



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΘΕΜΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

**ΑΓΩΓΟΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΕ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗ ΜΕ ΕΝΕΡΓΑ
ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΡΗΓΜΑΤΑ: Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ**



ΙΩΑΝΝΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ

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

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Υστερα από μια απαιτητική περίοδο έξι μηνών, ολοκληρώθηκε η διπλωματική εργασία μου. Ήταν μια περίοδος συνεχούς μάθησης, τόσο σε εκπαιδευτικό, όσο και σε προσωπικό επίπεδο.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. κ. Μαρίνο Καττή και Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, για την εμπιστοσύνη και πολύτιμη βοήθεια τους. Είμαι ευγνώμον που είχα δυο καθηγητές πρόθυμους να λύσουν κάθε απορία μου.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου, Δημήτρη Καραδήμο και Μαρία-Άννα Θεοδωράκη, για την πρόθυμη βοήθεια που μου παρείχαν στην εκμάθηση του λογισμικού που χρησιμοποίησα, αλλά κυρίως για τη στήριξη τους καθ'όλη τη διάρκεια.

Τέλος, για τη διαρκή ψυχολογική υποστήριξη και υπομονή, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και την αδερφή μου, Έμη, που με παροτρύνουν πάντα να ακολουθώ τους στόχους μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	1
Abstract.....	2
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	3
Κεφάλαιο 2: Γεωκίνδυνοι και Αγωγοί.....	5
2.1. Σεισμοί- Σεισμικά ρήγματα.....	7
2.2. Κατολισθήσεις.....	10
2.2.1. Υποθαλάσσιες Κατολισθήσεις.....	12
2.2.2. Χερσαίες Κατολισθήσεις.....	13
2.3. Πλευρικές εξαπλώσεις.....	15
Κεφάλαιο 3: Αλληλεπίδραση εδάφους και αγωγού - εδαφικά ελατήρια.....	16
3.1. Χερσαίοι αγωγοί.....	16
3.1.1 Ο'ROURKE & LIU(2012).....	17
3.1.1.1. Διαμήκης κίνηση.....	18
3.1.1.2. Εγκάρσια οριζόντια κίνηση.....	19
3.1.1.3. Εγκάρσια κάθετη κίνηση – κατεύθυνση προς τα πάνω.....	21
3.1.1.4. Εγκάρσια κάθετη κίνηση – κατεύθυνση προς τα κάτω.....	22
3.1.2. AMERICAN LIFELINES ALLIANCE (A.L.A)	24
3.1.2.1. Μέγιστη αξονική εδαφική δύναμη.....	24
3.1.2.2. Μέγιστη πλευρική εδαφική δύναμη.....	25
3.1.2.3. Μέγιστη κατακόρυφη δύναμη (ανύψωσης).....	25
3.1.2.4. Μέγιστη κατακόρυφη δύναμη (ανάχωσης).....	26

3.2. Υποθαλάσσιοι αγωγοί.....	27
3.2.1. Ενσωμάτωση αγωγού.....	27
3.2.2. Ο'ROURKE & LIU (2012).....	28
3.2.2.1. Διαμήκης κίνηση.....	28
3.2.2.2. Οριζόντια εγκάρσια κίνηση.....	29
3.2.2.3. Εγκάρσια κάθετη κίνηση- προς τα πάνω.....	29
3.2.2.4. Εγκάρσια κάθετη κίνηση- προς τα κάτω.....	30
3.2.3. ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ DNV·GL.....	31
3.2.3.1. Αξονική αλληλεπίδραση αγωγού – Εδάφους.....	31
3.2.3.2. Πλευρική αλληλεπίδραση αγωγού- Εδάφους.....	33
3.2.3.3. Αντίσταση προς τα πάνω.....	33
3.2.3.4. Αντίσταση προς τα κάτω.....	36
Κεφάλαιο 4: Παραμετρική ανάλυση για την αλληλεπίδραση αγωγού και ρήγματος με έμφαση στα εδαφικά ελατήρια.....	38
4.1. Προσομοίωμα χερσαίου αγωγού– παρουσίαση προβλήματος	38
4.1.1. Προσέγγιση προβλήματος με τη θεωρία A.L.A.....	40
4.2. Προσομοίωμα υποθαλάσσιου αγωγού– παρουσίαση προβλήματος.....	52
4.2.1. Παραμετρική ανάλυση για υποθαλάσσιο αγωγό σύμφωνα με τους Ο'Rourke & Liu.....	53
4.2.2. Παραμετρική ανάλυση για υποθαλάσσιο αγωγό σύμφωνα με τον κανονισμό της DNV.....	61

Κεφάλαιο 5: Γενικά συμπεράσματα και προτεινόμενη έρευνα.....	69
Βιβλιογραφία.....	71
Παράρτημα.....	73

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σημερινή πραγματικότητα θέτει διαρκώς καινούργια δεδομένα στην αξιοποίηση φυσικού αερίου και πετρελαίου. Θεωρείται επιτακτική ανάγκη η εξόρυξη και μεταφορά αυτών μέσω χερσαίων και υποθαλάσσιων αγωγών, για την κάλυψη των ανθρώπινων και κοινωνικών αναγκών. Ωστόσο, η έκθεση των εν λόγω αγωγών σε γεωλογικούς κινδύνους (γεωκινδύνους), ενισχύει την ανάγκη για διαρκή παρακολούθηση, ώστε να αποφευχθούν βλάβες ή καταστροφές.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάζεται η σπουδαιότητα των εδαφικών ελατηρίων (αξονικά, πλευρικά, κατακόρυφα), στην αποφυγή καταπόνησης ενός θαμμένου αγωγού από σεισμικό ρήγμα. Για τις ανάγκες της εργασίας, μελετήθηκαν οι επικρατέστεροι βασικοί κανονισμοί εδαφικών ελατηρίων και πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση, μεταβάλλοντας τόσο τις τιμές των εδαφικών ελατηρίων σύμφωνα με τους κανονισμούς, όσο και γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού, όπως το πάχος τοιχώματος, και η εξωτερική ακτίνα. Για την ολοκλήρωση των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, ώστε να ληφθούν οι τιμές αξονικής τάσης και παραμόρφωσης του αγωγού στο σημείο διασταύρωσης με το ρήγμα και να συνταχθούν οι γραφικές παραστάσεις αυτών. Τέλος, αξιολογούνται τα αποτελέσματα της μελέτης και παρουσιάζονται συμπεράσματα προκειμένου να εκτιμηθεί το μέγεθος του προβλήματος και να προταθούν επιγραμματικά διάφορα μέτρα αντιμετώπισής του, καθώς επίσης και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

ABSTRACT

Current situation creates a new framework in the development of gas and oil resources. Their extraction and transportation through onshore and offshore pipelines is essential for meeting human and social needs. These pipelines are exposed to geological hazards (geohazards) and therefore occurs a growing need for continuous monitoring to avoid damage or distraction. The importance of soil springs (axial, lateral, vertical) in the prevention of stresses of a buried pipeline by seismic fault is examined in this particular thesis. For the purposes of this thesis, main springs territorial regulations were studied and parametric analysis was produced altering both the values of soil springs in accordance with the regulations, and also the geometrical characteristics of the pipeline such as the wall thickness and the outer radius. To complete the analysis the finite element software ABAQUS was used in order to obtain the axial tension and deformation of the pipeline at the meeting point of fault and to compile these graphical representations. Finally, the study results and conclusions presented are evaluated in order to assess the extent of the problem and propose briefly various measures to address it, as well as suggestions for further research.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι σύγχρονες κοινωνίες έχουν ενσωματώσει στους ρυθμούς τους την ευρεία χρήση ορυκτών καυσίμων. Αυτή η επιτακτική ανάγκη οδήγησε τον ανθρώπινο παράγοντα στη δημιουργία μέσων εξόρυξης και μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου. Πρόκειται για αγωγούς, η χρήση των οποίων είναι απαραίτητη και ιδιαίτερης οικονομικής και κοινωνικής σημασίας, για αυτό το λόγο και η προστασία τους από φυσικούς ή ανθρωπογενείς κινδύνους κρίνεται αναγκαία. Οι αγωγοί μπορεί να είναι τοποθετημένοι τόσο σε χερσαίο περιβάλλον, όσο και σε υποθαλάσσιο, να είναι θαμμένοι ή επιφανειακοί. Κατά την έκθεση ενός αγωγού σε έναν γεωκίνδυνο, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται και τον καταπονούν είναι ιδιαίτερα μεγάλες, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στη συμπίεση ή ακόμη και καταστροφή τους. Ένα ενδεχόμενο που θα επέφερε μεγάλο οικονομικό αλλά και περιβαλλοντικό όλεθρο. Η κίνηση του εδάφους λόγω φαινομένων διάδοσης σεισμικών κυμάτων ή άλλων γεωκινδύνων συμβάλλει στην ανάπτυξη ορθών δυνάμεων και δυνάμεων τριβής στη διεπιφάνεια του αγωγού με το έδαφος, που φορτίζουν τον αγωγό. Κάθε δύναμη-παραμόρφωση αναπαρίσταται με ανεξάρτητο εδαφικό ελατήριο, το οποίο συμβάλλει στην ελάφρυνση του αγωγού από την καταπόνηση που δέχεται.

Η παρούσα εργασία είχε στόχο να εξετάσει τη σπουδαιότητα των εδαφικών ελατηρίων, σε περιπτώσεις καταπόνησης ενός αγωγού. Για τη διεξαγωγή της μελέτης, αρχικά λήφθηκε ένας αγωγός δύο διαστάσεων, ο οποίος θεωρήθηκε θαμμένος, αρχικά σε χερσαίο και έπειτα σε υποθαλάσσιο περιβάλλον, και είχε υποστεί μια καταπόνηση λόγω σεισμικού ρήγματος. Στο πρώτο Κεφάλαιο, αναφέρεται η βασική θεωρία για χερσαίους και υποθαλάσσιους γεωκινδύνους, ώστε να εξοικειωθεί ο αναγνώστης με το πρόβλημα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι κύριοι κανονισμοί που καλύπτουν το κομμάτι των εδαφικών ελατηρίων, τόσο σε επίπεδο θεωρίας, όσο και μαθηματικών σχέσεων. Το Κεφάλαιο των αναλύσεων, παρουσιάζει τις γραφικές παραστάσεις αξονικής τάσης και παραμόρφωσης, κατά μήκος του αγωγού, σε συνάρτηση με την απόσταση από το ρήγμα, σύμφωνα με τις τιμές ελατηρίων που προέκυψαν από τους κανονισμούς. Για συγκριτικούς σκοπούς, πραγματοποιήθηκε επίσης παραμετρική ανάλυση, μεταβάλλοντας τις τιμές της μετατόπισης του ρήγματος, του πάχους τοιχώματος και της εξωτερικής ακτίνας, τόσο για αμμώδες εδαφικό υλικό όσο και για τρία είδη αργίλου. Στη συνέχεια, αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα, ώστε να διατυπωθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα. Για την κάλυψη του τεχνικού μέρους της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, από το οποίο προέκυψαν οι τιμές των αξονικών τάσεων και παραμορφώσεων, για τη σύνταξη των διαγραμμάτων σε

πρόγραμμα EXCEL. Τέλος, για την κάλυψη του θεωρητικού τμήματος, μελετήθηκε εις βάθος ελληνική και ξένη βιβλιογραφία που κάλυπτε τις ανάγκες του προβλήματος.

2. ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΑΓΩΓΟΙ

Οι γεωκίνδυνοι είναι γεγονότα που προκαλούνται από γεωλογικά χαρακτηριστικά και διαδικασίες και μπορεί να αποτελέσουν σοβαρές απειλές για τον άνθρωπο, τις κατασκευές και το φυσικό και δομημένο περιβάλλον. Οι σεισμοί, οι πλημμύρες, οι κατολισθήσεις, τα ηφαίστεια, οι χιονοστοιβάδες και τα τσουνάμι αποτελούν τα πιο τυπικά παραδείγματα τέτοιων φαινομένων. Οι κατολισθήσεις, που οφείλονται σε έντονες βροχοπτώσεις, οι πλημμύρες, οι σεισμοί, καθώς και οι ανθρώπινες δράσεις είναι οι πιο κοινές και επικίνδυνες καταστροφές που μπορούν να προκληθούν στη γη. Τόσο σε χερσαίο, όσο και σε υποθαλάσσιο περιβάλλον, οι γεωλογικές διαδικασίες σε συνδιασμό με την ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως για παράδειγμα οι διαδικασίες για την εύρεση και μεταφορά πετρελαίου στην ανοικτή θάλασσα, μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες ροές μάζας. Όσον αφορά τον αριθμό των θανατηφόρων περιστατικών, οι σεισμοί και οι πλημμύρες θεωρούνται οι πιο σημαντικοί γεωκίνδυνοι, παρόλο που οι μεγαλύτερες καταστροφές οφείλονται στην απομάκρυνση εδαφικών υλικών και στη μεγάλη ροή μάζας, που προκαλούνται εξ αυτών. Το τσουνάμι αποτελεί έναν γεωκίνδυνο που εκδηλώνεται σπάνια, αλλά σε περιπτώσεις εμφάνισης του, όπως στο περιστατικό που διαδραματίστηκε στον Ινδικό Ωκεανό το 2004, ο απολογισμός των θυμάτων και των καταστροφών είναι ιδιαίτερα υψηλός.

Επομένως, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη για τη βέλτιστη κατανόηση των τεχνικών, οικονομικών και κοινωνικών κινδύνων, που προέρχονται από τα εν λόγω γεωλογικά φαινόμενα, καθώς και τη σχέση των κινδύνων με τις ανθρώπινες δυνατότητες για να την αντιμετώπιση τους. Η ανάγκη ενισχύεται από την αυξημένη εκδήλωση γεωλογικών κινδύνων και κυρίως από την αυξημένη ανησυχία για τα προβλήματα που μπορούν να προκαλέσουν στην παραγωγή και τη μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου (Psarroroulos & Antoniou, 2016). Στη συνέχεια, θα παρουσιασθούν αναλυτικά τα πιο σημαντικά γεωλογικά φαινόμενα που επηρεάζουν τόσο χερσαίους, όσο και υποθαλάσσιους αγωγούς.

ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΟΙ

Οι γεωκίνδυνοι που εκδηλώνονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, σχετίζονται ιδιαίτερα με τη μορφολογία του θαλάσσιου πυθμένα, παρουσιάζουν

μεγάλη ταχύτητα διάδοσης και τα αποτελέσματα τους εμφανίζονται πιο έντονα σε μεγάλα βάθη. Η συχνότητα εκδήλωσής τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μορφολογία του πυθμένα και από τις δραστηριότητες και συνθήκες που επικρατούν σε αυτόν. Σημαντικός επίσης παράγοντας είναι η ζώνη επικινδυνότητας στην οποία μπορεί να ανήκει η περιοχή. Έχει διατυπωθεί μια κατηγοριοποίηση των εν λόγω κινδύνων σύμφωνα με το χρόνο εκδήλωσής τους, καθώς και με το μέσο που προκάλεσε τη δημιουργία τους.

Ός προς το χρόνο εκδήλωσης, διακρίνονται σε ακαριαία και μακροχρόνια φαινόμενα. Στην πρώτη κατηγορία, ανήκουν οι σεισμοί και φαινόμενα που συνδέονται με αυτούς, όπως οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, οι τυρβώδεις ροές και η αποβολή αερίων. Πρόκειται για φαινόμενα που δεν εκδηλώνονται συχνά, αλλά σε περίπτωση εμφάνισής τους, οι συνέπειες είναι μεγάλες. Στην περίπτωση των μακροχρόνιων φαινομένων, πρόκειται για κινδύνους που εκδηλώνονται σταδιακά και σε αργούς ρυθμούς. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει ο ερπυσμός.

Όσον αφορά το μέσο εκδήλωσης των υποθαλάσσιων γεωκινδύνων, μπορούν να δημιουργηθούν από ανθρώπινους και φυσικούς παράγοντες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα γεωλογικά φαινόμενα που μπορεί να προκληθούν λόγω επέμβασης του ανθρώπινου παράγοντα. Το θετικό σημείο στους ανθρωπογενείς γεωκινδύνους είναι η βραδεία εξέλιξη τους και η δυνατότητα παρακολούθησης ή ακόμη και αποφυγής τους. Η δεύτερη κατηγορία κινδύνων χαρακτηρίζεται από ένταση και συχνότητα εκδήλωσης. Μπορεί να υπάρχει συσχετισμός μεταξύ των φυσικών κινδύνων ή ακόμη και να έχει προκληθεί το ένα φαινόμενο από το άλλο.

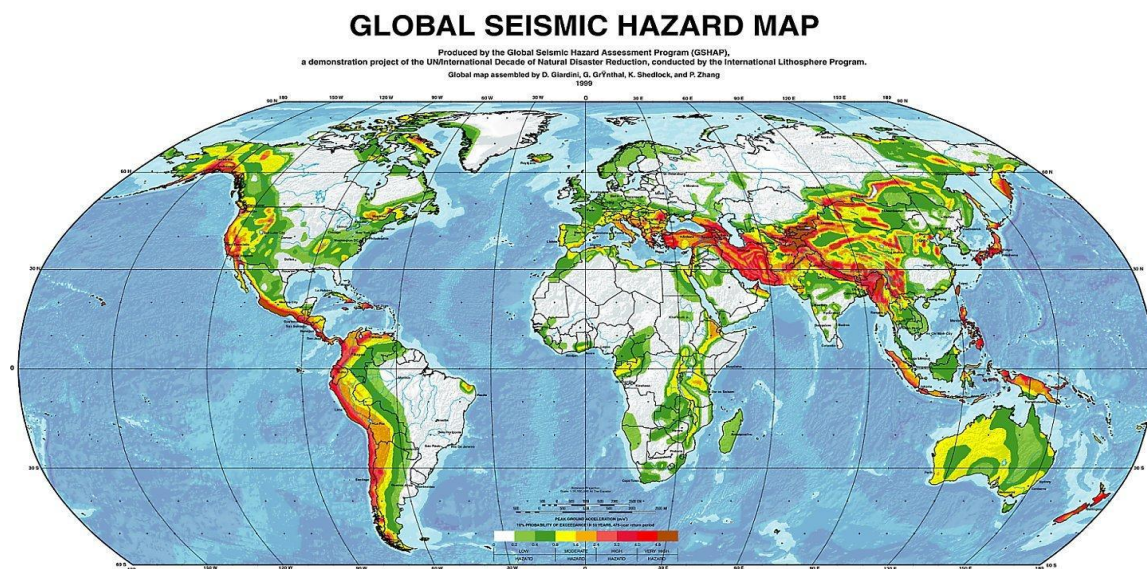
ΧΕΡΣΑΙΟΙ ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΟΙ

Οι γεωκίνδυνοι που εκδηλώνονται σε χερσαίες περιοχές δε διαφέρουν ιδιαίτερα από τους αντίστοιχους σε υποθαλάσσιο περιβάλλον. Ο χρόνος και οι παράγοντες εκδήλωσης είναι ίδιοι, το μόνο σημείο που διαφέρει είναι ότι τα φαινόμενα εξαρτώνται από τις συνθήκες των χερσαίων εδαφών, έναντι του πυθμένα της θάλασσας, και ότι ο ανθρώπινος παράγοντας δρά σε μεγαλύτερο βαθμό στη χερσαία ζώνη, γεγονός που ίσως ευνοεί τη συχνότερη εμφάνιση των χερσαίων γεωκινδύνων. Στη συνέχεια παραθέτονται οι βασικοί γεωκίνδυνοι σε υποθαλάσσιο και χερσαίο περιβάλλον.

2.1. ΣΕΙΣΜΟΙ-ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΡΗΓΜΑΤΑ

Πρόκειται για εδαφική δόνηση, που οφείλεται στη διατάραξη της μηχανικής ισορροπίας των πετρωμάτων από φυσικές αιτίες που διενεργούνται στο εσωτερικό της γης. Ο σεισμός αποτελεί ένα στιγμιαίο αποτέλεσμα μιας μακροχρόνιας διαδικασίας συσσώρευσης δυναμικής ενέργειας, σε καταπονούμενες περιοχές της λιθόσφαιρας. Η εκδήλωση αυτού του γεωλογικού φαινομένου πραγματοποιείται απροειδοποίητα και διαρκεί μόλις λίγα δευτερόλεπτα. Παρά τη μικρή διάρκειά του, η ενέργεια που εκτονώνεται είναι ικανή να προκαλέσει μεγάλες καταστροφές, μέχρι και απώλειες ανθρώπινων ζώων. Τέλος, ένα σεισμικό φαινόμενο μπορεί να αποτελέσει έναυσμα για την εκδήλωση κάποιου άλλου γεωκινδύνου, όπως για παράδειγμα ένα τσουνάμι ή μια αποκόλληση πρानούς (Paradopoulos et.al 2007).

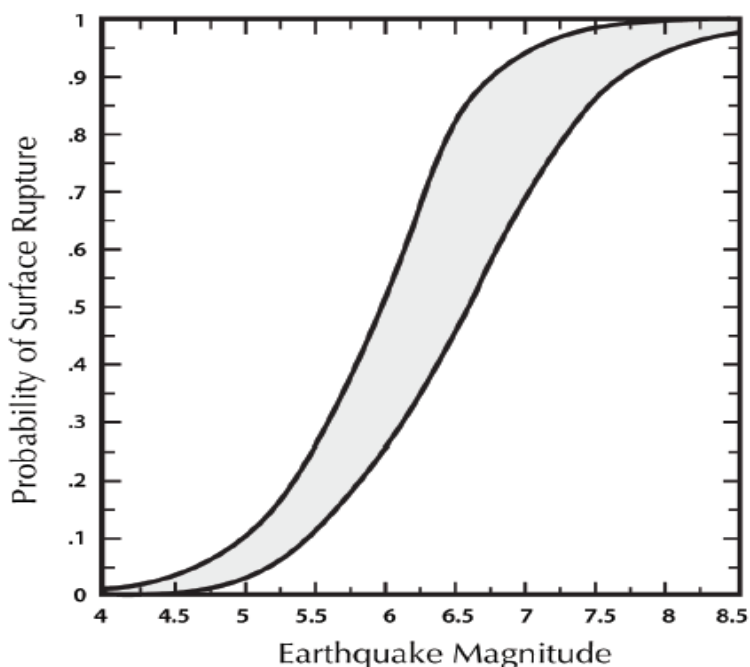
Η εμφάνιση μιας σεισμικής δόνησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μορφολογία του εδάφους, και για αυτό το λόγο έχουν διαμορφωθεί χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας (βλ. Εικόνα 2.1), σύμφωνα τα σεισμικά περιστατικά που έχουν καταγραφεί. Η Ελλάδα θεωρείται μια ιδιαίτερα σεισμογενής χώρα, γεγονός που οφείλεται στη σύγκλιση της Αφρικανικής με την Ευρω-ασιατική λιθοσφαιρική πλάκα. Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο θεωρείται η πιο σεισμογενής χώρα, ενώ σε παγκόσμιο επίπεδο κατατάσσεται έκτη.



Εικόνα 2.1: Παγκόσμιος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας (D. Giardini et. al 1999)

ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΡΗΓΜΑΤΑ

Οι τεκτονικοί σεισμοί οφείλονται σε διαρρήξεις των πετρωμάτων, οι οποίες γίνονται πάνω σε επιφάνειες, οι οποίες ονομάζονται επιφάνειες διάρρηξης. Το επίπεδο το οποίο εφάπτεται της επιφάνειας ή συμπίπτει με την επιφάνεια διάρρηξης στην εστία του σεισμού λέγεται επίπεδο του ρήγματος. Συνεπώς, με τον όρο ρήγμα νοείται η διακοπή της συνέχειας μιας ομάδας στρωμάτων πετρωμάτων του στερεού φλοιού της γης, η οποία συμβαίνει κατά επίπεδη επιφάνεια και σε μεγάλη έκταση και εκατέρωθεν της οποίας πραγματοποιείται σχετική κίνηση των στρωμάτων. Στις περιπτώσεις όπου το μέγεθος του σεισμού είναι αρκετά μεγάλο, η διάδοση μπορεί να ανέλθει εως την επιφάνεια του εδάφους και να δημιουργηθεί επιφανειακή ρήξη. Έχουν προταθεί αρκετές σχέσεις που συσχετίζουν τη πιθανότητα επιφανειακής ρήξης με το μέγεθος του σεισμού, όπως το διάγραμμα των Youngs et. al. (2003), στο οποίο διακρίνεται ότι η πιθανότητα να εκδηλωθεί ένα ρήγμα στην επιφάνεια του εδάφους κατά 90%, προϋποθέτει να έχει παρουσιασθεί σεισμός μεγέθους 7.5 μονάδων (βλ. Εικόνα 2.2).



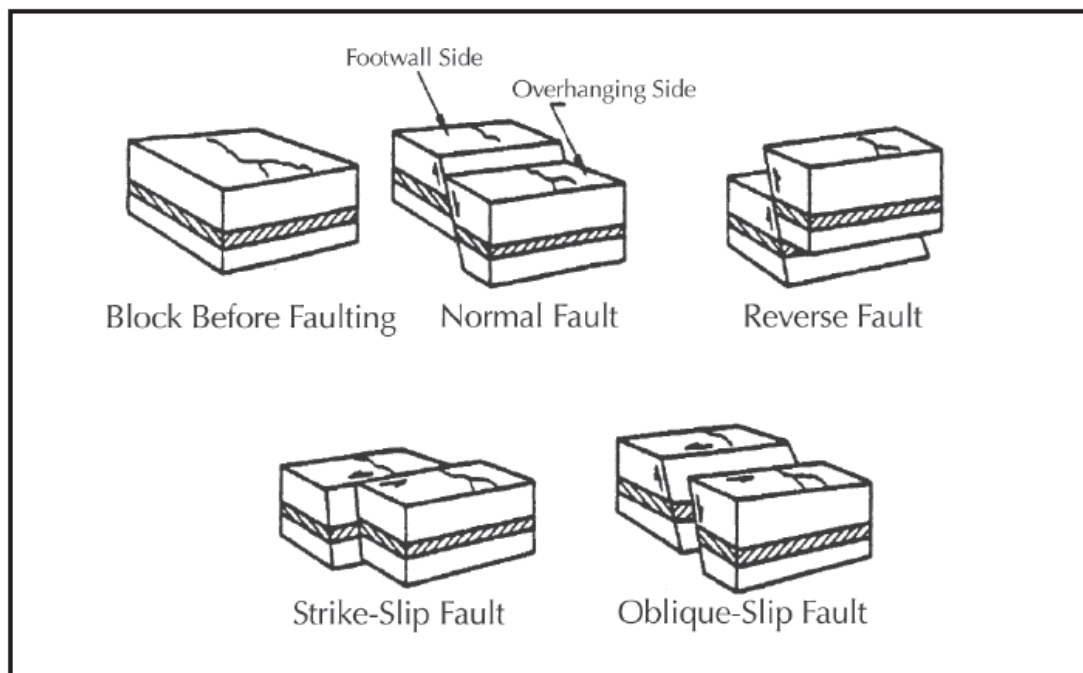
Εικόνα 2.2: Πιθανότητα επιφανειακής διάρρηξης ως συνάρτηση του σεισμικού μεγέθους (Youngs et. al. 2003)

Μια κατηγοριοποίηση των ρηγμάτων που έχει παρουσιασθεί, αφορά τη σχετική θέση που έχουν αποκτήσει τα ρηξιγενή τεμάχια μετά τη διάρρηξη (Parazakos et. Al 2005).

- 1) Κανονικό ρήγμα: ρήγμα όπου το υπερκείμενο τεμάχιο φαίνεται να έχει κατέλθει σε σχέση με το υποκείμενο. Προκαλεί σε ένα οριζόντιο αγωγό αξονικό εφελκυσμό και κάμψη.
- 2) Ανάστροφο ρήγμα: ρήγμα όπου το υπερκείμενο τεμάχιο φαίνεται να έχει ανέλθει σε σχέση με το υποκείμενο. Προκαλεί σε ένα οριζόντιο αγωγό αξονική θλίψη και κάμψη.

Τόσο στα κανονικά, όσο και στα ανάστροφα η εδαφική μετακίνηση είναι κατακόρυφη.

- 3) Ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης: διακρίνονται σε αριστερόστροφα και δεξιόστροφα, όπου παρατηρείται οριζόντια μετατόπιση των τεμαχίων τους. Ένα τέτοιο ρήγμα προκαλεί σε ένα συνεχή αγωγό αξονικό εφελκυσμό και κάμψη ή αξονική θλίψη και κάμψη, ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζει ο αγωγός με το ρήγμα.



Εικόνα 2.3: Ταξινόμηση ρηγμάτων (Meyersohn, 1991)

Έχουν διατυπωθεί αρκετές μαθηματικές σχέσεις που δίνουν το μέσο όρο της μετακίνησης του ρήγματος ανάλογα με το μέγεθος του σεισμού. Οι σχέσεις που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι αυτές που πρότειναν οι Wells and Coppersmith (1994) και παρουσιάζονται στη συνέχεια:

$$\log \delta_f = -6.32 + 0.90M \quad \text{για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης} \quad (2.1)$$

$$\log \delta_f = -4.45 + 0.63M \quad \text{για κανονικό ρήγμα} \quad (2.2)$$

$$\log \delta_f = -0.74 + 0.08M \quad \text{για ανάστροφο ρήγμα} \quad (2.3)$$

όπου δ_f : ο μέσος όρος μετακίνησης του ρήγματος σε μέτρα και

M: μέγεθος μέτρησης σεισμού σε μονάδες Moment

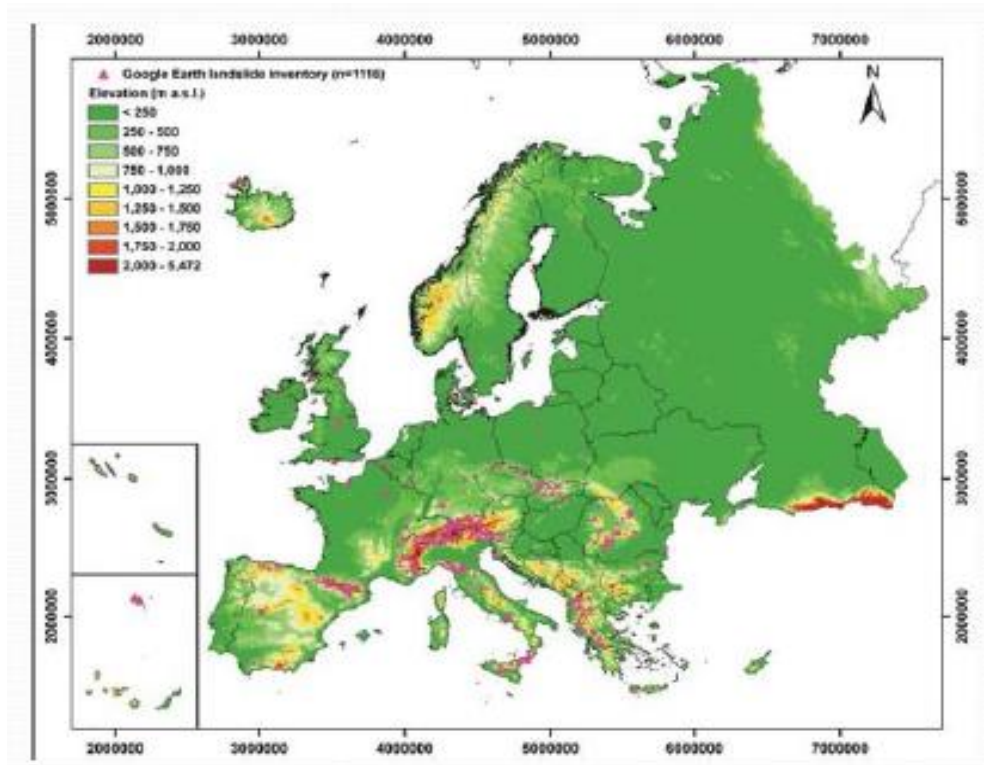
2.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Ως κατολίσθηση ορίζεται η μετακίνηση που διαδραματίζεται σε φυσικά ή τεχνητά πρηνή. Στην πραγματικότητα πρόκειται για μετακίνηση εδαφικής μάζας, η οποία αποχωρεί από το εδαφικό σύνολο μέσω ολίσθησης, κατάπτωσης, ανατροπής και ερπυσμού (Λουπασάκης 2013). Αν ο βράχος ή το έδαφος κινηθεί αποκλειστικά με κατακόρυφη διεύθυνση, το φαινόμενο ονομάζεται καθίζηση, κατάρρευση ή κατάπτωση. Αν σημειώνεται και κίνηση κατά την οριζόντια διεύθυνση, τότε γίνεται χρήση του γενικού όρου κατολίσθηση (Camerlenghi et al., 2010). Μια κατολίσθηση μπορεί να εκδηλωθεί απότομα και να διαρκέσει μόλις λίγα δευτερόλεπτα ή λεπτά, αλλά προκαλώντας μεγάλο μέγεθος καταστροφών. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που οδηγούν σε τέτοια φαινόμενα είναι οι εξής (Παπαχαρισίου, 2008):

- Αφαίρεση της υποστήριξης του πρηνούς
- Επιπλέον φόρτιση του πρηνούς

- Δράση της χλωριδοπανίδας
- Αποσάθρωση
- Παρουσία ύδατος
- Γεωλογική δομή

Οι κατολισθήσεις αποτελούν έναν σημαντικό κίνδυνο για τους αγωγούς, διότι μπορούν να προκαλέσουν καταστροφή, μόνιμες παραμορφώσεις και να οδηγήσουν σε διαρροές ή σε διακοπή της λειτουργίας τους (Marinos V. Stoumpos et al. 2016). Ο παρακάτω χάρτης παρουσιάζει την κατανομή των κατολισθήσεων σε ευρωπαϊκό επίπεδο (SAFEland project: Van Den Eeckhaut et al. 2011).



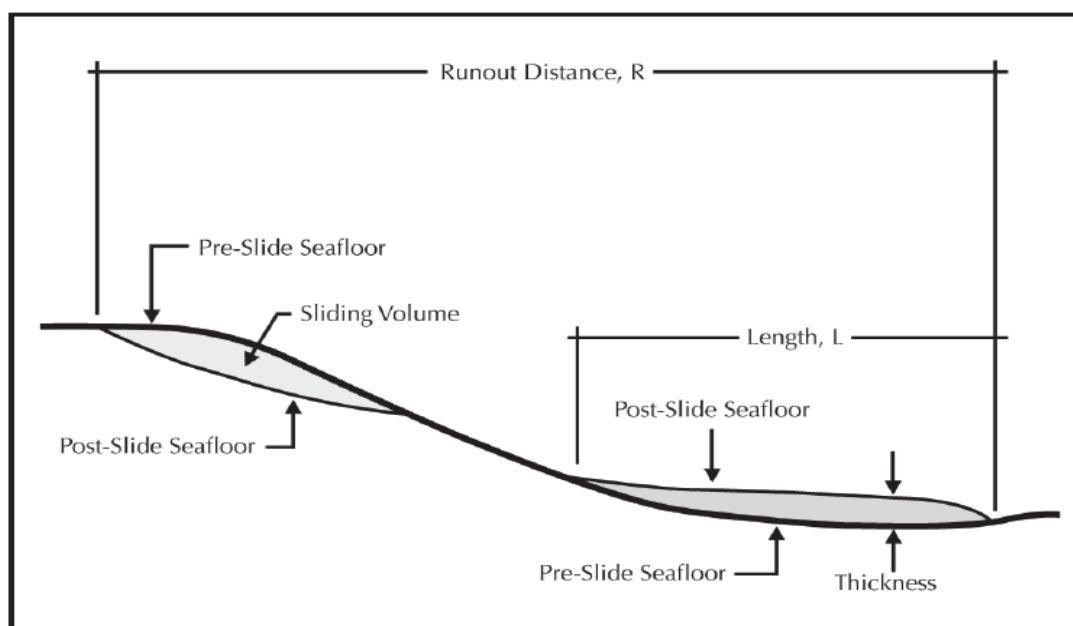
Εικόνα 2.4: Χάρτης κατανομής των κατολισθήσεων (Van Den Eeckhaut et al. 2011)

2.2.1. ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Μια κατολίσθηση σε θαλάσσιο περιβάλλον μπορεί να δημιουργηθεί από σεισμικές δονήσεις και έντονες ροές, αλλά συνήθως τα φαινόμενα που τις ενεργοποιούν είναι οι ηφαιστειακές εκρήξεις και διαβρώσεις. Οι περιοχές που κρίνονται πιο επιρρεπείς σε κατολίσθησεις είναι αυτές που παρουσιάζουν και σεισμική επικινδυνότητα ή αυτές που είναι παράκτιες ή βρίσκονται κοντά σε δέλτα ποταμών.

Τόσο τα σεισμικά κύματα όσο και τα κύματα που δημιουργούνται από έντονες βροχοπτώσεις, προκαλούν δυναμική φόρτιση, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει ένα λεπτό εδαφικό υλικό σε απώλεια της διατμητικής αντοχής του λόγω υπερβολικής εισχώρησης ύδατος. Ο μηχανισμός φόρτισης στην περίπτωση των σεισμικών κυμάτων βασίζεται σε αρχικές πλευρικές φορτίσεις, σε αντίθεση με την κατακόρυφη φόρτιση που προκαλούν οι έντονες ροές.

Τέλος, η απόκριση του αγωγού επηρεάζεται άμεσα από το μήκος και το πλάτος του πρηνούς και οι μέγιστες εδαφικές δυνάμεις που μπορούν να αναπτυχθούν είναι μικρότερες από αντίστοιχες που εκδηλώνονται σε αγωγούς που βρίσκονται τοποθετημένοι σε τυπικά βάθη χερσαίων πρηνών. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει μια απλοποιημένη γεωμετρία υποθαλάσσιας κατολίσθησης.



Εικόνα 2.5: Απλοποιημένη γεωμετρία μιας υποθαλάσσιας κατολίσθησης (O'Rourke & Liu 2012)

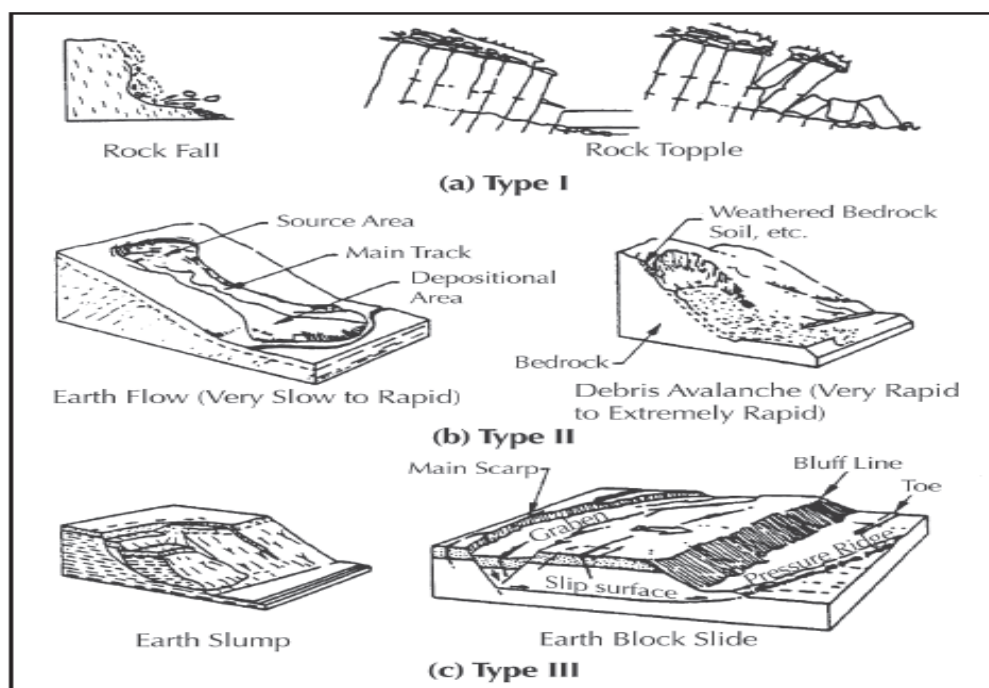
2.2.2. ΧΕΡΣΑΙΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Οι κατολισθήσεις που αναπτύσσονται σε χερσαίο περιβάλλον συνήθως δημιουργούνται από σεισμικά κύματα, βροχοπτώσεις ή κύματα κακοκαιρίας. Οι βασικές κατηγορίες κατολισθήσεων, που βασίζονται στις εδαφικές μετατοπίσεις, στη γεωμετρία του πρηνούς και στον τύπο του εδαφικού υλικού είναι : πτώσεις, ανατροπές, ολισθήσεις, ρευστοποίηση. Μια επόμενη κατηγοριοποίηση, αφορά την επιρροή που έχουν στους αγωγούς (Varnes 1978). Οι τρεις κατηγορίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Τύπος 1: περιλαμβάνει πτώσεις και ανατροπές βράχων. Είναι ικανές να καταστρέψουν επιφανειακούς αγωγούς, ενώ βλάπτουν ελάχιστα τους θαμμένους.

Τύπος 2: περιλαμβάνει ρευστοποίηση εδάφους και επιχώσεων σε μορφή πλημμύρας. Παρουσιάζονται μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις.

Τύπος 3: περιλαμβάνει εδαφικές καταπτώσεις και ολισθήσεις. Το έδαφος κινείται ως συσσωμάτωμα. Αναπτύσσονται συνήθως σε κανάλια, αναχώματα, πρηνή και επηρεάζουν αρκετά τους αγωγούς διότι υπάρχουν στις περιοχές εκδήλωσης του φαινομένου. Στην Εικόνα 2.6 παρουσιάζεται μια κατηγοριοποίηση των κατολισθήσεων.



Εικόνα 2.6: Κατηγοριοποίηση κατολισθήσεων (Meyersohn, 1991)

Δεν είναι απαραίτητο, τα γεγονότα κατολίσθησης που φτάνουν στον αγωγό να προκαλέσουν ρήξη. Η ζημιά αρκετές φορές περιορίζεται σε έκθεση, κάμψη ή λυγισμό. Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι αστοχίας για τον αγωγό, με βάση την εμπειρία της βιομηχανίας (Nyman et al., 2008, Lee et al., 2009, Young and Lockey, 2013). Αυτοί είναι:

1. *Πλευρική και κατακόρυφη μετατόπιση:*

Θραύση του αγωγού ως αποτέλεσμα διαφορικής οριζόντιας ή κατακόρυφης κίνησης του κύριου σώματος κατολισθήσεως, οπισθοδρόμηση προς τα άνω του κύριου άκρου ή αστοχίας των πλευρών. Η πιθανότητα μετατόπισης του αγωγού είναι συνάρτηση του βάθους κατολισθήσεων, της συμπεριφοράς των υλικών, της ταχύτητας κίνησης και της σωρευτικής μετατόπισης που μπορεί να συμβεί με την πάροδο του χρόνου.

2. *Σύνδεση:*

Η θραύση του αγωγού ως αποτέλεσμα της απομάκρυνσης του υποστηρίγματος κατά μήκος ενός σημαντικού μήκους (π.χ. μεγαλύτερο από 30m) εξαιτίας της υποχώρησης του κύριου άκρου κατολισθήσεως (οπισθοδρόμηση ανατροπής) ή της αποτυχίας των πλευρικών εδρών (πλευρική επέκταση). Η πιθανότητα κάλυψης είναι συνάρτηση της κατακόρυφης μετατόπισης της μάζας κατολίσθησης και της υποχώρησης μιας ρωγμής που διαβρώνεται κατά μήκος της ευθυγράμμισης του αγωγού.

3. *Φόρτωση:*

Θραύση του αγωγού λόγω των πιέσεων που προκαλούνται μετά την ταφή, από κατολισθημένο υλικό. Αυτός ο τρόπος αστοχίας εξαρτάται από το βάθος της ταφής και το βάρος του υλικού που ενεργεί πάνω στον αγωγό.

4. *Σύγκρουση:*

Αν ο αγωγός είναι εκτεθειμένος, η ώθηση λόγω της ορμής των ογκόλιθων μπορεί να οδηγήσει σε ρήξη. Σε γενικές γραμμές, οι θαμμένοι αγωγοί είναι λιγότερο ευάλωτοι σε αυτόν τον τρόπο αστοχίας. Δεδομένου ότι πρόκειται για περίπτωση ορμής και ώθησης, το ύψος από το οποίο προήλθε ο ογκόλιθος, δηλαδή η ταχύτητα κρούσης και η μάζα του ογκόλιθου αποτελούν καθοριστικές παραμέτρους.

2.3. ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΕΞΑΠΛΩΣΕΙΣ

Ουσιαστικά πρόκειται για τη ρευστοποίηση στην οποία υπόκειται ένα κορεσμένο αμμώδες εδαφικό υλικό, ύστερα από σεισμική διέγερση. Η αύξηση της πίεσης του νερού στους πόρους του εδαφικού υλικού λόγω της ρευστοποίησης, προκαλεί απώλεια διατμητικής αντοχής στα μη συνεκτικά εδάφη, με αποτέλεσμα να μετακινούνται πλευρικά και σε σπάνιες περιπτώσεις κατακόρυφα. Οι παράγοντες που ευνοούν την ρευστοποίηση είναι συνδυασμός ευαισθησίας τους εδάφους (ανάλογα με τη θέση και την ηλικία έχουμε επίπεδα ρευστοποίησης : μικρό, μεσαίο, μεγάλο), μέγιστης επιτάχυνσης στο σημείο και διορθωτικών συντελεστών. Επίσης, σημαντικοί παράγοντες θεωρούνται και η οριζόντια εδαφική επιτάχυνση στο σημείο, το σεισμικό μέγεθος και το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την πλευρική εξάπλωση είναι :

α) *Μέγεθος εδαφικής παραμόρφωσης*: Επηρεάζει την καταπόνηση του αγωγού. Συνήθως, οι μετατοπίσεις τόσο της βάσης, όσο και του μετώπου κυμαίνονται από 1-2 m και 4-10 m αντίστοιχα.

β) *Χωρική έκταση της ζώνης πλευρικής εξάπλωσης*: Το πλάτος και το μήκος της ζώνης της εδαφικής παραμόρφωσης επηρεάζει τον αγωγό. Οι τιμές τους δίνονται εμπειρικά απο διαγράμματα.

γ) *Πρότυπο (μοτίβο) ζώνης*: Επηρεάζει την απόκριση των υπόγειων αγωγών.

Γενικά, όσον αφορά την απόκριση ενός αγωγού στις πλευρικές εξαπλώσεις, εφαρμόζεται μια οριζόντια δύναμη πάνω και γύρω από τον αγωγό, που προέρχεται από τη ρευστοποίηση του εδάφους, καθώς και δυνάμεις άνωσης και πλευστότητας, όταν το στρώμα που ρευστοποιείται βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους ή μόνο δυνάμεις άνωσης όταν το στρώμα που ρευστοποιείται βρίσκεται κάτω από τον αγωγό.

3. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΑΓΩΓΟΥ- ΕΔΑΦΙΚΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ

Η κίνηση του εδάφους λόγω φαινομένων διάδοσης σεισμικών κυμάτων ή άλλων γεωκινδύνων συμβάλει στην ανάπτυξη ορθών δυνάμεων και δυνάμεων τριβής στη διεπιφάνεια του αγωγού με το έδαφος, που φορτίζουν τον αγωγό. Κάθε δύναμη- παραμόρφωση αναπαρίσταται με ανεξάρτητο εδαφικό ελατήριο. Για λόγους ανάλυσης, η εδαφική παραμόρφωση μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες: Μια διαμήκης, κατά την οποία η κίνηση του εδάφους πραγματοποιείται παράλληλα με τον άξονα του αγωγού και μια εγκάρσια, στην οποία η κίνηση του εδάφους εκδηλώνεται κάθετα στον άξονα του αγωγού. Στη συνέχεια η εγκάρσια συνιστώσα, διαχωρίζεται περαιτέρω σε εγκάρσια-κάθετη και εγκάρσια-οριζόντια. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εγκάρσια κάθετη συνιστώσα, η οποία παρουσιάζει την ανάγκη περαιτέρω ανάλυσης. Διαχωρίζεται σε προς τα άνω και προς τα κάτω συνιστώσα και αναπαρίσταται με διαφορετικό εδαφικό ελατήριο, καθώς παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις στις δυο περιπτώσεις.

Στην συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί αναλυτική αναφορά τόσο σε χερσαίους όσο και σε υποθαλάσσιους αγωγούς και θα παρατεθούν οι αναλυτικές σχέσεις που δίνουν τις τιμές των διαμήκων και εγκάρσιων δυνάμεων.

3.1 ΧΕΡΣΑΙΟΙ ΑΓΩΓΟΙ

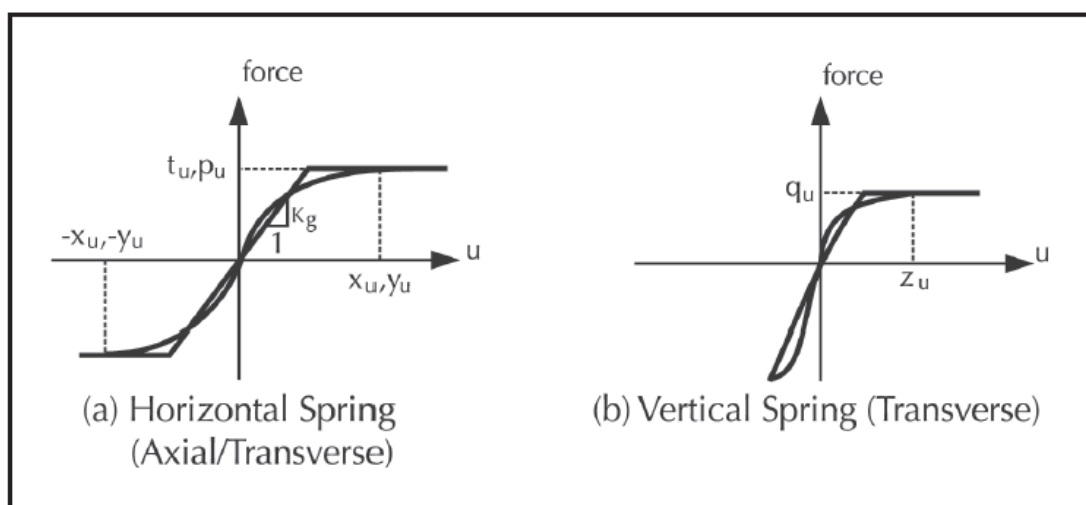
Ο χερσαίος αγωγός, γνωστός και ως onshore pipeline στην αγγλική ορολογία, αποτελεί ένα μέσο μεταφοράς πετρελαίου, φυσικού αερίου, νερού ή αποβλήτων. Υπάρχουν δύο είδη αγωγών, όσον αφορά τη σεισμική απόκριση και τη σχεδίασή τους, και διαχωρίζονται ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους. Οι συνεχείς αγωγοί, είναι από χάλυβα και διαθέτουν συγκολλημένες συνδέσεις, συγκολλημένες αρθρώσεις ή βιδωτές φλάτζες. Μπορούν να σπάσουν κατά τον εφελκυσμό ή να καμφθούν κατά τη θλίψη αλλά είναι ανθεκτικοί στα σεισμικά κύματα. Οι κατακεραματισμένοι αγωγοί δημιουργούνται από σκυρόδεμα ή ασβεστομένο τσιμέντο και διαθέτουν συνδέσεις φλάτζας. Είναι ευάλωτοι στα σεισμικά κύματα και στους γεωκινδύνους, μιάς και τα σεισμικά κύματα θλίβουν τις συνδέσεις τους. Οι χερσαίοι αγωγοί, τοποθετούνται κάτω από την επιφάνεια

του εδάφους μέσα σε τάφρους, ώστε να εξυπηρετεί η χρήση τους και να αποφεύγονται οι φθορές, μπορεί όμως να εντοπισθούν σε μη κατοικημένες περιοχές και πάνω στην επιφάνεια του εδάφους.

Για τον προσδιορισμό των διαμήκων και εγκάρσιων δυνάμεων που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια εδάφους και αγωγού παραθέτονται αναλυτικές σχέσεις σύμφωνα με την θεωρία του O'Rourke & Liu, καθώς και από τον διεθνή κανονισμό ALA, που όπως θα διαπιστωθεί δεν παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις.

3.1.1. O'ROURKE & LIU (2012)

Οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός χερσαίου αγωγού, θαμμένου σε μη ρευστοποιημένο έδαφος, και του εδάφους που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια είναι συνδυαστικό αποτέλεσμα εργαστηριακών πειραμάτων και αναλυτικών θεωριών. Για τις ανάγκες της ανάλυσης προτάθηκε η χρήση εξιδανικευμένου ελαστοπλαστικού μοντέλου, που προσδιορίζεται από δύο παραμέτρους: την μέγιστη αντίσταση t_u , p_u , q_u σε αξονική, πλευρική και κάθετη διεύθυνση και τις αντίστοιχες μέγιστες μετατοπίσεις x_u , y_u , z_u (βλ. Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1 : Σχέση φορτίου- μετακίνησης στην αλληλεπίδραση αγωγού και εδάφους (O'Rourke & Liu 2012)

3.1.1.1. ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗ

Πρόκειται για κίνηση παράλληλη με τον άξονα του αγωγού. Σε μη συνεκτικά υλικά, όπως είναι η άμμος, η διαμήκης αντίσταση οφείλεται στην τριβή που αναπτύσσεται κατά τη διεύθυνση του άξονα του αγωγού με το έδαφος. Η ορθή τάση που οδηγεί σε αξονική τριβή, προέρχεται από το βάρος και από πλευρικές εδαφικές πιέσεις και η τιμή της λαμβάνεται ως ο μέσος όρος αυτών των κάθετων και πλευρικών πιέσεων. Η αναλυτική σχέση που δίνει την τιμή αυτή και την αντίστοιχη μετατόπιση παρουσιάζονται παρακάτω.

$$t_u = \pi D \gamma H \left(\frac{1+k_0}{2} \right) \tan(k\phi) \quad (3.1)$$

$$x_u = 0.1 - 0.2 \text{ in} = 2.5 - 5 \text{ mm} \quad (3.2)$$

όπου D είναι η διάμετρος του αγωγού, γ το ειδικό βάρος του εδάφους, H το βάθος έως το κέντρο του αγωγού, K₀ ο συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία και k ο συντελεστής που δίνεται από τον παρακάτω πίνακα ανάλογα με το υλικό.

Πίνακας 3.1: Συντελεστής k για την μέγιστη αντίσταση μη συνεκτικού υλικού κατά την οριζόντια διεύθυνση (ASCE-ALA 2001)

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

Για την άργιλο και τα υπόλοιπα συνεκτικά υλικά ($\phi=0^\circ$), η διαμήκης αντίσταση ανά μονάδα μήκους και η αντίστοιχη ελαστική παραμόρφωση δίνονται αντίστοιχα από τους παρακάτω τύπους στην περίπτωση αστράγγιστων συνθηκών:

$$t_u = \pi D \alpha S_u \quad (3.3)$$

$$x_u = 0.2 - 0.4 \text{ in} = 5 - 10 \text{ mm} \quad (3.4)$$

όπου D η διάμετρος του αγωγού, S_u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή και α ο συντελεστής προσκόλλησης που δίνεται από την εξίσωση:

$$\alpha = 0.608 - 0.123c - \frac{0.274}{c^{2+1}} + \frac{0.697}{c^{3+1}}$$

Στην περίπτωση στραγγισμένων συνθηκών όπου ένα αργιλικό υλικό έχει τόσο γωνία εσωτερικής τριβής ($\phi \neq 0^\circ$) όσο και συνοχή (c), τότε η μέγιστη αξονική αντίσταση δίνεται από το άθροισμα των σχέσεων 3.1 και 3.3 (όπου το S_u αντικαθίσταται από το c).

3.1.1.2. ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΚΙΝΗΣΗ

Η εγκάρσια οριζόντια κίνηση στη διεπιφάνεια αγωγού και εδάφους δημιουργείται από τη σχετική κίνηση κάθετα στον άξονα του αγωγού, στο οριζόντιο επίπεδο. Η μέγιστη πλευρική δύναμη για αγωγό θαμμένο σε μεγάλο βάθος και σε μη-συνεκτικό υλικό δίνεται από τη σχέση:

$$F_{\max} = p_u = 4\mu\gamma HD + \gamma HD (1+k_p)(1+\mu) - 1.12\gamma HD(1+k_a)(0.44-0.89\mu) \quad (3.5)$$

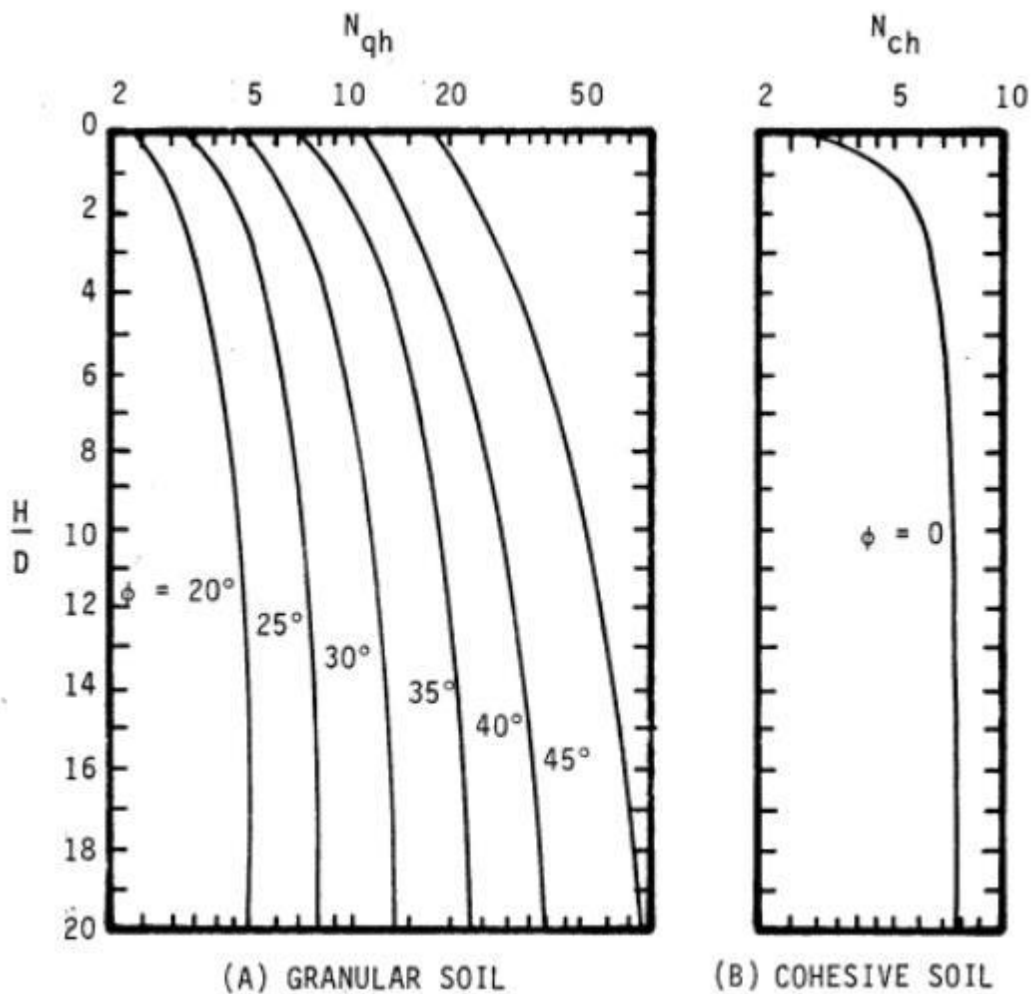
όπου, k_a , k_p οι συντελεστές πλευρικής ώθησης για ενεργητικές και παθητικές συνθήκες αντίστοιχα.

Η σχέση που συνήθως χρησιμοποιείται και που προτείνεται από τον κανονισμό ALA της ASCE για την μέγιστη πλευρική αντίσταση και την αντίστοιχη μετατόπιση, για μη συνεκτικό υλικό είναι:

$$P_u = \gamma H N_{qh} D \quad (3.6)$$

$$y_u = \begin{cases} (0.07 - 0.10) \left(H + \frac{D}{2} \right) & \text{χαλαρή άμμος} \\ (0.03 - 0.05) \left(H + \frac{D}{2} \right) & \text{μέτρια άμμος} \\ (0.02 - 0.03) \left(H + \frac{D}{2} \right) & \text{πυκνή άμμος} \end{cases} \quad (3.7)$$

όπου N_{qh} ο συντελεστής φέρουσας οριζόντιας ικανότητας για την άμμο. Η τιμή του δίνεται από το παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2 : Εγκάρσια φέρουσα ικανότητα για άμμο και άργιλο (ASCE-ALA)

Οι αντίστοιχες σχέσεις για συνεκτικά υλικά υπό αστράγγιστες συνθήκες και με μηδενική γωνία εσωτερικής τριβής ($\phi=0^\circ$), παρουσιάζονται παρακάτω:

$$P_u = S_u N_{ch} D \quad (3.8)$$

$$Y_u = (0.03 - 0.05) \left(H + \frac{D}{2} \right) \quad (3.9)$$

όπου, N_{ch} ο συντελεστής φέρουσας οριζόντιας ικανότητας για άργιλο, ο οποίος δίνεται από το παραπάνω διάγραμμα.

Ένας άλλος τρόπος να υπολογισθούν οι τιμές των N_{ch} και N_{qh} είναι από τις ακόλουθες σχέσεις : $N_{ch} = a + bx + c/(x+1)^2 + d/(x+1)^3 \leq 9$ και $N_{qh} = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$ με τους συντελεστές a, b, c, d, e να δίνονται από πίνακα.

Πίνακας 3.2 : Συντελεστές για την οριζόντια φέρουσα ικανότητα (ASCE-ALA 2001)

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

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

3.1.1.3. ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΚΑΘΕΤΗ ΚΙΝΗΣΗ – ΠΡΟΣ ΤΑ ΠΑΝΩ

Η σχετική προς τα πάνω κίνηση, κάθετα στο άξονα του αγωγού, προκαλεί κατακόρυφες δυνάμεις στη διεπιφάνεια αγωγού-εδάφους. Ο κανονισμός ALA της ASCE προτείνει για την άμμο και τα υπόλοιπα μη-συνεκτικά υλικά τους παρακάτω τύπους όπως προέκυψαν έπειτα από εργαστηριακά πειράματα και θεωρητικά μοντέλα.

$$q_u = \gamma H N_{qv} D \quad (3.10)$$

$$z_u = (0.01 - 0.015) H \leq D/10 \quad (3.11)$$

όπου $N_{qv} = \frac{\varphi H}{44D} \leq N_q$, ο συντελεστής κατακόρυφης ανύψωσης για την άμμο (0 για $\varphi=0^\circ$).

Για τα συνεκτικά υλικά, όπως η άργιλος, η κάθετη δύναμη και η ελαστική παραμόρφωση δίνονται από τους τύπους:

$$q_u = S_u N_{cv} D \quad (3.12)$$

$$z_u = (0.1-0.2) H \leq D/5 \quad (3.13)$$

όπου, $N_{cv} = 2 \frac{H}{D} \leq 10$, ο συντελεστής κατακόρυφης ανύψωσης για την άργιλο (0 για $c=0$).

3.1.1.4. ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΚΑΘΕΤΗ ΚΙΝΗΣΗ – ΠΡΟΣ ΤΑ ΚΑΤΩ

Πρόκειται για τη σχετική προς κάτω κίνηση, η οποία είναι κάθετη στον άξονα του αγωγού και δημιουργεί κατακόρυφες δυνάμεις στη διεπιφάνεια αγωγού και εδάφους. Αντιστοιχεί στην κάθετη φέρουσα ικανότητα της βάσης. Για την άμμο και τα υπόλοιπα μη-συνεκτικά υλικά δίνονται οι σχέσεις:

$$q_u = \gamma H N_q D + 1/2 \gamma D^2 N_\gamma \quad (3.14)$$

$$z_u = (0.10-0.15) D \quad (3.15)$$

Ενώ για την άργιλο και τα υπόλοιπα υλικά με μηδενική γωνία εσωτερικής τριβής, σε αστράγγιστες συνθήκες ισχύει:

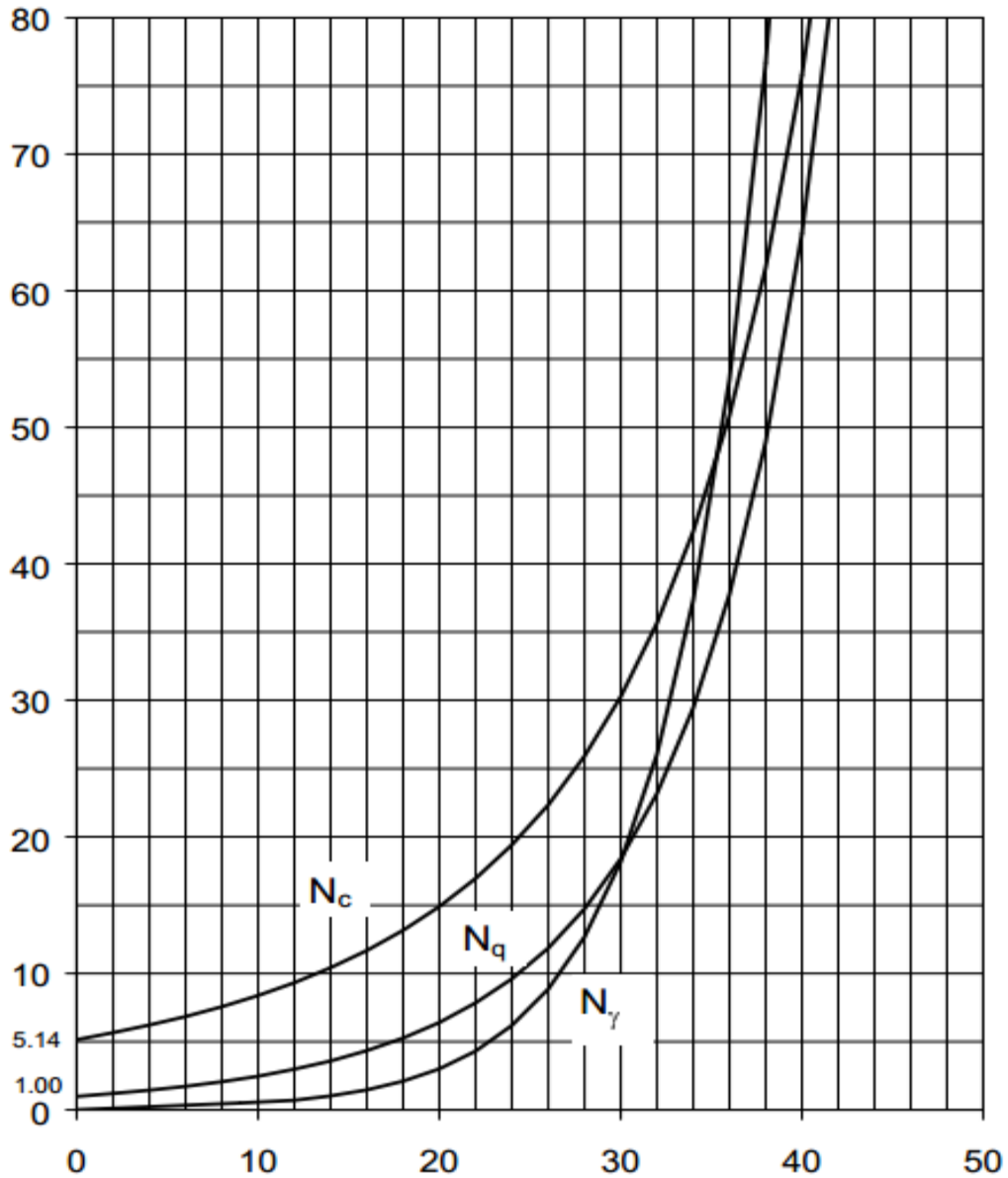
$$q_u = S_u N_c D \quad (3.16)$$

$$z_u = (0.10-0.15) D \quad (3.17)$$

όπου, γ το ειδικό βάρος του εδάφους και N_c , N_q , N_γ οι συντελεστές φέρουσας ικανότητας εδάφους που οι τιμές τους δίνονται από τους ακόλουθους τύπους.

$$\left\{ \begin{array}{l} N_c = [\cot(\varphi + 0.001)] \{ \exp[\pi \tan(\varphi + 0.001)] \tan^2 (45 + \frac{\varphi + 0.001}{2}) - 1 \} \\ N_q = \exp(\pi \tan \varphi) \tan^2 (45 + \frac{\varphi}{2}) \\ N_\gamma = e (0.18 \varphi - 2.5) \end{array} \right. \quad (3.18)$$

Οι τιμές των παραπάνω συντελεστών μπορούν να υπολογισθούν και από το ακόλουθο διάγραμμα.



Εικόνα 3.3: Τιμές των συντελεστών φέρουσας ικανότητας του εδάφους N_c , N_q , N_γ (ASCE-ALA 2001)

3.1.2. AMERICAN LIFELINES ALLIANCE (A.L.A)

Ο συγκεκριμένος κανονισμός αναφέρει ότι οι αγωγοί καταπονούνται από εδαφικές φορτίσεις, οι οποίες αναπαρίστανται από διακεκριμένα μη γραμμικά εδαφικά ελατήρια. Οι ιδιότητες εδαφικής απορροής είναι κατάλληλες για τον υπολογισμό των οριζόντιων και κατακόρυφων εδαφικών δυνάμεων, όταν έχει ελεγχθεί ότι η κίνηση του αγωγού δεν επηρεάζεται από το εδαφικό υλικό που βρίσκεται εκτός της τάφρου. Οι αγωγοί που είναι τοποθετημένοι στη στεριά, παρουσιάζουν σταδιακή αύξηση στις τιμές των οριζόντιων εδαφικών δυνάμεων που δέχονται, καθώς μεγαλώνει η μετατόπιση, γεγονός που οφείλεται στο σχηματισμό εδαφικού αναχώματος μπροστά από τον αγωγό. Οι μέγιστες τιμές ελατηρίων και οι αντίστοιχες μετατοπίσεις, υπολογίζονται από καθορισμένο τυπολόγιο, το οποίο έχει προκύψει έπειτα από γεωτεχνικές μελέτες και εργαστηριακά πειράματα και παρουσιάζεται στη συνέχεια.

3.1.2.1. ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΕΔΑΦΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ

Η μέγιστη αξονική εδαφική δύναμη που μεταδίδεται στον αγωγό ανα μονάδα μήκους είναι:

$$T_u = \pi D a c + \pi D H \gamma (1 + K_0) / 2 \tan \delta \quad (3.19)$$

$$\Delta t = \begin{cases} 0.2 \text{ in} = 5 \text{ mm} \text{ χαλαρή άμμος} \\ 0.1 \text{ in} = 3 \text{ mm} \text{ πυκνή άμμος} \\ 0.3 \text{ in} = 8 \text{ mm} \text{ σκληρή άργιλο} \\ 0.4 \text{ in} = 10 \text{ mm} \text{ μαλακή άργιλο} \end{cases} \quad (3.20)$$

όπου, D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού, c η συνοχή του εδάφους, H το βάθος ως το κέντρο του αγωγού, K_0 ο συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία, a ο παράγοντας προσκόλλησης που δίνεται από τον τύπο $a = 0.608 - 0.123c - \frac{0.274}{c^2+1} + \frac{0.697}{c^3+1}$ και $\delta = f\phi$ η γωνία μεταξύ εδάφους και αγωγού, όπου το f είναι συντελεστής που σχετίζεται με το υλικό της εξωτερικής επένδυσης και δίνεται από τον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 3.2 : Συντελεστής f ανάλογα με το υλικό της επένδυσης (ASCE-ALA 2001)

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

3.1.2.2. ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΕΔΑΦΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ

Η μέγιστη πλευρική δύναμη που καταπονεί τον αγωγό δίνεται :

$$P_u = N_{ch}cD + N_{gh}\gamma HD \quad (3.21)$$

$$\Delta P = 0.04 (H + D/2) \leq 0.10D - 0.15D \quad (3.22)$$

όπου, N_{ch} συντελεστής φέρουσας οριζόντιας ικανότητας για άργιλο (0 για $c=0$), N_{gh} συντελεστής φέρουσας οριζόντιας ικανότητας (0 για $\phi=0$). Δίνονται από σχέσεις που έχουν διατυπωθεί προηγουμένως και οι συντελεστές τους από τον Πίνακα 3.2 ή εναλλακτικά από την Εικόνα 3.2.

3.1.2.3. ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΔΥΝΑΜΗ (ΑΝΥΨΩΣΗΣ)

Οι εξισώσεις που καθορίζουν τις προς τα άνω δυνάμεις καθορίζονται από μικρής κλίμακας εργαστηριακές μελέτες και απευθύνονται σε προβλήματα όπου ο αγωγός είναι θαμμένος σε σχετικά μικρά βάθη, όπως εκφράζεται από τον λόγο H/D . Σε συνθήκες που το συγκεκριμένο πηλίκιο έχει μεγαλύτερη τιμή από το αποδεκτό όριο που έχει ορισθεί, τότε απαιτείται να διεξαχθεί γεωτεχνική μελέτη για τον προσδιορισμό της τιμής της ζητούμενης δύναμης και της αντίστοιχης μετατόπισης. Η μέγιστη εδαφική δύναμη δίνεται από τον καθορισμένο τύπο:

$$Q_u = N_{cv}cD + N_{qv}\gamma HD \quad (3.23)$$

$$\Delta_{qu} = \begin{cases} 0.01H - 0.02H & \text{για πυκνή έως χαλαρή άμμο} \\ 0.1H - 0.2H & \text{για σκληρή έως μαλακή άργιλο} \end{cases} \quad (3.24)$$

όπου, N_{cv} παράγοντας κατακόρυφης ανύψωσης για άργιλο, N_{qv} παράγοντας κατακόρυφης ανύψωσης για άμμο και δίνονται από τις σχέσεις:

$$N_{cv} = 2(H/D) \leq 10 \text{ εφαρμόζεται για } H/D \leq 10, N_{qv} = \phi H / 44D \leq N_q.$$

3.1.2.4. ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΔΥΝΑΜΗ (ΑΝΑΧΩΣΗΣ)

Η μέγιστη εδαφική κατακόρυφη προς τα κάτω δύναμη και η αντίστοιχη μετακίνηση προσδιορίζονται από τις σχέσεις:

$$Q_d = N_c c D + N_q \gamma H D + N_\gamma \gamma D^2 / 2 \quad (3.25)$$

$$\Delta_{qd} = \begin{cases} 0.1D & \text{για κοκκώδες έδαφος} \\ 0.2D & \text{για συνεκτικό έδαφος} \end{cases} \quad (3.26)$$

όπου, N_c , N_q , N_γ οι συντελεστές φέρουσας ικανότητας που δίνονται από τις εξισώσεις 3.18 ή εναλλακτικά μπορούν να προσδιορισθούν από την Εικόνα 3.3.

3.2 ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΑΓΩΓΟΙ

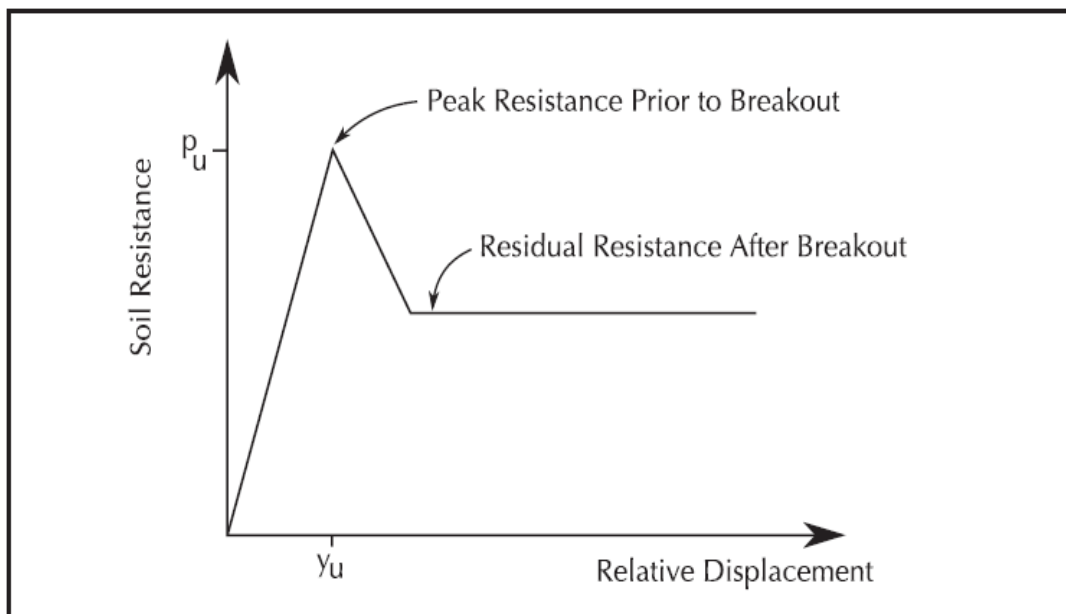
Στους υποθαλάσσιους αγωγούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαθηματικοί τύποι, που έχουν ήδη διατυπωθεί στην ενότητα 3.1, για να καθοριστούν οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ αγωγού και εδάφους. Συγκεκριμένα, για αγωγούς που περικλύονται από άμμο πρέπει να χρησιμοποιείται η ενεργή πυκνότητα του εδάφους, ενώ για αγωγούς που περικλύονται από άργιλο η αστράγγιστη διατμητική αντοχή. Η εναπόθεση των αγωγών πραγματοποιείται σε μεγάλα βάθη στην επιφάνεια του βυθού, συχνά όμως λόγω διαβρώσεων από θαλάσσια ρεύματα και κύματα, τμήματα μαλακού εδαφικού υλικού, όπως άμμος και μαλακή άργιλος, αποκολλούνται με αποτέλεσμα να καλύπτουν μέρος του αγωγού. Στη συνέχεια θα διατυπωθούν τα ισοδύναμα εδαφικά ελατήρια σε αγωγούς που είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του βυθού.

3.2.1 ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ

Η ενσωμάτωση του αγωγού στο θαλάσσιο πυθμένα εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων. Θεωρείται συνήθως πως καθοριστικό λόγο στην ενσωμάτωσή του κατέχει το βυθισμένο βάρος του αγωγού, όπως και η σκληρότητα των ιζημάτων του βυθού. Όμως, στην πραγματικότητα, οι τιμές ενσωμάτωσης υπολογίζονται μέσω στατιστικών μοντέλων, διότι καθίσταται δύσκολος ο υπολογισμός των τιμών ενσωμάτωσης του αγωγού μέσω θεωρητικών σχέσεων, λόγω των ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών και των συνθηκών που επικρατούν κατά την τοποθέτηση του. Συγκεκριμένα, οι μέγιστες τιμές κατακόρυφου φορτίου που δέχεται ο αγωγός από τον πυθμένα στον οποίο έχει τοποθετηθεί είναι δύο με τρεις φορές μεγαλύτερες από το βυθισμένο βάρος του. Επίσης, λόγω της δυναμικής κίνησης του αγωγού, συμπεριλαμβανομένων και των πλευρικών ταλαντώσεων, συνήθως αναπτύσσονται και ανακυκλικές φορτίσεις στη διεπιφάνεια με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ενσωμάτωση του αγωγού στον πυθμένα.

Στην περίπτωση των θαμένων αγωγών στον πυθμένα της θάλασσας, η εδαφική αντίσταση που αναπτύσσεται λόγω της πλευρικής κίνησης μεταξύ πυθμένα και αγωγού είναι αυξητική συνάρτηση της κίνησης του αγωγού. Το σημείο θραύσης μεταξύ αγωγού και πυθμένα προέρχεται από την ψευδο-τάφρο στην οποία έχει τοποθετηθεί ο αγωγός και έχει ως

αποτέλεσμα τη μείωση της εδαφικής αντίστασης έως και στο μισό της μέγιστης τιμής. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3.4) επισυνάπτεται διαγραμματική αναπαράσταση της μεταβολής της πλευρικής αντίστασης λόγω του σημείου θραύσης.



Εικόνα 3.4: Μεταβολή της πλευρικής αντίστασης λόγω του σημείου θραύσης (O'Rourke & Liu 2012)

3.2.2 Ο'ROURKE & LIU

3.2.2.1 ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗ

Για αγωγούς που βρίσκονται πάνω σε αμμώδη πυθμένα ή σε σκληρό πυθμένα, όπως στιφρή άργιλο, τσιμεντοποιημένη άμμο, κοράλια ή πέτρες και η ενσωμάτωση του αγωγού σε αυτόν είναι αμελητέα, τότε η αξονική εδαφική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$t_u = w_s \tan k \varphi \quad (3.27)$$

$$x_u = \begin{cases} 0.002m & \text{σκληρός βυθός} \\ 0.005m & \text{αμμώδης βυθός} \end{cases} \quad (3.28)$$

όπου , w_s το βυθισμένο βάρος του αγωγού ανά μονάδα μήκους, $\tan k \varphi$ ο συντελεστής τριβής μεταξύ αγωγού και βυθού, και k μειωτικός συντελεστής

τριβής που δίνεται απο τον Πίνακα 3.1. Σε περιπτώσεις σκληρού πυθμένα, η γωνία ϕ κυμαίνεται μεταξύ 40°-45°.

Η διαμήκης κίνηση εκδηλώνεται παράλληλα με την ψευδοτάφρο με αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται σημείο θραύσης και η μέγιστη εδαφική αντίσταση να παραμένει σχετικά σταθερή για σχετική μετακίνηση μεγαλύτερη της x_u .

3.2.2.2 Οριζόντια εγκάρσια κίνηση

Η αρχική πλευρική ή οριζόντια εγκάρσια αντίσταση ενός αγωγού, που βρίσκεται πάνω σε αμμώδη πυθμένα, αποτελείται από μια συνιστώσα τριβής και από μια συνιστώσα παθητικής εδαφικής αντίστασης. Η αρχική συνολική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$p_u = \tan(k\phi)w_s + (4.5 - 0.11 \frac{\gamma D^2}{w_s}) (\gamma D^2) (\frac{z}{D})^{1.25} \quad (3.29)$$

$$y_u = 0.2D - 0.5D \quad (3.30)$$

όπου, ο δεύτερος όρος στη σχέση είναι η παθητική εδαφική αντίσταση λόγω της ενσωμάτωσης του αγωγού στην ψευδοτάφρο.

Στην περίπτωση του αργιλικού πυθμένα, η οριζόντια εγκάρσια αντίσταση, λαμβάνοντας επίσης υπόψιν τόσο την τριβή όσο και την παθητική εδαφική αντίσταση, προκύπτει από τη σχέση:

$$p_u = 0.2w_s + 3z \sqrt{(DSu\gamma)} \quad (3.31)$$

$$y_u = 0.1D \quad (3.32)$$

όπου, γ είναι το ειδικό βάρος του εδάφους του πυθμένα (πυκνότητα του κορεσμένου εδάφους μείον πυκνότητα του θαλασσινού νερού).

3.2.2.3 Εγκάρσια κάθετη κίνηση- προς τα πάνω

Για υποθαλάσσιο αγωγό που είναι τοποθετημένος απευθείας πάνω σε αμμώδη ή σκληρό πυθμένα, δεν υπάρχει εδαφικό υλικό πάνω από τον αγωγό για να

αντισταθεί στην κατακόρυφη κίνηση. Ο αγωγός θα τείνει να κινηθεί προς τα πάνω, εξαιτίας μίας δύναμης, που είναι ίση με το βυθισμένο βάρος του αγωγού. Ο αγωγός που έχει τοποθετηθεί σε αργιλικό πυθμένα, η σχέση που δίνει την αρχική αντίσταση που θα προκαλέσει τη θραύση, πρέπει να λαμβάνει υπόψη την πρόσφυση στη διεπιφάνεια αγωγού-εδάφους. Επομένως, η κατακόρυφη αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$q_u = w_s + \alpha S_u D \sin \theta \quad (3.33)$$

όπου, $\theta = \cos^{-1}(1 - 2z/D) \leq 90^\circ$. Στην περίπτωση που το σημείο θραύσης εκδηλωθεί σε απόσταση 0.002 m, τότε η μόνη αντίσταση που θα εμφανίσει ο αγωγός έναντι στην κατακόρυφη προς τα πάνω κίνηση, είναι το βυθισμένο βάρος του.

3.2.2.4 Εγκάρσια κάθετη κίνηση- προς τα κάτω

Ο αγωγός που τοποθετείται σε σκληρό πυθμένα, αναπτύσσει μεγάλη αντίσταση στην κίνηση προς τα κάτω και κίνηση μερικών χιλιοστών. Στην περίπτωση αμμώδους εδαφικού υλικού, η εγκάρσια κάθετη αντίσταση δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$q_u = \frac{1}{2} \gamma N_y B^2 \quad (3.34)$$

όπου, $B = D \sin \theta$ το πλάτος επαφής του αγωγού που εξαρτάται από την ενσωμάτωση του αγωγού.

Για αργιλώδες εδαφικό υλικό χρησιμοποιήθηκαν αρκετοί μαθηματικοί τύποι, με παρόμοια αποτελέσματα. Ένας πιθανός τύπος προς χρήση είναι ο παρακάτω που έχει διατυπωθεί και για χερσαίους αγωγούς. Η εφαρμογή του και σε περιπτώσεις υποθαλάσσιων αγωγών είναι δυνατή διότι στην προς τα κάτω κίνηση δεν εκδηλώνεται σημείο θραύσης.

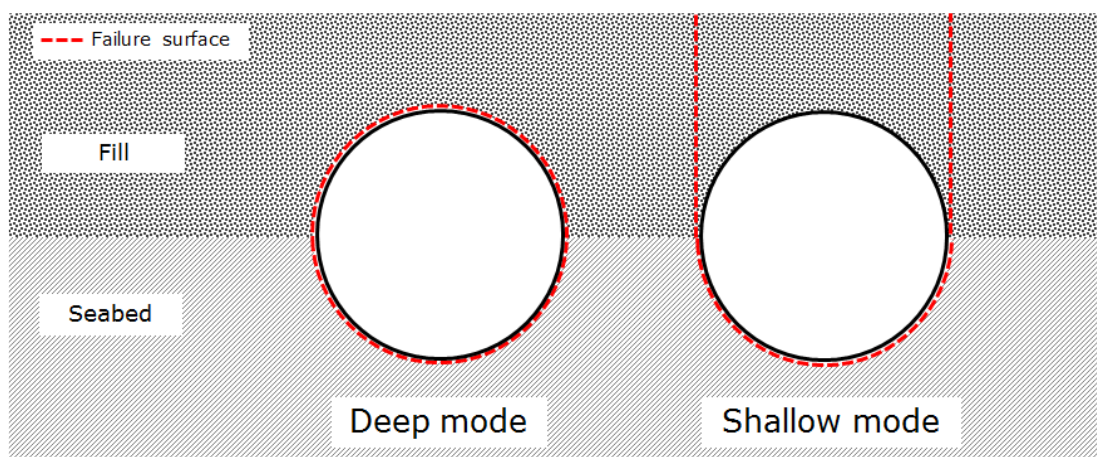
$$q_u = S_u N_c D \quad (3.35)$$

3.2.3 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ DNV· GL

Στον κανονισμό της DNV·GL παραθέτονται προτάσεις για τον σχεδιασμό θαμένων υποθαλάσσιων αγωγών. Τόσο οι θαμένοι όσο και οι επιφανειακοί αγωγοί σχεδιάζονται ώστε να παραμένουν στο σημείο που τοποθετήθηκαν. Για αυτό το λόγο, ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στην αλληλεπίδρασή τους με το έδαφος, ώστε να εξετασθεί η συμπεριφορά τους πριν το σημείο θραύσης. Οι εδαφικές συνθήκες, η μέθοδος τοποθέτησης του αγωγού στην τάφρο, καθώς και οι οριακές συνθήκες γύρω από τον αγωγό, αποτελούν κάποιες από τις παραμέτρους που πρέπει να ελέγχονται πριν τον σχεδιασμό.

3.2.3.1 Αξονική αλληλεπίδραση αγωγού-εδάφους

Η αξονική αντίσταση ενός θαμένου αγωγού μπορεί να προσδιορισθεί με διερεύνηση δύο διαφορετικών μεθόδων αστοχίας, τη βαθιά και τη ρηχή λειτουργία. Η ουσιαστική διαφοροποίηση των δύο μεθόδων είναι εάν το έδαφος, που καλύπτει την πάνω επιφάνεια του αγωγού, ολισθαίνει αξονικά μαζί με τον αγωγό ή εάν η διατμητική αντοχή του υλικού που αναπτύσσεται, είναι ικανή να αποτρέψει την ολίσθηση της εδαφικής μάζας. Οι σχέσεις που παραθέτονται προσδιορίζουν την τιμή της αξονικής αντίστασης τόσο και στις δυο μεθόδους αλλά και σε αστραγγιστες ή στραγγιζόμενες συνθήκες.



Εικόνα 3.5: Αναπαράσταση βαθιάς και ρηχής λειτουργίας (DNV·GL 2017)

Στραγγιζόμενες συνθήκες: Λαμβάνεται η θεώρηση ότι ο αγωγός βρίσκεται θαμένος μεταξύ δυο διαφορετικών εδαφικών στρωμάτων, ένα υλικό που

εντοπίζεται στη βάση του αγωγού και αναπαριστά τον πυθμένα και ένα εδαφικό υλικό που καλύπτει τον αγωγό.

Βαθιά λειτουργία:

$$F_{A,deep,d} = \mu_{seabed} \left[\pi \frac{\gamma'_{fill} D}{4} \left(H + \frac{D}{2} \right) (1 + K_{0,fill}) + \frac{\gamma'_{seabed} D^2}{3} \left(1 + \frac{k_{0,seabed}}{2} \right) + \nu - \frac{(\gamma'_{fill} - \gamma'_{seabed}) \pi D^2}{8} + \mu_{fill} \left[\pi \frac{\gamma'_{fill} D}{4} \left(H + \frac{D}{2} \right) (1 + K_{0,fill}) - \frac{\gamma'_{seabed} D^2}{3} \left(1 + K_{0, \frac{fill}}{2} \right) \right] \right] \quad (3.38)$$

Ρηχή λειτουργία: Για το άνω μισό του αγωγού αντικαθίσταται στον τύπο η κατακόρυφη διατμητική αντίσταση.

$$F_{A,shallow,d} = \mu_{seabed} \left[\pi \frac{\gamma'_{fill} D}{4} \left(H + \frac{D}{2} \right) (1 + K_{0,fill}) + \frac{\gamma'_{seabed} D^2}{3} \left(1 + \frac{k_{0,seabed}}{2} \right) + \nu - \frac{(\gamma'_{fill} - \gamma'_{seabed}) \pi D^2}{8} + \gamma'_{fill} k_{0,fill} \left(H + \frac{D}{2} \right) \tan \phi_{fill} \right] \quad (3.37)$$

όπου, μ_{seabed} , μ_{fill} οι συντελεστές τριβής μεταξύ αγωγού και του αντίστοιχου εδαφικού υλικού, γ'_{seabed} , γ'_{fill} το βυθισμένο βάρος ανά μονάδα μήκους του ανάλογου εδαφικού υλικού αντίστοιχα, H το ύψος καλύμματος πάνω από τον αγωγό, D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού, ν το βυθισμένο βάρος του αγωγού, $k_{0,seabed}$, $k_{0,fill}$ οι συντελεστές πλευρικής ώθησης του αντίστοιχου εδαφικού υλικού, οι οποίοι μπορούν να υπολογισθούν από τον τύπο $1 - \sin \phi$, λαμβάνοντας τη γωνία εσωτερικής τριβής του αντίστοιχου υλικού και τέλος ϕ_{fill} η γωνία εσωτερικής τριβής του επιφανειακού υλικού.

Αστράγγιστες συνθήκες:

Βαθιά λειτουργία:

$$F_{A,deep,u} = \alpha S_{u,reconsolidated} \pi D \quad (3.38)$$

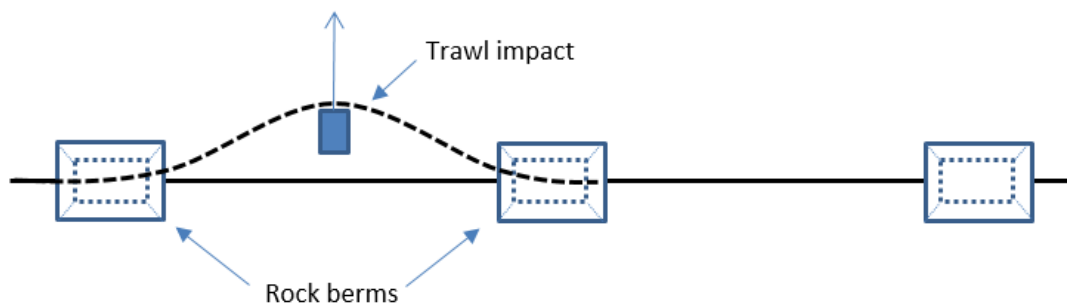
Ρηγή λειτουργία:

$$F_{A,shallow,u} = \alpha S_{u,bottom,reconsolidated} \pi \frac{D}{2} + 2S_{u,backfill,reconsolidated} \left(H + \frac{D}{2} \right) \quad (3.39)$$

όπου, α ο συντελεστής πρόσφυσης ή τραχύτητα εδάφους-αγωγού, $S_{u,reconsolidated}$, $S_{u,bottom,reconsolidated}$, $S_{u,backfill,reconsolidated}$ οι μέσες τιμές της ανασυγκροτημένης διατμητικής αντοχής γύρω και κάτω του αγωγού αντίστοιχα, καθώς και κατά μήκος του επιπέδου του υλικού.

3.2.3.2 Πλευρική αλληλεπίδραση αγωγού-εδάφους

Η πλευρική αντίσταση για ένα θαμένο αγωγό συνήθως δεν αποτελεί τροχοπέδη, εάν είναι τοποθετημένος σε κατάλληλο βάθος μακριά από εξωτερικούς παράγοντες, όπως άγκυρες. Οι επιφανειακοί αγωγοί που είναι περισσότερο εκτεθειμένοι στους εξωγενείς κινδύνους, τοποθετούνται σε προστατευτικούς πέτρινους ογκόλιθους, ώστε να αποφευχθεί η επαφή τους με άγκυρες και τράτες.



Εικόνα 3.6: Αναπαράσταση επιφανειακών αγωγών (DNV·GL 2017)

3.2.3.3 Αντίσταση προς τα πάνω

Στραγγιζόμενες συνθήκες: Έχουν διατυπωθεί αρκετές μέθοδοι που υπολογίζουν την προς τα άνω αντίσταση του αγωγού. Η DNV·GL παραθέτει ότι ανεξάρτητα με τη μέθοδο που θα ληφθεί για τον υπολογισμό της προς τα άνω αντίστασης, σκόπιμο είναι η χαμηλή εκτίμηση της τιμής της να έχει σταθερή απόκλιση από τη μέγιστη τιμή της, της τάξης του 2-5 %.

Επομένως, η τιμή της δίνεται από τον τύπο:

$$F_{\text{uplift,d}} = \gamma'HD + \gamma'D^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{\pi}{8} \right) + k \tan \varphi \gamma' \left(H + \frac{D}{2} \right)^2 \quad (3.40)$$

όπου, k ο πλευρικός συντελεστής εδαφικών ωθήσεων, ο οποίος καταγράφει την αύξηση της κάθετης τάσης κατά την ανύψωση. Στη σχέση μπορεί να γίνει αντικατάσταση με $k \tan \varphi = f$ όπου f είναι ο συντελεστής αντίστασης ανύψωσης και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο ανάλογα με το εδαφικό υλικό.

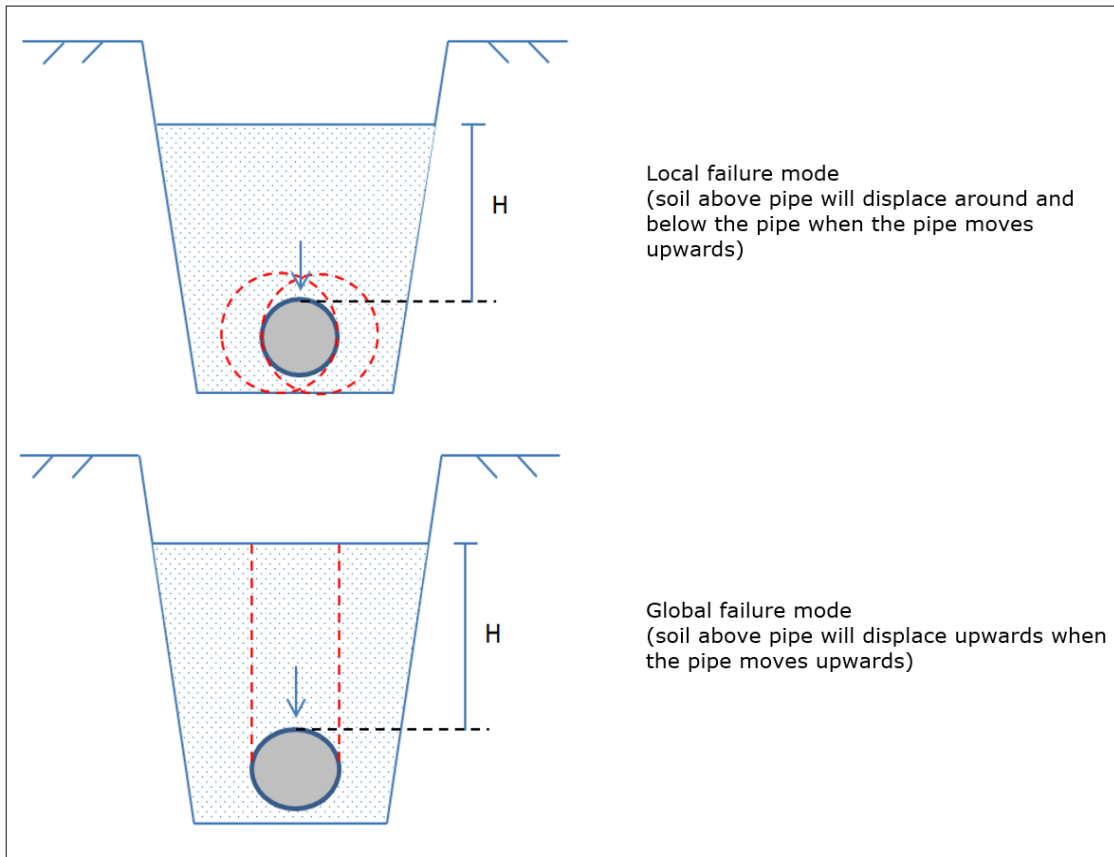
Πίνακας 3.3 : Συντελεστής αντίστασης ανύψωσης f ανάλογα με το εδαφικό υλικό (DNV·GL 2017)

Sand type	$\varphi(^{\circ})$	K model	Roughness r	Best estimate f
Loose	30	K_D	N/A	0.29
Medium	35	K_p	-1.00	0.47
Dense	40	K_p	-0.97	0.62

Εναλλακτικά, μπορεί να υπολογισθεί ο f από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$f_{Le} = \begin{cases} 0.1 & \text{for } \varphi \leq 30 \\ 0.1 + \frac{\varphi - 30}{30} & \text{for } 30 < \varphi \leq 45 \\ 0.6 & \text{for } \varphi > 45 \end{cases} \quad (3.41)$$

Αστράγγιστες συνθήκες: Θεωρείται ότι υπάρχουν δυο μοντέλα αστοχίας που προσομοιώνουν την προς τα πάνω αντίσταση σε αστράγγιστες συνθήκες, μια τοπική και μια γενικευμένη λειτουργία. Η πρώτη λαμβάνει ως δεδομένο ότι το έδαφος πάνω από τον αγωγό θα μετακινηθεί γύρω και κάτω από αυτόν, όταν ο αγωγός κινηθεί προς τα πάνω. Αντίθετα, η γενικευμένη λειτουργία παραθέτει ότι το έδαφος πάνω από τον αγωγό θα μετακινηθεί προς τα πάνω, με την κίνηση του αγωγού προς την ίδια κατεύθυνση. Οι σχέσεις που προτείνονται για τον υπολογισμό της προς τα άνω αντίστασης δίνονται στη συνέχεια.



Εικόνα 3.7: Αναπαράσταση τοπικής και γενικευμένης λειτουργίας (DNV·GL 2017)

Τοπική λειτουργία:

$$F_{\text{uplift,local,u}} = N_c S_u D - \gamma' A_p \quad (3.42)$$

όπου, N_c ο συντελεστής φέρουσας ικανότητας που αντιστοιχεί σε λειτουργία βαθιάς αστοχίας και κυμαίνεται μεταξύ 9 και 12.

Γενικευμένη λειτουργία:

$$F_{\text{uplift,global,u}} = \gamma' H D + \gamma' D^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{\pi}{8} \right) + 2 S_u \left(H + \frac{D}{2} \right) \quad (3.43)$$

Για τη λειτουργία σφάλματος τόσο σε γενικευμένο όσο και σε τοπικό επίπεδο, πρέπει να χρησιμοποιείται η μέση δύναμη διάτμησης στην επιφάνεια αστοχίας. Επομένως, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η λειτουργία αστοχίας, για τη σωστή επιλογή της κατάλληλης μέσης δύναμης διάτμησης. Συνήθως, η μέση δύναμη διάτμησης που θα χρησιμοποιηθεί στις δύο εξισώσεις είναι διαφορετική.

3.2.3.4 Αντίσταση προς τα κάτω

Οι αγωγοί που είναι τοποθετημένοι σε μαλακή άργιλο, μπορεί να λυγίσουν προς τα κάτω αντί για προς τα πάνω, καθώς και να βιώσουν μετατοπίσεις προς τα κάτω που επηρεάζουν την αρχική ευθεία του αγωγού. Η αντίσταση προς τα κάτω μπορεί να υπολογιστεί παρόμοια με τα μοντέλα αντοχής διείδυσης για τους εκτεθειμένους αγωγούς αλλά με βάση την πίεση υπερκείμενου φορτίου και ενδεχομένως θεωρώντας τη βαθιά λειτουργία αστοχίας. Οι σχέσεις που δίνουν την ζητούμενη αντίσταση για αστράγγιστες και στραγγιζόμενες συνθήκες είναι:

Αστράγγιστες συνθήκες: Υπάρχουν διαφορετικά μοντέλα υπολογισμών που είναι διαθέσιμα για τον υπολογισμό της κάθετης αντίστασης σε αστράγγιστες συνθήκες. Ο αγωγός που δέχεται κατακόρυφη πίεση προς το έδαφος, λαμβάνει ως βάθος τοποθέτησης, το βάθος που η δύναμη επαφής του αγωγού βρίσκεται σε ισορροπία με τη φέρουσα ικανότητα του θαλάσσιου πυθμένα. Η κατακόρυφη δύναμη που απαιτείται για τη διείδυση του αγωγού στο βάθος ταφής z είναι:

$$Q_v = \left\{ \min \left[6 \left(\frac{z}{D} \right)^{0.25} ; 3.4 \left(\frac{10z}{D} \right)^{0.5} \right] + 1.5 \frac{\gamma' A_{bm}}{D S_u} \right\} D S_u \quad (3.44)$$

όπου, S_u είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους στην αναστροφή του αγωγού και A_{bm} είναι η περιοχή της εγκάρσιας τομής του αγωγού και δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} A_{bm} &= \arcsin \left(\frac{B}{D} \right) \cdot \frac{D^2}{4} - B \cdot \frac{D}{4} \cos(\arcsin(\frac{B}{D})) \quad \text{για } z < D/2 \\ A_{bm} &= \pi \cdot \frac{D^2}{8} + D \cdot \left(z - \frac{D}{2} \right) \quad \text{για } z \geq D/2 \end{aligned} \quad (3.45)$$

Στραγγιζόμενες συνθήκες: Η κατακόρυφη δύναμη που διεισδύει τον αγωγό για ξηρές συνθήκες είναι:

$$Q_v = 0.5 \cdot \gamma' \cdot N_v \cdot B^2 + z_0 \cdot \gamma' \cdot N_q \cdot d_q \cdot B \quad (3.46)$$

όπου, $N_q = e^{\pi \tan \varphi} \left(\tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) \right)$ $N_v = 1.5 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan \varphi$ ή $N_v = 2(N_q + 1) \tan \varphi$ συντελεστές φέρουσας ικανότητας, B το πλάτος της διεπιφάνειας αγωγού-εδάφους, $d_q = 1 + 1.2 \frac{z_0}{B} \tan \varphi (1 - \sin \varphi)^2$ είναι ένας παράγοντας που υπολογίζει τις επιπτώσεις στο βάθος και z_0 είναι το επίπεδο αναφοράς z για επιπτώσεις βάθους όπου υπολογίζεται από τους ακόλουθους τύπους:

$$Z_0 = \begin{cases} 0 & \text{για } z < \frac{D}{2} \cdot \left[1 - \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \\ z - \frac{D}{2} + \left[\frac{\frac{D}{2}}{\left(\sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \frac{B}{2} \right)} \right] & \text{για } z > \frac{D}{2} \cdot \left[1 - \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \end{cases} \quad (3.47)$$

4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΚΑΙ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παραθέτονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων, όπως προέκυψαν με χρήση του ABAQUS, ενός προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Για κάθε τροποποίηση παράμετρου, εξετάστηκε η απόκριση του αγωγού και για πλήρη κατανόηση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν διαγράμματα αξονικής καταπόνησης (τάσεων και παραμορφώσεων) σε αποστάσεις 60 m δεξιά και αριστερά του ρήγματος. Στη συνέχεια θα παρουσιασθούν αναλυτικά τα εν λόγω διαγράμματα, αφού πρώτα αναλυθεί το προσομοίωμα του αγωγού που χρησιμοποιήθηκε με βάση ένα παράδειγμα του προγράμματος. Να σημειωθεί ότι ο αγωγός εξετάστηκε τόσο σε χερσαίο, όσο και σε υποθαλάσσιο περιβάλλον.

4.1. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΧΕΡΣΑΙΟΥ ΑΓΩΓΟΥ- ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

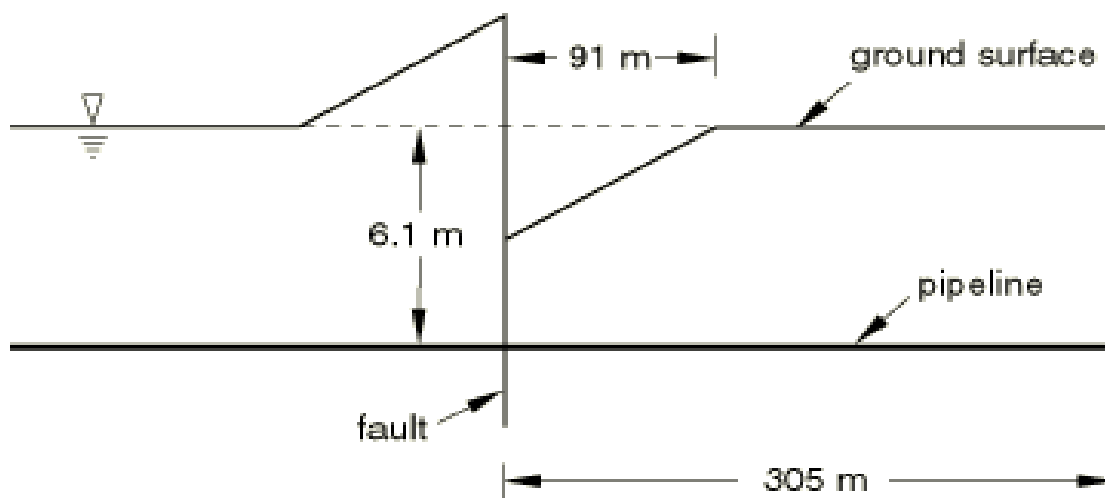
Ο αγωγός που προτείνεται από το προγραμματιστικό περιβάλλον είναι ένας τυπικός αγωγός φτιαγμένος από ελαστικοπλαστικό χάλυβα, με εξωτερική ακτίνα 0.61 m (24.0 in) και πάχος τοιχώματος 0.0254 m (1.0 in). Εξωτερικά ο αγωγός διαθέτει επένδυση σκυροδέματος πάχους 0.11 m (4.3 in) και τέλος καλύπτεται από ένα λεπτό στρώμα πάχους 0.003 m (0.11 in) για προστασία από διαβρωτικούς παράγοντες. Στο Σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το προσομοίωμα του αγωγού που περιγράφηκε, όπου με τον αριθμό 1 συμβολίζεται η επένδυση κατά της διάβρωσης, με 2 το σκυρόδεμα και 3 η εξωτερική επένδυση.



Εικόνα 4.1: Αναπαράσταση προσομιώματος αγωγού (Maliaga A., 2016)

Περεταίρω, ο αγωγός είναι τοποθετημένος σε βάθος 6.1 m (20.0 ft) από την επιφάνεια του εδάφους και διαθέτει μήκος 610 m (2000 ft). Στο πρόγραμμα ο αγωγός αναπαραστάθηκε από 50 πεπερασμένα στοιχεία πρώτης τάξης τύπου PIPE21, ενώ η αλληλεπίδραση του με το έδαφος από πεπερασμένα στοιχεία PSI24.

Όσον αφορά την αλληλεπίδραση του αγωγού με το έδαφος, η τελική δύναμη που δέχεται ανά μονάδα μήκους στην αξονική κατεύθυνση είναι 730 N/m και στην κατακόρυφη 1460 N/m, με αντίστοιχη κατακόρυφη μετατόπιση και στις δυο περιπτώσεις 0.0304 m. Η φόρτιση του αγωγού πραγματοποιήθηκε σε αξονικό-κάθετο επίπεδο, ώστε η οριζόντια εγκάρσια κατεύθυνση να μην επηρεάζει την απόκριση του αγωγού. Η εν λόγω φόρτιση στον αγωγό προκαλείται από σχετική κατακόρυφη μετατόπιση 1.52 m κατά μήκος της γραμμής του ρήγματος. Η επίδραση της κατακόρυφης κίνησης του εδάφους μειώνεται γραμμικά σε απόσταση 91.4 m από την προέλευση του ρήγματος. Τέλος, το ρήγμα αναπαριστάται από άκαμπτα πεπερασμένα στοιχεία R2D2 τα οποία συνδέονται με τις ακμές των στοιχείων PSI, ώστε να δημιουργηθούν δυο άκαμπτες επιφάνειες. Η κίνηση του ρήγματος διαμορφώνεται με την εφαρμογή μιας περιστροφής σε κάθε μια από τις εν λόγω άκαμπτες επιφάνειες, ώστε να επιτυγχάνεται μια θετική κατακόρυφη μετατόπιση 0.76 m στην αριστερή πλευρά και μια αρνητική κατακόρυφη μετατόπιση 0.76 m στη δεξιά. Στη συνέχεια παρουσιάζεται σχηματικά η περιγραφή που πραγματοποιήθηκε για το πρόβλημα.



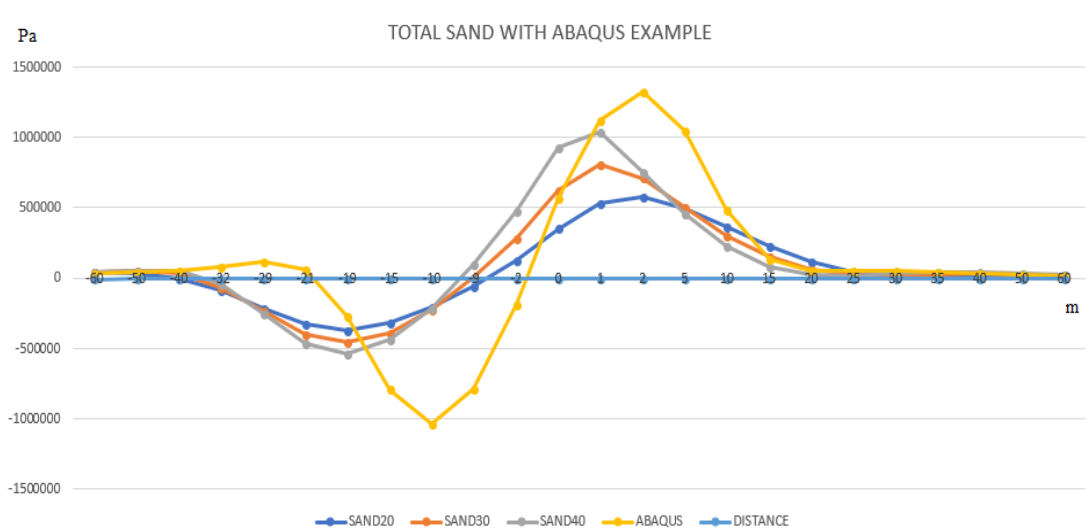
Εικόνα 4.2: Αναπαράσταση αλληλεπίδρασης αγωγού-ρήγματος (Abaqus, Simulia)

4.1.1. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ A.L.A

Στο πρόβλημα που αναπτύχθηκε παραπάνω εξετάστηκε η επίδραση που δημιουργούν τα εδαφικά ελατήρια στην καταπόνηση του αγωγού, για διαφορετικό εδαφικό υλικό. Τελέστηκε παραμετρική ανάλυση θεωρώντας ότι ο αγωγός έχει τοποθετηθεί σε αμμώδες ή αργιλικό έδαφος και πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων. Έπειτα, για τις ίδιες τιμές εδαφικών ελατηρίων πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις αλλάζοντας τις τιμές της εξωτερικής ακτίνας, του πάχους τοιχώματος και της μετακίνησης και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα. Να σημειωθεί ότι οι τιμές των εδαφικών ελατηρίων στο παράδειγμα που λήφθηκε από το ABAQUS, προέκυψαν με χρήση του κανονισμού American Lifelines Alliance (A.L.A), επομένως στις παραμετρικές αναλύσεις για κάθε εδαφικό υλικό, καθώς και στις τις υπόλοιπες αναλύσεις, διατηρήθηκε η χρήση του ίδιου κανονισμού, για τον υπολογισμό των ζητούμενων τιμών. Για λόγους σύγκρισης υπολογίστηκαν οι τιμές των εδαφικών ελατηρίων με χρήση και της θεωρίας των O'Rourke & Liu, χωρίς να παρατηρείται ωστόσο κάποια διαφοροποίηση, καθώς και οι δύο κανονισμοί φαίνεται να συμφωνούν στην περίπτωση των χερσαίων αγωγών.

a) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ-ΑΜΜΟΣ

Οι πρώτες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για τοποθέτηση του αγωγού σε αμμώδες έδαφος, συγκεκριμένα για άμμο με τιμές γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ) $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$. Για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις και με χρήση των κατάλληλων μαθηματικών τύπων, όπως αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, προέκυψαν οι μέγιστες αξονικές, εγκάρσιες και κατακόρυφες (προς τα άνω, προς τα κάτω) δυνάμεις, με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις που δημιουργούν. Τα διαγράμματα αξονικής τάσης και παραμόρφωσης του αγωγού, που παρουσιάζονται στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια υπολογιστικού φύλλου Excel.

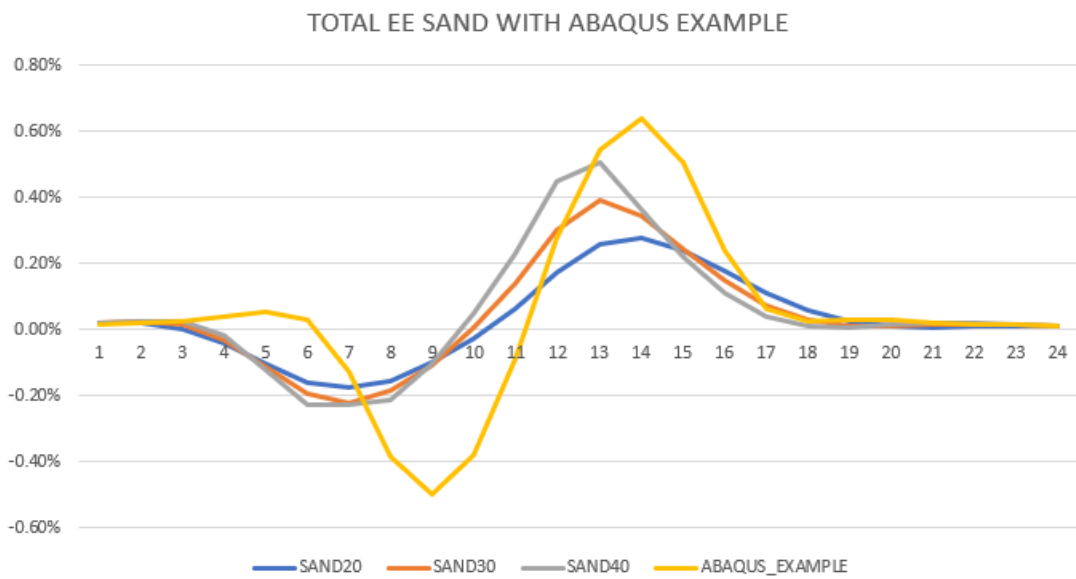


Εικόνα 4.3: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το διάγραμμα της Εικόνας 4.3 είναι ότι η αύξηση της τιμής της γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ) έχει ως αποτέλεσμα η αξονική τάση να παίρνει τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές της. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή της αξονικής τάσης (για $\phi=40^\circ$) είναι $S_{11}= 1042965.313$ Pa και εκδηλώνεται σε οριζόντια απόσταση 1 m από το υψηλότερο σημείο του ρήγματος. Παρατηρείται επίσης ότι παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις από τα αποτελέσματα του παραδείγματος του ABAQUS, τόσο στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές, όσο και στις θέσεις που εκδηλώνονται. Τέλος από το

παράδειγμα, η αξονική τάση παίρνει αρνητικές τιμές στη θέση -19, συγκριτικά με τις τρεις καμπύλες ($\phi=20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$), που παρουσιάζουν αρνητική τιμή 32 m αριστερά του υψηλότερου σημείου του ρήγματος.

Αντίστοιχα, διαμορφώθηκε και το διάγραμμα ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης και παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 4.4 Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS

Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.4 παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή ανέρχεται σε ποσοστό $EE_{11}=0.50\%$ για $\phi=40^\circ$ ενώ στο έτοιμο παράδειγμα του Abaqus σε ποσοστό $EE_{11}=0.60\%$, καθώς και σε διαφορετικές αποστάσεις από το υψηλότερο σημείο του ρήγματος. Η γραφική παράσταση του έτοιμου παραδείγματος φαίνεται να διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από τις υπόλοιπες, όχι μόνο στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές, όσο και στο ότι διατηρεί θετικές τιμές για αποστάσεις πλησιέστερα στο υψηλότερο σημείο του ρήγματος, σε αντίθεση με τις γραφικές παραστάσεις για αμμο.

β) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΡΙΠΛΑΣΙΑ ΤΙΜΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ-ΑΜΜΟΣ

Διατηρώντας τις ίδιες συνθήκες (αμμώδες εδαφικό υλικό με $\phi=20, 30, 40^\circ$) και επομένως τις ίδιες τιμές εδαφικών ελατηρίων, διπλασιάστηκε αρχικά και έπειτα τριπλασιάστηκε η τιμή της μετατόπισης του ρήγματος και δημιουργήθηκαν διαγράμματα αξονικής τάσης και παραμόρφωσης, τα οποία παρουσιάζονται στο Παράρτημα. Για τη συγκεκριμένη ανάλυση βλ. Εικόνα Π.1, Εικόνα Π.2.

Τα αντίστοιχα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα διαγράμματα των Εικόνων Π.1, Π.2 είναι ότι στην περίπτωση που η κατακόρυφη μετατόπιση διπλασιάζεται και τριπλασιάζεται, παρατηρείται αύξηση στην μέγιστη τιμή που παίρνει η αξονική τάση (για $\phi=40^\circ$) και συγκεκριμένα από $S_{11}=1042965.313$ Pa, πλησιάζει την τιμή $S_{11}=1600000$ Pa για διπλάσια και $S_{11}=2000000$ Pa για τριπλάσια μετατόπιση. Η γραφική παράσταση του παραδείγματος διαφέρει αισθητά από τα αποτελέσματα που προέκυψαν για $\phi=20, 30, 40^\circ$. Συγκεκριμένα στο παράδειγμα του ABAQUS, η αξονική τάση ξεκινάει από θετικές τιμές και προσεγγίζει τις αρνητικές σε αποστάσεις 21 και 25 m (για διπλάσια και τριπλάσια μετατόπιση αντίστοιχα) αριστερά από το υψηλότερο σημείο του ρήγματος. Αντίθετα στα υπόλοιπα παραδείγματα οι αρνητικές τιμές προσεγγίζονται νωρίτερα και συγκεκριμένα σε αποστάσεις 40 και 50 m αριστερά. Τέλος, οι μέγιστες τιμές αξονικής τάσης για διπλάσια και τριπλάσια μετατόπιση εντοπίζονται 1 m δεξιά από το υψηλότερο σημείο του ρήγματος, σε αντίθεση με το παράδειγμα του ABAQUS, στο οποίο παρουσιάζεται 5 m δεξιότερα.

Αντίστοιχα, οι γραφικές παραστάσεις ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης παρατίθενται στο Παράρτημα, βλ. Εικόνα Π.3, Εικόνα Π.4.

Όσον αφορά την ελαστική αξονική παραμόρφωση για διπλασιασμό και τριπλασιασμό της μετατόπισης του ρήγματος, σχηματικά τα διαγράμματα δεν διαφέρουν σημαντικά από τα αντίστοιχα της αξονικής τάσης. Το μέγιστο ποσοστό που ανέρχεται η ελαστική αξονική παραμόρφωση για $\phi=40^\circ$ είναι $EE_{11}=0.80\%$ και $EE_{11}=1.0\%$ για διπλάσια και τριπλάσια μετατόπιση αντίστοιχα, ενώ στο παράδειγμα του ABAQUS είναι $EE_{11}=0.90\%$ και $EE_{11}=1.10\%$ αντίστοιχα και εκδηλώνονται και στις δύο περιπτώσεις στην ίδια απόσταση από το υψηλότερο σημείο του ρήγματος.

γ) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΡΙΠΛΑΣΙΑ ΤΙΜΗ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΑΓΩΓΟΥ-ΑΜΜΟΣ

Η παραμετρική ανάλυση που ακολούθησε είχε ως διαφοροποίηση από τις αρχικές συνθήκες τη διπλάσια και αντίστοιχα τριπλάσια τιμή του πάχους τοιχώματος του αγωγού. Τα ζητούμενα διαγράμματα αξονικής τάσης και παραμόρφωσης παραθέτονται στο Παράρτημα, βλ. Εικόνα Π.5 - Εικόνα Π.8.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν ύστερα από μελέτη των διαγραμμάτων είναι ότι η πρώτη αρνητική τιμή αξονικής τάσης για διπλάσιο πάχος τοιχώματος, για $\phi=20, 30, 40^\circ$, παρουσιάζεται σε απόσταση 45 m αριστερά του υψηλότερου σημείου του ρήγματος ενώ για το παράδειγμα του ABAQUS παρουσιάζεται στα 25 m. Η μέγιστη τιμή αξονικής τάσης για διπλάσιο πάχος τοιχώματος, παρουσιάζεται για $\phi=40^\circ$ και είναι κοντά στην τιμή $S_{11}=800000$ Pa και εκδηλώνεται σε απόσταση ενός m δεξιότερα από το υψηλότερο σημείο. Αντίθετα, στο έτοιμο παράδειγμα είναι περίπου $S_{11}=900000$ Pa και σε θέση 2 m δεξιότερα του υψηλότερου σημείου. Όσον αφορά το τριπλάσιο πάχος τοιχώματος, η αξονική τάση παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές συγκριτικά με την περίπτωση του διπλάσιου πάχους, με τη μέγιστη τιμή να ανέρχεται στη τιμή $S_{11}=600000$ Pa για $\phi=40^\circ$ και περίπου $S_{11}=800000$ Pa για το έτοιμο παράδειγμα. Οι μέγιστες τιμές εντοπίζονται σε θέση 1 και 5 m δεξιότερα του υψηλότερου σημείου του ρήγματος αντίστοιχα. Τέλος, η ελαστική αξονική παραμόρφωση όπως και η αξονική τάση παρουσιάζει μικρότερες τιμές για αύξηση του πάχους του τοιχώματος. Έτσι, για διπλάσιο πάχος εμφανίζει μέγιστο ποσοστό $EE_{11}=0.35\%$ ενώ για τριπλάσιο $EE_{11}=0.30\%$. Επιπλέον, οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές παρουσιάζονται στις ίδιες αποστάσεις που παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες στο διάγραμμα αξονικής τάσης από το υψηλότερο σημείο του ρήγματος.

δ) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΡΙΠΛΑΣΙΑ ΤΙΜΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΑΓΩΓΟΥ-ΑΜΜΟΣ

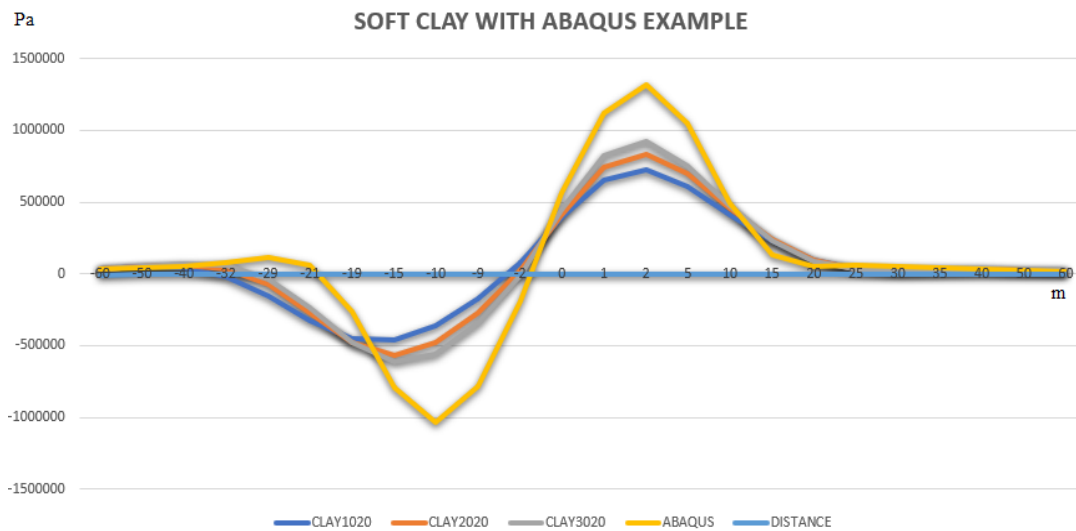
Η τελευταία παραδοχή που εφαρμόστηκε στην παραμετρική ανάλυση για εδαφικό υλικό την άμμο, θεωρεί την εξωτερική ακτίνα του αγωγού διπλάσια και τριπλάσια σε μέγεθος. Με τα συγκεκριμένα δεδομένα συντάχθηκαν τα διαγράμματα αξονικής τάσης και ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης, τα οποία επισυνάπτονται στο Παράρτημα, (βλ. Εικόνα Π.9-Εικόνα Π.12) και στη συνέχεια παραθέτονται τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν.

Συγκρίνοντας τις περιπτώσεις, προκύπτει από τα διαγράμματα των Εικόνων 4.13-4.16 ότι για αύξηση της εξωτερικής ακτίνας, τόσο η αξονική τάση, όσο και η ελαστική αξονική παραμόρφωση μειώνεται. Οι μέγιστες τιμές αξονικής τάσης για διπλάσια και τριπλάσια εξωτερική ακτίνα είναι κοντά στις τιμές $S_{11}=800000$ Pa και $S_{11}=600000$ Pa αντίστοιχα. Οι αρχικές τιμές των διαγραμμάτων για $\phi=20, 30, 40^\circ$ είναι αρνητικές και δέχονται θετικές τιμές σε απόσταση 15m αριστερά του υψηλότερου σημείου του ρήγματος στην περίπτωση της διπλάσιας εξωτερικής ακτίνας, ενώ στην περίπτωση της τριπλάσιας εξωτερικής ακτίνας οι θετικές τιμές για $\phi=20, 30^\circ$ παρουσιάζονται σε απόσταση 10 m αριστερά, ενώ για $\phi=40^\circ$ σε σημείο που απέχει 15 μέτρα. Αντίθετα, για αύξηση της εξωτερικής ακτίνας η ελαστική αξονική παραμόρφωση παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές. Έτσι, για διπλάσια ακτίνα το μέγιστο ποσοστό είναι $EE_{11}=0.35\%$ ενώ για τριπλάσια $EE_{11}=0.39\%$.

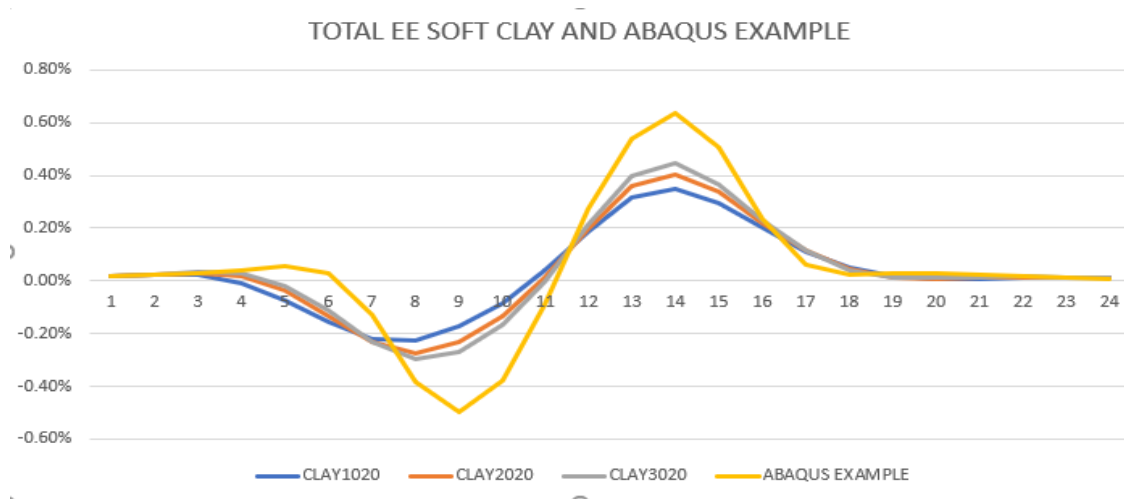
α) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ-ΑΡΓΙΛΟΣ

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε αλλάζοντας το εδαφικό υλικό και τοποθετώντας άργιλο (μαλακή άργιλο συνοχή εδάφους 10, 20,30 kPa και γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=20^\circ$, μέτρια άργιλο με συνοχή 30, 50, 100 kPa και γωνία $\phi=30^\circ$ και σκληρή άργιλο με συνοχή 50, 100, 150 kPa και $\phi=40^\circ$). Οι αρχικές συνθήκες του αγωγού δε μεταβλήθηκαν και με το αντίστοιχο τυπολόγιο υπολογίσθηκαν οι μέγιστες τιμές των αξονικών, πλευρικών και κατακόρυφων δυνάμεων και των αντίστοιχων μετατοπίσεων τους. Στη συνέχεια παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις των αξονικών τάσεων και των ελαστικών αξονικών παραμορφώσεων του αγωγού κατά μήκος του ρήγματος για όλες τις κατηγορίες αργίλου και τα συμπεράσματα θα δοθούν συγκεντρωτικά αφού πραγματοποιηθεί σύγκριση.

ΜΑΛΑΚΗ ΑΡΓΙΛΟΣ:

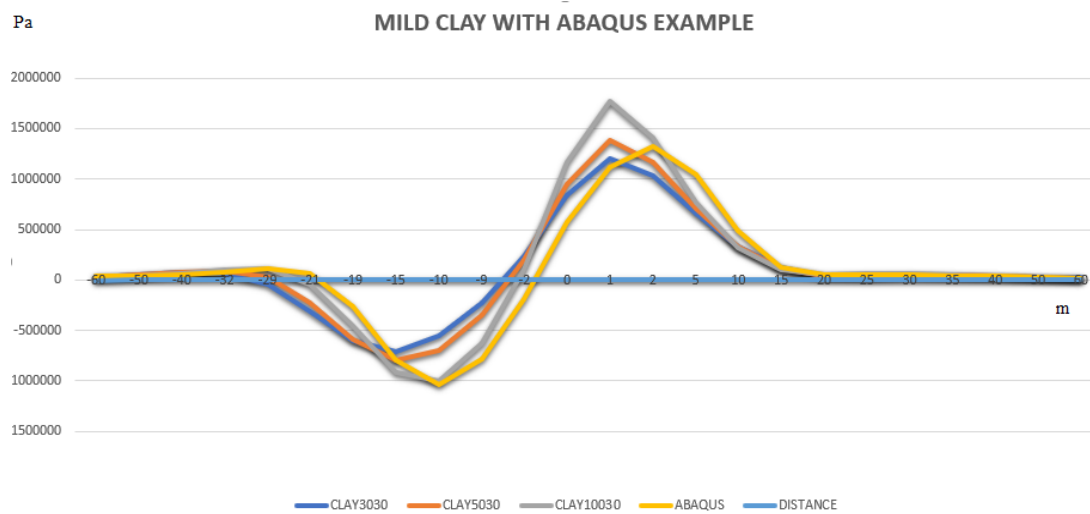


Εικόνα 4.5: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS

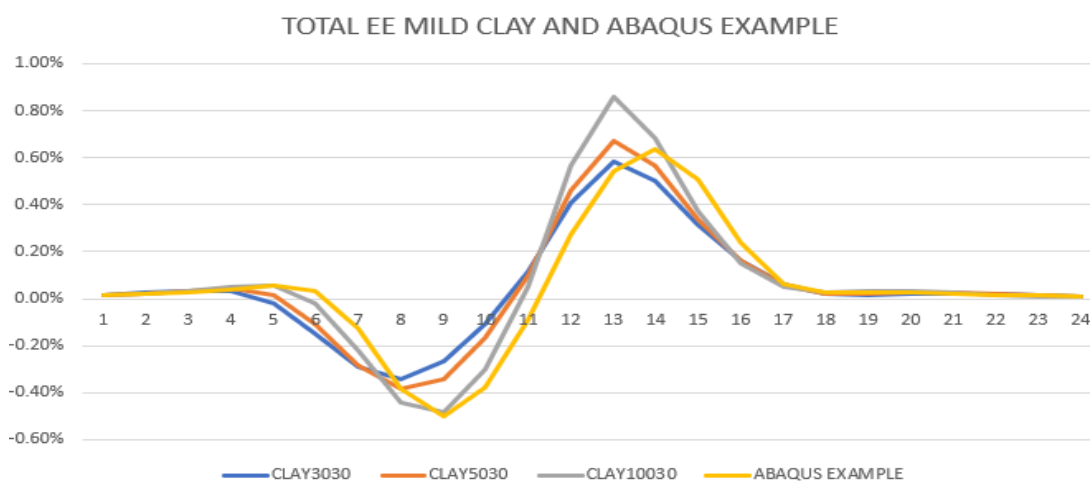


Εικόνα 4.6: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS

ΜΕΤΡΙΑ ΑΡΓΙΛΟΣ:

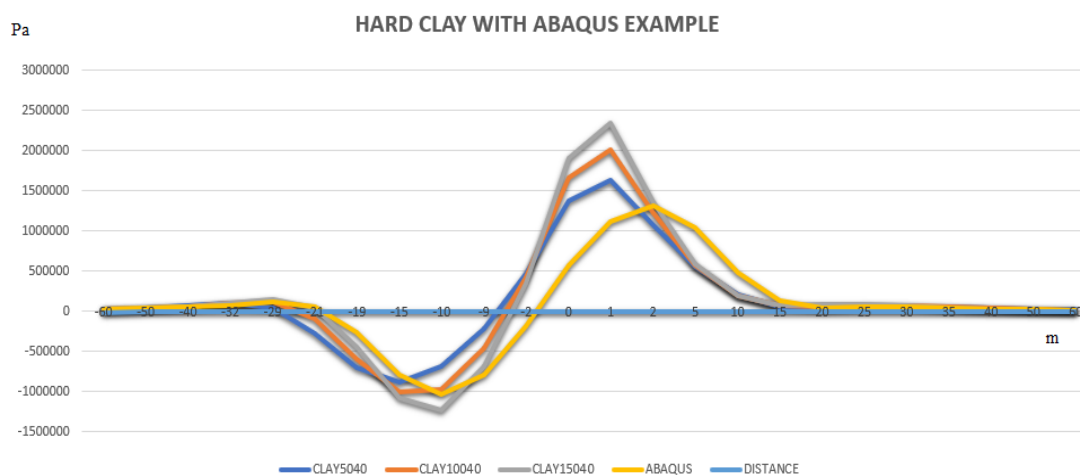


Εικόνα 4.7: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS

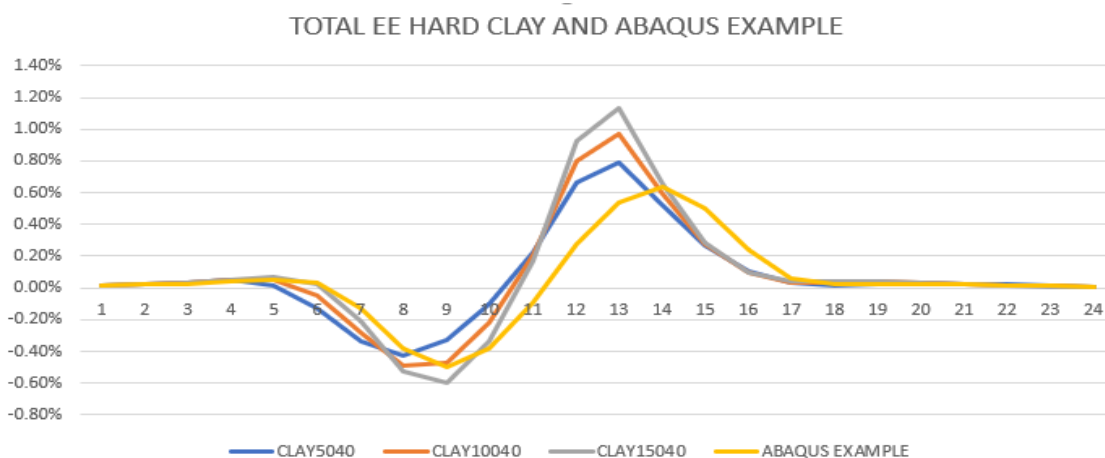


Εικόνα 4.8: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS

ΣΚΛΗΡΗ ΑΡΓΙΛΟΣ:



Εικόνα 4.9: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS



Εικόνα 4.10: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS

Εξετάζοντας τα διαγράμματα στις Εικόνες 4.5, 4.7, 4.9 για κάθε κατηγορία αργίλου και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα, προέκυψε ότι οι μεγάλες τιμές εδαφικής συνοχής (c) συμβάλλουν σε μεγαλύτερες αξονικές τάσεις στον αγωγό, με τη μέγιστη τιμή αξονικής τάσης σε αργιλικό εδαφικό υλικό να εντοπίζεται σε οριζόντια απόσταση 1 m από το υψηλότερο σημείο του ρήγματος, για γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=40^\circ$ και συνοχή $c=150$ kPa, με τιμή $S_{11}=2347843$ Pa. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι το σκληρό αργιλικό υπόβαθρο συγκριτικά με το μέτριο και το μαλακό συμβάλλει περισσότερο στην καταπόνηση του αγωγού. Η αύξηση της συνοχής έχει ως αποτέλεσμα η αξονική τάση να παίρνει αρνητικές τιμές σε κοντινότερες αποστάσεις από το 0, δηλαδή για $c=30$ kPa αρνητικές τιμές έχουμε στη θέση -29 σε αντίθεση με τη θέση -19 που έχουμε για $c=150$ kPa. Όσον αφορά το παραδείγμα του ABAQUS, οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές της αξονικής τάσης είναι υψηλότερες από τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης μόνο στην περίπτωση της μαλακής αργίλου, δηλαδή για $c=10,20,30$ kPa και $\phi=20^\circ$, ενώ η μέγιστη τιμή του έτοιμου παραδείγματος παρουσιάζεται 1 m δεξιά στον οριζόντιο άξονα από τις μέγιστες τιμές που προέκυψαν από την παραμετρική ανάλυση. Επίσης, η μέγιστη τιμή της μέτριας αργίλου ($c=50$ kPa, $\phi=30^\circ$) πλησιάζει περισσότερο, συγκριτικά με τα υπόλοιπα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης, την μέγιστη τιμή του έτοιμου παραδείγματος. Συγκεκριμένα $S_{11}=1389980.25$ Pa και $S_{11}=1320614.5$ Pa αντίστοιχα.

Εξετάζοντας τα διαγράμματα των Εικόνων 4.6, 4.8, 4.10, παρατηρείται αύξηση των ποσοστών για αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής και της συνοχής. Έτσι, στην περίπτωση της μαλακής αργίλου όσο μεγαλώνει η συνοχή c (10,20,30 kPa), το ποσοστό της ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης αυξάνεται με μέγιστη τιμή $EE_{11}=0.42\%$ να έχουμε για $c=30$ kPa. Το έτοιμο παράδειγμα φαίνεται να διαφέρει αισθητά και φτάνει περίπου μέγιστη τιμή $EE_{11}=0.60\%$. Στις περιπτώσεις της μαλακής και σκληρής αργίλου η ελαστική αξονική παραμόρφωση αυξάνεται με μέγιστες τιμές $EE_{11}=0.80\%$ και $EE_{11}=1.20\%$. Τέλος, οι μέγιστες τιμές παρουσιάζονται σε απόσταση 1 m από το υψηλότερο σημείο του ρήγματος στην περίπτωση της μέτριας και σκληρής αργίλου, ενώ στην περίπτωση της μαλακής αργίλου στα 2 m.

β) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΡΙΠΛΑΣΙΑ ΤΙΜΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ-ΑΡΓΙΛΟΣ

Διατηρώντας τις αρχικές συνθήκες σταθερές και μεταβάλλοντας την τιμή της μετατόπισης, επαναπροσδιορίστηκαν οι τιμές των εδαφικών ελατηρίων και δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα αξονικής τάσης και ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης για τις τρεις κατηγορίες αργιλικού εδαφικού υλικού, τα οποία παρουσιάζονται στο Παράρτημα (βλ. Εικόνες Π.13-Π.24).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη συνοχή (c) και γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) παρουσιάζει το εδαφικό υπόβαθρο, τόσο μεγαλύτερη είναι η αξονική τάση. Έτσι, η μαλακή άργιλος παίρνει μέγιστη τιμή $S_{11}=1500000$ Pa σε απόσταση 2 m δεξιότερα του υψηλότερου σημείου του ρήγματος, η μέτρια άργιλος παίρνει μέγιστη τιμή $S_{11}=2700000$ Pa σε απόσταση 1 m ενώ τέλος για τη σκληρή άργιλο έχουμε $S_{11}=3500000$ Pa στην ίδια θέση με την μέτρια άργιλο. Όσον αφορά το έτοιμο παράδειγμα, παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές από τα υπόλοιπα, εκτός από την περίπτωση της μαλακής αργίλου. Τα διαγράμματα της ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης εμφανίζουν αυξήσεις στα ποσοστά τους με την αύξηση της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής με μέγιστες τιμές να παρουσιάζονται στο διάγραμμα της σκληρής αργίλου που ανέρχεται στην τιμή $EE_{11}=1.5\%$.

Σε σύγκριση των τιμών για διπλάσια και τριπλάσια μετατόπιση, για μεγαλύτερη μετατόπιση αυξάνει και η αξονική τάση, καθώς και η ελαστική αξονική παραμόρφωση που φτάνει σε ποσοστό ως και $EE_{11}=2.5\%$ στην περίπτωση της σκληρής αργίλου για τριπλάσια σε αντίθεση με το $EE_{11}=1.5\%$ που εμφανίζεται στη διπλάσια.

γ) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΡΙΠΛΑΣΙΑ ΤΙΜΗ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΑΓΩΓΟΥ-ΑΡΓΙΛΟΣ

Η παραμετρική ανάλυση συνεχίστηκε για τις τρεις κατηγορίες αργιλικού υποβάθρου, με μεταβολή του πάχους του τοιχώματος του αγωγού. Για διπλάσια και τριπλάσια τιμή πάχους τοιχώματος συντάχθηκαν κατάλληλα διαγράμματα αξονικής τάσης και ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης και συγκρίθηκαν τα

αποτελέσματα. Τα ζητούμενα διαγράμματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα στις Εικόνες Π.25- Π.36.

Παρατηρείται ότι η απόκριση του εδαφικού υλικού (μαλακή, μέτρια, σκληρή άργιλος) είναι ίδια με την προηγούμενη περίπτωση. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται αύξηση στις τιμές της αξονικής τάσης και της ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης για αύξηση της συνοχής. Συνεπώς, οι υψηλότερες τιμές εντοπίζονται στην σκληρή άργιλο που φτάνουν ως και $S_{11} = 1500000 \text{ Pa}$ και $EE_{11} = 0.80\%$. Συγκριτικά με την αύξηση του πάχους τοιχώματος, για τριπλάσιο πάχος παρατηρείται πτώση στις τιμές των τάσεων και παραμορφώσεων από αυτές που δόθηκαν για διπλάσιο πάχος. Έτσι, στην περίπτωση της σκληρής άργιλου, η αξονική τάση έχει τιμή $S_{11} = 1400000 \text{ Pa}$ και η ελαστική αξονική παραμόρφωση $EE_{11} = 0.70\%$. Επομένως, διαπιστώνεται ότι η αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού εμποδίζει την ανάπτυξη μεγαλύτερων τιμών τάσης και παραμόρφωσης.

δ) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΡΙΠΛΑΣΙΑ ΤΙΜΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΑΓΩΓΟΥ-ΑΡΓΙΛΟΣ

Η παραμετρική ανάλυση για αργιλικό εδαφικό υλικό ολοκληρώθηκε με τη μεταβολή της τιμής της εξωτερικής ακτίνας του αγωγού, διατηρώντας τις υπόλοιπες μεταβλητές σε τιμές αρχικών συνθηκών. Οι τιμές των ελατηρίων προσδιορίστηκαν με βάση τα νέα δεδομένα και συντάχθηκαν τα ανάλογα διαγράμματα, που επισυνάπτονται στο Παράρτημα (βλ. Εικόνα Π.37-Π.48).

Τα συμπεράσματα που διεξάγονται μελετώντας τις γραφικές παραστάσεις της παραμετρικής ανάλυσης είναι ότι η αύξηση της εξωτερικής ακτίνας δρα με τον ίδιο τρόπο στις τιμές των εντάσεων, όπως παρατηρήθηκε και προηγουμένως στο πάχος τοιχώματος. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνει η συνοχή του εδαφικού υλικού, οι τιμές της αξονικής τάσης και της ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης φαίνεται να μεγαλώνουν. Έτσι, για σκληρή άργιλο οι μέγιστες τιμές είναι οι ακόλουθες για διπλασιασμό της εξωτερικής ακτίνας: $S_{11} = 1700000 \text{ Pa}$ και $EE_{11} = 0.80\%$ περίπου. Οι μέγιστες τιμές εντοπίζονται σε αποστάσεις όλο και πιο κοντά στο υψηλότερο σημείο του ρήγματος για αύξηση της συνοχής. Έτσι, για μαλακή άργιλο είναι σε απόσταση 5 m, για μέτρια 2 m και για σκληρή 1 m. Παρατηρώντας το παράδειγμα του προγράμματος ABAQUS, διαφέρει από τα υπόλοιπα και

συγκεκριμένα μόνο στην περίπτωση της μαλακής αργίλου παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων. Επιπλέον, για αύξηση της εξωτερικής ακτίνας από διπλάσια σε τριπλάσια τιμή, παρατηρείται πάλι αύξηση των τιμών για μεγαλύτερες συνοχές, όμως οι τιμές αυτές παραμένουν μικρότερες από τις αντίστοιχες που δόθηκαν για διπλάσια εξωτερική ακτίνα. Συγκεκριμένα, για σκληρή άργιλο, η μέγιστη αξονική τάση ανέρχεται στην τιμή $S_{11}=140000$ Pa περίπου και η ελαστική αξονική παραμόρφωση σε ποσοστό $EE_{11}=0.65\%$. Τέλος, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της εξωτερικής ακτίνας δρά όπως και η αύξηση του πάχους τοιχώματος, δηλαδή παρεμποδίζουν τις αυξήσεις των αξονικών τάσεων και παραμορφώσεων.

4.2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΑΓΩΓΟΥ -ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί χρήζουν άλλης αντιμετώπισης έναντι στους χερσαίους. Ο πιο σημαντικός παράγοντας σε περιπτώσεις που ένας αγωγός τοποθετείται σε υγρό περιβάλλον, όπως στον πυθμένα της θάλασσας, είναι το νερό και συγκεκριμένα η άνωση. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στο παρόν κεφάλαιο δε διαφέρει στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του από αυτό που λήφθηκε υπόψη στην περασμένη υποενότητα. Η βασική διαφοροποίηση σε αντίστοιχα προβλήματα, βρίσκεται στον τρόπο υπολογισμού των ελατηρίων συμπεριλαμβάνοντας την άνωση. Συγκεκριμένα, ένας υποθαλάσσιος αγωγός περιγράφεται μέσω του εγγράφου των O'Rourke & Liu και μέσω του κανονισμού της DNV· GL. Στη συνέχεια, θα παρατεθεί η διαδικασία κατά την οποία υπολογίσθηκαν οι τιμές των ζητούμενων μέγιστων αξονικών, πλευρικών και κατακόρυφων δυνάμεων, καθώς και οι αντίστοιχες μετατοπίσεις τους.

4.2.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟ ΑΓΩΓΟ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΥΣ Ο'ROURKE & LIU

Το προσομοίωμα του αγωγού έχει παρουσιασθεί παραπάνω στην Εικόνα 4.1 και τόσο τα υλικά, όσο και η διαστασιολόγηση έχουν παραμείνει αμετάβλητα. Αρχικά, το βάρος που θεωρείται ότι έχει ο αγωγός, εφόσον είναι υποθαλάσσιος, είναι το βυθισμένο βάρος του. Για τον υπολογισμό του ζητούμενου βάρους, πρέπει να υπολογίσω την επιφάνεια εγκάρσιας διατομής κάθε υλικού, μίας και η σχέση που δίνει το βυθισμένο βάρος είναι :

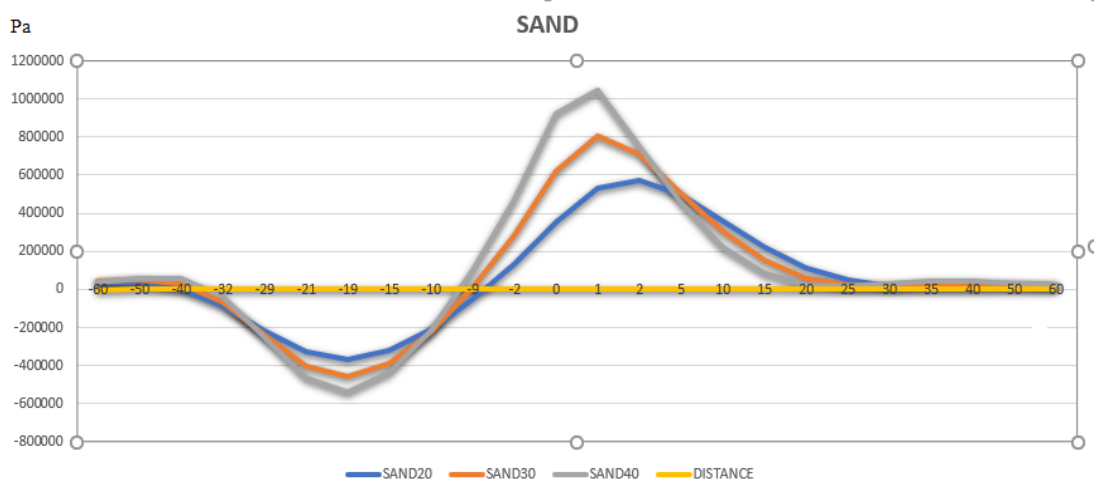
$$\gamma_{\text{sub}} = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (4.2.1)$$

όπου, γ_{sat} το κορεσμένο βάρος του αγωγού, το οποίο υπολογίζεται με τον ακόλουθο τρόπο. Για κάθε υλικό του αγωγού, υπολογίζεται η εγκάρσια διατομή και πολλαπλασιάζεται με το ειδικό βάρος του υλικού και έπειτα το άθροισμα τους δίνει το κορεσμένο βάρος. Να σημειωθεί ότι το βάρος της στρώσης της εξωτερικής επένδυσης δεν συμπεριλήφθηκε στον υπολογισμό, αφού είναι πάρα πολύ μικρό και δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα

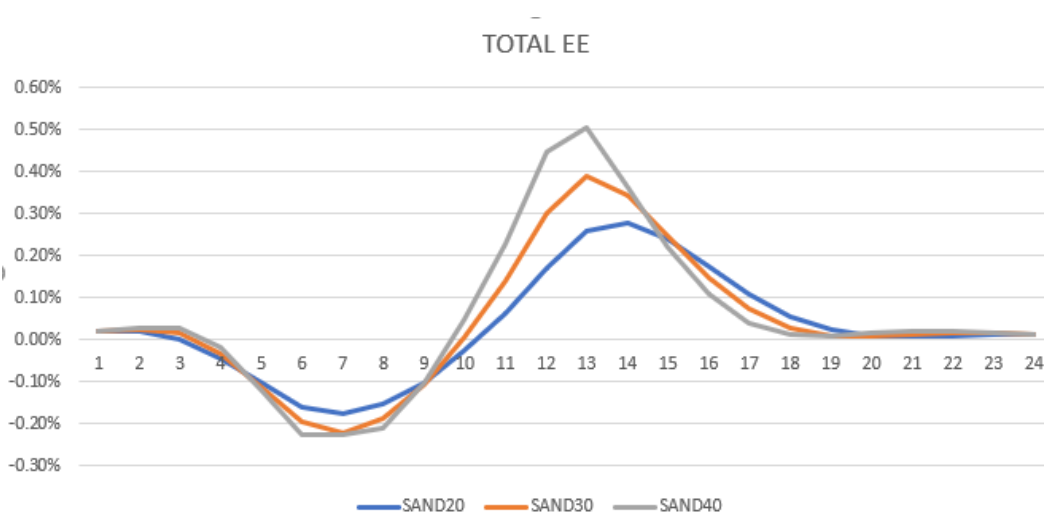
$$\gamma_w = V g \rho_{\text{νερού}} \text{ η άνωση του αγωγού.}$$

Έπειτα, αφού προσδιορίστηκε η τιμή του βυθισμένου βάρους του αγωγού, χρησιμοποιήθηκαν οι κατάλληλες μαθηματικές σχέσεις που παραθέτει ο κανονισμός, για τον υπολογισμό των τιμών των εδαφικών ελατηρίων και των αντίστοιχων μετατοπίσεων. Η παραμετρική ανάλυση που ακολούθησε, βασίστηκε στις αρχικές συνθήκες, καθώς και στην μεταβολή των τιμών της μετακίνησης του ρήγματος και του πάχους τοιχώματος του αγωγού και χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια εδαφικά υλικά. Για κάθε μια περίπτωση συντάχθηκαν διαγράμματα αξονικής τάσης και ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης για τον αγωγό.

α) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ-ΑΜΜΟΣ



Εικόνα 4.11: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος



Εικόνα 4.12: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος

Μελετώντας τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων στις Εικόνες 4.11, 4.12 προκύπτει ότι με την αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής ϕ , παρουσιάζεται μεγιστη και ελάχιστη τιμή αξονικής τάσης, με τη μεγαλύτερη τιμή $S_{11} = 1000000$ Pa, να δίνεται στο διάγραμμα αξονικής τάσης για $\phi = 40^\circ$. Οι μέγιστες τιμές αξονικής τάσης για γωνίες εσωτερικής τριβής $\phi = 30^\circ$ και $\phi = 40^\circ$, εκδηλώνονται σε απόσταση 1 m δεξιά από το ρήγμα, ενώ για $\phi = 20^\circ$ στα 2 m. Αντίθετα, οι ελάχιστες τιμές και στις τρεις περιπτώσεις εντοπίζεται σε απόσταση 19 μέτρων αριστερά

του ρήγματος. Τέλος, η ελαστική αξονική παραμόρφωση του αγωγού αυξάνεται με την αύξηση της τιμής των εδαφικών ελατηρίων, με μέγιστο ποσοστό $EE_{11}=0.50\%$ να παρουσιάζεται για $\phi=40^\circ$.

β) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΡΙΠΛΑΣΙΑ ΤΙΜΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΑΜΜΟΣ

Ακολουθήθηκε η ίδια παραμετρική ανάλυση με την ενότητα 4.1 και τα αποτελέσματα που προέκυψαν για μεταβολή της τιμής της μετατόπισης του ρήγματος παρουσιάζονται στο Παράρτημα (βλ. Εικόνα Π.49- Π.52).

Παρατηρείται ότι για διπλασιασμό της μετατόπισης του ρήγματος, οι τιμές αξονικής τάσης εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές, με τη μέγιστη να παρουσιάζεται για $\phi=40^\circ$ και είναι λίγο μεγαλύτερη από $S_{11}=1500000$ Pa. Αντίστοιχη απόκριση έχει και η ελαστική ένταση, όπου το ποσοστό είναι έως και 0.30% μεγαλύτερο από το αντίστοιχο σε αρχικές συνθήκες. Ανάλογη συμπεριφορά εκδηλώνεται και για τριπλάσια μετατόπιση όπου οι τιμές της αξονικής τάσης και ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης εμφανίζουν ακόμη μεγαλύτερες τιμές με μέγιστες $S_{11}=2000000$ Pa και $EE_{11}=1.00\%$. Και σε αυτή την περίπτωση οι μεγαλύτερες τιμές δίνονται με αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής ϕ .

γ) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΡΙΠΛΑΣΙΑ ΤΙΜΗ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΑΓΩΓΟΥ-ΑΜΜΟΣ

Σε αυτή την περίπτωση, η μεταβολή της τιμής του πάχους τοιχώματος του αγωγού, επιφέρει αλλαγή και στο βυθισμένο βάρος του. Επομένως, πρέπει να επαναπροσδιορισθούν οι τιμές των εδαφικών ελατηρίων, πρώτου ξεκινήσει η παραμετρική ανάλυση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στο Παράρτημα (βλ. Εικόνα Π.53- Π.56)

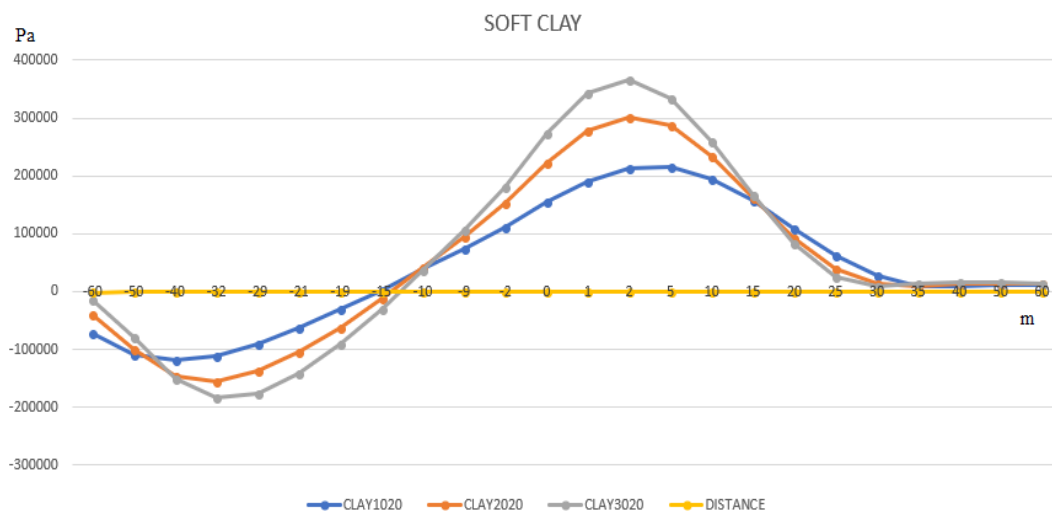
Συμπερασματικά, παρατηρείται ότι όταν διπλασιάζεται το πάχος τοιχώματος οι αρχικές τιμές της αξονικής τάσης ξεκινούν από τα αρνητικά. Η μέγιστη τιμή για γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=20^\circ$ εντοπίζεται σε μεγαλύτερη απόσταση από το ρήγμα, συγκριτικά με τις αντίστοιχες για $\phi=30^\circ$ και 40° και είναι (για $\phi=40^\circ$) ίση με $S_{11}=2000000$ Pa σε μηδενική απόσταση από το ρήγμα έως και 1 m δεξιότερα.

Όσον αφορά το διάγραμμα της ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης, παρουσιάζει την ίδια μορφή με το αντίστοιχο της αξονικής τάσης, με μέγιστη τιμή παραμόρφωσης την $\epsilon_{11}=0.10\%$ στη θέση του ρήγματος έως και ένα μέτρο δεξιάτερα. Τελός, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος οι μέγιστες τιμές είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες για διπλάσιο πάχος, με μέγιστες τις $S_{11} = 1500000$ Pa και $\epsilon_{11} = 0.8\%$.

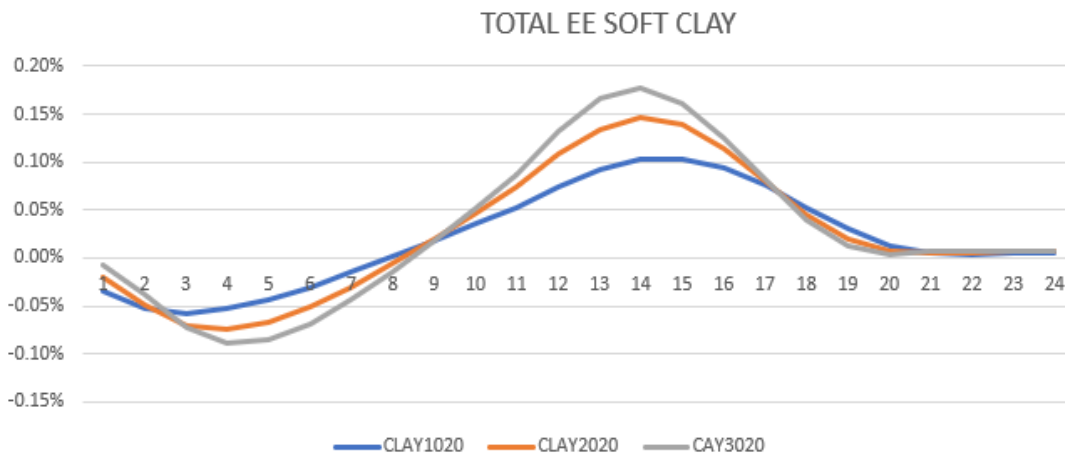
α) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ-ΑΡΓΙΛΟΣ

Στην ίδια διαδικασία προσαρμόστηκαν δεδομένα για αργιλικό εδαφικό υλικό και συγκεκριμένα για τρεις κατηγορίες αργίλου που λήφθηκαν και στους χερσαίους αγωγούς (μαλακή, μέτρια, σκληρή άργιλος) και υπολογίσθηκαν οι αντίστοιχες τιμές εδαφικών ελατηρίων. Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται και αξιολογούνται στη συνέχεια.

ΜΑΛΑΚΗ ΑΡΓΙΛΟΣ:

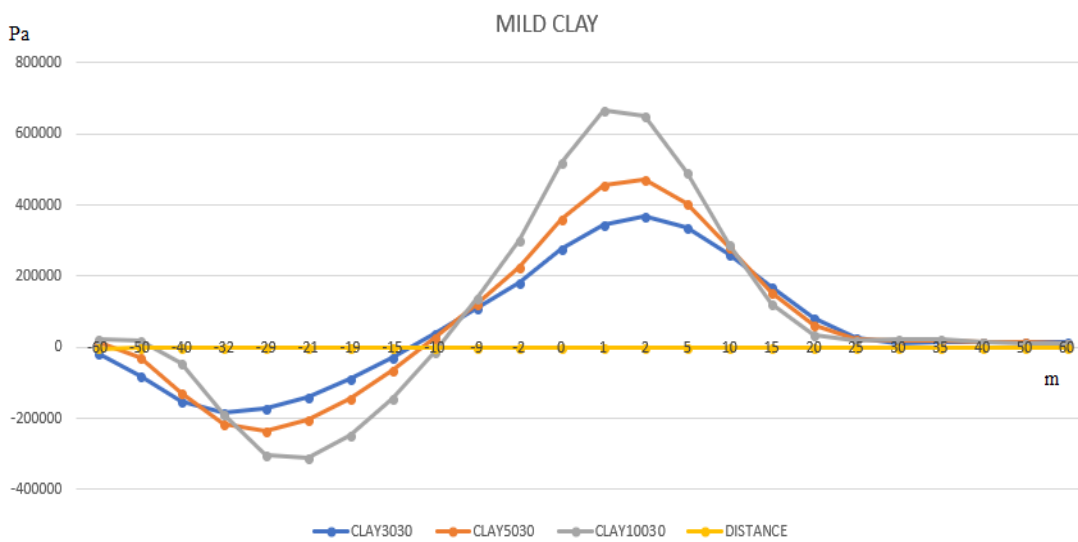


Εικόνα 4.13: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος

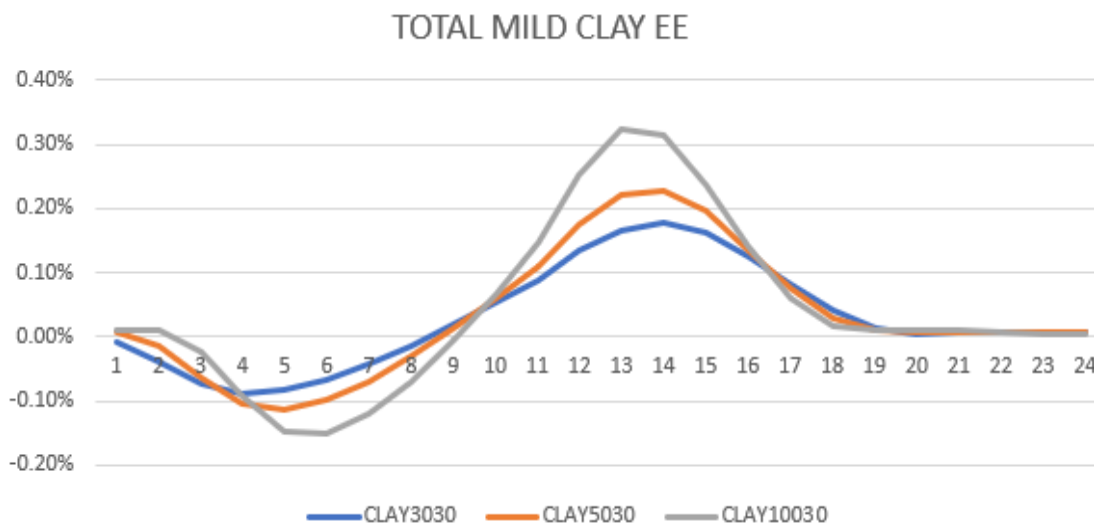


Διάγραμμα 4.14: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος

ΜΕΤΡΙΑ ΑΡΓΙΛΟΣ:

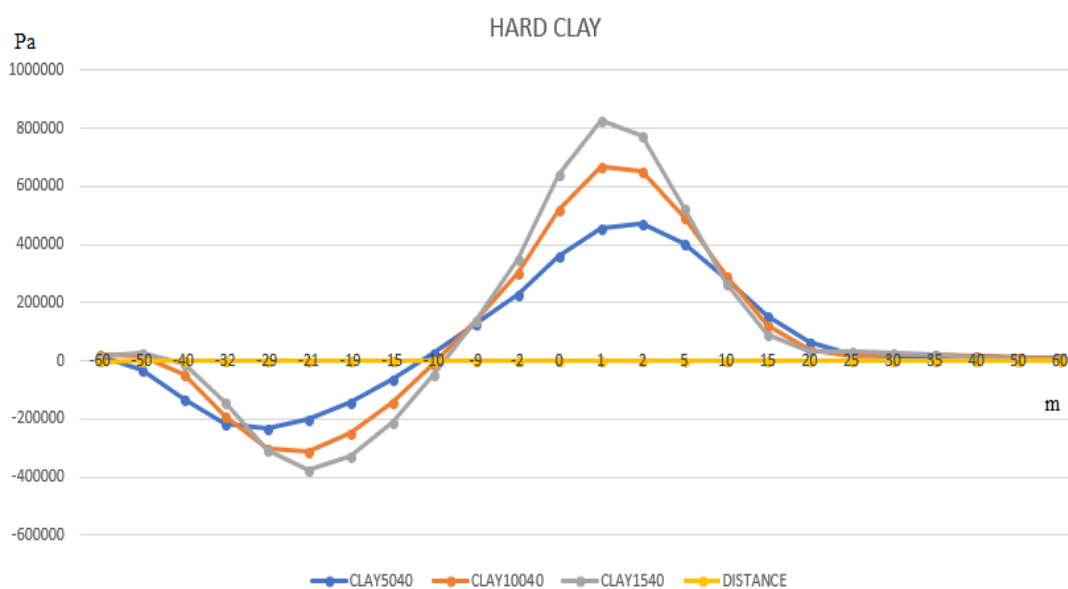


Εικόνα 4.15: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος

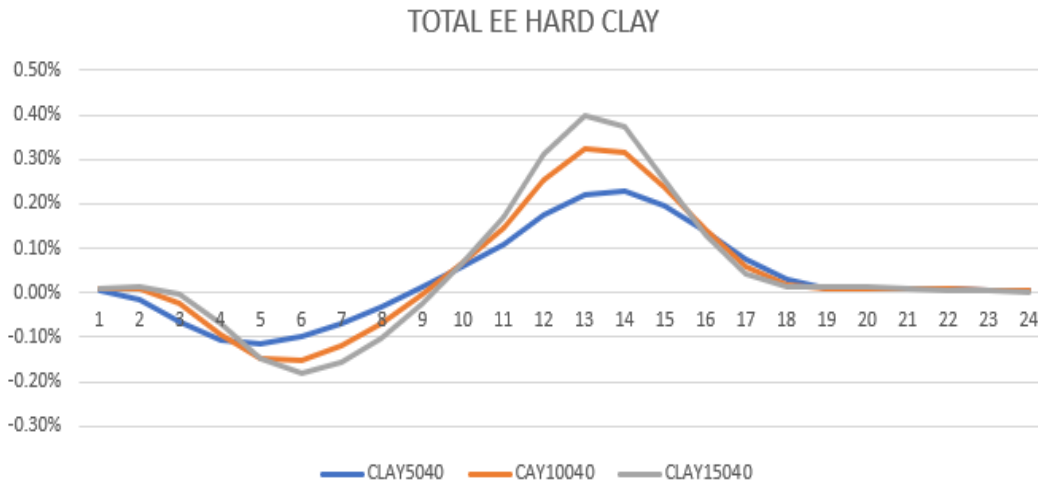


Εικόνα 4.16: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος

ΣΚΛΗΡΗ ΑΡΓΙΛΟΣ:



Εικόνα 4.17: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος



Εικόνα 4.18: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα στις Εικόνες, προκύπτει ότι η αύξηση της συνοχής c , επιφέρει μέγιστη και ελάχιστη τιμή αξονικής τάσης, με μεγαλύτερη τιμή στο διάγραμμα να εντοπίζεται για σκληρή άργιλο ($c=150$ kPa και $\phi=40^\circ$) και είναι $S_{11} = 800000$ Pa. Για μικρότερες τιμές συνοχής, οι αρχικές τιμές αξονικής τάσης, για απόσταση 60 μέτρων από το ρήγμα είναι αρνητικές. Συγκεκριμένα, για μαλακή άργιλο είναι αρνητικές ενώ για σκληρή ξεκινούν από θετικές τιμές. Έπειτα, παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται η τιμή της συνοχής, μικραίνει η απόσταση από το ρήγμα που εκδηλώνεται η μέγιστη τιμή αξονικής τάσης. Έτσι, για μαλακή και μέτρια άργιλο είναι σε απόσταση 2 m δεξιά του ρήματος ενώ για σκληρή ενός. Τέλος, η ελαστική αξονική παραμόρφωση του αγωγού αυξάνεται με την αύξηση της τιμής των εδαφικών ελατηρίων και παρουσιάζει μέγιστο ποσοστό $EE_{11}=0.40\%$. για $c=150$ kPa και $\phi=40^\circ$.

β) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΡΙΠΛΑΣΙΑ ΤΙΜΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΑΡΓΙΛΟΣ

Τα διαγράμματα αξονικής τάσης και ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης μπορούν να εντοπισθούν στο Παράρτημα (βλ. Εικόνα Π.57-Π.68)

Υστερα από την ολοκλήρωση της παραπάνω παραμετρικής ανάλυσης, τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν είναι ότι για διπλασιασμό της μετατόπισης, οι τιμές αξονικής τάσης παρουσιάζουν αύξηση από μαλακή σε μέτρια άργιλο (δηλαδή για γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=30^\circ$) και έπειτα από μέτρια σε σκληρή παρουσιάζεται πτώση των τιμών, ενώ η μέγιστη τιμή αξονικής τάσης είναι για $c=100$ kPa και $\phi=30^\circ$ και είναι $S_{11}=1000000$ Pa. Αντίστοιχη απόκριση έχει και η ελαστική αξονική παραμόρφωση, όπου το ποσοστό αυξάνεται μέχρι μέτρια άργιλο και έπειτα παρουσιάζει πτώση. Το μέγιστο ποσοστό είναι περίπου $EE_{11}=0.50\%$. Για τριπλάσια μετατόπιση οι τιμές της αξονικής τάσης τείνουν να εμφανίζονται μεγαλύτερες για αύξηση της συνοχής, με μέγιστη τιμή $S_{11}=1400000$ Pa, να δίνεται για σκληρή άργιλο. Η γραφική παράσταση ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης παρουσιάζει αντίστοιχη συμπεριφορά με μέγιστη τιμή $EE_{11}=0.70\%$. Και σε αυτή την περίπτωση οι μεγαλύτερες τιμές δίνονται με αύξηση της συνοχής και της γωνίας ϕ .

γ) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΡΙΠΛΑΣΙΑ ΤΙΜΗ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΑΓΩΓΟΥ-ΑΡΓΙΛΟΣ

Στην εν λόγω παραμετρική ανάλυση η διαδικασία που ακολουθείται είναι ίδια με τις προηγούμενες, ιδιαίτερη έμφαση πρέπει ωστόσο να δοθεί στην αλλαγή του βυθισμένου βάρους του αγωγού και επομένως στις νέες τιμές που παίρνουν τα εδαφικά ελατήρια. Τα ζητούμενα διαγράμματα αξονικής τάσης και ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης βρίσκονται στο Παράρτημα (βλ. Εικόνα Π.69 – Π.80).

Συγκεντρώνοντας τα τελευταία συμπεράσματα από την παραμετρική ανάλυση που προηγήθηκε σύμφωνα με τη θεωρία των O'Rourke & Liu, παρατηρείται ότι όταν διπλασιάζεται το πάχος τοιχώματος του αγωγού, οι αρχικές τιμές της αξονικής τάσης ξεκινούν από τα αρνητικά και με αύξηση της συνοχής περνούν στα θετικά. Συγκεκριμένα, θετικές τιμές έχουμε για συνοχή μεγαλύτερη από 50. Επίσης, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος φαίνεται η αξονική ένταση να αυξάνει με την αύξηση της συνοχής. Έτσι, η μέγιστη τιμή $S_{11}=600000$ Pa εντοπίζεται για $c=150$ kPa και $\phi=40^\circ$, σε απόσταση 1 έως και 2 m δεξιά από το ρήγμα. Μελετώντας τα διάγραμμα ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης, παρουσιάζει την ίδια μορφή με το αντίστοιχο της αξονικής τάσης, δίνοντας μέγιστη τιμή ελαστικής παραμόρφωσης $EE_{11}=0.30\%$ για σκληρή άργιλο. Τέλος, για τριπλάσιο

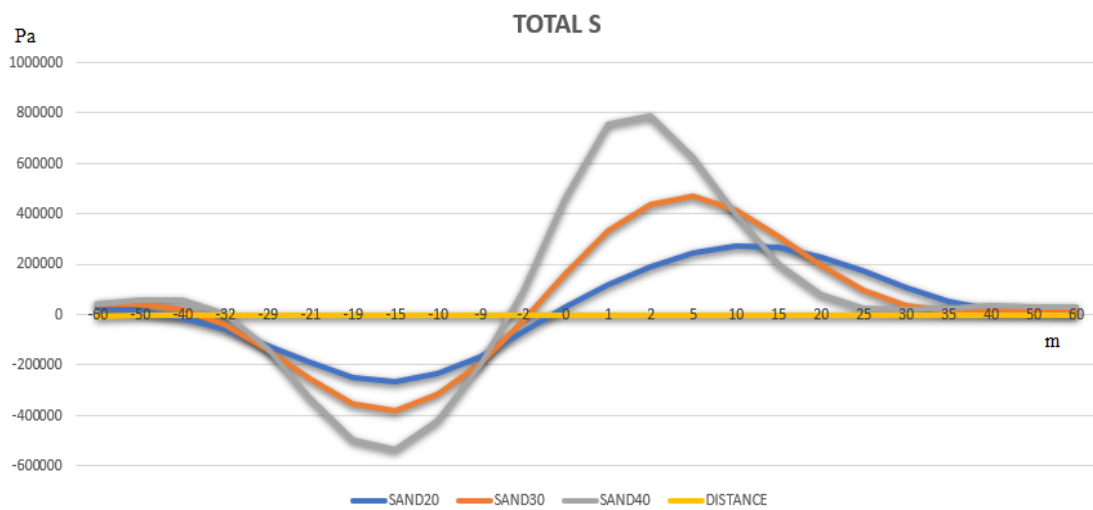
πάχος τοιχώματος οι μέγιστες τιμές είναι μικρότερες απο τις αντίστοιχες για διπλάσιο πάχος, με μέγιστες τις $S_{11} = 500000$ Pa και $E_{11} = 0.25\%$.

4.2.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟ ΑΓΩΓΟ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟ ΤΗΣ DNV·GL

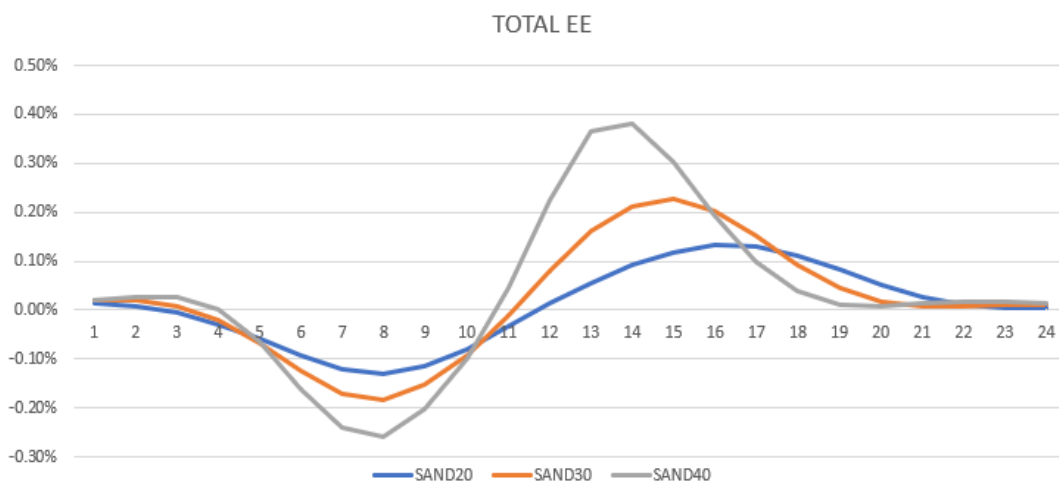
Η παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον κανονισμό της DNV·GL θεωρείται πιο ιδιόμορφη, λόγω της πολυπλοκότητας του. Όπως, έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο των εδαφικών ελατηρίων λαμβάνονται δύο λειτουργίες αστοχίας τόσο στις αξονικές δυνάμεις, όσο και στις κατακόρυφες προς τα άνω, επομένως η παραμετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε δύο φορές ώστε να πραγματοποιηθούν συγκρίσεις.

α) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ-ΑΜΜΟΣ

Η παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για αμμώδες εδαφικό υλικό στηρίχθηκε στη βαθιά λειτουργία αστοχίας, διότι εκτελέσθηκε το ίδιο πρόβλημα σύμφωνα και με τη ρηχή λειτουργία, όπως αναφέρεται στον κανονισμό, και δεν παρουσιάσθηκαν διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα. Η ανάλυση βασίσθηκε στις ίδιες αρχικές συνθήκες, όπως και μεταβολές μεγεθών, που ακολουθούνται απο την αρχή του κεφαλαίου. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων συντάχθηκαν τα ανάλογα διαγράμματα, όπως παρουσιάζονται ακολούθως.



Εικόνα 4.13: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος



Εικόνα 4.14: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα στις Εικόνες 4.13-4.14, η αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής ϕ για αρχικές συνθήκες, συμβάλλει στην αύξηση της αξονικής τάσης και παραμόρφωσης, μιας και οι μέγιστες τιμές δίνονται για γωνία

$\phi=40^\circ$. Παρουσιάζεται ωστόσο, διαφοροποίηση στη θέση όπου εντοπίζονται οι τοπικές μέγιστες και ελάχιστες τιμές

β) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΡΙΠΛΑΣΙΑ ΤΙΜΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΑΜΜΟΣ

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα (βλ. Εικόνα Π.81 -Π.84).

Η μεταβολή της τιμής της μετατόπισης του ρήγματος σε διπλάσια και τριπλάσια, οδήγησε στην αύξηση των τιμών αξονικής τάσης και παραμόρφωσης, δηλαδή συνέβαλε στην καταπόνηση του αγωγού. Συγκεκριμένα παρατηρείται αύξηση έως και 7000 Pa αξονικής τάσης. Όσον αφορά την ελαστική παραμόρφωση, το ποσοστό αύξησης ανέρχεται σε $EE_{11}=0.8\%$ έναντι του $EE_{11}=0.4\%$ που κατείχε για αρχικές συνθήκες.

γ) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΡΙΠΛΑΣΙΑ ΤΙΜΗ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΑΓΩΓΟΥ-ΑΜΜΟΣ

Σε αυτή την περίπτωση η αλλαγή στις τιμές του πάχους τοιχώματος, δεν επηρεάζει τις τιμές των εδαφικών ελατηρίων, όπως συνέβη σύμφωνα με τη θεωρία των O'Rourke & Liu για υποθαλάσσιους αγωγούς. Τα διαγράμματα αξονικής τάσης και παραμόρφωσης παρουσιάζονται στο Παράρτημα (βλ. Εικόνα Π.85- Π.88).

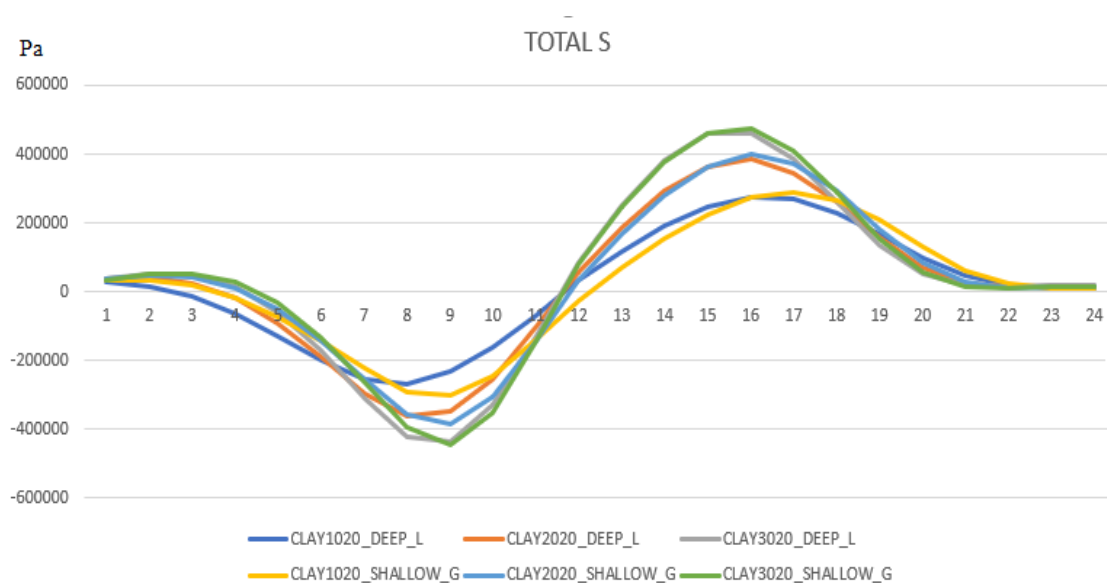
Η απόκριση του αγωγού στην περίπτωση που διπλασιάζεται και τριπλασιάζεται το πάχος τοιχώματος του ακολούθησε τις προσδοκίες. Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση του πάχους τοιχώματος, εξυπηρετεί στη μείωση της καταπόνησης του αγωγού, διότι στα διαγράμματα αξονικής τάσης και παραμόρφωσης οι μέγιστες τιμές διαρκώς μειώνονται. Αντίθετα όμως, η αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής ϕ συμβάλει στην αύξηση των τιμών των

εξεταζόμενων μεγεθών, μιας και για γωνία $\phi=40^\circ$ παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με τις τιμές για γωνίες $\phi=20^\circ, 30^\circ$.

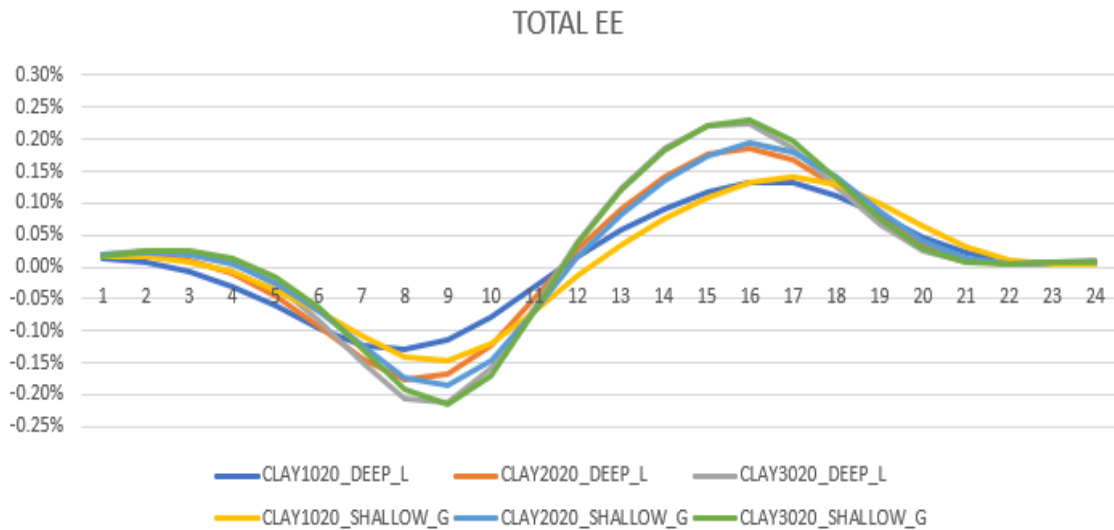
α) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ-ΑΡΓΙΛΟΣ

Η παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε υποθαλάσσιες συνθήκες, έχοντας ως εδαφικό υλικό την άργιλο, εκτελέστηκε σύμφωνα με δύο συνδιασμούς λειτουργιών, όπως προβλέπει ο κανονισμός. Η πρώτη συσχέτιση έθετε ως λειτουργία για τον υπολογισμό των αξονικών δυνάμεων τη βαθιά και για τον υπολογισμό των κατακόρυφων προς τα άνω την τοπική. Οι θεωρήσεις που ισχύουν και στις δύο λειτουργίες έχουν επισημανθεί στο κεφάλαιο 3. Στη δεύτερη περίπτωση, τα αξονικά ελατήρια υπολογίζονται σύμφωνα με τη ρηχή λειτουργία ενώ τα κατακόρυφα με τη γενικευμένη. Στις δύο περιπτώσεις υπήρξαν διαφοροποιήσεις επομένως θα παρατεθούν σε συγκεντρωτικά διαγράμματα τα αποτελέσματα, ώστε να διεξαχθούν με μεγαλύτερη ευκολία τα συμπεράσματα.

ΜΑΛΑΚΗ ΑΡΓΙΛΟΣ:

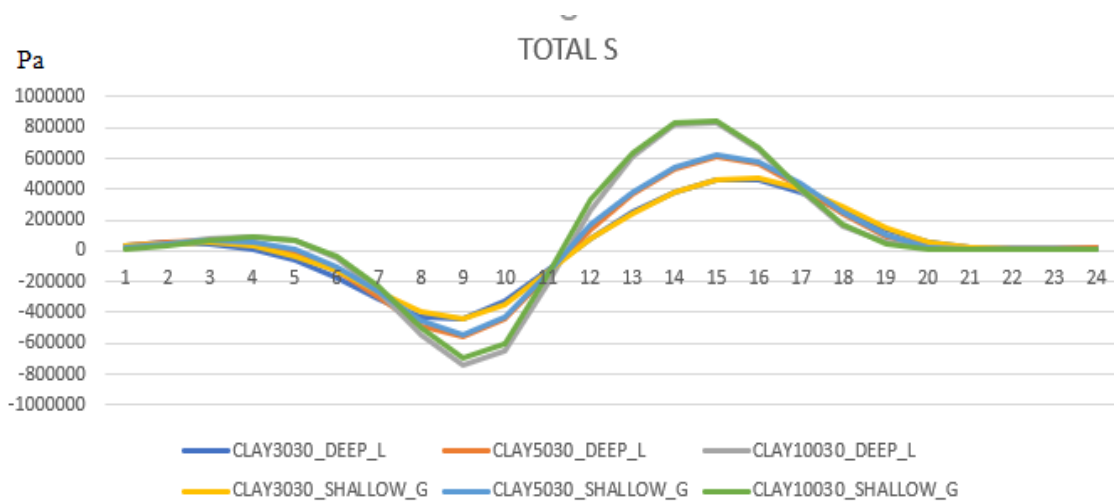


Εικόνα 4.15: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος

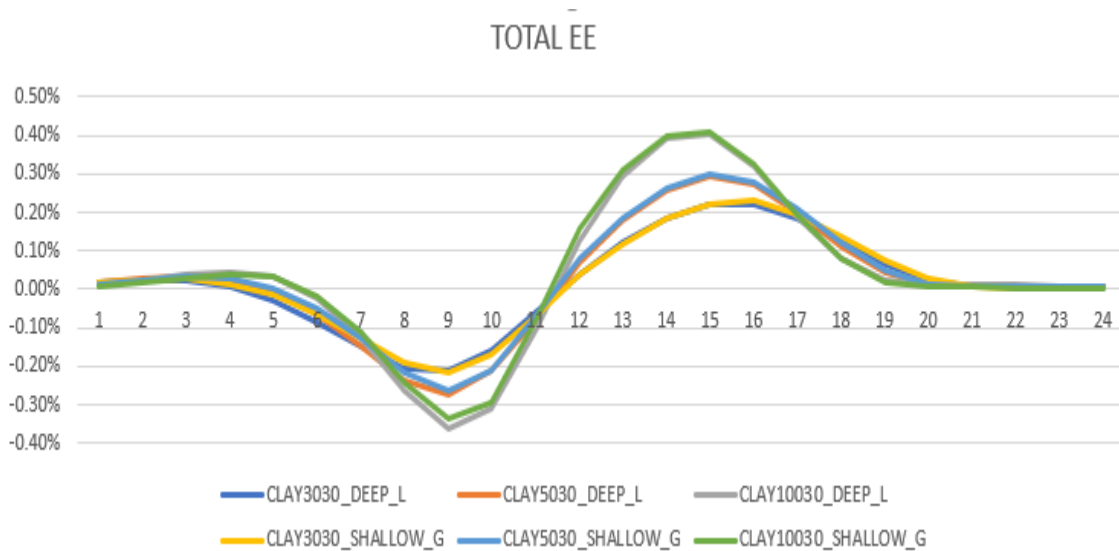


Εικόνα 4.16: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος

ΜΕΤΡΙΑ ΑΡΓΙΛΟΣ:

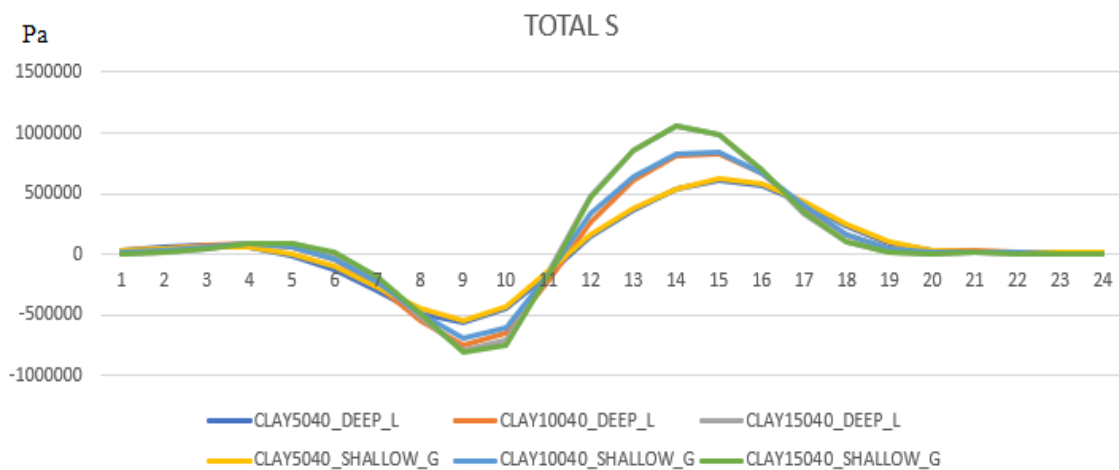


Εικόνα 4.17: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος

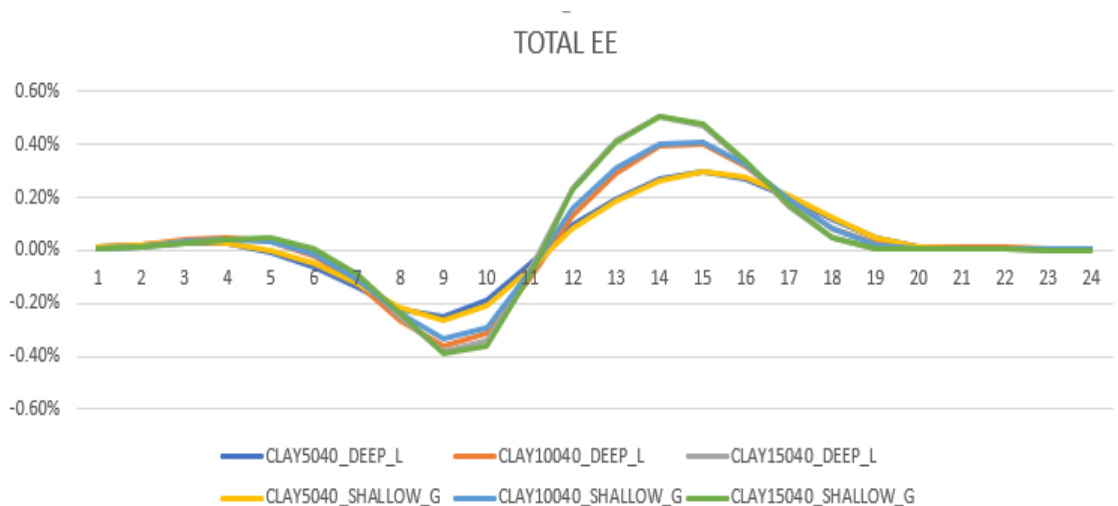


Εικόνα 4.18: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος

ΣΚΛΗΡΗ ΑΡΓΙΛΟΣ:



Εικόνα 4.19: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος



Εικόνα 4.20: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος

Σύμφωνα με τους δυο συνδιασμούς λειτουργιών, καθώς και με την παράλληλη αύξηση των τιμών συνοχής και γωνίας εσωτερικής τριβής, παρατηρείται ότι οι δύο συνδιασμοί (βαθιά λειτουργία-τοπική λειτουργία, ρηχή λειτουργία-γενικευμένη λειτουργία) παρουσιάζουν διαφορές αλλά όχι ιδιαίτερα αισθητές μιας και η μορφή των γραφικών παραστάσεων δεν διαφέρει και οι αποκλίσεις στις τιμές, για αντίστοιχες τιμές συνοχής και γωνίας ϕ , είναι μικρές. Ωστόσο, προκύπτει ότι η αύξηση της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής συμβάλλουν στην καταπόνηση του αγωγού, μιας και οι τιμές αξονικής τάσης και ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης παρουσιάζουν αυξητική τάση.

β) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΡΙΠΛΑΣΙΑ ΤΙΜΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΑΡΓΙΛΟΣ

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για διπλάσια και τριπλάσια μετατόπιση ρήγματος παρουσιάζονται στο Παράρτημα (βλ.Εικόνα Π.89-Π.100).

Ανάλογη απόκριση με τις προηγούμενες αναλύσεις, παρουσιάζεται και στη συγκεκριμένη περίπτωση. Η αύξηση της τιμής της μετατόπισης του ρήγματος συμβάλλει στην αύξηση της αξονικής τάσης και παραμόρφωσης, με την αύξηση της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής. Ωστόσο, οι διαφοροποιήσεις στις δύο λειτουργίες αστοχίας είναι πιο έντονες από ότι στις αρχικές συνθήκες, με την λειτουργία ρηχή-γενικευμένη να παίρνει μεγαλύτερες τιμές όταν

διπλασιάζεται η μετατόπιση, σε αντίθεση με τη λειτουργία βαθιά-τοπική που εκδηλώνει μεγαλύτερες τιμές για τριπλάσια μετατόπιση.

γ) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΡΙΠΛΑΣΙΑ ΤΙΜΗ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΑΓΩΓΟΥ-ΑΡΓΙΛΟΣ

Τα αποτελέσματα από την τελευταία παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον κανονισμό της DNV·GL παρουσιάζονται στο Παράρτημα (βλ. Εικόνα Π.101-Π.112).

Σύμφωνα με τις γραφικές παραστάσεις, για διπλασιασμό του πάχους τοιχώματος του αγωγού παρουσιάζεται αύξηση της τιμής της αξονικής τάσης, αυξάνοντας τη συνοχή και τη γωνία εσωτερικής τριβής. Και σε αυτή την εκδοχή παρατηρείται ότι η λειτουργία ρηχή- γενικευμένη ανέρχεται σε υψηλότερες τιμές συγκριτικά με την βαθιά-τοπική. Όσον αφορά την ελαστική αξονική παραμόρφωση, ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά με την αξονική τάση και παρουσιάζει αύξηση έως και 0.5% στις μέγιστες τιμές της. Για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος, τις μέγιστες τιμές αξονικής τάσης και παραμόρφωσης εξακολουθεί να παρουσιάζει η σκληρή άργιλος ($c=150$ kPa, $\phi=40^\circ$) για ρηχή-γενικευμένη λειτουργία, με τη διαφορά ότι έπειτα ακολουθεί, για ίδιες τιμές συνοχής και γωνίας εσωτερικής τριβής, η βαθια-γενικευμένη λειτουργία, σε αντίθεση με τα προηγούμενα διαγράμματα που η ρηχή λειτουργία, για κάθε συνδιασμό c , ϕ , εμφάνιζε τις υψηλότερες τιμές και έπειτα ακολουθούσε η βαθιά λειτουργία. Τέλος, οι τιμές αξονικής τάσης και παραμόρφωσης για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος, είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες για διπλάσιο, δηλαδή η αύξηση του πάχους τοιχώματος του αγωγού εξυπηρετεί στην προστασία του αγωγού από την καταπόνηση.

5. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας που πραγματοποιήθηκε, θα επισημανθούν τα συμπεράσματα που εξήχθησαν, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

- Η κατασκευή χερσαίων και υποθαλάσσιων αγωγών είναι επιτακτική ανάγκη σήμερα και πρόκειται να κατασκευαστούν περισσότεροι στο εγγύς μέλλον.
- Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που παρουσιάζονται στο σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία αγωγών είναι οι γεωκίνδυνοι.
- Ένας γεωκίνδυνος, όπως το σεισμικό ρήγμα ή η κατολίσθηση μπορεί να προκαλέσει μόνιμες παραμορφώσεις στον αγωγό.
- Με βάση τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε για την αλληλεπίδραση αγωγού και εδαφικών παραμορφώσεων λόγω διάρρηξης ρήγματος, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι τα εξής :
- Τα εδαφικά ελατήρια επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόκριση του αγωγού στις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται.
- Για μεγαλύτερες τιμές εδαφικών ελατηρίων, η αξονική καταπόνηση που δέχονται οι αγωγοί αυξάνεται.
- Οι αξονικές τάσεις και ελαστικές παραμορφώσεις παίρνουν διαφορετικές τιμές, για διαφορετικό υλικό εδαφικής και ιζηματογενούς στρώσης στη διεπιφάνεια αγωγού και ρήγματος. Συγκεκριμένα, η αύξηση της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής συμβάλλουν στην ανάπτυξη υψηλότερων τιμών.
- Η αύξηση του πάχους τοιχώματος και της εξωτερικής ακτίνας του αγωγού, συμβάλλουν στη μείωση των αξονικών τάσεων και παραμορφώσεων που δέχεται ο αγωγός.
- Παρατηρούνται διαφορές στις τιμές αξονικής τάσης και παραμόρφωσης, ανάλογα με τον κανονισμό που χρησιμοποιήθηκε για τα εδαφικά ελατήρια.

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

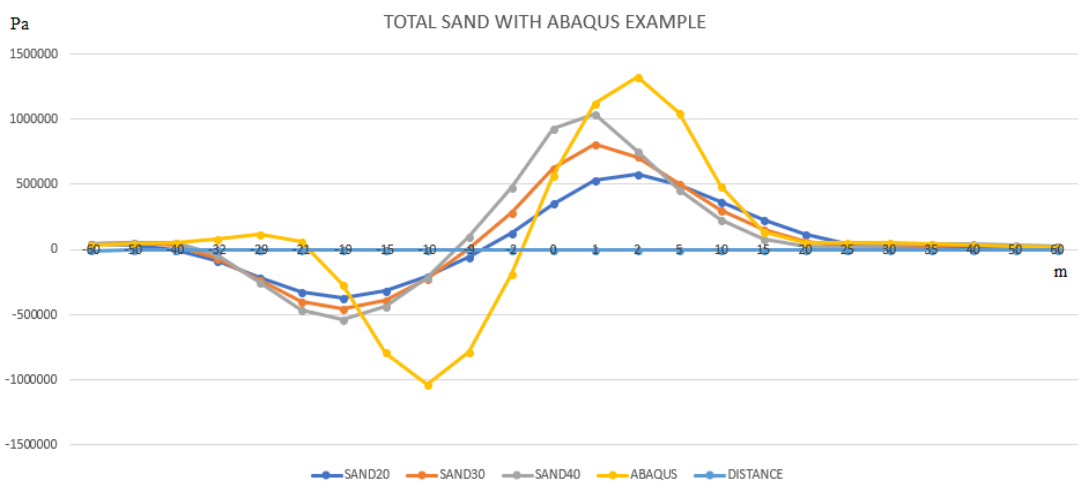
- Έλεγχος σπουδαιότητας εδαφικών ελατηρίων και σε άλλες περιπτώσεις γεωκινδύνων, όπως στην περίπτωση αστάθειας ενός πρανούς.
- Τρισδιάστατη προσομοίωση του αντίστοιχου προβλήματος.
- Εξέταση εδαφικών ελατηρίων σε επιφανειακό αγωγό.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

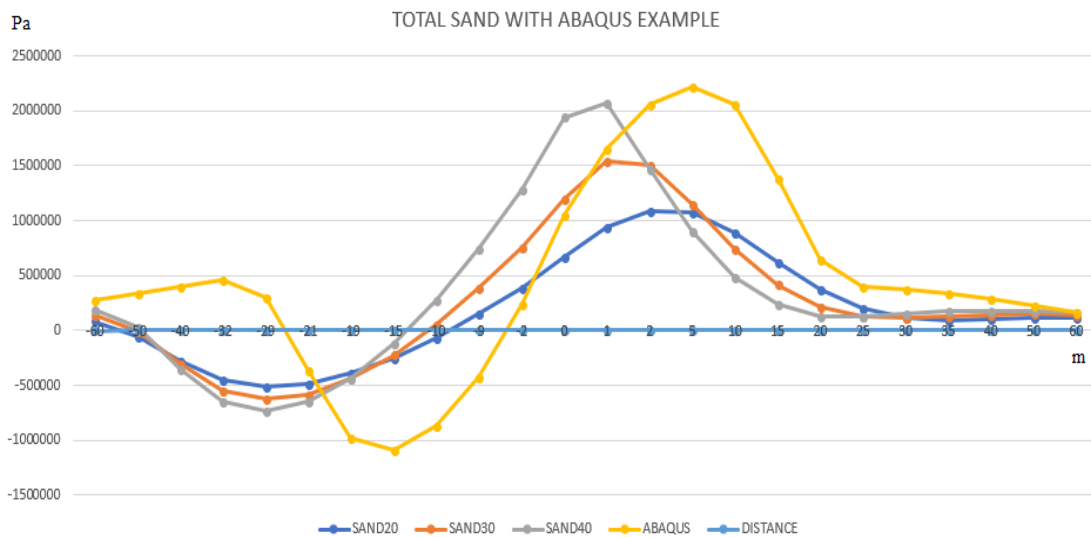
1. O'Rourke MJ, Liu X., Seismic design of buried and offshore pipelines, Monograph Series, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, (MCEER), 2012.
2. American Lifelines Alliance – ASCE, Guidelines for the design of buried steel pipe, 2001.
3. DNVGL-RP-F114, Pipe-soil interaction for submarine pipelines, 2017.
4. DNVGL-ST-F101, Submarine pipeline systems, 2017.
5. ABAQUS, Users' Manual, Simulia, Providence, RI, USA, 2014.
6. Καββαδάς Μ., Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006.
7. Μαλιάγκα Α., Διπλωματική: Υποθαλάσσιοι αγωγοί φυσικού αερίου σε διασταύρωση με ενεργά σεισμικά ρήγματα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2017.
8. Psarropoulos P. & Antoniou A., Assessment of earthquake-related geohazards and seismic design of onshore and offshore pipelines, 2016.
9. Camerlenghi, A., Urgelers, R., & Fantoni L - *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, 2010.
10. Sakellariou D., Ceramicola, S., De Martini, P. M. & Briand, F., Marine geohazards in the Mediterranean: Executive Summary, CIESM Workshop Monographs No 42, 2011.
11. Varnes D.J., "Slope movement Types and Processes", Landslides Analysis and Control, National Academy of Science, 11-33, 1978.
12. Papadopoulos, G. A., Daskalaki E., Fokaefs, A. & Giraleas, N., 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, 2007.
13. Παπαχαρισίου Στ., Διπλωματική: Φυσικοί κίνδυνοι- Διαχείριση φυσικών κινδύνων-Εφαρμογή εκτίμησης κατολισθητικής επικινδυνότητας, Κεφ. 2ο, Σελ: 30-41, Α.Π.Θ, 2008.
14. Youngs, R. Arabasz, W., Anderson, R., Ramelli et al, "A methodology for Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis", Earthquake spectra, 191-219, 2003.

15. Marinos V., Stoumpos G., Papathanassiou G., Grendas N. , Papouli D. and Papazachos C. , Landslide geohazard for pipelines of natural gas transport, Aristotle University of Thessaloniki, 2016.
16. Meyersohn, W.D., "Analytical and Design Considerations for the Seismic Response of Buried Pipelines, Thesis, Graduate School of Cornell University, January, 1991.
17. Wells, D.L and Coppersmith, K.J, "New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement" Bulletin of the Seismological Society of America, 974-1002, 1994.
18. Παπαζάχος Κ., Γ.Φ. Καρακαΐσης, Π. Μ. Χατζηδημητρίου, Εισαγωγή στη Σεισμολογία, Εκδοσεις ΖΗΤΗ, 2005.

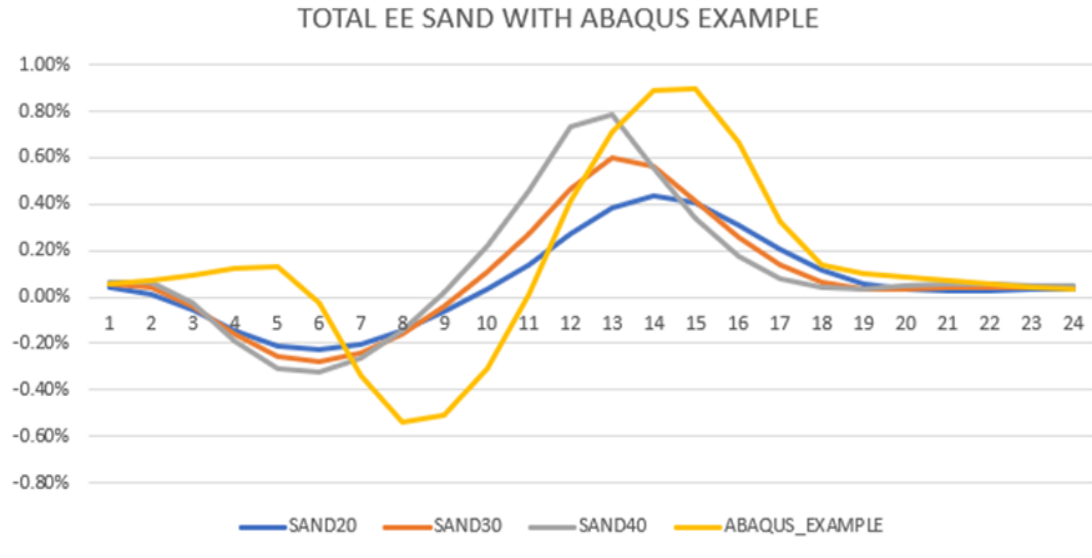
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ



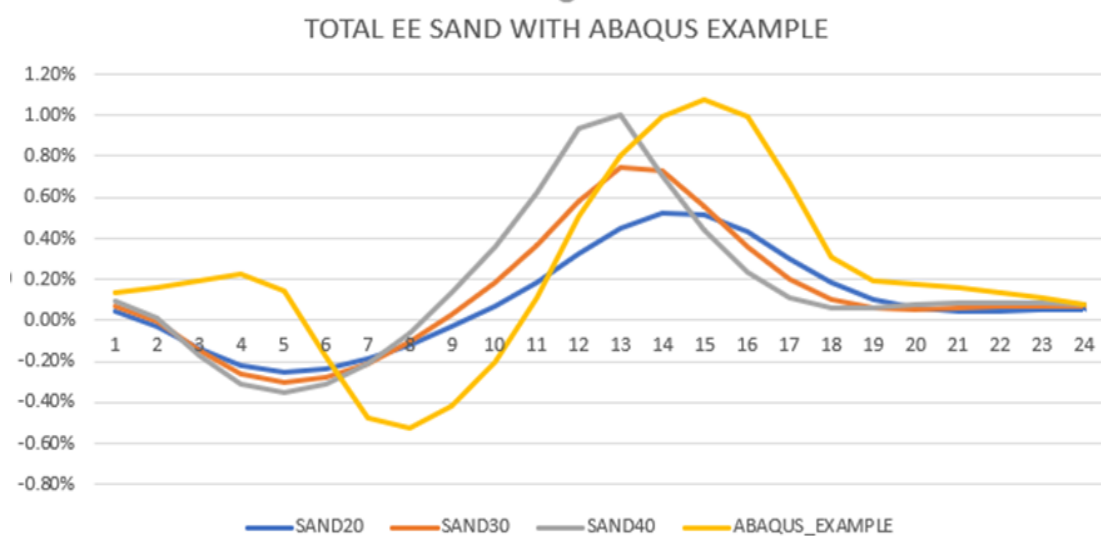
Εικόνα Π.1: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμόδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS για διπλασιασμό της μετατόπισης του ρήγματος



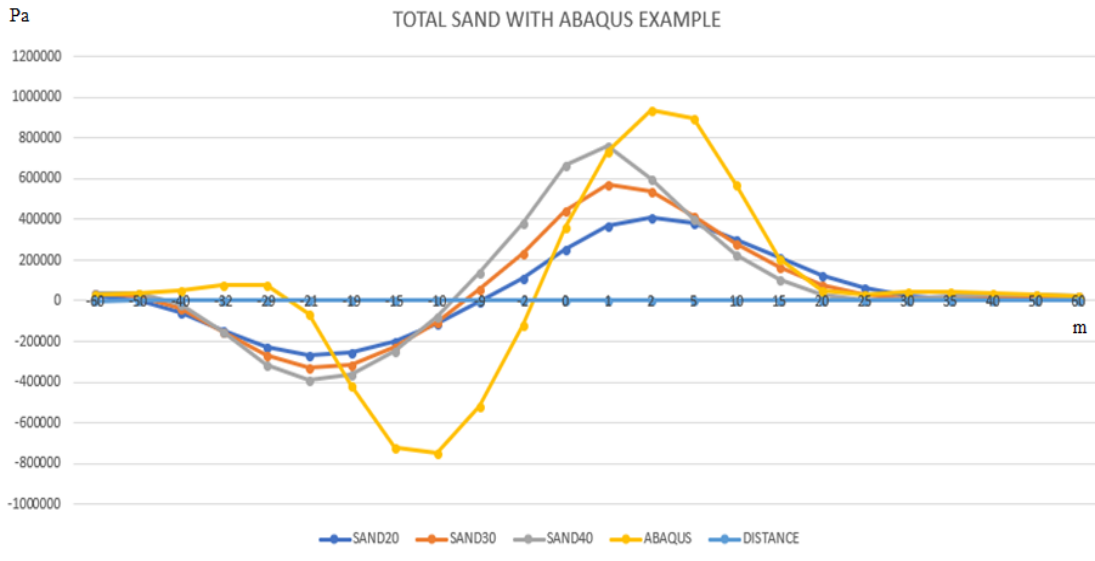
Εικόνα Π.2: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμόδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλασιασμό της μετατόπισης του ρήγματος



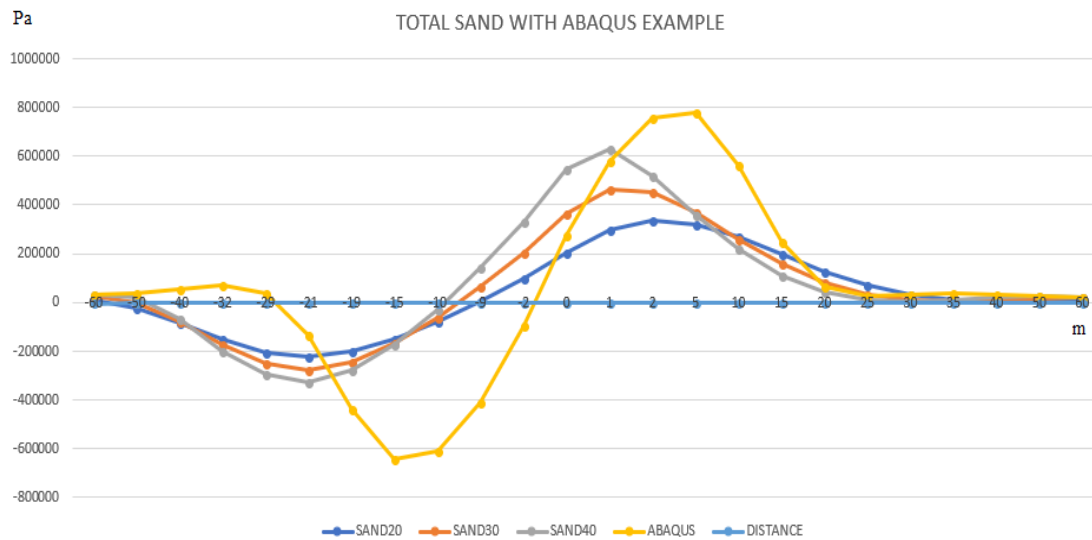
Εικόνα Π.3: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλασιασμό της μετατόπισης του ρήγματος



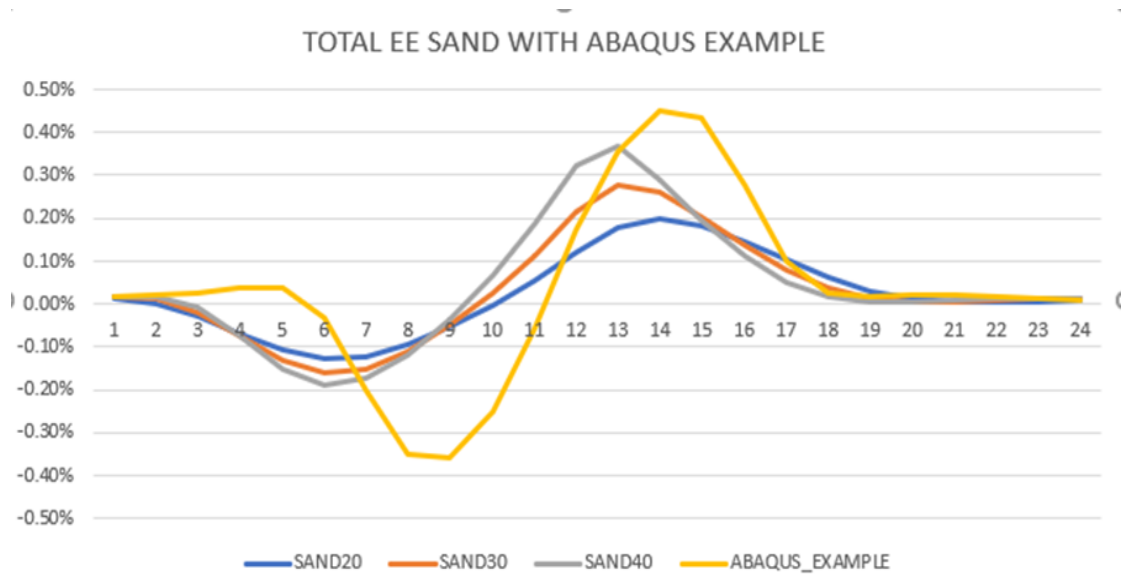
Εικόνα Π.4: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλασιασμό της μετατόπισης του ρήγματος



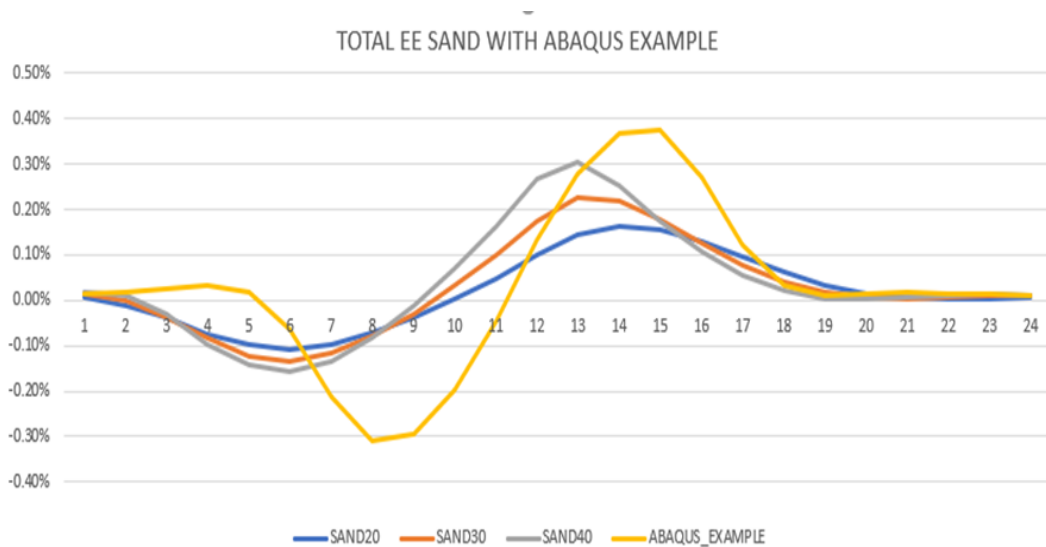
Εικόνα Π.5: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS για διπλασιασμό του πάχους τοιχώματος



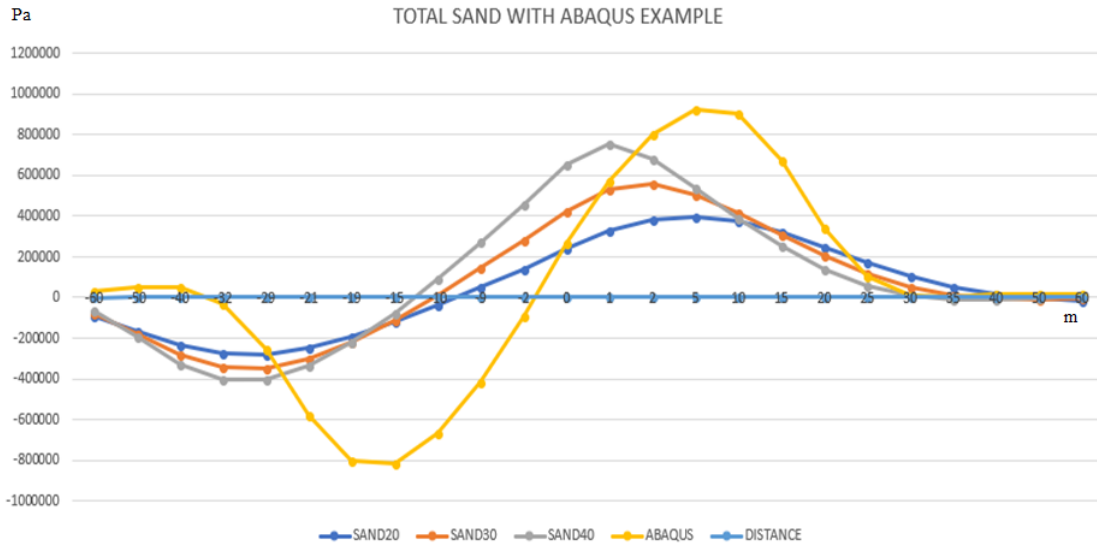
Εικόνα Π.6: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS για τριπλασιασμό του πάχους τοιχώματος



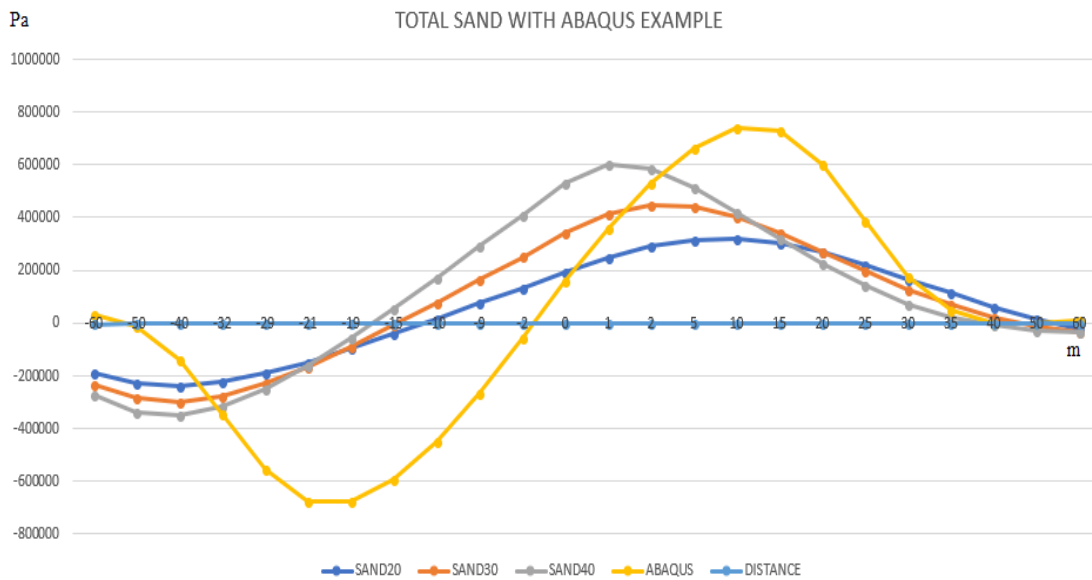
Εικόνα Π.7: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλασιασμό του πάχους τοιχώματος



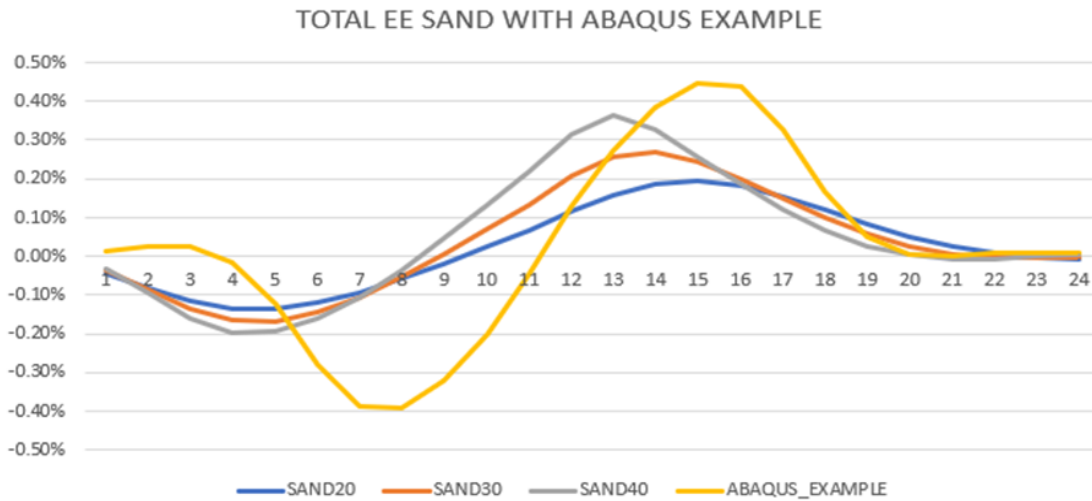
Εικόνα Π.8: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλασιασμό του πάχους τοιχώματος



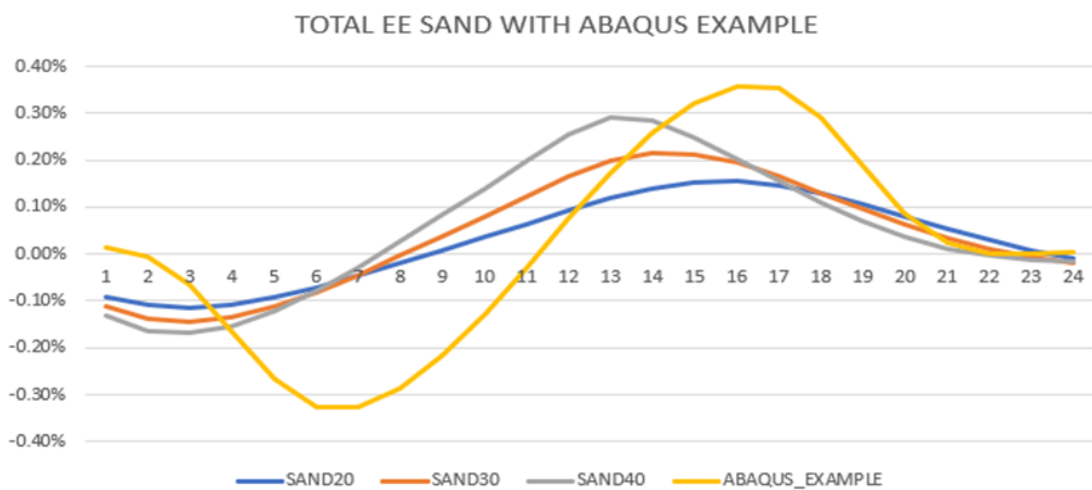
Εικόνα Π.9: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσια εξωτερική ακτίνα αγωγού



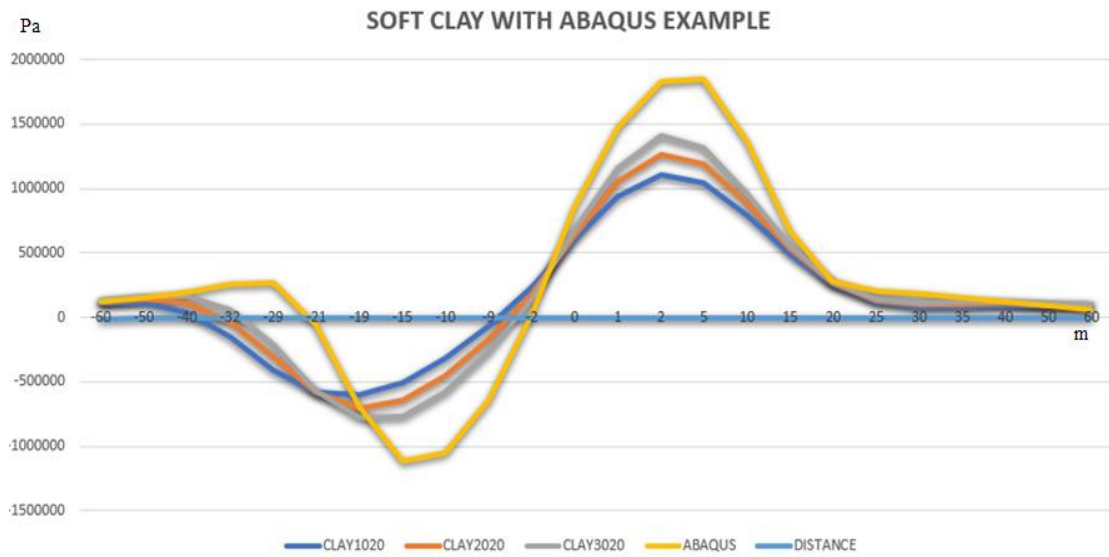
Εικόνα Π.10: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσια εξωτερική ακτίνα αγωγού



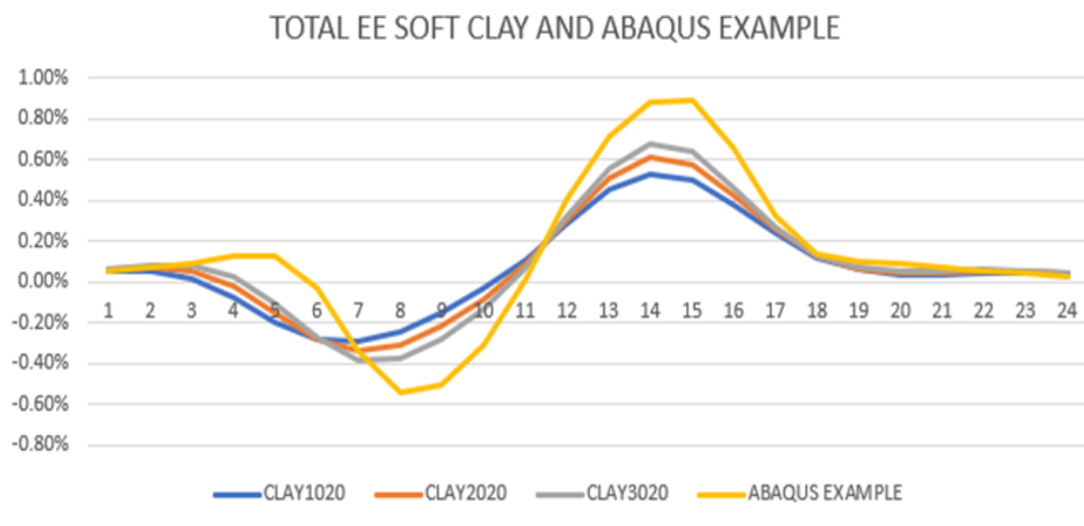
Εικόνα Π.11: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσια εξωτερική ακτίνα αγωγού



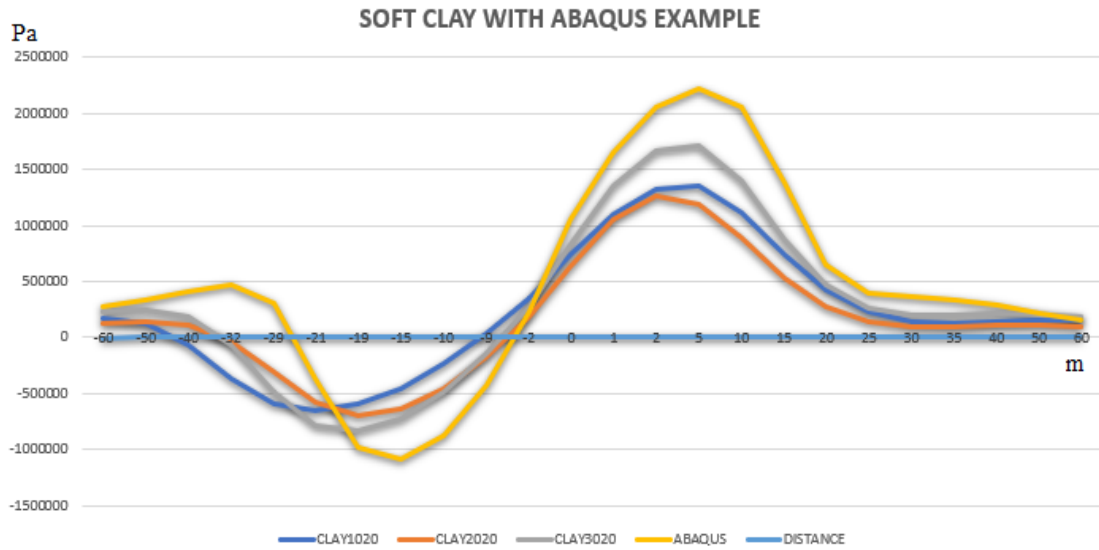
Εικόνα Π.12: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσια εξωτερική ακτίνα αγωγού



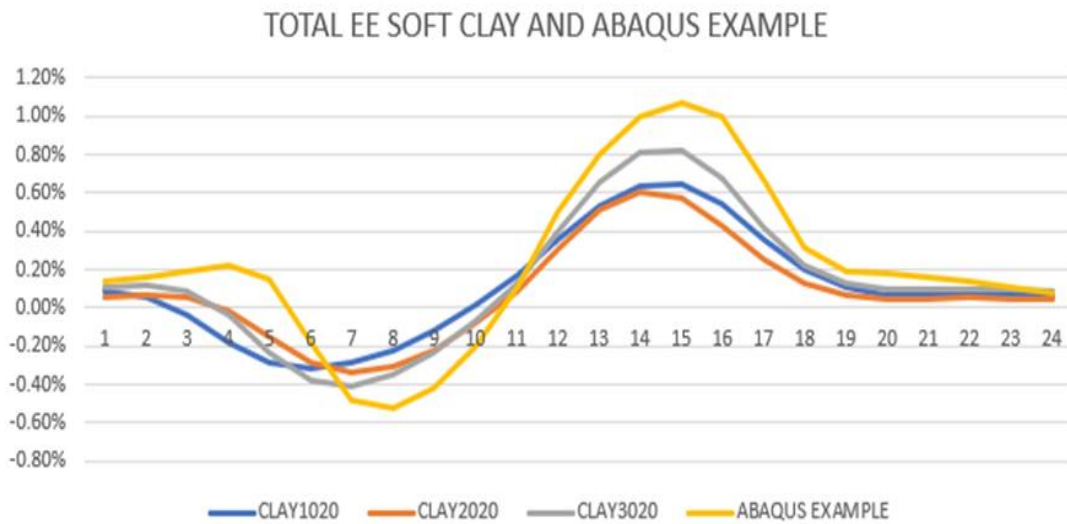
Εικόνα Π.13: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσια τιμή μετατόπισης ρήγματος



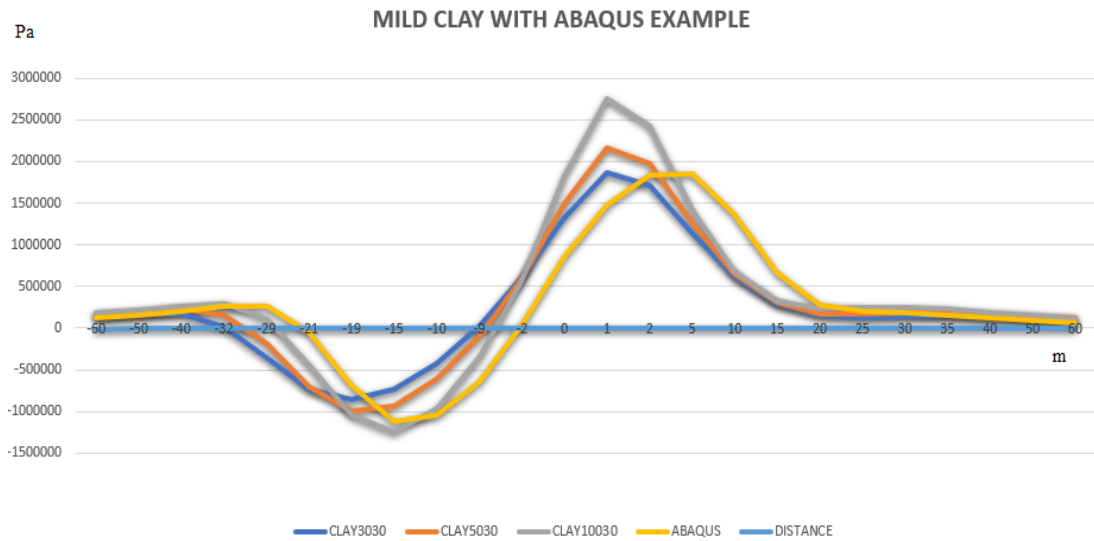
Εικόνα Π.14: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσια τιμή μετατόπισης ρήγματος



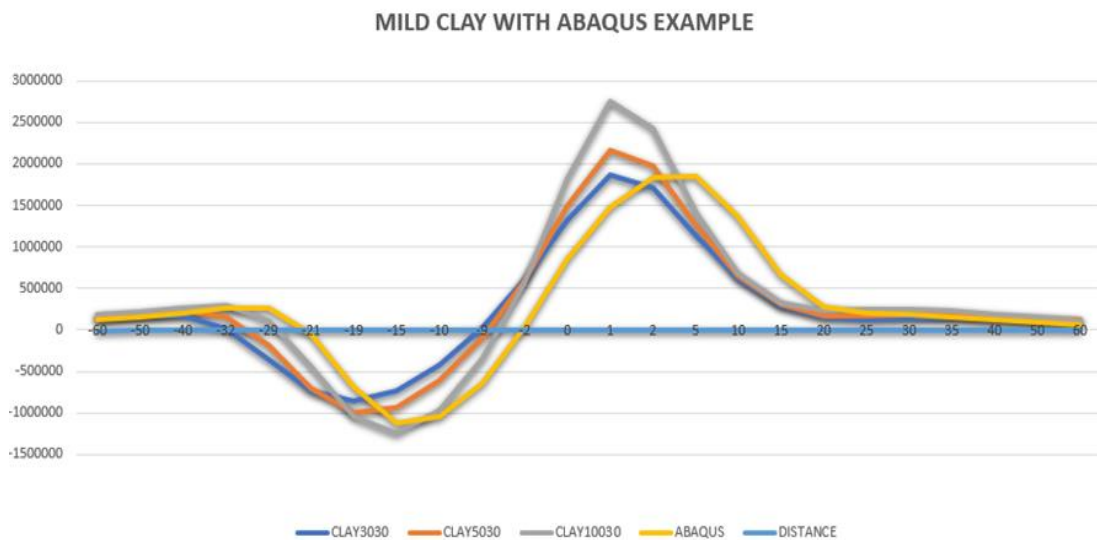
Εικόνα Π.15: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσια τιμή μετατόπισης ρήγματος



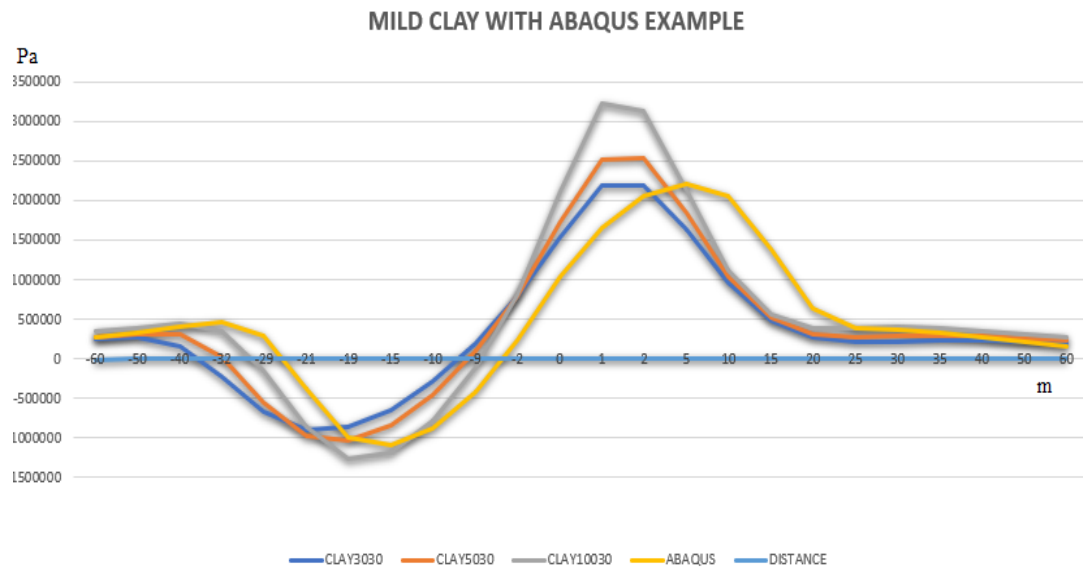
Εικόνα Π.16: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσια τιμή μετατόπισης ρήγματος



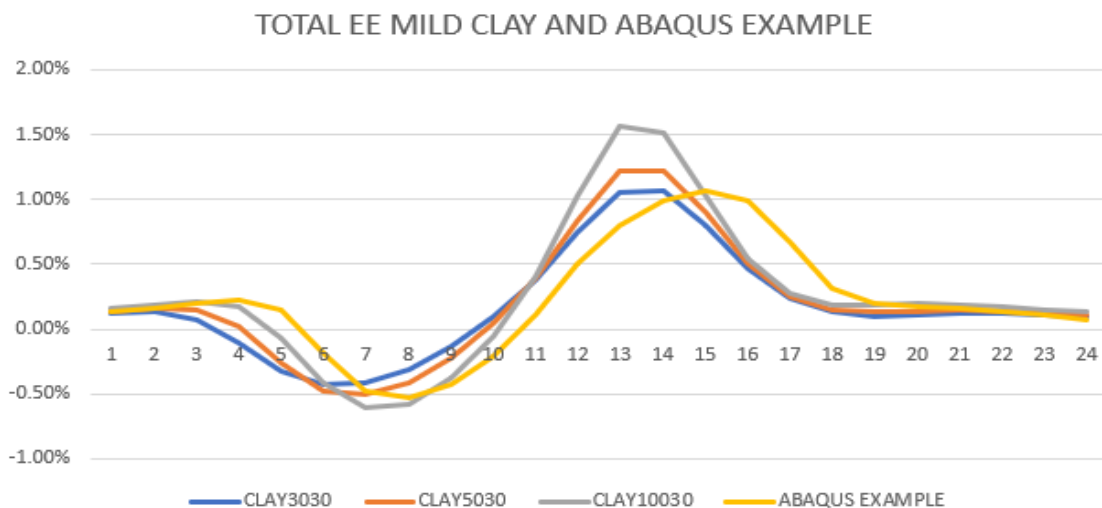
Εικόνα Π.17: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσια τιμή μετατόπισης ρήγματος



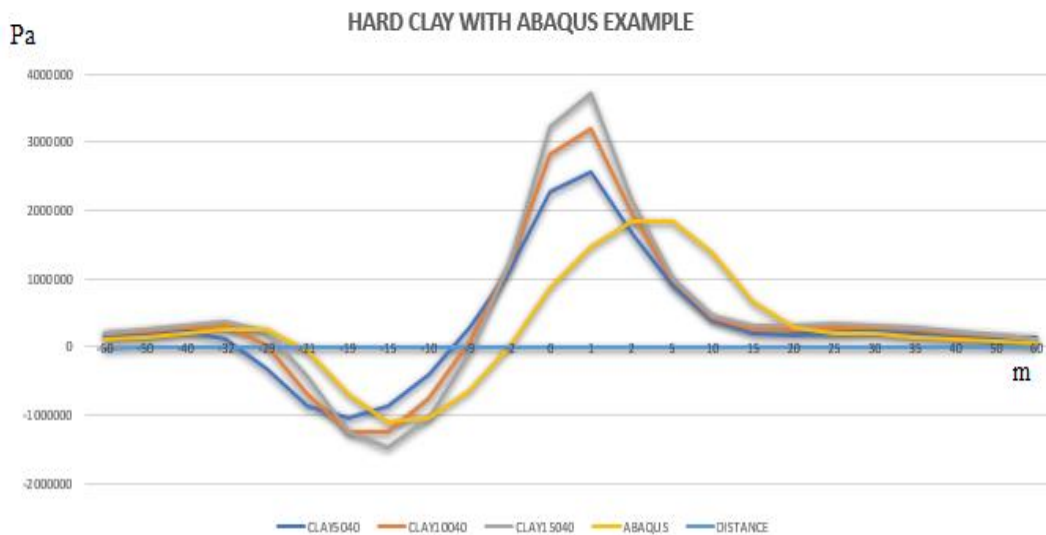
Εικόνα Π.18: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσια τιμή μετατόπισης ρήγματος



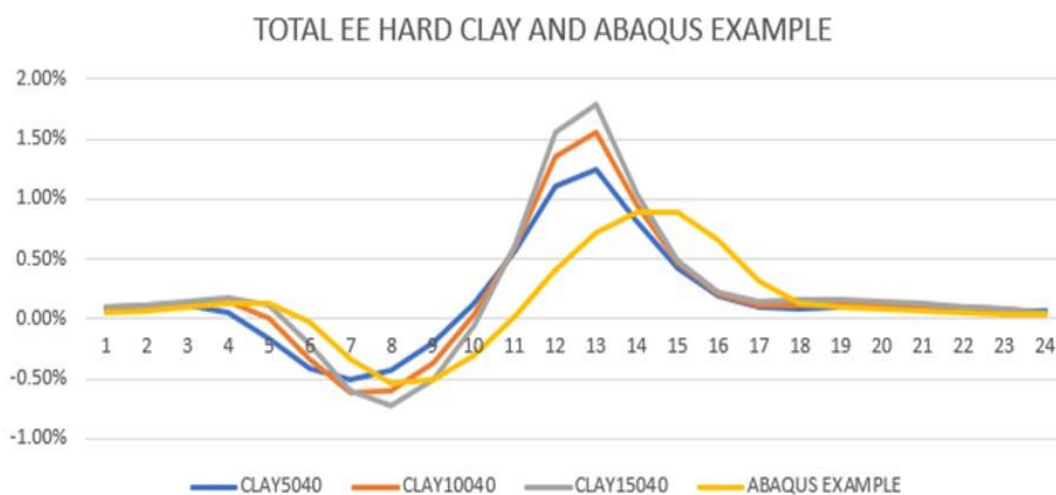
Εικόνα Π.19: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσια τιμή μετατόπισης ρήγματος



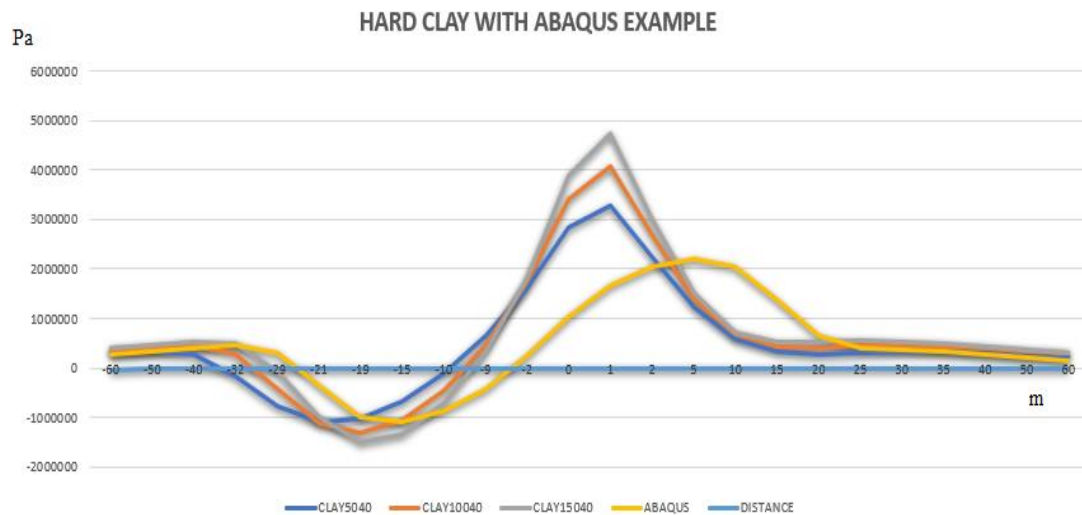
Εικόνα Π.20: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσια τιμή μετατόπισης ρήγματος



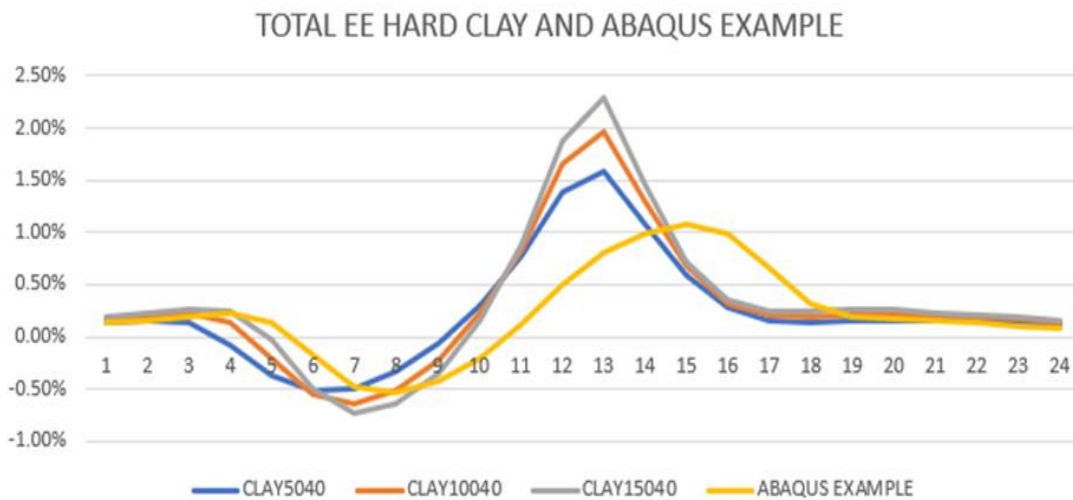
Εικόνα Π.21: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσια τιμή μετατόπισης ρήγματος



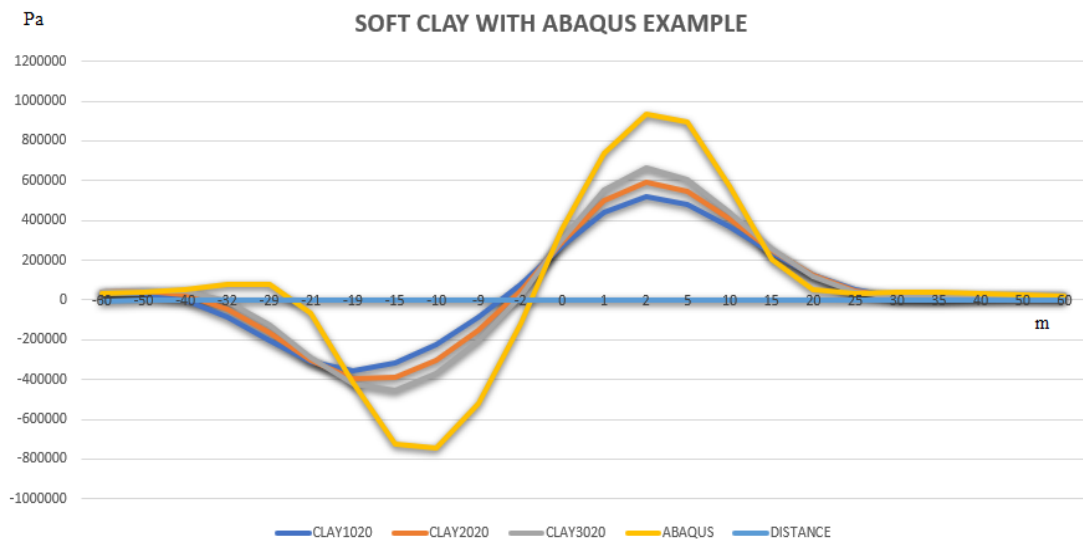
Εικόνα Π.22: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσια τιμή μετατόπισης ρήγματος



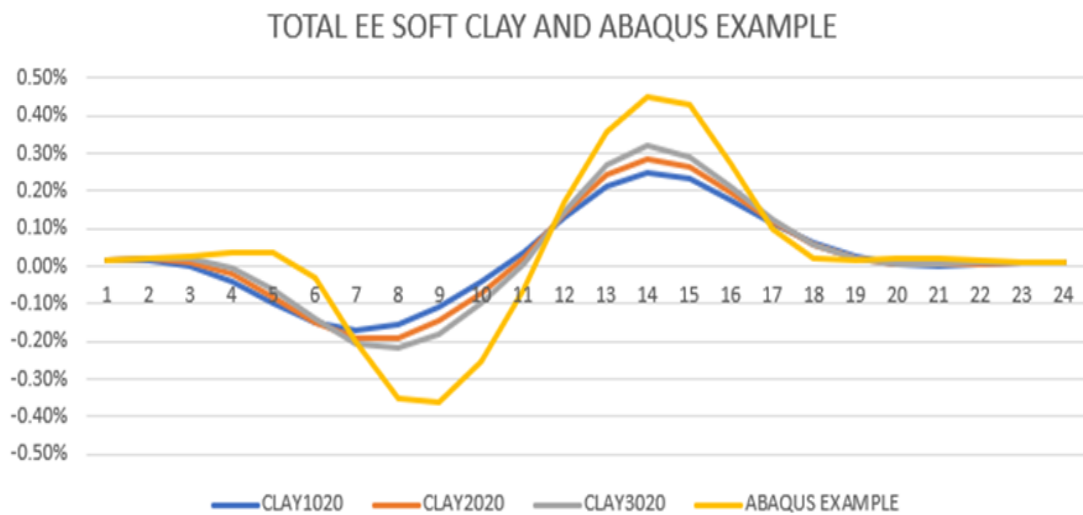
Εικόνα Π.23: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσια τιμή μετατόπισης ρήγματος



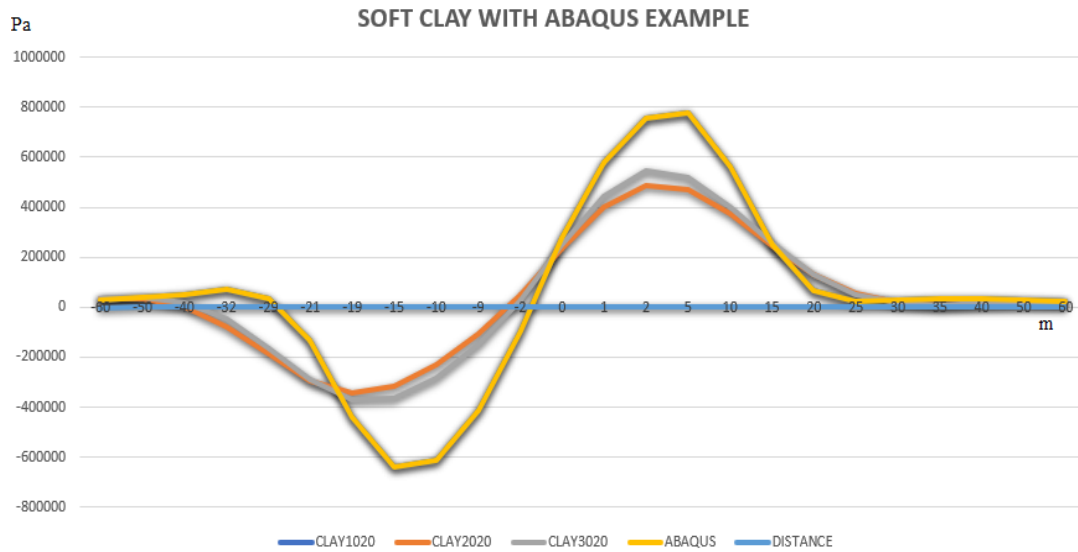
Εικόνα Π.24: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσια τιμή μετατόπισης ρήγματος



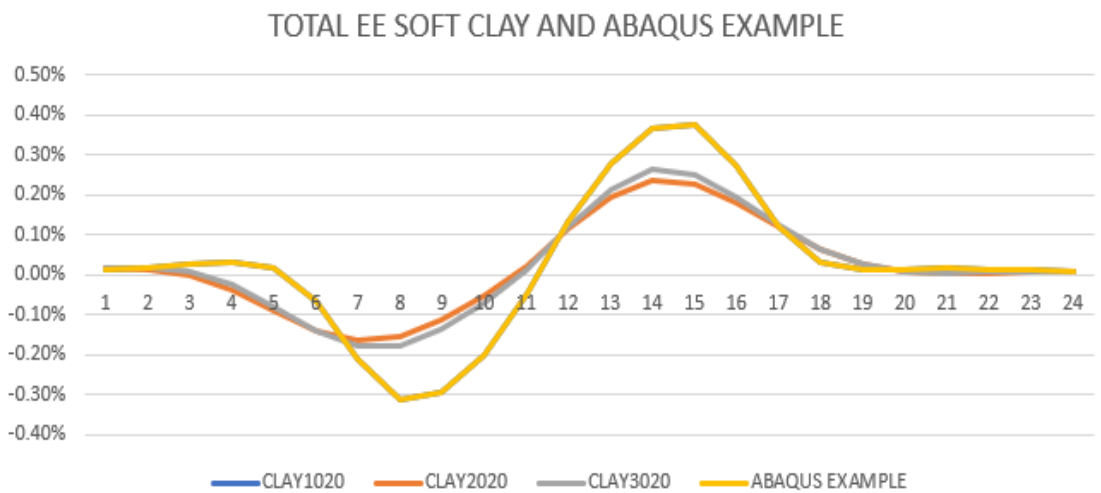
Εικόνα Π.25: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσια τιμή πάχους τοιχώματος αγωγού



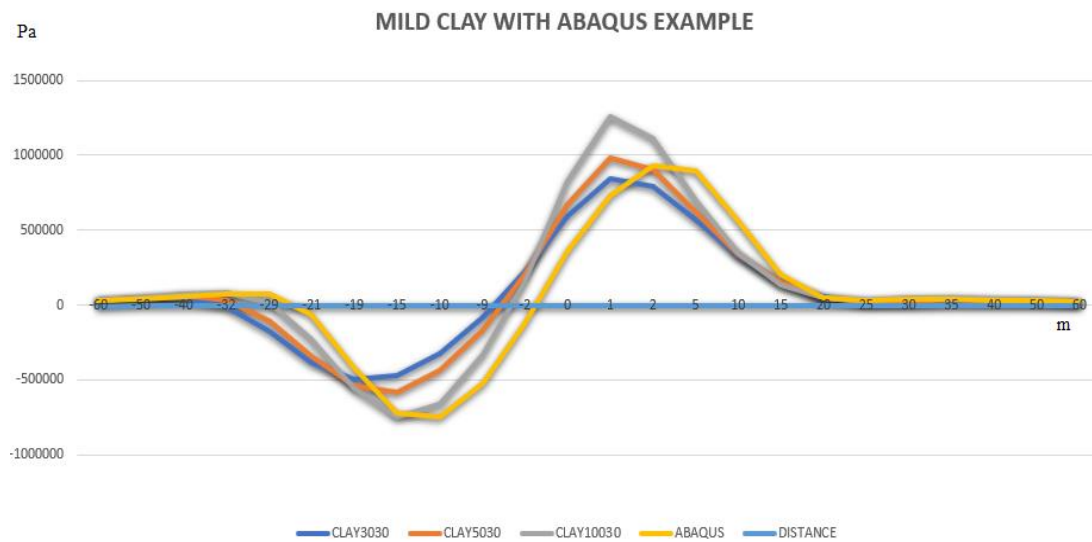
Εικόνα Π.26: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



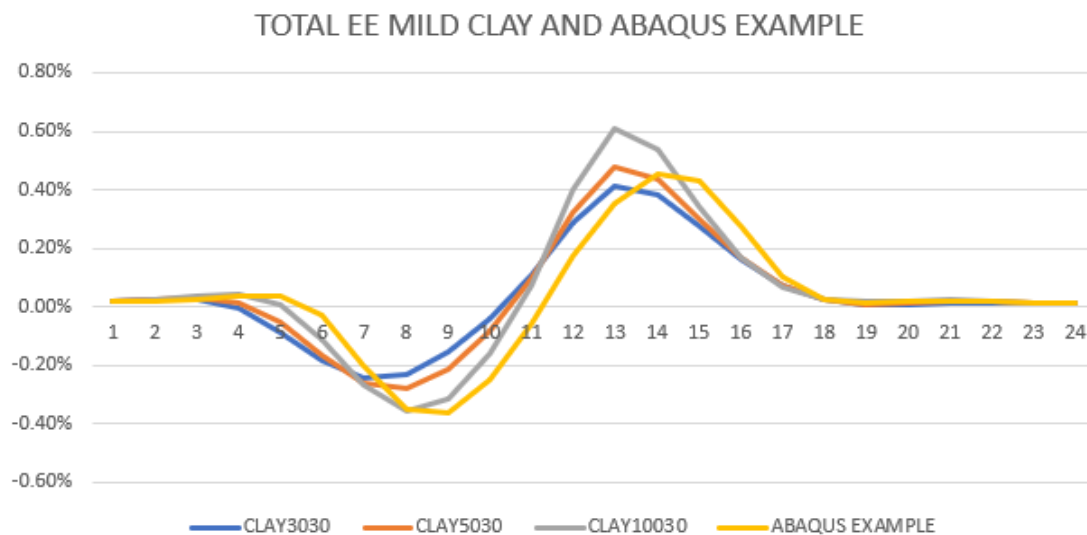
Εικόνα Π.27: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσια τιμή πάχους τοιχώματος αγωγού



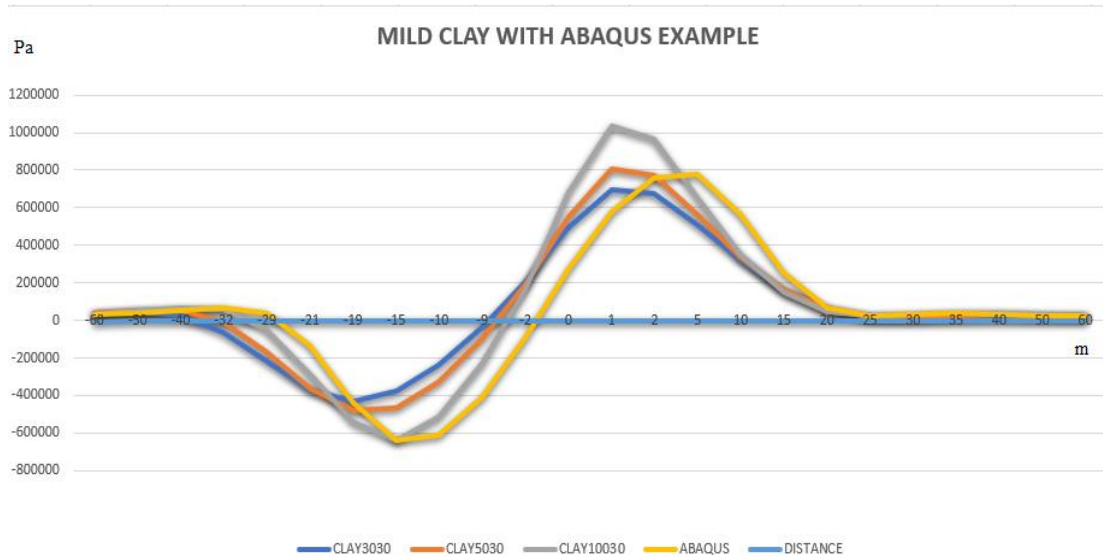
Εικόνα Π.28: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



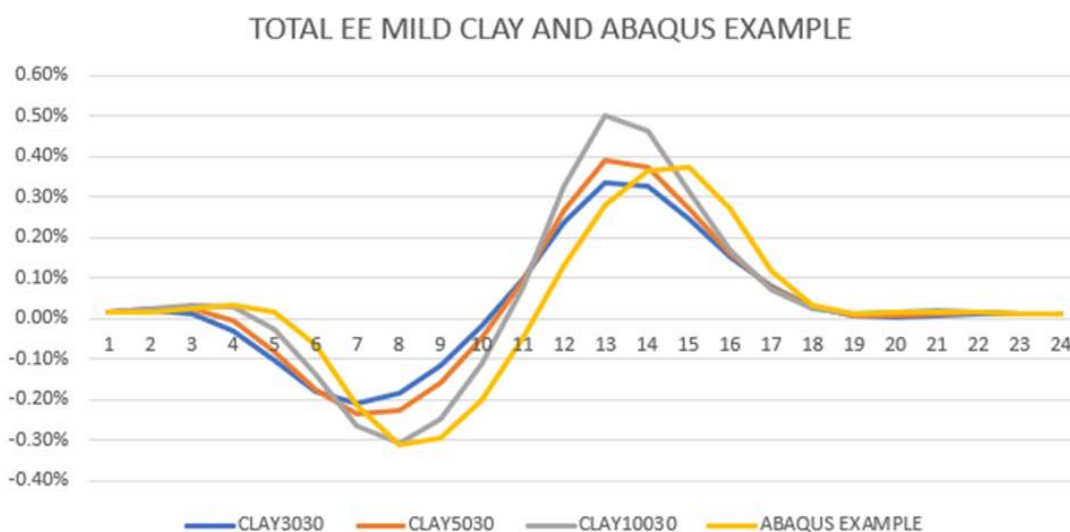
Εικόνα Π.29: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσια τιμή πάχους τοιχώματος αγωγού



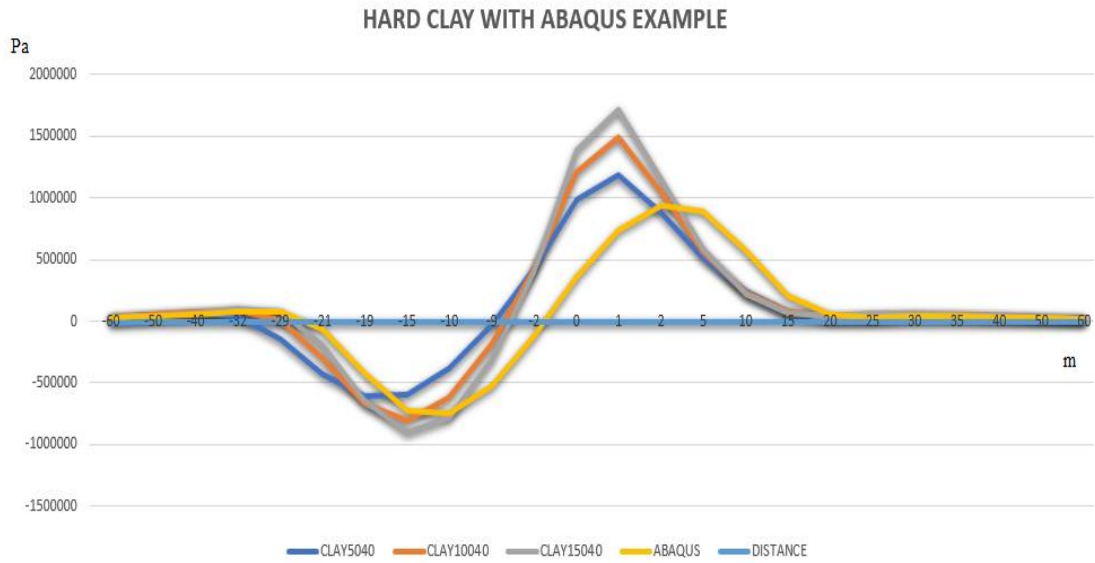
Εικόνα Π.30: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



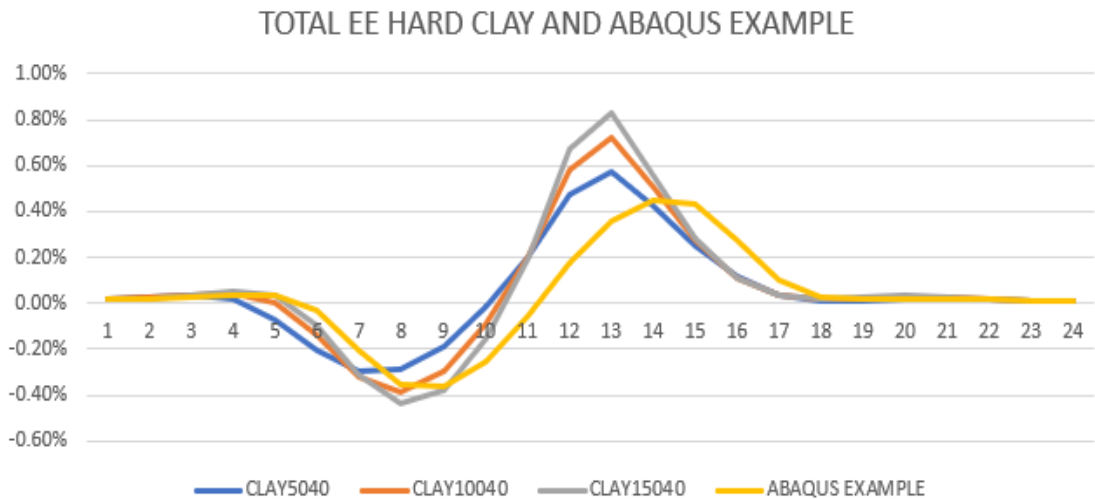
Εικόνα Π.31: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσια τιμή πάχους τοιχώματος αγωγού



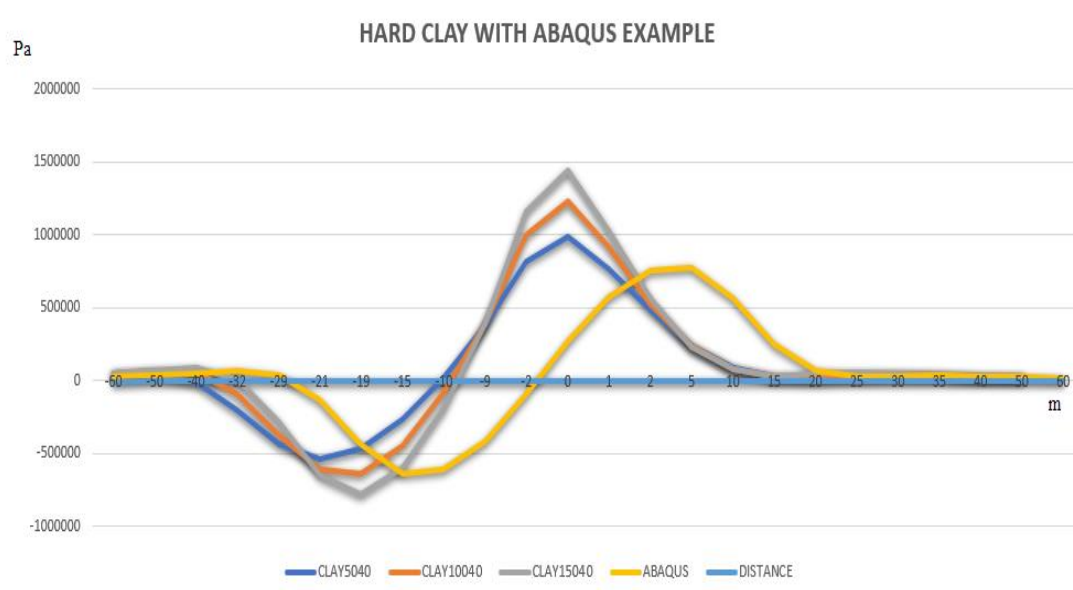
Εικόνα Π.32 Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



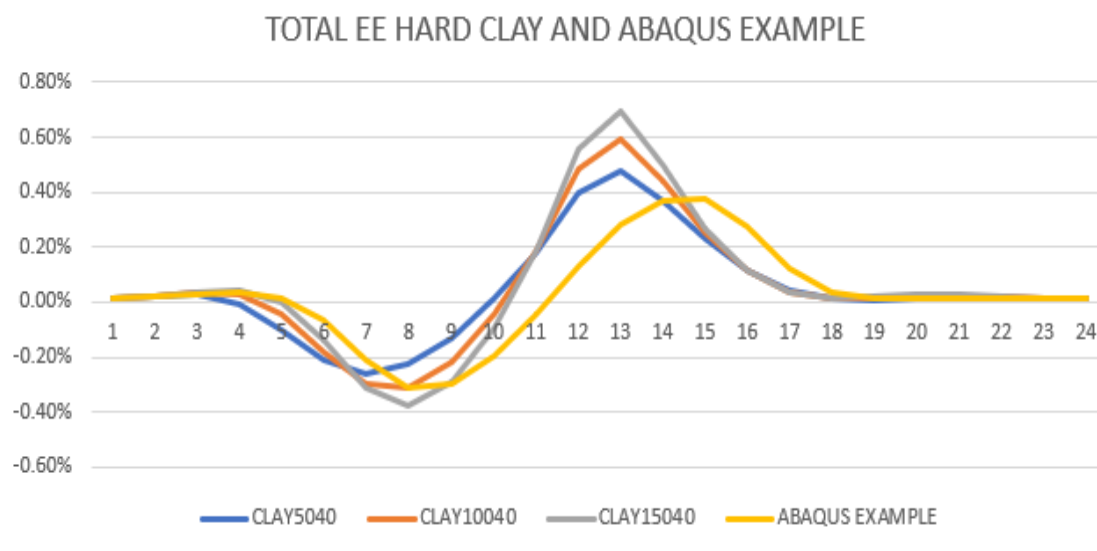
Εικόνα Π.33: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσια τιμή πάχους τοιχώματος αγωγού



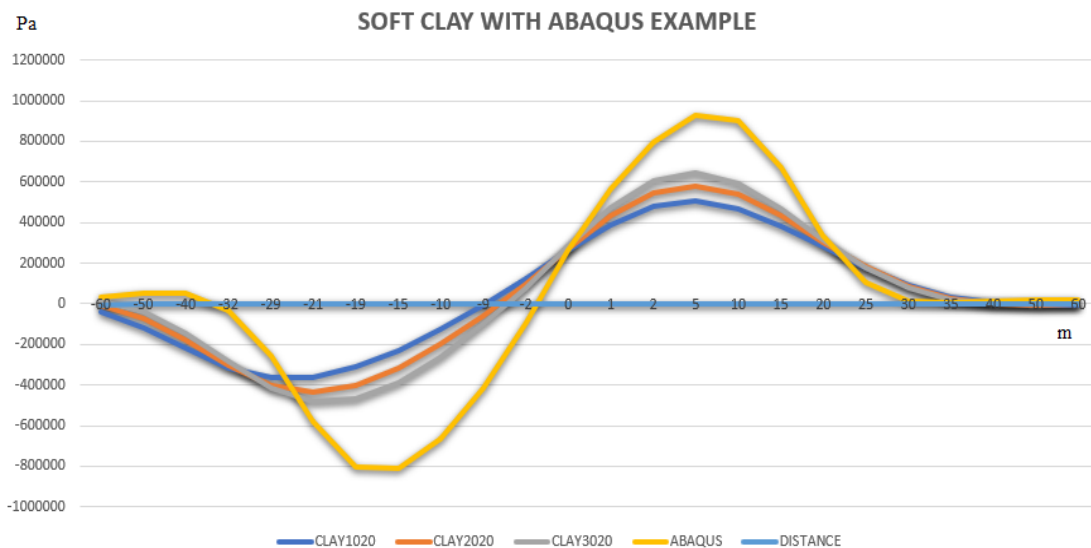
Εικόνα Π.34: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



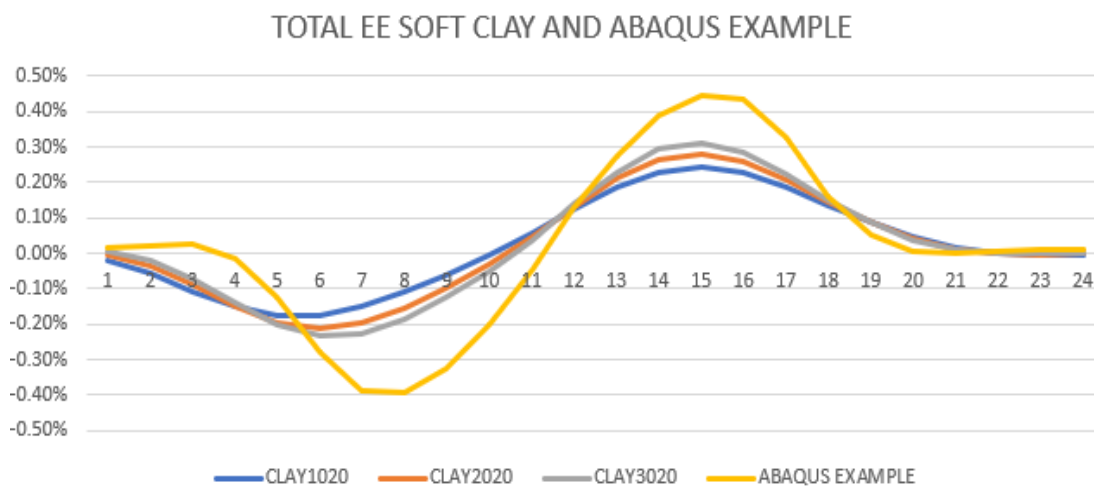
Εικόνα Π.35: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσια τιμή πάχους τοιχώματος αγωγού



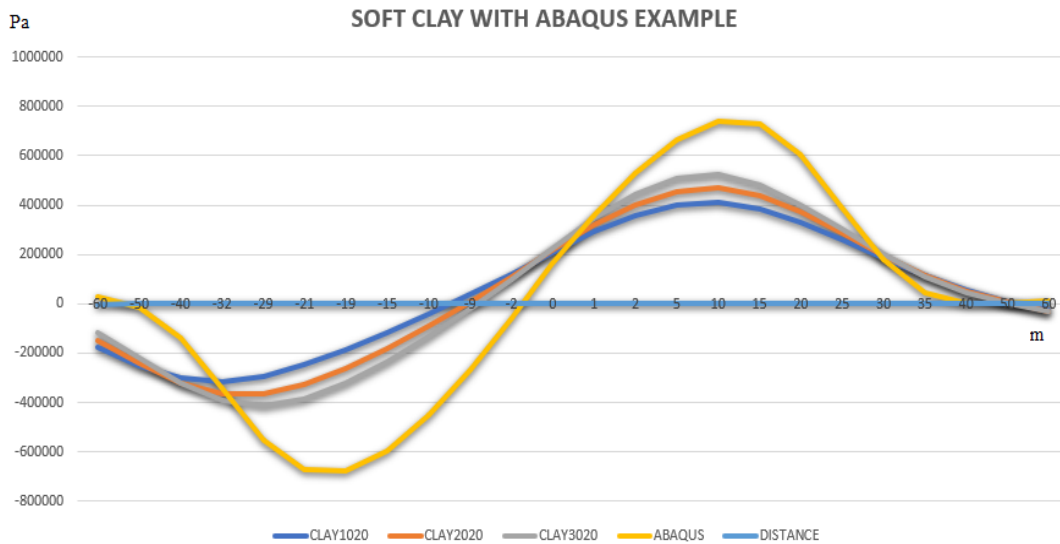
Εικόνα Π.36: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



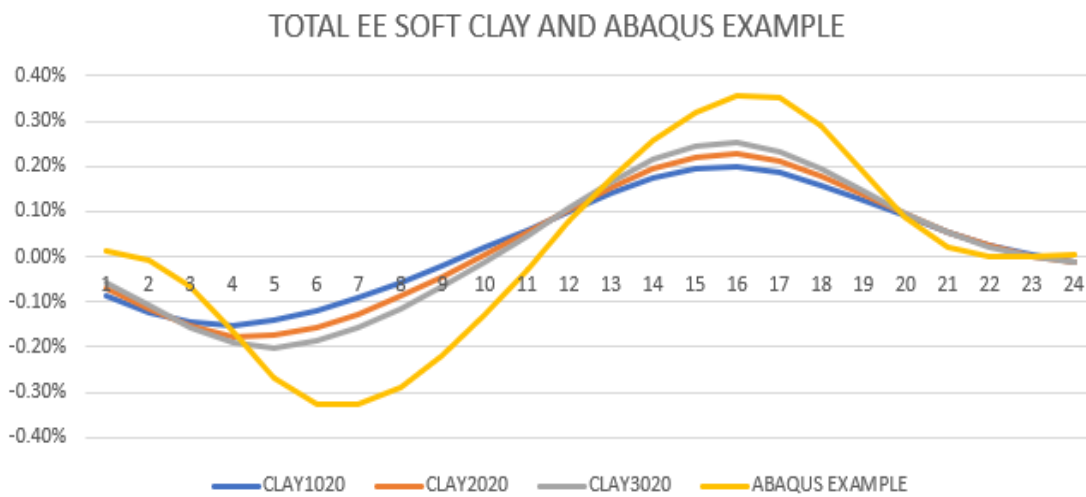
Εικόνα Π.37: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσια τιμή εξωτερικής ακτίνας αγωγού



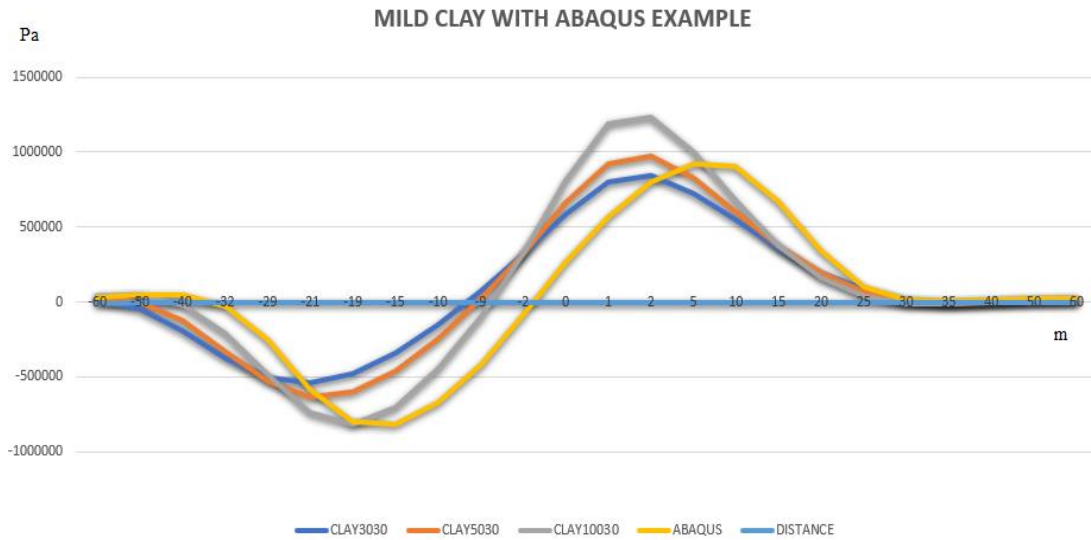
Εικόνα Π.38: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσια τιμή εξωτερικής ακτίνας αγωγού



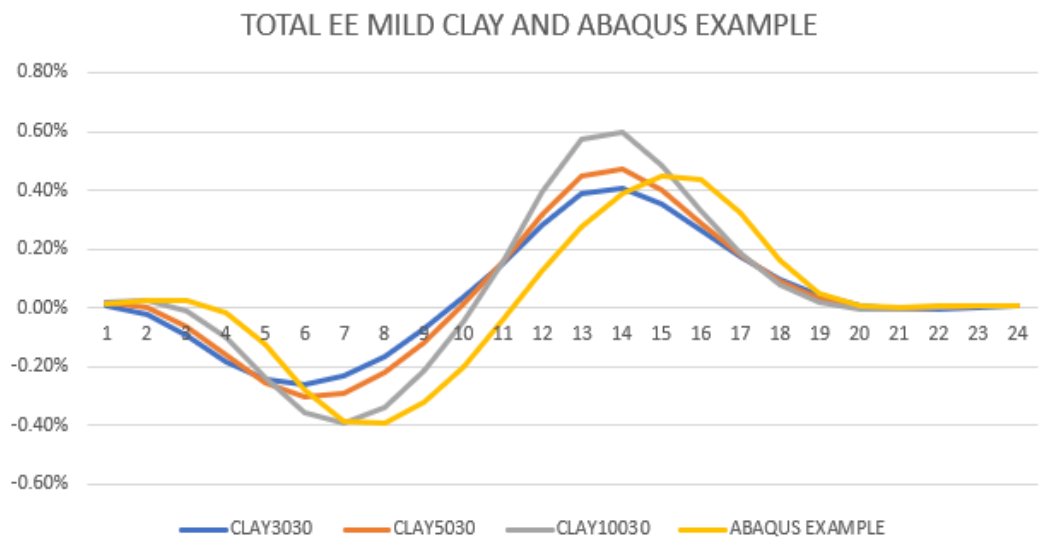
Εικόνα Π.39: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσια τιμή εξωτερικής ακτίνας αγωγού



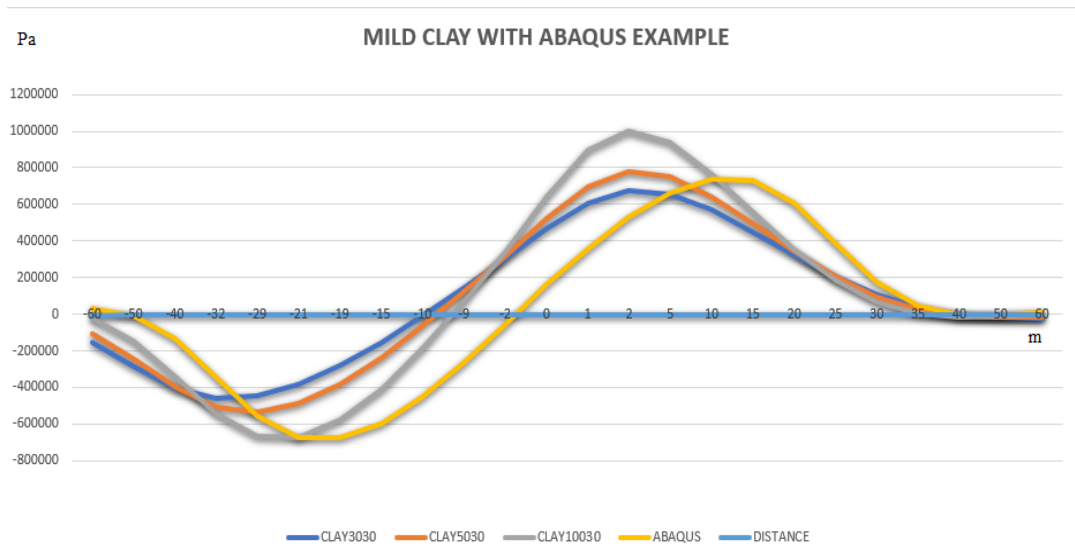
Εικόνα Π.40: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσια τιμή εξωτερικής ακτίνας αγωγού



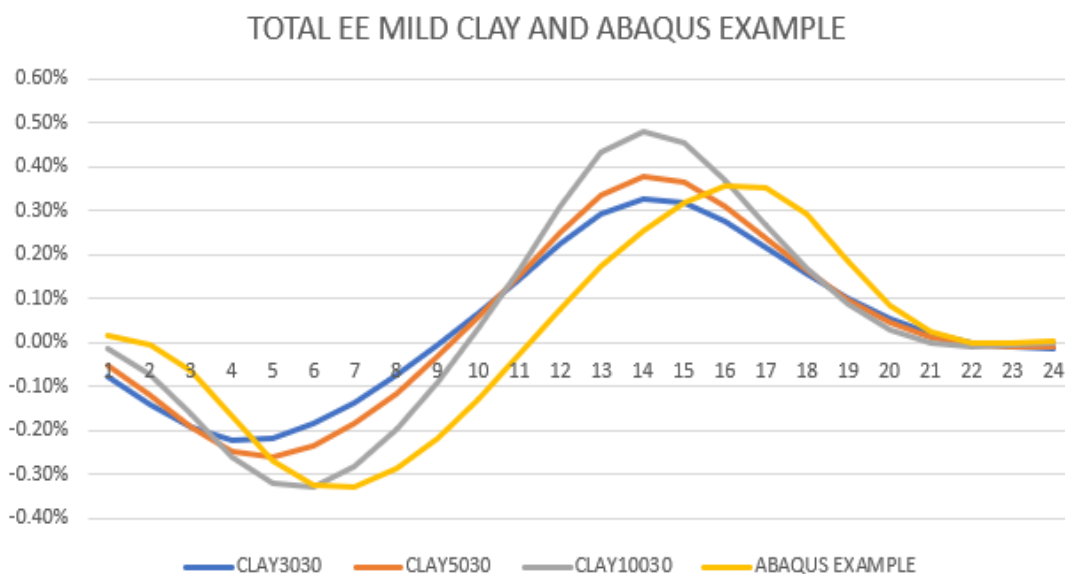
Εικόνα Π.41: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσια τιμή εξωτερικής ακτίνας αγωγού



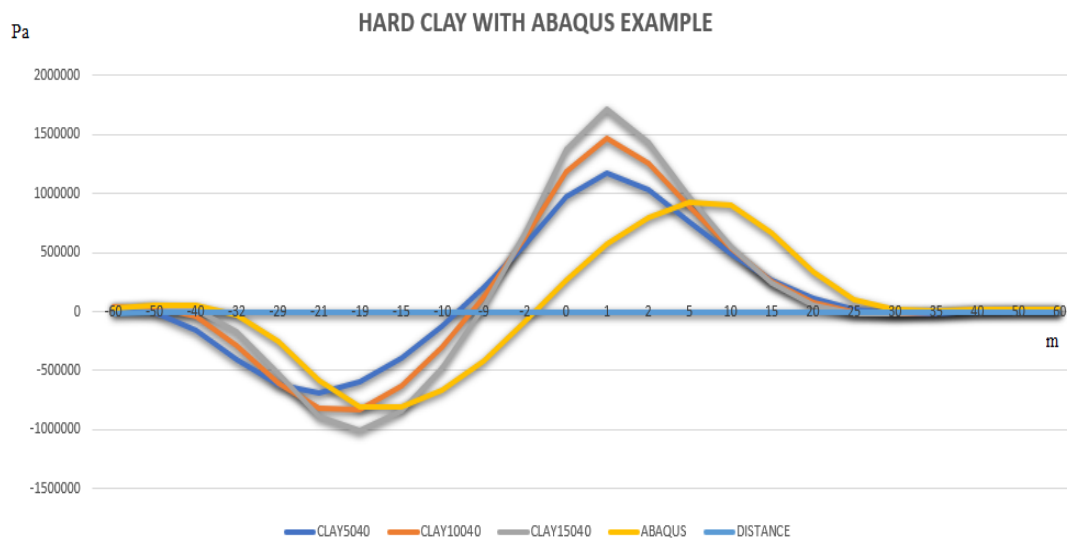
Εικόνα Π.42: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσια τιμή εξωτερικής ακτίνας αγωγού



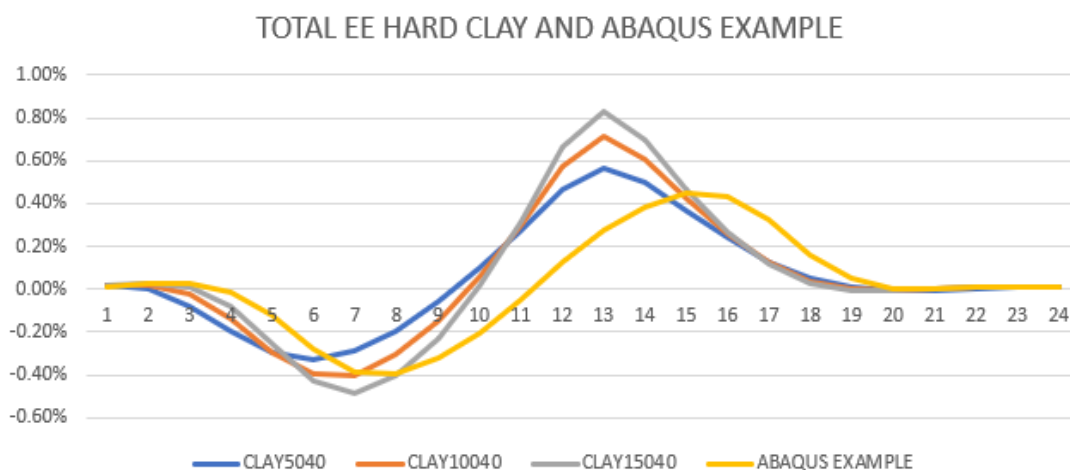
Εικόνα Π.43: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσια τιμή εξωτερικής ακτίνας αγωγού



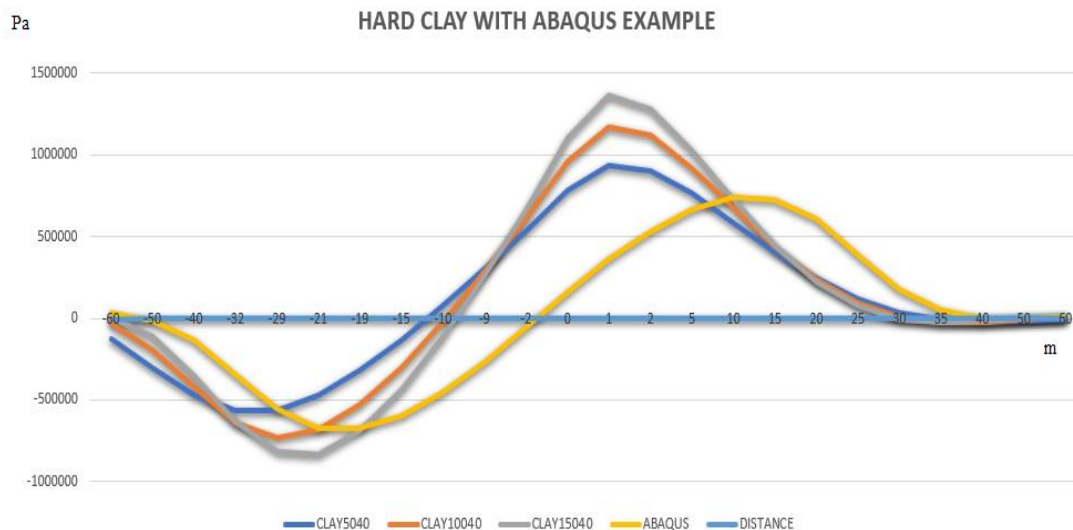
Εικόνα Π.44: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσια τιμή εξωτερικής ακτίνας αγωγού



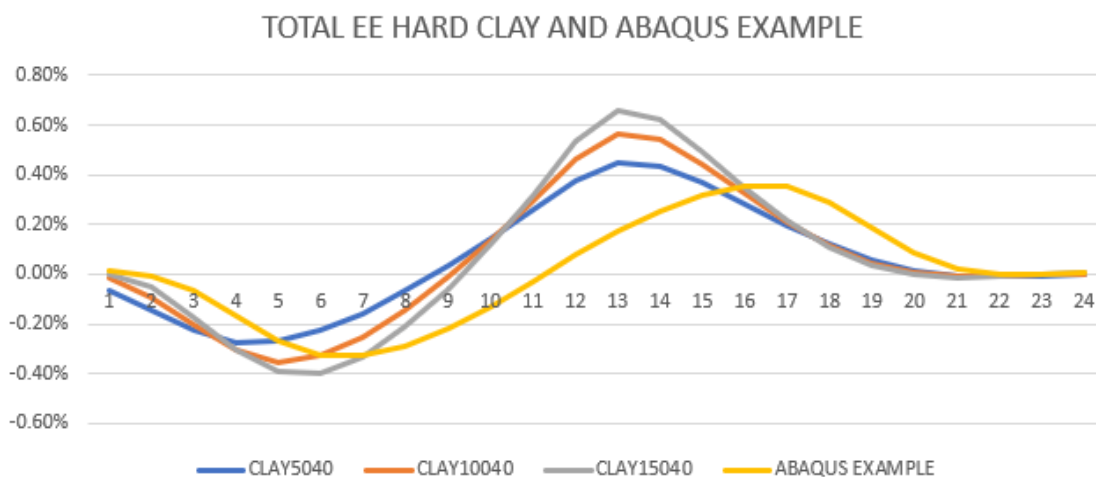
Εικόνα Π.45: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για διπλάσια τιμή εξωτερικής ακτίνας αγωγού



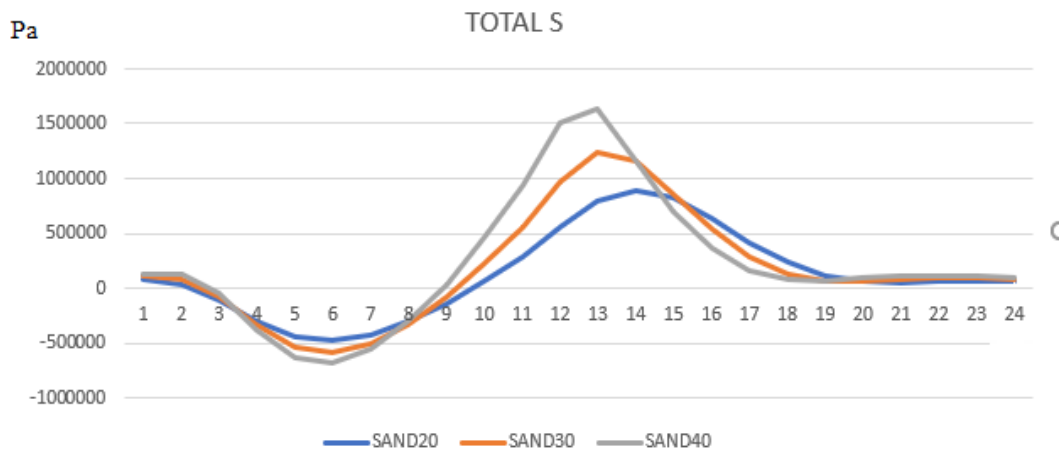
Εικόνα Π.46: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS για διπλάσια τιμή εξωτερικής ακτίνας αγωγού



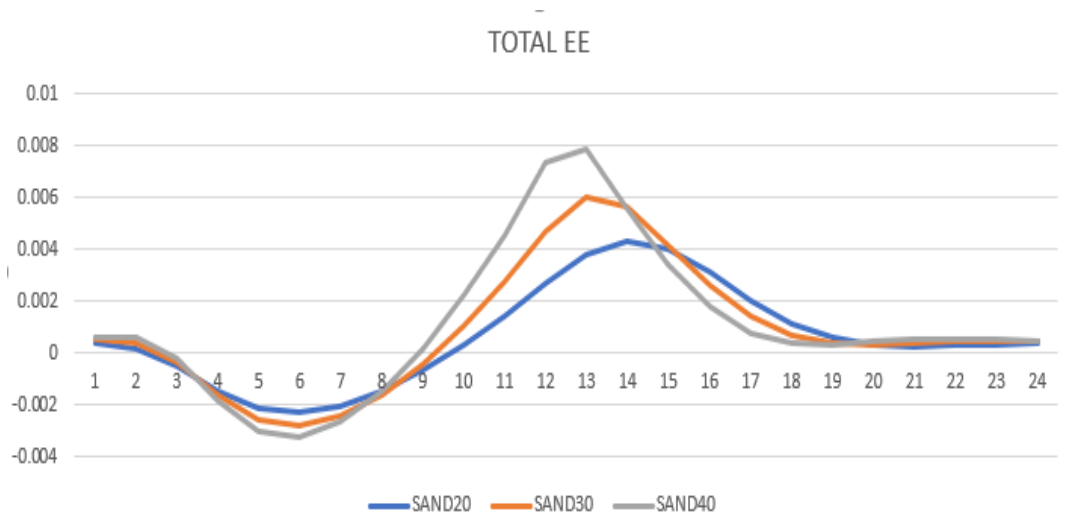
Εικόνα Π.47: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS, για τριπλάσια τιμή εξωτερικής ακτίνας αγωγού



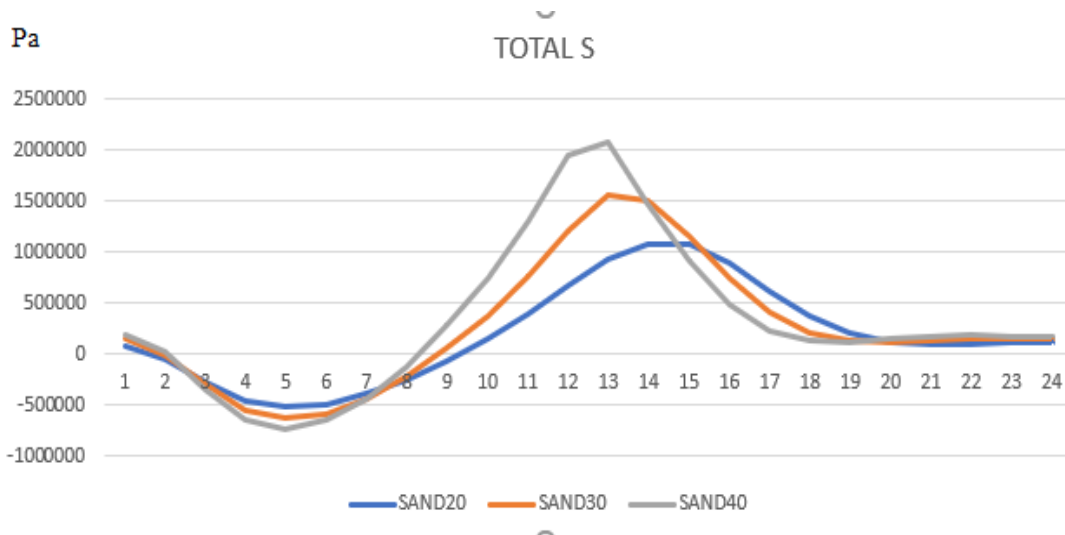
Εικόνα Π.48: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, σε σύγκριση με παράδειγμα από το πρόγραμμα ABAQUS για τριπλάσια τιμή εξωτερικής ακτίνας αγωγού



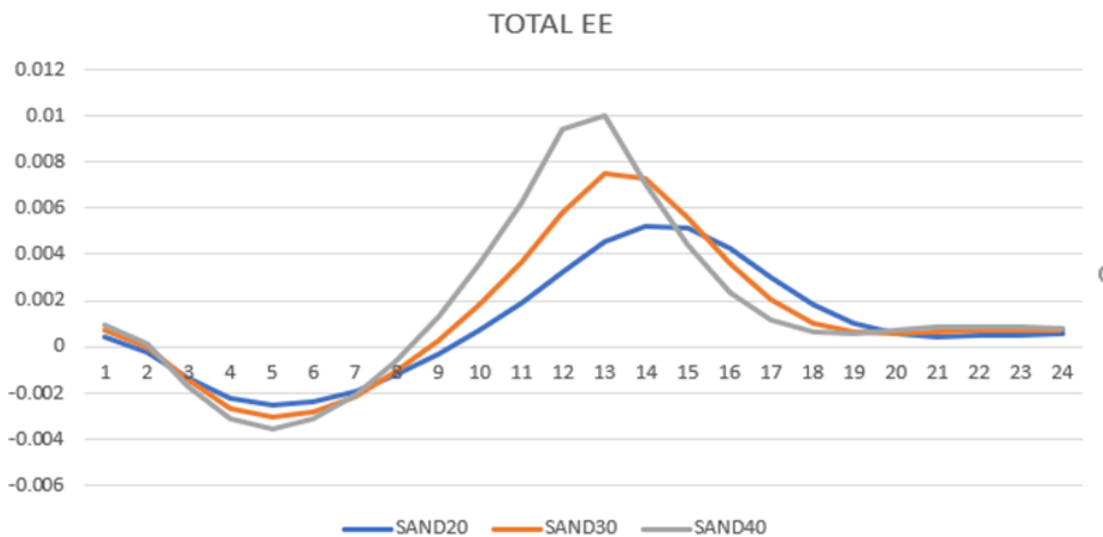
Εικόνα Π.49: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλασιασμό της μετακίνησης του ρήγματος



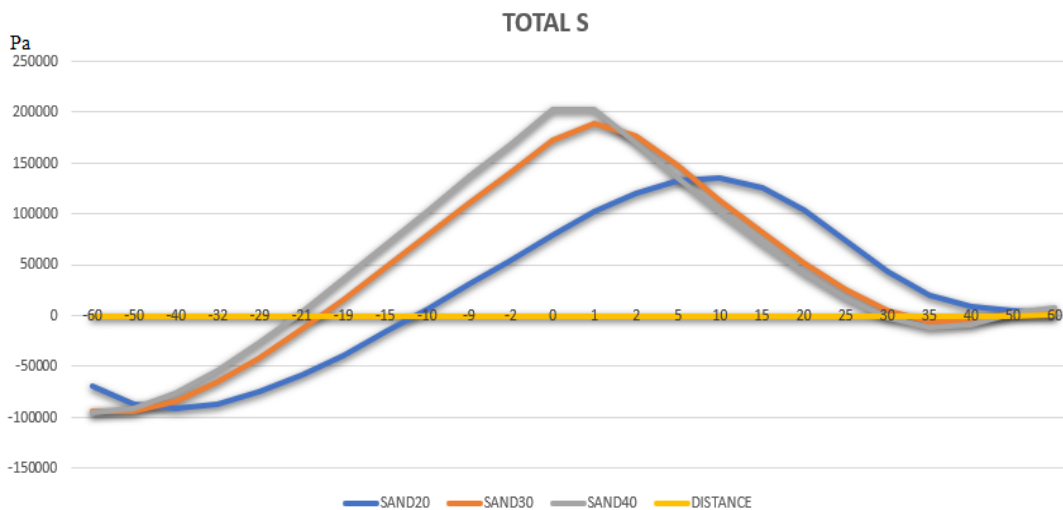
Εικόνα Π.50: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλασιασμό της μετακίνησης του ρήγματος



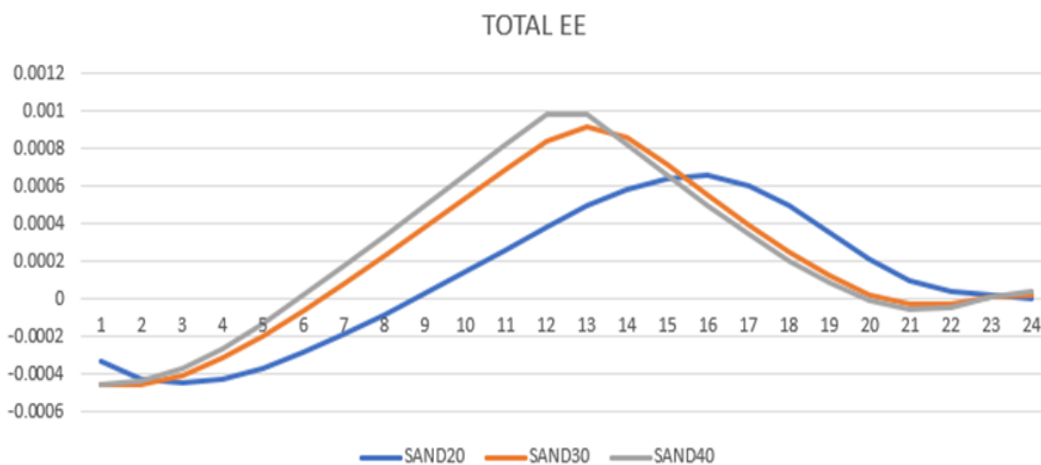
Εικόνα Π.51: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλασιασμό της μετακίνησης του ρήγματος



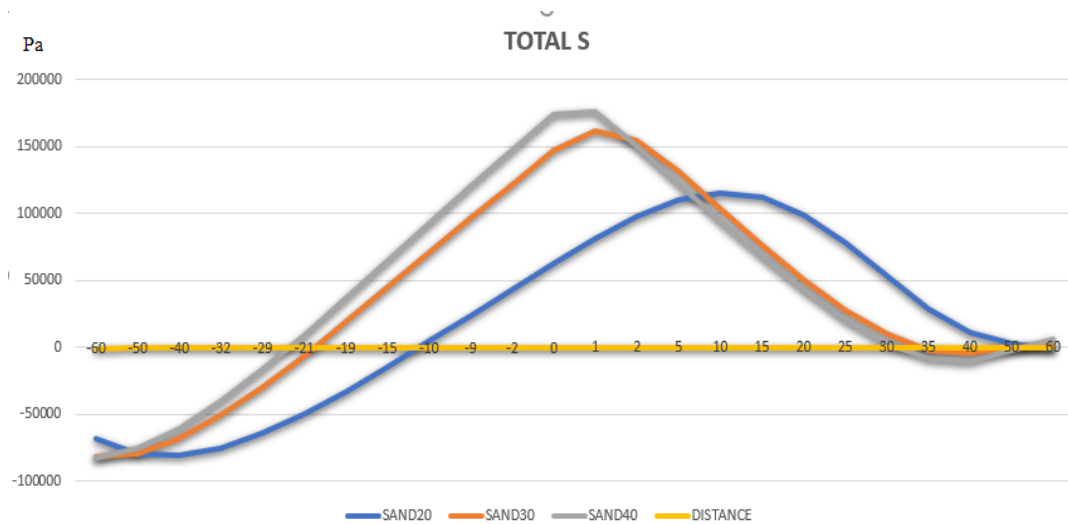
Εικόνα Π.52: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλασιασμό της μετακίνησης του ρήγματος



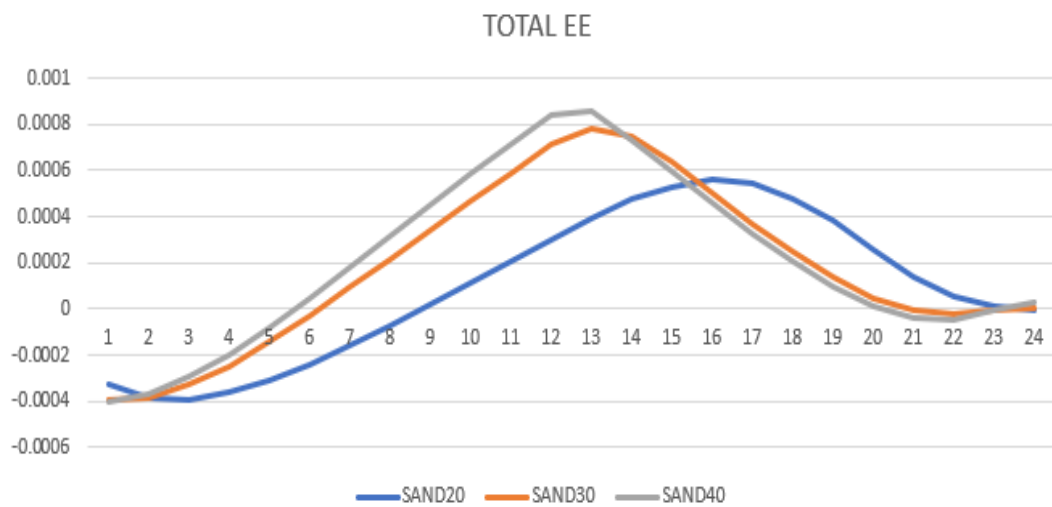
Εικόνα Π.53: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλασιασμό του πάχους τοιχώματος



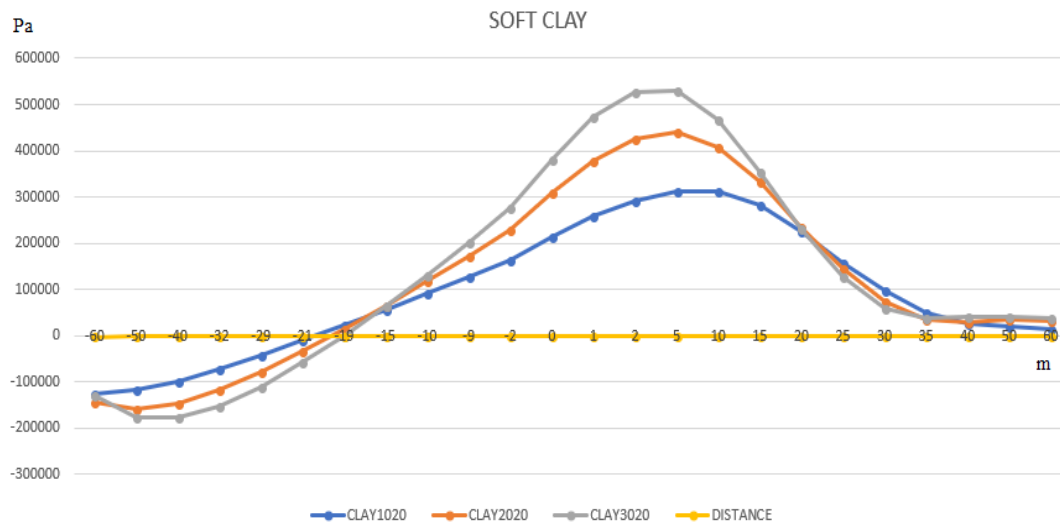
Εικόνα Π.54: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλασιασμό του πάχους τοιχώματος



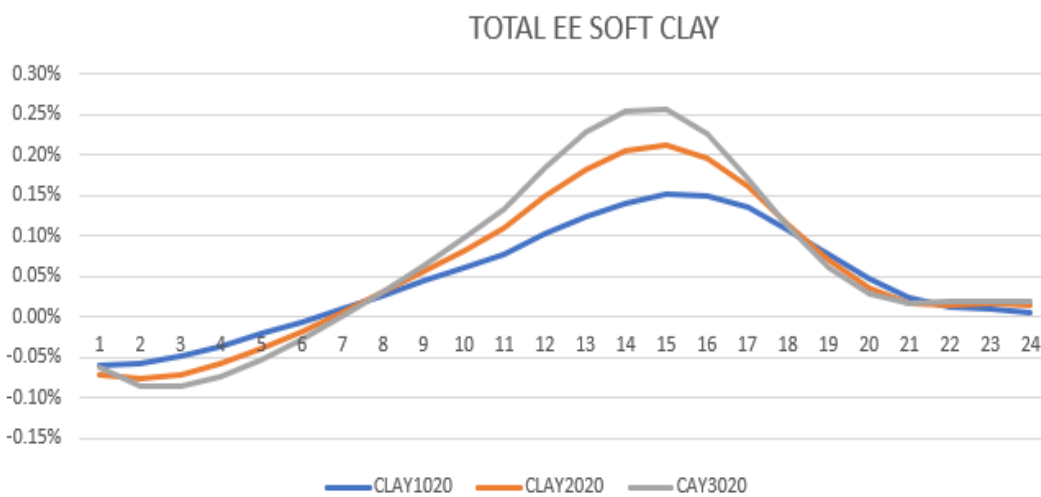
Εικόνα Π.55: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλασιασμό του πάχους τοιχώματος



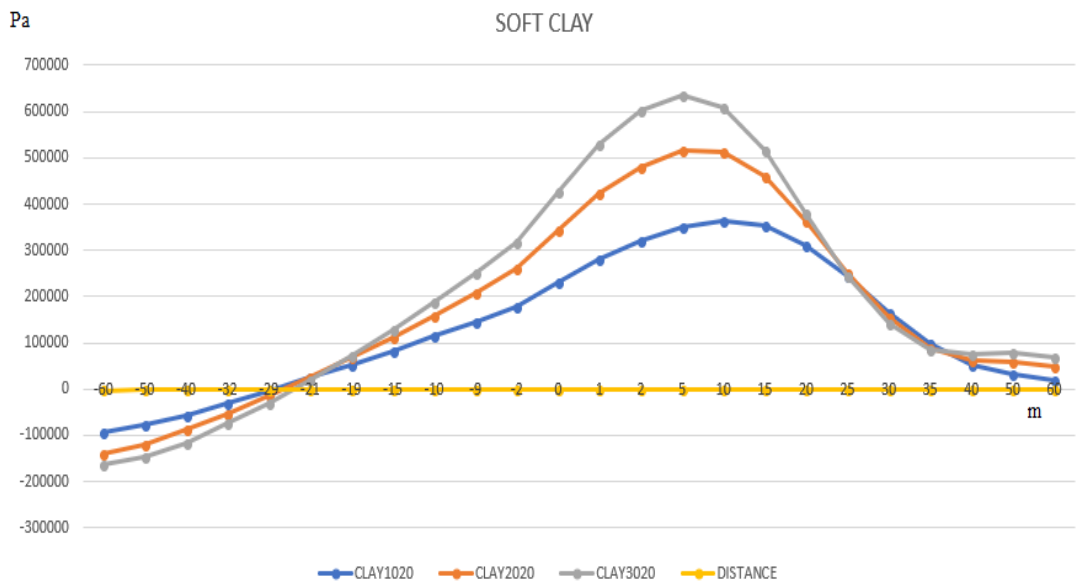
Εικόνα Π.56: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλασιασμό του πάχους τοιχώματος



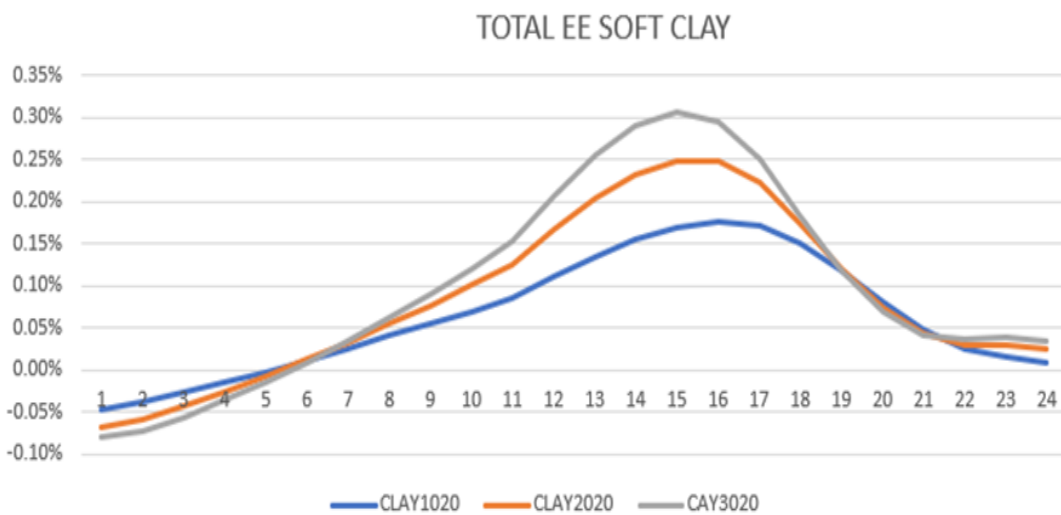
Εικόνα Π.57: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσια μετατόπιση ρήγματος



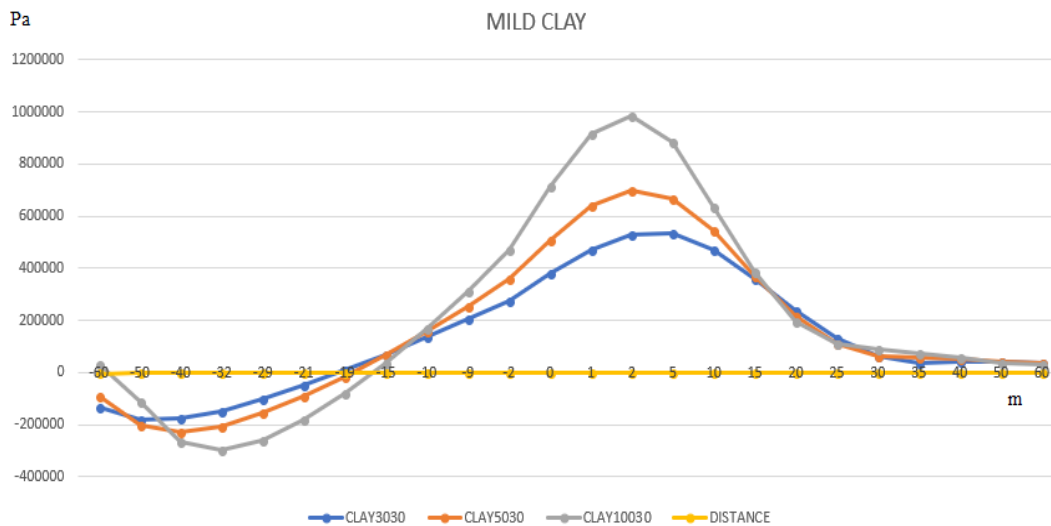
Εικόνα Π.58: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσια μετατόπιση ρήγματος



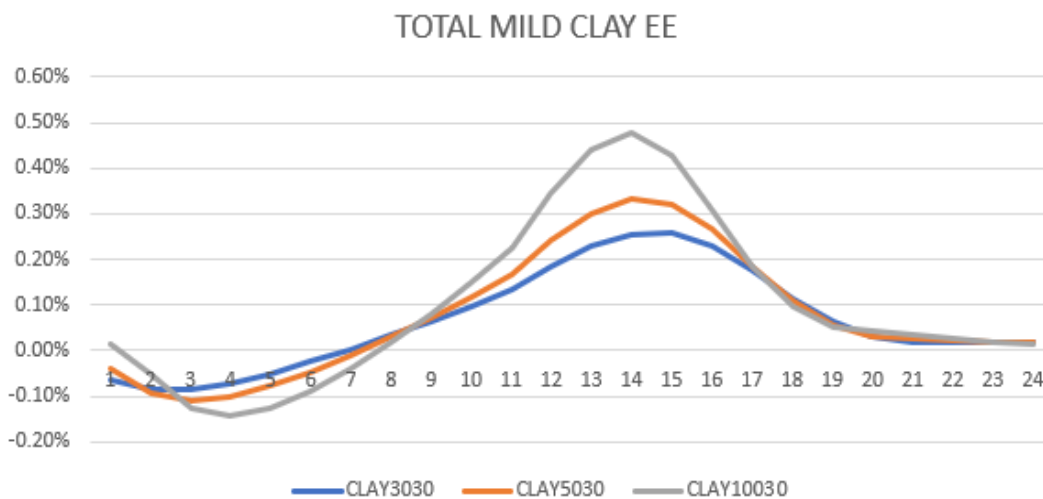
Εικόνα Π.59: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσια μετατόπιση ρήγματος



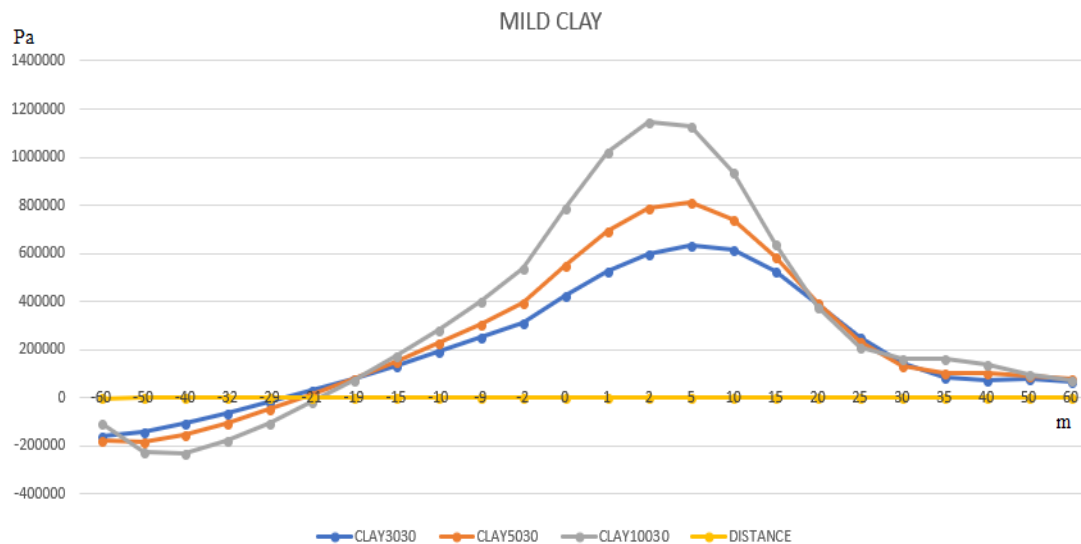
Εικόνα Π.60: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσια μετατόπιση ρήγματος



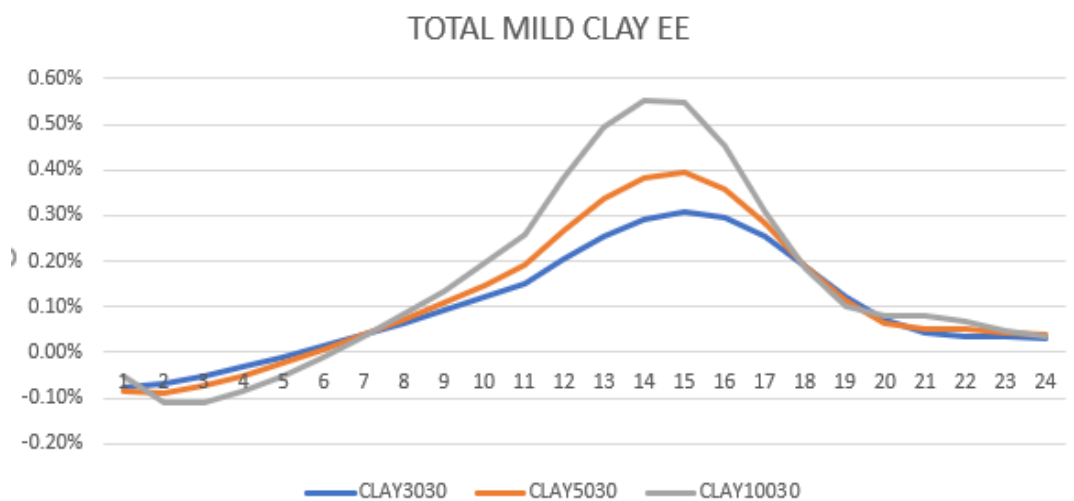
Εικόνα Π.61: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσια μετατόπιση ρήγματος



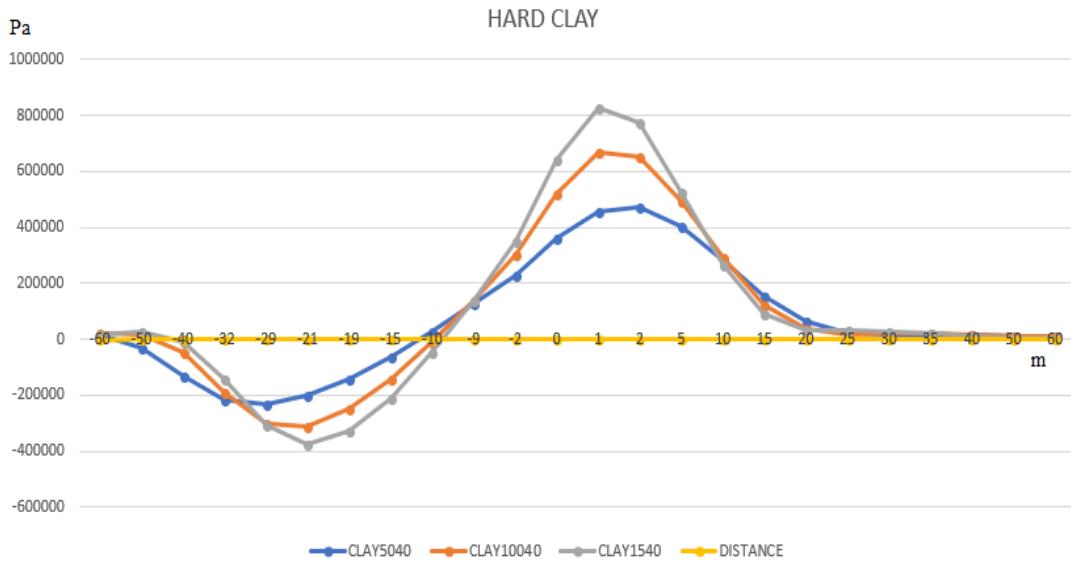
Εικόνα Π.62: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσια μετατόπιση ρήγματος



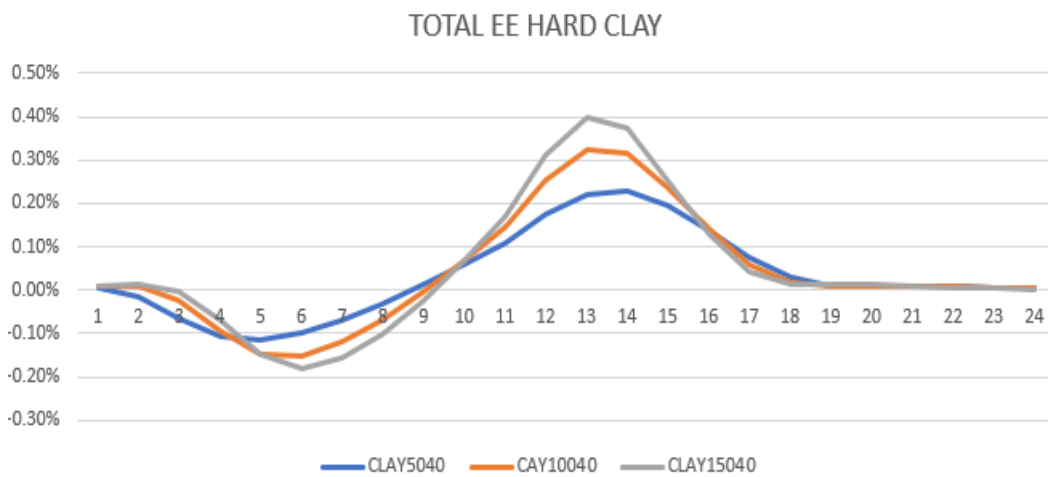
Εικόνα Π.63: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσια μετατόπιση ρήγματος



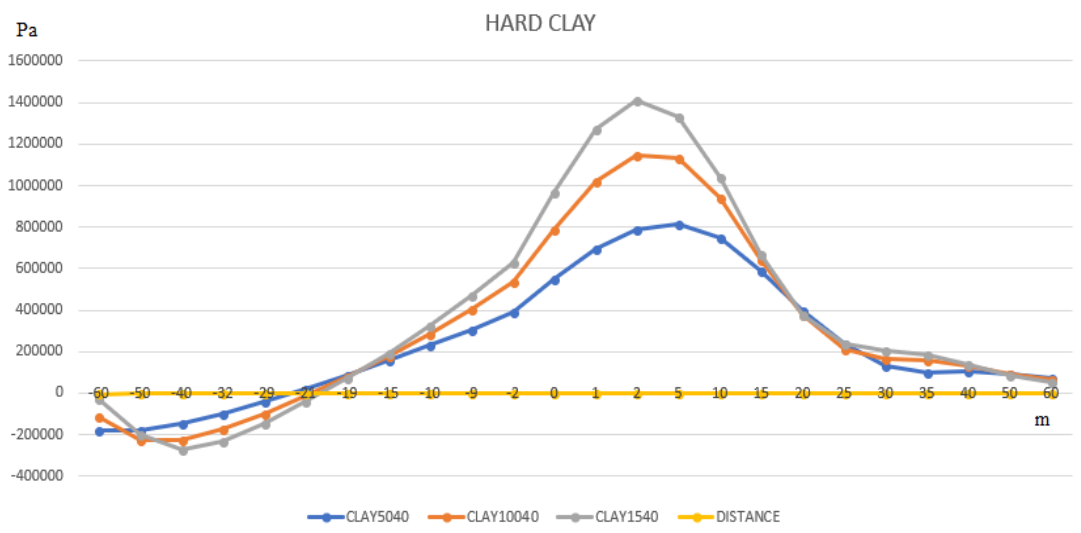
Εικόνα Π.64: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσια μετατόπιση ρήγματος



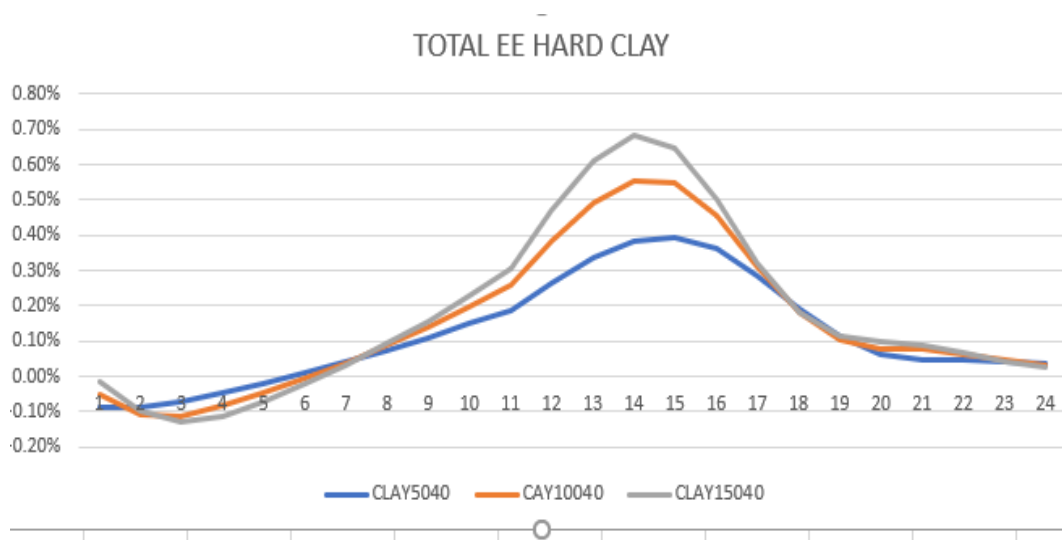
Εικόνα Π.65: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσια μετατόπιση ρήγματος



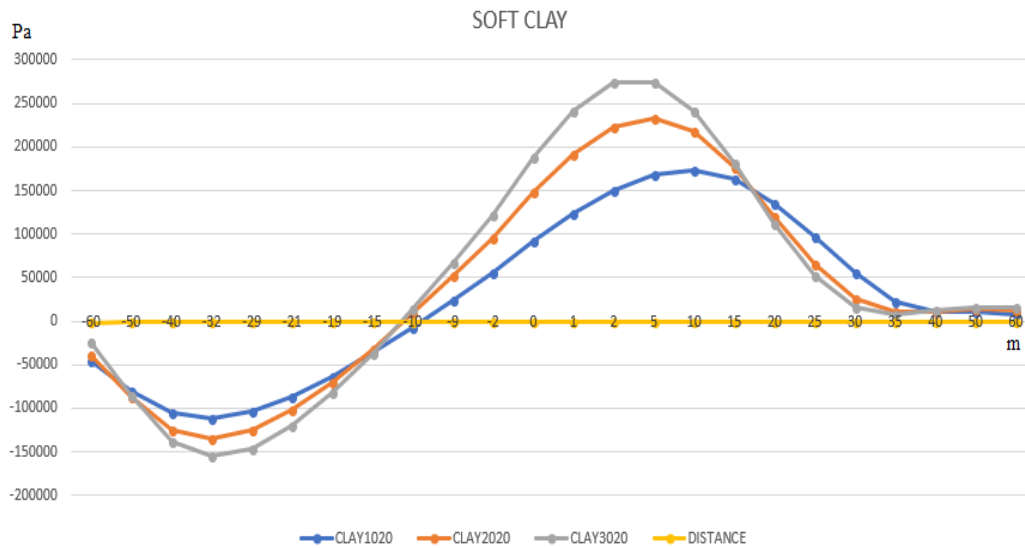
Εικόνα Π.66: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσια μετατόπιση ρήγματος



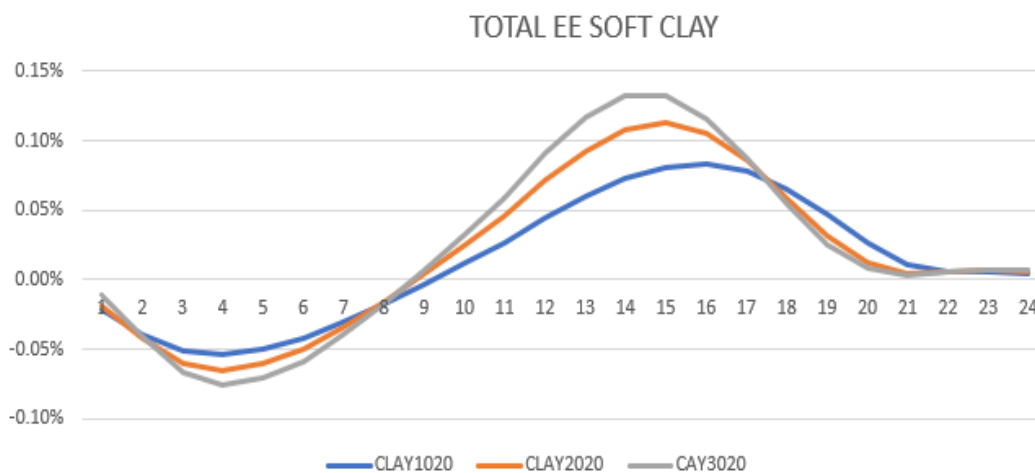
Εικόνα Π.67: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσια μετατόπιση ρήγματος



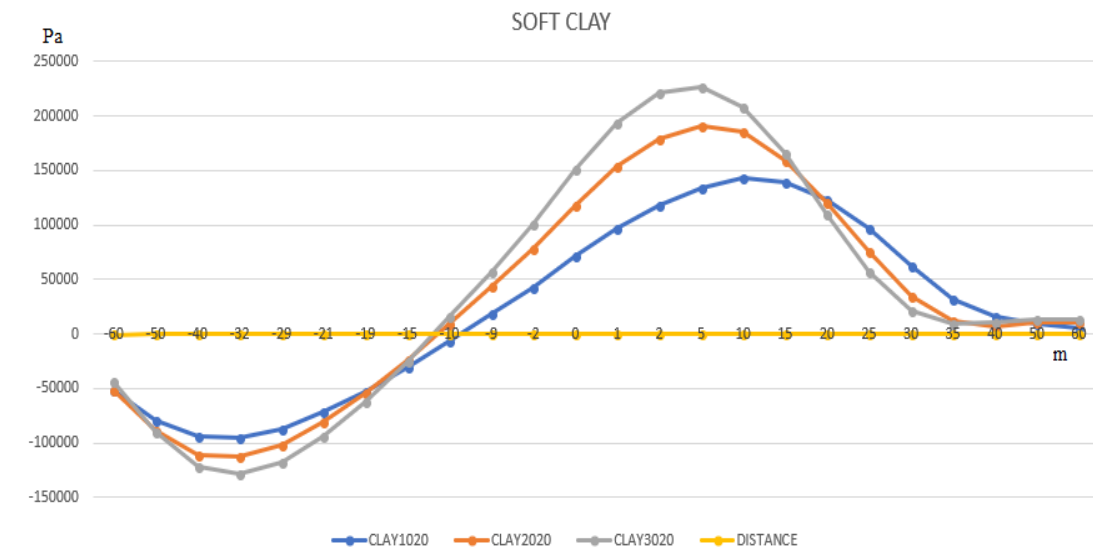
Εικόνα Π.68: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσια μετατόπιση ρήγματος



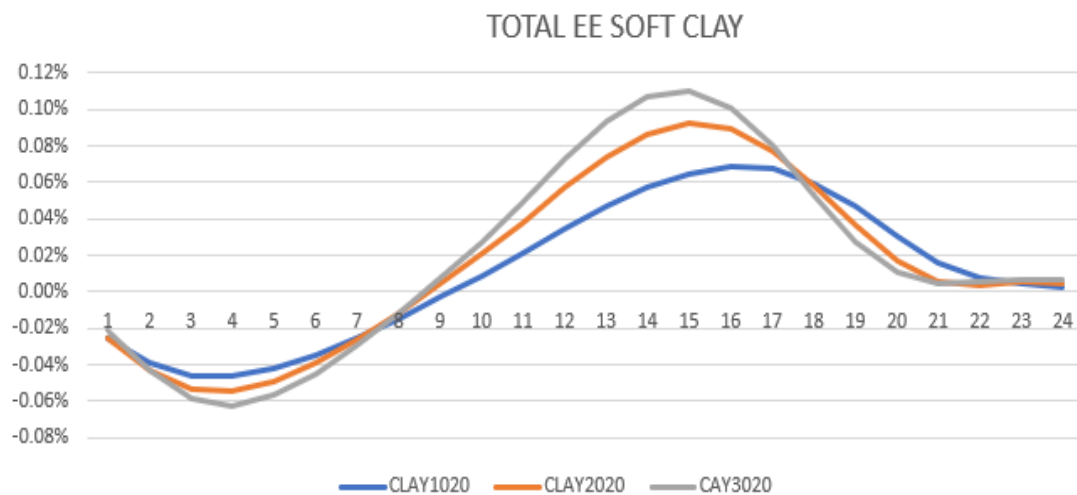
Εικόνα Π.69: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος



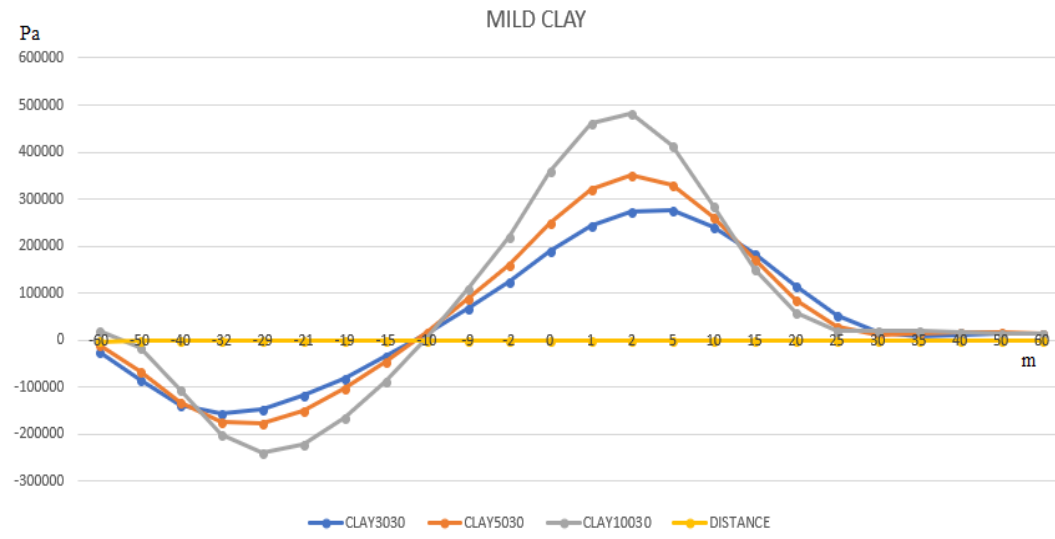
Εικόνα Π.70: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος



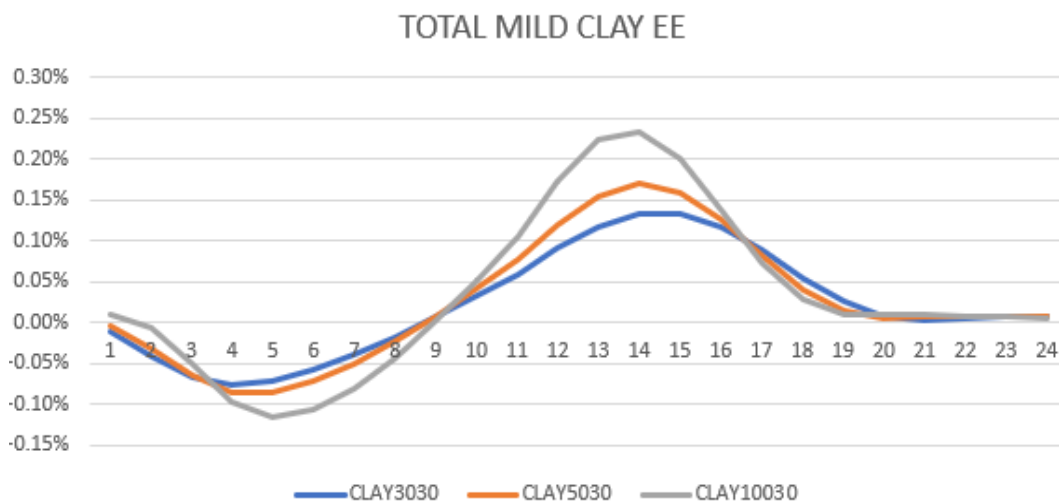
Εικόνα Π.71: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος



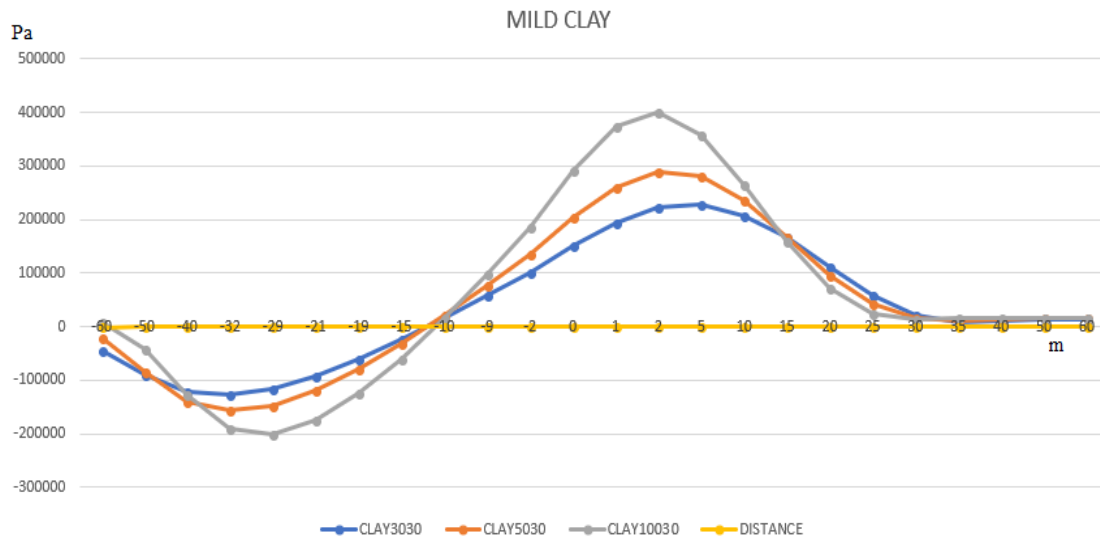
Εικόνα Π.72: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος



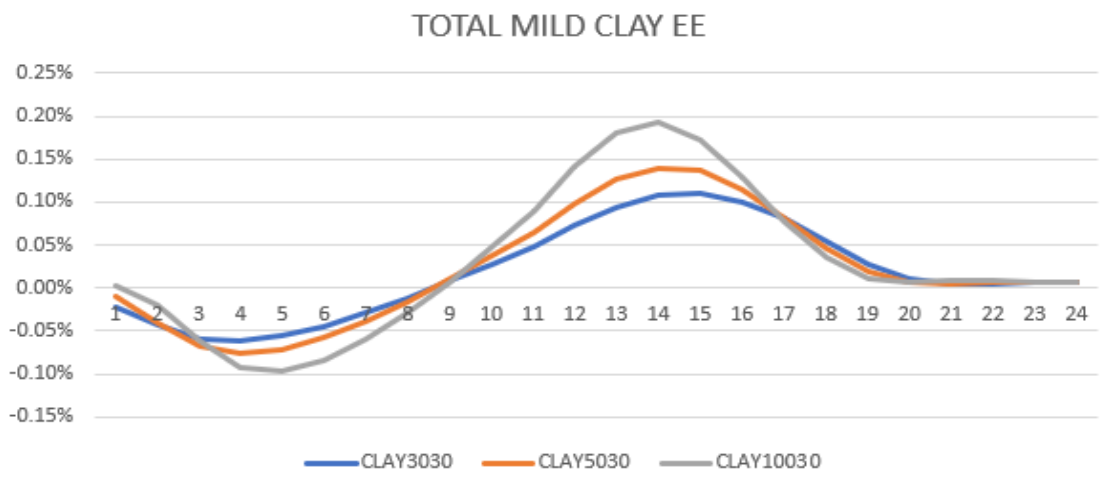
Εικόνα Π.73: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος



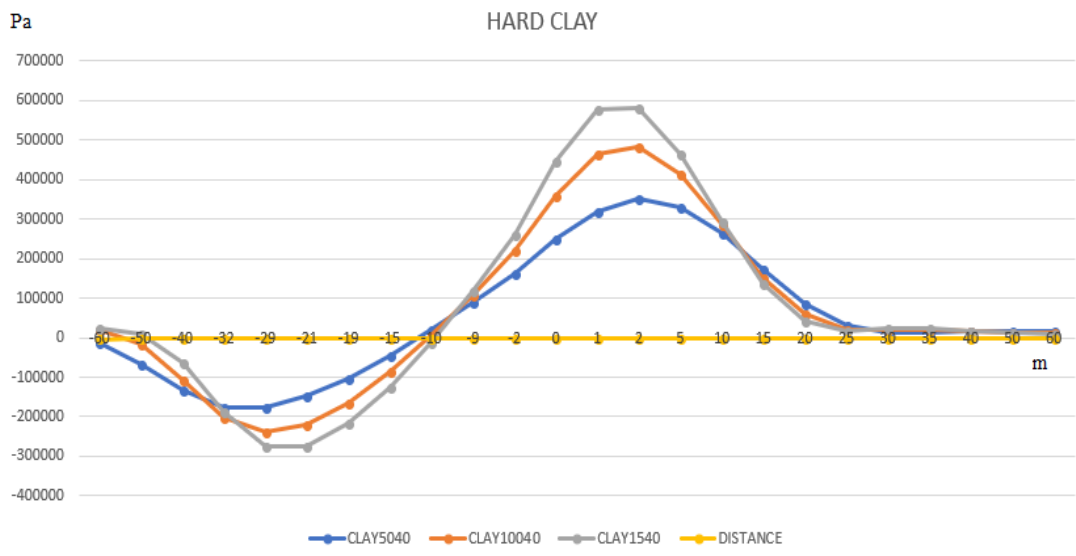
Εικόνα Π.74: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος



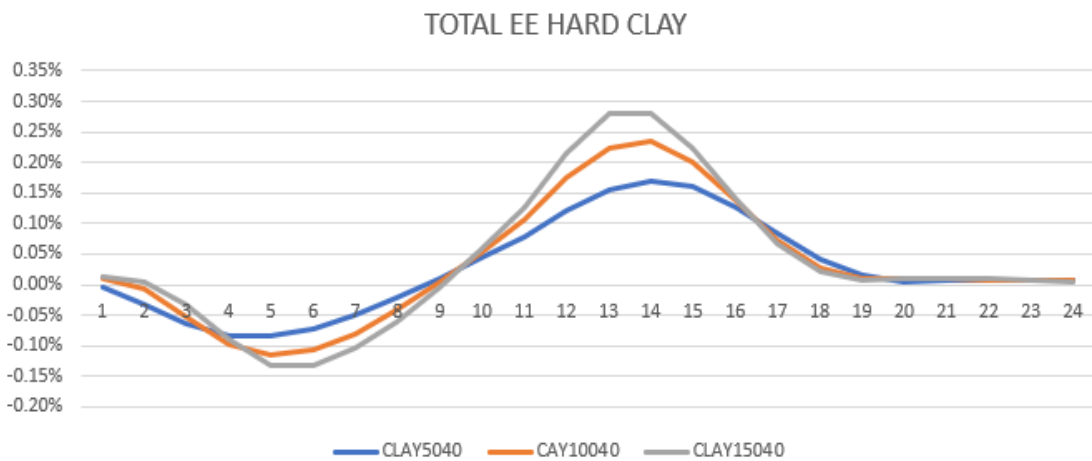
Εικόνα Π.75: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος



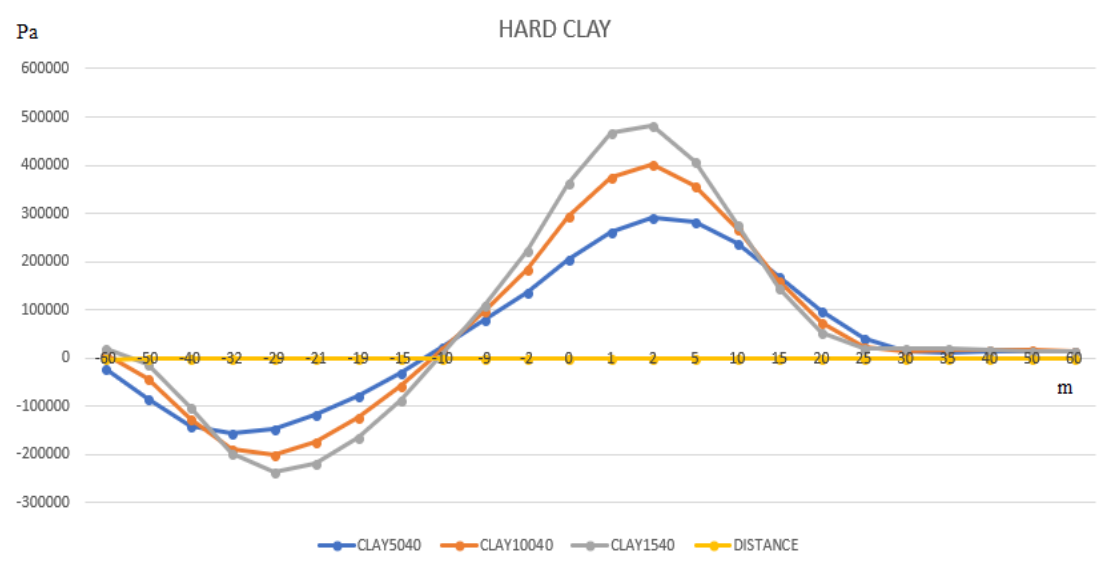
Εικόνα Π.76: Ελαστική ένταση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος



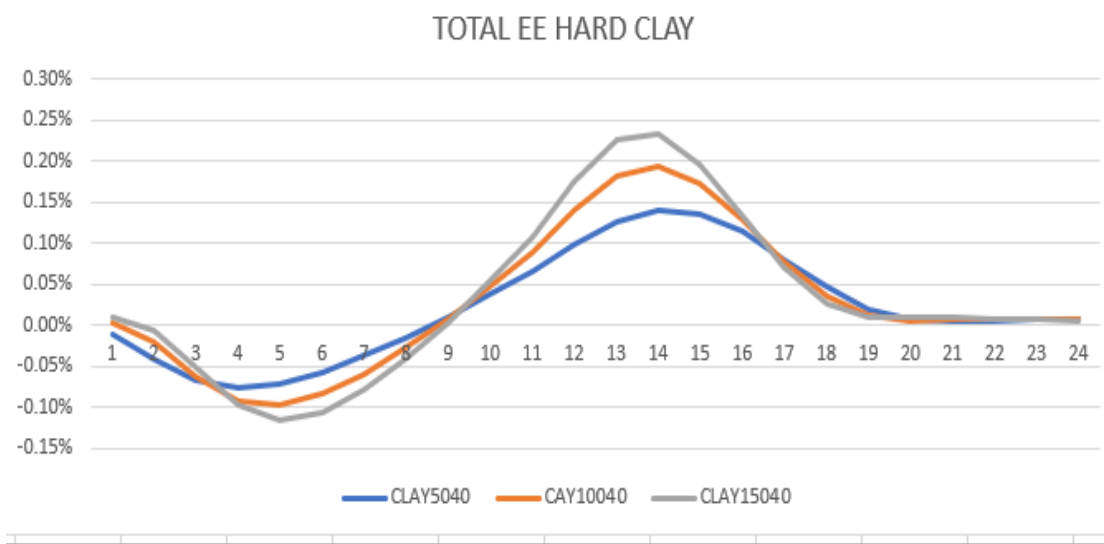
Εικόνα Π.77: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος



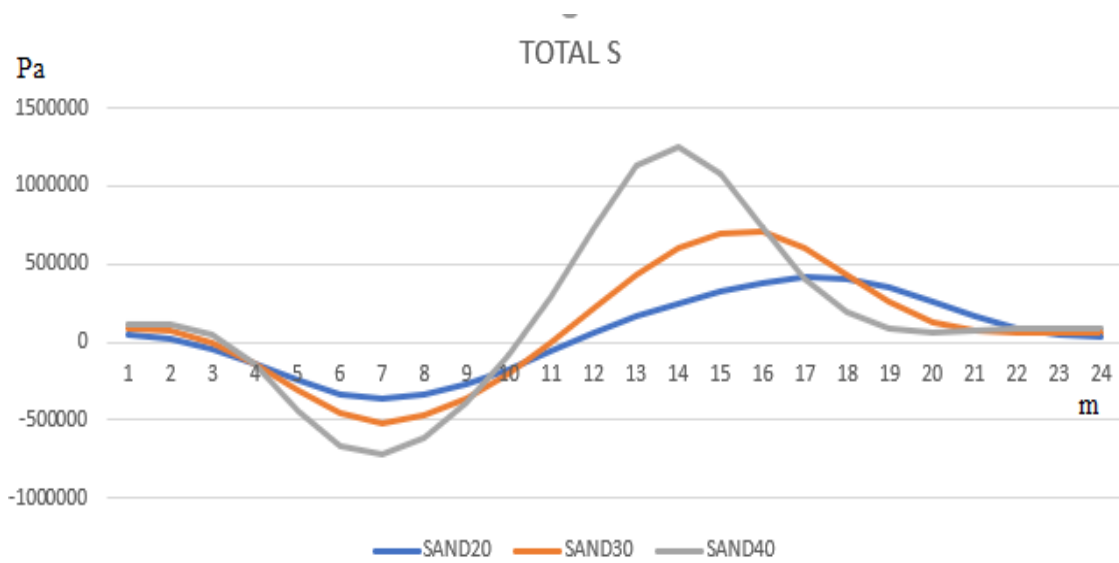
Εικόνα Π.78: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος



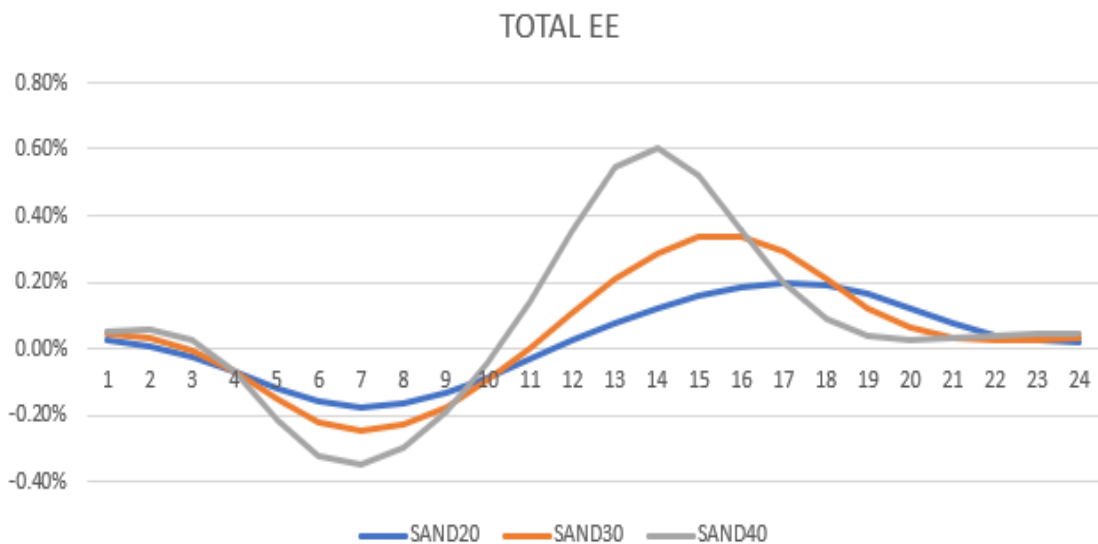
Εικόνα Π.79: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος



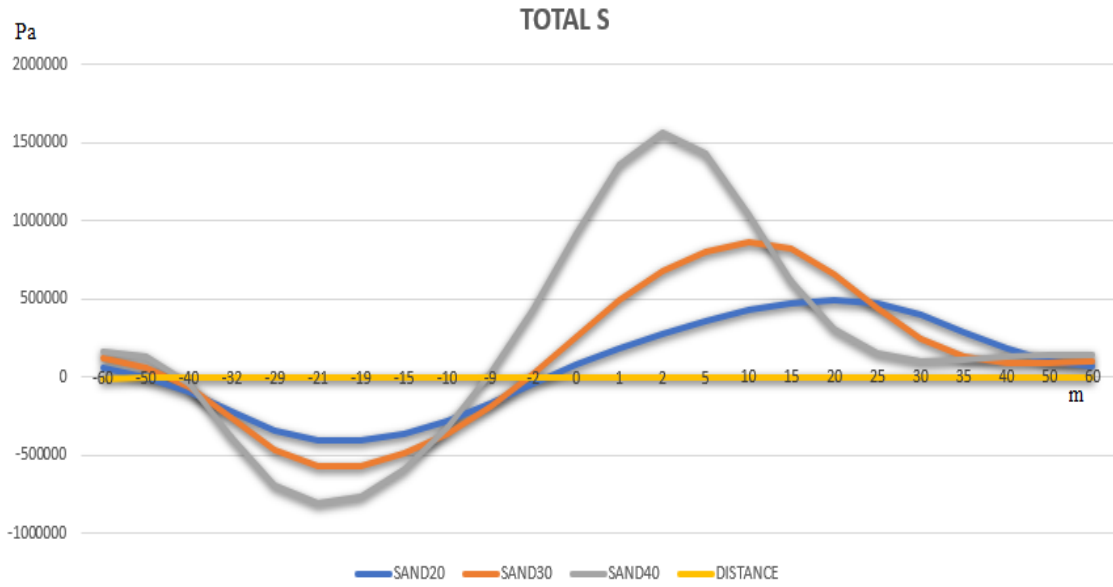
Εικόνα Π.80: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό άργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος



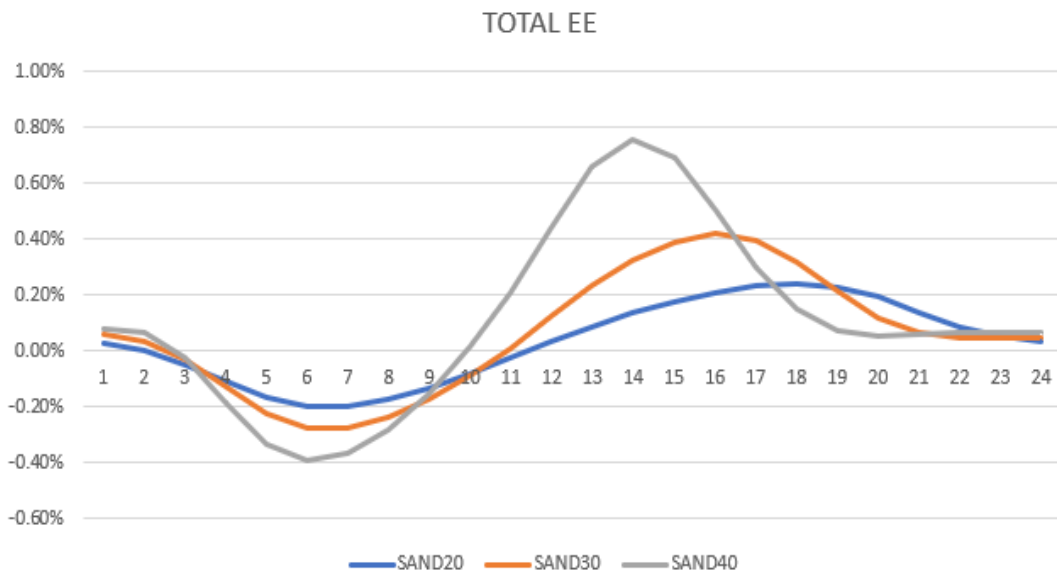
Εικόνα Π.81: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος , για διπλάσια μετατόπιση ρήγματος



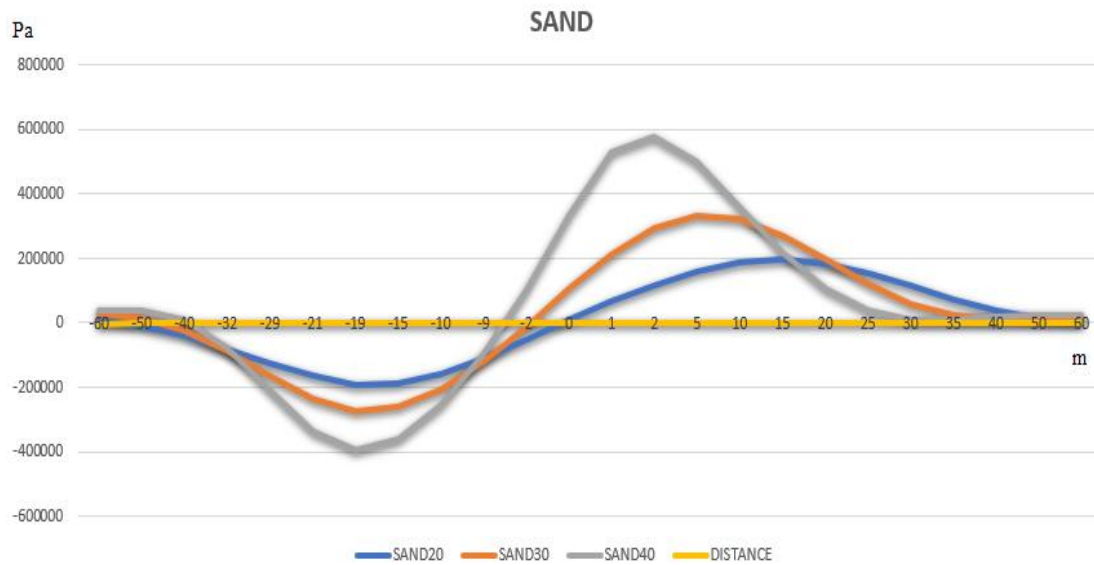
Εικόνα Π.82: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος , για διπλάσια μετατόπιση ρήγματος



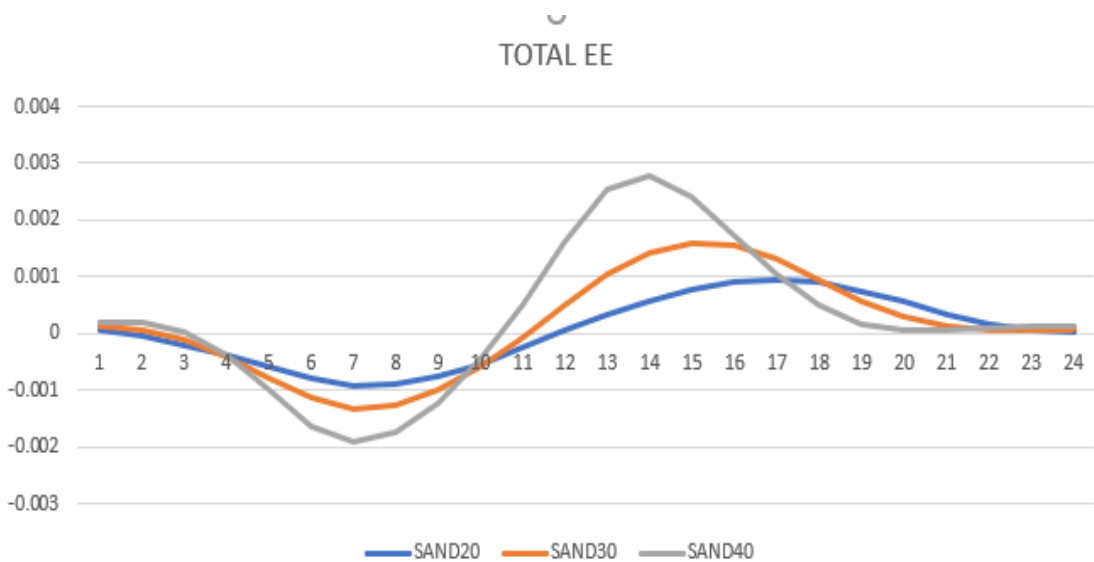
Εικόνα Π.83: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσια μετατόπιση ρήγματος



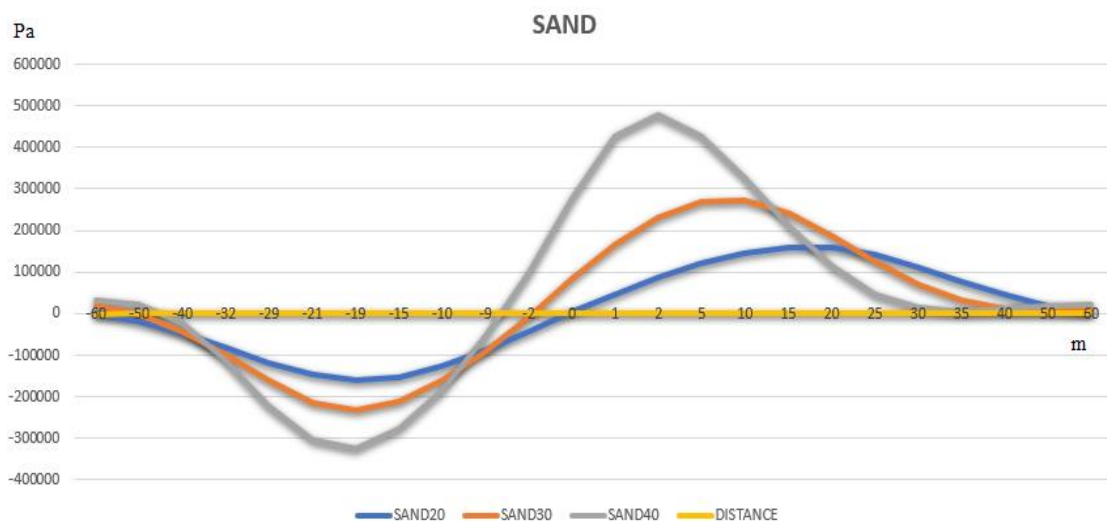
Εικόνα Π.84: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσια μετατόπιση ρήγματος



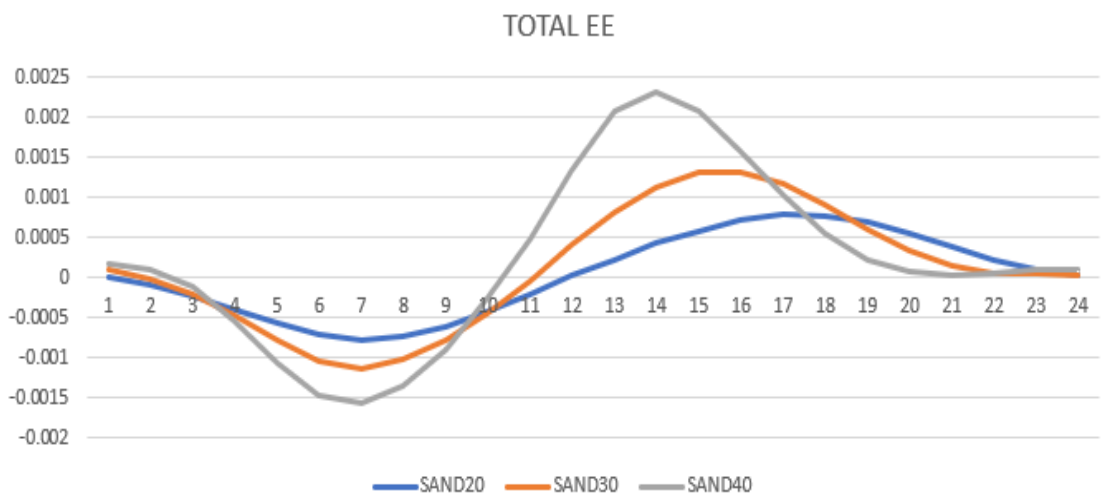
Εικόνα Π.85: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



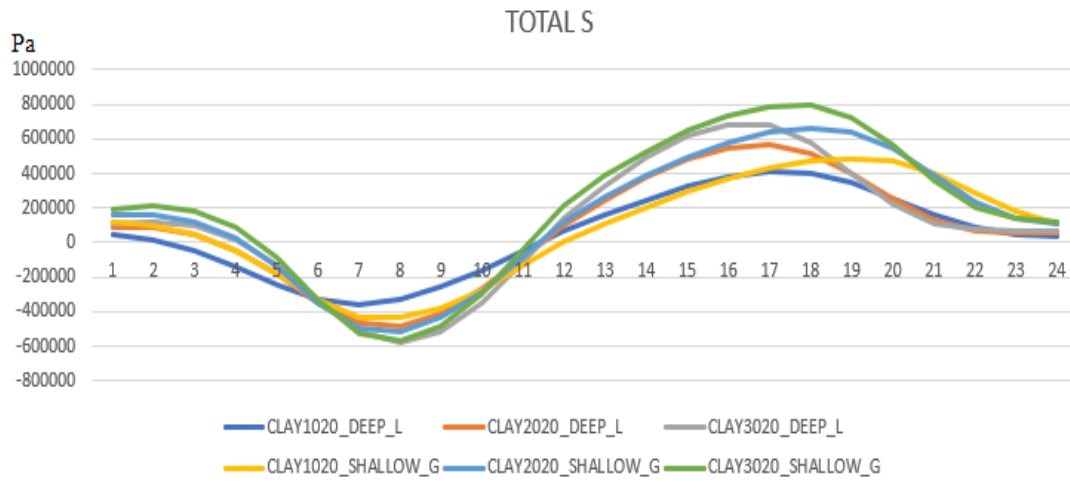
Εικόνα Π.86: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



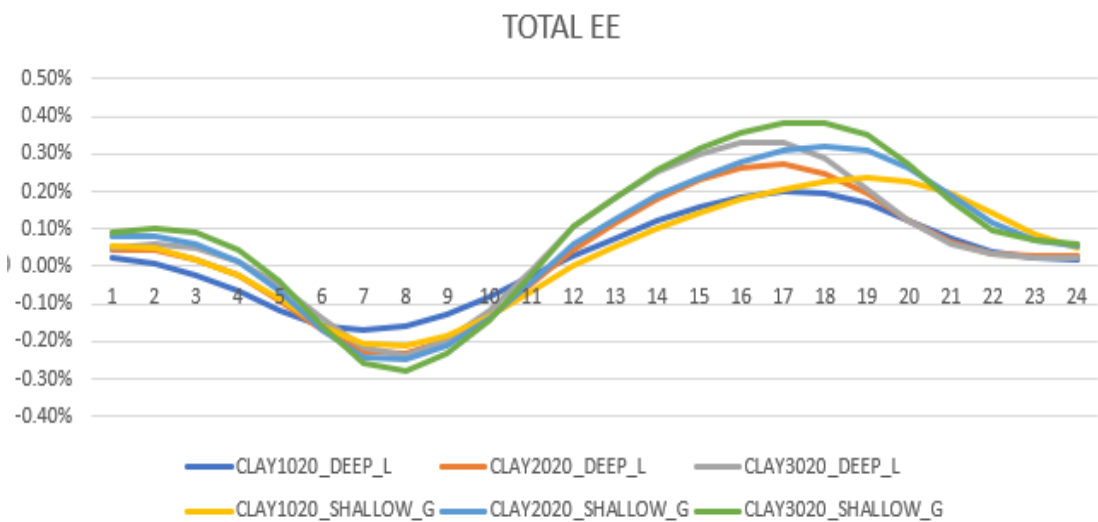
Εικόνα Π.87: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



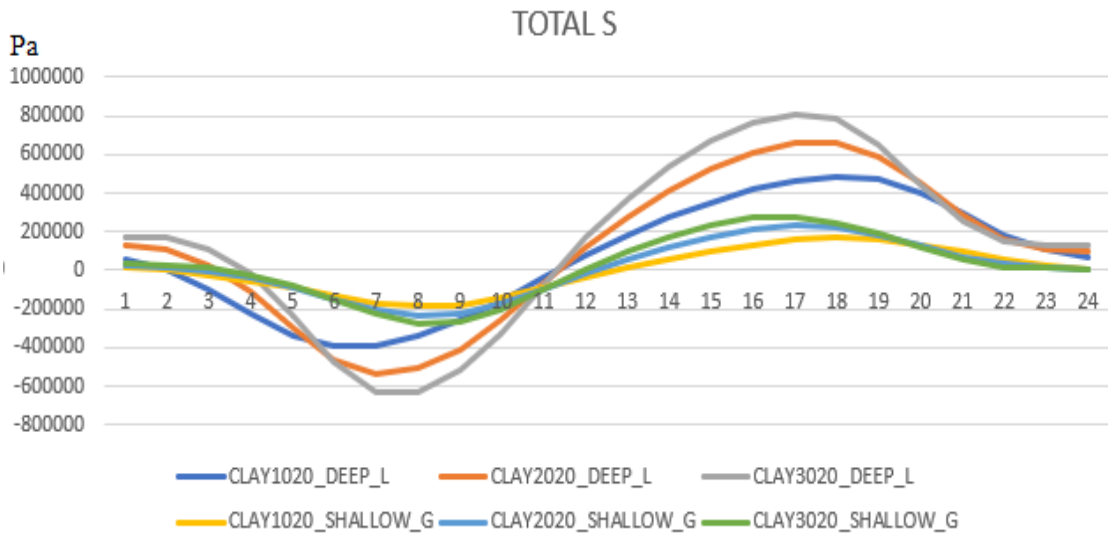
Εικόνα Π.88: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε αμμώδες εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



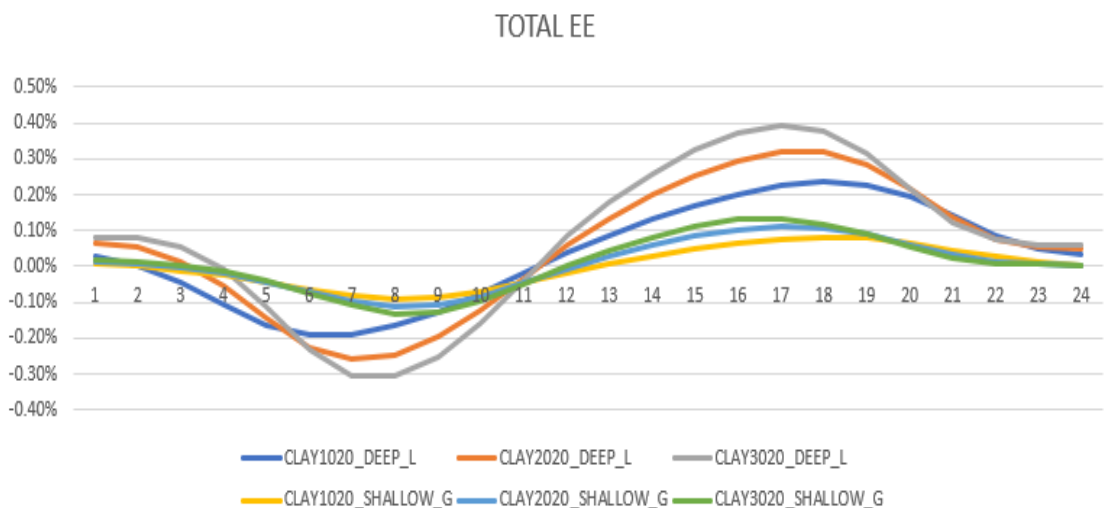
Εικόνα Π.89: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσια μετατόπιση ρήγματος



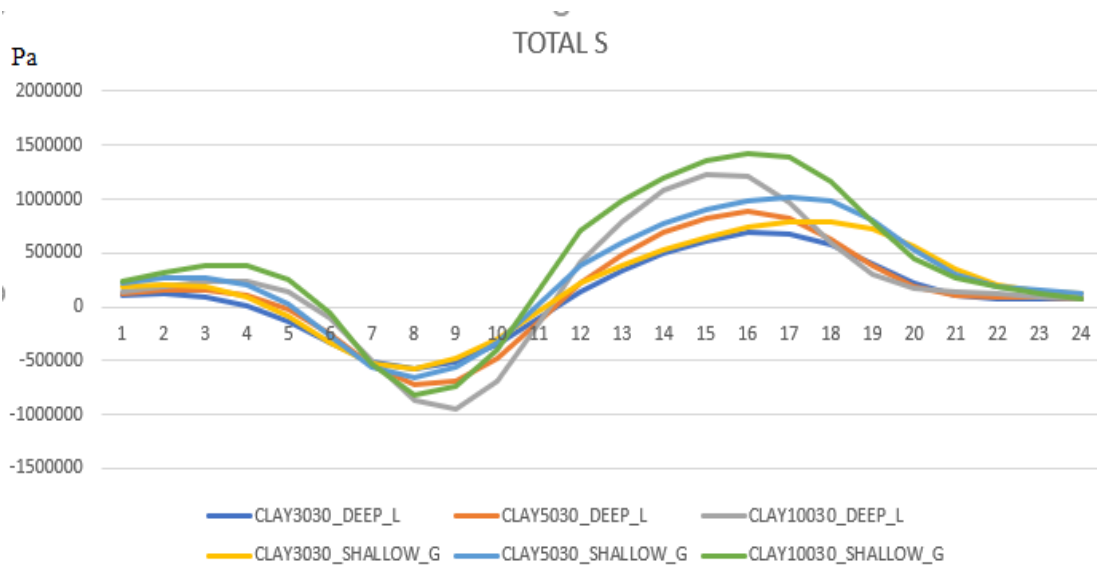
Εικόνα Π.90: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσια μετατόπιση ρήγματος



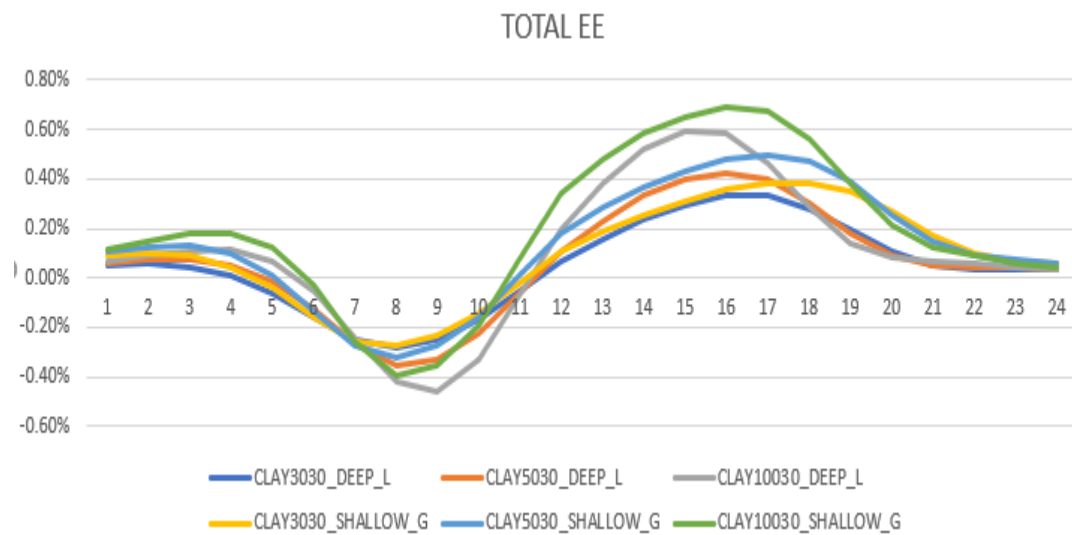
Εικόνα Π.91: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσια μετατόπιση ρήγματος



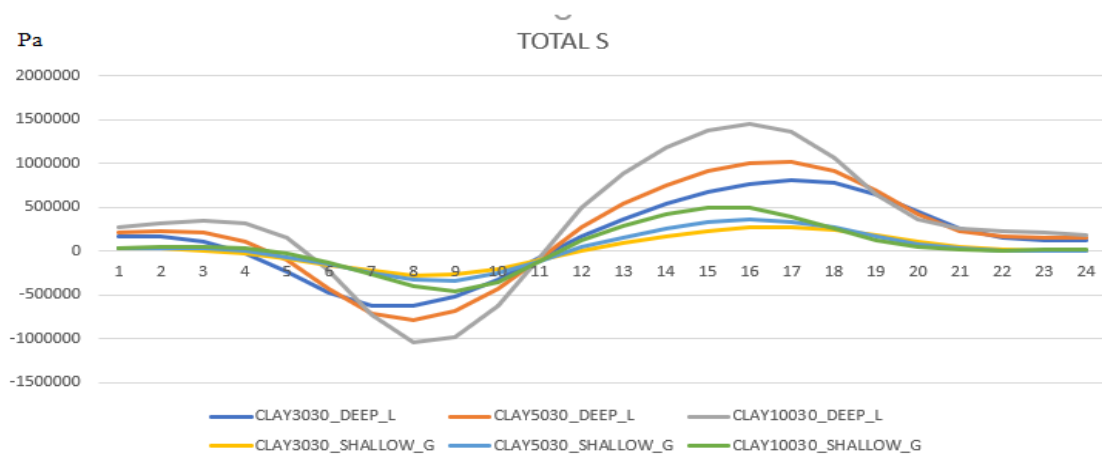
Εικόνα Π.92: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσια μετατόπιση ρήγματος



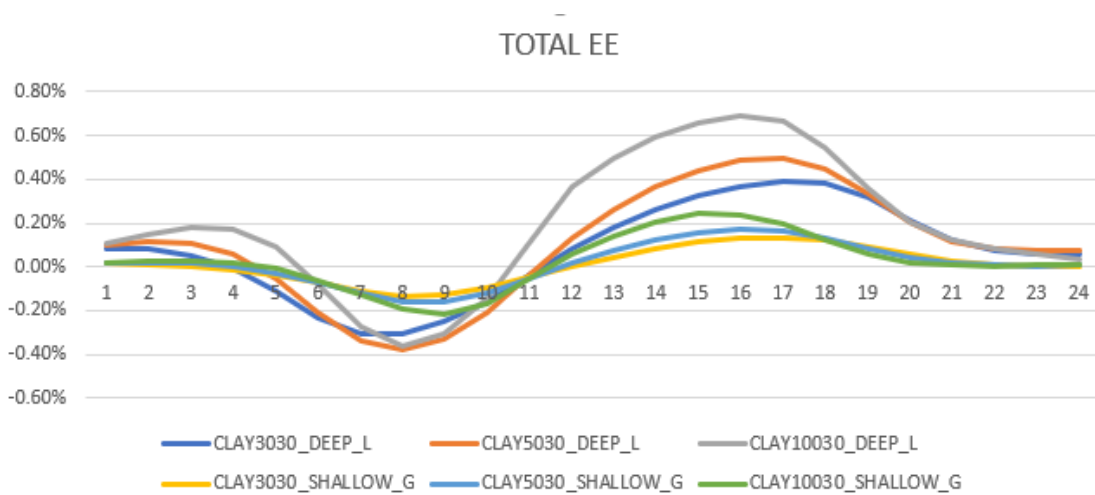
Εικόνα Π.93: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσια μετατόπιση ρήγματος



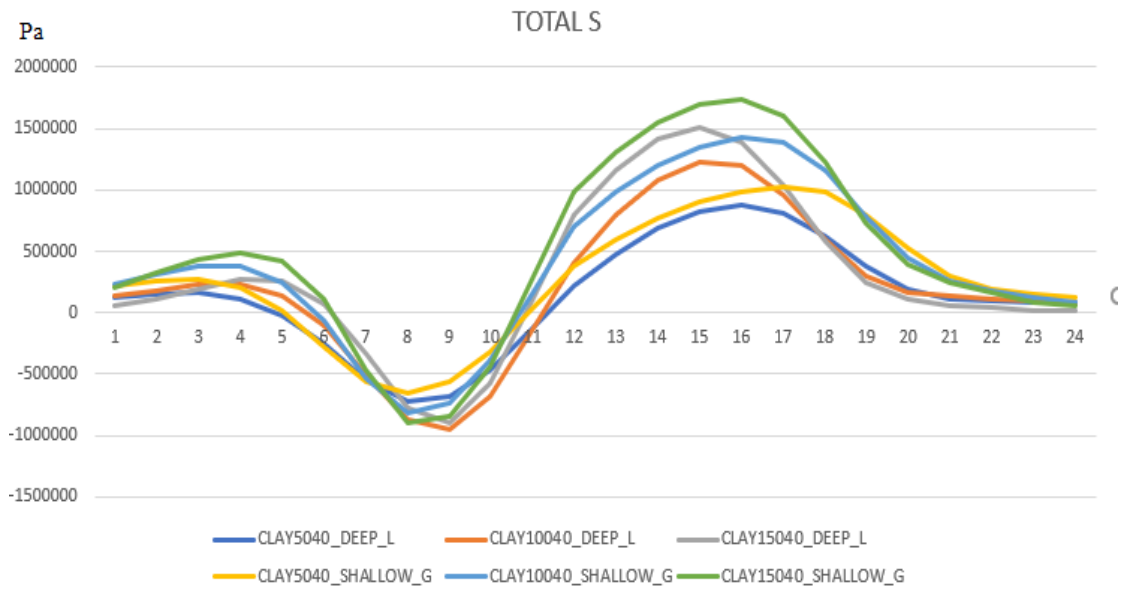
Εικόνα Π.94: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσια μετατόπιση ρήγματος



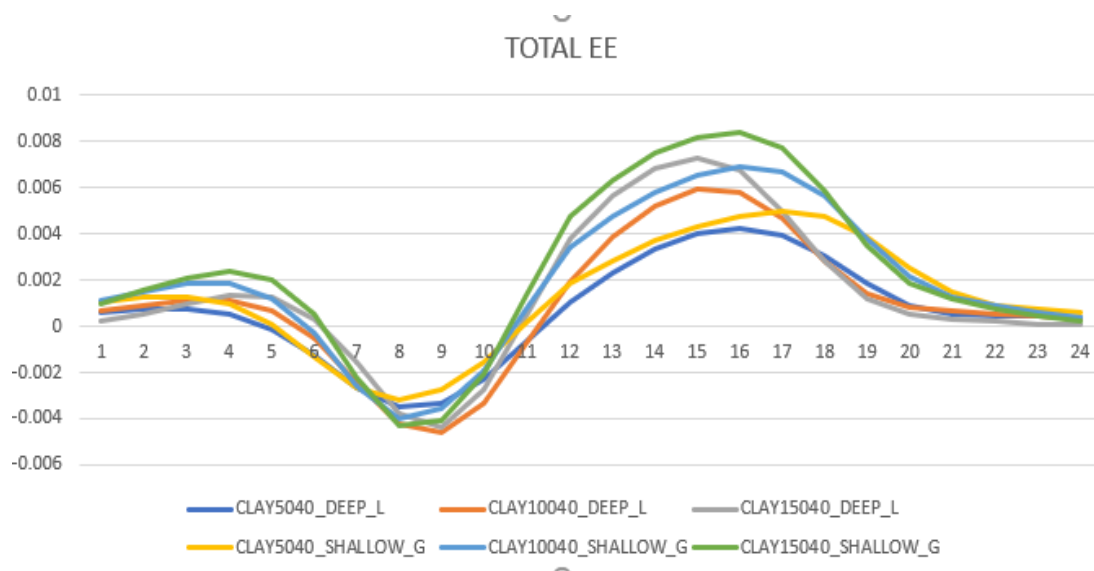
Εικόνα Π.95: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσια μετατόπιση ρήγματος



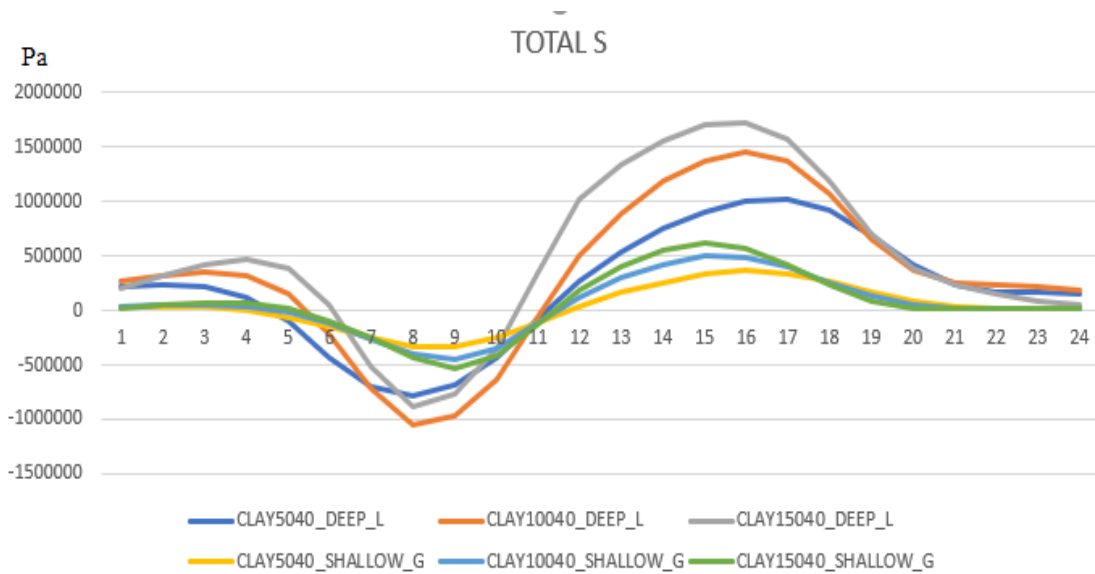
Εικόνα Π.96: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσια μετατόπιση ρήγματος



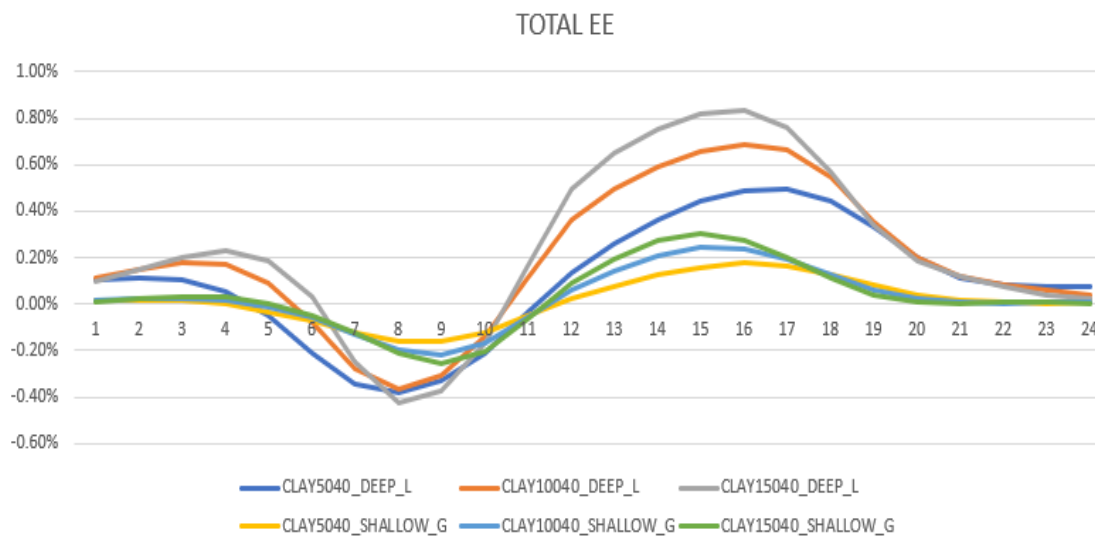
Εικόνα Π.97: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσια μετατόπιση ρήγματος



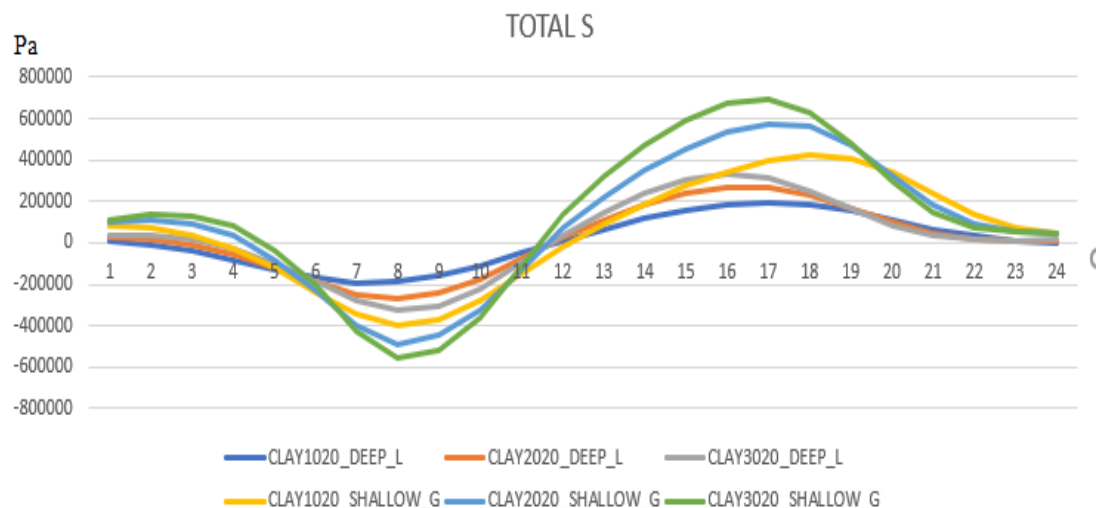
Εικόνα Π.98: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσια μετατόπιση ρήγματος



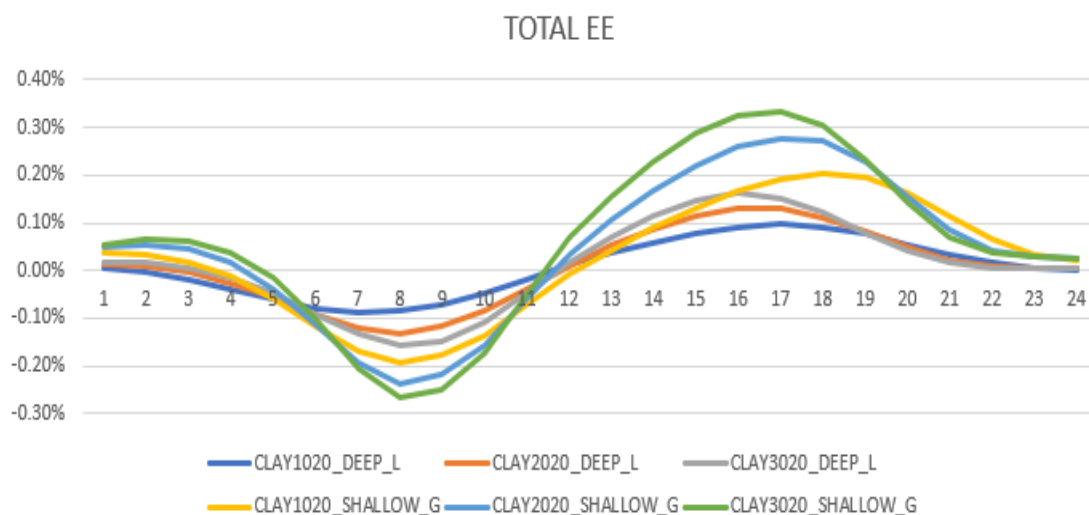
Εικόνα Π.99: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσια μετατόπιση ρήγματος



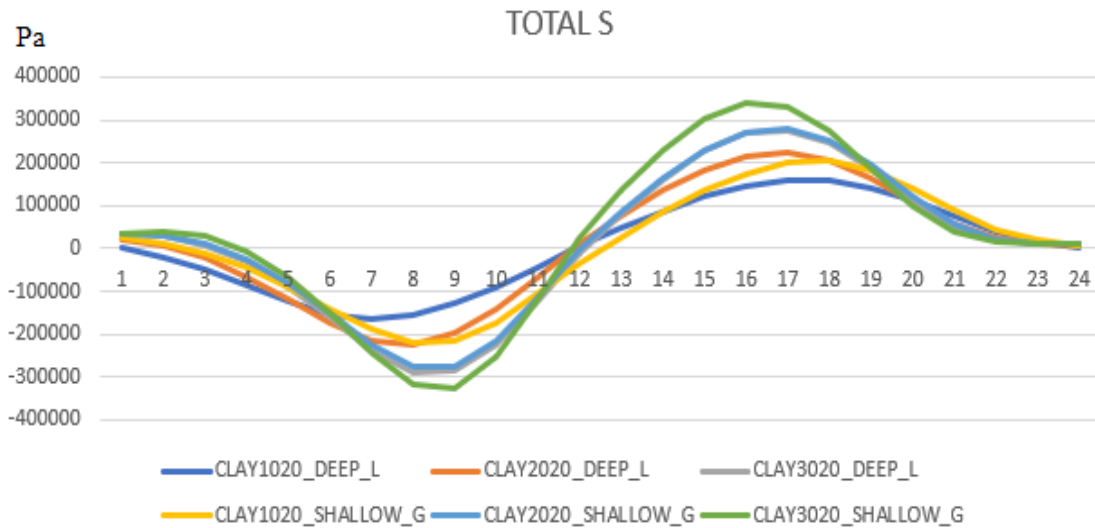
Εικόνα Π.100: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσια μετατόπιση ρήγματος



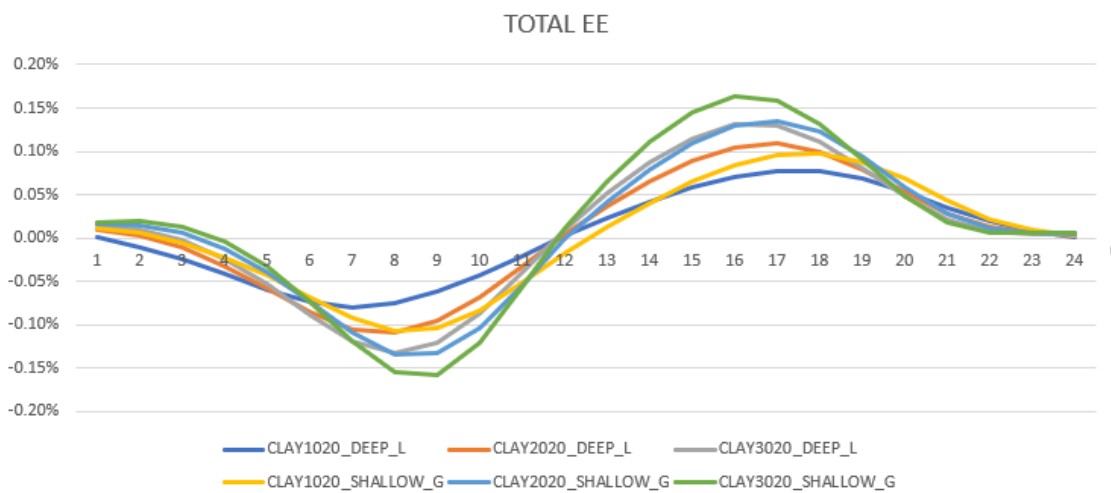
Εικόνα Π.101: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



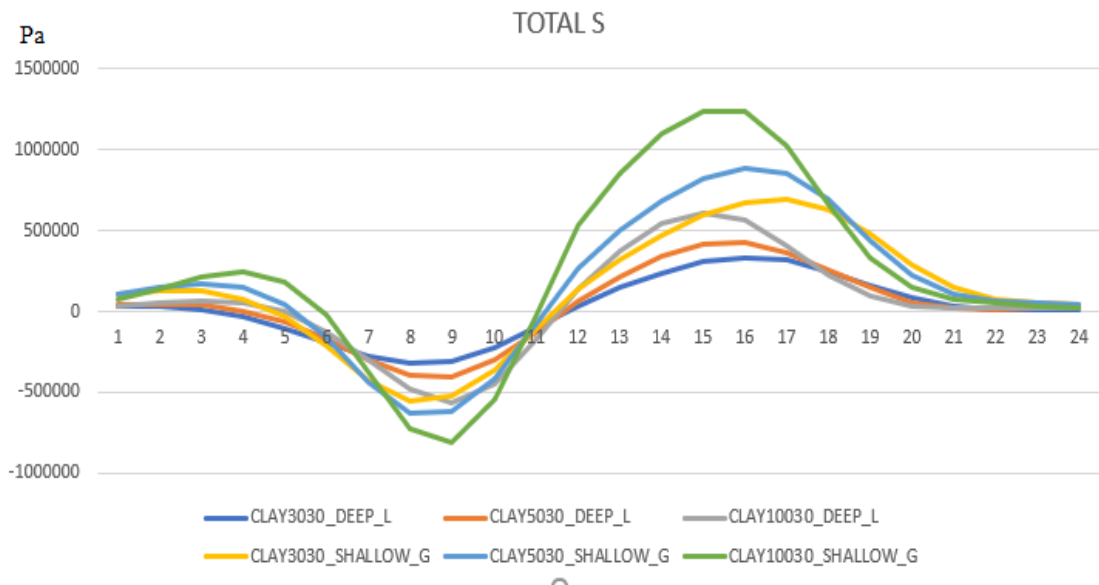
Εικόνα Π.102: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



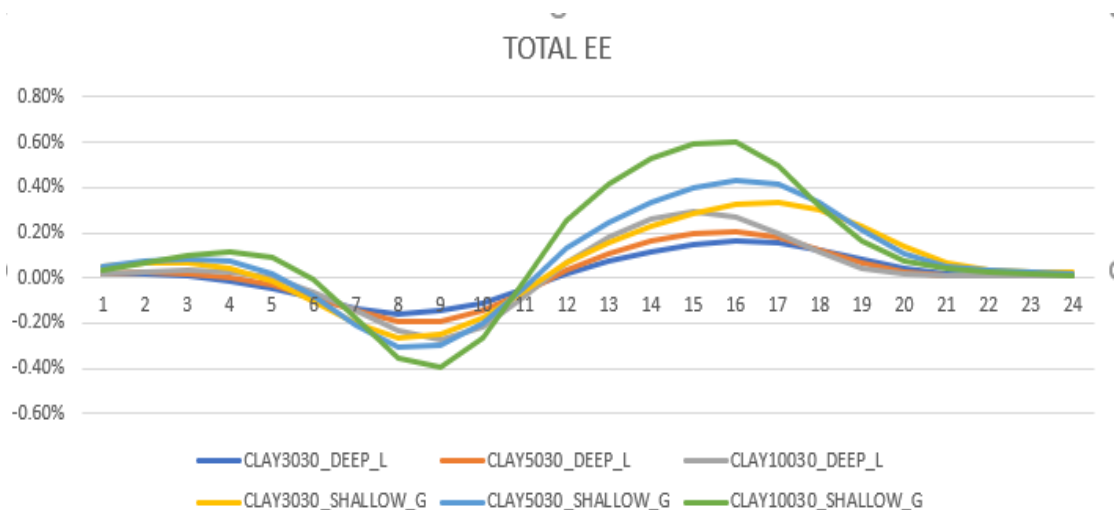
Εικόνα Π.103: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



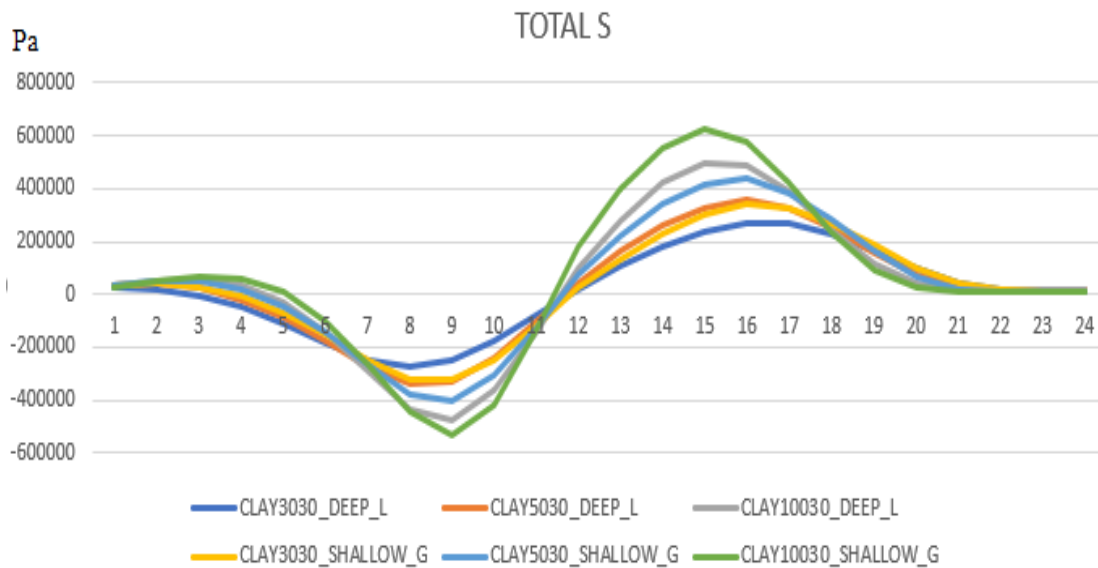
Εικόνα Π.104: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μαλακό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



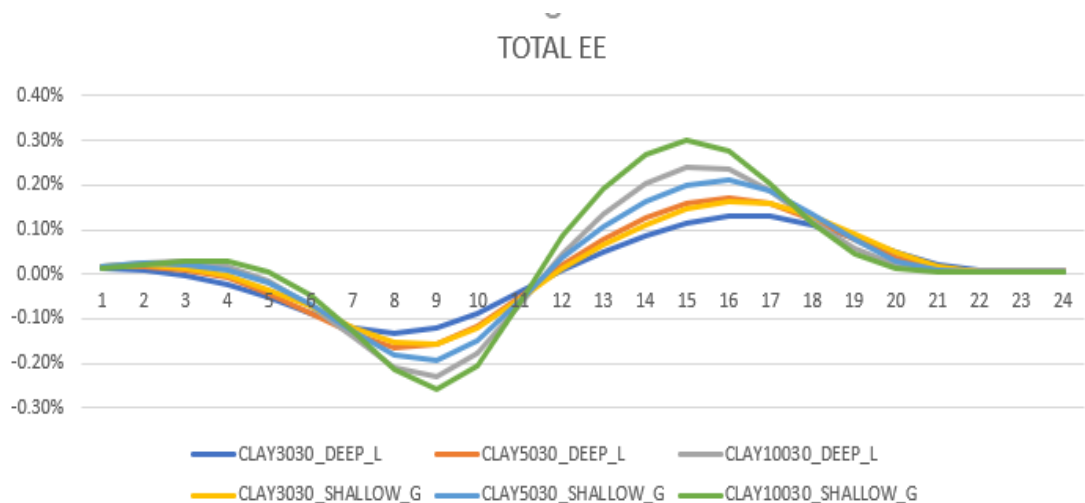
Εικόνα Π.105: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



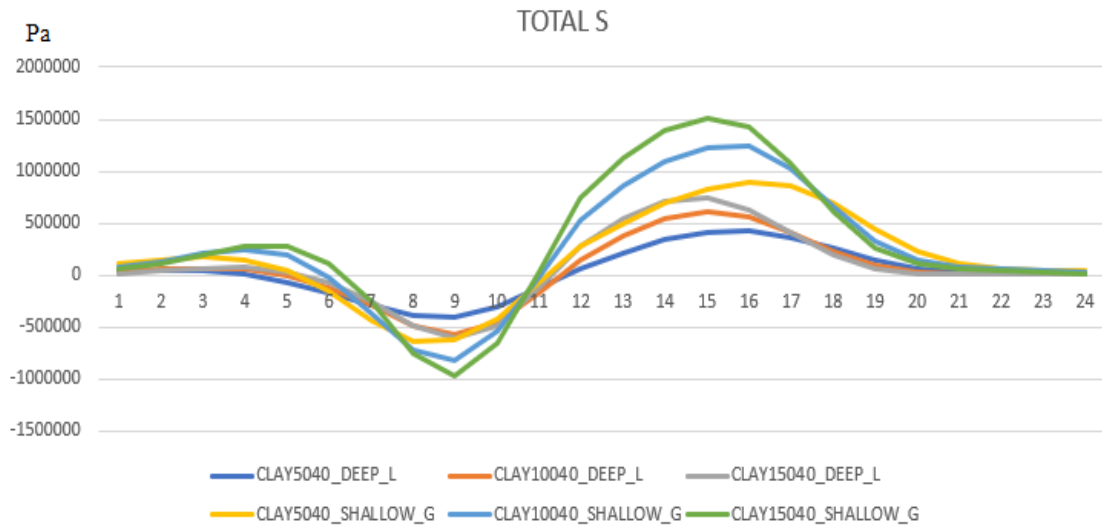
Εικόνα Π.106: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



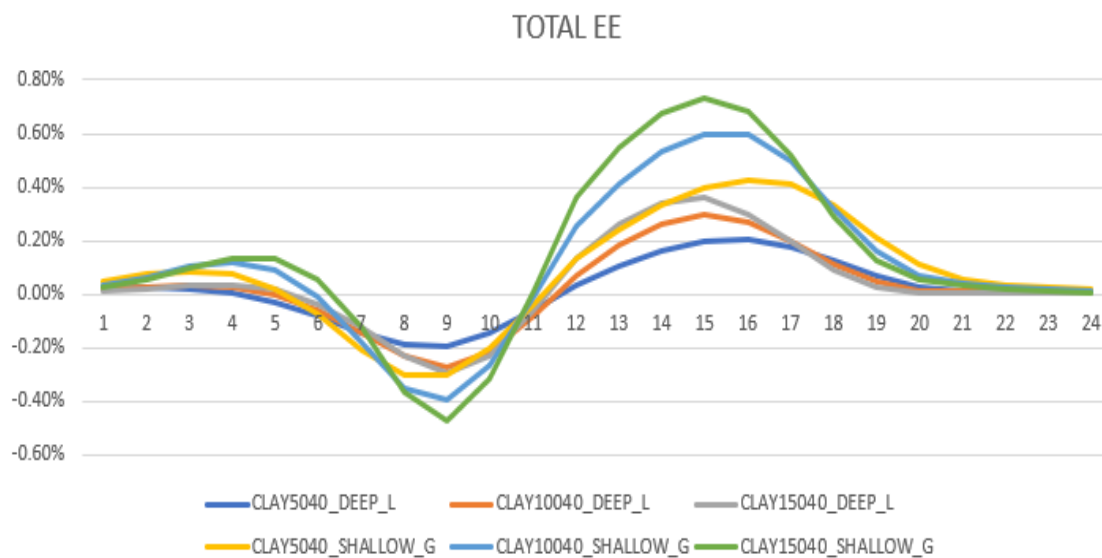
Εικόνα Π.107: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



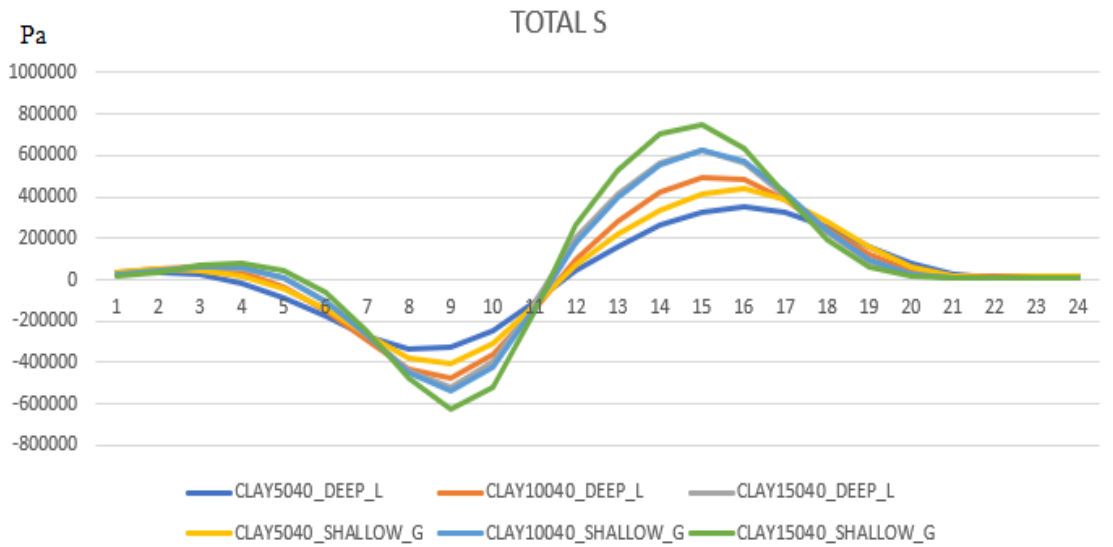
Εικόνα Π.108: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε μέτριο αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



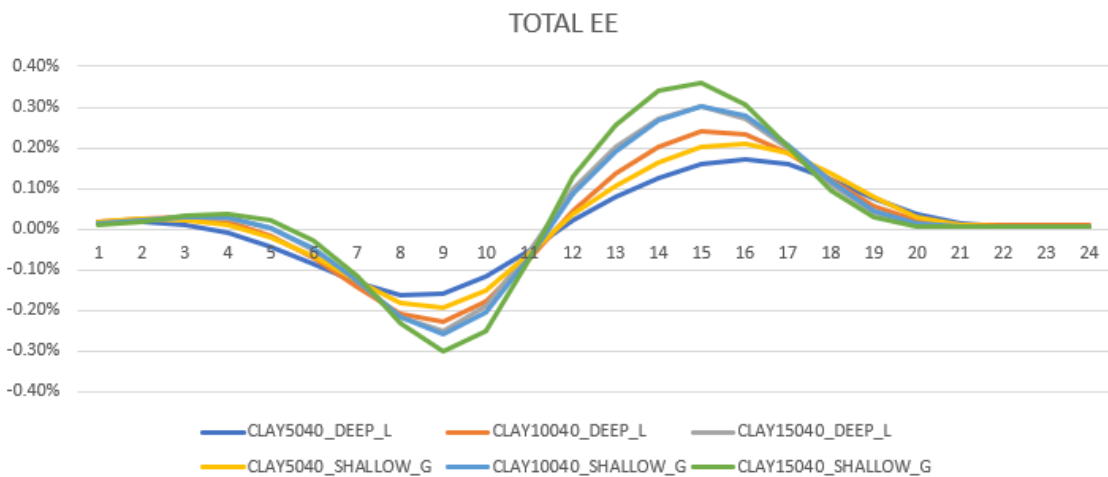
Εικόνα Π.109: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



Εικόνα Π.110: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για διπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



Εικόνα Π.111: Αξονική τάση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού



Εικόνα Π.112: Ελαστική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος αγωγού που είναι τοποθετημένος σε σκληρό αργιλικό εδαφικό υλικό, λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, για τριπλάσιο πάχος τοιχώματος αγωγού

