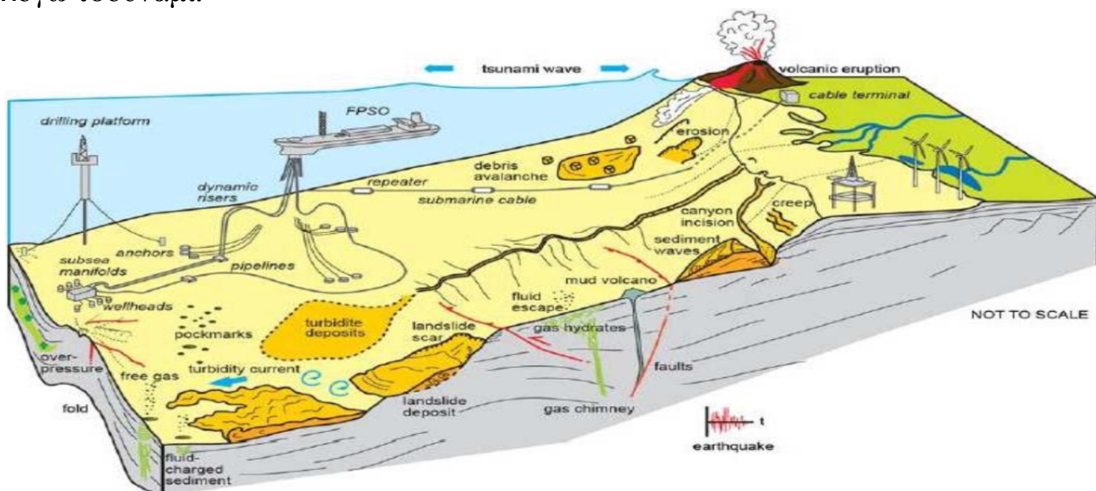


Εικόνα 2.2: Σχηματική απεικόνιση χερσαίων γεωλογικών κινδύνων.

Πηγή: (www.psdadm.gr)

Υποθαλάσσιοι Γεωκίνδυνοι:

Στην κατηγορία των υποθαλάσσιων γεωλογικών κινδύνων κατατάσσονται οι αστοχίες πρανών, τεκτονικές και μη τεκτονικές αστοχίες, ισχυρές σεισμικές δονήσεις του πυθμένα και ρευστοποιήσεις των ιζημάτων αυτού, αέρια, υδρίτες αερίων και ηφαιστεια λάσπης (εικόνα 2.3). Ειδικά σε θαλάσσια τεχνικά έργα μπορούν να προκληθούν προβλήματα από διάφορα είδη υλικών του πυθμένα ή από υδροδυναμικές δυνάμεις λόγω τσουνάμι.



Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση υποθαλάσσιων γεωλογικών κινδύνων.

Πηγή: (www.psdadm.gr)

2.2.2 Κατηγορίες γεωκινδύνων

Μία αρχική μορφή κατηγοριοποίησης των γεωκινδύνων είναι αυτή κατά τους Randolph & Gourvenec (2011). Σύμφωνα με αυτή έχουμε τις εξής κατηγορίες:

Ακραία φαινόμενα: Αφορά πιο σπάνιου χαρακτήρα αλλά ταυτόχρονα έντονου επεισοδιακού χαρακτήρα φαινόμενα. Σε αυτή την κατηγορία συμπεριλαμβάνονται φαινόμενα όπως οι σεισμοί και τα επακόλουθα τους, οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, οι τυρβώδεις ροές και η αποβολή αερίων.

Μακροχρόνια φαινόμενα: Πρόκειται για φαινόμενα που απαιτούν ιδιαίτερα μεγάλο χρονικό διάστημα για να εκδηλωθούν. Οι συνθήκες αυτές ευνοούνται από αργές διαδικασίες προοδευτικού χαρακτήρα, όπως είναι για παράδειγμα ο ερπυσμός των υλικών.

2.2.3 Διάκριση σε ανθρωπογενείς ή φυσικούς γεωλογικούς κινδύνους

Φυσικοί: Οι φυσικοί γεωκίνδυνοι χαρακτηρίζονται από την ένταση και τη χρονική κατανομή δηλαδή την συχνότητα εκδήλωσής τους. Δύναται να υπάρχει συσχετισμός μεταξύ τους ή να προκληθούν χάρη στην ύπαρξη κάποιων άλλων.

Ανθρωπογενείς: Οι δραστηριότητες των ανθρώπων και η επέμβαση τους στο φυσικό περιβάλλον έχουν ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται επιπλέον γεωλογικοί κίνδυνοι. Πιο συγκεκριμένα οι αλληλεπιδράσεις αυτές μπορούν να προκαλέσουν επιτάχυνση ή μεταβολή των γεωλογικών συστημάτων. Το θετικό σε αυτή την περίπτωση είναι ότι πρόκειται για βραδείας εξέλιξης φαινόμενα, τα οποία είναι συνήθως ελεγχόμενα με αποτέλεσμα τον περιορισμό, την αποφυγή τους ή ακόμη και την εξάλειψη τους.

Η συχνότητα εκδήλωσης ενός γεωλογικού κινδύνου εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την μορφολογία του εδάφους ή του πυθμένα αν αφορά θαλάσσιο χώρο, και τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Αρχικά ο κίνδυνος εμφάνισης ενός φαινομένου μπορεί να είναι χαμηλού επιπέδου αλλά εφόσον υπάρξει παρέμβαση από τον άνθρωπο τα δεδομένα αλλάζουν και μπορεί να έχουμε ως αποτέλεσμα την ενεργοποίηση ενός τέτοιου φαινομένου. Επιπλέον, στη περίπτωση που δεν υπάρχει εκδήλωση του φαινομένου στη γύρω περιοχή, σημειώνεται μείωση της πιθανότητας εμφάνισης, ενώ αντίθετα η ύπαρξη ευνοϊκών για το φαινόμενο συνθηκών μπορεί να επιφέρει υψηλούς κινδύνους, εξαιτίας συχνών μετακινήσεων (Randolph & Gourvenec, 2011).

2.3.1 Σεισμοί

Ως σεισμός χαρακτηρίζεται η «εκτόνωση» της τάσης που συσσωρεύεται, δηλαδή της πίεσης που εφαρμόζεται στην επιφάνεια ενός ρήγματος. Συχνότερα το φαινόμενο εκδηλώνεται διαμήκους των ορίων των τεκτονικών πλακών, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι αποκλείεται να γίνει η εμφάνιση του οπουδήποτε αλλού. Οι σεισμοί εκδηλώνονται συνήθως απροειδοποίητα χωρίς να υπάρχει δυνατότητα αποτροπής. Το εν λόγω φαινόμενο μπορεί να προκαλέσει ανυπολόγιστες ζημιές σε κάθε είδους κατασκευές, πάρα την μικρή του χρονική διάρκεια. Επιπλέον, υπάρχει πιθανότητα πρόκλησης και άλλων φυσικών καταστροφών υψηλής επικινδυνότητας που αποτελούν σοβαρή απειλή για την ανθρώπινη ζωή και όχι μόνο, όπως λόγου χάρη το τσουνάμι.

Η Ελλάδα, είναι μία ιδιαίτερος σεισμογενής χώρα. Βρίσκεται πολύ κοντά στο όριο σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών της Ευρασίας και της Αφρικής. Η μετακίνηση αυτών των δύο πλακών οδηγεί στη σύγκρουσή τους σε ένα μέτωπο μεγαλύτερο των δύο χιλιάδων χιλιομέτρων κατά μήκος της νότιας Ευρώπης. Επειδή η απόσταση της Ελλάδας από το μέτωπο της σύγκρουσης είναι μικρή, η χώρα μας έχει σχεδόν καθημερινά σεισμούς, μικρού ή μεγάλου μεγέθους, ενώ στον τόπο μας δρουν και αρκετά ηφαίστεια. Ο παρακάτω παγκόσμιος χάρτης (εικόνα 2.4) αναδεικνύει με έντονο κόκκινο χρώμα τις πιο σεισμογενείς περιοχές. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι η Ελλάδα και η Μεσόγειος ανήκουν στην κατηγορία με τις πιο σεισμογενείς χώρες του κόσμου.



Εικόνα 2.4: Παγκόσμιος χάρτης σεισμικής δραστηριότητας.
Πηγή: (podilato98.blogspot.com)

Το γεγονός ότι η χώρα μας τυχαίνει να βρίσκεται σε εκείνο το σημείο της γης όπου συναντώνται η Αφρικανική και η Ευρω-ασιατική λιθοσφαιρική πλάκα έχει ως αποτέλεσμα να είναι η πρώτη σε σεισμικότητα χώρα όχι μόνο στη Μεσόγειο αλλά και σε όλη την Ευρώπη, ενώ βρίσκεται έκτη στην κατάταξη με τις πιο σεισμογενείς χώρες του κόσμου μετά την Ιαπωνία, Νέες Εβρίδες, Περού, νησιά Σολομώντα και Χιλή. Είναι χαρακτηριστικό πως κάθε χρόνο συμβαίνουν στη χώρα μας περισσότεροι σεισμοί σε σχέση με τις υπόλοιπες χώρες της Ευρώπης, αποτελεί όμως ευτύχημα το γεγονός ότι οι πιο πολλοί σεισμοί γίνονται κάτω από τη θάλασσα. Παρ' όλα αυτά, δεν έχουν την ίδια σεισμικότητα όλες οι περιοχές της Ελλάδας. Η περιοχή κατά μήκος του νοητού τόξου που δημιουργούν τα νησιά του Ιονίου, η Κρήτη και η Ρόδος είναι η πιο σεισμογενής στον Ελλαδικό χώρο.

2.3.2 Εκδήλωση του φαινομένου

Ο φλοιός της Γης κινείται διαρκώς, αλλά με πολύ βραδύ ρυθμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να συσσωρεύεται τάση (πίεση) συνήθως στα όρια των τεκτονικών πλακών. Τη στιγμή όπου η τάση σε αυτά τα σημεία υπερβεί το όριο αντοχής των υλικών της Γης, τότε ο σεισμός εκδηλώνεται.

Σύμφωνα με την θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών, ο φλοιός της Γης αποτελείται από δέκα μεγάλες άκαμπτες πλάκες και είκοσι πιο μικρού μεγέθους, οι οποίες κινούνται συνεχώς. Όπως είναι προφανές οι πλάκες αλλάζουν θέση και είτε απομακρύνονται μεταξύ τους, είτε έρχονται σε σύγκρουση μεταξύ τους, ή μετατοπίζονται η μία εκατέρωθεν της άλλης ή παραλλήλως της άλλης. Με τον τρόπο αυτό προκαλείται παραμόρφωση των πετρωμάτων στην περιοχή γύρω από τα όρια των πλακών και δημιουργεί επικίνδυνες ζώνες ρηγμάτων. Σε κάποια σημεία των ρηγμάτων, το πέτρωμα εγκλωβίζεται κατά μήκος αυτών και δεν ολισθαίνει κατά την κίνηση των πλακών. Η τάση που δημιουργείται ανάμεσα στις δύο πλευρές του ρήγματος καταλήγει στη θραύση του πετρώματος και την μετακίνηση του. Αυτή η μετατόπιση είναι και η αιτία που προκαλεί τους σεισμούς. Καθώς ο σεισμός εκδηλώνεται, απελευθερώνονται μεγάλες ποσότητες ενέργειας, εντός της Γης με την μορφή ταλαντώσεων, τα λεγόμενα σεισμικά κύματα. (Sakellariou et., 2011).

Η συχνότητα των σεισμών σχετίζεται κάθε φορά από τις γεωτεκτονικές συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε περιοχή. Τα σεισμικά κύματα που προκαλούνται διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις ενώ όσο απομακρυνόμαστε από την εστία τόσο μικρότερη είναι η αίσθηση του φαινομένου. Προκειμένου να προσδιοριστεί ο ρυθμός επανάληψης μεγάλων σεισμών από την επιστημονική κοινότητα, χρησιμοποιούνται όλα τα μέσα σεισμολογικά, γεωλογικά, αρχαιολογικά και άλλα δεδομένα. Έτσι με αυτό τον τρόπο αξιολογείται η σεισμική επικινδυνότητα μιας συγκεκριμένης περιοχής. Η παρακάτω φωτογραφία είναι από το εσωτερικό σεισμολογικού σταθμού (εικόνα 2.5) και απεικονίζει τα όργανα που μετρούν την ένταση των σεισμών. Η κλίμακα μέτρησης του μεγέθους των σεισμών που είναι ευρέως γνωστή παγκόσμια είναι αυτή της κλίμακας του Richter.



Εικόνα 2.5: Σεισμογράφος, όργανο μέτρησης έντασης σεισμών.

Πηγή: (www.cnn.gr)

Γενικά όμως, δεν υπάρχει ένας συγκεκριμένος ορισμός για την σεισμικότητα. Το μόνο που μπορούμε να εφαρμόσουμε δίνοντας αξιόλογα αποτελέσματα είναι να συλλέξουμε σε μία συνάρτηση τα μεγέθη και τις συχνότητες των σεισμών σε μία ορισμένη χρονική περίοδο. Έτσι επιτυγχάνεται η σύγκριση σεισμικότητας μεταξύ διαφορετικών περιοχών ανά τον κόσμο.

2.3.3 Λιθοσφαιρικές πλάκες - Υπαιτιότητα εκδήλωσης σεισμού

Η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών αναπτύχθηκε παράλληλα με την υπόθεση της επέκτασης του θαλάσσιου πυθμένα και της έννοιας των ρηγμάτων μετασχηματισμού. Είναι το κύριο αίτιο για το σύνολο σχεδόν των γεωδυναμικών φαινομένων που παρατηρούνται στη Γη.

- Οι κινήσεις που πραγματοποιούν οι λιθοσφαιρικές πλάκες είναι 3:

- 1) ΑΠΟΚΛΙΣΗ



- 2) ΣΥΓΚΛΙΣΗ



- 3) ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΚΙΝΗΣΗ



Η λιθόσφαιρα (ο όρος διατυπώθηκε πρώτη φορά από τον R. A. Daly) είναι ένα δύσκαμπτο στρώμα πάχους 80 χιλιομέτρων περίπου που περιλαμβάνει τον φλοιό και μέρος του πάνω μανδύα και καλύπτει ολόκληρη την Γη. Αυτή δεν είναι συνεχής αλλά χωρίζεται από τα δύο παγκόσμια συστήματα διάρρηξης.

Χωρίς να υπάρχει προκαθορισμένος όρος για το τι είναι η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών, μπορούμε να πούμε ότι πρόκειται για την επιστημονική θεωρία που αναπτύχθηκε αργά, αλλά άλλαξε τις ιδέες μας για το πώς «λειτουργεί» η Γη.

Η τεκτονική (των πλακών) είναι η μελέτη των δυνάμεων που δρουν στη Γη. Η δράση των δυνάμεων αυτών δημιούργησε τις ηπείρους, τους ωκεανούς, και γενικά όλα τα γεωμορφολογικά και τεκτονικά χαρακτηριστικά μεγάλης κλίμακας που βλέπουμε σήμερα στη Γη.

Η λιθόσφαιρα χωρίζεται από τα 2 παγκόσμια συστήματα διάρρηξης σε 6 μεγάλες λιθοσφαιρικές πλάκες και σε ισάριθμες μικρότερες που πραγματοποιούν κινήσεις μεταξύ τους, η ταχύτητα των οποίων μπορεί να φτάσει τα 10 cm/yr. Πολύ σπουδαίο ρόλο, τόσο στη γένεση- καταστροφή, όσο και στην κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών, διαδραματίζουν τα όρια (ή οι παρυφές) της επαφής τους. Αυτά διακρίνονται σε 3 μεγάλες κατηγορίες:

- 1) ζώνες σύγκλισης-κατάδυσης
- 2) στις μέσο-ωκεάνιες ράχεις και
- 3) στα ρήγματα μετασχηματισμού

Τα όρια επαφής των λιθοσφαιρικών πλακών ορίζονται με ακρίβεια με γεωφυσικές και κυρίως σεισμολογικές μεθόδους. Έτσι είναι γνωστό σήμερα ότι οι μεγάλες σεισμικές ζώνες που παρατηρούνται στη Γη ταυτίζονται σχεδόν με τα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών. Εξαιρέσεις αποτελούν οι μεγάλες ενδοηπειρωτικές ενεργές παραμορφώσεις όπως για παράδειγμα είναι η Κίνα. Στην (εικόνα 2.6) παρατηρούμε τη μορφή και τα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών που εκτιμάται πως είναι σήμερα.



Εικόνα 2.6: Σχηματική απεικόνιση των λιθοσφαιρικών πλακών.
Πηγή: (www.pemptousia.gr)

Κατά την κίνησή τους οι λιθοσφαιρικές πλάκες συγκρούονται μεταξύ τους με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται παραμορφωτικές τάσεις στις παρυφές τους. Συνέπεια αυτών των κινήσεων είναι η βύθιση ωκεάνιων πλακών μεγάλης πυκνότητας κάτω από ηπειρωτικές πλάκες, κοντά στα νησιωτικά τόξα ή σε παρόμοιες τεκτονικές δομές. Γενικά κάθε πλάκα κινείται οριζόντια με διεύθυνση από την μέσο-ωκεάνια πλάκα, όπου γεννάται, προς την ηπειρωτική ζώνη διάρρηξης (τάφος), όπου το μπροστινό τμήμα καταστρέφεται με πλάγια κατάδυση μέσα στην ασθενόσφαιρα.

2.4.1 Κατολισθήσεις

Η διατάραξη της ισορροπίας μιας εδαφικής ή βραχώδους μάζας είναι ο ορισμός της κατολίσθησης. 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 κατά κύριο λόγο με ανθρώπινες δραστηριότητες. Στην περίπτωση όπου το έδαφος ή ο βράχος κινηθεί αποκλειστικά με κατακόρυφη διεύθυνση, τότε το φαινόμενο ονομάζεται καθίζηση, κατάρρευση ή κατάπτωση. Σε διαφορετική περίπτωση που υπάρχει και οριζόντια κίνηση σε συνδυασμό με την κατακόρυφη, τότε αποδεκτή γίνεται μόνο η χρήση του όρου κατολίσθηση (Camerlmgghi et al., 2010).

2.4.2 Ταξινόμηση κατολισθήσεων

Τα δύο πιο γνωστά συστήματα ταξινόμησης των κατολισθήσεων, που εξελίχθηκαν βέβαια στην πορεία του χρόνου και είναι γενικότερα αποδεκτά σήμερα, είναι αυτά που προτάθηκαν από τον J.N. Hutchinson (1968) και D.J. Varnes (1978). Και τα δύο βασίζονται στις παρακάτω τέσσερις κύριες παραμέτρους:

- α. τύπος κίνησης, (5 τύποι: ολισθήσεις, καταπτώσεις, ανατροπές, πλευρικές εξαπλώσεις, ροές-ρεύματα)
- β. τύπος υλικού, (3 τύποι: βραχώδεις, εδαφικό, κορήματα)
- γ. ταχύτητα κίνησης, (7 φάσματα τιμών: από εξαιρετικά ταχεία 5μ/δευτ., έως εξαιρετικά αργή ≤ 50 χιλιοστά/έτος)
- δ. περιεχόμενη υγρασία. (4 κατηγορίες: ξηρή κατάσταση, παρουσία υγρασίας αλλά όχι κινούμενο νερό, σημαντική παρουσία νερού κινούμενου ή επιφανειακά λιμνάζοντος, και πλήρως κορεσμένο με νερό υλικό που ρέει σαν ρευστό σε μικρές κλίσεις πρανούς)

Σημείωση: Τα α και β είναι τα απαραίτητα συστατικά του ονόματος κάθε τύπου κατολισθητικού φαινομένου. Π.χ. ολίσθηση κορημάτων, κατάπτωση βράχων, ροή γαιών, κλπ.

Παρά τις διαφορές που υπήρχαν στην αρχή, τα συστήματα αυτά συνέκλιναν σταδιακά και χρησιμοποιούν στη σημερινή εποχή την ίδια βασικά ορολογία. Η παραμένουσα διαφορά έγκειται στο ότι το σύστημα του Varnes, είναι ίσως πιο εύκολο στην εφαρμογή, ενώ του Hutchinson έλκει περισσότερο το μηχανικό που ασχολείται με την ανάλυση της ευστάθειας του υπό μελέτη πρανούς (Crozier, 1986).

Το σύστημα ταξινόμησης σύμφωνα με τον Varnes (1978) εμπεριέχει όλους τους τύπους μετακίνησης που θα μπορούσαν να παρατηρηθούν σε πρανή (εκτός κλασσικών καθιζήσεων) και όχι μόνο των κατολισθήσεων με τη στενή έννοια. Η κάθε ταξινομικός τύπος εκφράζεται από δύο ονόματα. Το πρώτο αναφέρεται στον τεχνικογεωλογικό τύπο του υλικού και το δεύτερο στον τεχνικογεωλογικό τύπο της κίνησης.

Έτσι, ανάλογα με τον τεχνικογεωλογικό τύπο του υλικού, διακρίνουμε:

- A) την κατηγορία των βραχωδών σχηματισμών, όπου η κίνηση αναφέρεται είτε σε συμπαγή-μεμονωμένα τεμάχια, είτε σε βραχομάζα αποτελούμενη από σύνολο βραχωδών τεμαχίων διακεκριμένων μέσω δομικών συνεχειών (διακλάσεις, στρώσεις, κλπ), και
- B) δύο κατηγορίες εδαφικών σχηματισμών: τα κορήματα με επικράτηση αδρομερούς-χονδρόκοκκου υλικού και τις γαίες με επικράτηση του λεπτομερούς-λεπτόκοκκου υλικού.

Ανάλογα δε, με τον τύπο της κίνησης, διακρίνουμε:

- τις καταπτώσεις
- τις ανατροπές
- τις ολισθήσεις
- τις πλευρικές εξαπλώσεις
- τις ροές
- τις σύνθετες κινήσεις

Ας σημειωθεί τέλος ότι, ο τύπος της σύνθετης κατολίσθησης δεν εμφανίζεται στην επίσημη, ισχύουσα σήμερα ταξινόμηση, παρά το γεγονός ότι οι περισσότερες κατολισθητικές κινήσεις είναι σύνθετες. Δηλαδή, συνδυάζουν περισσότερες του ενός τύπου κινήσεις, πλην όμως, σχεδόν πάντοτε ένας τύπος είναι ο χαρακτηριστικός που επικρατεί.

2.4.3 Εκδήλωση Κατολίσθησης

Όπως είναι λογικό, οι φυσικές και οι ανθρώπινες διεργασίες επηρεάζουν την εμφάνιση του φαινομένου. Παρακάτω παρουσιάζονται όλοι οι παράγοντες που συντελούν στην δημιουργία κατολισθήσεων (Παπαχαρισίου, 2008):

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

Στην παρακάτω φωτογραφία (εικόνα 2.7) απεικονίζεται το μέγεθος της καταστροφής που επήλθε από τις κατολισθήσεις που εκδηλώθηκαν σε λιγνιτωρυχείο της ΔΕΗ. Κατά κύριο λόγο η εμφάνιση του φαινομένου οφείλεται στις ανθρωπογενείς δραστηριότητες.



Εικόνα 2.7: Κατολισθήσεις που εκδηλώθηκαν σε λιγνιτωρυχείο της ΔΕΗ στο Αμύνταιο.

Πηγή: (www.google.gr)

Μια κατολίσθηση μπορεί να γίνει αιφνιδιακά και διαρκεί μόλις λίγα δευτερόλεπτα. Η ένταση και η διάρκεια του φαινομένου ποικίλει αναλόγως τους παράγοντες του περιβάλλοντος και τις συνθήκες που επικρατούν. Είναι ιδιαίτερα δύσκολο να υπολογιστεί η συχνότητα εμφάνισης του καθώς ανά πάσα στιγμή μπορεί να προκληθεί ένα τέτοιο φαινόμενο. Οι κυριότεροι παράγοντες που οδηγούν στις κατολισθήσεις είναι οι εξής (Παπαχαρισίου, 2008):

- *Η αφαίρεση της υποστήριξης του πρανούς.
- *Η επιπλέον φόρτιση του πρανούς.
- *Η δράση της χλωρίδας και της πανίδας.
- *Η αποσάθρωση.
- *Η παρουσία ύδατος.
- *Η γεωλογική δομή.

2.4.4 Μέγεθος Κατολισθήσεων

Μια κατολίσθηση μπορεί να συμβεί τοπικά σε μία πλαγιά και να είναι της τάξεως του ενός κυβικού χιλιομέτρου ή και λιγότερο, ή να διαδραματίζεται σε μεγαλύτερη έκταση και να προκύπτει κατολίσθηση έως και χιλιάδων κυβικών χιλιομέτρων υλικού.

Η μεγαλύτερη κατολίσθηση που έχει μελετηθεί εις βάθος είναι αυτή της Storegga στο ηπειρωτικό πρανές της Νορβηγίας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον σημειώνεται σε αυτή την περίπτωση, εξαιτίας της ύπαρξης του οικοπέδου φυσικού αερίου Ormen Lange στην πλευρική προεξοχή του (Bugge, et al., 1998α), (Bryn, et al., 1999β).

Οι επιστήμονες εκτιμούν ότι το φαινόμενο τοποθετείται χρονολογικά 8000 χρόνια πριν. Φέρεται ότι υπήρχαν 5600 km³ υλικού, ενώ η περιοχή που συνέβη το φαινόμενο είχε μέση κλίση μικρότερη από 2 μοίρες. Η επίδραση της κατολίσθησης εκτεινόταν σε έκταση πάνω από 30.000 Km³ με αποστάσεις εκτροπής που φτάνουν έως και τα 800 Km (K valstad, et al., 2001).

2.5.1 Ηφαίστεια

Ως ηφαίστεια ορίζονται τα ανοίγματα της γήινης επιφάνειας από τα οποία εξέρχονται μάγμα, αέρια και έτερα υλικά. Τα ηφαίστεια βρίσκονται συνηθέστερα στα όρια των τεκτονικών πλακών. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπου εντοπίζονται σε περιοχές που αποτελούν θέσεις κάτω του γήινου φλοιού όπου συναντούν ρεύματα θερμού υλικού από τον μανδύα, αυτές οι περιοχές ονομάζονται «θερμές κηλίδες». Η έκρηξη των ηφαιστειών γίνεται είτε βίαια είτε με αργό ρυθμό. Τα ηφαίστεια μπορούν να διακριθούν σε κατηγορίες αναλόγως της (Παπαχαρισίου, 2008):

- α) Γεωτεχνικής θέσης
- β) Εκρηξιμότητας
- γ) Μορφής ηφαιστειακού κώνου

Σύμφωνα με τους επιστήμονες, ενεργά χαρακτηρίζονται εκείνα τα ηφαίστεια που εμφανίζουν κάποιας μορφής σύγχρονη δραστηριότητα. Στο πλαίσιο αυτής της δραστηριότητας περιλαμβάνεται η εκρηκτική, η σεισμική ή ακόμη και η απλή έκλυση αερίων. Στην περίπτωση της εκρηκτικής δραστηριότητας εκτινάσσεται ή καταρρέει ο κώνος του Ηφαιστείου και τότε δημιουργείται μια κεντρική κοιλότητα που ονομάζεται καλδέρα. Παράδειγμα ενεργού ηφαιστείου αποτελεί το Μάουνα Λόα (εικόνα 2.8) στο νησί της Χαβάης που έγινε πρόσφατη έκρηξη το 2005.



Εικόνα 2.8: Έκρηξη στο ηφαίστειο Μάουνα Λοα στο νησί της Χαβάης.

Πηγή: (www.cnn.gr)

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

Ροές λάβας: Είναι το πιο γνωστό προϊόν που παράγεται από την ηφαιστειακή δραστηριότητα με μεγαλύτερες ή μικρότερες ταχύτητες κίνησης αναλόγως της σύστασή τους. Η κλίμακα μεγέθους δεν είναι μεγάλη και γι' αυτές τις ταχύτητες και έτσι καθιστά τη δυνατότητα αντίδρασης.

Πυροκλαστικά προϊόντα: Τα προϊόντα αυτά συνδέονται άμεσα με την άνοδο και τη βίαιη απελευθέρωση των αερίων που βρίσκονται εντός του μάγματος. Μπορεί να βρίσκονται είτε σε ρευστή είτε σε στερεή μορφή.

Αέρια: Κατά την ηφαιστειακή δραστηριότητα αλλά και τις ενδιάμεσες περιόδους σημειώνεται έκλυση αερίων, κατά κύριο λόγο διοξειδίου του άνθρακα, μονοξειδίου του άνθρακα και υδρόθειου. Από αυτά τα βαρύτερα επικάθονται στα κατώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα, πλησίον στο έδαφος, με κίνδυνο θανάτωσης κάθε ζωντανού οργανισμού.

Λασποροές: Οι ραγδαίες μετακινήσεις στα κατάντη, μεγάλων όγκων προϊόντων, λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας, κορεσμένων σε νερό, ονομάζονται λασποροές. Το φαινόμενο αυτό, θεωρείται πολύ επιβλαβές για τον άνθρωπο επιφέροντας σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία του, εκτός αυτού έχει επιπτώσεις και στο ίδιο το περιβάλλον.

2.5.2 Εκδήλωση ηφαιστείου

Κάτωθεν του φλοιού υπάρχει το ρευστό πέτρωμα που ονομάζεται μάγμα. Αυτό είναι πιο ελαφρύ από το στερεό πέτρωμα του περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα, λόγω της άνωσης και της πίεσης των αερίων και έτσι να οδηγείται προς τα πάνω με δυνατότητα διείσδυσης εντός των ζωνών ασυνεχειών (ρήγματα) στο φλοιό της Γης. Αυτή είναι η έναρξη της ηφαιστειακής έκρηξης (Dominey-Howes et al, 2000). Στην επόμενη φωτογραφία (εικόνα 2.9) φαίνεται η έκλυση αερίων, λίγο πριν εκδηλωθεί το φαινόμενο του ηφαιστείου.



Εικόνα 2.9: Φωτογραφία λίγο πριν την έκρηξη του ηφαιστείου Αυγουστίνου.
Πηγή:(www.liberal.gr)

Η διαφυγή των αερίων, στην περίπτωση λεπτόρρευστου μάγματος, επιτυγχάνεται εύκολα κατά την έξοδο του μάγματος από το ηφαίστειο. Όταν όμως, η μορφή του μάγματος είναι παχύρρευστη τότε είναι αδύνατη η εύκολη διαφυγή των αερίων από το ηφαίστειο, με αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης μέχρι ότου να προκύψει η βίαιη διαφυγή, δηλαδή η έκρηξη. Εφόσον το μάγμα εκρήγνυται, σπάει σε μικρότερα κομμάτια, την λεγόμενη τέφρα. Το μέγεθος της τέφρας παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση, από πολύ μικρά σωματίδια στάχτης έως ογκόλιθους με μέγεθος αρκετών κυβικών μέτρων. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι ηφαιστειακές εκρήξεις γίνονται αιφνίδια, χωρίς κάποια προειδοποίηση εκδήλωσης του φαινομένου, υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπου εμφανίζονται μερικά πρόδρομα φαινόμενα του συγκεκριμένου γεωκινδύνου.

2.5.3 Τύποι Ηφαιστείων

Οι κύριοι τύποι ηφαιστείων είναι:

- ◆ Ασπιδωτά: Συνδέονται με βασαλτικό μάγμα.
- ◆ Στρωματοηφαίστεια: Συνδέονται με ανδεσιτικό μάγμα.
- ◆ Ηφαίστεια ασβόλης: Αποτελούνται μόνο από πυροκλαστικά υλικά.

- Οι κύριες δομές που παρατηρούνται στα ηφαίστεια είναι οι κρατήρες, οι δόμοι λάβας και οι καλδέρες.
- Μαξιλαροειδείς λάβες είναι μία ιδιαίτερη μορφή λάβας που σχηματίζεται από υποθαλάσσιες εκχύσεις.
- Τα πυροκλαστικά υλικά είναι τα υλικά εκείνα που εξέρχονται του ηφαιστειακού σωλήνα και μπορεί να είναι ηφαιστειακή σποδός, τέφρα, πυροκλαστικές ροές, lahar, λασποροές, λάβα, οβίδες, κ.ά. (Sripas Pavlidis)

2.5.4 Τύποι Μάγματος

Διακρίνονται τρεις τύποι μάγματος, ανάλογα με την σύστασή τους:

- Βασαλτικό
- Ανδεσιτικό
- Ρυολιθικό

A) Βασαλτικού τύπου είναι περίπου το 80% του μάγματος, τα αντίστοιχα ηφαίστεια όμως συνήθως δεν γίνονται αντιληπτά γιατί η πλειοψηφία τους βρίσκεται στον πυθμένα των ωκεανών, εκτός ορισμένων χαρακτηριστικών περιπτώσεων (Χαβάη, Ισλανδία, κ.ά.).

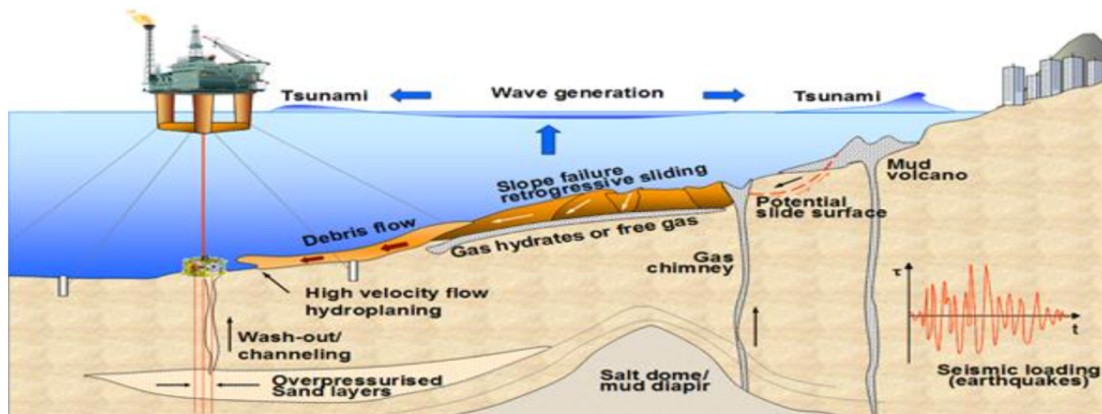
B) Ανδεσιτικού τύπου είναι περίπου το 10% του μάγματος, και τα αντίστοιχα ηφαίστεια βρίσκονται διατεταγμένα κυρίως κατά μήκος των ζωνών λιθοσφαιρικής σύγκλισης (π.χ. το Ελληνικό Ηφαιστειακό Τόξο).

Γ) Ρυολιθικού τύπου είναι περίπου το υπόλοιπο 10% του μάγματος. Το περισσότερο μάγμα του τύπου αυτού δεν φτάνει στην επιφάνεια. Οι πιο επικίνδυνες εκρήξεις είναι αυτές στις οποίες το μάγμα έχει μικρή ρευστότητα και πολλά διαλυμένα αέρια. Όσο πιο όξινο είναι το μάγμα, τόσο πιο επικίνδυνο είναι (Spyros. Pavlidis).

2.6.1 Γεωκίνδυνοι στον Ελλαδικό χώρο και στη Μεσόγειο

Όπως προαναφέραμε η Ελλάδα αποτελεί μία από τις χώρες του πλανήτη όπου οι γεωκίνδυνοι κάνουν την εμφάνισή τους με μεγάλη συχνότητα. Τόσο στο χερσαίο τμήμα όσο και στο θαλάσσιο χώρο μπορεί να υπάρξει σεισμική ή ηφαιστειακή δραστηριότητα ή κατολισθήσεις που προκαλούν μεγάλες καταστροφές. Πολλά τέτοια γεγονότα έχουν εκδηλωθεί στην Μεσόγειο, μια περιοχή που φημίζεται για την εμφάνιση υψηλών συχνοτήτων σεισμικής και ηφαιστειακής δραστηριότητας.

Τα πιο πολλά από αυτά τα φαινόμενα που εκδηλώνονται στη Μεσόγειο αποτυπώνονται στην (εικόνα 2.10), και μπορεί να σχετίζονται με γεωλογικές διαδικασίες που συνδέονται με τα όρια των πλακών και τα ενεργά ρήγματα ή την αστοχία πραινών, με αποτέλεσμα τη βύθιση παράκτιων περιοχών. (Sakellariou et al., 2011)



Εικόνα 2.10: Σχηματικό διάγραμμα που παρουσιάζει κύριους τύπους υπεράκτιων Γεωκινδύνων.
Πηγή: (Nadim and Kvalstad, Risk Assessment and Management for Offshore Geohazards. International Centre for Geohazards / Norwegian Geotechnical Oslo Norway, 2007).

Ο σημερινός σχηματισμός της Μεσογείου είναι αποτέλεσμα της καταβύθισης της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική πλάκα. Οι γεωλογικές διεργασίες που έχουν διεξαχθεί κατά τους παρελθοντικούς χρόνους, έχουν συντελέσει όχι μόνο στην αύξηση της ηφαιστειακής δραστηριότητας του τόξου αλλά και στην ενίσχυση της σεισμικότητας σε διακριτές περιοχές (Papadopoulos et al, 2007). Στην παρακάτω δορυφορική λήψη (εικόνα 2.11) παρατηρούμε την σημερινή μορφή της Μεσογείου.



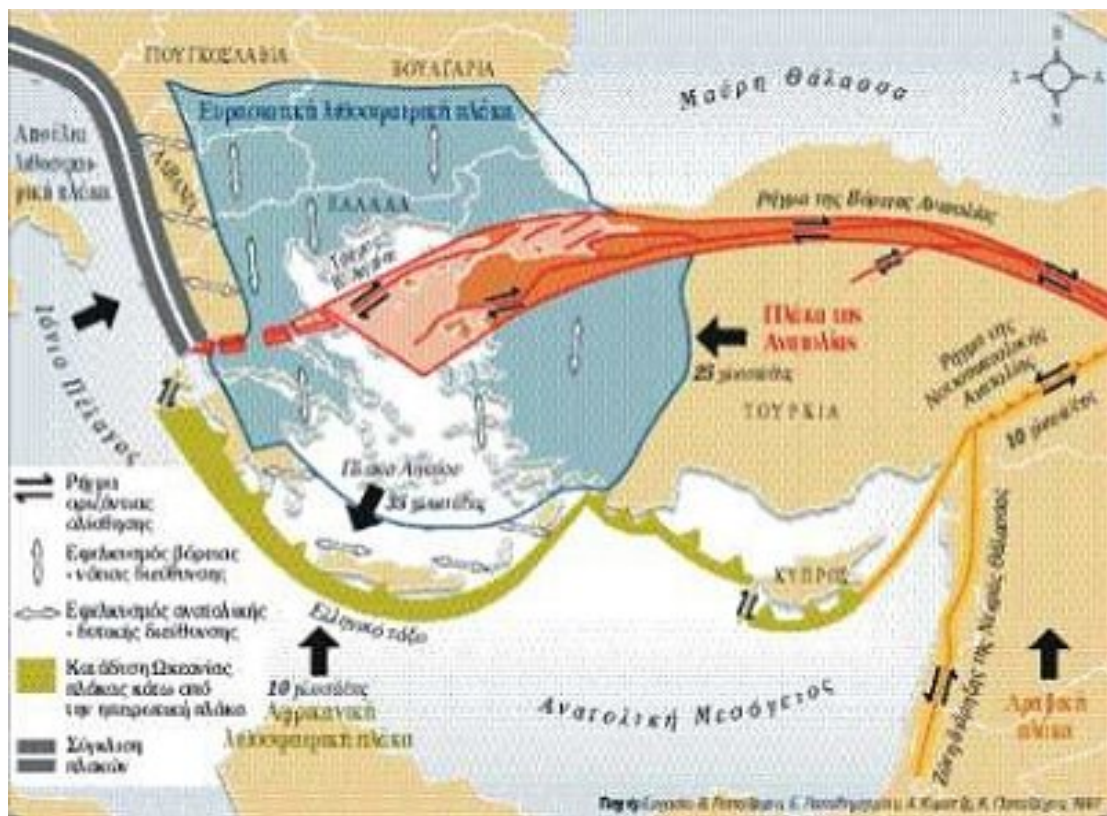
Εικόνα 2.11: Η σημερινή μορφή της Μεσογείου.
Πηγή: (el.wikipedia.org)

2.6.2 Η σεισμική δραστηριότητα στην Ελλάδα και την Μεσόγειο

Τα πιο συχνά και επικίνδυνα φαινόμενα που γίνονται στην Ελλάδα και στη ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου είναι οι σεισμοί. Η σεισμικότητα στην Γη εξαρτάται από την κύρια γεωδυναμική διαδικασία, δηλαδή την συνεχή κίνηση των άκαμπτων λιθοσφαιρικών πλακών. Ο μηχανισμός αυτός είναι αρκετά δραστήριος στην περιοχή της Μεσογείου, όπου σημειώνονται αλληλεπιδράσεις μεταξύ της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής πλάκας όπως φαίνεται στην (εικόνα 2.12), ενώ ταυτόχρονα κάποιες μικρότερες πλάκες συνεισφέρουν με αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφόρων σεισμοτεκτονικών στυλ (Sakellariou et al., 2011):

Συμπύεση λόγω λιθοσφαιρικής σύγκλισης στην Ιβηρική χερσόνησο και την Αλγερία:

- 1) Το τόξο της Καλαβρίας στην Ιταλία
- 2) Του ελληνικού τόξου στην Ελλάδα
- 3) Του Κυπριακού τόξου στην λεκάνη της Λεβαντίνης
- 4) Στα Απέννινα και στο στενό της Μεσίνας στην Ιταλία
- 5) Στη διώρυγα της Κορίνθου στην κεντρική Ελλάδα



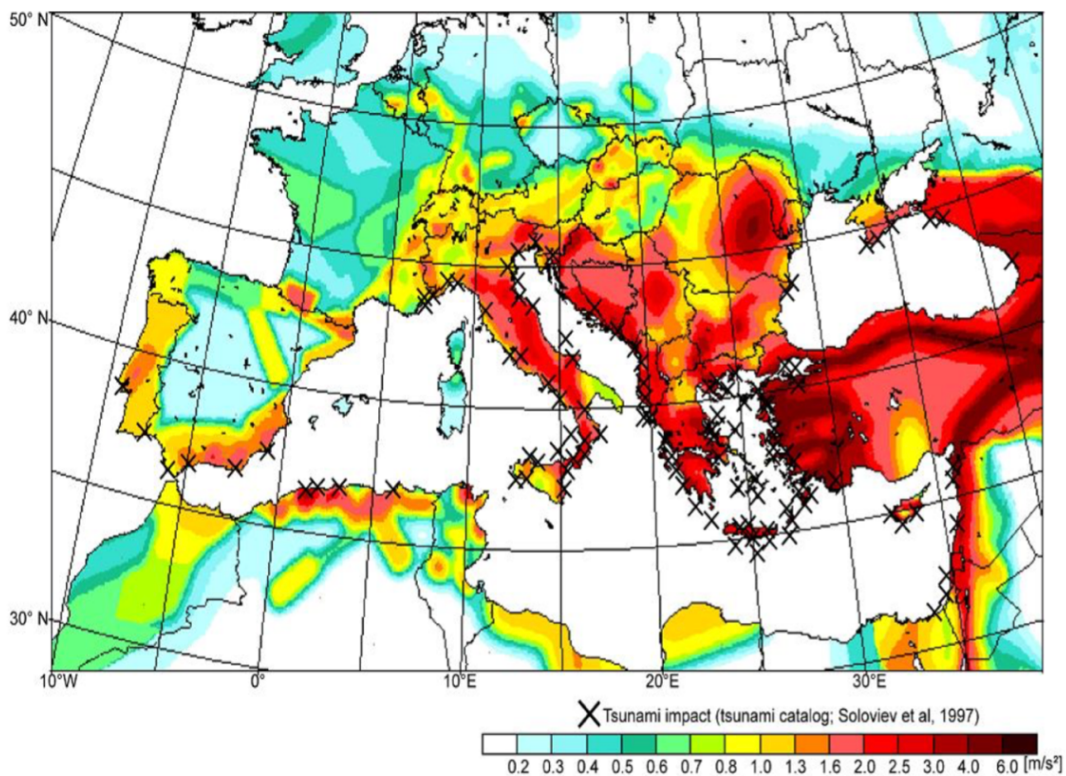
Εικόνα 2.12: Σχήμα όπου φαίνονται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ λιθοσφαιρικών πλακών και τα ενεργά ρήγματα της περιοχής.

Πηγή: (www.seismoi-live.gr)

Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της σεισμικότητας είναι σχετικά ρηχό και εμφανίζεται στο ανώτερο στρώμα της λιθόσφαιρας περίπου στα 30 με 40 χιλιόμετρα. Στην Ισπανία όμως έχουν καταγραφεί βαθύτεροι σεισμοί έως και 660 χιλιόμετρα περίπου. Στις ζώνες καταβύθισης της Καλαβρίας έως 350 χιλιόμετρα, στο ελληνικό τόξο έως 180 χιλιόμετρα και στο κυπριακό τόξο έως 120 χιλιόμετρα.

Τέλος, οι παράκτιες ζώνες της Ρόδου και της Κρήτης αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα των σεισμών λόγω σύγκλισης της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής πλάκας κατά μήκος του τόξου της Μεσογείου (Stiros, 2010).

Το τσουνάμι συνδέεται άρρηκτα με τη σεισμική δραστηριότητα. Ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει στην ακτή είναι πολύ σύντομος με αποτέλεσμα ο αντίστοιχος χρόνος προετοιμασίας να είναι ελάχιστος για την αποφυγή θυμάτων σε παράκτιες περιοχές. Τα υψηλά κύματα που δημιουργούνται μπορεί να φτάσουν στην κοντινότερη ακτή σε μόνο λίγα λεπτά. Στον παρακάτω χάρτη (εικόνα 2.13) με χρωματισμούς απεικονίζεται η σεισμική επικινδυνότητα ενώ με X σηματοδοτούνται τα ανιχνεύσιμα τσουνάμι στη Μεσόγειο. Ένα από αυτά είναι το τσουνάμι στο Στρόμπολι το 2002 που προκλήθηκε από 15 εκατομμύρια κυβικά μέτρα υποβρύχιας κατολίσθησης κατά μήκος της Sciara del Fuoco, χρειάστηκε λιγότερο από τρία λεπτά για να φτάσει στην ακτή του νησιού, και πέντε λεπτά για να χτυπήσει τις ακτές Rapaera σε απόσταση είκοσι χιλιομέτρων από την πηγή.

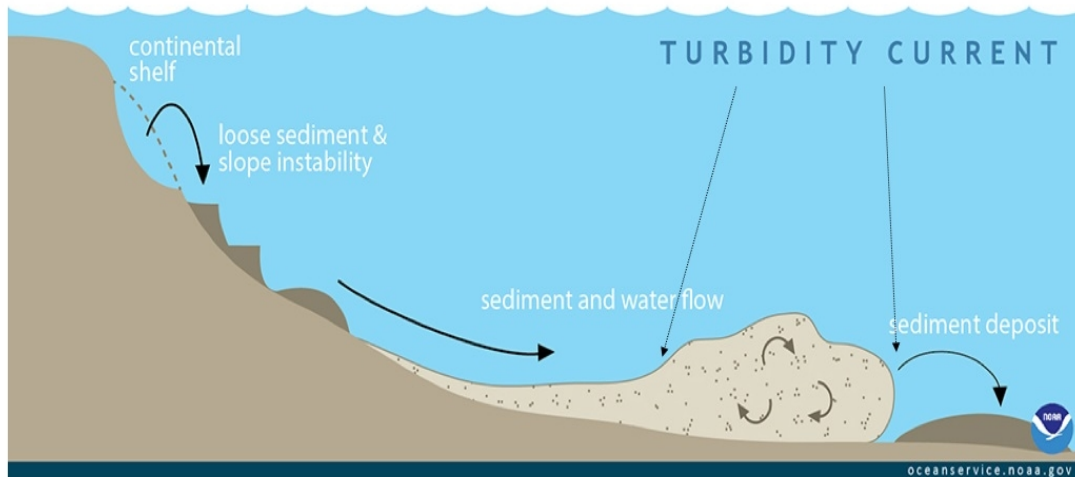


Εικόνα 2.13: Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας στην Ευρώπη χρωματισμένος βάσει μέγιστης επιτάχυνσης του εδάφους με πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 χρόνια και σηματοδότηση (X) περισσότερων από 250 ανιχνεύσιμων τσουνάμι στη περιοχή της Μεσογείου για το διάστημα 1500-1990 (Stozyk, 2009). Πηγή: (www.seismoi-live.gr)

2.6.3 Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις στην Μεσόγειο

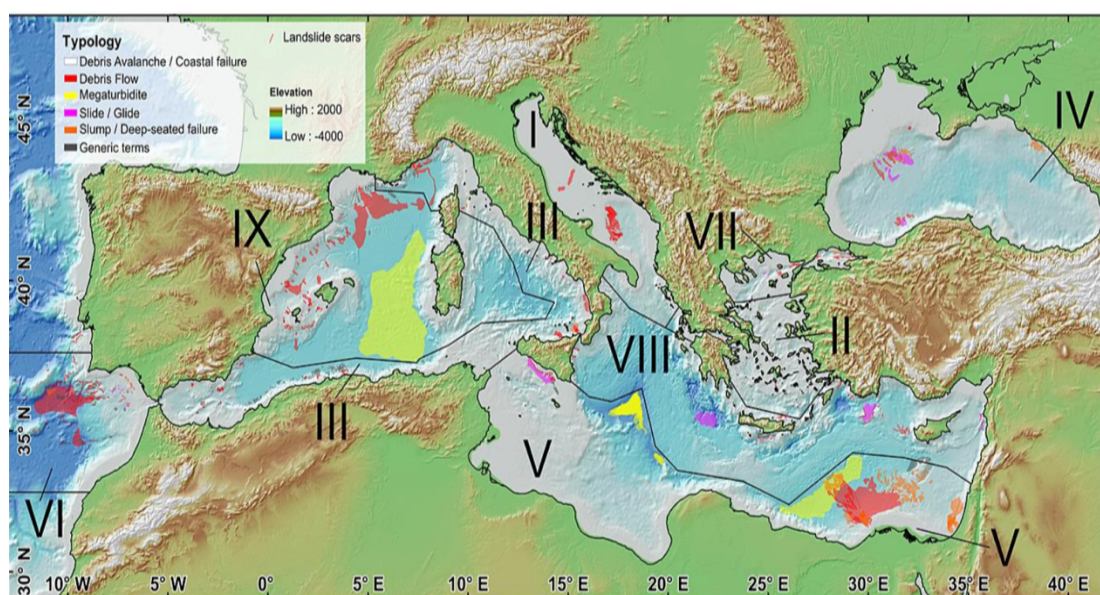
Η Μεσόγειος αποτελείται από απότομες και ηπειρωτικές όχθες, που στην πλειοψηφία τους είναι τεκτονικά ενεργές και περιέχουν μικρά βουνά που διατρέχονται από ποτάμια και σε μεγάλο βαθμό επηρεάζονται από διάφορες διαδικασίες ανεπάρκειας κλίσης. Γύρω από την λεκάνη της Μεσόγειο έχουν αναφερθεί σε βιβλιογραφία περίπου 600 σημεία που έχουν σχέση με υποθαλάσσιες κατολισθήσεις και σχεδόν τον ίδιο αριθμό μαζικής αστοχίας ιζημάτων (Camerlengi et al. 2010). Αυτά τα σημεία βρίσκονται

συνήθως τόσο σε τεκτονικά ενεργές περιοχές, όσο βρίσκονται σε πιο «ήσυχες» περιοχές και έχουν ενεργοποιηθεί σε ρηγά νερά (50-100 m) έως και 2 χιλιόμετρα. Ο όγκος των ιζημάτων κυμαίνεται από λιγότερο από 0.001 km³ σε περισσότερο από 1.000 km³. Στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 2.14) αναπαρίσταται η εκδήλωση μίας υποθαλάσσιας κατολίσθησης.



Εικόνα 2.14: Σχηματική απεικόνιση κατά την οποία εκδηλώνεται μία υποθαλάσσια κατολίσθηση. Πηγή: (blog.mares.com)

Οι κατολισθήσεις που έχουν χρονολογηθεί μέχρι σήμερα με ακρίβεια είναι λιγιστές. Ωστόσο με τα δεδομένα που υπάρχουν μέχρι σήμερα, έχει χαρακτηριστεί η Μεσόγειος από ζώνες διαφορετικής βαθμίδας κατολισθήσεων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 2.15). 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 η υπάρχει η άγνοια για τις σύγχρονες, ενεργές, αστοχίες όπως της Καλαβρίας που επηρέασε το Ιόνιο (Cramicola et al, 2010, Planinsek et al, 2011), από τις οποίες θα μπορούσαν να προκύψουν πολύτιμες παράμετροι που θα συνείσφεραν στην καλύτερη κατανόηση των κατολισθήσεων.



Εικόνα 2.15: Χάρτης απεικόνισης της κατανομής κατολισθήσεων στη Μεσόγειο θάλασσα σύμφωνα με την τυπολογία του βυθομετρικά σκιασμένου ανάγλυφου. Πηγή: (Urgeles & Camerlmgghi, 2013).

Στο παρελθόν έχουν σημειωθεί περιστατικά κατά τα οποία έχουν προκληθεί κύματα τσουνάμι, από κατολίσθηση όγκου ιζημάτων με σημαντικές επιπτώσεις κατά μήκος της ακτογραμμής. Η διαφορά του τσουνάμι από κατολίσθηση με το τσουνάμι από σεισμό 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 μία 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 πρυνών (Sakellariou et al., 2015):

1. Τεκτονικοί παράγοντες που σχετίζονται με την 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 την 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 προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι γεωκίνδυνοι είναι φαινόμενα τα οποία ο άνθρωπος στον μεγαλύτερο βαθμό τους δεν μπορεί να τα προβλέψει και ανάλογα την ένταση τους να τα αντιμετωπίσει. Γι' αυτό τον λόγο αποφασίζει να δραστηριοποιηθεί με τρόπους που μπορεί να υποβοηθήσουν ή να επιτείνουν έναν γεωκίνδυνο.

Η Μεσόγειος αποτελεί μία από τις πιο σεισμογενής περιοχή στην Ευρώπη, βρίσκεται επάνω από ρήγματα και περιέχει επιπλέον στην λεκάνη της, υποθαλάσσια ηφαίστεια. Έτσι καθίσταται αναγκαίο σε κάθε σχεδιασμό έργου να γίνεται συνεχής έλεγχος των εργασιών κατά την εκτέλεση τους. Το σημείο χωροθέτησης κάθε τέτοιου τεχνικού έργου είναι από τα σημαντικότερα ζητήματα, ενώ σε περιοχές υψηλής πίεσης κοντά σε ρήγματα η τοποθέτηση τεχνικού έργου είναι απαγορευτική.

2.6.4 Κατολισθήσεις στον ελλαδικό χώρο

Ο Ελληνικός χώρος χαρακτηρίζεται από γεωμορφολογική και γεωλογική πολυμορφία. Το γεγονός αυτό εξηγεί το μεγάλο αριθμό κατολισθήσεων-καθιζήσεων (μόνο κατά μήκος του οδικού δικτύου έχουν καταγραφεί επίσημα πάνω από 500 περιπτώσεις τα τελευταία 50 χρόνια).

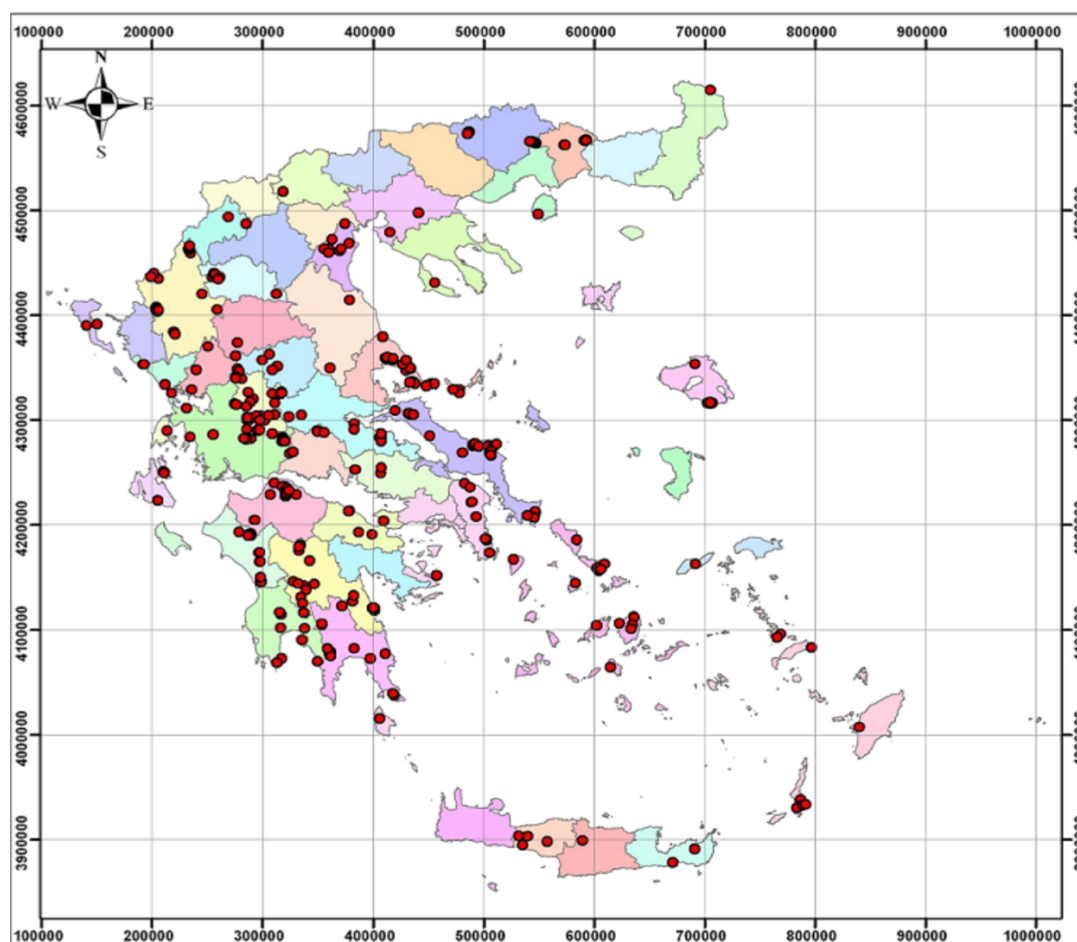
Ειδικά για τον Ελληνικό χώρο, αιτίες που οδηγούν σε συχνή εμφάνιση κατολισθήσεων ή καθιζήσεων είναι:

1. Οι μεγάλες μορφολογικές κλίσεις σε πολλά σημεία της χώρας.
2. Η έντονη τεκτονική παραμόρφωση. Το σημείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό και συνδέεται και με την υψηλή σεισμικότητα της χώρας μας. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι μεγάλος αριθμός κατολισθήσεων συνδέεται με σεισμικά γεγονότα (π.χ. Μήλος 1992, Γρεβενά 1995, Αθήνα 1999).
3. Τα μικρά μεγέθη των γεωτεχνικών παραμέτρων των γεωλογικών σχηματισμών.
4. Οι ανθρώπινες παρεμβάσεις, οι οποίες συχνά γίνονται αλόγιστα και χωρίς μελέτη ή προγραμματισμό και οδηγούν στην αποψίλωση των δασών, στην άστοχη διαμόρφωση πρυνών ή στην αφαίρεση της υποστήριξης των πρυνών, στην υπεράντληση των υδροφόρων οριζόντων κ.α.

Όσον αφορά την ταξινόμηση των κατολισθήσεων στον Ελληνικό χώρο, με βασικό κριτήριο τη φύση του υλικού, θα μπορούσαν οι κινήσεις αυτές να αναφερθούν σε τρεις λιθολογικές ενότητες, ανάλογα με την ταξινόμηση Zaruba – Mencl (1969,1976) και Hoek – Bray (1977) για βραχώδεις σχηματισμούς ως εξής:

- α) Τεταρτογενείς αποθέσεις.
- β) Τριτογενή αργιλομαργαϊκά ιζήματα.
- γ) Παλαιότεροι βραχώδεις σχηματισμοί.

Στον επόμενο χάρτη (εικόνα 2.16) με κόκκινες κουκκίδες σημειώνεται η κατανομή των θέσεων των κατολισθήσεων πανελλαδικά. Οι πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις κατολισθήσεων κατά μήκος του εθνικού οδικού δικτύου είναι αυτή της Ε.Ο. Αθηνών - Λαμίας στη Μαλακάσα και της Ε.Ο. Κορίνθου -Πατρών στη θέση Παναγοπούλα. Και στις δύο περιπτώσεις χρειάστηκε μεγάλο οικονομικό κόστος όσο αφορά την επέμβαση και αποκατάσταση των συγκοινωνιών.



Εικόνα 2.16: Κατανομή των θέσεων των κατολισθήσεων στον Ελλαδικό χώρο.
Πηγή: (Σχολικό βιβλίο Β' Γυμνασίου)

2.6.5 Υποθαλάσσια ηφαιστεια της Μεσογείου

Η καταβύθιση της Μεσογείου είναι στενά συνδεδεμένη με την ηφαιστειακή δραστηριότητα που εμφανίζεται στις θάλασσες του Αιγαίου και το Τυρρηνικό πέλαγος 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 βρίσκονται ακόμη σε εξέλιξη. Είναι ευρέως γνωστό ότι ένα ποσοστό των τσουνάμι σε όλο τον κόσμο συνδέονται άρρηκτα με τα ηφαίστεια.

Οι ηφαιστειακοί μηχανισμοί που προκαλούν τσουνάμι συνδέονται με το σχηματισμό της καλντέρας, την κατάρρευση του ηφαιστείου οικοδομήματος, των πυροκλαστικών ροών, τα ζεστά κύματα που δημιουργούνται κατά την διάρκεια της έκρηξης, ακόμα και στην αστοχία των ηφαιστειακών κοιτασμάτων αμέσως μετά την εναπόθεση 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. Πολλά από αυτά τα ηφαίστεια του Αιολικού είναι ενεργά, όπως λόγω χάρη το γνωστό ηφαίστριο Stromboli (εικόνα 2.17), που εξαιτίας των συνεχιζόμενων διαλειπόντων εκρήξεων του ήταν γνωστό στην αρχαιότητα ως «Φάρος της Μεσογείου». Το 2002 ξεκίνησε μια περίοδος αναταραχής, πέρα από την δραστηριότητα του παρελθόντος γεγονός που αποδεικνύει την ύπαρξη κινδύνου και σήμερα.



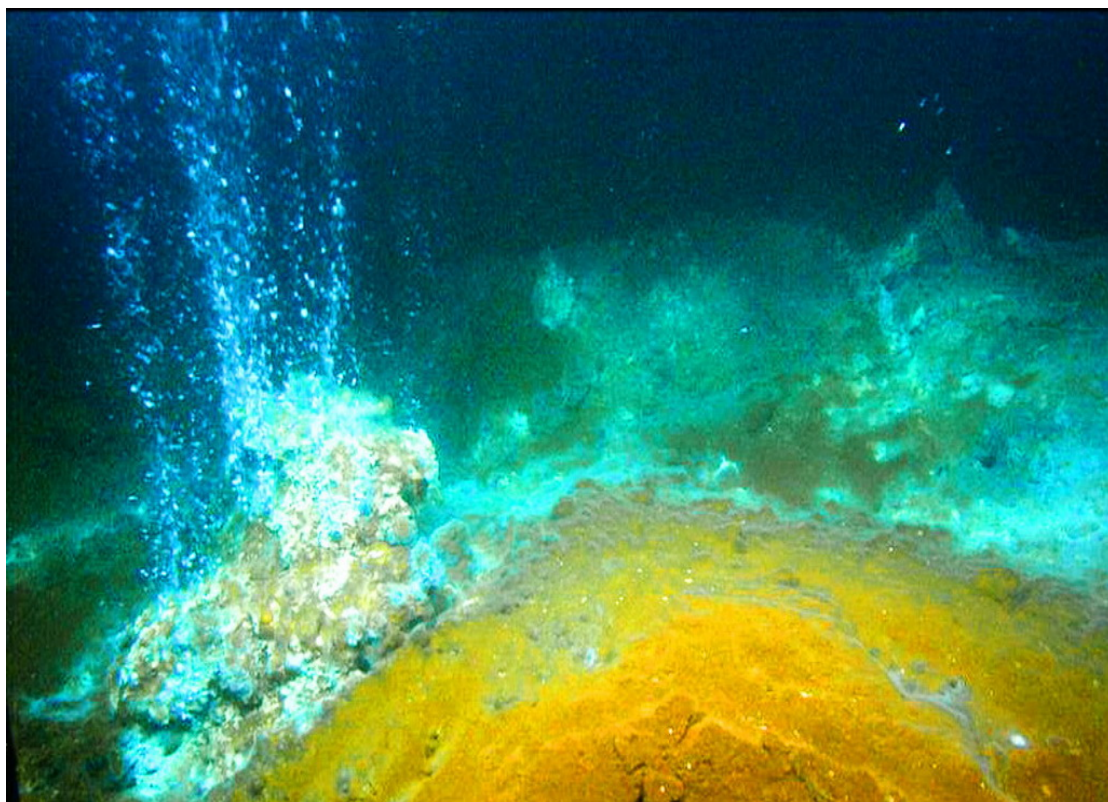
Εικόνα 2.17: Φωτογραφία του νήσου Stromboli που αποτελεί το ένα από τα νησιά του Τυρρηνικού πελάγους με ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Πηγή: (el.wikipedia.org)

Άλλη ηφαιστειακή περιοχή της Μεσογείου αποτελεί το Στενό της Σικελίας. Υπάρχουν πολλές ιστορικές αναφορές σχετικά με την υποθαλάσσια ηφαιστειακή δραστηριότητα στην συγκεκριμένη περιοχή. Οι πιο πρόσφατες εκρήξεις που εκδηλώθηκαν οδήγησαν στο σχηματισμό δύο εφήμερων νήσων, του 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 χιλιόμετρα βόρεια της Ελληνικής Τάφρου, και οριοθετείται από τέσσερα κύρια ηφαιστειακά πεδία στο Νότιο Αιγαίο και συγκεκριμένα τα Πόρο-Μέθανα-Αίγινα, Μήλος, Σαντορίνη-Κολούμπος, και Νίσυρος-Κως.

Στα Ελληνικά χωρικά ύδατα, οι πιο σημαντικές εκρήξεις που έχουν καταγραφεί στην ιστορία έχουν εμφανιστεί στο πεδίο της Σαντορίνης – Κολούμπου. Η πιο πρόσφατη ιδιαίτερος σημαντική, ήταν η μινωική έκρηξη του ηφαιστείου της Σαντορίνης, που έλαβε χώρα τον 17ο αιώνα π.Χ. και θεωρείται ότι ήταν ο κύριος λόγος για την παρακμή του Μινωικού πολιτισμού στην Κρήτη (Sakellariou et al.,2011). Ο Κολούμπος (εικόνα 2.18) είναι ένα υποθαλάσσιο ηφαιστείο που αποτελεί στολίδι στο πυθμένα του Αιγαίου, δυστυχώς όμως στην περίπτωση των μηχανικών πρέπει να αντιμετωπιστεί ως μία μορφή γεωκινδύνου.



Εικόνα 2.18: Κολούμπος, υποθαλάσσιο ηφαιστείο κοντά στην Σαντορίνη.
Πηγή:(doryforos.gr)

Ωστόσο, έχουν σημειωθεί και πιο πρόσφατες εκρήξεις. Μία από αυτές έλαβε χώρα τον Σεπτέμβριο του 1659 και συνδέεται άμεσα με το υποθαλάσσιο ηφαιστείο Κολούμπος που βρίσκεται λίγα μίλια βορειοανατολικά της Σαντορίνης. Εκτιμάται ότι υπήρξαν δεκάδες θύματα λόγω των ηφαιστειακών αερίων ενώ μετά την έκρηξη προκλήθηκε 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-Howers et al., 2000).

Ο Κολούμπος βρίσκεται περίπου 18 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του νερού ενώ το ύψος του ανέρχεται στα 280 μετρά σε σχέση με τον περιβάλλοντα πυθμένα. Ο κρατήρας του έχει διάμετρο περίπου 3 χιλιομέτρων και βάθος 512 μέτρων. Σε μεγάλη έκταση περιμετρικά από το ηφαιστείο έχουν εντοπιστεί υδροθερμικά φρέατα από τα οποία αναβλύζει καυτό νερό έως και 220° με διαλυμένα μεταλλικά στοιχεία, μία κατάσταση που αποδεικνύει έμπρακτα ότι ο Κολούμπος είναι ενεργός.

Κεφάλαιο 3: Ενεργά Ρήγματα

3.1 Εισαγωγή

Το κύριο αντικείμενο μελέτης αυτής της διπλωματικής αποτελούν τα ρήγματα. Ρήγμα θεωρείται μία ασυνέχεια του φλοιού της Γης, η οποία προκαλεί μετατόπιση των τεμαχίων εκατέρωθέν της. Τα ρήγματα, σε όλες τις κλίμακες εμφάνισης (από μερικές δεκάδες μέτρα μέχρι ρηξιγενείς ζώνες που τέμνουν όλη τη λιθόσφαιρα) και όλων των κατηγοριών και τύπων (κανονικά, ανάστροφα, οριζόντιας ολίσθησης, μικρής ή μεγάλης γωνίας κλίσης, επωθήσεις ή αποκολλήσεις, θραυσιγενούς χαρακτήρα ή ζώνες διάτμησης και ανενεργά ή ενεργά και σεισμικά) αποτελούν από τις πιο ενδιαφέρουσες και κυρίαρχες δομές στην τεκτονική δομή μιας περιοχής. Τα ρήγματα δημιουργούνται λόγω των τάσεων που ασκούνται στο φλοιό από τις μετακινήσεις των λιθосφαιρικών πλακών. Κάθε κίνηση ενός ρήματος δημιουργεί ένα σεισμό. Ενεργό ρήγμα χαρακτηρίζεται το ρήγμα εκείνο το οποίο έχει αποδεδειγμένα προκαλέσει σεισμό κατά τα τελευταία 125.000 έτη ή/και έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει έναν νέο.

3.2 Ενεργά σεισμικά Ρήγματα

Ο Reid το 1910 διατύπωσε την θεωρία κατά την οποία η δημιουργία επιφανειακού σεισμού αποδίδεται στη συνεχή ελαστική παραμόρφωση των πετρωμάτων, εξαιτίας της συσσώρευσης μεγάλης ποσότητας δυναμικής ενέργειας (ενέργειας ελαστικής παραμόρφωσης). Τη στιγμή που οι τάσεις φτάνουν να είναι μεγαλύτερες από την αντοχή του πετρώματος τότε σημειώνεται θραύση και μετακίνηση των δυο τεμαχίων προς μία καθορισμένη διεύθυνση πάνω σε μία συγκεκριμένη επιφάνεια. Αυτή η επιφάνεια ολίσθησης ονομάζεται 'ρήγμα' ενώ η περιοχή γύρω από την οποία συμβαίνει η συγκέντρωση των τάσεων ονομάζεται 'σεισμογόνος χώρος' (Kramer, 1996).

Το ρήγμα λοιπόν, ορίζεται ως η αιφνίδια διακοπή της συνέχειας των πετρωμάτων, εξαιτίας θραύσεως διαμήκους της επιφάνειας διάρρηξης. Αμέσως μετά την εκδήλωση του ρήματος, παρατηρείται σχετική μετακίνηση των δύο «πλευρών» εκατέρωθεν της επιφάνειας διάρρηξης. Η μετατόπιση γίνεται άνωθεν της διαρρηγνυόμενης επιφάνειας, οι δε δύο πλευρές ονομάζονται ρηξιτεμάχη ή τεμάχη απλώς. Η δημιουργία νέων ρηγμάτων συνδέεται άρρηκτα με την εμφάνιση σεισμών. Είναι γνωστό όμως, ότι πλέον οι ισχυροί σεισμοί οφείλονται κατά κύριο λόγο σε συσσωρευμένες τάσεις γύρω από παλαιά ρήγματα και όχι στη δημιουργία νέων. Επιφανειακά ίχνη ρηγμάτων που προκάλεσαν ισχυρούς σεισμούς, παρέχοντας ταυτόχρονα επιτόπια μελέτης, υπάρχουν, όπως για παράδειγμα το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα (εικόνα 3.1), στην Καλιφόρνια ή το γνωστό ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας.

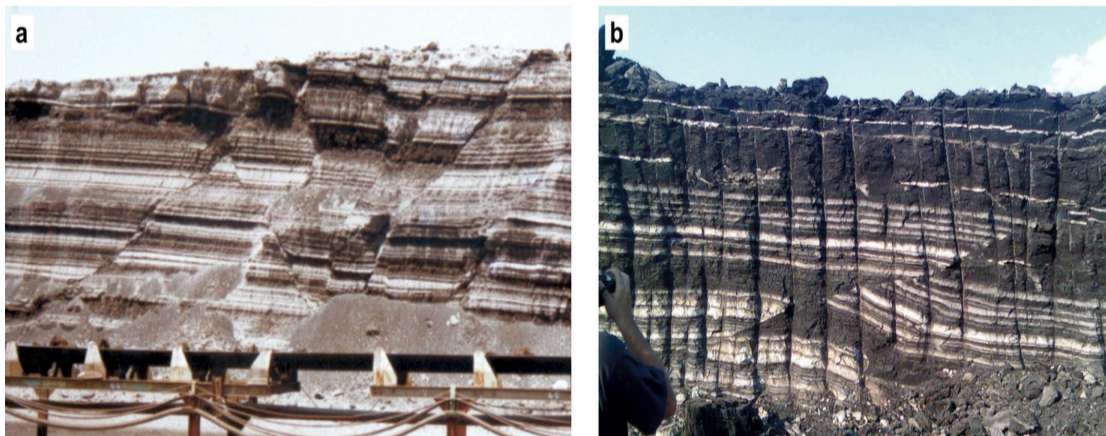


Εικόνα 3.1: Ίχνος στην επιφάνεια της Γης, ρήγμα του Αγίου Ανδρέα (Καλιφόρνια).
Πηγή: (www.geodifhs.com)

Ωστόσο, η πλειοψηφία των ρηγμάτων δεν εμφανίζουν επιφανειακό ίχνος και η μελέτη τους στηρίζεται σε μεθόδους καταγραφής και μελέτης διάφορων τύπων σεισμικών κυμάτων, μέσω των οποίων εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με το επίπεδο του ρήγματος, την διεύθυνση και το είδος της διάρρηξης, καθώς και του μεγέθους μετάθεσης.

3.3 Αναγνώριση ρηγμάτων στην ύπαιθρο

Στην ύπαιθρο πολλές φορές είναι δύσκολο να αποφανθεί κανείς για το όριο ανάμεσα σε δύο γεωλογικούς σχηματισμούς, αν αυτό αντιπροσωπεύει ένα ρήγμα, με την ευρεία έννοια του όρου, δηλαδή είτε πρόκειται για οριζόντιο απωθητικό ρήγμα, είτε για κανονικό, μεγάλης κλίσης, είτε για ζώνη του ανώτερου τμήματος του φλοιού με κατακλαστικά πετρώματα, είτε για μια ζώνη διάτμησης με πλαστικού χαρακτήρα μυλονιτικές δομές, που έχει δημιουργηθεί σε βαθύτερους τεκτονικούς ορόφους. Η αναγνώριση των ρηγμάτων στην ύπαιθρο δεν είναι τόσο εύκολη υπόθεση πάντοτε, ειδικά στην περίπτωση ανενεργών ρηγμάτων που φέρνουν σε επαφή όμοιους λιθολογικά σχηματισμούς. Στην περίπτωση αυτή, η διάβρωση εξομαλύνει κάθε μορφολογική ασυνέχεια που δημιουργεί το ρήγμα, με αποτέλεσμα να μη μπορούμε να παρατηρήσουμε όχι μόνο κατοπτρική επιφάνεια, αλλά ούτε και κρημνό κατά μήκος του ρήγματος.



Εικόνα 3.2: Στις φωτογραφίες φαίνεται η απότομη διακοπή και μετάθεση της στρώσης, αλλά και η επανάληψη ή παράλειψη στρωμάτων, που οφείλεται στην πλειονότητα των περιπτώσεων σε ρήγματα, είτε κανονικού χαρακτήρα (αριστερή φωτογραφία) είτε απωθητικού χαρακτήρα (δεξιά φωτογραφία).

Πηγή: (opencources.uoa.gr)

Η παρουσία ενός ρήγματος εντοπίζεται καλύτερα όταν αυτό εμφανίζεται σε φυσική ή τεχνητή τομή. Στην περίπτωση αυτή, όχι μόνο μπορούμε να το παρατηρήσουμε σχετικά εύκολα, αλλά μπορούμε και να μετρήσουμε τόσο τα στοιχεία του (διεύθυνση και κλίση της επιφανείας του και ενδεχομένως πλαγιοβύθιση ή διεύθυνση γραμμών ολίσθησης), όσο και τα χαρακτηριστικά του.

Στην περίπτωση που η άμεση παρατήρηση ενός ρήγματος δεν είναι εφικτή, καταφεύγουμε στον εντοπισμό ορισμένων στοιχείων, η ύπαρξη των οποίων υποδηλώνει την παρουσία ρήγματος. Τα κριτήρια αναγνώρισης των ρηγμάτων μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες (Twiss & Moores, 1992):

- Εγγενή χαρακτηριστικά των ρηγμάτων.
- Συνέπειες της ρηγμάτωσης σε γεωλογικές ή στρωματογραφικές ενότητες.
- Αποτελέσματα της ρηγμάτωσης στη μορφολογία και το ανάγλυφο.

3.4 Εγγενή χαρακτηριστικά των ρηγμάτων

Τα εγγενή χαρακτηριστικά των ρηγμάτων περιλαμβάνουν όλες αυτές τις δομές που αναπτύσσονται στη ζώνη του ρήγματος και το περιβάλλον της, δηλαδή τη ζώνη του πετρώματος που επηρεάζεται από τη διάρρηξη και έχουν σχέση με τη δημιουργία του και τον μηχανισμό γένεσής του. Κατά κύριο λόγο με την έννοια ρήγμα αναφερόμαστε στις περιπτώσεις που ο μηχανισμός της διάρρηξης είναι θραυστιγενούς χαρακτήρα, δηλαδή όταν το ρήγμα εντοπίζεται στο ανώτερο τμήμα της λιθόσφαιρας. Για τις περιπτώσεις που η διάρρηξη έχει λάβει χώρα σε βαθύτερα τμήματα της λιθόσφαιρας, όπου οι συνθήκες παραμόρφωσης είναι πλαστικού ή πλαστικοθραυστιγενούς χαρακτήρα, χρησιμοποιείται ο όρος ζώνη διάτμησης. Προφανώς υπάρχουν περιπτώσεις που μια μεγάλη ρηξιγενής ζώνη τέμνει το σύνολο της λιθόσφαιρας με ένα ανώτερο τμήμα να χαρακτηρίζεται από θραυστιγενή χαρακτηριστικά, ένα κατώτερο με όλκιμο (πλαστικού) χαρακτήρα δομές και μια ζώνη μετάβασης με πλαστικοθραυστιγενούς χαρακτήρα παραμόρφωση. Πιο συγκεκριμένα, τα εγγενή χαρακτηριστικά των ρηγμάτων περιλαμβάνουν (Fossen, 2010):

- Τον πυρήνα του ρήγματος με τη χαρακτηριστική παρουσία κατακλαστικών πετρωμάτων (συνήθως τεκτονικά λατυποπαγή, μικρολατυποπαγή κ.λπ.), που αναπτύσσονται στις ρηξιγενείς ζώνες.
- Τις κατοπτρικές επιφάνειες των ρηγμάτων, με όλων των ειδών τις γραμμώσεις που αναπτύσσονται πάνω σε αυτές και έχουν σχέση με την κίνηση του ρήγματος, όπως: γραμμές προστριβής, αυλακώσεις, ανάπτυξη και προσανατολισμός ινωδών ορυκτών και γεωμετρικές γραμμές.
- Τη ζώνη κατακερματισμού και τη ζώνη πάρελξης, που η παρουσία τους υποδηλώνει την ύπαρξη του ρήγματος.



Εικόνα 3.3: Αριστερά έχουμε ανθρακικό τεκτονικό μικρολατυποπαγές και κατοπτρική επιφάνεια, από τον πυρήνα του ενεργού ρήγματος του Οσίου Παταπίου στη χερσόνησο της Περαχώρας (Κορινθία). Δεξιά έχουμε, κατοπτρική επιφάνεια (S) σε ανθρακικά πετρώματα που συνοδεύεται από μια ζώνη 20 cm από συνεκτικό κατακλαστικό πέτρωμα (C). Και τα δυο μαζί αποτελούν τον πυρήνα του ρήγματος.
Πηγή: (opencources.uoa.gr)

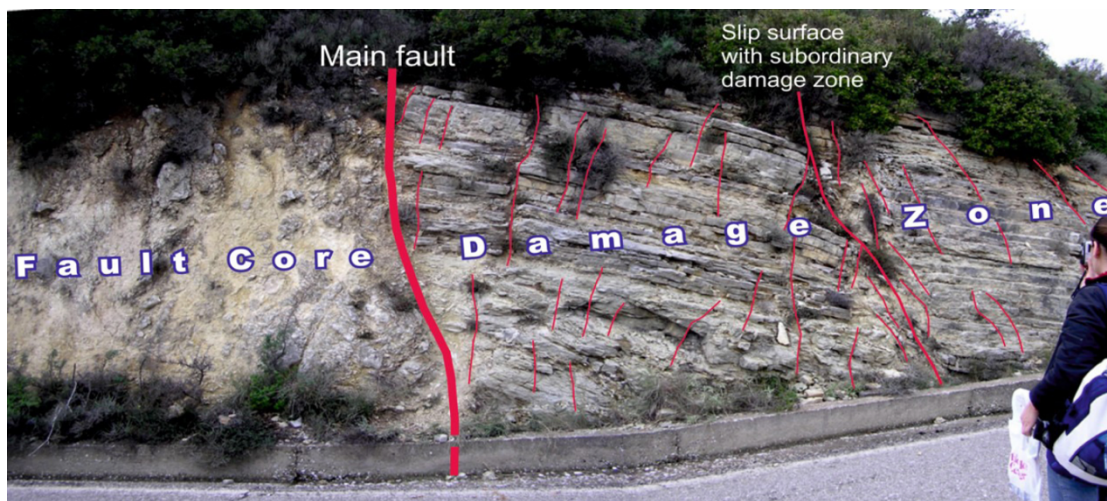
Τα ρήγματα σπάνια είναι απλές επιφάνειες ή ζώνες από παράλληλες επιφάνειες με συγκεκριμένο πάχος. Συνήθως είναι πολύπλοκες και σύνθετες τεκτονικές δομές, που χαρακτηρίζονται από έναν αριθμό δομικών χαρακτηριστικών, που δύσκολα μπορεί να προβλεφθεί. Εξαιτίας των εντόνων διαφοροποιήσεων που παρατηρούνται τόσο κατά μήκος του ίδιου ρήγματος, όσο και ανάμεσα σε διαφορετικά ρήγματα, δεν είναι εύκολο να υπάρξει μια γενική περιγραφή για την ανατομία των ρηγμάτων.

Στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχει ένας κεντρικός πυρήνας του ρήγματος ή επιφάνεια ολίσθησης, που περιβάλλεται από μια κατακλαστή ζώνη, στην οποία όλη η

μάζα του πετρώματος είναι θραυστιγενώς παραμορφωμένη. Αποκαλείται ζώνη κατακερματισμού.

Ο πυρήνας του ρήγματος μπορεί να κυμαίνεται από μια απλή επιφάνεια ολίσθησης με κατακλαστική ζώνη της τάξης των mm ή μια ζώνη από αρκετές επιφάνειες ολίσθησης, έως και μία ζώνη υψηλής διάτμησης με πλάτος αρκετών μέτρων, όπου από τις πρωτογενείς δομές του πετρώματος δεν έχουν μείνει πάρα ελάχιστα υπολείμματα. Στις κατακλαστικές αυτές ζώνες, ιδιαίτερα των μεγάλων ρηγμάτων και των μεγάλων ζωνών διάτμησης, αναπτύσσεται μια σειρά από ειδικού τύπου πετρώματα με πολύ χαρακτηριστικές τεκτονικές δομές, γνωστά ως πετρώματα ρηξιγενών ζωνών.

Η εκτίμηση του άλματος του ρήγματος, αναφέρεται ότι σε γενικές γραμμές παρατηρείται μια αύξηση του πλάτους της ζώνης του πυρήνα του ρήγματος με το μέγεθος του άλματος, αν και παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις κατά μήκος του ρήγματος.



Εικόνα 3.4: Στην φωτογραφία έχει γίνει διαχωρισμός του πυρήνα, ενός κατακόρυφου ρήγματος και η ζώνη κατακερματισμού. Στη ζώνη κατακερματισμού του κύριου ρήγματος, αναπτύσσονται μικρότερες επιφάνειες ολίσθησης με την δική τους δευτερεύουσα ζώνη κατακερματισμού.

Πηγή: (opencourses.uoa.gr)

Το πλάτος της ζώνης κατακερματισμού μπορεί να διαφοροποιείται και αυτό από στρώμα σε στρώμα, αλλά, όπως και με τη ζώνη του πυρήνα, φαίνεται να υπάρχει μια πολύ στενή σχέση αναμεσα στο μέγεθος της ολίσθησης και το πάχος της ζώνης κατακερματισμού.

Συχνά τα στρώματα πτυχώνονται ελαφρά (κάμπτονται) εκατέρωθεν του ρήγματος και ο όρος που χρησιμοποιείται γι' αυτή τη συμπεριφορά είναι πάρελξη. Η ζώνη της πάρελξης, μπορεί να είναι πλατύτερη ή στενότερη από τη ζώνη κατακερματισμού, αλλά μπορεί και να απουσιάζει εντελώς. Θα λέγαμε ότι τα μαλακά πετρώματα αναπτύσσουν πιο εύκολα ζώνη πάρελξης, απ' ότι τα σκληρά. Η κύρια διαφορά της από τη ζώνη κατακερματισμού είναι ο όλκιμος χαρακτήρας της παραμόρφωσης που επικρατεί στη ζώνη αυτή, σε αντίθεση με τον καθαρά θραυστιγενή χαρακτήρα της ζώνης κατακερματισμού.

Στα ρήγματα που έχουν δημιουργηθεί και δράσει σε μεγαλύτερα βάθη (ζώνες διάτμησης), τα εγγενή χαρακτηριστικά δεν έχουν την ίδια εικόνα με αυτή των τυπικών

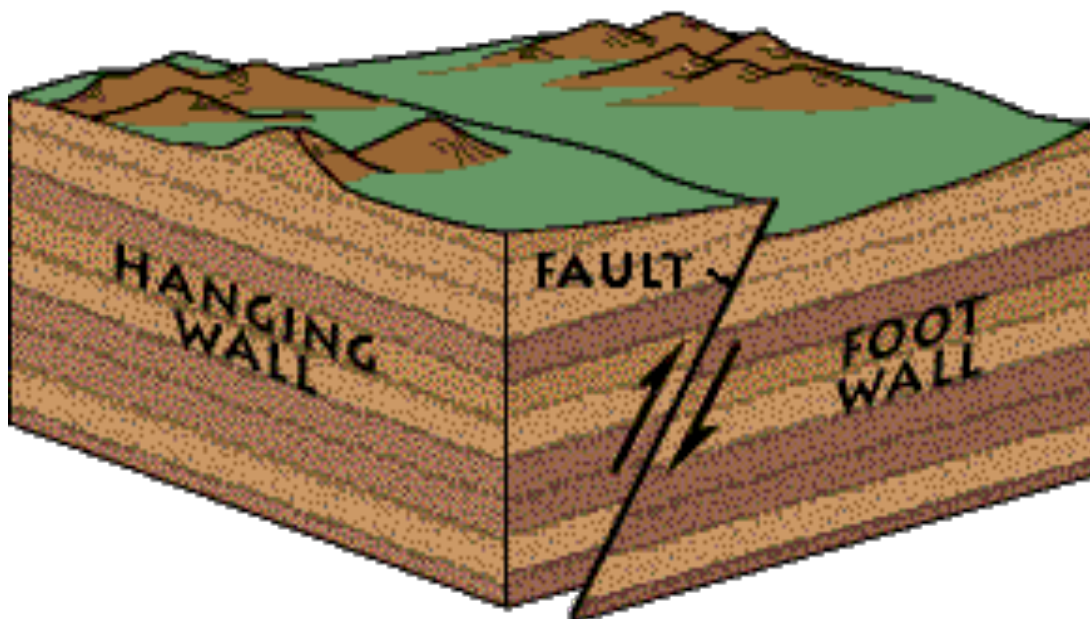
ρηγμάτων, που περιεγράφηκε στα προηγούμενα. Στις περιπτώσεις αυτές αναπτύσσεται μια ζώνη, πλάτους από μερικά εκατοστά ή μέτρα έως αρκετά δεκάδες ή εκατοντάδες μέτρα, στην οποία κυριαρχούν οι μυλονιτικού χαρακτήρα δομές, όπως περιεστρεμμένοι πορφυροκλάστες, μη κυλινδρικές πτυχές, πλάγιες φυλλώσεις κ.λπ.

3.5 Κατηγοριοποίηση Ρηγμάτων

Για την μελέτη και ανάλυση των ρηγμάτων χρησιμοποιούμε μια σύνθετη διαδικασία που περιλαμβάνει πλήθος σταδίων, διαφορετικών προσεγγίσεων και συνδυασμό διαφόρων ειδών ταξινόμησης. Σε αυτή τη παράγραφο, ωστόσο, 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. κινήματική 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 ρηξιτεμάχια ή απλά τεμάχια. Το τεμάχος που βρίσκεται προς τη φορά κλίσης του ρήγματος («υπέρεκειται») είναι το υπερκείμενο τεμάχος ή οροφή ή στέγη (hanging wall). Το τεμάχος αντίθετης φοράς από αυτή της κλίσης του ρήγματος («υπόκειται») ονομάζεται υποκείμενο τεμάχος ή δάπεδο (footwall) (Kramer, 1996). Στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 3.5) απεικονίζεται μία εδαφική στρώση και ένα ρήγμα με σκοπό να γίνει αντιληπτή η ονομασία των ρηξιτεμάχων που προκύπτουν μετά την διάρρηξη.

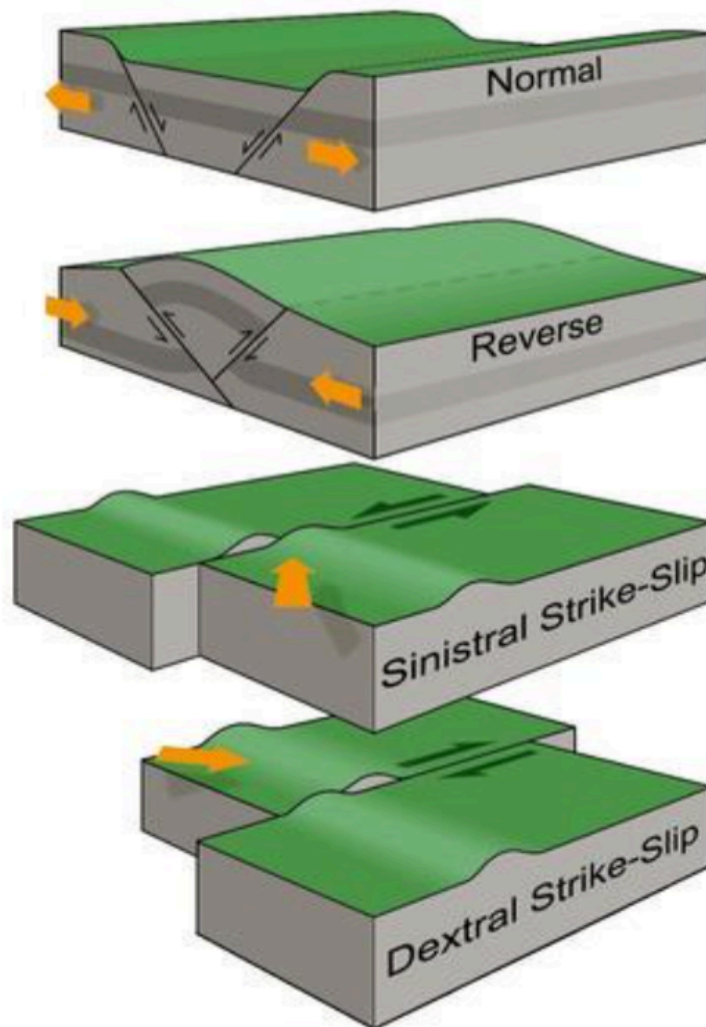


Εικόνα 3.5: Σχηματική απεικόνιση των δύο ρηξιτεμάχων. Το αριστερό τμήμα είναι το υπερκείμενο (Hanging wall) και το δεξιό τμήμα αποτελεί το υποκείμενο (Footwall).

Πηγή: (www.geosci.usyd.edu)

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 ρηξιτεμάχια μετά τη διάρρηξη. Οι πλέον αποδεκτές κατηγορίες είναι οι ακόλουθες (Kramer, 1996) και για τις οποίες παρακάτω ακολουθεί σχηματική απεικόνιση (εικόνα 3.6):

- Κανονικά ρήγματα (Normal faults): ρήγματα όπου το υπερκείμενο τέμαχος 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 3.6: Ταξινόμηση ρηγμάτων βάση γεωμετρίας.
Πηγή: (www.geosci.usyd.edu)

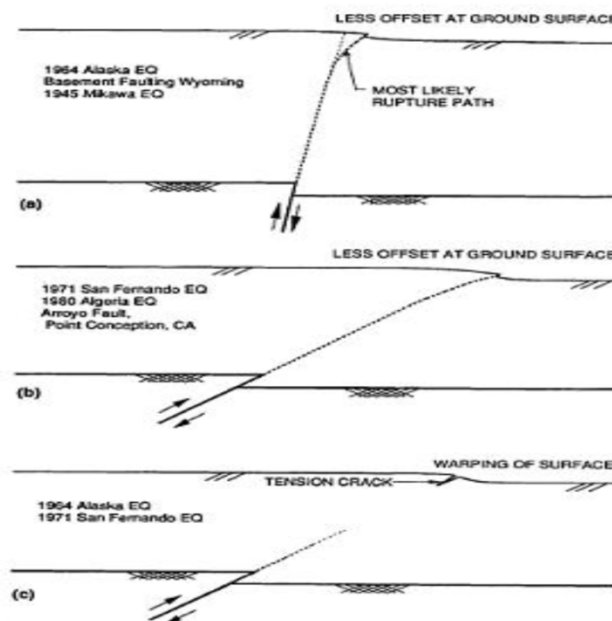
Συγκεκριμένα, δεξιόστροφα είναι αυτά στα οποία, αν θεωρηθεί το ένα τέμαχος σταθερό, το άλλο έχει μετατοπιστεί προς τα δεξιά του. Ενώ το αντίθετο ισχύει για τα αριστερόστροφα ρήγματα.

3.6 Διάρρηξη ρήγματος

Η διάρρηξη ενός σεισμικού ρήγματος παράγει δύο τύπους μετατόπισης του εδάφους: τη μόνιμη οιονειστατική 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 (εικόνα 3.7). Τα στοιχεία αυτά επικεντρώνονται σε μόνο τρεις από τις πιο σημαντικές μεταβλητές: (Bray, Seed, Cluff & Seed, 1994) το είδος της κίνησης ρήγματος, τη κλίση του επιπέδου ρήγματος, καθώς και τη φύση του υπερκείμενου κοιτάσματος του εδάφους.



Εικόνα 3.7: Διαδρομή διαρρηγμένου ανάστροφου ρήγματος μέσω του εδάφους (a) δύσκαμπτο επίπεδο, Απότομος 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 υπερκειμένου τεμάχους. Η διάθλαση λαμβάνει χώρα στη διαχωριστική επιφάνεια του εδάφους-υποβάθρου και καθώς η ρήξη διαδίδεται στην επιφάνεια, κάμπτεται άνωθεν του υπερκειμένου τεμάχους, αυξάνοντας περαιτέρω το βάθος. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να προεξέχουν κάθετα, ή να παράγουν μικρά βυθίσματα βαρύτητας. Όταν η γωνία βάθους ρήγματος θ 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).

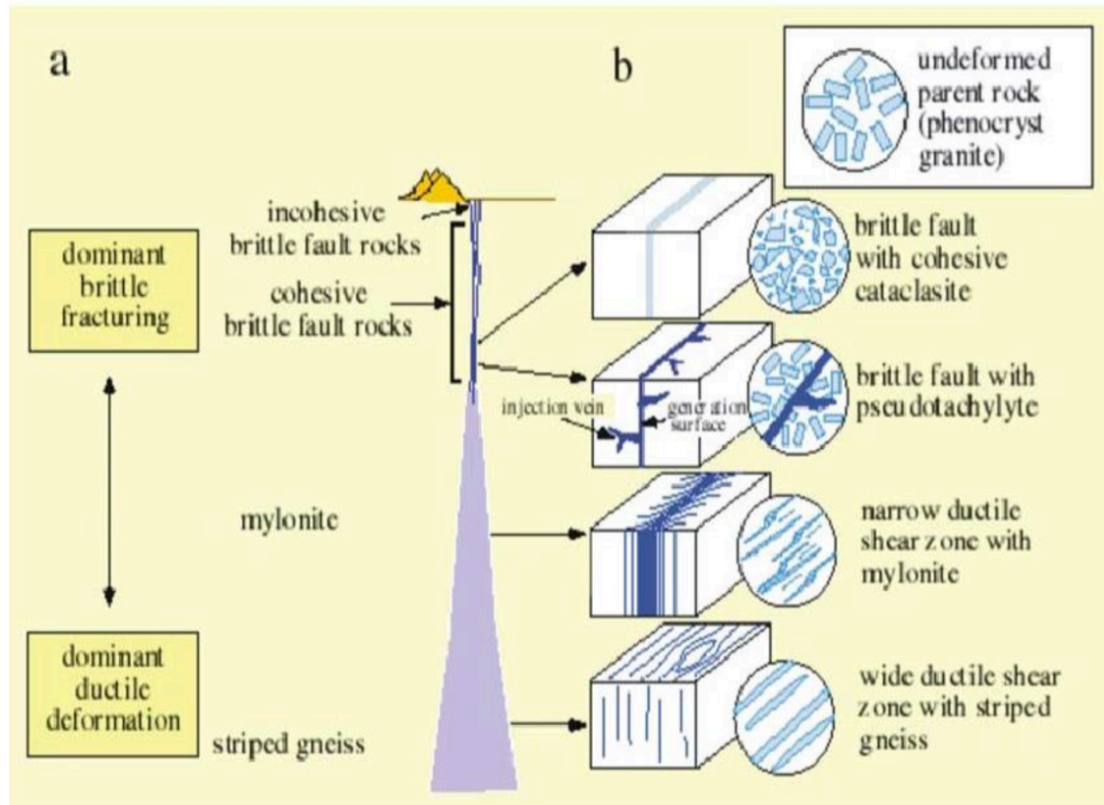
Στη διάρρηξη τους τα ανάστροφα ρήγματα τείνουν να κάμπτουν το υποκείμενο τέμαχος ενώ μεταδίδονται προς την επιφάνεια, μειώνοντας το βάθος τους. Ακολούθως, στην περίπτωση διάρρηξης κανονικών ρηγμάτων, τα όλκιμα υποστρώματα, κάμπτονται πάνω από τη γραμμή ολίσθησης, με διάδοση της παραμόρφωσης σε ευρύτερες 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. Παρ' όλα 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. Εξαίρεση 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 ότι 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 ζώνες (ή ρηξιγενείς ζώνες – ρήγματα) και σε όλκιμες, εξαρτάται από τον χαρακτηριστικό τύπο της παραμόρφωσης (θραυσιγενής ή όλκιμη). Στην (εικόνα 3.8) παραπείθετε ένα σχήμα με την κατανομή των πιο βασικών κατηγοριών πετρωμάτων ρηξιγενών ζωνών σε μία μεγάλη κλίμακα διατμητικής ζώνης. Στη βιβλιογραφία εντοπίζεται και ένας ενδιάμεσος τύπος, που αναφέρεται στην ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ των προαναφερθέντων.



Εικόνα 3.8: Κατανομή των κύριων κατηγοριών πετρωμάτων ρηξιγενών ζωνών σε μεγάλης κλίμακας διατμητική ζώνη.

Πηγή: (labtect.geol.uoa.gr)

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. Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την διάρρηξη δευτερογενών ρηγμάτων και εξάγει χρήσιμα αποτελέσματα και συμπεράσματα για την παραμόρφωση της επιφανειακής εδαφικής ή ιζηματογενούς στρώσης, καθώς και για την καταπόνηση που επιφέρουν στα τεχνικά έργα του περιβάλλοντος χώρου.

3.7 Μορφοτεκτονικές εκφράσεις των ρηγμάτων

Συχνά τα ρήγματα έχουν σημαντικές επιπτώσεις στα φυσικό-γεωγραφικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής, με ανάπτυξη συγκεκριμένων μορφοτεκτονικών δομών. Πολλά ενεργά ή ανενεργά ρήγματα δηλώνουν την παρουσία τους με τα αποτελέσματα της δράσης τους πάνω στη μορφολογία, στο υδρογραφικό δίκτυο και στη ροή των υπογείων υδάτων. Η παρατήρηση των αποτελεσμάτων αυτών και κατά συνέπεια ο εντοπισμός ενός ρήματος, βοηθάει πολύ στη γεωλογική χαρτογράφηση. Σε ό,τι αφορά στις κυριότερες, τέτοιου τύπου, μορφοτεκτονικές δομές μπορούν να αναφερθούν τα ακόλουθα:

- Οι κρημνοί συνιστούν γραμμικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της μορφολογίας του εδάφους, κατά μήκος των οποίων η τοπογραφική κλίση έχει μεγάλες τιμές. Αυτοί κατά κανόνα υποδηλώνουν την παρουσία ρηγμάτων και μπορεί να συνδέονται τόσο με κανονικού χαρακτήρα, όσο και με απωθητικά ρήγματα. Διακρίνουμε τις ακόλουθες δυο περιπτώσεις:

- Κρημνοί ενεργών ρηγμάτων. Τα ενεργά ρήγματα δημιουργούν μια μορφολογική ασυνέχεια, έναν κρημό, κατά μήκος του ρήματος, λόγω της διαρκούς ανόδου του υποκειμένου τεμάχου, από τις επαναδραστηριοποιήσεις του ρήματος. Ο κρημός αυτός συνοδεύεται από σημαντικού πάχους πλευρικά κροτήματα, ενώ παρατηρείται και έντονη κατά βάθος διάβρωση (κατά μήκος ρεμάτων, που σχηματίζουν έντονα φαράγγια, με διεύθυνση εγκάρσια στο ρήγμα) στο ανερχόμενο ρηξιτέμαχος, με αποτέλεσμα ο κρημός να διαχωρίζεται σε διαδοχικές τριγωνικές επιφάνειες.

- Κρημνοί από διαφορική διάβρωση κατά μήκος ρηγμάτων. Στην περίπτωση αυτή πρόκειται για ανενεργά ρήγματα, τα οποία φέρνουν σε επαφή έναν σκληρό με έναν μαλακό γεωλογικό σχηματισμό. Η μορφολογική ασυνέχεια, ο κρημός δηλαδή, δημιουργείται λόγω της διαφορικής διάβρωσης (σκληρό/μαλακό) και όχι λόγω της δράσης του ρήματος, όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Άλλη μια σημαντική διαφορά είναι ότι στην περίπτωση αυτή υπάρχει, ελάχιστη ή καθόλου, ανάπτυξη πλευρικών κορημάτων.

- Μετατόπιση μορφολογικών στοιχείων, όπως ράχες, κοιλάδες, ποτάμια, ρέματα κ.λπ. Οι πιο εντυπωσιακές περιπτώσεις αφορούν την οριζόντια μετατόπιση των μορφολογικών δομών, που παρατηρείται κυρίως κατά μήκος ρηγμάτων με σημαντική οριζόντια ολίσθηση. Αντίθετα, κατακόρυφες κλιμακωτές μεταβολές στις κοίτες των ποταμών, είναι λιγότερο εντυπωσιακές, αλλά μπορεί να σχετίζονται με εγκάρσια ρήγματα με ολίσθηση κατά κλίση, αν δεν σχετίζονται με την αντοχή των πετρωμάτων στη διάβρωση (σκληρό/μαλακό).

Ένα παράδειγμα αποτελεί ο εντυπωσιακός κρημός (εικόνα 3.9), της τάξης εκατοντάδων μέτρων, που έχει δημιουργήσει το ενεργό κανονικό ρήγμα του Καβουσίου (διάυλος Ιερά- πέτρας – Παχιάς Άμμου στην ανατολική Κρήτη). Το υποκείμενο (foot-wall), ανερχόμενο τέμαχος αποτελείται από μάρμαρα (Mr) και το υπερκείμενο (hanging wall) και κατερχόμενο από πλειο-τεταρτογενούς ηλικίας κλαστικούς σχηματισμούς. Είναι χαρακτηριστική η συγκέντρωση πολλών δεκάδων μέτρων κορημάτων (Sc), αλλά και η έντονη κατά βάθος διάβρωση στο ανερχόμενο

τέμαχος (εγκάρσια στο ρήγμα), που υποδηλώνεται από το εντυπωσιακό φαράγγι του. Κατά θέσεις αποκαλύπτεται και η κατοπτρική επιφάνεια του ρήματος.



Εικόνα 3.9: Χαρακτηριστικό κρημνός ενεργού ρήματος του Μοναστηρακίου (από τη ρηξιγενή ζώνη Καβουσιού - Ιεράπετρας) βόρεια από την Ιεράπετρα, που χαρακτηρίζεται από έντονη μορφολογική ασυνέχεια, παρουσία πλευρικών κορημάτων (Sc) και έντονη κατά βάθος διάβρωση στο ανερχόμενο ρηξιτέμαχος.
Πηγή: (opencourses.uoa.gr)

3.8 Συνέπειες της ρηγμάτωσης σε γεωλογικές ή στρωματογραφικές ενότητες

Τα ρήγματα τέμνουν και μετακινούν τις στρωματογραφικές ακολουθίες, φέρνοντας σε επαφή διαφορετικούς στρωματογραφικούς ορίζοντες. Οι επωθήσεις μετακινούν, για δεκάδες ή και εκατοντάδες χιλιόμετρα, τεκτονικές ενότητες πάνω σε άλλες ενότητες, με εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι η επαφή ανάμεσα σε δύο στρώματα ή γεωλογικούς σχηματισμούς ή γεωλογικές ενότητες, που υπό κανονικές συνθήκες, δεν θα έπρεπε να βρίσκονται μαζί, αποτελούν βασικό κριτήριο και ένδειξη για την ύπαρξη ρήματος. Πιο συγκεκριμένα, τέτοιου τύπου ενδείξεις περιλαμβάνουν:

- Απότομη διακοπή και μετατόπιση της στρώσης μιας συνεχούς γεωλογικής ακολουθίας. Στην περίπτωση αυτή διαφορετικής ηλικίας ορίζοντες έρχονται «δίπλα- δίπλα».
- Επαφές στρωμάτων και γεωλογικών ενότητων που δεν θα έπρεπε να βρίσκονται μαζί, όπως π.χ. νηριτικές με πελαγικές ακολουθίες, μεταμορφωμένες με μη μεταμορφωμένες ενότητες, οφιολιθικά πετρώματα με νηριτικά ιζήματα κ.λπ.
- Επανάληψη ή παράλειψη στρωμάτων σε μια γνωστή στρωματογραφική ακολουθία, τόσο σε τομές στην ύπαιθρο, όσο και σε στοιχεία από γεωτρήσεις.

Χρειάζεται μεγάλη προσοχή, γιατί ορισμένες από τις περιπτώσεις, που περιγράφονται παραπάνω, μπορεί να οφείλονται σε άλλες δομές, όπως ασυμφωνίες, ισοκλινείς πτυχές ή διεισδύσεις εκρηξιγενών σωμάτων. Πρέπει να αξιολογούμε όλα τα διαθέσιμα στοιχεία, ώστε να καταλήγουμε στη σωστή ερμηνεία.

Η μετατόπιση κατά μήκος ρηγμάτων τοποθετεί πετρώματα το ένα δίπλα στο άλλο, τα οποία συνήθως δεν βρίσκονται μαζί (ή κοντά) στις αδιατάρακτες ακολουθίες στρωμάτων. Το αποτέλεσμα αυτής της ασυνέχειας μας προσφέρει μια από τις καλύτερες αποδείξεις για την παρουσία ενός ρήγματος. Η διακοπή της συνέχειας ή η μετατόπιση ενός συνεχούς γεωλογικού στοιχείου, όπως για παράδειγμα της στρώσης, μπορεί να υποδηλώνει την παρουσία ενός ρήγματος. Η επανάληψη στρωμάτων ή η παράλειψη (μη εμφάνιση) στρωμάτων σε μια γνωστή στρωματογραφική ακολουθία αποτελεί μια άλλη πιθανή ένδειξη παρουσίας ρήγματος.

Το κριτήριο αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό και στην υπόγεια γεωλογία, όπου συχνά τα μόνα στοιχεία που έχουμε στη διάθεσή μας προέρχονται από πυρήνες γεωτρήσεων.

3.9 Διάδοση ενεργού ρήγματος διάμεσου 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. Ακόμη, 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 έχουν άμεση επίδραση στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι οι ακόλουθοι:

- Τύπος ρήγματος (κανονικό, ανάστροφο, οριζόντιας ολίσθησης)
- Κλίση ρήγματος
- Βάθος και γεωμετρία εδαφικής στρώσης
- Ιδιότητες υπερκειμένων 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 ζώνης 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 υδροποιημένου 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 συνέχεια 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 παρακάτω:

- Την ενισχυμένη εξαιτίας του φαινομένου κατευθυντικότητας δόνηση λόγω θραύσης του ρήγματος 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 ρήγματος.

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 αλλοιωματικές 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 καμιά 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 πραγματοποιηθήκαν νεότερες μετακινήσεις.
2. Ότι υπάρχει ενεργό ρήγμα μεν, αλλά η μετατόπιση στο βραχύδες υπόβαθρο δεν είναι ικανή, συναρτήσει των εδαφικών χαρακτηριστικών, να επιφέρει την παραμόρφωση του υποβάθρου έως την επιφάνεια («τυφλό ρήγμα»).

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

Μετά την επεξεργασία τα αποτελέσματα παρουσίασαν τον σχηματισμό ζωνών παθητικών και ενεργητικών τάσεων διευθύνσεως περίπου 45ο 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 and 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 και 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 μελετήσαν και οι Cole και Lade (1984) καθώς επίσης και το εύρος της επηρεαζόμενης ζώνης σε αλλούβια, επιφανειακά ρήγματα κατακόρυφης μετατόπισης.

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

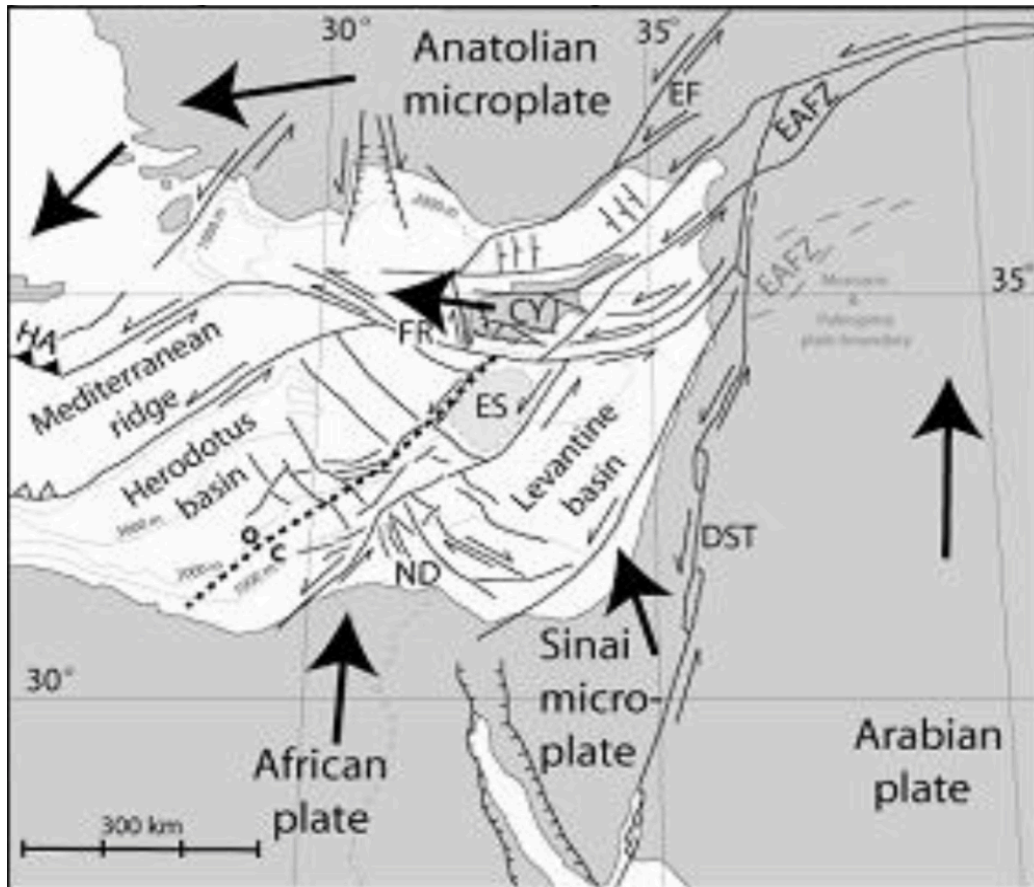
Εφτά χρόνια αργότερα, οι Bray et al. (1994) μελέτησαν το ζήτημα της διάδοσης ρήγματος σε συνεκτικά υλικά, μέσω αριθμητικών αναλύσεων χρησιμοποιώντας πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Είναι σημαντικό 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.

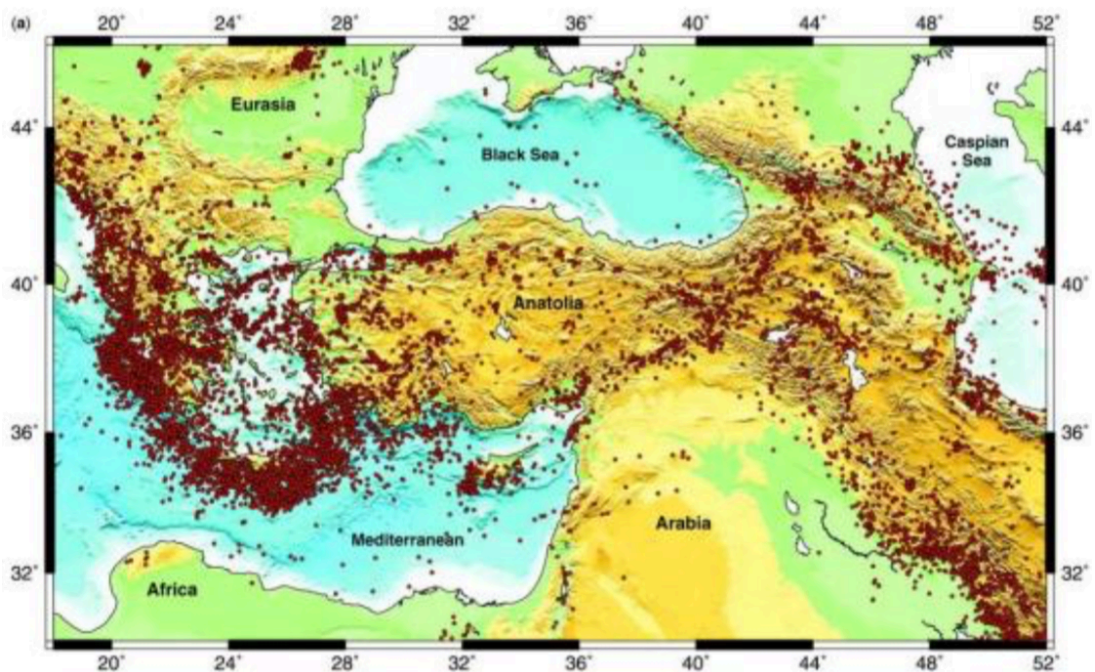
3.10 Τα σημαντικότερα ρήγματα στην Ελλάδα και τη Μεσόγειο

Η Ελλάδα αποτελεί μία από τις πιο σεισμογενείς χώρες παγκοσμίως και αυτό οφείλεται στο ότι υπάρχουν πολλά ενεργά ρήγματα στο χερσαίο της τμήμα αλλά και στη λεκάνη της Μεσογείου που την περιβάλλει. Ειδικότερα, 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 θεωρείται από τις πιο σεισμικά ενεργές περιοχές. 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 όπως φαίνεται στην (εικόνα 3.10).

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.



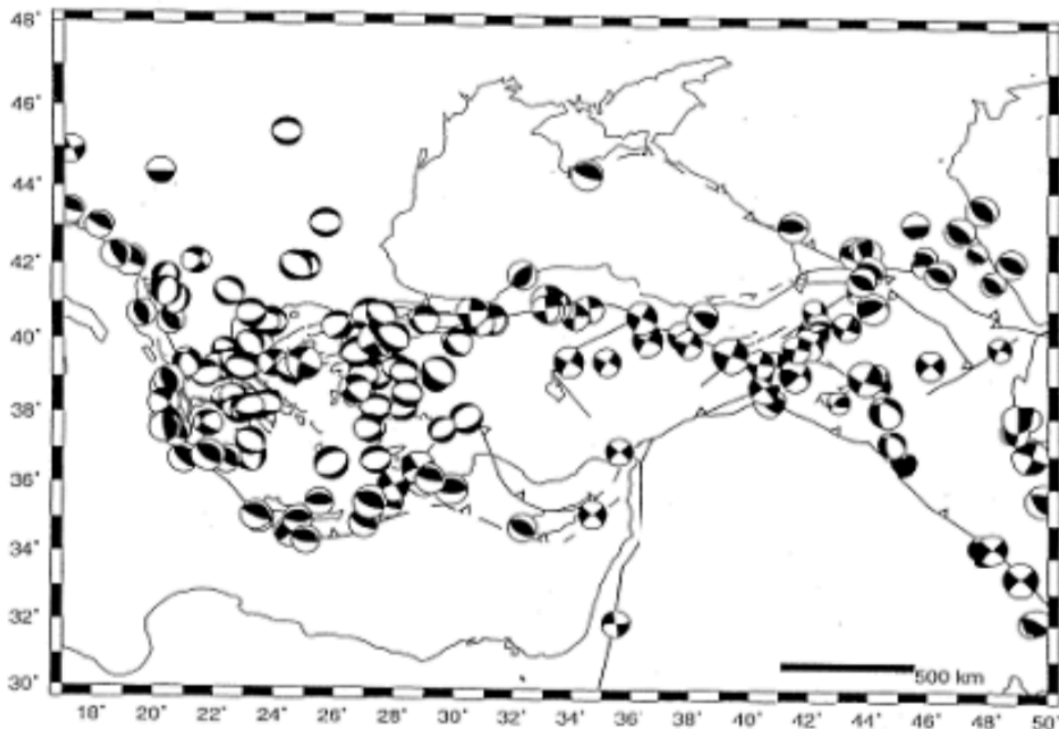
Εικόνα 3.10: Παρούσα κατάσταση του χάρτη της Ανατολικής Μεσογείου
 Πηγή : (Harrison, 2008)



Εικόνα 3.11: Σεισμικότητα της περιοχής της Ανατολικής Μεσογείου και των περιχώρων με βάση την αναφορά από USGS-NEIC για το διάστημα 1973-2007 με μεγέθη για > 3. (Ο συγκεντρωτικός χάρτης, χάρτης βαθυμετρίας και ρηγμάτων της περιοχής σχεδιάστηκε με βάση τις παρατηρήσεις των Le Pichon & Angelier (1981), Taymaz (1990), Taymaz et al. (1990, 1991a, b); Saroglu et al. (1992), Papazachos et al. (1998), McClusky et al. (2000) and Tan & Taymaz (2006))
 Πηγή: (Taymaz et al. 2007)

Είναι γνωστό ότι η Ελλάδα και η γείτονας χώρα Τουρκία, χαρακτηρίζονται από την υψηλότερη σεισμικότητα, λόγω των τεκτονικών πλακών και των ρηγμάτων (εικόνα 3.12) στην Ανατολική Μεσόγειο, συγκεκριμένα (Taymaz et al. 2007):

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



Εικόνα 3.12: Η κατανομή του επιπέδου των ρηγμάτων της Ανατολικής Μεσογείου κατά McKenzie (1972, 1978). Πηγή: (Barka & Reilinger, 1997)

Τα κύρια τεκτονικά στοιχεία στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου αναφέρονται παρακάτω και σημειώνονται στο χάρτη που ακολουθεί (εικόνα 3.13) (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 προς βορειοανατολικά, μέχρι 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

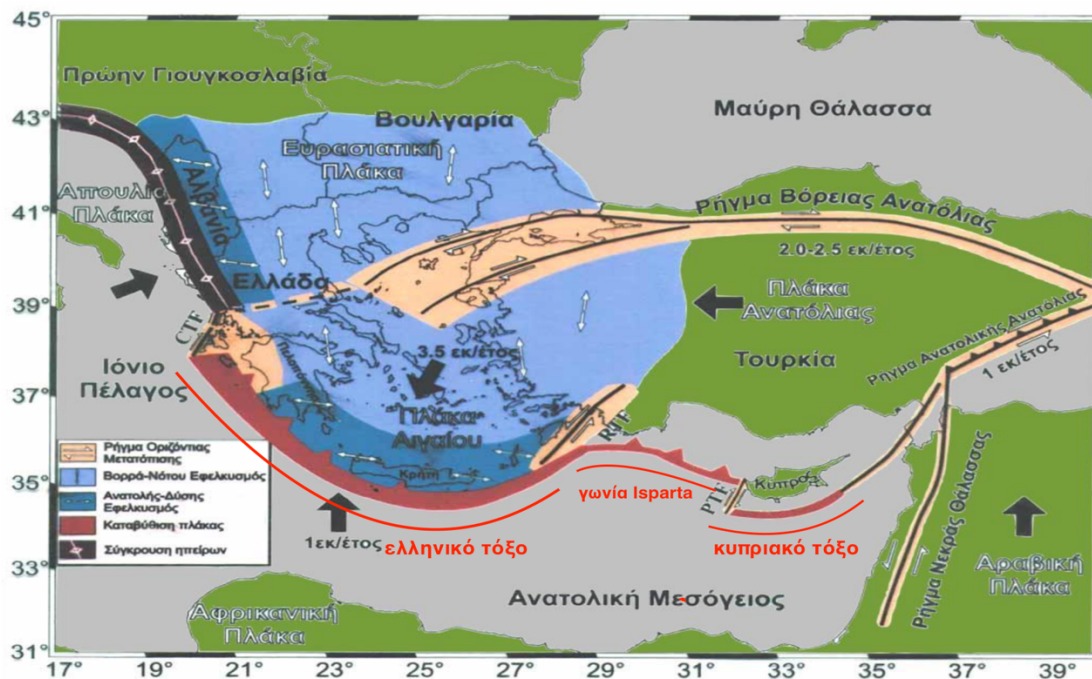
Η καταβύθιση κατά μήκος του τόξου της Κύπρου είναι ένα αμφιλεγόμενο θέμα στη βιβλιογραφία. Η ακρίβεια της καταβύθισης δεν είναι σαφής νότια της Κύπρου.

4. Δυτική Ανατολία

Στη Δυτική Ανατολία, η τάση δημιουργίας μικρών βυθισμάτων και τα σχετικά κανονικά ρήγματα είναι τα κυρίαρχα νεοτεκτονικά 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 πλακάς 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 Νοτίου Αιγαίου, και μια θάλασσα οριακά στην εσωτερική του πλευρά.



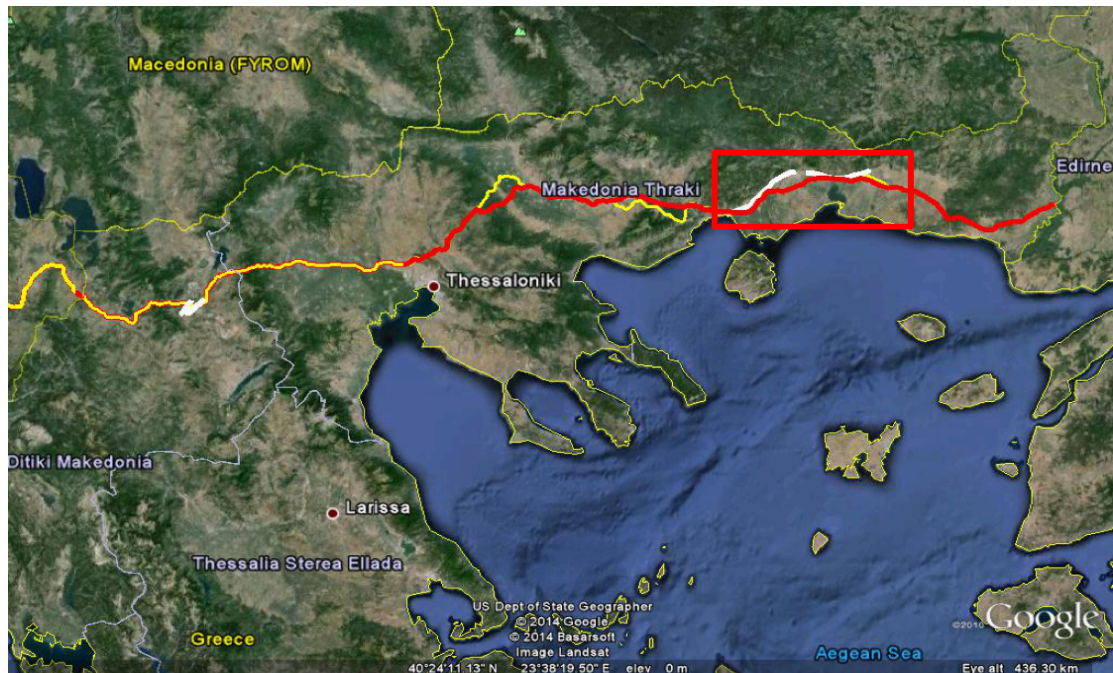
Εικόνα 3.13: Χάρτης προσδιορισμού των κύριων τεκτονικών στοιχείων στη Μεσόγειο.

Πηγή: (Barka & Reilinger, 1997)

3.11 Ρήγματα μεταξύ Ξάνθης- Κομοτηνής

Τα συγκεκριμένα ρήγματα αποτέλεσαν έμπνευση για την συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στην κατασκευή έργων με εκτεταμένο μήκος, όπως για παράδειγμα είναι οι αγωγοί μεταφοράς καυσίμων (φυσικού αερίου – πετρελαίου) ήταν πιστευτό μέχρι σήμερα πως δεν επηρεάζονται σε περίπτωση ενεργοποίησης ενός ρήγματος το οποίο συντρέχει με την κατασκευή σε κοντινή παράλληλη διεύθυνση. Με δεδομένο όμως ότι το μήκος ενός ρήγματος είναι πεπερασμένο και η κατασκευή που κινείται σε παράλληλη διεύθυνση εκτείνεται περισσότερο από ότι το ρήγμα, συνειδητοποιούμε εφόσον ενεργοποιηθεί το ρήγμα, ότι εγκυμονούν πολλοί κίνδυνοι από την δημιουργία δευτερογενών ρηγμάτων σε κάθετη διεύθυνση ως προς αυτήν του βασικού ρήγματος.

Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 3.14) με κόκκινη γραμμή απεικονίζεται ο αγωγός που βρίσκεται θαμμένος κάτω από την γη, ενώ οι δύο άσπρες γραμμές εντός του κόκκινου ορθογωνικού πλαισίου αποτελούν τα δύο παράλληλα ρήγματα (F-GR-38, F-GR-39) ως προς τον αγωγό.



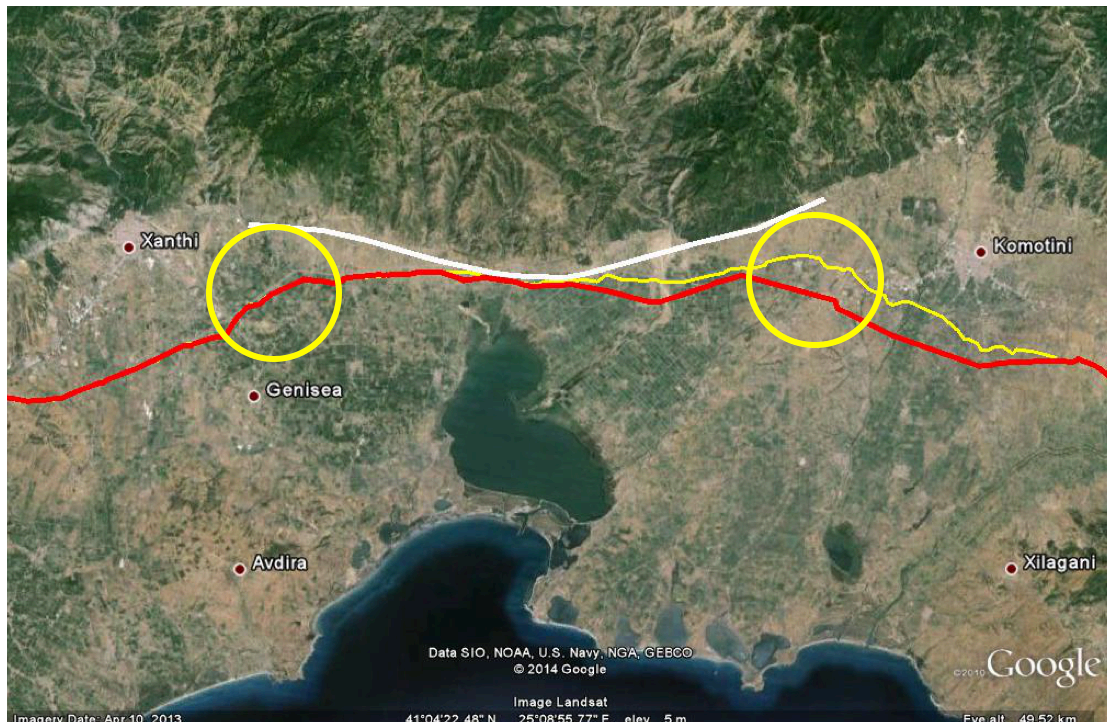
Εικόνα 3.14: Αγωγός παράλληλος σε δύο ρήγματα.
Πηγή: (Psarrououlos, 2015)

Η πιθανή ενεργοποίηση του ρήγματος F-GR-38 (εικόνα 3.15) μπορεί να προκαλέσει σχεδόν μία ομοιόμορφη παραμόρφωση ως προς την κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση της τάξεως του 1 m στον αγωγό.



Εικόνα 3.15: Ρήγμα μεταξύ Ξάνθης και Κομοτηνής (F-GR-38).
Πηγή: (Psarrououlos, 2015)

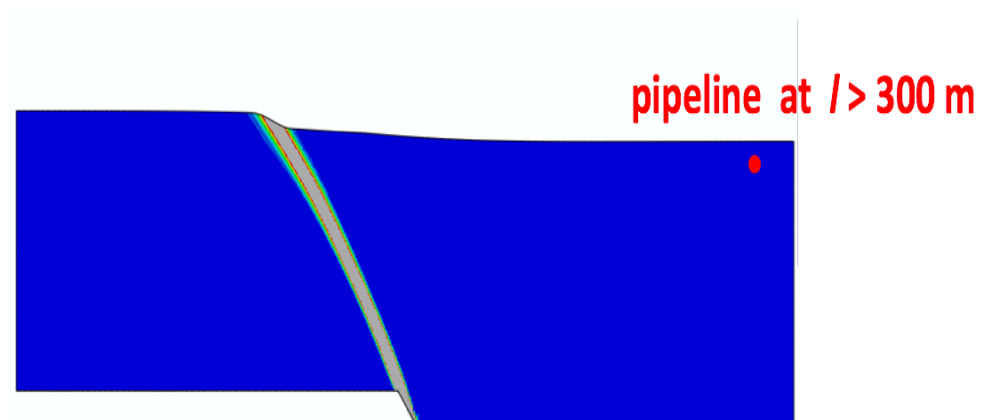
Ανάλογα με τις συνθήκες του εδάφους, ο αγωγός αναμένεται να διαταραχθεί σημαντικά στα άκρα του ρήγματος από δευτερεύουσα ρήξη όπως σημειώνεται στη παρακάτω εικόνα (εικόνα 3.16). Οι περιοχές που έχουν σημειωθεί με κύκλους στο παρακάτω σχήμα είναι αυτές που διατρέχουν το μεγαλύτερο κίνδυνο.



Εικόνα 3.16: Σχηματική απεικόνιση των περιοχών που αναμένεται να καταπονηθεί περισσότερο ο αγωγός από την διάρρηξη του ρήγματος. Πηγή: (Psarropoulos, 2015)

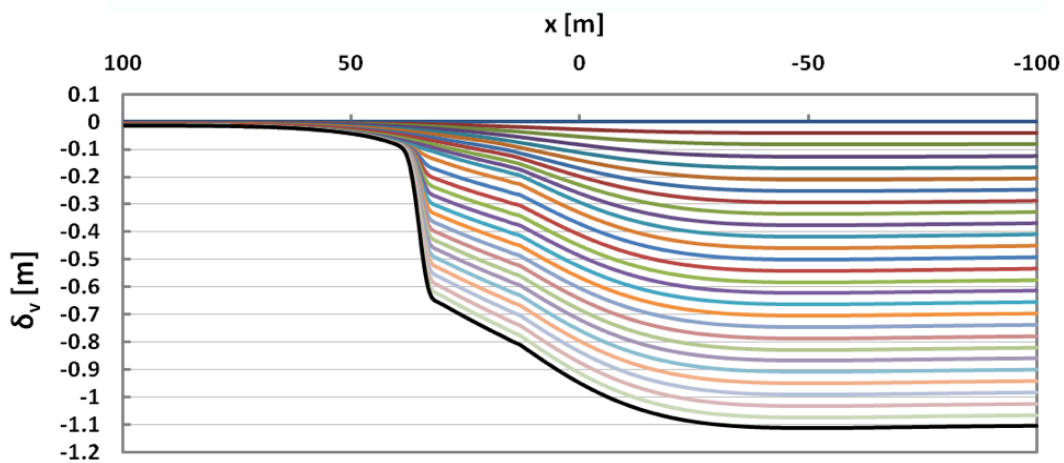
Η απόσταση μεταξύ του ρήγματος σε κάποια σημεία είναι μικρότερη από 300 m, πράγμα που σημαίνει ότι οποιαδήποτε δράση του ρήγματος θα έχει άμεση επιρροή στη κατασκευή του αγωγού.

Στη παρακάτω σχηματική απεικόνιση (εικόνα 3.17), η οποία αποτελεί μία κάθετη τομή του εδάφους, φαίνεται το ρήγμα στην γκρίζα περιοχή ενώ η κόκκινη κουκίδα σηματοδοτεί τον αγωγό που συντρέχει παράλληλα σε όλο το μήκος του ρήγματος.



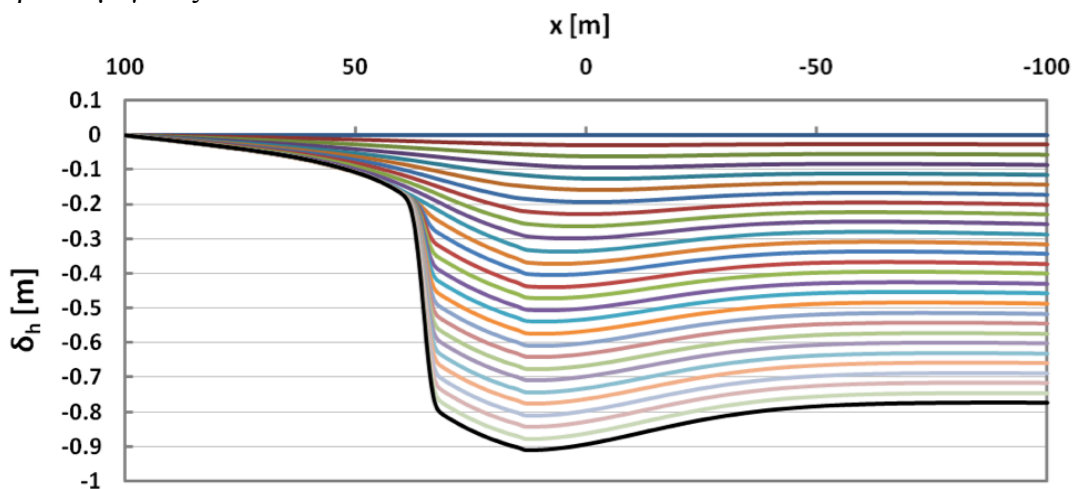
Εικόνα 3.17: Σχεδιάγραμμα κάθετης τομής του εδάφους σε σημείο απόστασης ρήγματος-αγωγού μικρότερο από 300 μέτρα. Πηγή: (Psarropoulos, 2015)

Για την συγκεκριμένη περίπτωση έχει γίνει ήδη προσομοίωση 2 διαστάσεων στο προγραμματιστικό περιβάλλον του ABAQUS (Psarropoulos, 2015). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρατίθενται στο παρακάτω σχεδιαγράμματα όπου δείχνουν την κατακόρυφη (εικόνα 3.18) και την οριζόντια (εικόνα 3.19) μετατόπιση των στοιχείων.



Εικόνα 3.18: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης.
Πηγή: (Psarropoulos, 2015)

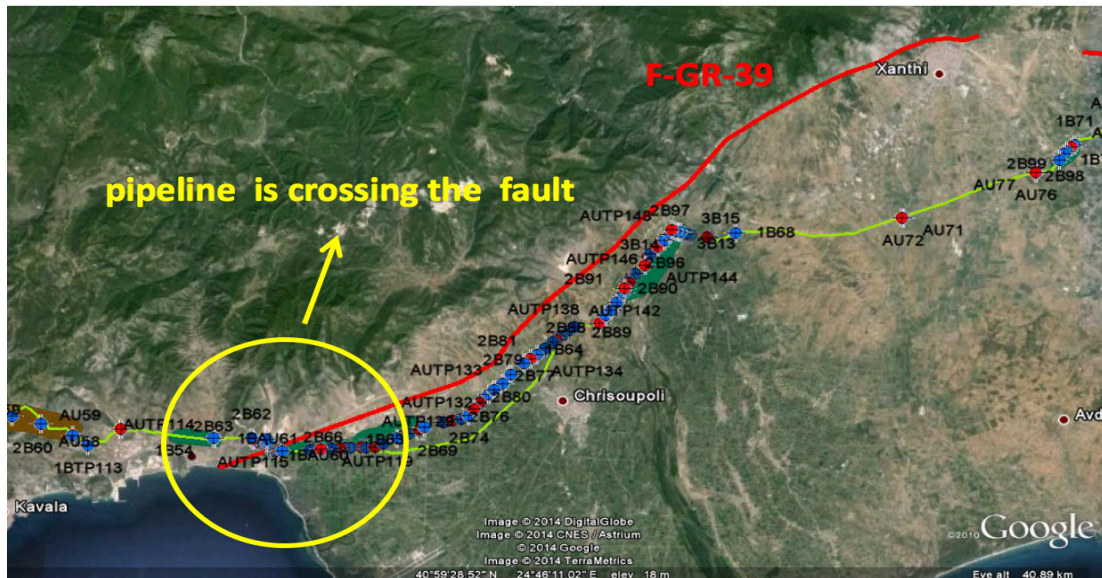
Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι η κατακόρυφη μετατόπιση ξεπερνά το 1 m. Η πιθανή ρήξη ενδέχεται να είναι αρκετά επώδυνη για την κατασκευή, καθώς τα δευτερογενή ρήγματα που επρόκειτο να σημειωθούν ενδέχεται να έχουν το ίδιο περίπου μέγεθος.



Εικόνα 3.19: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης.
Πηγή: (Psarropoulos, 2015)

Η οριζόντια μετατόπιση τείνει κοντά στο 1 m. Αυτό σημαίνει ότι αν εκδηλωθεί κατά τέτοιο τρόπο το ρήγμα, τότε τα δευτερογενή ρήγματα που θα προκύψουν στις άκρες θα έχουν και οριζοντιολισθητικό χαρακτήρα.

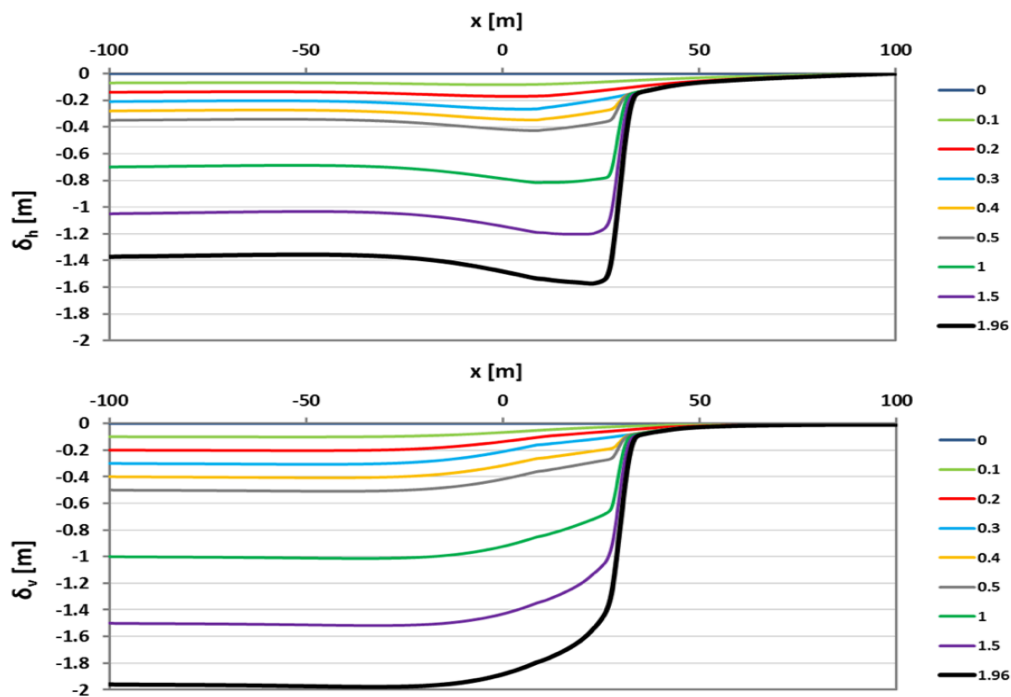
Ωστόσο, ο συγκεκριμένος αγωγός δεν είναι πιθανόν να «τραυματιστεί» μόνο από δευτερογενή ρήγματα που αναμένεται να εκδηλωθούν από την δράση του κύριου ρήγματος (F-GR-38). Σε σημείο κοντά στην Καβάλα, όπως διακρίνουμε στην (εικόνα 3.20), ο αγωγός διασχίζει το ρήγμα (F-GR-39), καθώς δεν υπήρχε δυνατότητα αποφυγής. Το σημείο αυτό χρειάζεται διαρκής παρακολούθηση, γιατί οπουδήποτε δραστηριότητα θεωρείται άκρως επικίνδυνη για την κατασκευή.



Εικόνα 3.20: Σημείο κοντά στην Καβάλα όπου ο αγωγός διασχίζει το ρήγμα F-GR-39.
 Πηγή: (Psarropoulos, 2015)

Στα διαγράμματα που ακολουθούν (εικόνα 3.21) απεικονίζονται οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες μετατοπίσεις του εν λόγω ρήγματος.

horizontal and vertical ground deformations



Εικόνα 3.21: Διαγράμματα οριζόντιων και κατακόρυφων μετατοπίσεων.
 Πηγή: (Psarropoulos, 2015)

Στο ρήγμα (F-GR-39) παρατηρούμε ακόμα πιο έντονες μετατοπίσεις ως προς τον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα και αυτό έχει σχέση με το υλικό των εδαφικών στρώσεων. Ο αγωγός διασχίζει το ρήγμα και το σημείο διασταύρωσης αυτών των δύο αποτελεί το επίμαχο σημείο για την δημιουργία προβλημάτων στην κατασκευή του αγωγού.

Κεφάλαιο 4: Εφαρμογές

4.1 Υπολογιστική προσομοίωση διάρρηξης ενεργού ρήγματος διαμέσου εδαφικής ή ιζηματογενούς στρώσης

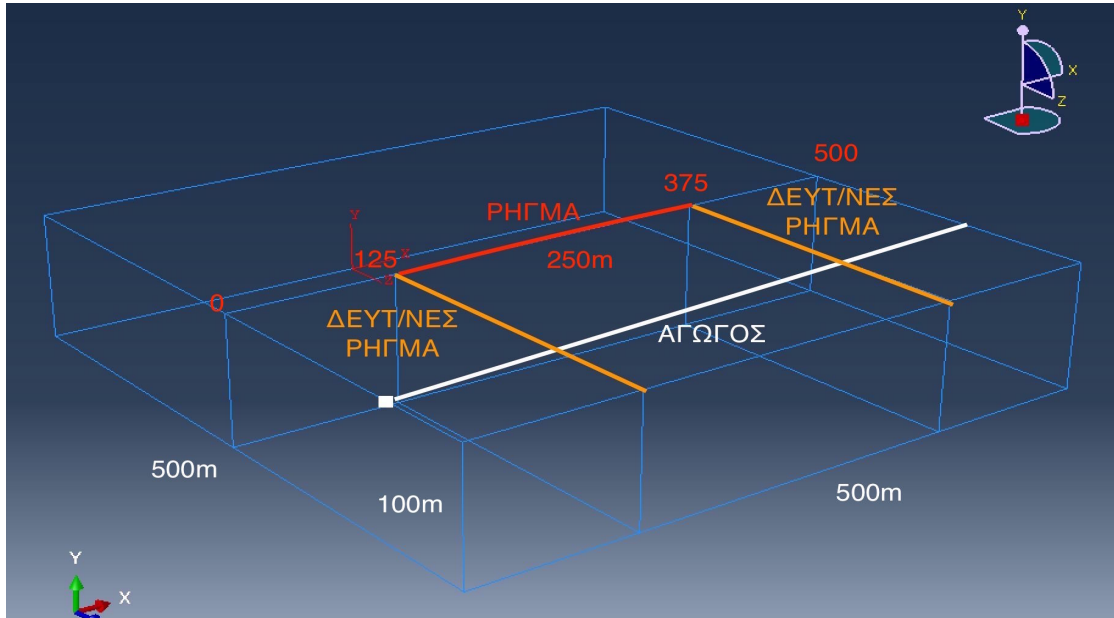
Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η διάρρηξη ενός ρήγματος όπου πάνω σε αυτό βρίσκεται μία εδαφική ή μία ιζηματογενής στρώση σε ελεύθερο πεδίο καθώς και η παραμόρφωση της ίδιας της επιφάνειας. Είναι γεγονός ότι το πρόβλημα είναι πολυπαραμετρικό, γι' αυτό το λόγο εξετάζονται κάποιοι πιο βασικοί παράμετροι, που στην προκειμένη περίπτωση είναι το πάχος της στρώσης, το μήκος διάρρηξης του ρήγματος, το υλικό της στρώσης καθώς και το είδος του ρήγματος (κανονικό, ανάστροφο και οριζοντιλισθητικό).

Για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον του ABAQUS. Το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων διαθέτει μία μεγάλη βιβλιοθήκη με πεπερασμένα στοιχεία με σκοπό να εξετασθεί υπολογιστικά ένα σύνθετο πρόβλημα και αποτελεί ένα από τα πιο αξιόπιστα προγράμματα για την προσομοίωση σύνθετων γεωτεχνικών προβλημάτων. Αρχικός αντικειμενικός σκοπός αποτέλεσε η σύνταξη ενός αρχείου όπου περιγράφονται τα δεδομένα και τα ζητούμενα του προβλήματος. Αυτό το αρχείο εισόδου εφόσον αφορά πολύπλοκα προβλήματα είναι προφανές πως θα είναι ένα εκτεταμένο αρχείο εισόδου, το οποίο δεν είναι δύσκολο να συνταχθεί αν ακολουθηθεί η κατάλληλη μέθοδος κάθε φορά. Ωστόσο πιο πρακτικό, ευέλικτο και γρήγορο είναι το σχεδιαστικό περιβάλλον του προγράμματος το οποίο παρέχει τις ίδιες δυνατότητες και δίνει την ευχέρεια στο χρήστη για άμεση προβολή των ενεργειών του. Έτσι, στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε το ABAQUS/CAE για τη γένεση του δικτύου και εφόσον το πρόβλημα εντοπίζεται στο χώρο, τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση είναι εξαπλευρικά στοιχεία τριών διαστάσεων.

4.2 Περιγραφή του προσομοιώματος της εδαφικής ή ιζηματογενής στρώσης

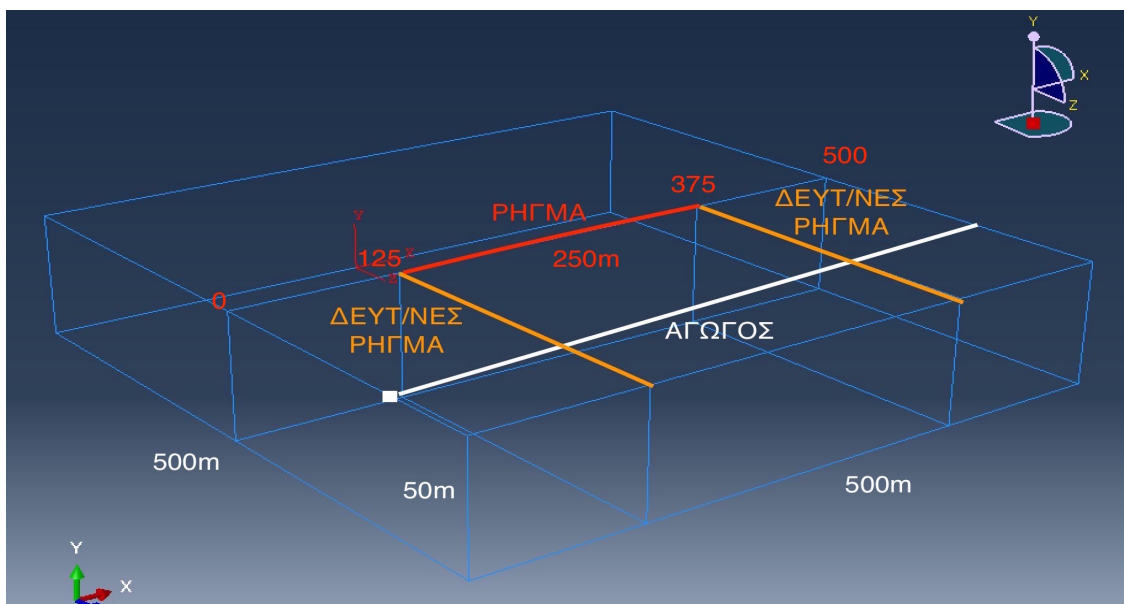
Στο προγραμματιστικό περιβάλλον του ABAQUS, με σκοπό την μελέτη της σχέσης του ρήγματος και εδάφους ή ιζημάτων στο ελεύθερο πεδίο, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση της διάρρηξης ενός ρήγματος στο ελεύθερο πεδίο πάνω στο οποίο βρίσκεται εδαφική ή ιζηματογενής στρώση. Η γεωμετρία της στρώσης που θεωρήθηκε είναι ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με τετραγωνική βάση. Για την δημιουργία αυτού του προσομοιώματος χρησιμοποιήθηκαν κυβικά στοιχεία τύπου CPE8 με πλευρά 1 m. Επειδή ένας παράγοντας προς εξέταση αποτελεί το μήκος του ρήγματος και ένας δεύτερος είναι αυτός του πάχους της εδαφικής ή ιζηματογενής στρώσης, χρειάστηκε να σχεδιαστούν τρία διαφορετικά προσομοιώματα. Οι διαστάσεις του βασικού προσομοιώματος είναι 500 μέτρα κατά μήκος, 500 μέτρα κατά πλάτος και 100 μέτρα πάχος (εικόνα 4.1). Η διάρρηξη του ρήγματος θεωρείται ότι γίνεται στο μέσο του παραλληλεπίπεδου με αποτέλεσμα να προκύπτουν δύο ριξημτεμάχη με μήκος 500 μέτρων, 250 μέτρα πλάτος και 100 πάχος το καθένα. Στην προκειμένη εφαρμογή, το μήκος του ρήγματος όμως θεωρείται πως είναι πεπερασμένο με αποτέλεσμα να σχηματίζονται δύο δευτερογενή ρήγματα στις δύο άκρες το βασικού ρήγματος. Το μήκος του βασικού ρήγματος λαμβάνεται 250 μέτρα και έχει εφαρμογή

στο κέντρο του προσομοιώματος, αφήνοντας 125 μέτρα περιθώριο σε κάθε πλευρά. Αν ο άξονας που χωρίζει τα δύο ριξητεμάχια βαθμολογηθεί από το 0 μέχρι το 500 τότε προκύπτει ότι στις θέσεις 125 και 375 θα είναι τα σημεία αρχής και τέλους του ρήγματος. Τα σημεία αυτά θεωρούνται οι αφετηρίες των δύο δευτερευόντων ρήγματων, τα οποία εκτείνονται σε κάθετη διεύθυνση ως προς τον άξονα του κύριου ρήγματος, ενώ εκμεταλλεύονται όλο το πλάτος του ριξητέμαχου τμήματος, που στη δεδομένη περίπτωση είναι 250 μέτρα.



Εικόνα 4.1: Σχεδιάγραμμα της προσομοίωσης διαστάσεων 500mx500m και πάχους στρώσης 100m.

Η δεύτερη παραδοχή του προσομοιώματος είναι σχεδόν η ίδια όπως φαίνεται στην (εικόνα 4.2). Σε αυτή την περίπτωση θέλουμε να βγάλουμε συμπεράσματα για το πως επιδρά το πάχος της εδαφικής ή ιζηματογενούς στρώσης. Οπότε το προσομοίωμα παραμένει το ίδιο με την διαφορά ότι το πάχος του είναι το διπλάσιο, δηλαδή 50 μέτρα αντί για 100 μέτρα. Επίσης η εφαρμογή και του κύριου ρήγματος και των δευτερευόντων συνεχίζει να είναι στα ίδια σημεία.



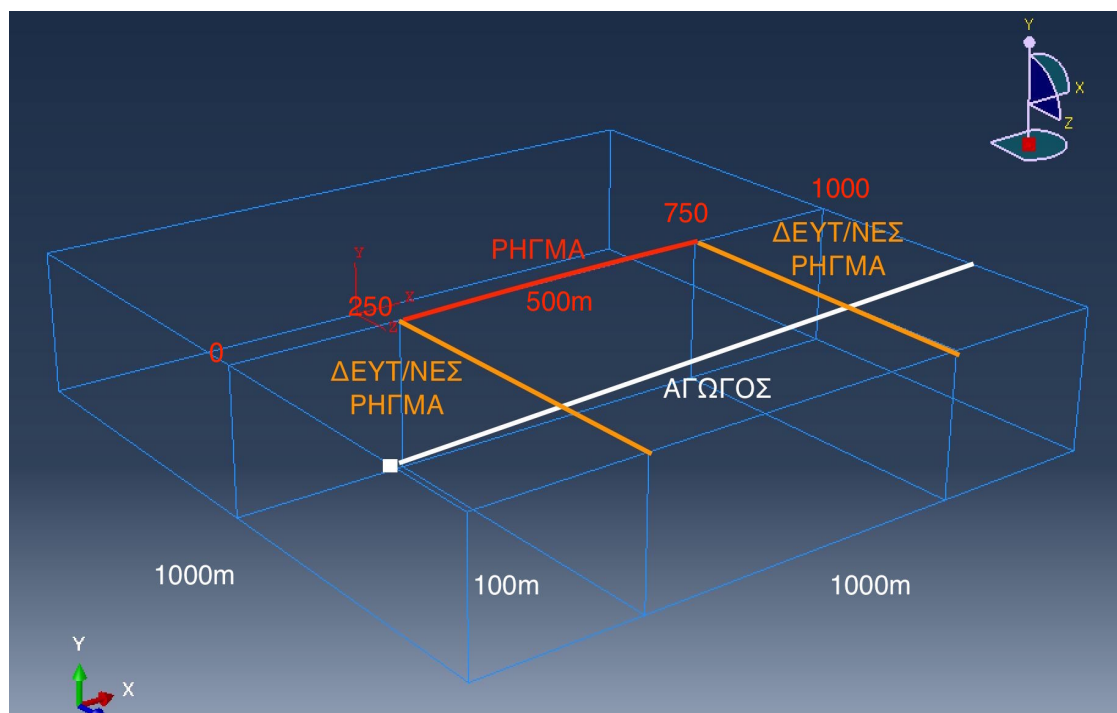
Εικόνα 4.2: Σχεδιάγραμμα της προσομοίωσης διαστάσεων 500mx500m και πάχους στρώσης 50m.

Τρίτη και τελευταία παραδοχή ως προς την γεωμετρία του προσομοιώματος είναι αυτή με τον διπλασιασμό του μήκους του ρήγματος η οποία αποτυπώνεται στο σχήμα που ακολουθεί (εικόνα 4.3).

Αρχικά είχαμε θεωρήσει ότι το ρήγμα είχε μήκος 250 μέτρα, οπότε μετά τον διπλασιασμό του μεγέθους του στα 500 μέτρα χρειάστηκε να φτιάξουμε ένα αναλογικά πιο μεγάλο προσομοίωμα με τα αντίστοιχα όμως χαρακτηριστικά. Για τον λόγο αυτό το προσομοίωμα που δημιουργήθηκε έχει διαστάσεις διπλάσιες ως προς το μήκος και το πλάτος, δηλαδή 1000 μέτρα έκαστος. Το πάχος όμως παραμένει το ίδιο εφόσον δεν επηρεάζει το μήκος του ρήγματος.

Πάλι θεωρούμε ότι η διάρρηξη του ρήγματος ότι γίνεται στο μέσο του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου με αποτέλεσμα να προκύπτουν δύο ριζητεμάχη με μήκος 1000 μέτρων, 500 μέτρα πλάτος και 100 μέτρα πάχος το καθένα. Το βασικό ρήγμα μήκους 500 μέτρων εφαρμόζεται στο κέντρο ξανά, με μόνη διαφορά ότι πλέον αφήνει ελεύθερα 250 μέτρα πλευρικά του.

Τώρα, αν ο άξονας που χωρίζει τα δύο ριζητεμάχη βαθμολογηθεί από το 0 μέχρι το 1000 τότε προκύπτει ότι στις θέσεις 250 και 750 θα είναι τα σημεία αρχής και τέλους του ρήγματος. Στις θέσεις αυτές θεωρείται ότι ξεκινούν τα δευτερογενή ρήγματα και εκτείνονται κάθετα σε σχέση με τον προαναφερθέντα άξονα και έχοντας μήκος 500 μέτρα.



Εικόνα 4.3: Σχεδιάγραμμα της προσομοίωσης διαστάσεων 1000mx1000m και πάχους στρώσης 100m.

Τέλος, για το συγκεκριμένο προσομοίωμα χρησιμοποιήθηκε:

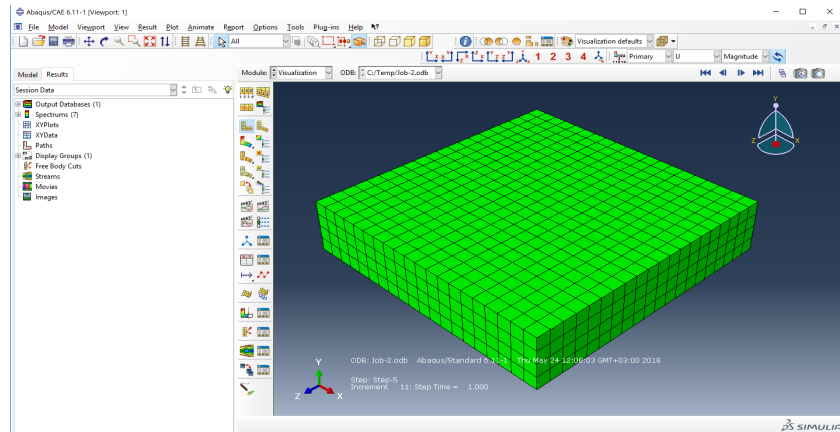
- Πυκνότητα υλικού $\rho=2 \text{ ton/m}^3$,
- Μέτρο Ελαστικότητας $E_0=10000 \text{ MPa}$
- Λόγος Poisson $\nu=0,3$.

Στην αρχή χρησιμοποιήθηκαν αρχικές γεωστατικές τάσεις δηλαδή το βάρος των υπερκείμενων και έπειτα ασκήθηκε διαφορική καθίζηση στην εδαφική ή ιζηματογενή στρώση προκειμένου να προσομοιωθεί η διάρρηξη του ρήγματος.

4.3 Βήματα για την δημιουργία προσομοίωσης στο ABAQUS

Βήμα 1

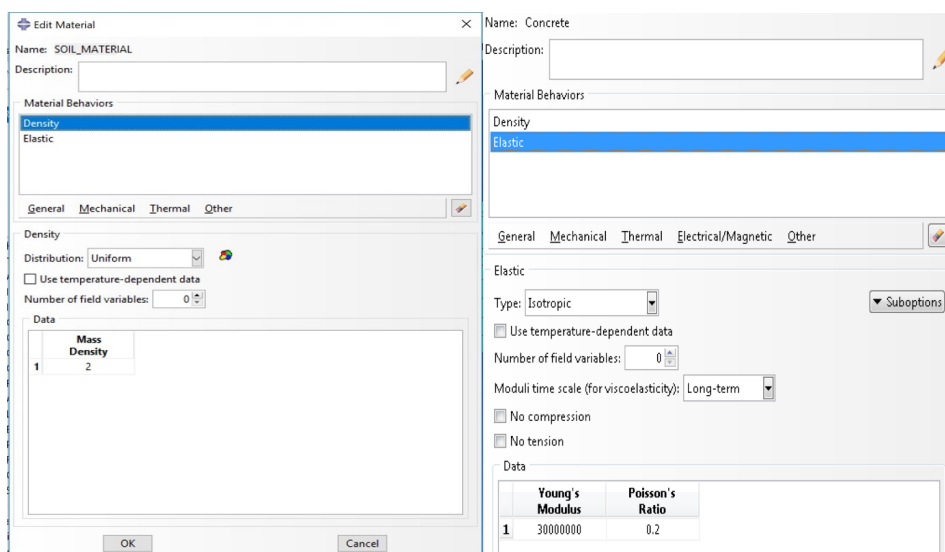
Το προγραμματιστικό περιβάλλον του ABAQUS παρέχει την δυνατότητα σχεδίασης (εικόνα 4.4). Αρχικός στόχος αποτέλεσε να αποδοθεί με ακρίβεια η γεωμετρία του προσομοιώματος. Με την χρήση εντολών CAD η διαδικασία αυτή είναι εύκολη, ενώ ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες για σφάλματα σε σχέση με την σύνταξη κώδικα για την δημιουργία input file.



Εικόνα 4.4: Σχεδιαστικό περιβάλλον ABAQUS.

Βήμα 2

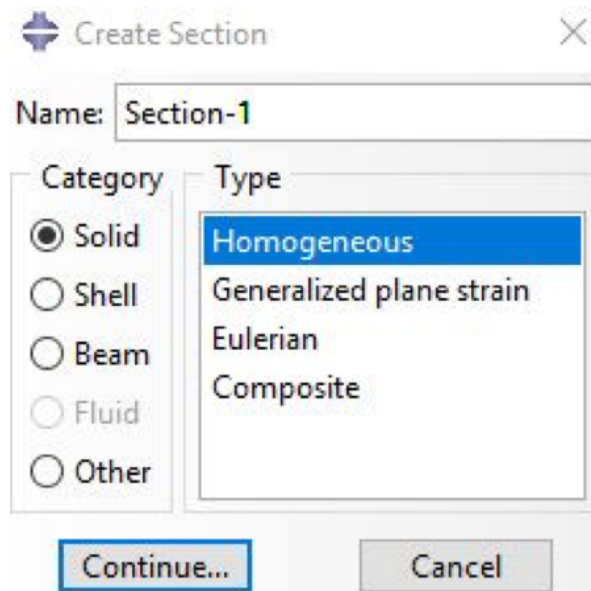
Εφόσον ολοκληρωθεί η γεωμετρία του προσομοιώματος, επόμενο βήμα αποτελεί ο καθορισμός των υλικών στην προσομοίωση (εικόνα 4.5). Στην εν λόγω εφαρμογή, έχουμε θεωρήσει ότι επρόκειτο για μια ομοιογενή εδαφική ή ιζηματογενής στρώση. Πιο συγκεκριμένα, η στρώση αυτή αποτελείται από αμμώδες εδαφικό ή ιζηματογενές υλικό, έχει γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=30^\circ$, γωνία διασταλτικότητας $\psi=3^\circ$ και συνοχή $c=50$ kPa ή $c=100$ kPa.



Εικόνα 4.5: Εφαρμογή των χαρακτηριστικών των υλικών.

Βήμα 3

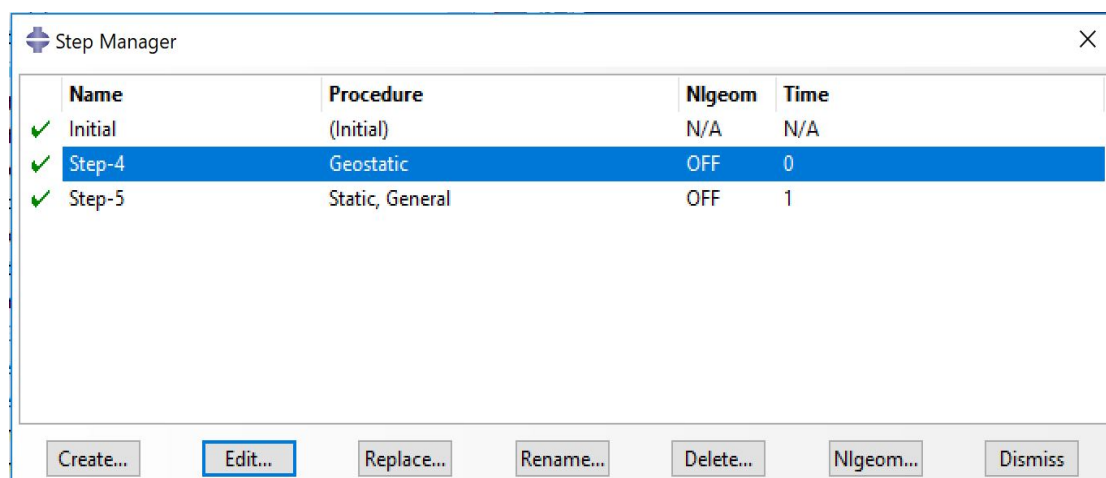
Σε αυτό το βήμα κάθε γεωμετρία χαρακτηρίζεται από το υλικό της. Το προσομοίωμα αποτελείται από μια ομοιογενή εδαφική ή ιζηματογενής στρώση, η οποία θεωρείται είναι άμμος ή άργιλος. Με την λειτουργία SECTION όπως διακρίνουμε στην (εικόνα 4.6) γίνεται η ανάθεση των ιδιοτήτων του υλικού στο γεωμετρικό μοντέλο.



Εικόνα 4.6: Ανάθεση ιδιοτήτων των υλικών.

Βήμα 4

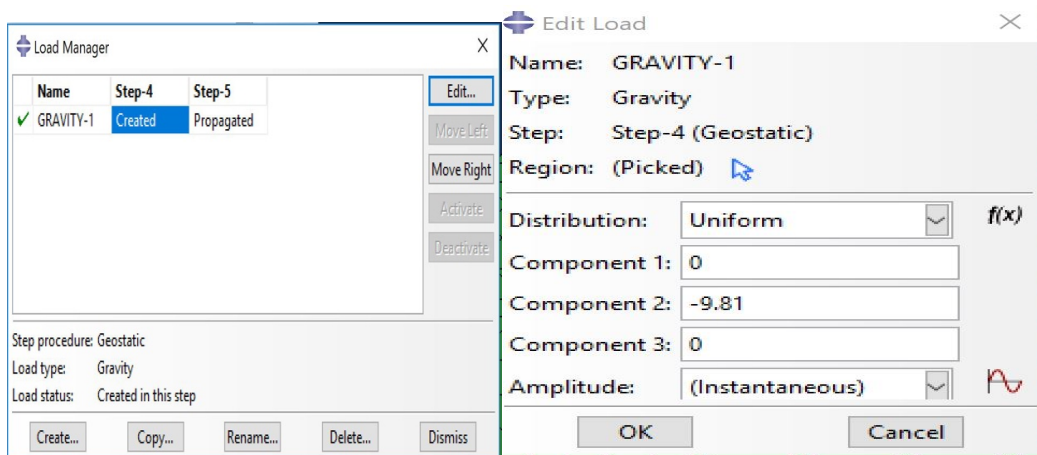
Στο ακόλουθο βήμα ορίσαμε τα στάδια τα οποία πρέπει να ακολουθηθούν για να ολοκληρωθεί η προσομοίωση. Ορίσαμε τρία στάδια στο σύνολο (εικόνα 4.7), ένα για να περιγράψει την αρχική κατάσταση που βρίσκεται το προσομοίωμα (initial step), ένα δεύτερο για να εφαρμόσουμε τις περιβαλλοντικές συνθήκες (geostatic step) και ένα τρίτο κατά το οποίο εκδηλώνονται τα ρήγματα (static step, general).



Εικόνα 4.7: Στάδια προσομοίωσης.

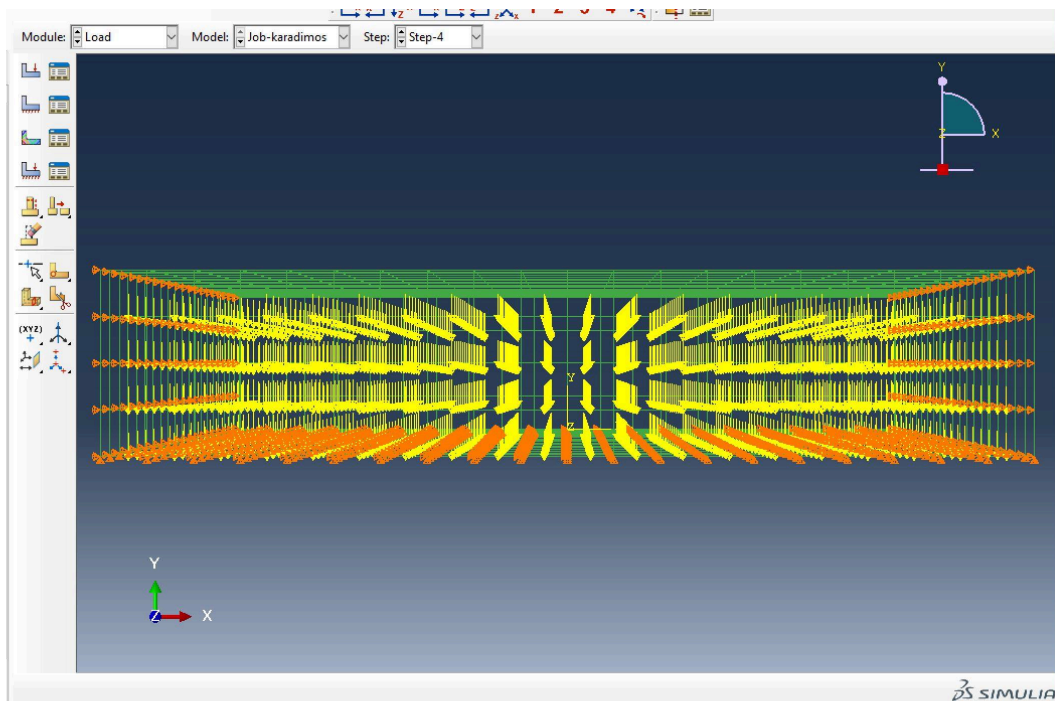
Βήμα 5

Επόμενη πράξη ήταν η εφαρμογή των συνθηκών μέσω της επιλογής Load. Η μόνη επίδραση που αφορά το προσομοίωμα είναι το βάρος της ίδιας της εδαφικής ή της ιζηματογενής στρώσης. Επομένως επιλέχθηκε όλο το προσομοίωμα όπως φαίνεται στην (εικόνα 4.8), στο οποίο και επιβλήθηκε η βαρύτητα (εικόνα 4.9).



Εικόνα 4.8: Στάδια για την εφαρμογή της βαρύτητας στο προσομοίωμα.

Βήματα κατά την δημιουργία και την εφαρμογή της βαρύτητας στο μοντέλο.

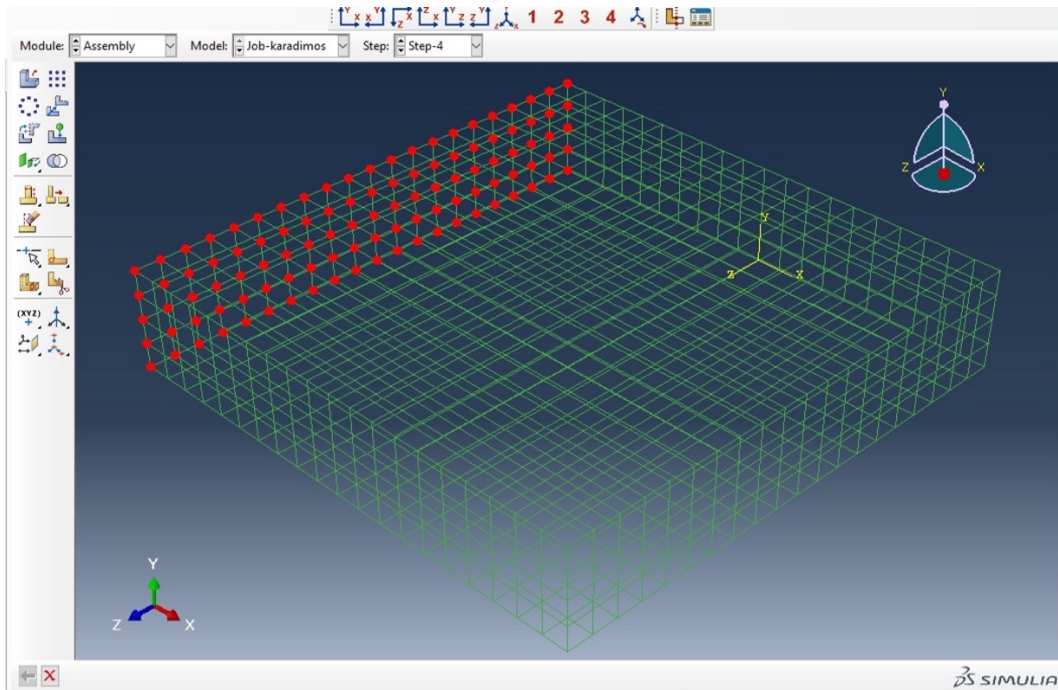


Εικόνα 4.9: Εφαρμογή της βαρύτητας στο προσομοίωμα.

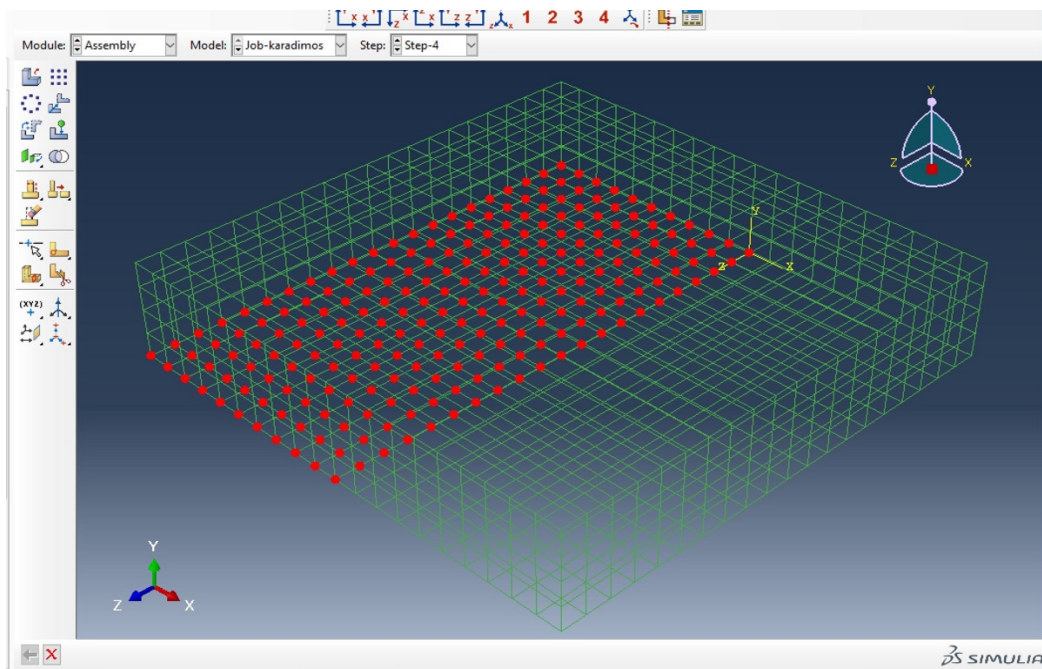
Η επιβολή της βαρύτητας σε κάθε σημείο (node) του προσομοιώματος σημειώνεται με κίτρινα βέλη προς τα κάτω. Οι πορτοκαλί κουκίδες σηματοδοτούν τα σημεία που είναι πακτωμένα ως προς έστω μία κατεύθυνση, ενώ οι κωνικοί σχηματισμοί γύρω από αυτά δείχνουν ως προς ποιους άξονες είναι πακτωμένα τα σημεία.

Βήμα 6

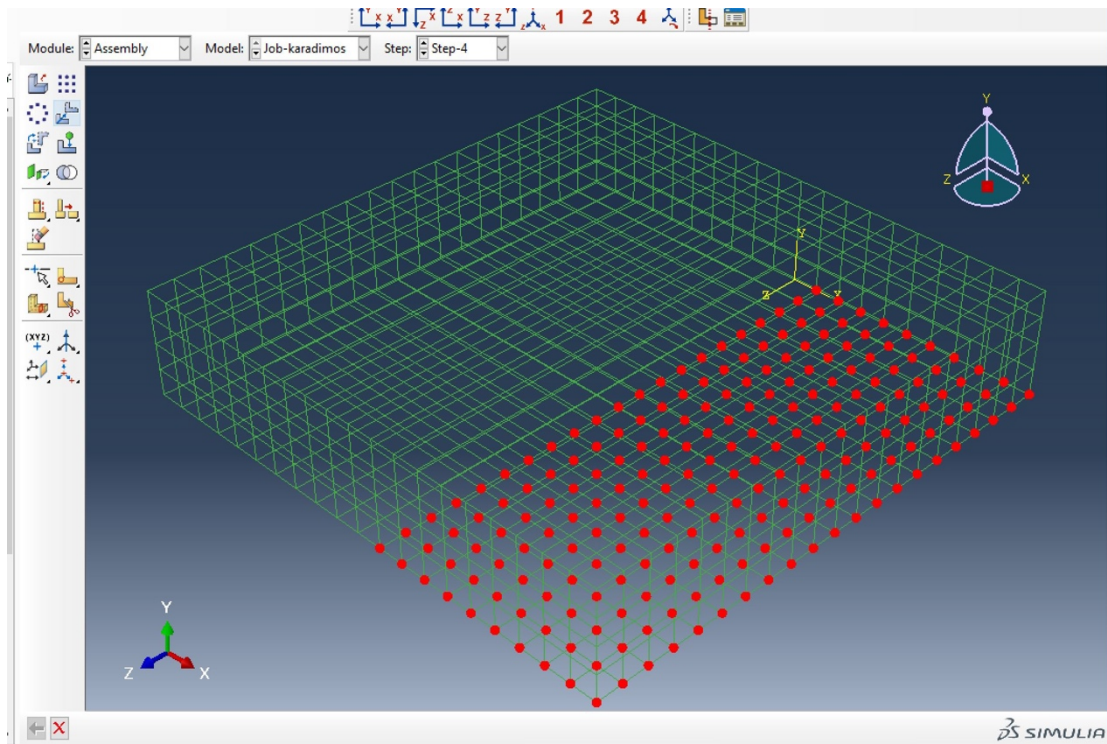
Στο μενού Assembly δίνεται η δυνατότητα να ομαδοποιηθούν πλήθη σημείων (nodes). Η πρακτική αυτή βολεύει αρκετές φορές καθώς ορισμένες ομάδες σημείων έχουν κοινά χαρακτηριστικά ή αποτελούν ένα τμήμα του προσομοιώματος. Η δυνατότητα αυτή λειτούργησε αποτελεσματικά για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών πλευρών των ρηξιτέμματων παραγώγων. Στις επόμενες εικόνες παρατίθενται τα πλέγματα που δημιουργήθηκαν (εικόνα 4.10^α, 4.10^β, 4.10^γ, 4.10^δ, 4.10^ε).



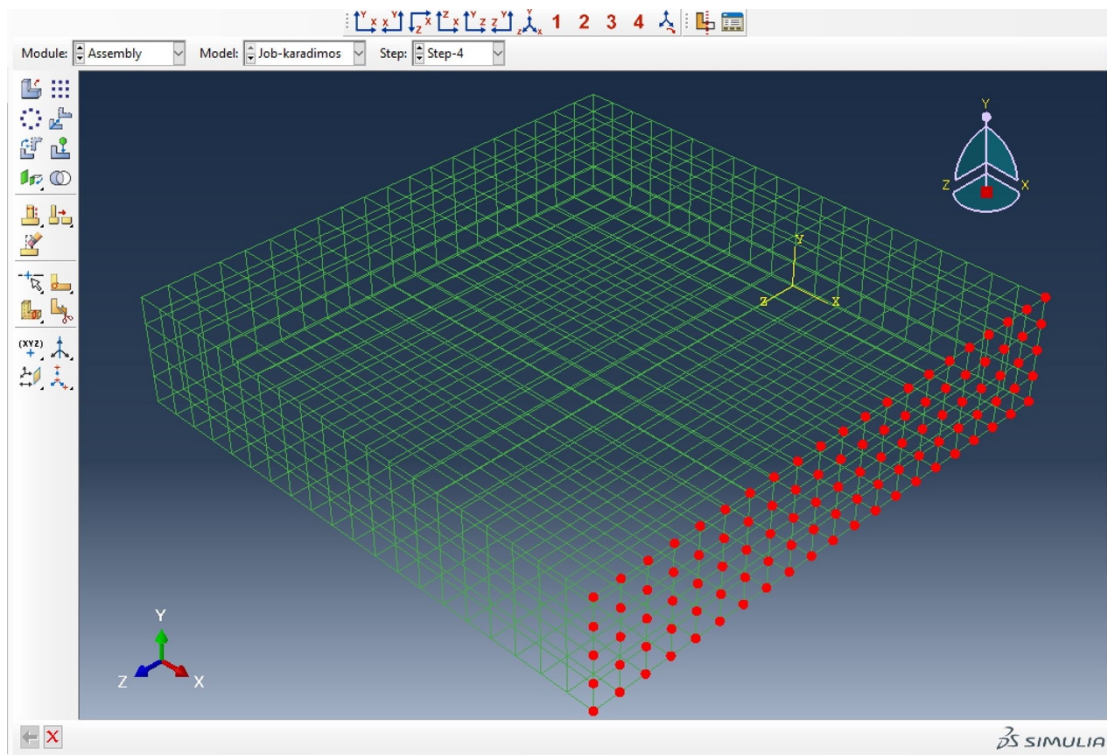
Εικόνα 4.10^α: Στη παρούσα εικόνα φαίνονται τα footwall-side nodes.



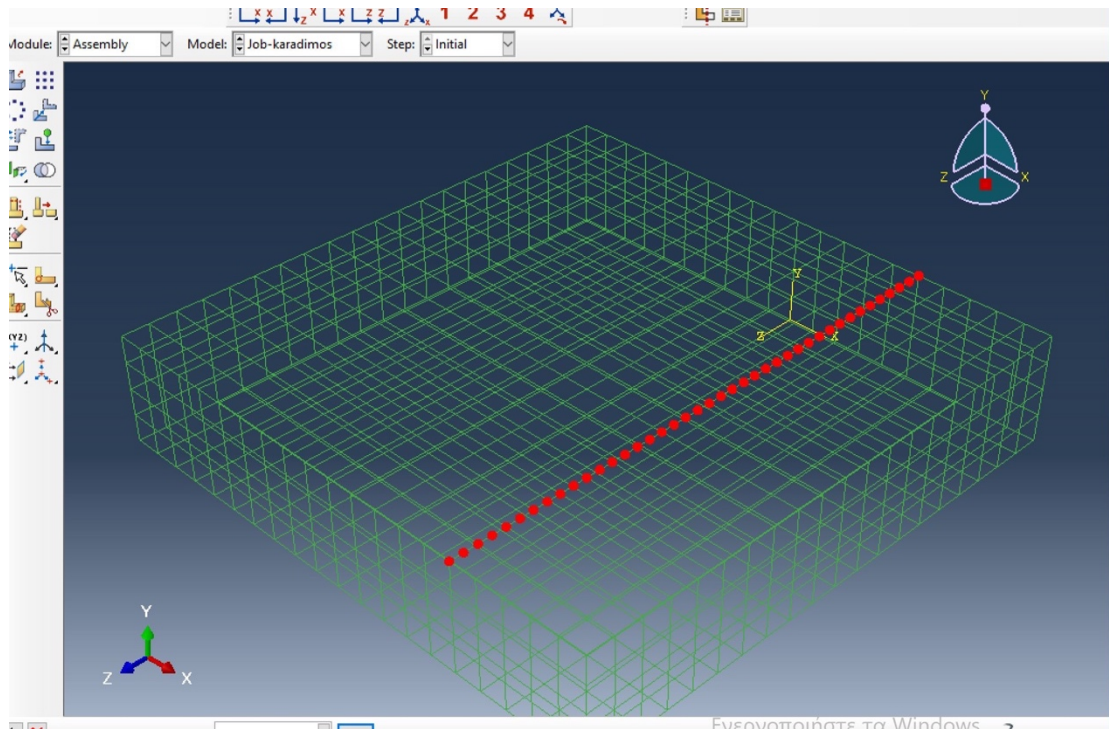
Εικόνα 4.10^β: Πλέγμα σημείων (nodes) που αποτελούν το Footwall.



Εικόνα 4.10^γ: Πλέγμα σημείων (nodes) που αποτελούν το Hanging wall.



Εικόνα 4.10^δ: Πλέγμα σημείων (nodes) που αποτελούν το Hanging side.

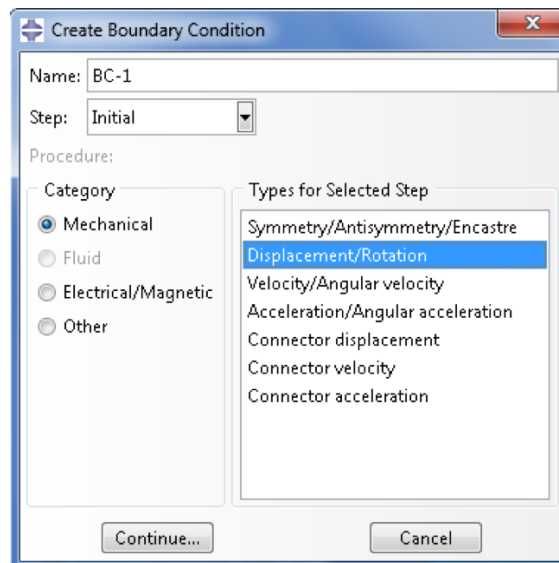


Εικόνα 4.10^ε: Η ευθεία της εδαφικής στρώσης που μελετάτε με σκοπό την χωροθέτηση αγωγού.

Η κόκκινη λωρίδα από nodes της παραπάνω εικόνας (εικόνα 4.10^ε) αποτελεί την προβλεπόμενη ευθεία χωροθέτησης αγωγού. Η ευθεία αυτή είναι παράλληλη προς το κύριο ρήγμα και ισαπέχει από αυτό και την μία ακραία πλευρά του προσομοιώματος.

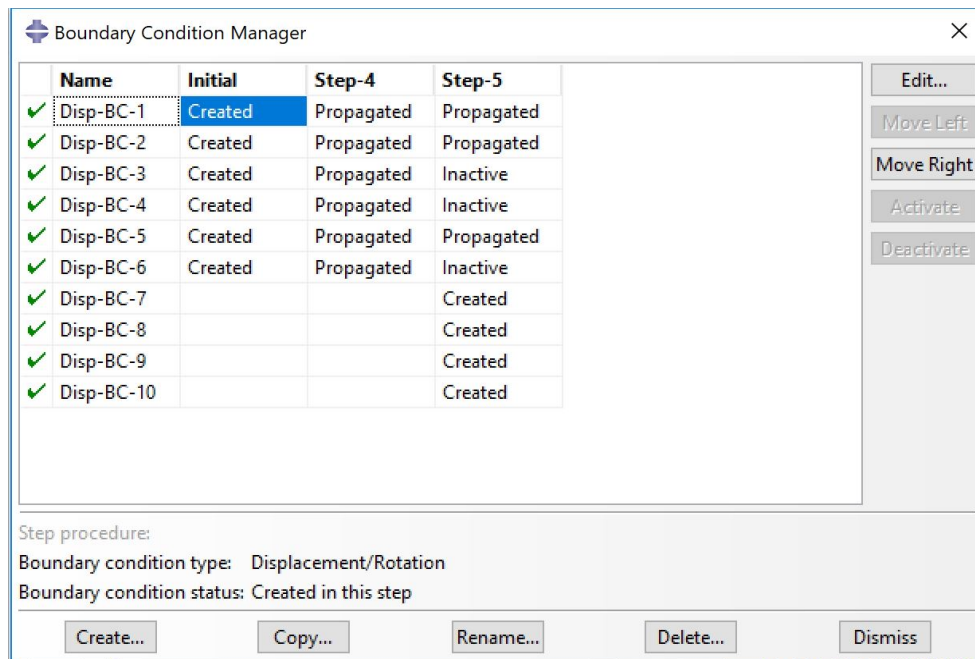
Βήμα 7

Σε αυτό το σημείο πρέπει να «οριοθετήσουμε» τις συνθήκες (εικόνα 4.12) που δημιουργήσαμε σε προηγούμενο βήμα (Load). Στο αρχικό στάδιο (initial step), πακτώθηκε ως προς τον άξονα των και x των y η βάση του προσομοιώματος, ενώ στο ίδιο στάδιο πακτώθηκαν και οι περιμετρικές πλευρές κατά x αυτές οι δύο πλευρές που τέμνουν κάθετα τον άξονα των x και ως προς z οι δύο πλευρές που τέμνουν κάθετα τον άξονα των z.



Εικόνα 4.12: Δημιουργία συνοριακών συνθηκών.

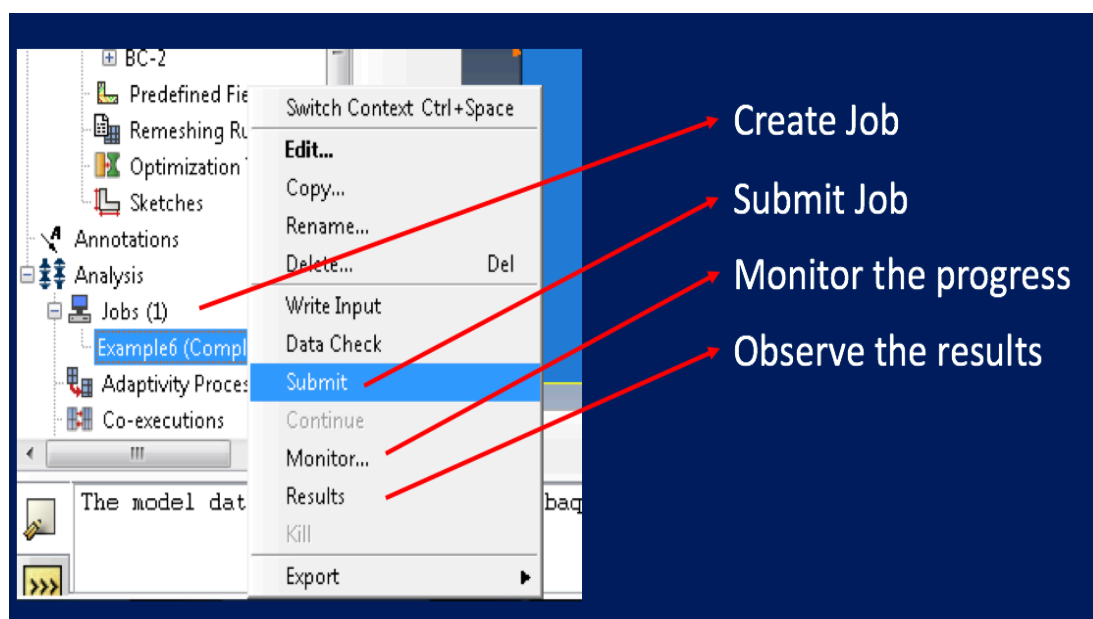
Στο Geostatic Step, δεν χρειάζεται κάποια παρέμβαση καθώς υπάρχει για την επιβολή της βαρύτητας (εικόνα 4.13). Τέλος στο Static Step εφαρμόζονται οι μετατοπίσεις και οι στροφές των ριζηταμμάτων που θεωρούμε ότι προκαλούνται εφόσον ενεργοποιεί το ρήγμα.



Εικόνα 4.13: Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών ανάλογα με το στάδιο.

Βήμα 8

Το τελικό βήμα για να «τρέξει» το προσομοίωμα είναι να δημιουργήσουμε μία εργασία (job) είναι αυτό που απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 4.14). Εφόσον τη δημιουργήσουμε το μόνο που μένει είναι να γίνει καταχώρηση ώστε να ξεκινήσουν οι αναλύσεις.



Εικόνα 4.14: Δημιουργία εργασίας για την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Το Monitor (εικόνα 4.15) βοηθάει αποτελεσματικά στην απαλοιφή λαθών και στην σωστή αναπαραγωγή των προσομοιώσεων. Ανά πάσα στιγμή όποιο σφάλμα (error) προκύψει κατά την διάρκεια των αναλύσεων το εντοπίζει και εμφανίζεται στην οθόνη το κατάλληλο σημείωμα για την διόρθωσή του.

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equal Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	1	1	0	1	1	1	1	1
2	1	1	0	1	1	1.01	0.01	0.01
2	2	1	0	1	1	1.02	0.02	0.01
2	3	1	0	1	1	1.035	0.035	0.015
2	4	1	0	1	1	1.0575	0.0575	0.0225
2	5	1	0	1	1	1.09125	0.09125	0.03375
2	6	1	0	1	1	1.14188	0.141875	0.050625
2	7	1	0	1	1	1.21781	0.217812	0.0759375
2	8	1	0	1	1	1.33172	0.331719	0.113906
2	9	1	0	1	1	1.50258	0.502578	0.170859
2	10	1	0	1	1	1.75887	0.758867	0.256289
2	11	1	0	1	1	2	1	0.241133

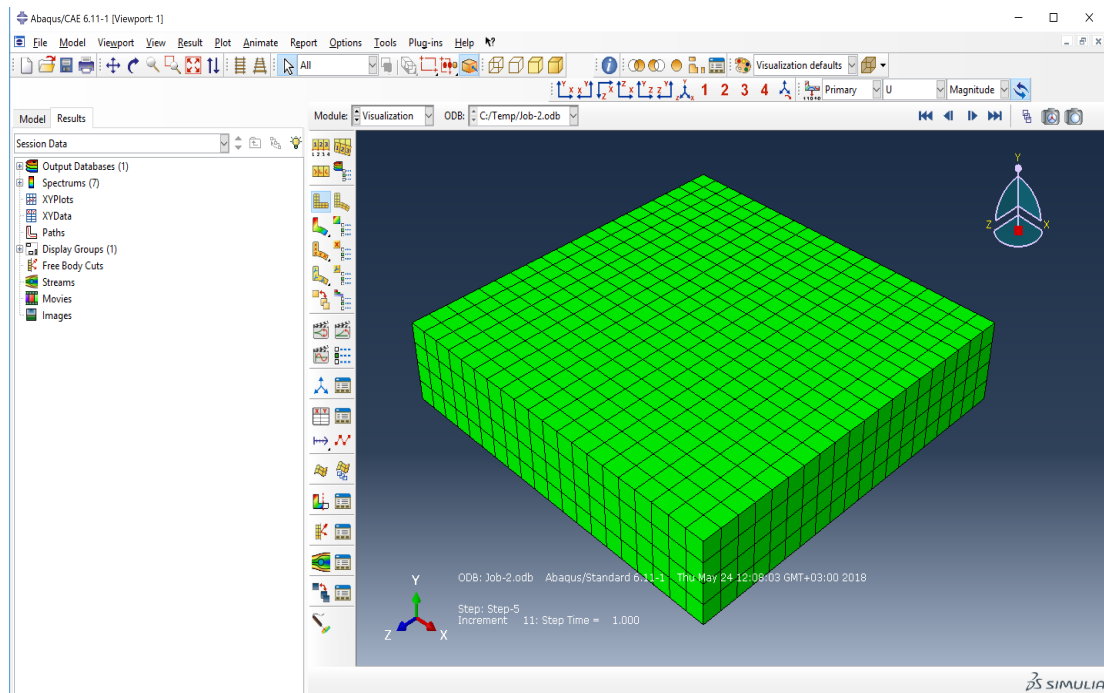
Log Errors Warnings Output Data File Message File Status File

Submitted: Thu May 24 12:07:54 2018
 Started: Analysis Input File Processor
 Completed: Analysis Input File Processor
 Started: Abaqus/Standard
 Completed: Abaqus/Standard
 Completed: Thu May 24 12:09:05 2018

Search Text
 Text to find: Match case

Εικόνα 4.15: Το Monitor ενημερώνει για την εξέλιξη των διεργασιών.

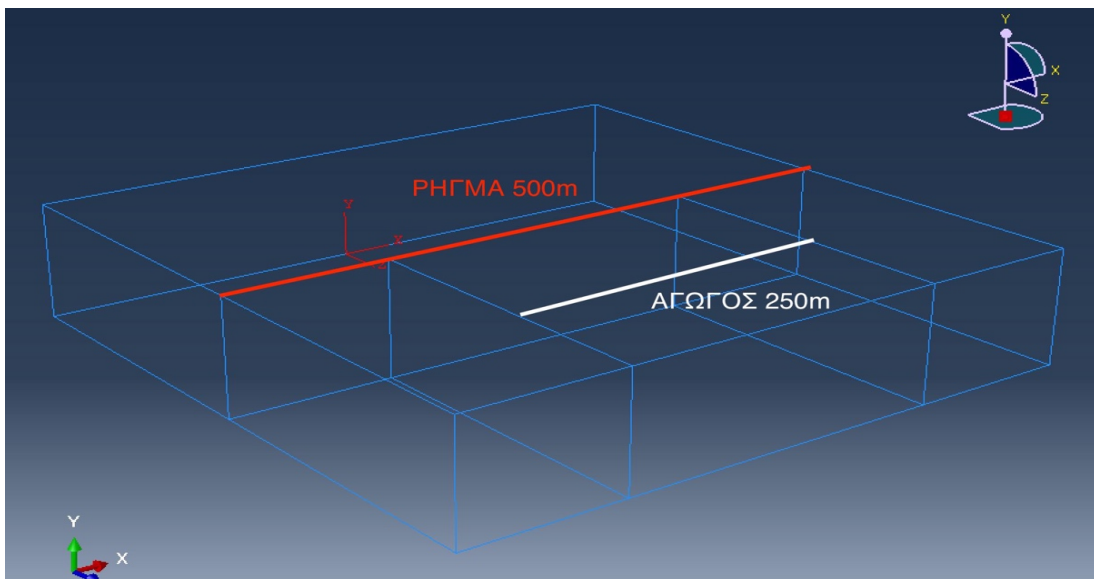
Τέλος, πατώντας το κουμπί Results εμφανίζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε οπτική μορφή (εικόνα 4.16). Για την προσκόμιση πιο περίπλοκων πληροφοριών απαιτείται γνώση σύνταξης input file, ωστόσο πιο απτές πληροφορίες, όπως οι συντεταγμένες σημείων, μπορούν να παρθούν από τα εργαλεία (tools).



Εικόνα 4.16: Οπτική μορφή των αποτελεσμάτων.

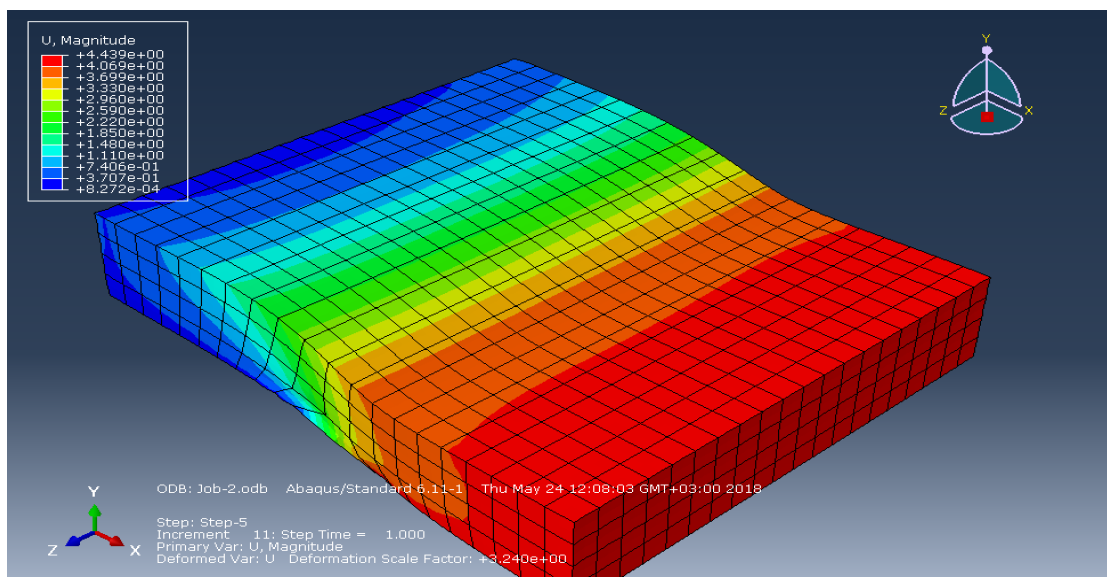
4.4 Εφαρμογή

Σε πρώτη φάση δημιουργήθηκε ένα προσομοίωμα με σκοπό να εφαρμοστεί το βασικό ρήγμα σε όλες τις πιθανές του μορφές. Η αρχική εκτίμηση είναι πως ένα ρήγμα και ένας αγωγός βρίσκονται σε παράλληλη διεύθυνση όπως διαπιστώνεται και στην (εικόνα 4.17). Πρωταρχικό στόχο αποτέλεσε η λήψη αναλύσεων για τη περίπτωση όπου το ρήγμα εκτείνεται περισσότερο από ότι ο αγωγός. Γι' αυτό το λόγο δημιουργήθηκε ένα μοντέλο με διαστάσεις μήκους 500 μέτρων, πλάτους 500 μέτρων και πάχους 100 μέτρων. Το ρήγμα αν και στο συγκεκριμένο μοντέλο έχει μήκος 500 μέτρα, θεωρείται ότι εκτείνεται κατά τις δύο διευθύνσεις άπειρα, ενώ το μήκος του αγωγού θεωρείται πεπερασμένο λαμβάνοντας τιμή μήκους 250 μέτρων. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η σχηματική απεικόνιση.

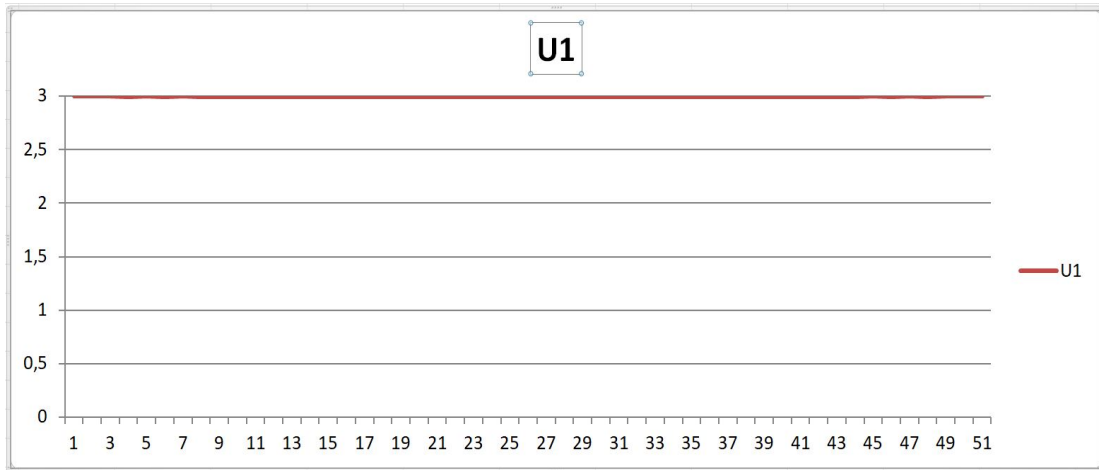


Εικόνα 4.17: Αγωγός πεπερασμένου μήκους παράλληλος σε ρήγμα.

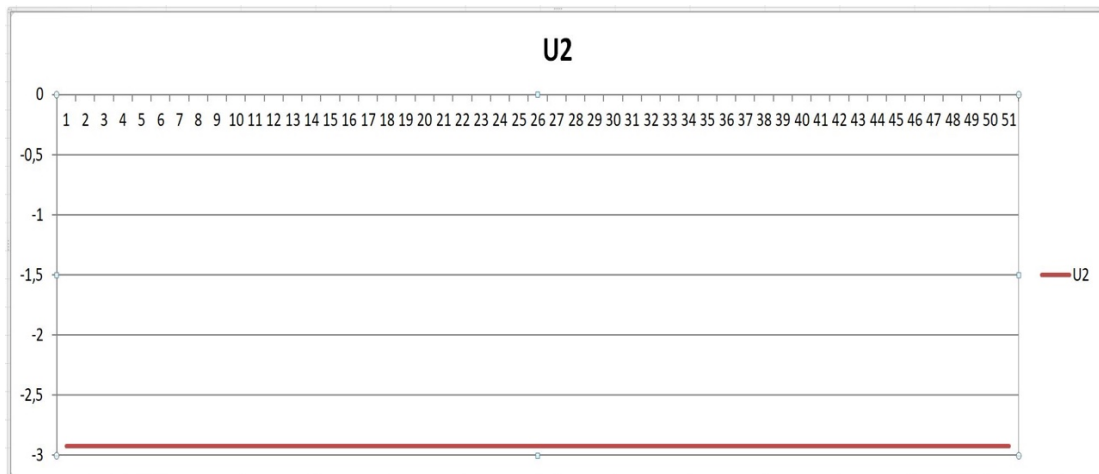
Στην συνέχεια ακολουθούν τα στοιχεία και τα διαγράμματα των αναλύσεων και από τους τρεις τύπους ρηγμάτων που μελετώνται:



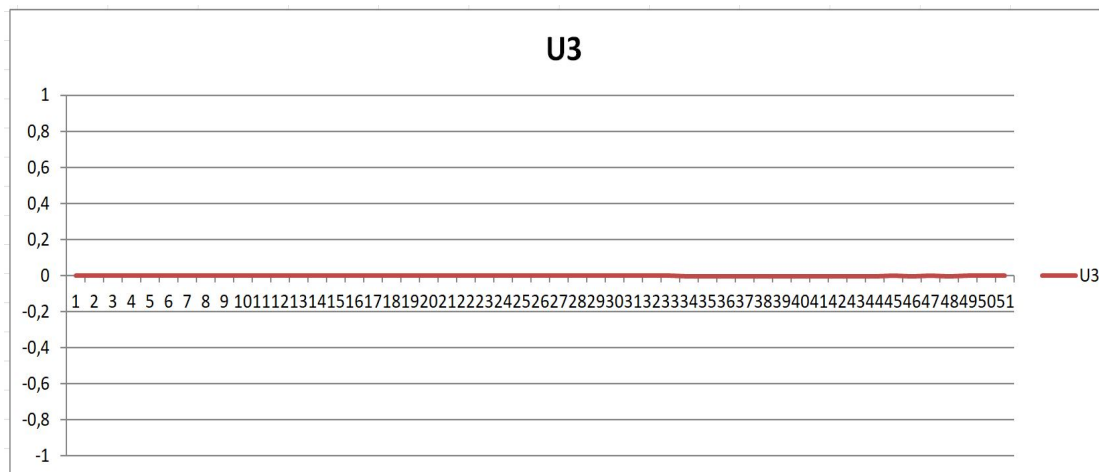
Σχήμα 1: Προσομοίωση των ιζηματογενών στρώσεων για κανονικό ρήγμα.



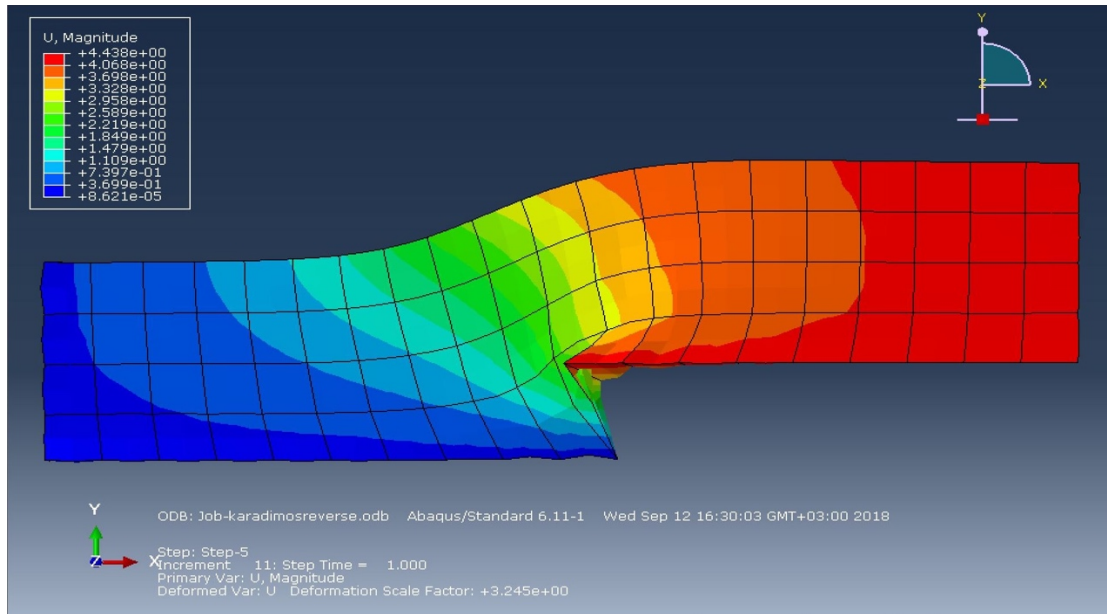
Διάγραμμα 1^α: Κανονικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.



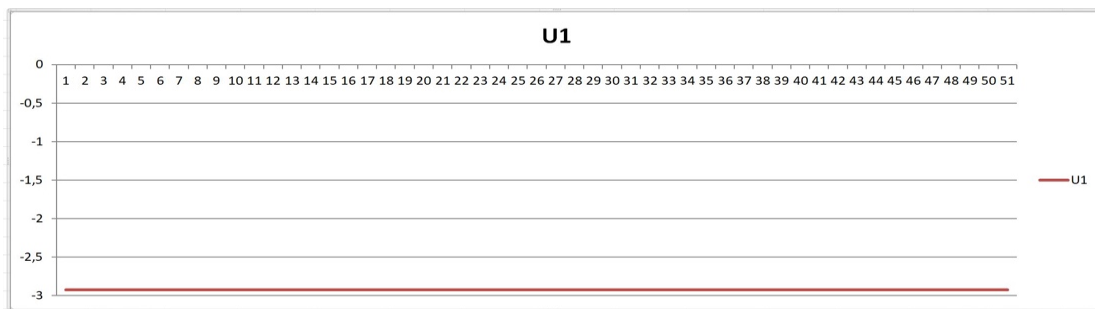
Διάγραμμα 1^β: Κανονικό ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.



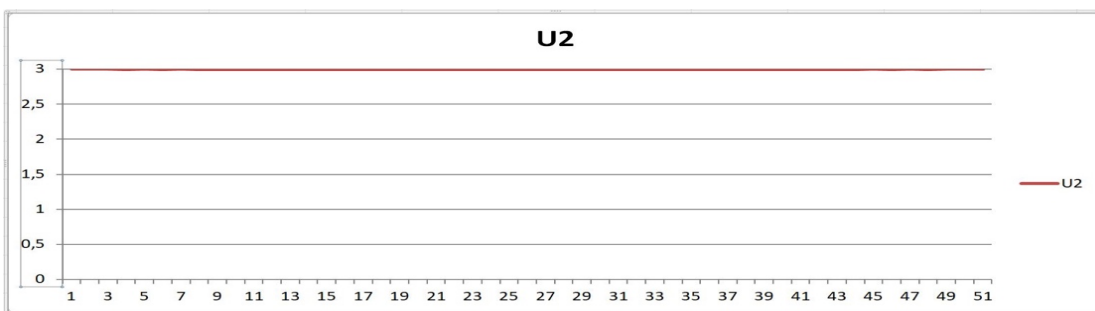
Διάγραμμα 1^γ: Κανονικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.



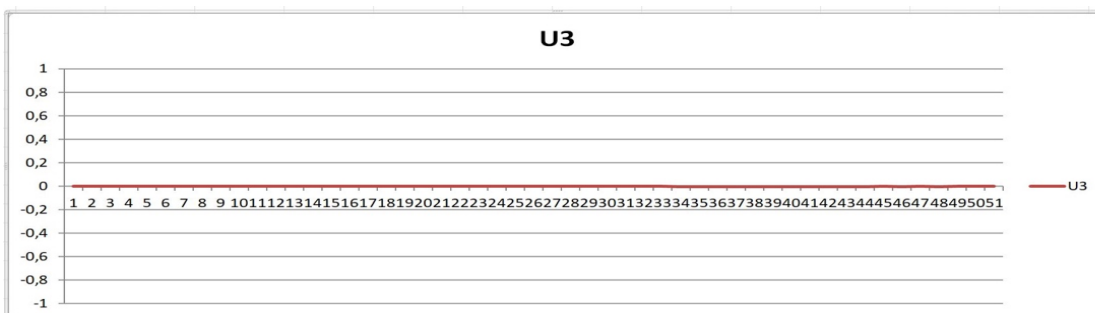
Σχήμα 2: Προσομοίωση των ιζηματογενών στρώσεων για ανάστροφο ρήγμα.



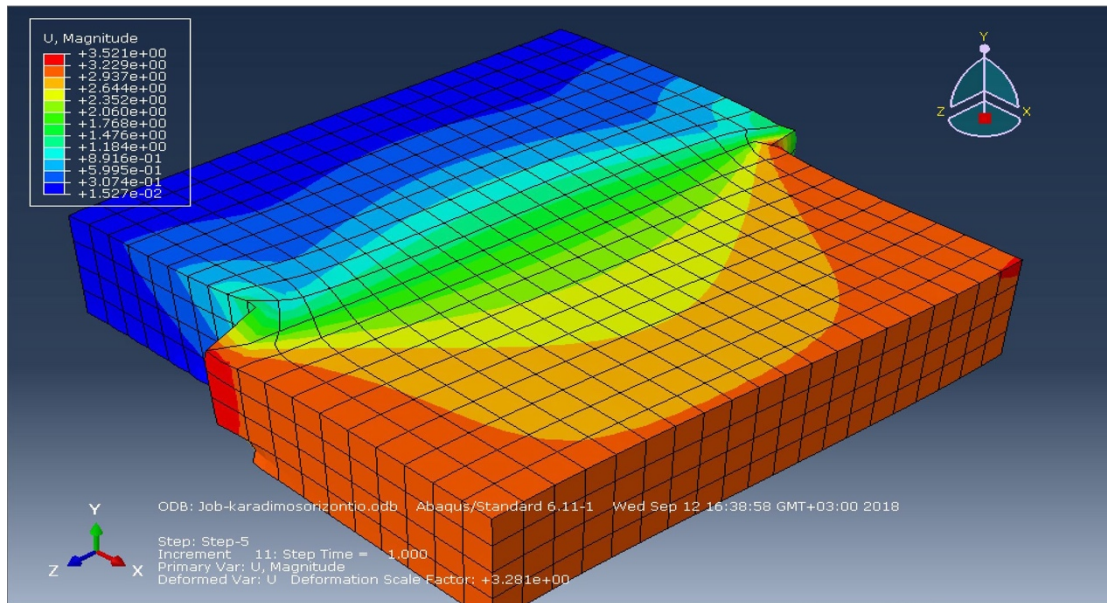
Διάγραμμα 2^α: Ανάστροφο ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.



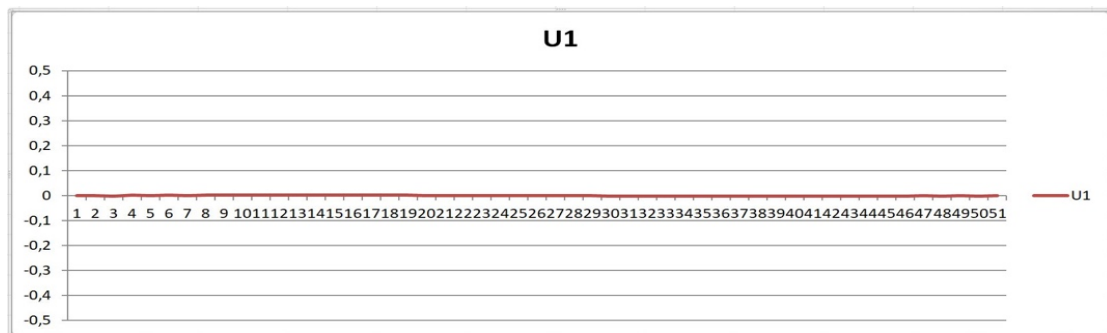
Διάγραμμα 2^β: Ανάστροφο ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.



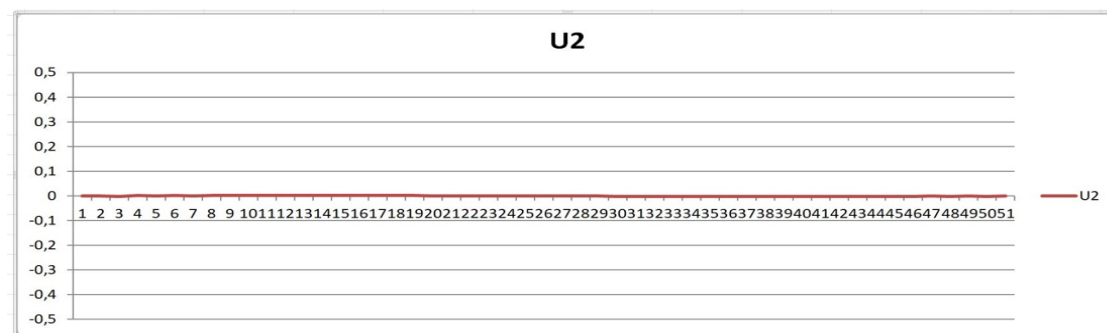
Διάγραμμα 2^γ: Ανάστροφο ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.



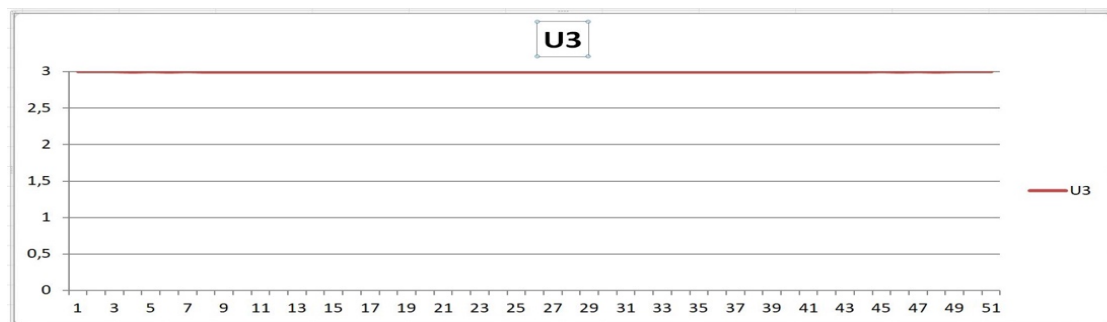
Σχήμα 3: Προσομοίωση των ιζηματογενών στρώσεων για οριζοντιολισθητικό ρήγμα.



Διάγραμμα 3^α: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.



Διάγραμμα 3^β: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.



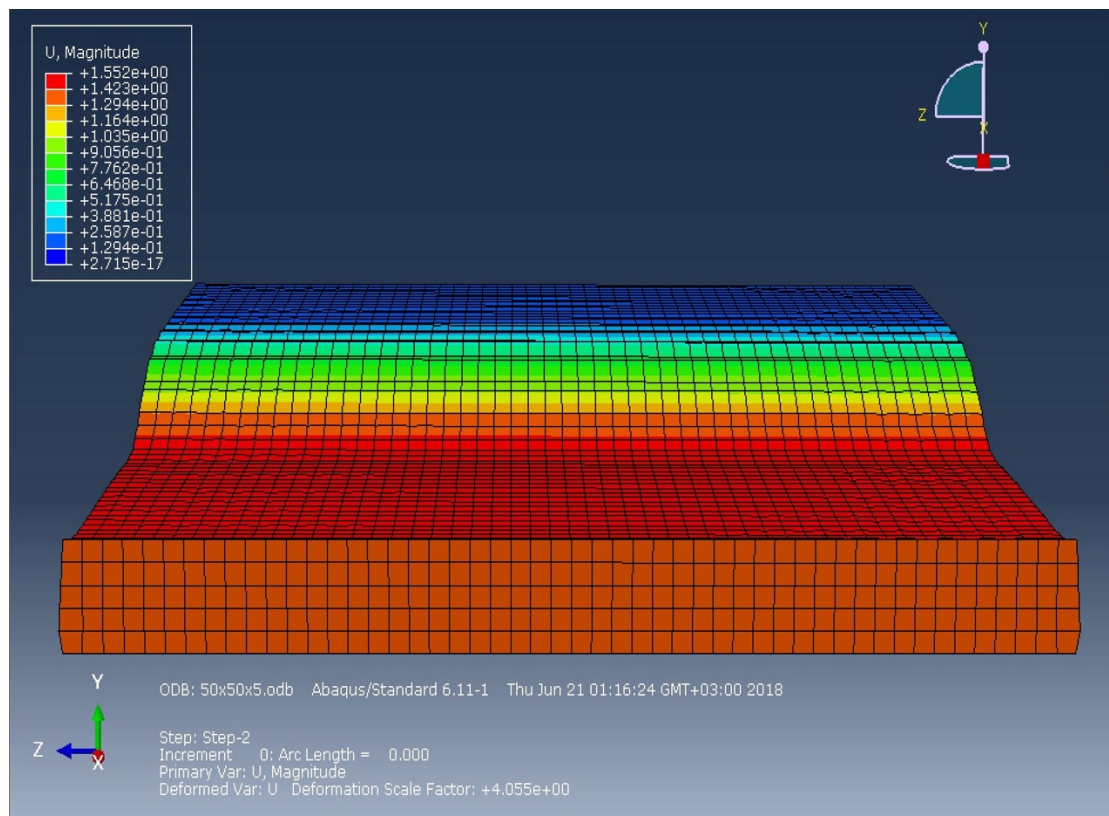
Διάγραμμα 3^γ: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

Στα διαγράμματα που προηγήθηκαν (διάγραμμα 1, διάγραμμα 2, διάγραμμα 3) φαίνονται οι μετατοπίσεις των σημείων (nodes) του αγωγού, στην περίπτωση όπου ο αγωγός έχει μικρότερο μήκος από το ρήγμα, οπότε ο αγωγός βρίσκεται εξολοκλήρου στο ριξητέμαχος.

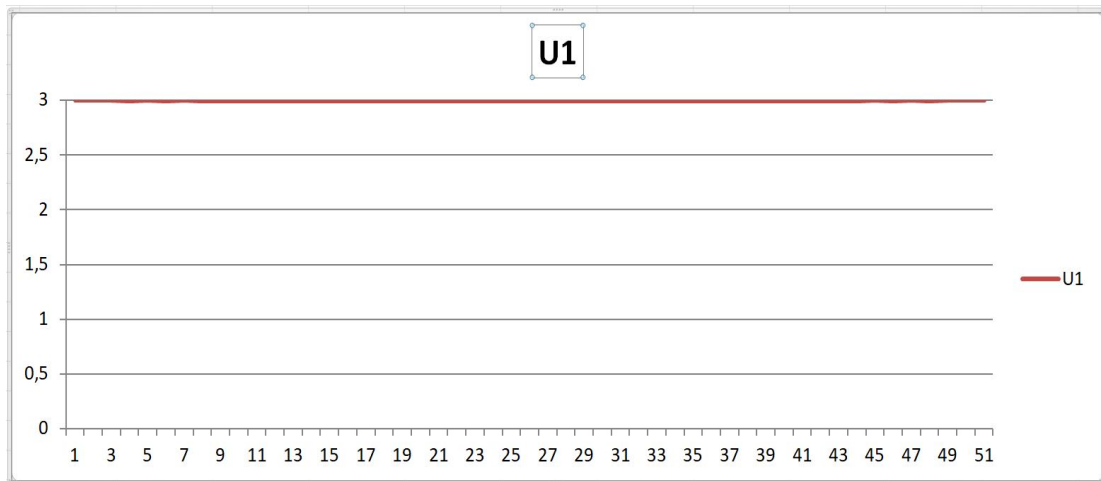
Από τα διαγράμματα προκύπτει το συμπέρασμα, εφόσον οι μετατοπίσεις είναι ακριβώς οι ίδιες με του υπόλοιπου ριξητέμαχος, ότι ο αγωγός κινείται ταυτόχρονα με το υπόλοιπο ριξητέμαχος. Εκτελέστηκαν 3 διαφορετικά πειράματα, ένα για κάθε περίπτωση ρήγματος (κανονικού, ανάστροφου, οριζοντιολισθητικού). Η μέγιστη κατακόρυφη ή οριζόντια μετατόπιση της επιφάνειας της αμμόδους εδαφικής ή ιζηματογενής στρώσης πάχους 100 m είναι της τάξης των 3 m σε όλες τις περιπτώσεις. Το μόνο που αλλάζει είναι ο προσανατολισμός, δηλαδή στην περίπτωση του κανονικού ρήγματος η μέγιστη τιμή της μετατόπισης βρίσκεται στον άξονα των y, στην περίπτωση του ανάστροφου επίσης στον άξονα y αλλά με θετικό πρόσημο, ενώ στην περίπτωση του οριζοντιολισθητικού ως προς τον άξονα των z.

4.5 Παραμετρική ανάλυση

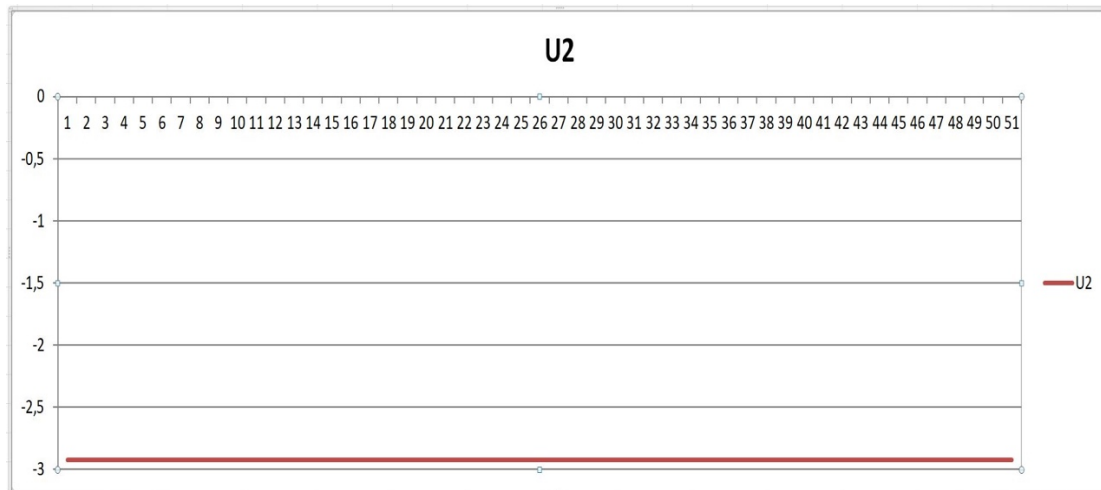
Για κάθε ένα από τα προσομοιώματα έγινε παραμετρική ανάλυση με βάση το υλικό και το πάχος της στρώσης ή για το ίδιο το υλικό αυτής. Πρώτα ξεκινήσαμε μεταβάλλοντας το πάχος της στρώσης H στα 50 m, που είναι ακριβώς το μισό της αρχικής τιμής. Η εφαρμογή έγινε και στους τρεις τύπους ρηγμάτων. Τα αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω.



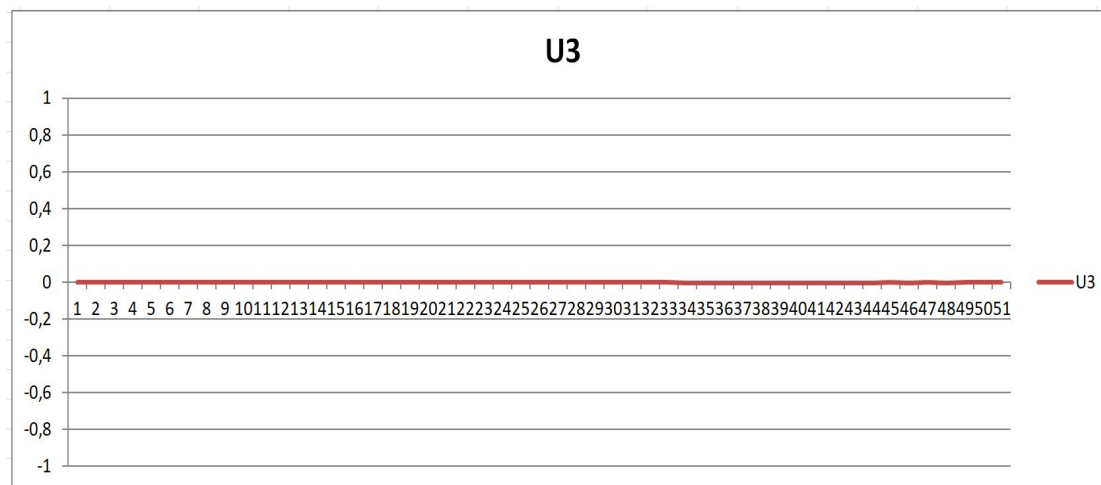
Σχήμα 4: Προσομοίωση κανονικού ρήγματος με εφαρμογή πάχους $H=50m$.



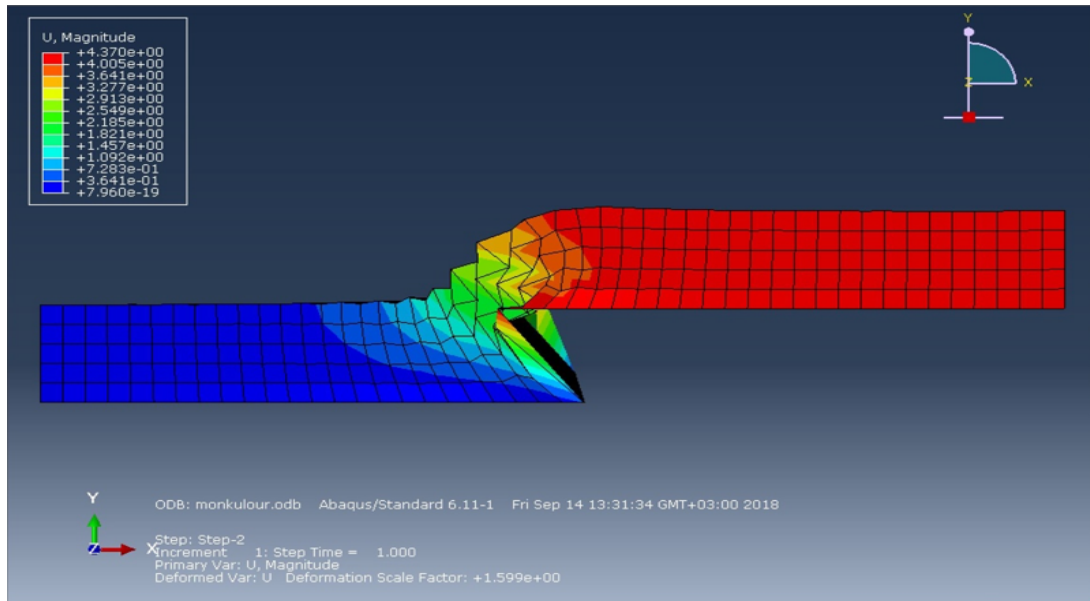
Διάγραμμα 4^α: Κανονικό ρήγμα - Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.



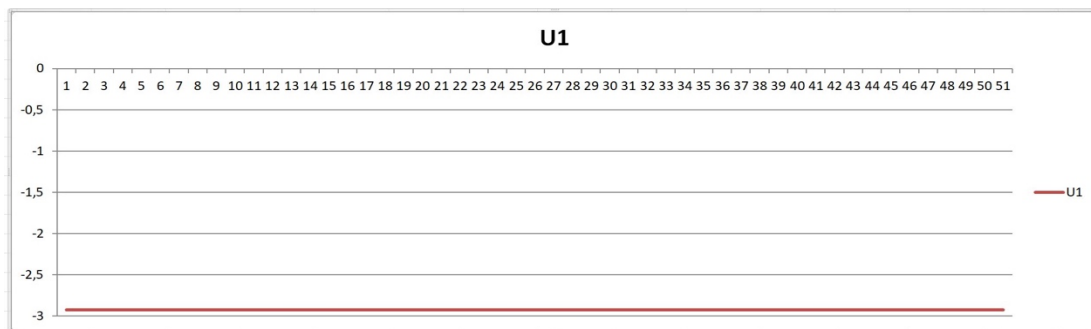
Διάγραμμα 4^β: Κανονικό ρήγμα - Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.



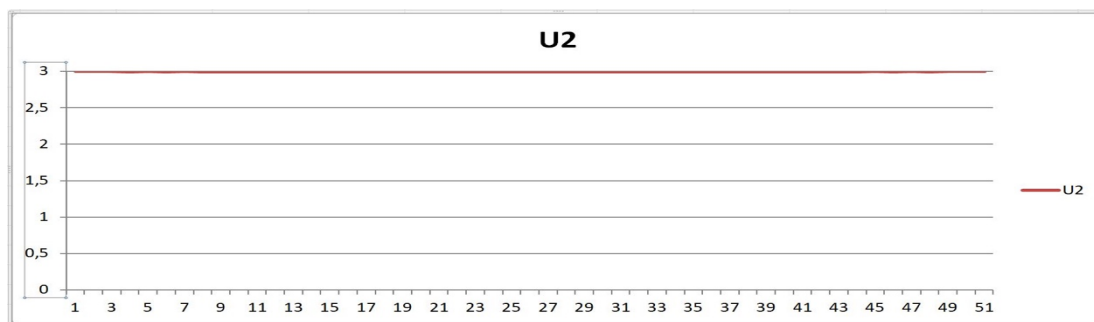
Διάγραμμα 4^γ: Κανονικό ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.



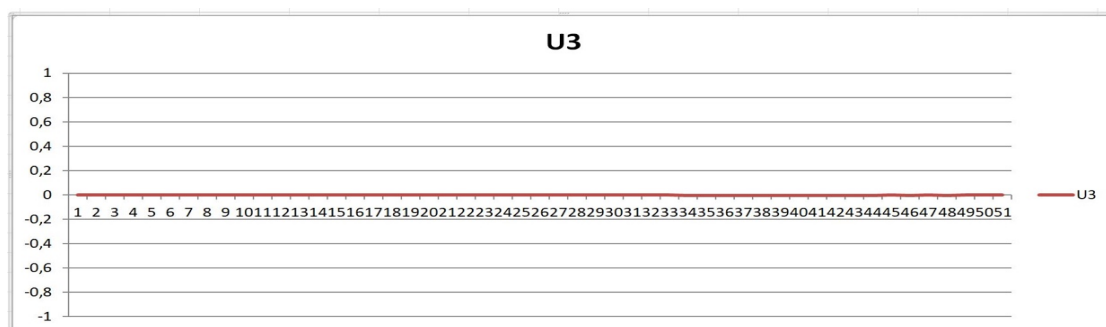
Σχήμα 5: Προσομοίωση ανάστροφου ρήγματος με εφαρμογή πάχους $H=50m$.



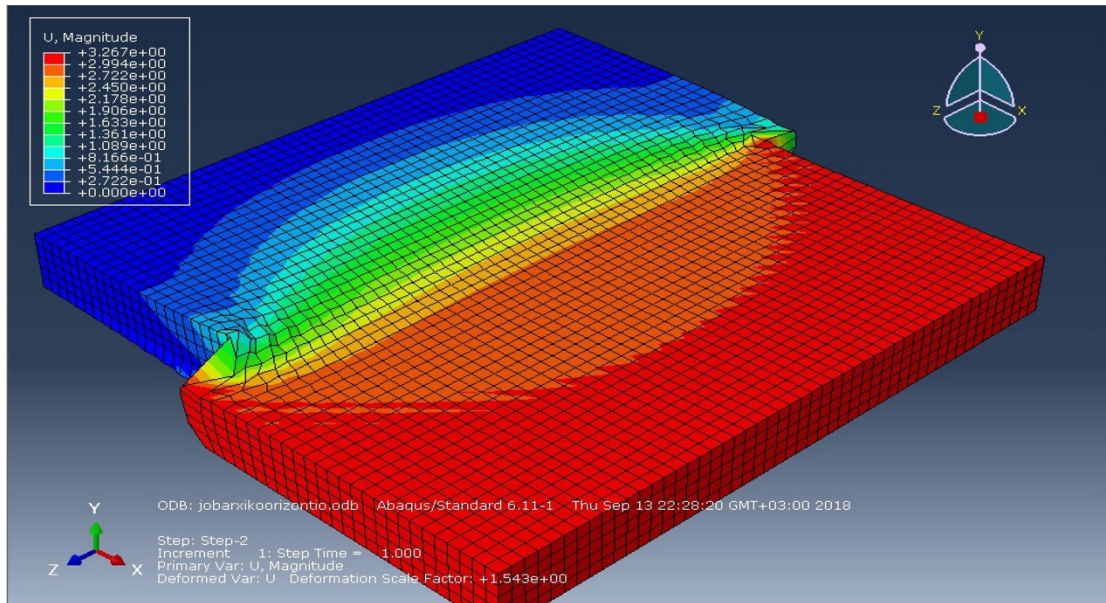
Διάγραμμα 5^α: Ανάστροφο ρήγμα - Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.



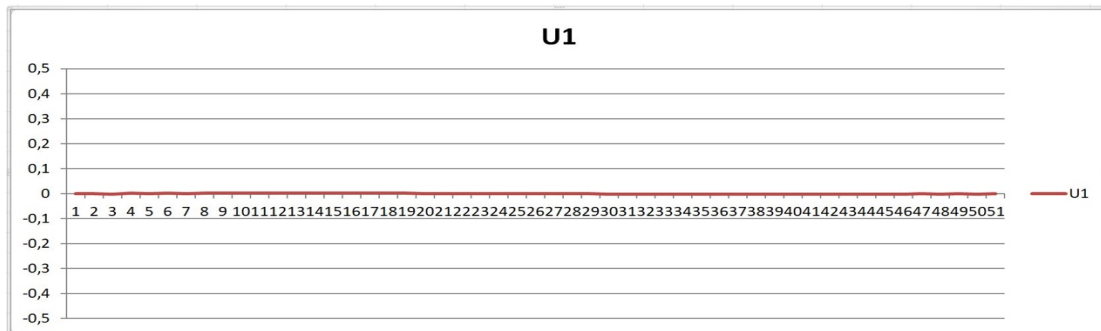
Διάγραμμα 5^β: Ανάστροφο ρήγμα - Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.



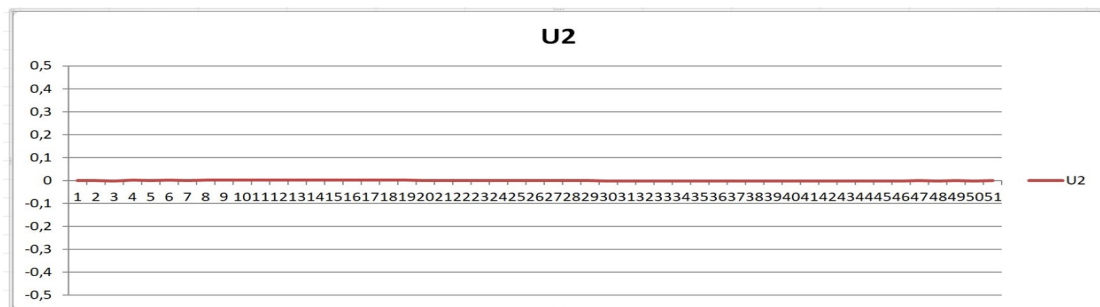
Διάγραμμα 5^γ: Ανάστροφο ρήγμα - Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.



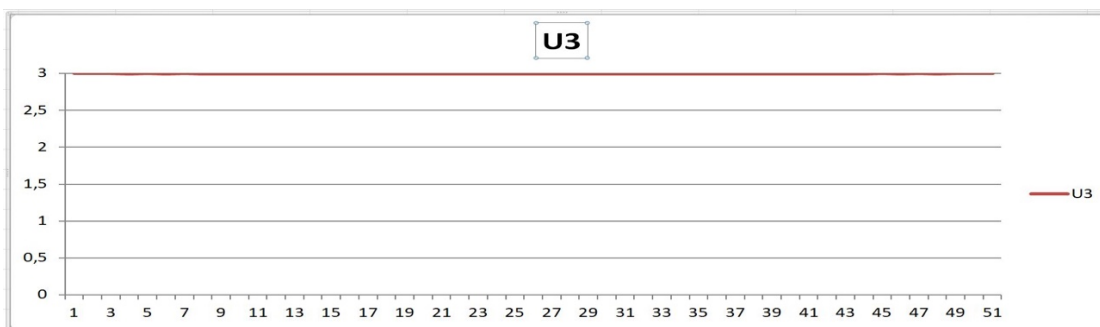
Σχήμα 6: Προσομοίωμα Οριζοντιολισθητικού ρήγματος, εφαρμογή πάχους $H=50m$.



Διάγραμμα 6^α: Οριζοντιοισθητικό ρήγμα - Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.



Διάγραμμα 6^β: Οριζοντιοισθητικό ρήγμα - Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.

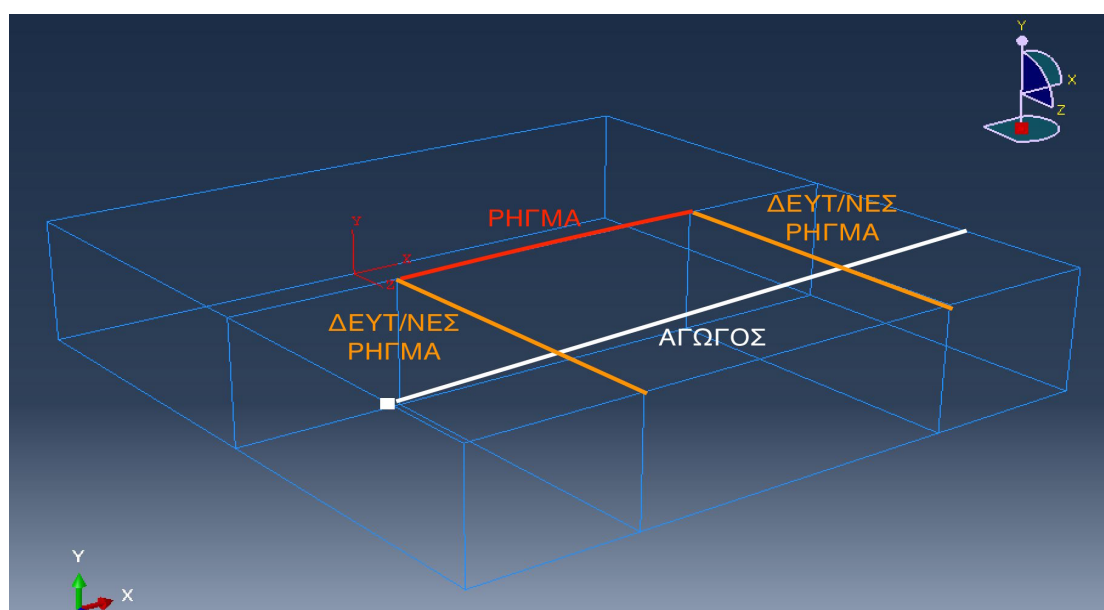


Διάγραμμα 6^γ: Οριζοντιοισθητικό ρήγμα - Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω σχήματα (σχήματα 1,2,3,4,5,6) και τα αντίστοιχα διάγραμμα (διαγράμματα 1,2,3,4,5,6) σε καμία των περιπτώσεων δεν παρατηρείται σχετική κίνηση μεταξύ του αγωγού και της επιφάνειας του ρήγματος. Οι σχετικές διαφορές μεταξύ των μετατοπίσεων ως προς όλες τις διευθύνσεις είναι απειροελάχιστες σε σχέση με το άλμα του ρήγματος. Τα πειράματα επαναλήφθηκαν και για υλικό με διπλάσια ελαστικότητα $E=20.000$, ωστόσο δεν παρατηρήθηκαν αισθητές αλλαγές στις μετατοπίσεις των σημείων (nodes) του αγωγού. Έτσι προκύπτει το συμπέρασμα ότι αν ένα ρήγμα συντρέχει παράλληλα με έναν αγωγό ο οποίος να έχει μικρότερη προέκταση από το εν λόγω ρήγμα, τότε ανεξάρτητα από το μήκος, το πάχος της στρώσης του υλικού που είναι θαμμένος ή των χαρακτηριστικών του υλικού παρατηρούμε ότι συμπεριφέρονται κατά τον ίδιο τρόπο χωρίς να υπάρχουν σχετικές μετακινήσεις μεταξύ αυτών των δύο. Οπότε μία τέτοια περίπτωση συνθήκων δεν αποτελεί απειλή για την κατασκευή.

4.6 Μελέτη δευτερογενών ρηγμάτων

Στη παρούσα φάση δημιουργήθηκε ένα προσομοίωμα με σκοπό να εξετασθεί το αντίστροφο ενδεχόμενο, θεωρούμε δηλαδή, ότι το ρήγμα έχει μήκος μικρότερο από εκείνο του αγωγού που εκτείνεται και προς τις δύο κατευθύνσεις άπειρα θεωρητικά (εικόνα 4.18). Πάλι κύριο χαρακτηριστικό του αγωγού και του ρήγματος αποτελεί η παραλληλία. Για την προσκόμιση των απαραίτητων αποτελεσμάτων θεωρήσαμε ένα αντίστοιχο μοντέλο με το πρωταρχικό, με διαστάσεις μήκους 500 μέτρων, πλάτους 500 μέτρων και πάχους 100 μέτρων. Ωστόσο, σε αυτήν την περίπτωση το ρήγμα είναι αυτό που θεωρείται πεπερασμένο λαμβάνοντας τιμή μήκους 250 μέτρων, ενώ ο αγωγός είναι αυτός που θεωρείται ότι εκτείνεται κατά τις δύο διευθύνσεις άπειρα. Βέβαια αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί στο προγραμματιστικό περιβάλλον του ABAQUS οπότε εκμεταλλευόμαστε όλο το μήκος του προσομοιώματος που είναι 500 μέτρα. Με δεδομένο όμως ότι το ρήγμα διαθέτει πεπερασμένο μήκος, θεωρούμε ότι στις δύο άκρες του προκύπτουν δευτερογενή ρηγματα τα οποία εκδηλώνονται σε κάθετο φορέα σε σχέση με το αρχικό ρήγμα. Παρακάτω ακολουθεί η σχετική γεωμετρία του προσομοιώματος.



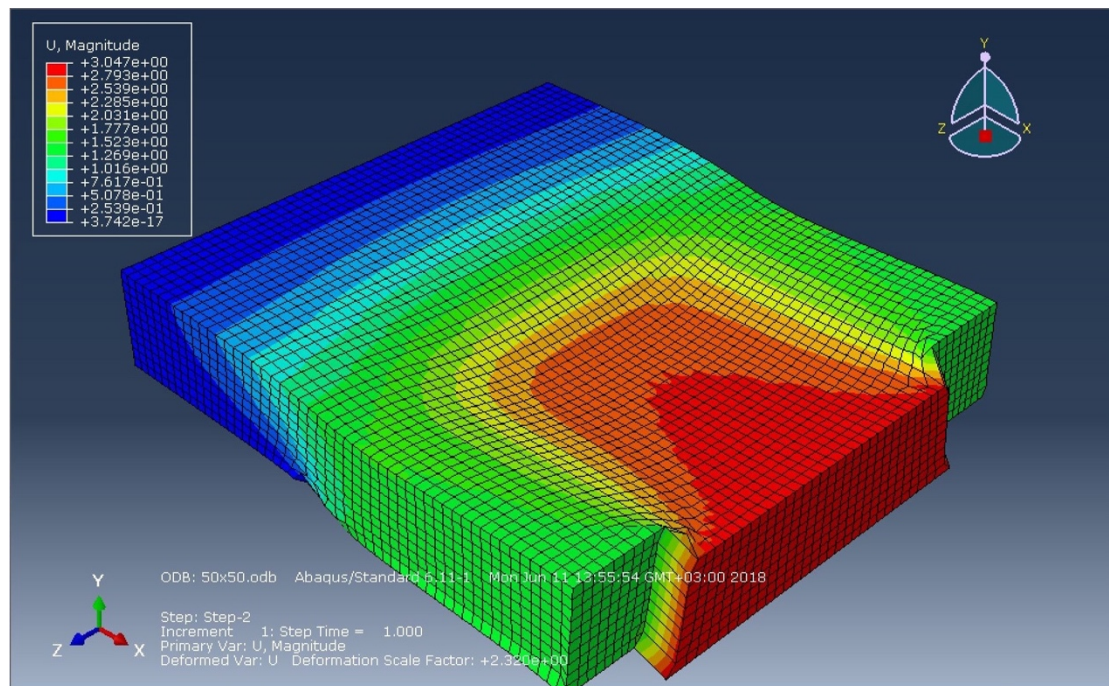
Εικόνα 4.18: Αγωγός θεωρητικά άπειρου μήκους παράλληλος σε ρήγμα πεπερασμένου μήκους 250m.

Αυτά τα δευτερογενή ρήγματα που προκύπτουν, τέμνουν κάθετα τον αγωγό σε δύο σημεία και εκτιμάται ότι θα καταπονήσουν τον αγωγό και σε αυτά τα συγκεκριμένα σημεία αλλά και σε όλο το μήκος μεταξύ αυτών. Στο προσομοίωμα αυτό εφαρμόστηκαν και οι τρεις τύποι ρηγμάτων (κανονικό, ανάστροφο, οριζοντιολισθητικό), για διαφορετικές διαστάσεις προσομοιώματος (500m x 500m) ή (1000m x 1000m), διαφορετικό μήκος ρήγματος (250m-500m), διαφορετικού πάχους εδαφικής ή ιζηματογενούς στρώσης (50m-100m), τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται στην συνέχεια.

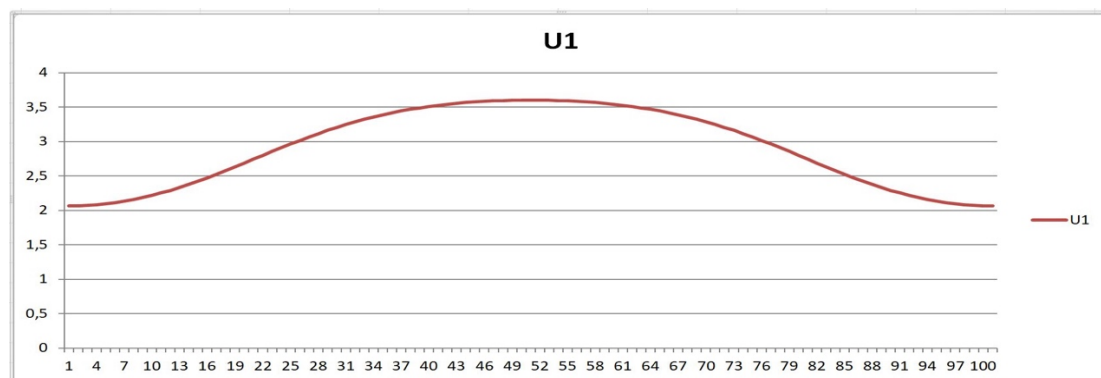
4.7 Εφαρμογή

Η πρώτη εφαρμογή αφορά το προσομοίωμα με μήκος 500m, πλάτος 500m και πάχος εδαφικής ή ιζηματογενούς στρώσης 100 m. Εξετάζονται και οι τρεις πιθανές περιπτώσεις ρηγμάτων.

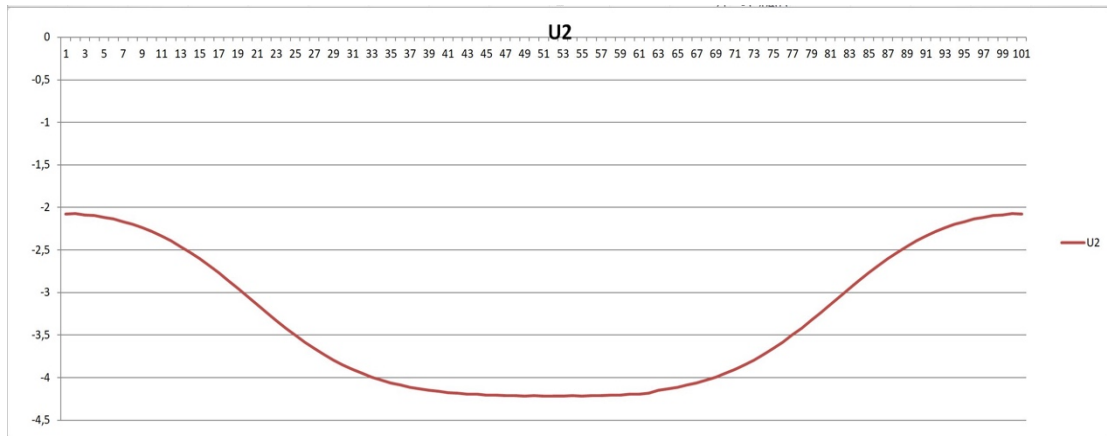
A) Κανονικό ρήγμα



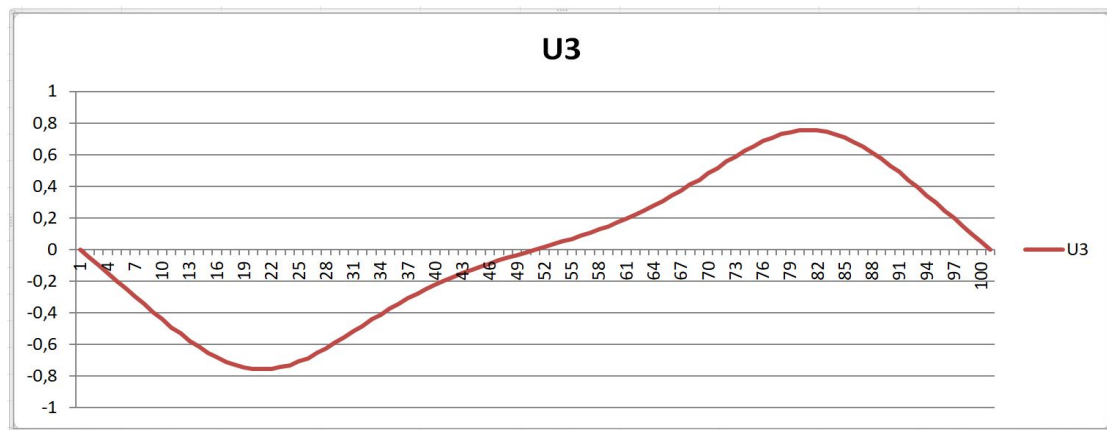
Σχήμα 7: Κανονικό ρήγμα. Εφαρμογή σε προσομοίωμα διαστάσεων (500,500,100).



Διάγραμμα 7^α: Κανονικό ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.

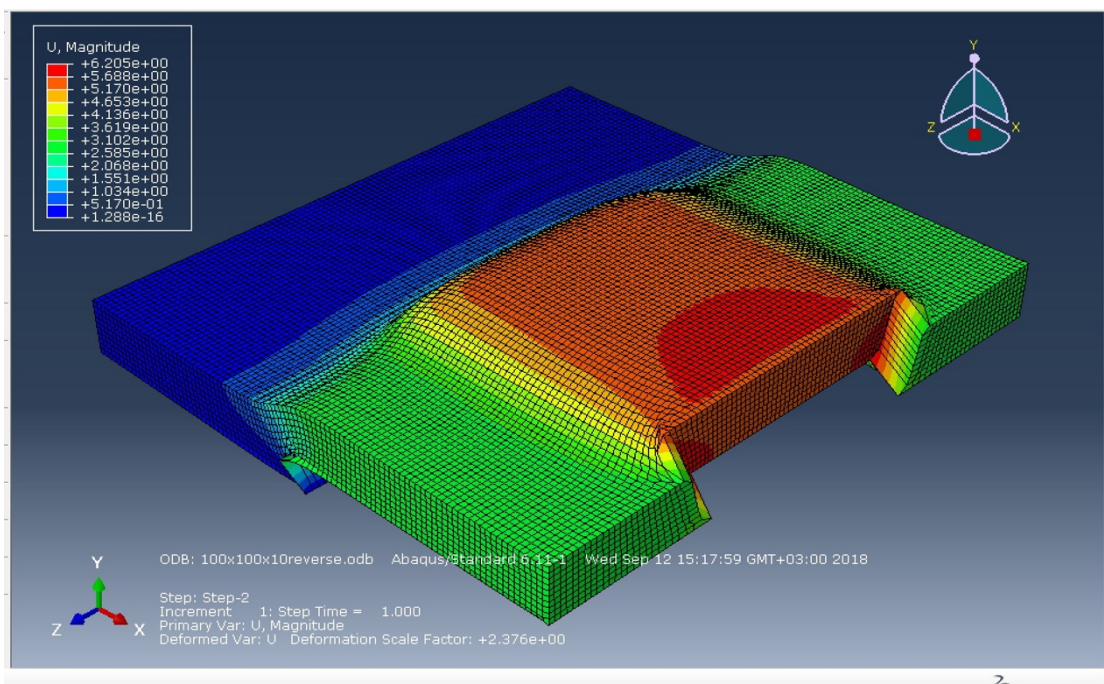


Διάγραμμα 7^β: Κανονικό ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.

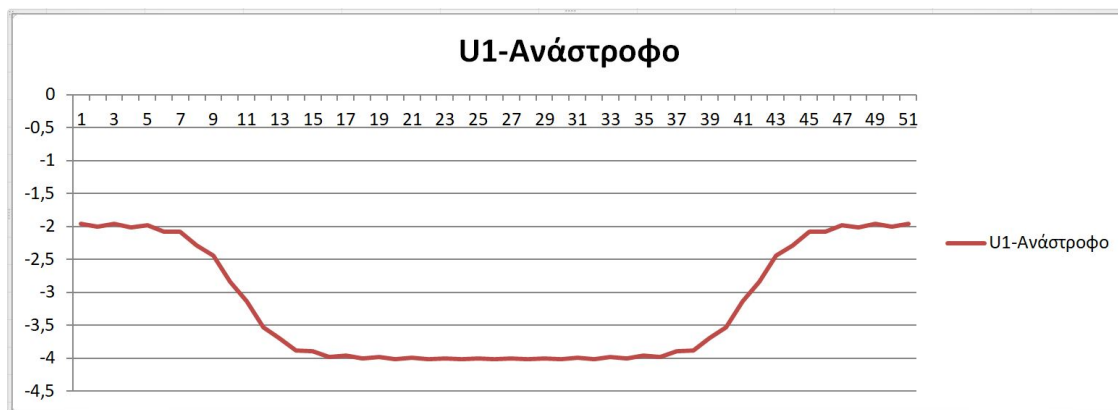


Διάγραμμα 7^γ: Κανονικό ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

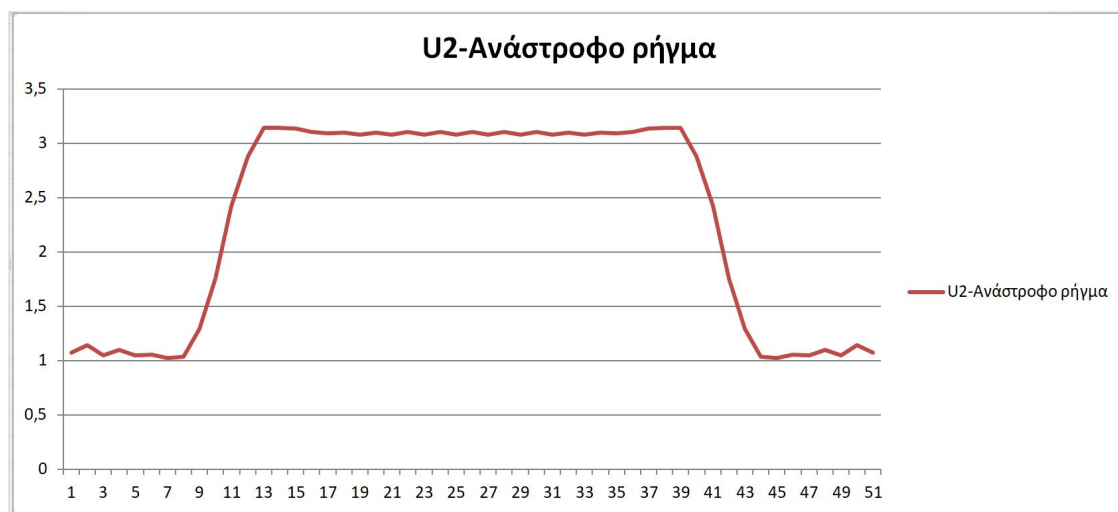
B) Ανάστροφο ρήγμα



Σχήμα 8: Ανάστροφο ρήγμα. Εφαρμογή σε προσομοίωμα διαστάσεων (500,500,100).



Διάγραμμα 8^α: Ανάστροφο ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.

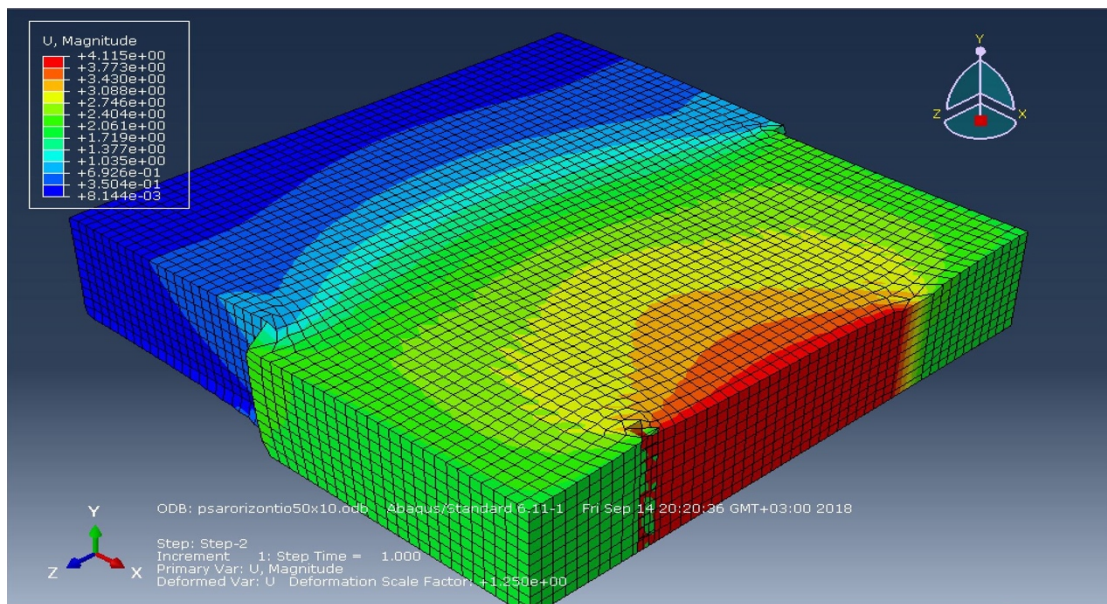


Διάγραμμα 8^β: Ανάστροφο ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.

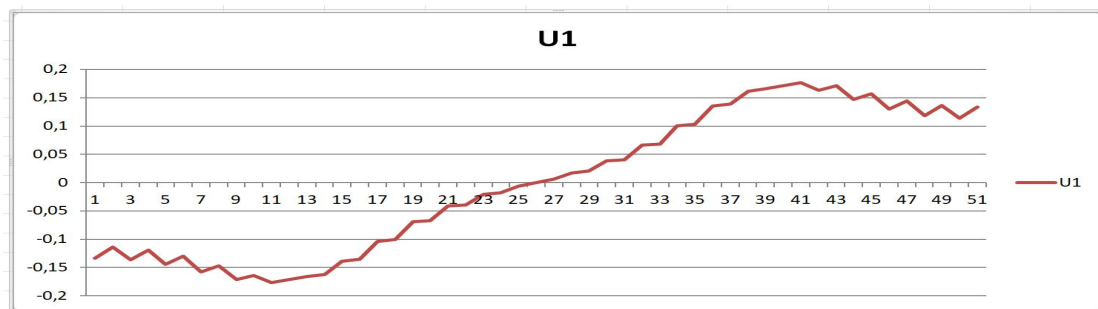


Διάγραμμα 8^γ: Ανάστροφο ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

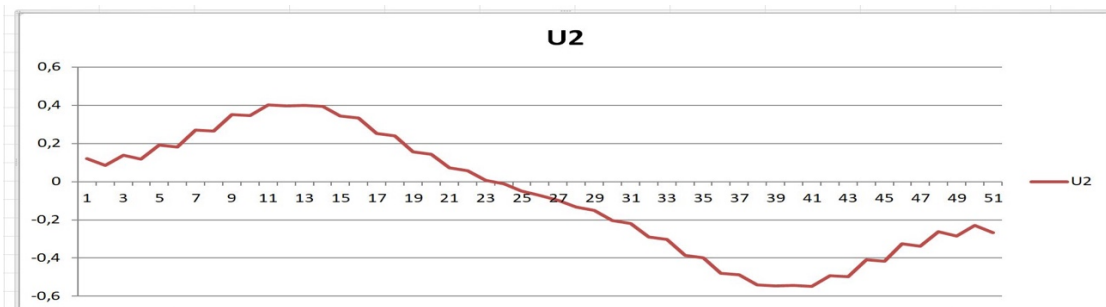
Γ) Οριζοντιολισθητικό ρήγμα



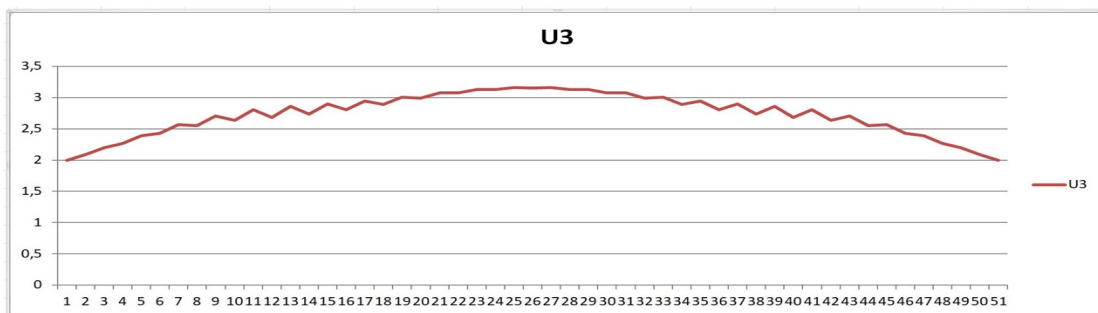
Σχήμα 9: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα. Εφαρμογή σε προσομοίωμα διαστάσεων (500,500,100)



Διάγραμμα 9^α: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.



Διάγραμμα 9^β: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.



Διάγραμμα 9^γ: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

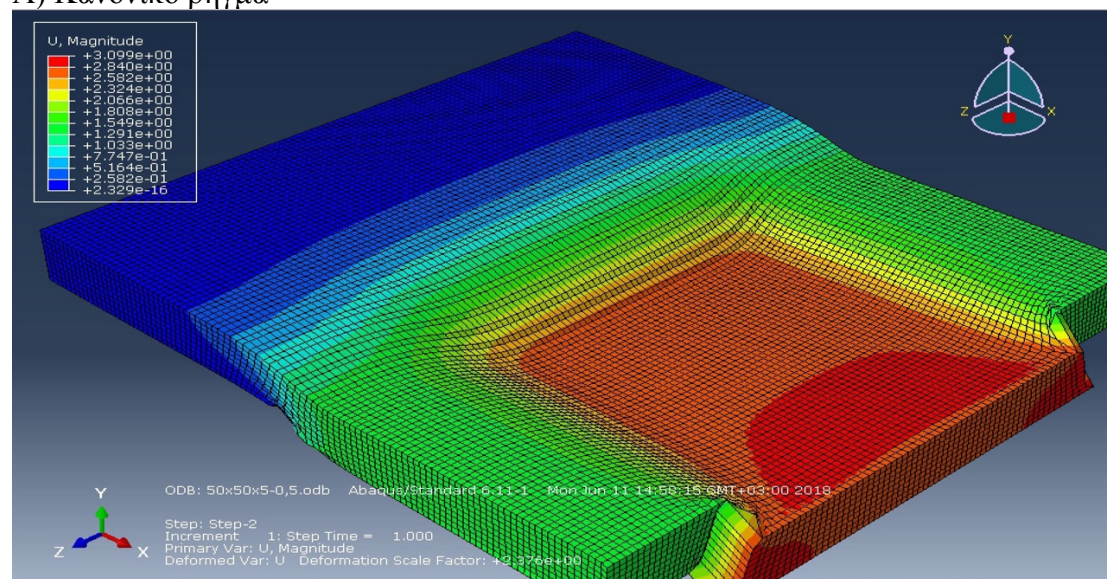
Στα διαγράμματα των παραπάνω εφαρμογών (διαγράμματα 7, 8, 9) παρατηρούνται εξίσου μεγάλες μεταβολές στις μετατοπίσεις των σημείων (nodes) σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Αρχικά, στην εφαρμογή του κανονικού ρήγματος παρατηρούνται μεταβολές της τάξης των 3,6 m ως προς τον άξονα x, 4,2 m ως προς τον άξονα των y και έως 0,75 m ως προς τον άξονα των z. Στη περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος είναι περίπου αντίστοιχες οι μεταβολές. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη μετατόπιση ως προς τον άξονα x είναι 4 m, η μέγιστη μετατόπιση ως προς τον άξονα y είναι 3,2 m, ενώ η μέγιστη μετατόπιση ως προς τον άξονα z είναι 0,7 m. Στο οριζοντιολισθητικό ρήγμα παρατηρούνται σχετικά πιο μικρές μεταβολές. Για την ακρίβεια τα αποτελέσματα των αναλύσεων έδειξαν ότι ως προς x η μέγιστη μεταβολή ήταν 0,18 m, ως προς y ήταν 0,5 m και ως προς z ήταν 3,3 m.

Είναι φανερό πως σε όλες τις περιπτώσεις ρηγμάτων δημιουργείται έντονο πρόβλημα για τον αγωγό από την διάρρηξη των δευτερογενών ρηγμάτων. Ειδικότερα κοντά στην περιοχή των σημείων τομής του αγωγού και του ρήγματος παρατηρούνται οι πιο απότομες μεταβολές, πράγμα που σημαίνει ότι δημιουργείται ένα σκαλοπάτι το οποίο μπορεί να αποβεί καταστροφικό για τον αγωγό, επιφέροντας τη διάσπαση του. Μεταξύ αυτών των δύο χαρακτηριστικών σημείων παρατηρούνται σε όλες τις περιπτώσεις οι μεγαλύτερες τιμές των μετατοπίσεων, με την μέγιστη να βρίσκεται στο μέση απόσταση μεταξύ αυτών. Το γεγονός αυτό δυσχεραίνει την κατάσταση του αγωγού μιας και τον αναγκάζει να εφάπτεται σε μια τοξοειδής καμπύλη και όχι σε ευθεία γραμμή όπως στην αρχική περίπτωση πριν την διάρρηξη. Εκτός όμως από την γεωμετρία που περικλείει τον αγωγό, προβλήματα θα υπάρξουν και από ίδιο τον αγωγό καθώς το βάρος του, λόγω κρέμασης, θα προκαλέσει διατμητικές τάσεις στα δύο χαρακτηριστικά σημεία.

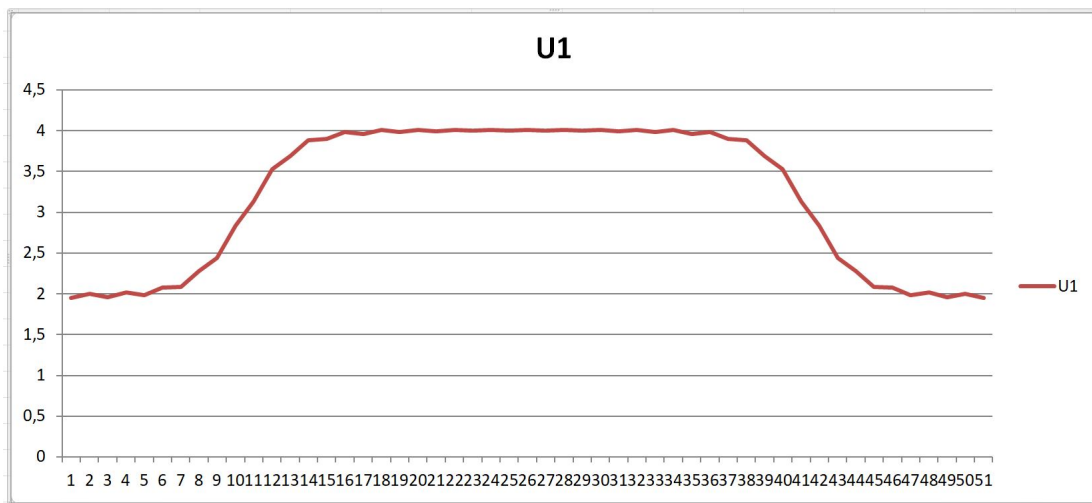
Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο αγωγός καταπονείται σε μεγάλο βαθμό και στις 3 περιπτώσεις ρηγμάτων. Άρα αποτελεί πλέον, ένα πολύ σημαντικό θέμα προς εξέταση η παράλληλη σχέση ρήγματος – αγωγού καθώς είναι πιθανή η ύπαρξη δευτερογενών ρηγμάτων.

Η δεύτερη εφαρμογή αφορά το μοντέλο με μήκος 500m, πλάτος 500m και πάχος ιζηματογενής στρώσης 50 m. Αυτή τη φορά δηλαδή έχει μειωθεί το πάχος στο μισό σε σχέση με την πρώτη εφαρμογή. Εξετάζονται και σε αυτή την περίπτωση και οι τρεις πιθανές περιπτώσεις ρηγμάτων.

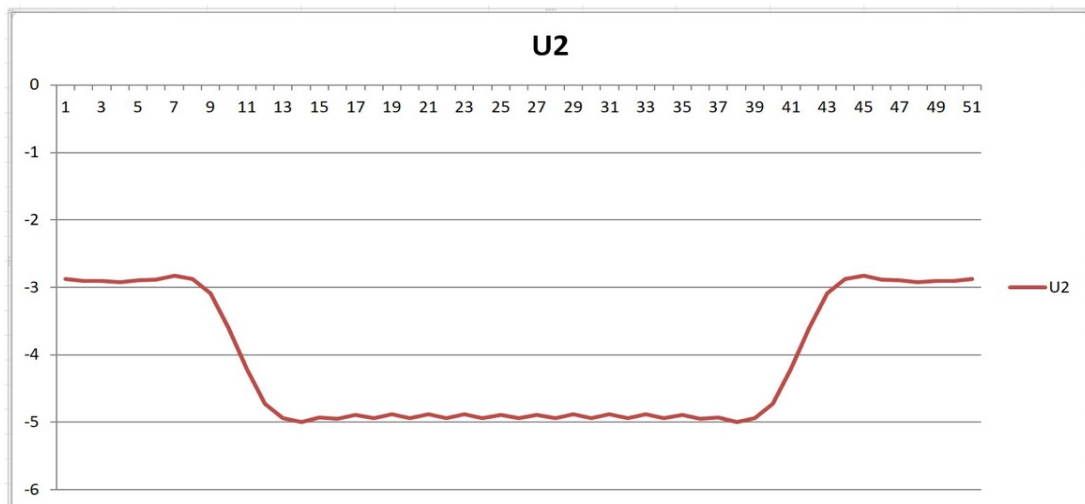
A) Κανονικό ρήγμα



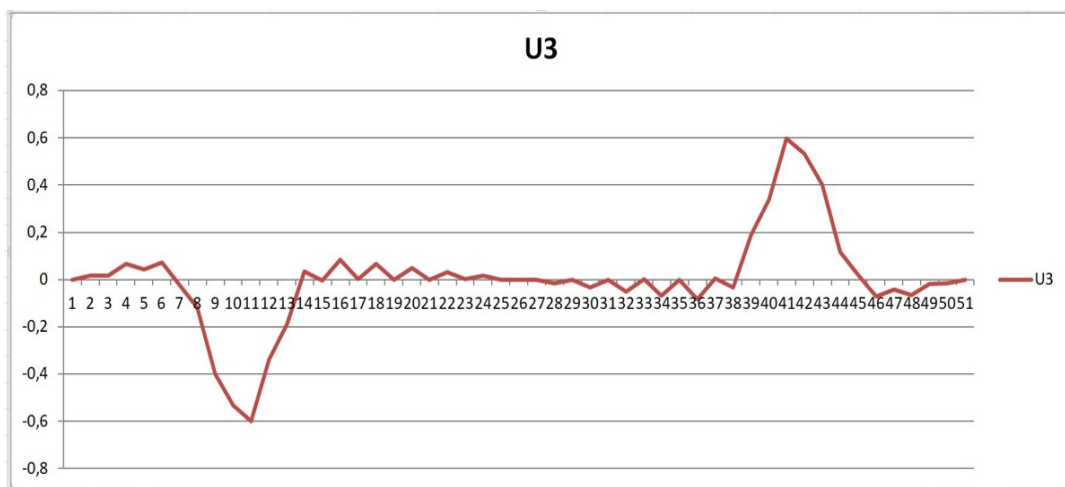
Σχήμα 10: Κανονικό ρήγμα. Εφαρμογή σε προσομοίωμα διαστάσεων (500,500,50).



Διάγραμμα 10^α: Κανονικό ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.

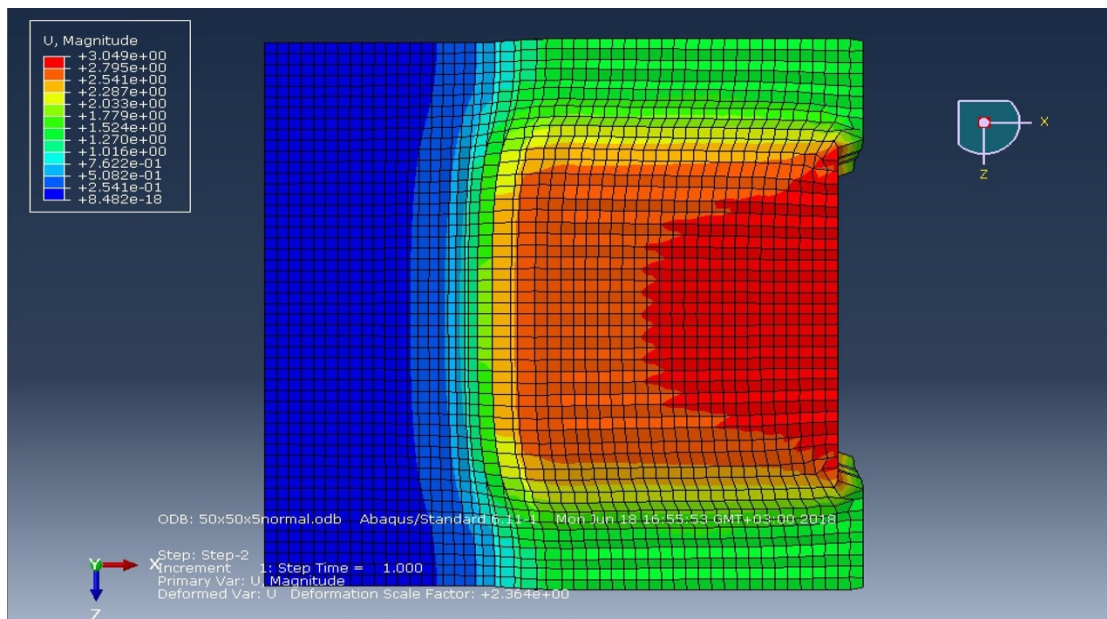


Διάγραμμα 10^β: Κανονικό ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.

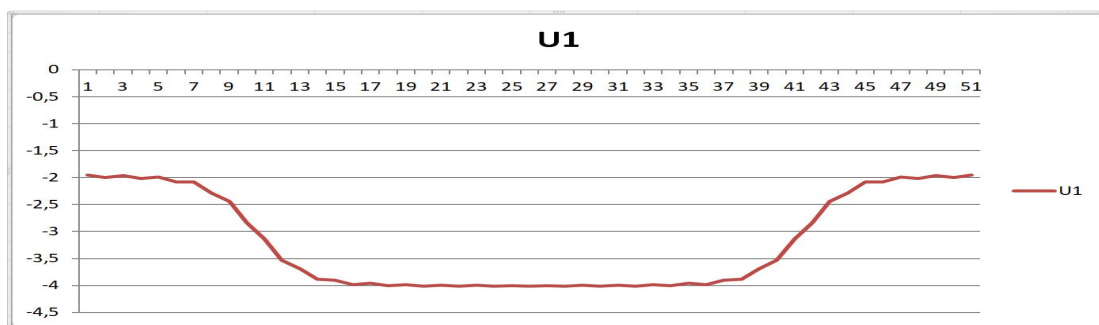


Διάγραμμα 10^γ: Κανονικό ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

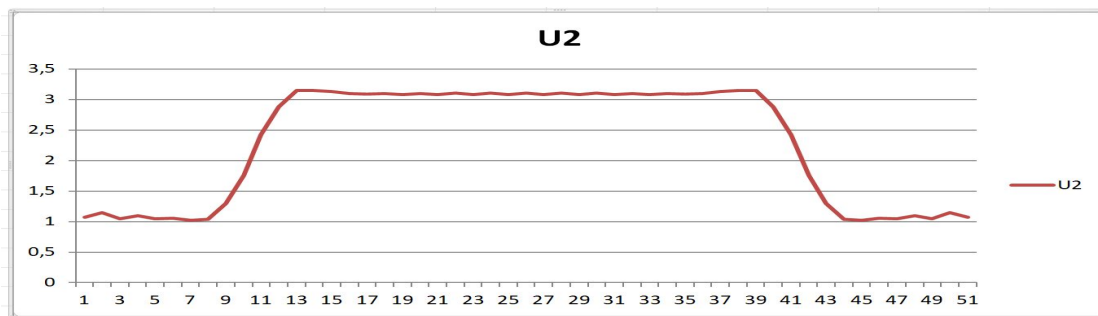
B) Ανάστροφο ρήγμα



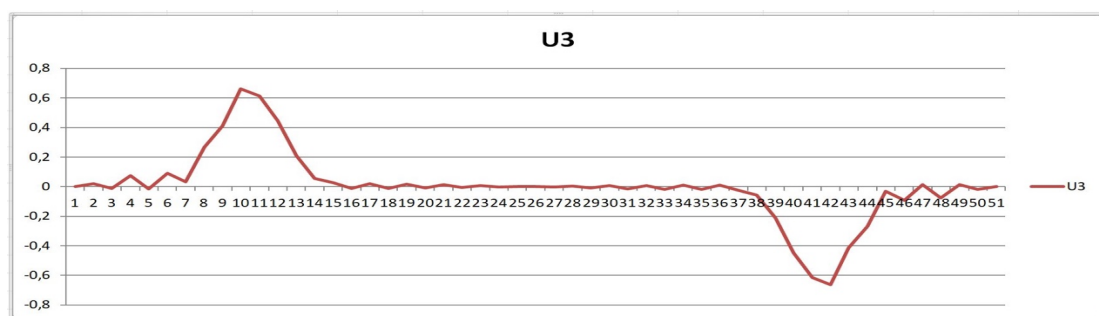
Σχήμα 11: Ανάστροφο ρήγμα. Εφαρμογή σε προσομοίωμα διαστάσεων (500,500,50).



Διάγραμμα 11^α: Ανάστροφο ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.

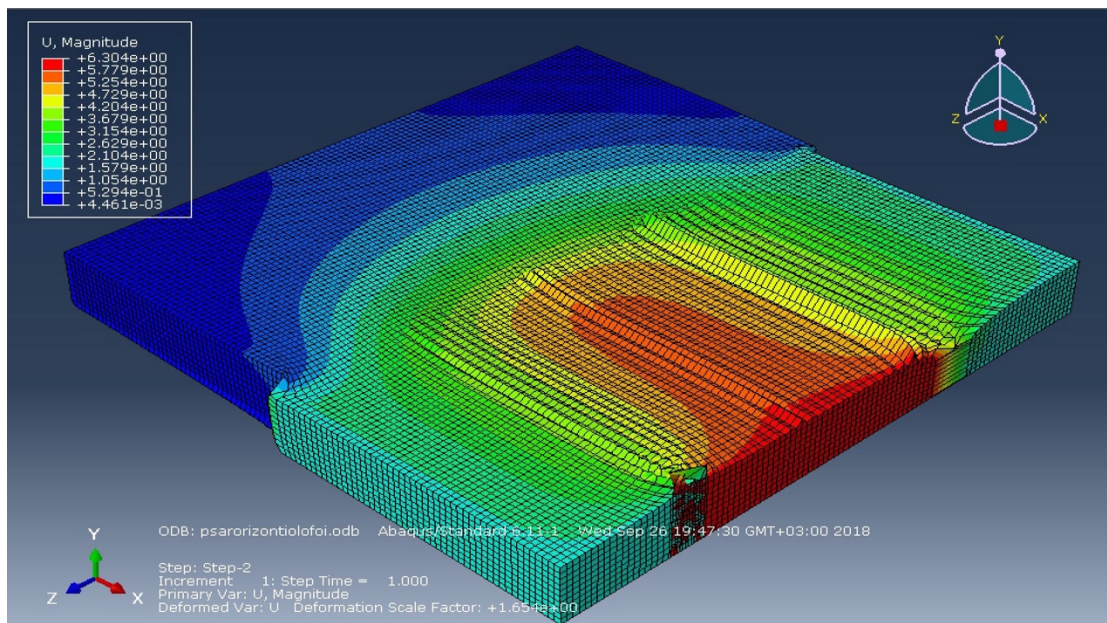


Διάγραμμα 11^β: Ανάστροφο ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.

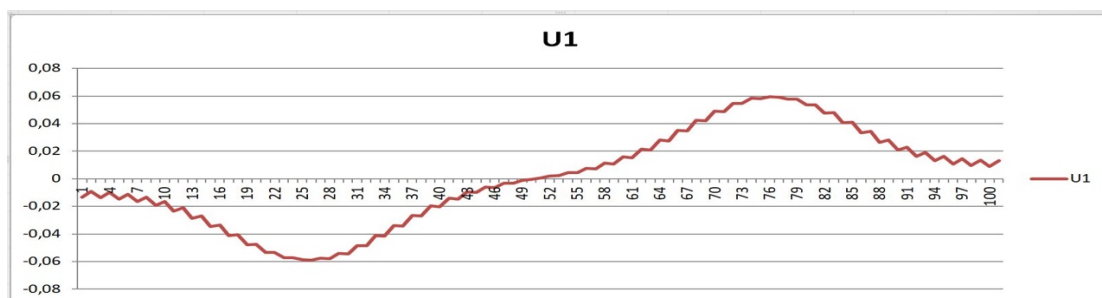


Διάγραμμα 11^γ: Ανάστροφο ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

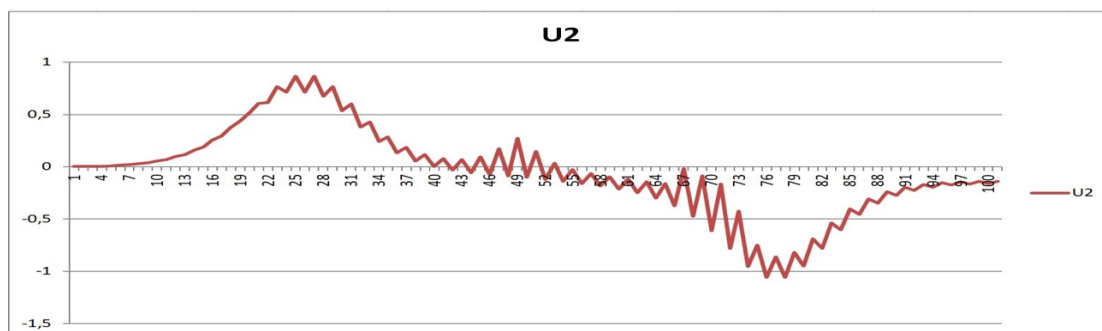
Γ) Οριζοντιολισθητικό ρήγμα



Σχήμα 12: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα. Εφαρμογή σε προσομοίωμα διαστάσεων (500,500,50)



Διάγραμμα 12^α: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.



Διάγραμμα 12^β: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.



Διάγραμμα 12^γ: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

Στη δεύτερη εφαρμογή με μειωμένη την στρώση του πάχους στα 50 m παρατηρούμε ακόμα μεγαλύτερες μεταβολές των συντεταγμένων των σημείων χάραξης του αγωγού όπως προκύπτουν από τα διαγράμματα (διαγράμματα 10, 11, 12). Σε πρώτη εκτίμηση αυτό φαινόταν λογικό καθώς το ρήγμα με τον αγωγό βρίσκονται σε πιο κοντινή απόσταση με αποτέλεσμα το ρήγμα να έχει μεγαλύτερη επιρροή στον αγωγό.

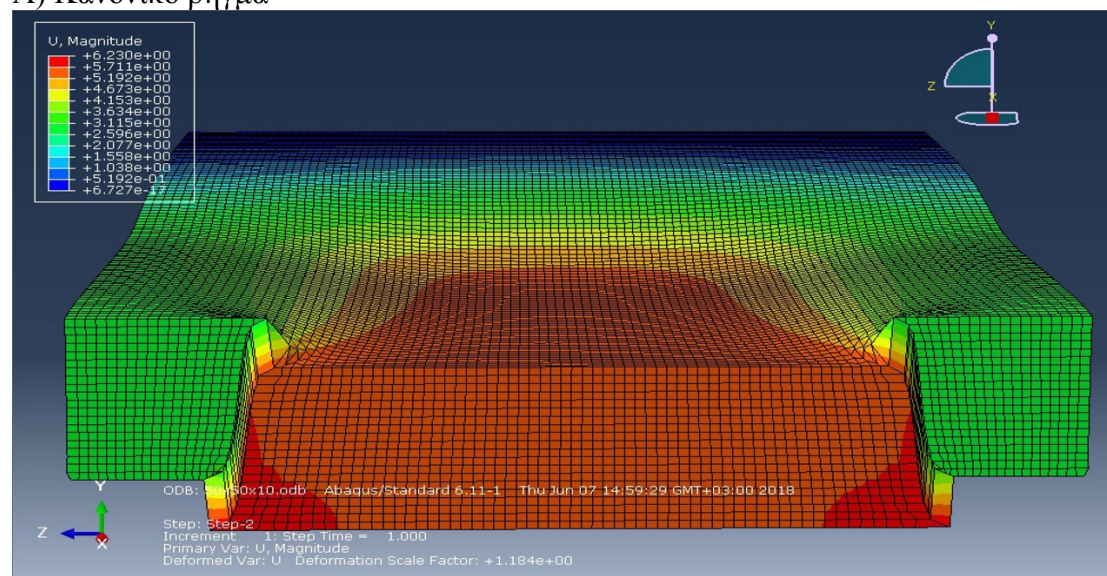
Οι αναλύσεις δείχνουν στην περίπτωση κανονικού ρήγματος ότι η μέγιστη μετατόπιση ως προς τον άξονα των x είναι 4 m, ως προς τον άξονα των y είναι 5 m, ενώ ως προς τον άξονα των z είναι 0,6 m. Τα αποτελέσματα για το ανάστροφο ρήγμα δείχνουν ότι η μέγιστη μετατόπιση ως προς τον άξονα των x είναι 4 m, ως προς τον άξονα των y είναι 3,2 m, ενώ ως προς τον άξονα των z είναι 0,65 m. Στη τρίτη και τελευταία περίπτωση του οριζοντιολισθητικού ρήγματος παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση ως προς τον άξονα των x είναι 0,06 m, ως προς τον άξονα των y είναι 1 m, ενώ ως προς τον άξονα των z είναι 3,8 m.

Σε σχέση με την πρώτη εφαρμογή παρατηρούμε πιο έντονη την επίδραση του ρήγματος στον φορέα του αγωγού. Οι μέγιστες τιμές των μετατοπίσεων έχουν αυξηθεί σε υπολογίσιμο βαθμό, ενώ παρατηρείται ακόμα ότι οι καμπύλες των διαγραμμάτων είναι ακόμα πιο απότομες. Αυτό πρακτικά σημαίνει, ότι τα σκαλοπάτια που δημιουργούνται στα δυο σημεία τομής του αγωγού με τα δευτερογενή ρήγματα είναι ακόμα πιο μεγάλα και απότομα σε σχέση με την πρώτη εφαρμογή. Οι μέγιστες τιμές βρίσκονται πάλι στον μέσο σημείο μεταξύ των δύο χαρακτηριστικών σημείων. Όντας όμως μεγαλύτερες της πρώτης εφαρμογής και με δεδομένο ότι το μήκος του ρήγματος είναι το ίδιο προκύπτει, ότι η καμπύλη στην οποία εφάπτεται ο φορέας του αγωγού γίνεται περισσότερο τοξοειδής. Έτσι προκαλούνται ακόμα πιο μεγάλες διατμητικές τάσεις και ο αγωγός καταπονείται σε πολύ πιο μεγάλο βαθμό.

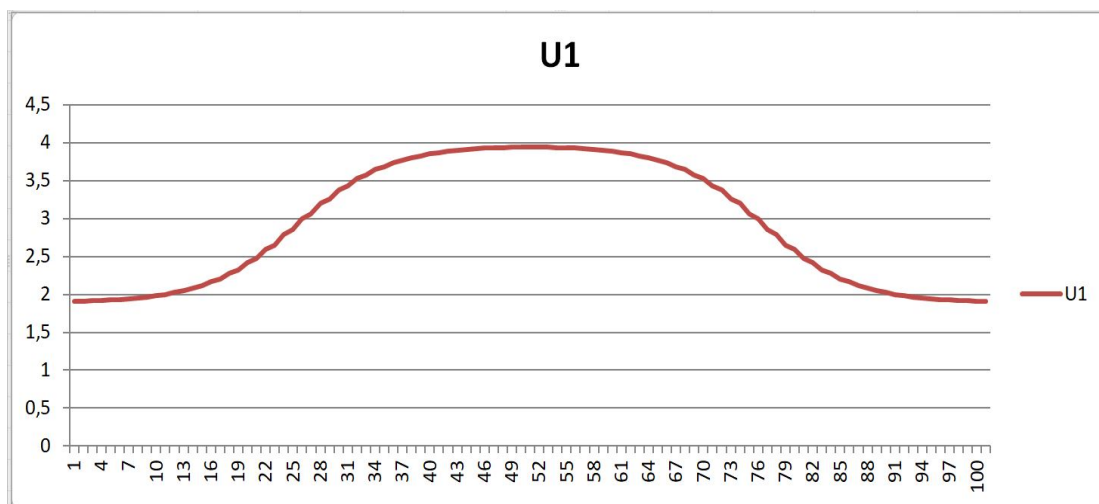
Συμπερασματικά, το πάχος της στρώσης του εδαφικού ή ιζηματογενούς υλικού που βρίσκεται πάνω από το ρήγμα επηρεάζει άμεσα την συμπεριφορά του αγωγού. Όσο το πάχος μειώνεται δείχνει να υπάρχει μία πιο άμεση συσχέτιση αυτών των δύο, που τείνουν να αλληλοεπιδρούν ακόμα περισσότερο.

Η τρίτη εφαρμογή αφορά το μοντέλο με μήκος 1000 m, πλάτος 1000 m και στρώσης 100 m. Αυτή τη φορά το πάχος επανέρχεται στην αρχική εκτιμώμενη τιμή όπως στην πρώτη εφαρμογή αλλά οι διαστάσεις του μοντέλου διπλασιάζονται, όπως άλλωστε και το μήκος του ρήγματος που από 250 m γίνεται 500 m. Αντίστοιχα εξετάζονται και σε αυτή την περίπτωση και οι τρεις πιθανές περιπτώσεις ρηγμάτων.

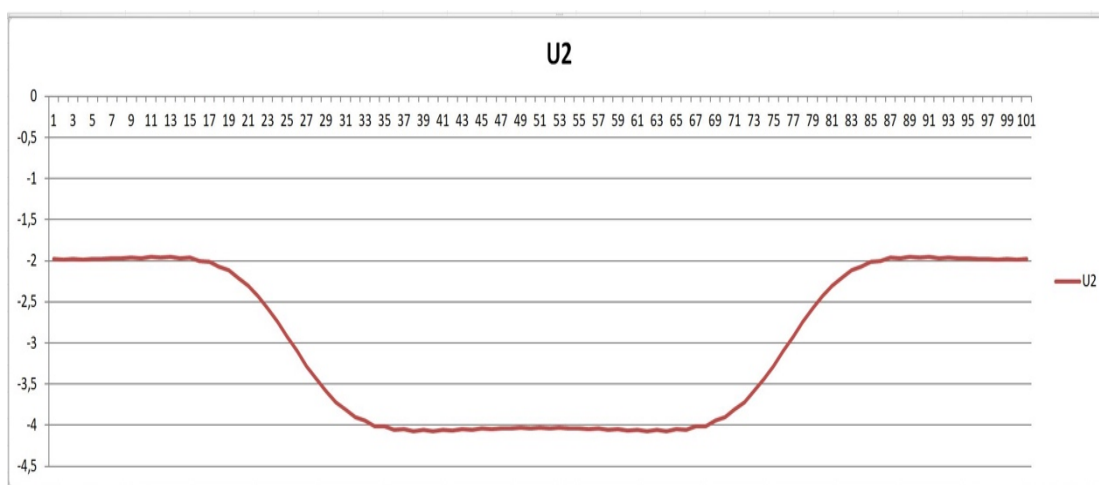
A) Κανονικό ρήγμα



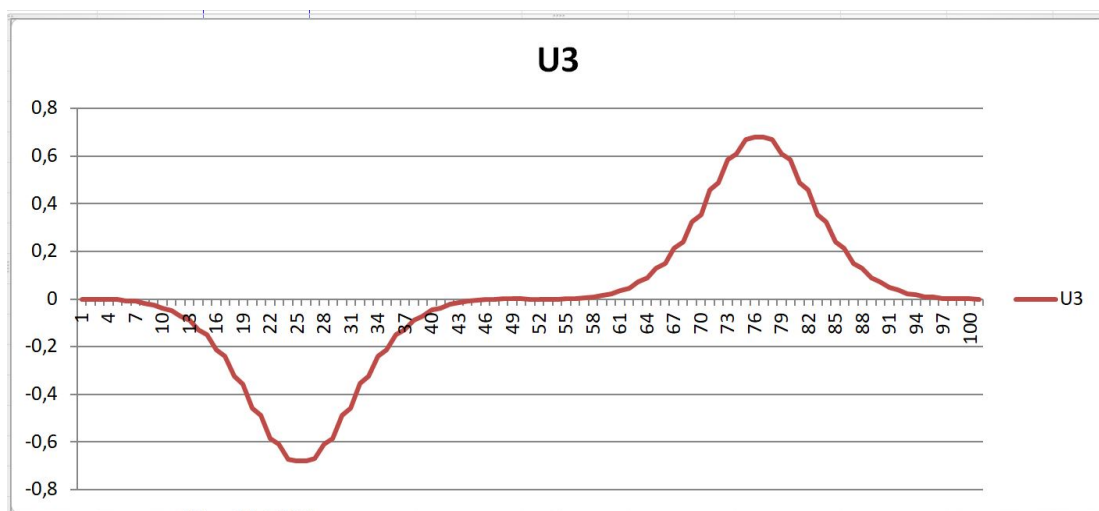
Σχήμα 13: Κανονικό ρήγμα. Εφαρμογή σε προσομοίωμα διαστάσεων (1000,1000,100).



Διάγραμμα 13^α: Κανονικό ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.

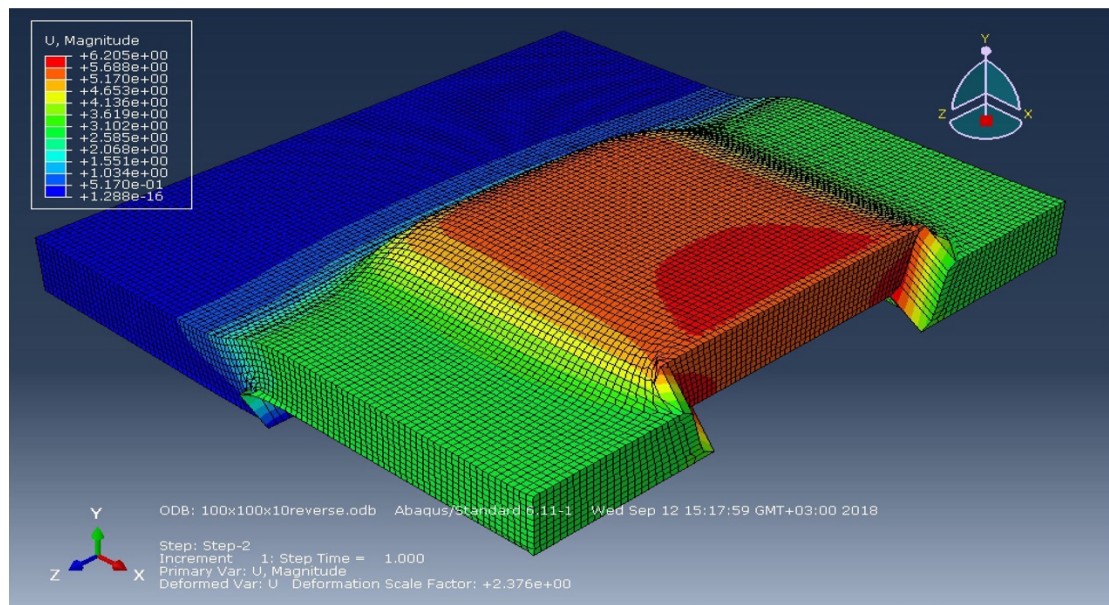


Διάγραμμα 13^β: Κανονικό ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.

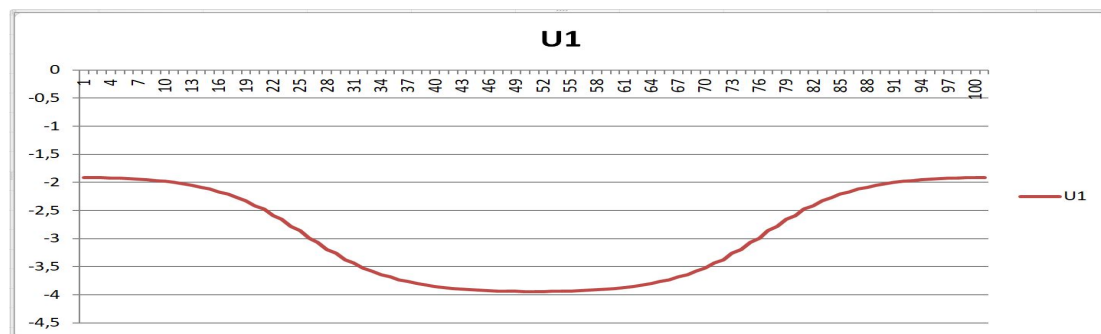


Διάγραμμα 13^γ: Κανονικό ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

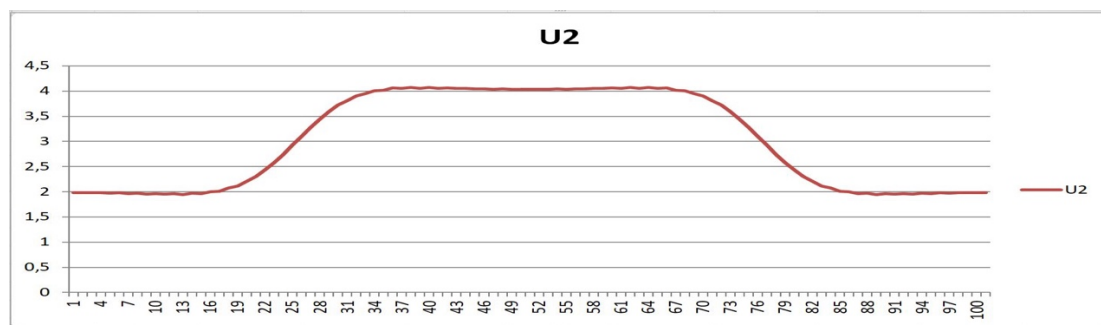
B) Ανάστροφο ρήγμα



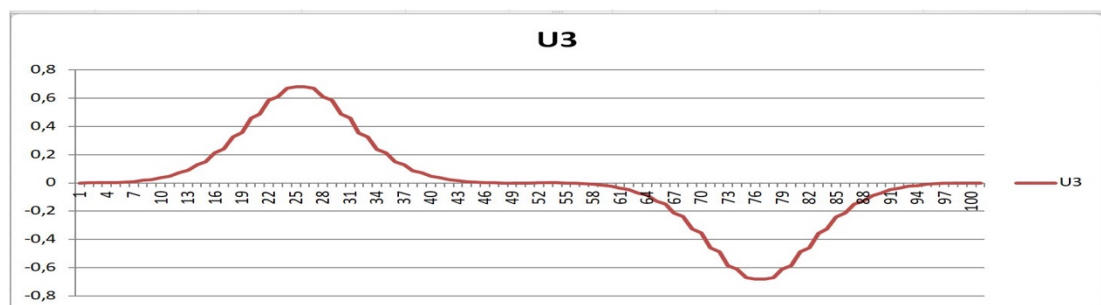
Σχήμα 14: Ανάστροφο ρήγμα. Εφαρμογή σε προσομοίωμα διαστάσεων (1000,1000,100).



Διάγραμμα 14^α: Ανάστροφο ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.

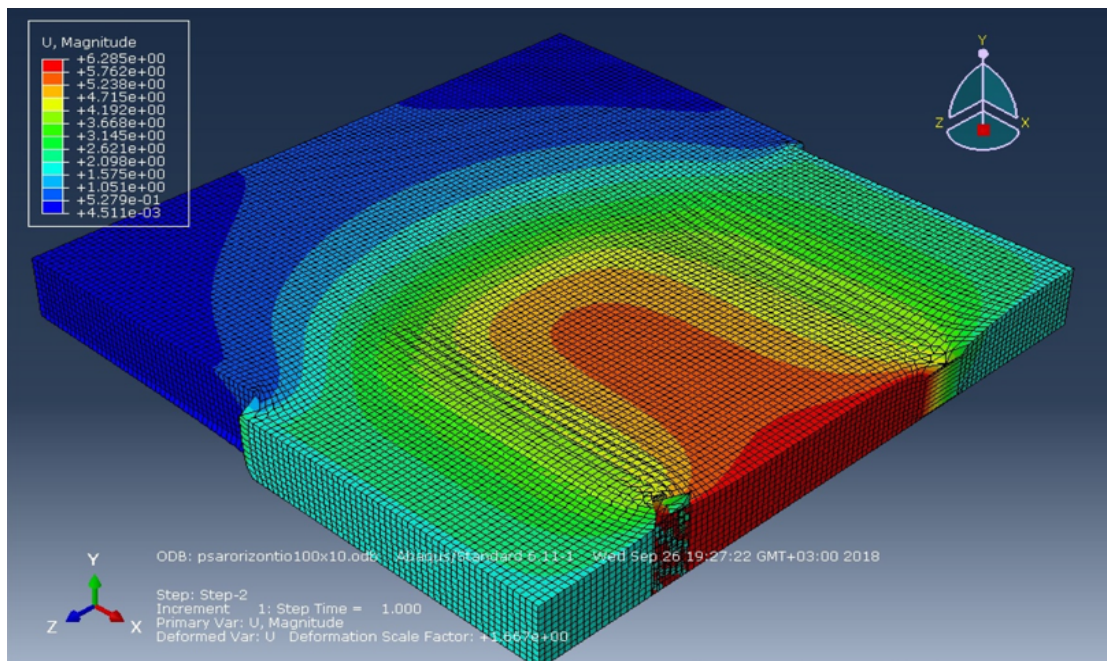


Διάγραμμα 14^β: Ανάστροφο ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.

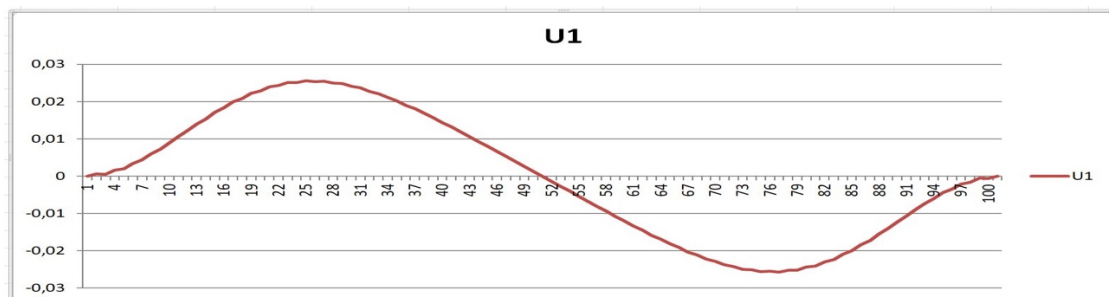


Διάγραμμα 14^γ: Ανάστροφο ρήγμα- Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

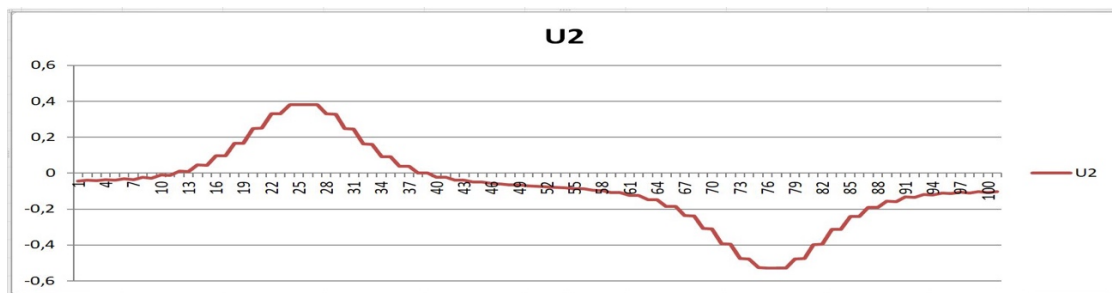
Γ) Οριζοντιολισθητικό ρήγμα



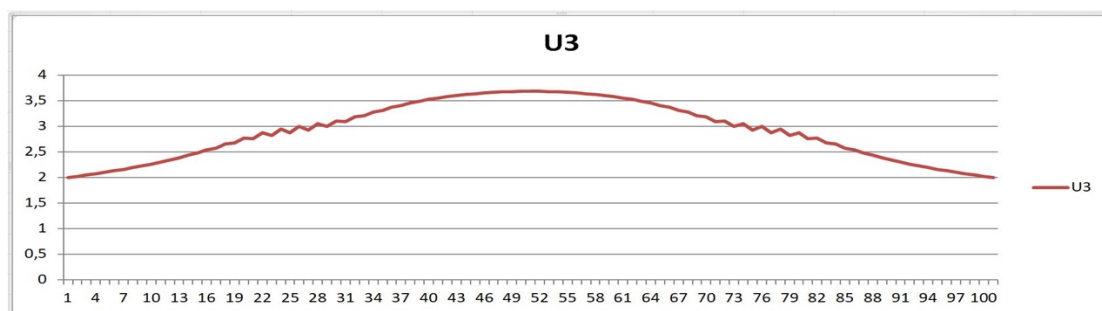
Σχήμα 15: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα. Εφαρμογή σε προσομοίωμα διαστάσεων (500,500,50)



Διάγραμμα 15^α: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.



Διάγραμμα 15^β: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.



Διάγραμμα 15^γ: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

Στην τρίτη και τελευταία εφαρμογή παρατηρούμε σχεδόν αντίστοιχες μεταβολές με αυτές της πρώτης εφαρμογής με τη διαφορά να εντοπίζεται στο γεγονός ότι οι μεταβολές αυτή την φορά δείχνουν να γίνονται με πιο ομαλό τρόπο. Αυτό όμως δεν αναιρεί τον κίνδυνο για τον αγωγό, ούτε αφήνει τα περιθώρια στους μηχανικούς να καθησυχαστούν.

Συγκεκριμένα, οι αναλύσεις δείχνουν στην περίπτωση κανονικού ρήγματος ότι η μέγιστη μετατόπιση ως προς τον άξονα των x και ως προς τον άξονα των y είναι 4 m, ενώ ως προς τον άξονα των z είναι 0,7 m. Τα αποτελέσματα για το ανάστροφο ρήγμα δείχνουν ότι η μέγιστη μετατόπιση ως προς τον άξονα των x είναι 3,9 m, ως προς τον άξονα των y είναι 4,1 m, ενώ ως προς τον άξονα των z είναι 0,7 m. Στη τρίτη περίπτωση του οριζοντιολισθητικού ρήγματος παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση ως προς τον άξονα των x είναι 0,025 m, ως προς τον άξονα των y είναι 0,4 m, ενώ ως προς τον άξονα των z είναι 3,6 m.

Εν ολίγης παρατηρούμε ότι οι τιμές των μέγιστων μετατοπίσεων δεν διαφέρουν αισθητά από αυτές της πρώτης εφαρμογής. Ωστόσο, το μήκος που συμβαίνουν αυτές οι μεταβολές συντεταγμένων των σημείων είναι το διπλάσιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα σκαλοπάτια που δημιουργούνται στα δύο χαρακτηριστικά σημεία στα οποία τέμνουν τα δευτερογενή ρήγματα τον αγωγό, να είναι πιο ομαλά. Έτσι, ο αγωγός συνεχίζει να βρίσκεται πάνω σε μία καμπύλη τροχιά με την διαφορά ότι η καμπύλη αυτή αντιστοιχεί σε τόξο κύκλου με μεγαλύτερη ακτίνα. Παρ' όλα αυτά, ο αγωγός μπορεί να εφάπτεται σε μία πιο ομαλή επιφάνεια, ωστόσο καταπονείται περισσότερο εξαιτίας του ίδιου του, του βάρους. Εφόσον το ρήγμα είναι διπλάσιο και το μήκος του αγωγού που σχετίζεται με αυτή την κατάσταση θα είναι το διπλάσιο. Το βάρος του αγωγού λοιπόν, θα είναι το διπλάσιο και επομένως οι διατμητικές τάσεις που εφαρμόζονται στα δυο επίμαχα σημεία του αγωγού θα είναι ακόμα μεγαλύτερες.

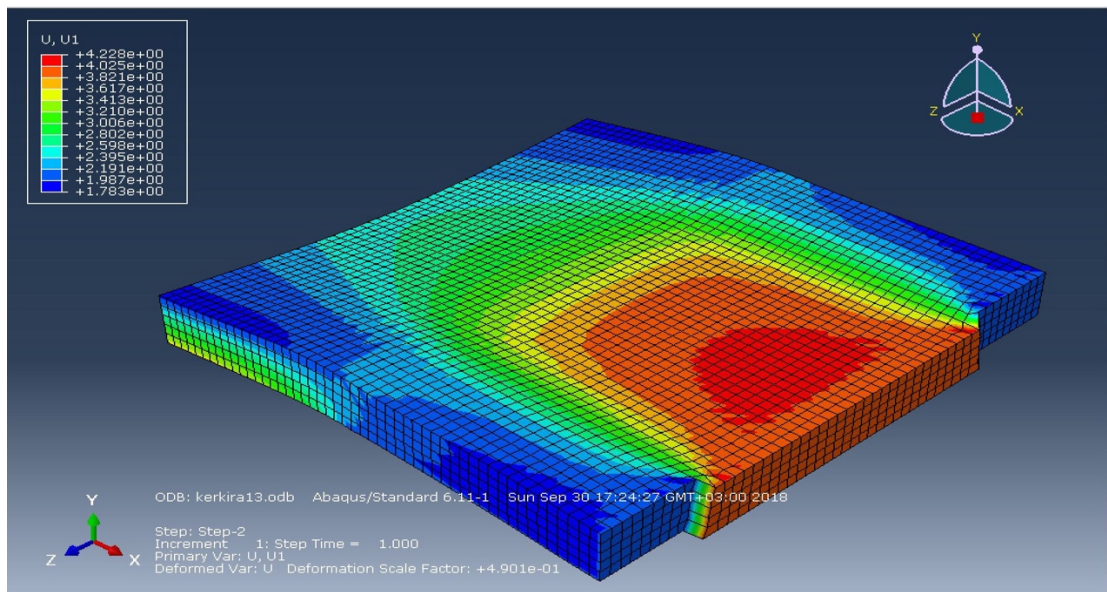
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παραπάνω εφαρμογή είναι ότι το μήκος του ρήγματος επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την συμπεριφορά του αγωγού. Σε πρώτη φάση δείχνει να ενισχύει την προστασία του αγωγού αφού του εξασφαλίζει έναν φορέα με λιγότερη καμπυλότητα. Με μια δεύτερη σκέψη όμως, καταλαβαίνουμε ότι το μήκος του αγωγού που συμμετέχει στην εφαρμογή έχει σημασία διότι το βάρος του τμήματος είναι αυτό που προκαλεί διατμητικές τάσεις στα δύο χαρακτηριστικά σημεία και όσο αυτό μεγαλώνει θα αυξάνονται ανάλογα και αυτές.

4.8 Εφαρμογή Mohr Coulomb

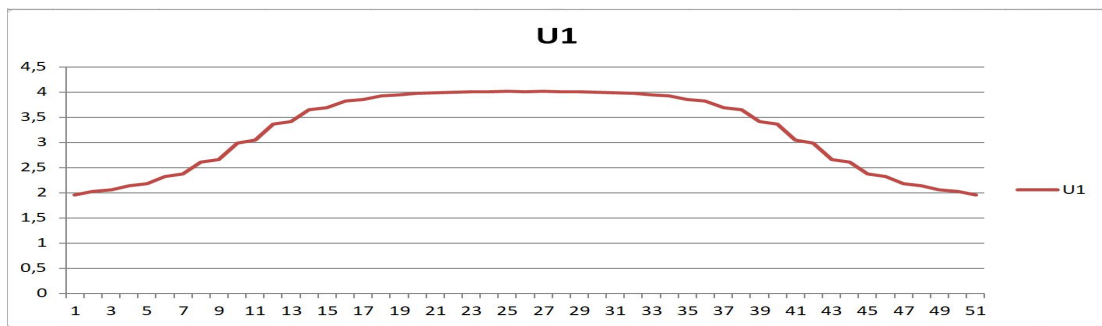
Για την εφαρμογή με χαρακτηριστικά πλαστικότητας του υλικού της εδαφικής ή ίζηματογενούς στρώσης κατά Mohr Coulomb χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια γεωμετρικά προσομοιώματα με εκείνα των προηγούμενων εφαρμογών. Συγκεκριμένα για την μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα με διαστάσεις μήκους 500 μέτρων, πλάτους 500 μέτρων και πάχους στρώσης 50 μέτρων. Το ρήγμα με το πεπερασμένο μήκος των 250 μέτρων και σε αυτή τη περίπτωση εφαρμόζεται στο κέντρο του προσομοιώματος, αφήνοντας περιθώριο 125 μέτρων σε κάθε πλευρά. Επίσης τα δευτερογενή ρήγματα εκτείνονται σε κάθετη διεύθυνση ως προς τον άξονα του κύριου ρήγματος και εκμεταλεύονται όλο το πλάτος του ριζητέμαχου τμήματος, που στη δεδομένη περίπτωση είναι 250 μέτρα.

Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις εφαρμογών για κάθε τύπο ρήγματος (κανονικό, ανάστροφο, οριζόντιας ολίσθησης). Και στις δύο περιπτώσεις η τιμή της γωνία τριβής είναι $\phi=30^\circ$, η γωνία διασταλτικότητας $\psi=3^\circ$, ενώ η διαφορά έγκειται στην συνοχή όπου εξετάζουμε τις δύο περιπτώσεις με τιμές $c=50$ kPa ή $c=100$ kPa.

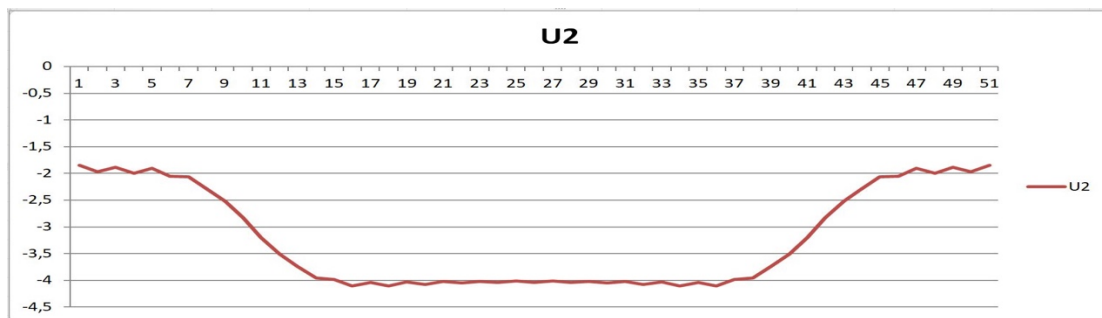
A)1^η Εφαρμογή - Κανονικό ρήγμα



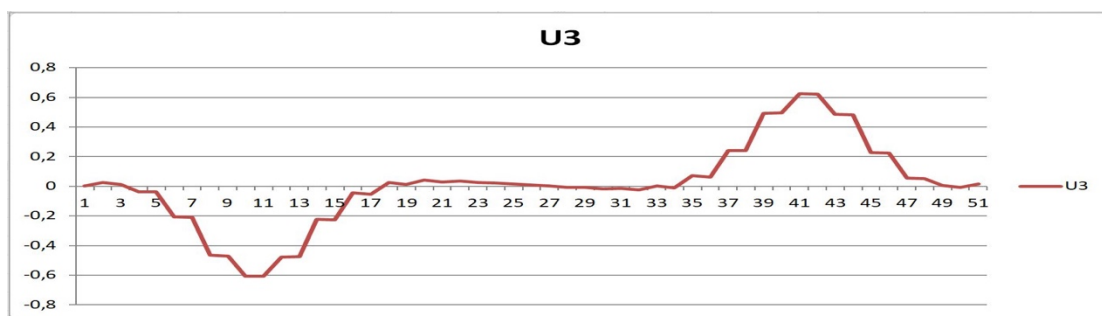
Σχήμα 16: Κανονικό ρήγμα. Πρώτη εφαρμογή με συνοχή εδαφικής στρώσης $c=100$ kPa.



Διάγραμμα 16^α: Κανονικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.

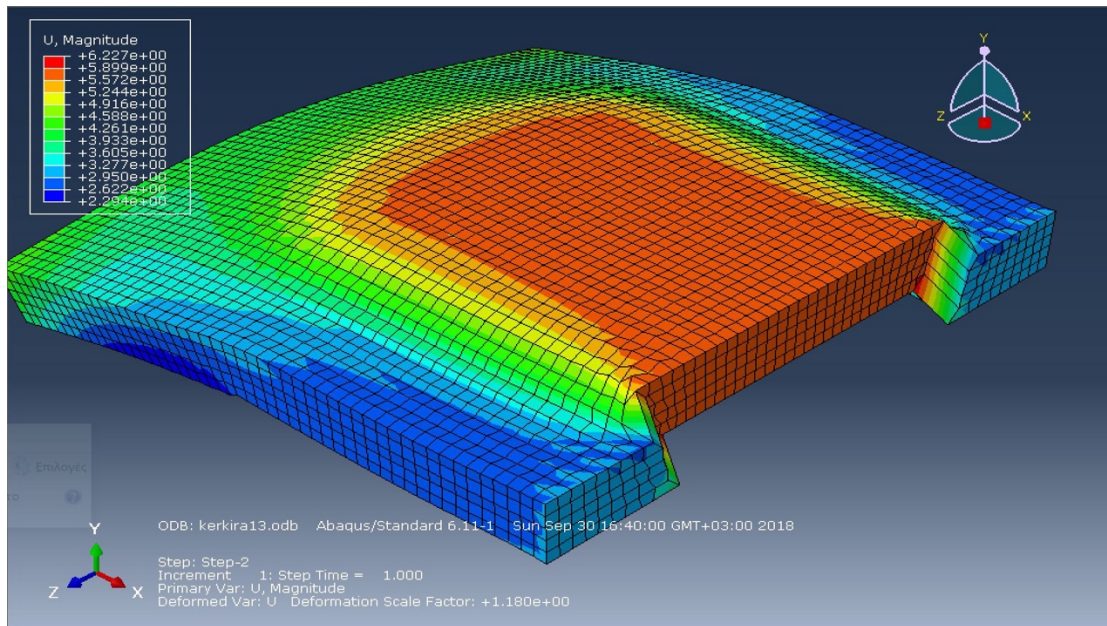


Διάγραμμα 16^β: Κανονικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.

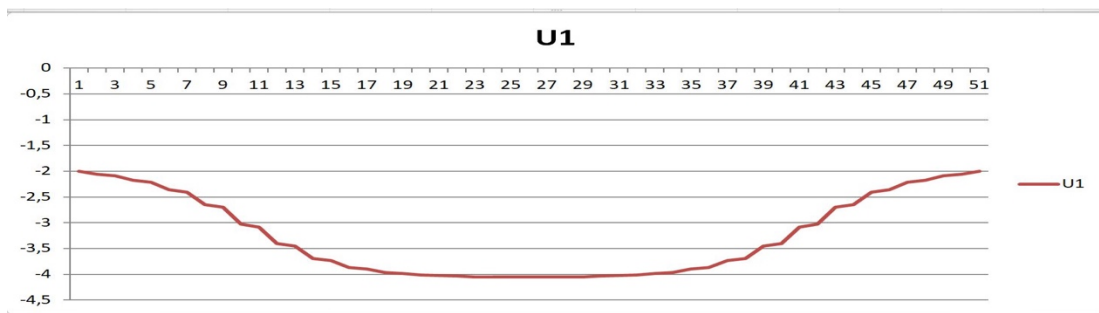


Διάγραμμα 16^γ: Κανονικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

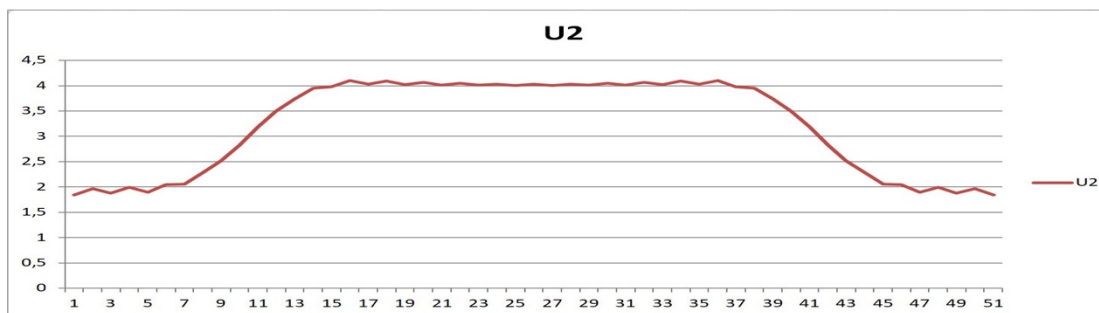
B) 1^η Εφαρμογή – Ανάστροφο ρήγμα



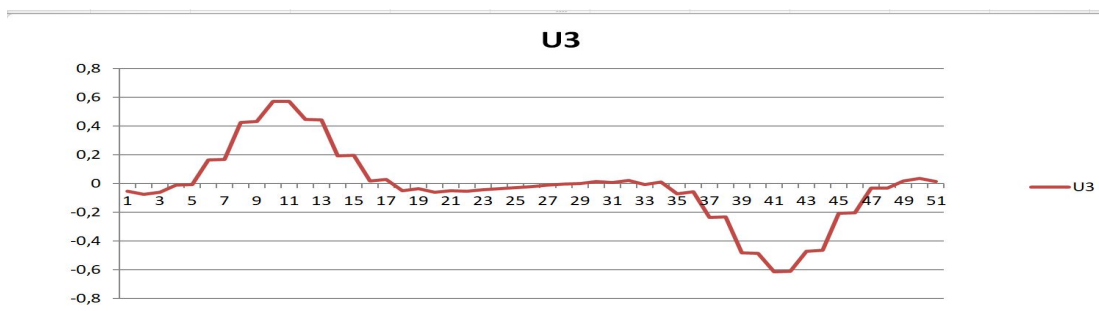
Σχήμα 17: Ανάστροφο ρήγμα. Πρώτη εφαρμογή με συνοχή εδαφικής στρώσης $c=100$ kPa.



Διάγραμμα 17^α: Ανάστροφο ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.

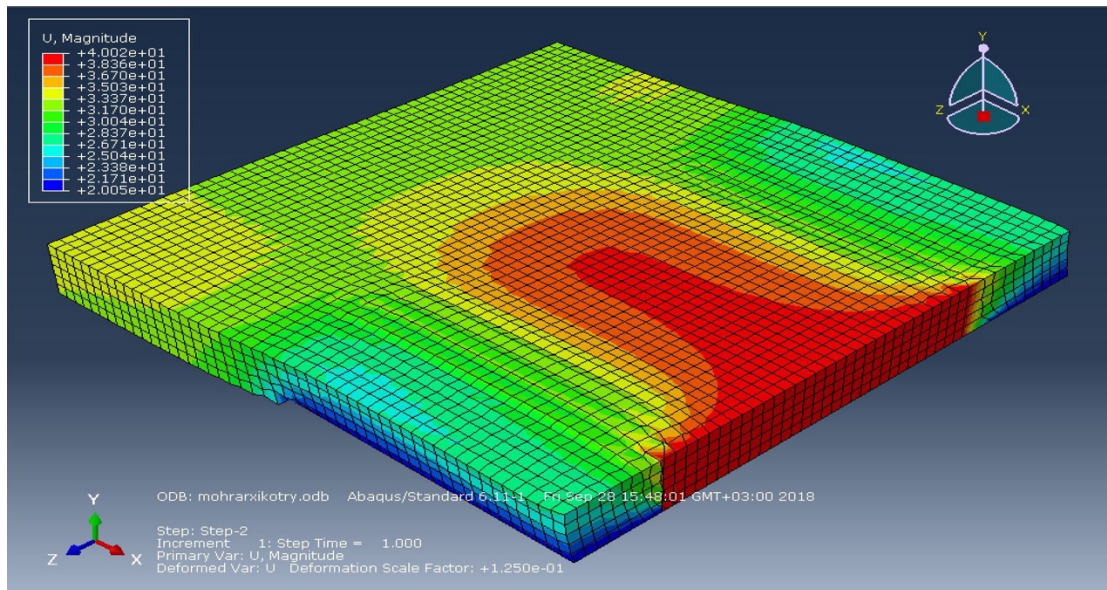


Διάγραμμα 17^β: Ανάστροφο ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.

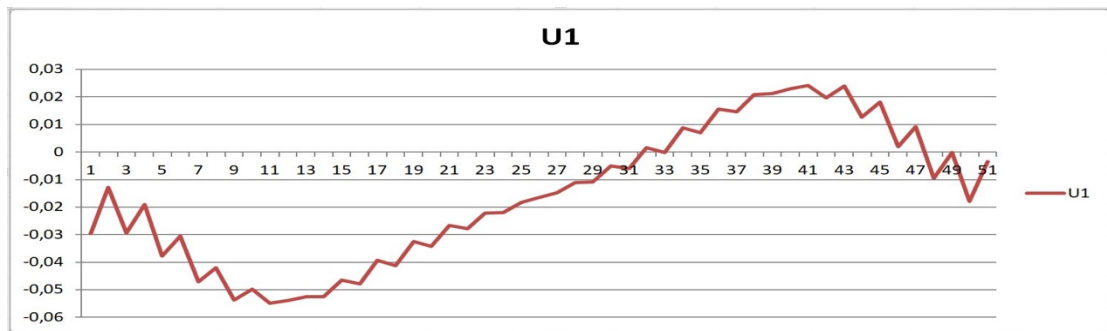


Διάγραμμα 17^γ: Ανάστροφο ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

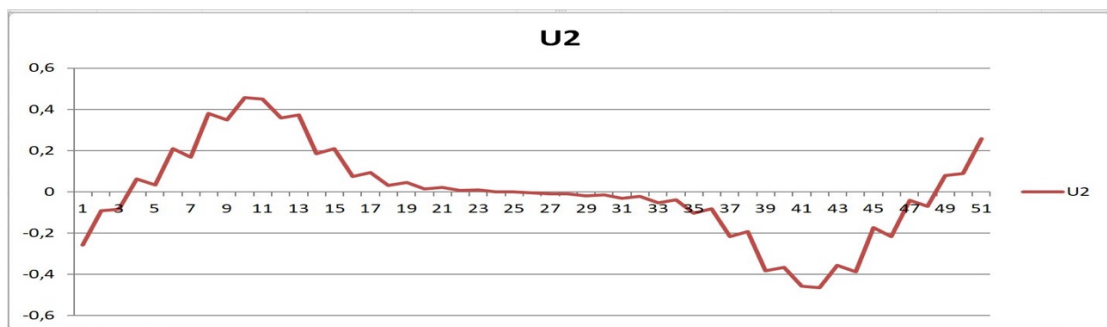
Γ) 1^η Εφαρμογή – Οριζοντιολισθητικό ρήγμα



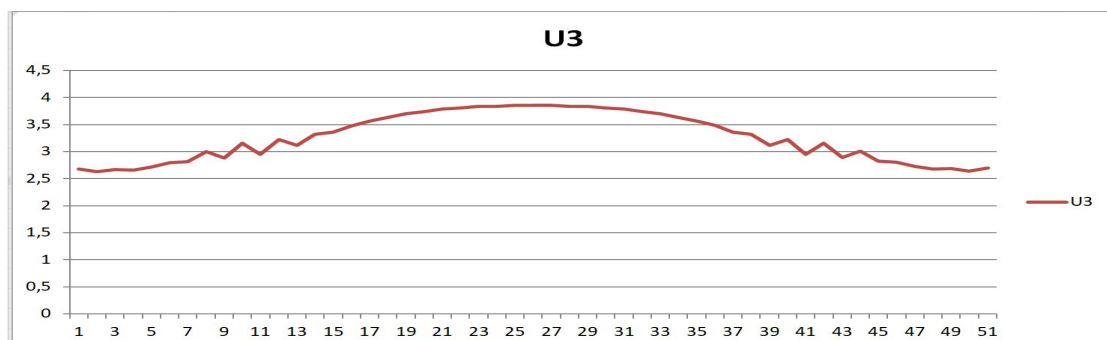
Σχήμα 18: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα. Πρώτη εφαρμογή με συνοχή εδαφικής στρώσης $c=100$ kPa.



Διάγραμμα 18^α: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.

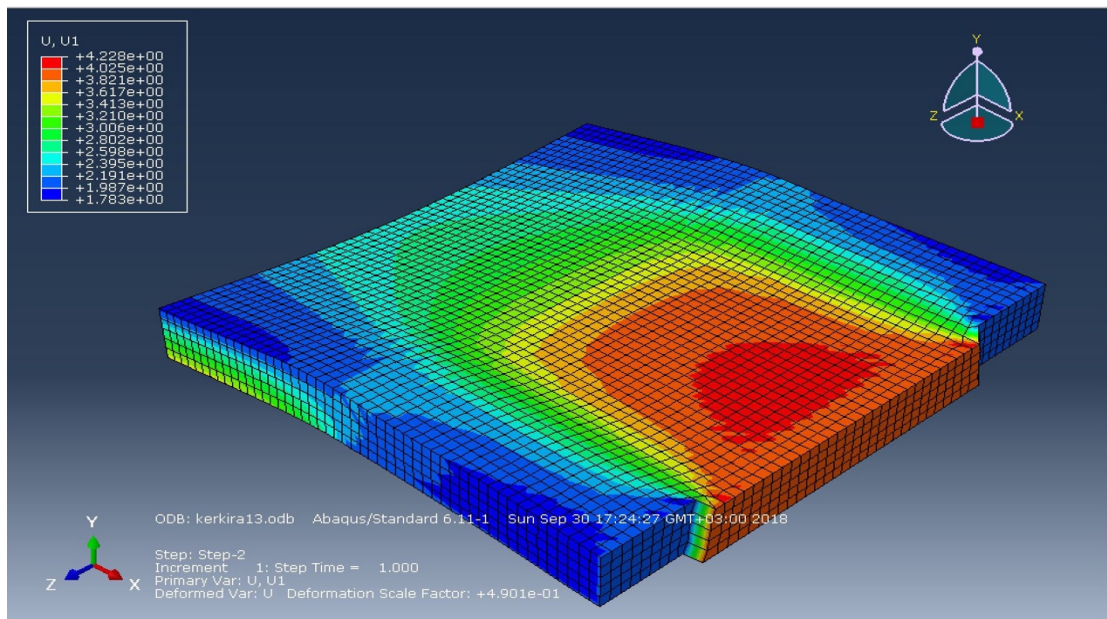


Διάγραμμα 18^β: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.

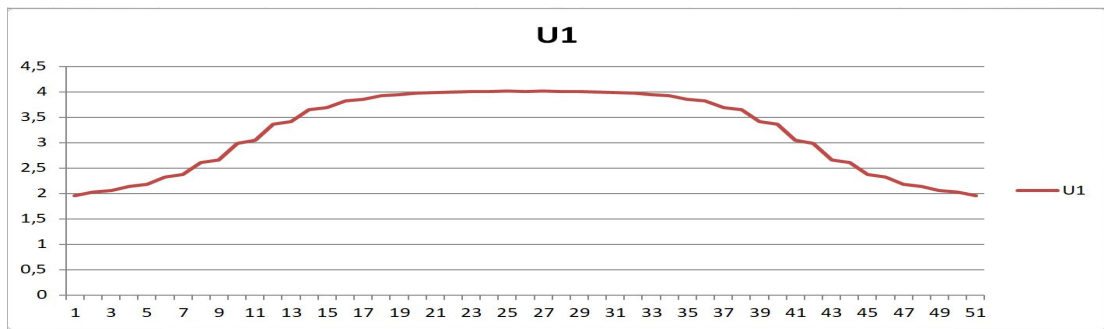


Διάγραμμα 18^γ: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

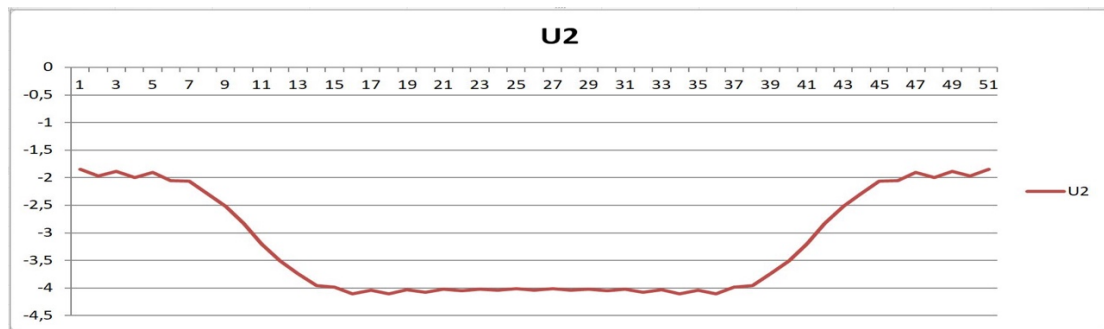
A) 2^η Εφαρμογή - Κανονικό ρήγμα



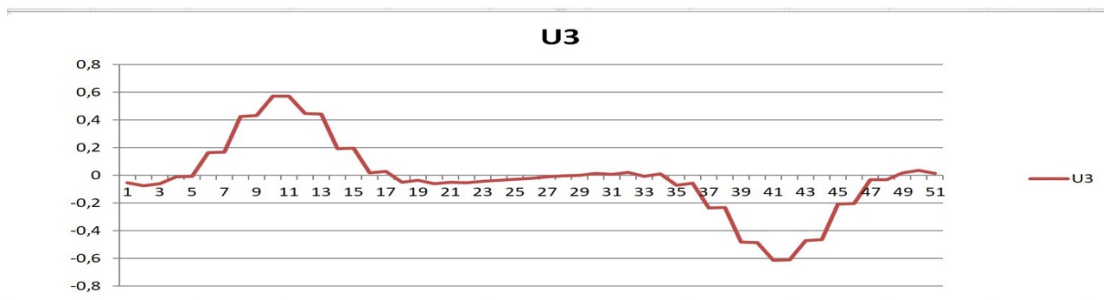
Σχήμα 19: Κανονικό ρήγμα. Δεύτερη εφαρμογή με συνοχή εδαφικής στρώσης $c=50$ kPa.



Διάγραμμα 19^α: Κανονικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.

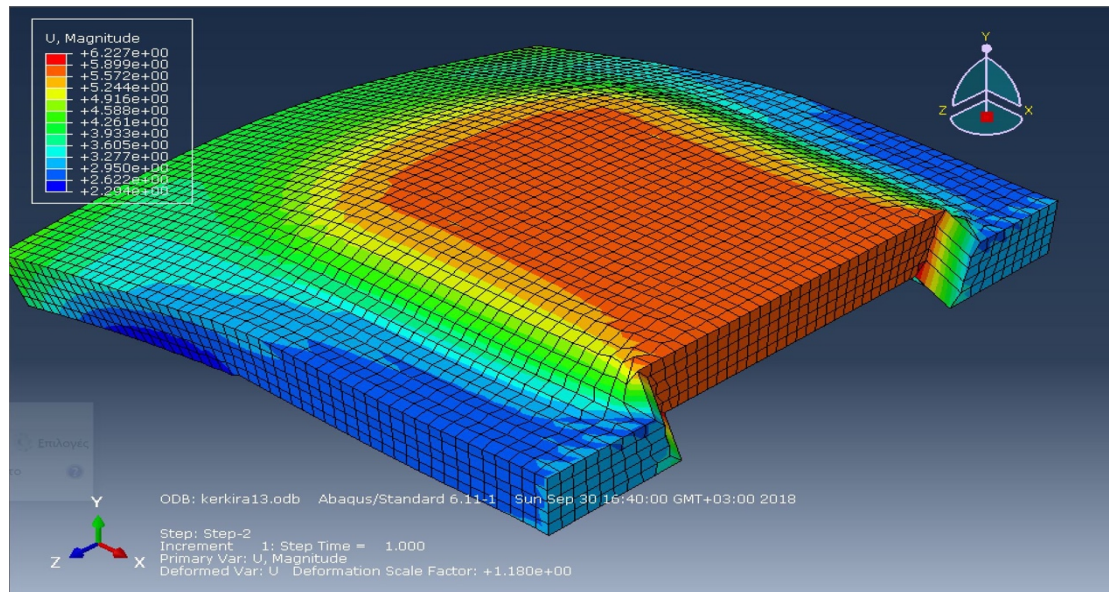


Διάγραμμα 19^β: Κανονικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.

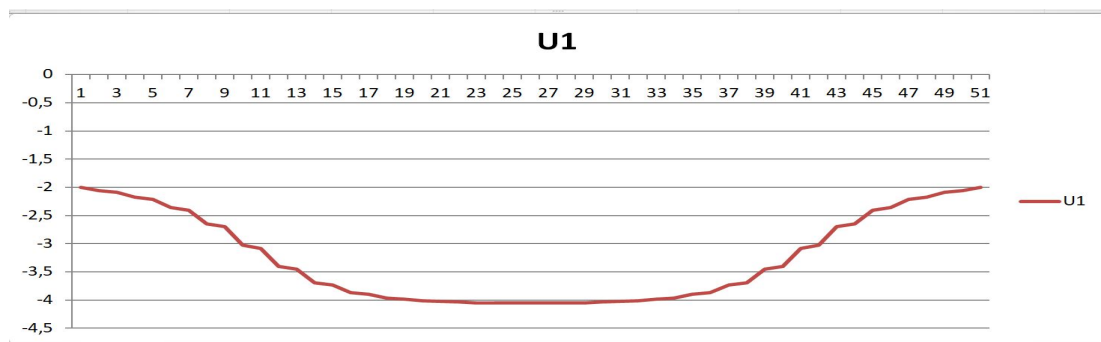


Διάγραμμα 19^γ: Κανονικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

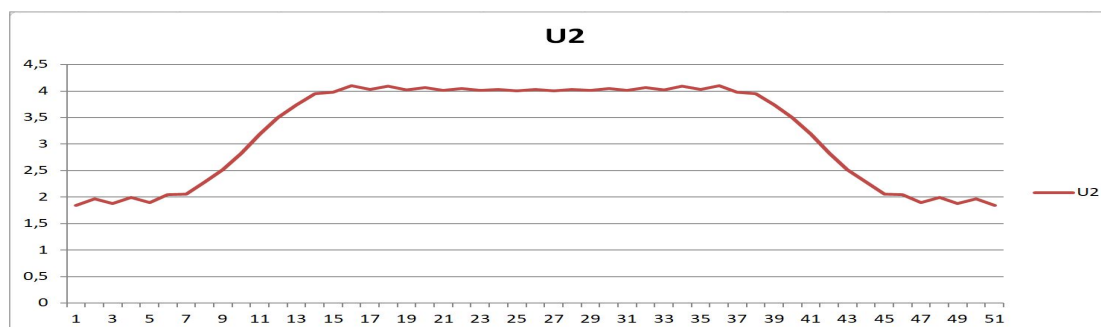
B) 2^η Εφαρμογή - Ανάστροφο ρήγμα



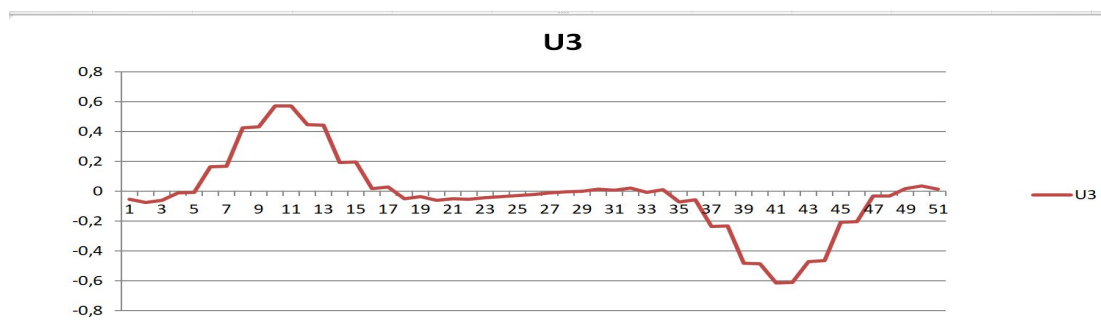
Σχήμα 20: Ανάστροφο ρήγμα. Δεύτερη εφαρμογή με συνοχή εδαφικής στρώσης $c=50$ kPa.



Διάγραμμα 20^α: Ανάστροφο ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.

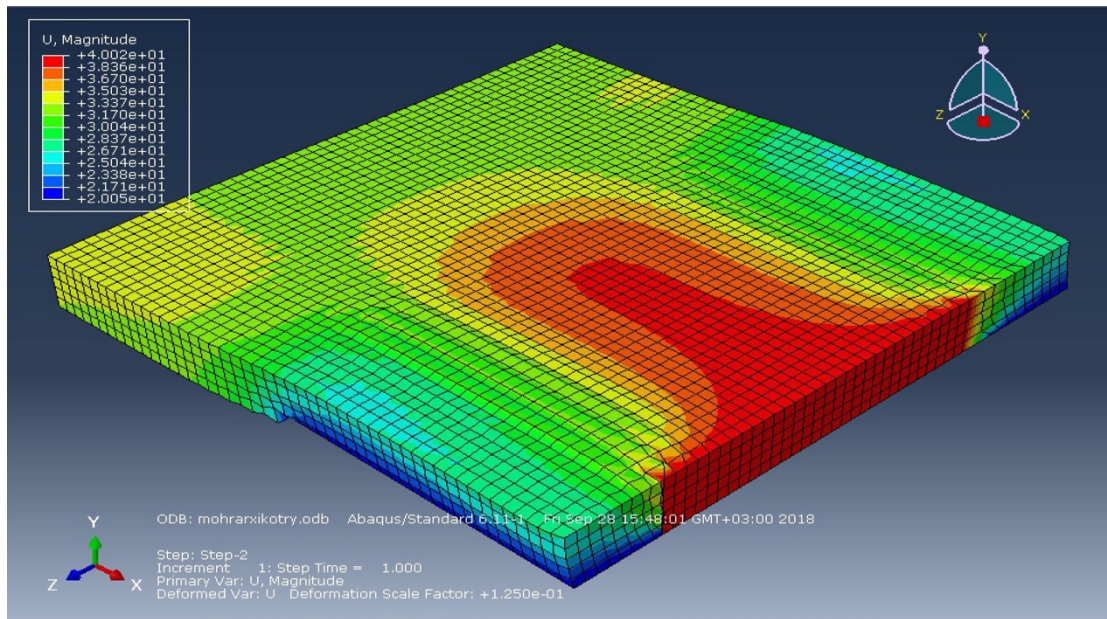


Διάγραμμα 20^β: Ανάστροφο ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.

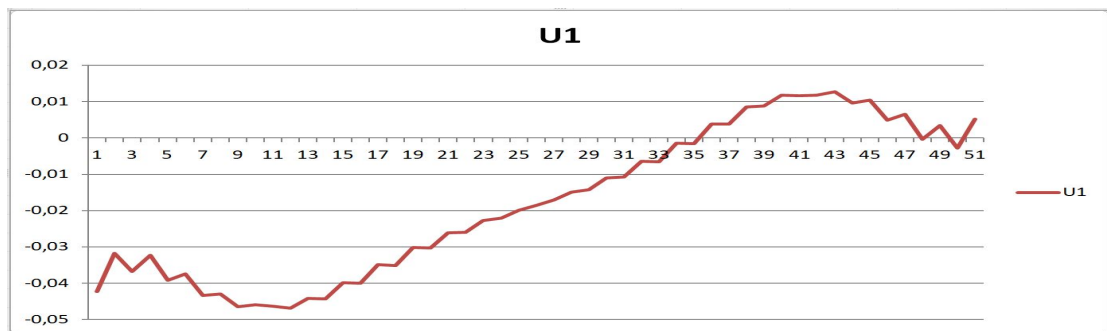


Διάγραμμα 20^γ: Ανάστροφο ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

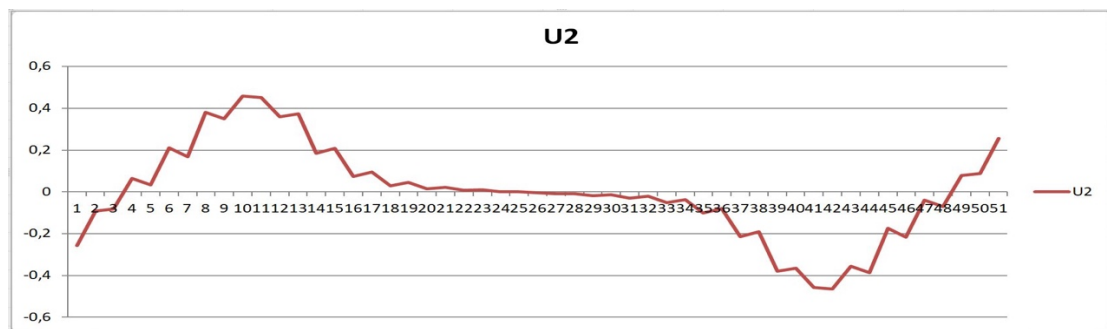
Γ) 2^η Εφαρμογή – Οριζοντιολισθητικό ρήγμα



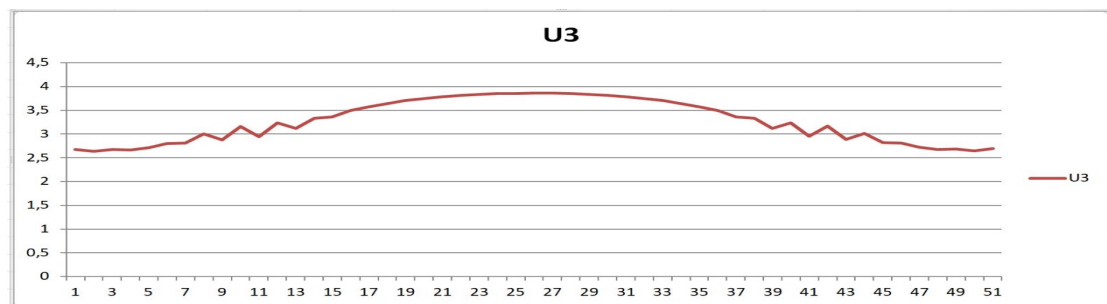
Σχήμα 21: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα. Δεύτερη εφαρμογή με συνοχή εδαφικής στρώσης $c=50$ kPa



Διάγραμμα 21^α: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.



Διάγραμμα 21^β: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.



Διάγραμμα 21^γ: Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

Παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις ρηγμάτων προκύπτουν περίπου οι ίδιες μεταβολές με αυτές των προηγούμενων εφαρμογών. Δηλαδή η συνθήκη Mohr Coulomb δεν έχει επηρεάσει ιδιαίτερα τις μέγιστες μεταβολές που συμβαίνουν στο προσομοίωμα λόγω της διάρρηξης του ρηγματος.

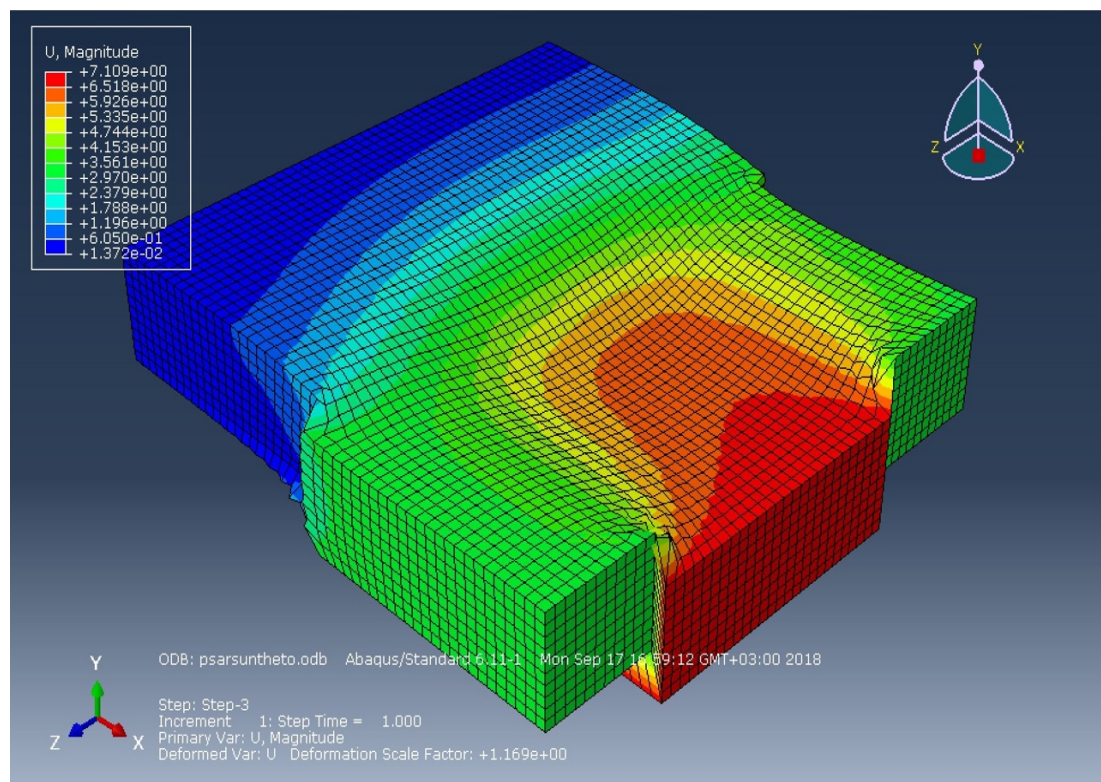
Συγκεκριμένα οι μέγιστες μεταβολές που παρατηρήθηκαν και στις δύο εφαρμογές είναι για το κανονικό ρήγμα ως προς τον άξονα των x και ως προς τον άξονα των y 4 μέτρα, ενώ ως προς τον z είναι 0,65 μέτρα. Έχει ωστόσο επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την μορφή της καμπύλης επιφάνειας που δημιουργείται στη επιφανειακή στρώση. Ευκολά συμπεραίνουμε ότι η καμπύλη επιφανειακή στρώση αποκτά μία πιο ομαλή μορφή μετά την εφαρμογή της συνθήκης και αυτό διαπιστώνεται από τα διαγράμματα των παραπάνω εφαρμογών (διαγράμματα 16, 17, 18,19, 20, 21).

Συγκρίνοντας μεταξύ τους, τις δύο παραπάνω περιπτώσεις που πραγματεύονται την συνθήκη Mohr Coulomb καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι όσο η συνοχή της εδαφικής ή ιζηματογενούς στρώσης αυξάνει την τιμή της τόσο η επιφανειακή στρώση αποκτά πιο καμπύλη μορφή, χωρίς να μεταβάλλονται οι μέγιστες μεταβολές.

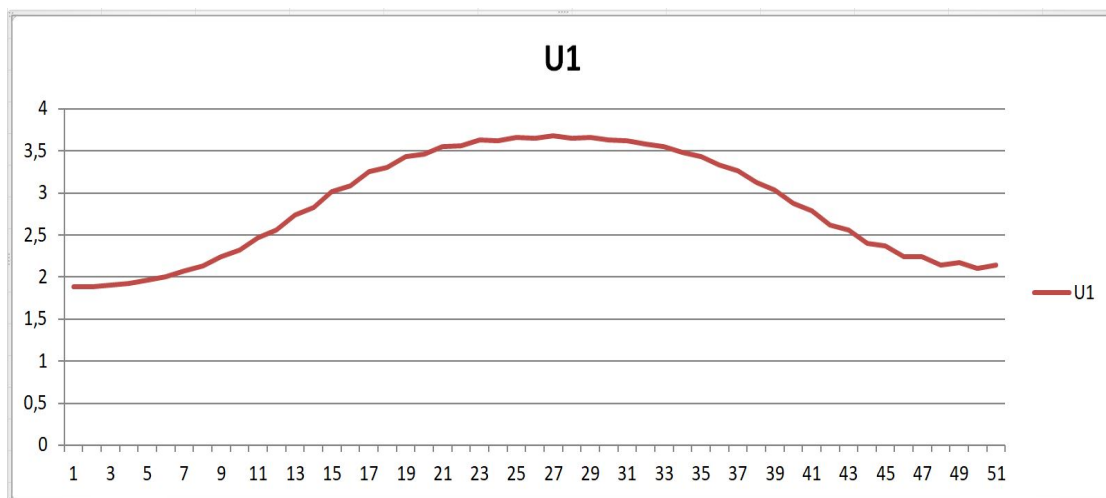
4.9 Συνδυαστικές εφαρμογές

Τέλος, τελευταία εφαρμογή αποτέλεσε ο συνδυασμός δύο ταυτόχρονων ως προς το είδος ρηγμάτων. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι το βασικό με διαστάσεις 500 μέτρων μήκος, 500 μέτρων πλάτος και 100 μέτρων πάχους εδαφικής ή ιζηματογενούς στρώσης.

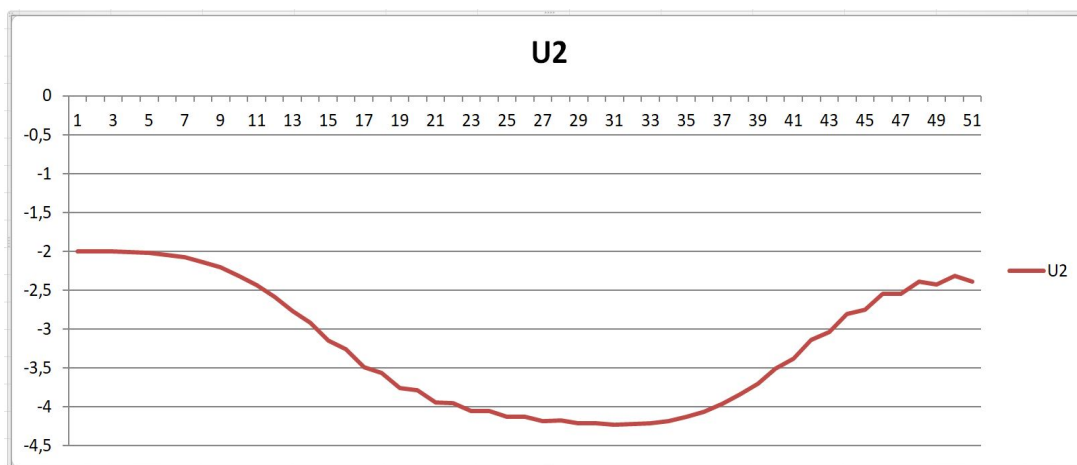
A) Πρώτη περίπτωση: Κανονικό σε συνδυασμό με Οριζοντιολισθητικό ρήγμα



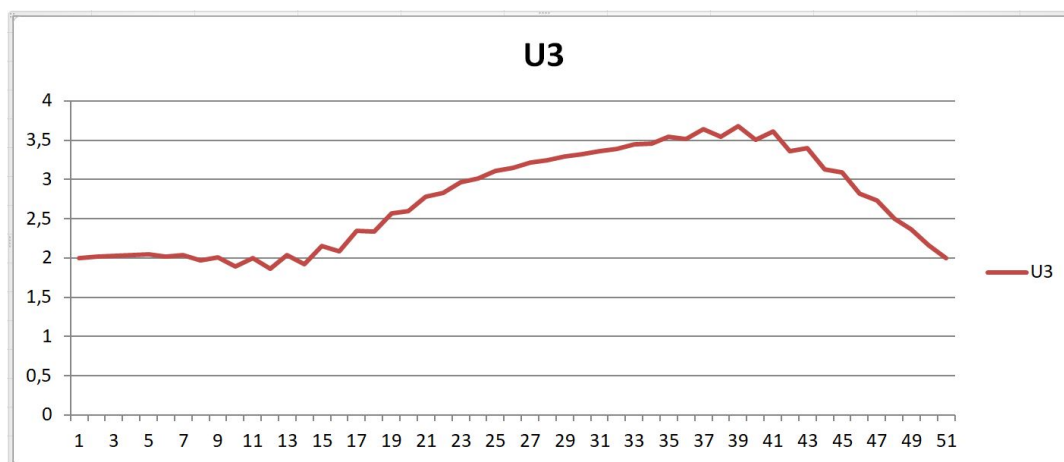
Σχήμα 22: Ταυτόχρονη εφαρμογή Κανονικού και Οριζοντιολισθητικού ρήγματος.



Διάγραμμα 22^α: Κανονικό μαζί με Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.

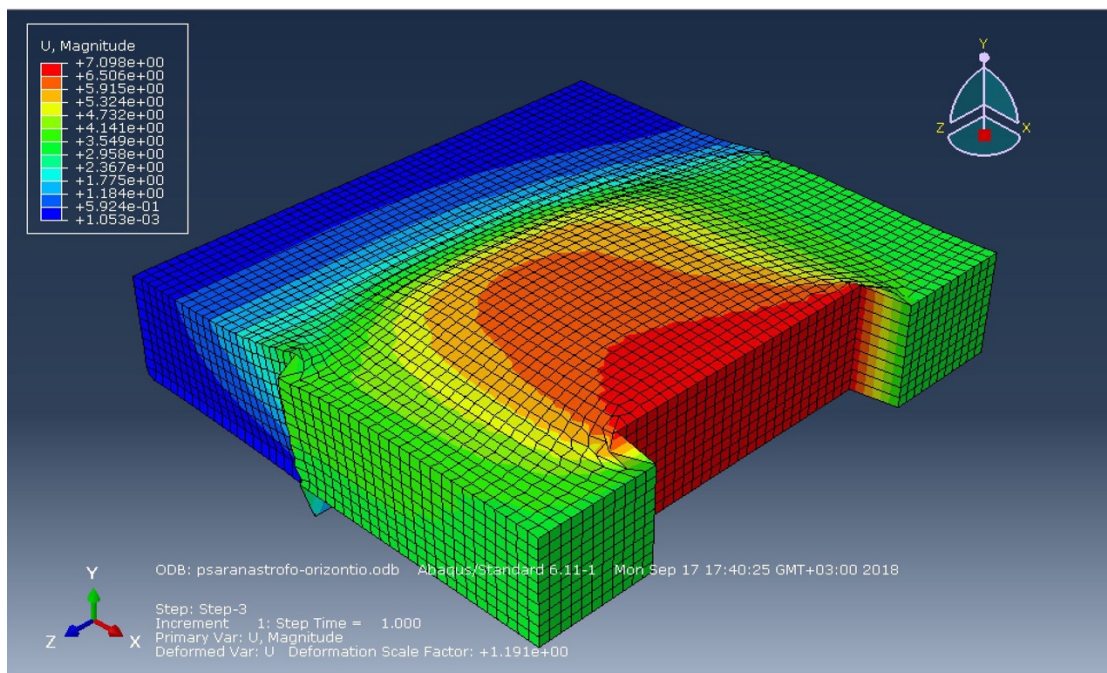


Διάγραμμα 22^β: Κανονικό μαζί με Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.

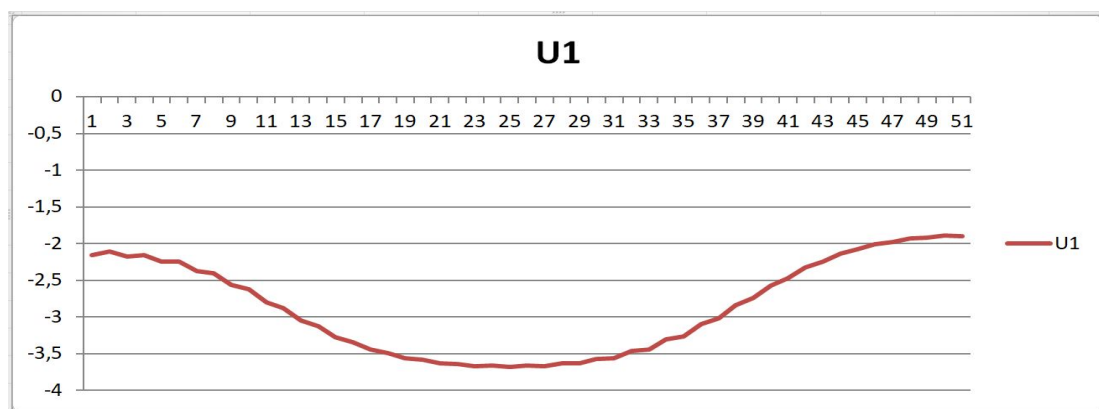


Διάγραμμα 22^γ: Κανονικό μαζί με Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

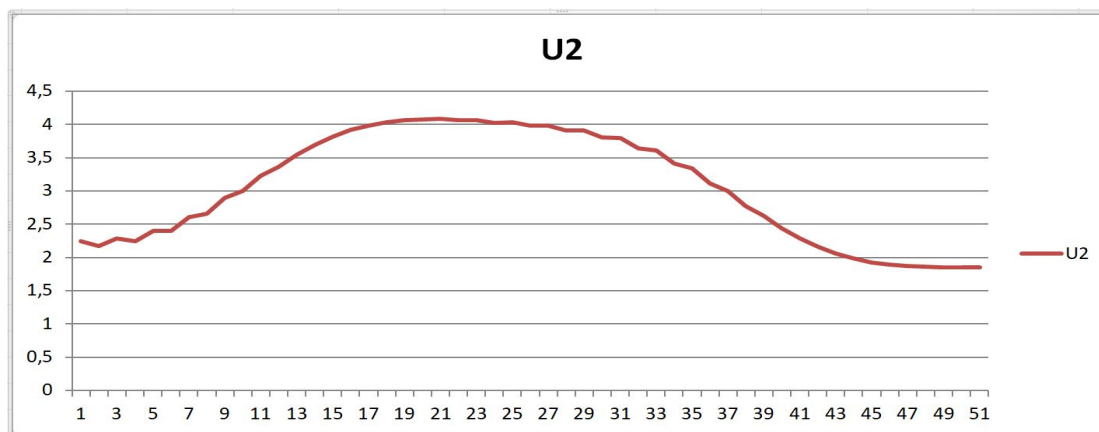
B) Δεύτερη περίπτωση: Ανάστροφο σε συνδυασμό με οριζοντιολισθητικό ρήγμα.



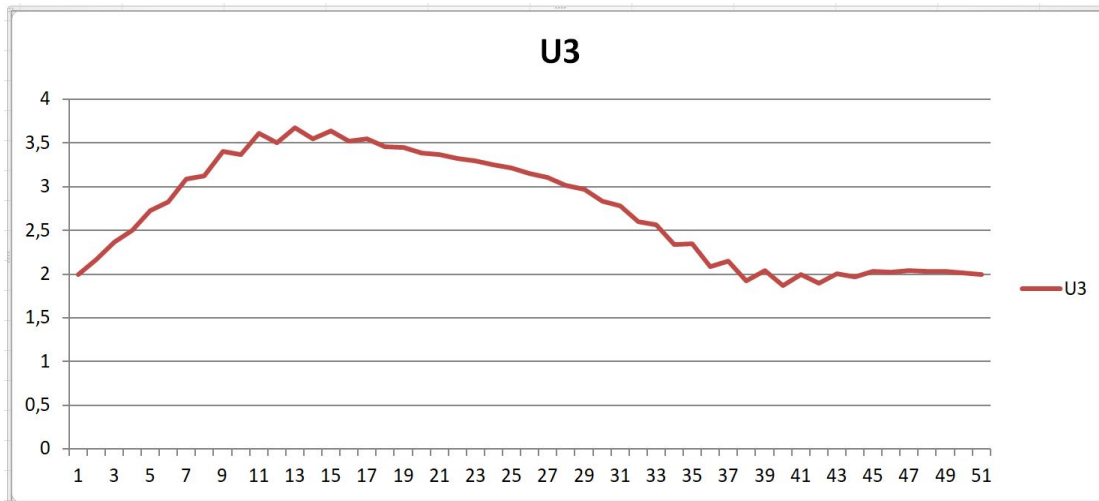
Σχήμα 23: Ταυτόχρονη εφαρμογή Ανάστροφου και Οριζοντιολισθητικού ρήγματος.



Διάγραμμα 23^α: Ανάστροφο μαζί με Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς x.



Διάγραμμα 23^β: Ανάστροφο μαζί με Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς y.



Διάγραμμα 23^γ: Ανάστροφο μαζί με Οριζοντιολισθητικό ρήγμα-Διάγραμμα μετατόπισης ως προς z.

Κατά τις δύο αυτές εφαρμογές που συνδυάζουν ταυτόχρονα δύο τύπους ρηγμάτων παρατηρούμε σχεδόν αντίστοιχες μεταβολές με αυτές των πρώτων εφαρμογών με την κάθε μία ξεχωριστά. Η διαφορά εντοπίζεται στο γεγονός ότι μεταβολές αυτές την φορά δρουν μαζί και δίνουν πλέον μία κοινή συνιστώσα μετατοπίσεων.

Συγκεκριμένα, οι αναλύσεις δείχνουν στην περίπτωση κανονικού με οριζοντιολισθητικού ρήγματος ότι η μέγιστη μετατόπιση ως προς τον άξονα των x είναι 3,7 m, ως προς τον άξονα των y είναι 4,3 m, ενώ ως προς τον άξονα των z είναι 3,7 m. Τα αποτελέσματα για το ανάστροφο σε συνδυασμό με οριζοντιολισθητικό ρήγμα δείχνουν ότι η μέγιστη μετατόπιση ως προς τον άξονα των x είναι 3,7 m, ως προς τον άξονα των y είναι 4,1 m, ενώ ως προς τον άξονα των z είναι 3,7 m. Παρατηρούμε και στις δύο περιπτώσεις ότι όταν δύο διαφορετικοί τύποι ρηγμάτων ενεργούν ταυτόχρονα τότε οι συναθροίζονται οι μετατοπίσεις που προκαλεί το καθένα ξεχωριστά.

Επίσης από τα αποτελέσματα των αναλύσεων και τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι τα επιφανειακά σημεία της στρώσης μετατοπίζονται αισθητά προς το ένα χαρακτηριστικό σημείο δημιουργώντας έτσι κατά μήκος της επιφάνειας, στρώσεις από μικρούς λόφους. Προς την μεριά του άλλου χαρακτηριστικού σημείου παρατηρούμε μία αισθητή υποχώρηση του εδάφους δημιουργώντας έτσι μία κυρτή επιφάνεια σε αυτό το τμήμα της περιοχής.

Εύκολα συμπεραίνουμε ότι ο συνδυασμός δύο τύπων ρηγμάτων προκαλεί ακόμα πιο μεγάλη επιρροή στην επιφάνεια της εδαφικής ή ιζηματογενούς στρώσης και κατ' επέκταση σε κάθε τεχνικό έργο που εδράζεται πάνω σε αυτήν, επομένως και στην περίπτωση του αγωγού. Άρα καταπονείται ο αγωγός σε μεγαλύτερο βαθμό και χρήζει πλέον την ανάγκη για περισσότερη μελέτη των συνθηκών της περιοχής.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Πιθανές προεκτάσεις

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

- Οι γεωκίνδυνοι αποτελούν ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την διάρκεια κατασκευής ενός τεχνικού έργου, ιδιαίτερα στην περίπτωση κατασκευής ενός αγωγού.
- Η κατασκευή αγωγών είναι επιτακτική ανάγκη σήμερα και πρόκειται να κατασκευαστούν περισσότεροι στο εγγύς μέλλον καθώς είναι απαραίτητη για την μεταφορά ορυκτών καυσίμων.
- Ένα ενεργό ρήγμα που βρίσκεται σε παράλληλη ευθεία με έναν αγωγό εκτεταμένου μήκους μπορεί να προκαλέσει ρήξη του αγωγού από την δημιουργία δευτερογενών ρηγμάτων.
- Όταν ενεργοποιείται ένα ρήγμα το οποίο έχει πολύ πιο μεγάλο μήκος από εκείνου του αγωγού και βρίσκεται σε παράλληλη διεύθυνση, τότε ο αγωγός συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο σε όλο του το μήκος χωρίς να καταπονείται σημαντικά.
- Στον Ελλαδικό χώρο και στη περιοχή της Μεσογείου υπάρχουν πολλά ενεργά σεισμικά ρήγματα καθώς και πολλές άλλες μορφές γεωκινδύνων που μπορούν να προκαλέσουν αστοχίες σε τέτοιου είδους κατασκευές.
- Με βάση την βιβλιογραφία και τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, το πάχος των εδαφικών ή των ιζηματογενών στρώσεων επηρεάζει την διάρρηξη ενός ρήγματος και κατ' επέκταση καθορίζει τις μόνιμες παραμορφώσεις σε έναν αγωγό.

Πιο συγκεκριμένα:

- ❖ Κάθε ρήγμα παρουσιάζει μια ξεχωριστή συμπεριφορά ανάλογα με τον τύπο του. (κανονικό, ανάστροφο, οριζοντισθητικό)
- ❖ Το πάχος των ιζηματογενών στρώσεων αποτελεί σημαντική παράμετρο καθώς όσο αυτό μειώνεται οι εδαφικές παραμορφώσεις στην επιφάνειά τους αυξάνονται.
- ❖ Το μήκος ενός ρήγματος επηρεάζει άμεσα τις επιπτώσεις σε έναν παράλληλο αγωγό καθώς όσο αυτό αυξάνεται, αυξάνονται ανάλογα και οι φορτίσεις που δέχεται ο αγωγός.
- ❖ Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών των εδαφικών ή ιζηματογενών στρώσεων είναι σημαντικές καθώς η αλλαγή αυτών παρουσιάζει αρκετά διαφορετική συμπεριφορά.

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

➤ Δημιουργία προσομοιώσεων σε μοντέλα όπου θα εκδηλώνονται ταυτόχρονα δύο τύποι ρηγμάτων. Δηλαδή την ταυτόχρονη δραστηριότητα ενός κανονικού και ενός οριζοντιολισθητικού ρήγματος ή αυτήν ενός ανάστροφου και ενός οριζοντιολισθητικού.

➤ Εξέταση της γωνίας διάρρηξης για όλους τους τύπους ρηγμάτων

➤ Δημιουργία εδαφικών ελατηρίων για αγωγούς που πρόκειται να κατασκευαστούν υποθαλάσσια μέσω πειραματικών και αριθμητικών προσομοιώσεων.

➤ Δημιουργία κανονισμού για εδαφικά ελατήρια που αφορούν αποκλειστικά υποθαλάσσιους αγωγούς.

Κεφάλαιο 6: Βιβλιογραφία – Αναφορές

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. 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.
3. 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.
4. Bryn, P. και συν., 1999β. Slope stability in deep water areas off mid Norway. Houston, Texas, s.n.
5. Bugge, T., Belderson, R. & Kenyon, N., 1998α. The Storrega slide. *Phil. Trans. Royal Soc.*, 325(1586), p. 357–388.
6. 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.
7. 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.
8. Kvalstad, T., 2007. What is current “Best Practice” in offshore geohazard investigations? A state-of-the-art review. Houston, Texas, s.n.
9. Taymaz T., Yilmaz Y., Dilek Y, (2007), The geodynamics of the Aegean and Anatolia: introduction, Department of Geology, Miami University, Oxford, OH 45056, USA.
10. GNS Science Different-types-of-Faults.
11. 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.
12. Ceramicola S., Caburlotto, A., Coste, M., Cova A, Migeon, S., Forlin, E. Praeg, D., Diviaco, 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.

13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Randolph, M. & Gourvenec, S., 2011. *Offshore Geotechnical Engineering*. s.l.:Spon Press.
19. 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.
20. Sakellariou, D., Ceramicola, S., De Martini, P. M. & Briand, F., (2011), *Marine geohazards in the Mediterranean: Executive Summary*, CIESM Workshop Monographs No 42
21. 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.
22. Frank Strozyk, (2009), *Submarine landslides in active margin environments -Slope stability vs. neotectonic activity on the northeastern margin of Crete, eastern Mediterranean*, Bremen University.
23. 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.
24. Scott, R.F (1987), Failure, *Geotechnique*, Voi. 37, No,4, pp. 423-466.
25. 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.

26. 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.
27. 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.
28. Αναστασόπουλος .X., (2005), Διδακτορική διατριβή Διδακτορική Διατριβή: Αλληλεπίδραση Επιφανειακής Διαρρήξεως – Εδάφους –Θεμελίου – Ανωδομής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
29. Σπυράκος, . & Τουτουδάκη, Ε. 2010. Βασικές έννοιες σεισμολογίας, Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας. Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
30. Παπαχαρισίου Στ., (2008), Διπλωματική: Φυσικοί κίνδυνοι- Διαχείριση φυσικών κινδύνων- Εφαρμογή εκτίμησης κατολισθητικής επικινδυνότητας, εφ. 2ο, Σελ: 30-41, Α. .Θ.
31. ABAQUS, Users' Manual, Simulia, Providence, RI, USA, 2014.
32. Fossen, H. (2010). Structural Geology. 480p., Cambridge University Press. Grasemann, B., Schneider, A.D., Stockli, F.D. & Iglseder, C. (2012). Miocene bivergent crustal extension in the Cyclades (Greece). Lithosphere, V. 4, No 1, p. 23-39.
33. Twiss, J.R. & Moores, M.F. (1992). Structural Geology. 532p., W. H. Freeman and Company.
34. Varnes D. J., 1978. Slope movement types and processes: in Schuster R.L. & Krizak R., Landslides Washington D.C.. National Academy of Sciences Transportation Research Board. p. 11-13.
35. Psarropoulos P. (2015) Presentation about Greek faults between Xanthi and Komotini (F-GR-38, F-GR-39).