

Ευχαριστίες...

Φτάνοντας στο τέλος της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην προσπάθειά μου αυτή με άμεσο ή έμμεσο τρόπο.

Πρώτα και σημαντικότερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Γ. Γκαζέτα που μου έδωσε την ιδέα και το κίνητρο για να διερευνήσω το θέμα αυτό υπό την καθοδήγησή του, αλλά και για όλες τις πολύτιμες συμβουλές και προτάσεις του καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα Α. Τσάτση και στους διδάκτορες Φ. Γελαγώτη και Ρ. Κουρκουλή για την διαρκή υποστήριξή τους και τις συμβουλές τους στην προσπάθειά μου αυτή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους συμφοιτητές και φίλους μου για την συνεχή και αμέριστη συμπαράσταση κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Πίνακας περιεχομένων

1	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	1
1.1	Εισαγωγή	3
1.2	Ρήγματα.....	3
1.3	Περί αγωγών.....	4
1.4	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	6
	ΣΧΗΜΑΤΑ 1^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	17
2	ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	47
2.1	Ορισμός του προβλήματος	49
2.2	Προσομοίωμα και Μέθοδος Ανάλυσης	50
2.2.1	Προσομοίωμα Πεπερασμένων Στοιχείων	50
2.2.2	Καταστατικό Προσομοίωμα Εδάφους.....	51
2.2.3	Τρόποι αστοχίας αγωγού.....	51
	ΣΧΗΜΑΤΑ 2^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	55
3	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	65
3.1	Παρουσίαση του Προβλήματος	67
	ΣΧΗΜΑΤΑ 3^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	73
4	ΠΡΟΤΑΣΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΛΑΤΗΡΙΩΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ.....	93
4.1	Σύγκριση νέων ελατηρίων με της ALA (2001).....	95
4.2	Αιτιολόγηση διαφορών.....	99

4.3	Αδιαστοτοποίηση προτεινομένων ελατηρίων	102
ΣΧΗΜΑΤΑ 4^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ		111
5	ΑΓΩΓΟΣ ΥΠΟΒΑΛΛΟΜΕΝΟΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑ: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΛΑΤΗΡΙΩΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΠΛΗΡΩΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	135
5.1	Κανονικό ρήγμα	137
5.2	Ανάστροφο ρήγμα	138
ΣΧΗΜΑΤΑ 5^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ		143
6	ΠΡΟΤΑΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΓΩΓΩΝ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΟ ΡΗΓΜΑ	157
6.1	Ανάπτυξη πρότασης.....	159
ΣΧΗΜΑΤΑ 6^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ		165
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	179
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ		185

1^ο Κεφάλαιο

Εισαγωγή και Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1 Εισαγωγή και Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.1 Εισαγωγή

Οι υπόγειοι αγωγοί χρησιμοποιούνται συνήθως για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, τηλεπικοινωνιών και την μεταφορά νερού, απορριμμάτων, πετρελαίου και φυσικού αερίου. Επιπλέον, αναφέρονται στην βιβλιογραφία ως «σωστικό σχοινί», οι οποίοι συχνά διασταυρώνονται με ενεργά ρήγματα, με αρκετές πιθανότητες να προκαλέσουν μεγάλους σεισμούς και συνάμα μεγάλες εδαφικές μετατοπίσεις. Υπάρχουν αρκετά χαρακτηριστικά παραδείγματα σεισμών, οι οποίοι προκάλεσαν σημαντικές καταστροφές σε υπόγειους αγωγούς, όπως στο San Fernando (1971), Managua (1972), Haicheng (1975), Tang-shan (1976), Miyagiken-Oki (1978), Northridge (1994), Kobe (1995), Chi-Chi (1999), Kocaeli (1999) κι από πιο πρόσφατα στην Χιλή το 2010 και στο Christchurch το 2011 και στην Ιαπωνία το 2011. Παρατηρώντας τις σεισμικές καταστροφές στους αγωγούς, συμπεραίνεται ότι παρόμοιες καταστροφές μπορούν να προκληθούν κι από παροδικές παραμορφώσεις του εδάφους λόγω μετάδοσης κυμάτων ή μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων, όπως κατολισθήσεων και μετακίνησης εδάφους λόγω ρευστοποίησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εδαφικές μετακινήσεις λόγω ενεργών ρηγμάτων, ακόμη κι αν περιορίζονται σε μικρής έκτασης περιοχές, προκαλούν σημαντικότερες καταστροφές στους υπόγειους αγωγούς. Υπάρχουν μόνον ελάχιστες περιπτώσεις αστοχίας αγωγών λόγω μετάδοσης κυμάτων (Μεξικό 1985-Michoacan). Ωστόσο, η εδαφική μετακίνηση λόγω ρήγματος είναι ένα οιωνεί στατικό πρόβλημα και μπορεί να προκαλέσει σημαντικές καταστροφές στον αγωγό λόγω της σεισμικής έντασης.

1.2 Ρήγματα

Παρόλο που η παρούσα εργασία διερευνά ρήγματα τα οποία βρίσκονται στις ανώτερες εδαφικές στιβάδες, είναι χρήσιμο να παρουσιαστεί μια σύντομη θεωρητική ανασκόπηση στα ρήγματα και στην σχέση τους με την δημιουργία σεισμικών φαινομένων. Λόγω της τριβής και της σιβαρότητας του βραχώδους εδάφους, οι βράχοι δεν μπορούν να ολισθήσουν και να γλιστρήσουν η μια πάνω στην άλλη. Ωστόσο, οι τάσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των

βράχων όταν φτάσουν την οριακή αντοχή αυτών, η ενέργεια που αναπτύσσεται «εκτονώνεται» ως παραμόρφωση και διαχέεται στο επίπεδο που υπάρχει σχετική μετατόπιση-το ρήγμα. Υπάρχουν δύο τρόποι να προσομοιωθεί αυτή η διεπιφάνεια- με το μοντέλο Asperities και με μακροσκοπικά ανομοιογενές τραχύ, όπου η διεπιφάνεια αποτελείται από ασυνέχειες με περιοχές με διαφορετικής διατμητικής αντοχής. Παρακάτω παρατείνονται τα βασικότερα είδη ρηγμάτων.

Ρήγματα ολίσθησης

Τα ρήγματα ολίσθησης προκαλούνται κυρίως λόγω οριζόντιας μετακίνησης. **Σχήμα 1.2.1**

Κανονικά κι ανάστροφα ρήγματα (dip-slip faults)

Στα δύο αυτά ρήγματα επικρατεί η κατακόρυφη μετακίνηση. Κανονικά **Σχήμα 1.2.2** λέγονται τα ρήγματα στα οποία ο μετακινούμενος βράχος κινείται σχετικώς προς τα κάτω λόγω απομειωμένης εφελκυστικής τάσης. Η κίνηση αυτή οφείλεται στην ύπαρξη βαρύτητας. Στο ανάστροφο ρήγμα **Σχήμα 1.2.3** ο μετακινούμενος βράχος κινείται προς τα πάνω σε σχέση με τον σταθερό λόγω θλίψης.

Ρήγματα λοξής μετατόπισης (oblique-slip faults)

Τα ρήγματα λοξής μετατόπισης είναι αποτέλεσμα συνδυασμού ολισθαίνοντος και βαρύτητας ρήγματος **Σχήμα 1.2.4**. Στα ρήγματα αυτά δεν είναι απαραίτητο να δημιουργούν διεπιφάνεια. Η ρήξη μπορεί να φτάσει μέχρι και στα ανώτερα εδαφικά στρώματα αναλόγως με το βάθος του εδαφικού στρώματος, την γωνία του ρήγματος, τις εδαφικές ιδιότητες και την μετατόπιση του μετακινούμενου βράχου.

1.3 Περί αγωγών

Οι αγωγοί που μεταφέρουν πετρέλαιο και φυσικό αέριο είναι συνήθως κατασκευασμένοι από χάλυβα με ποικίλα χαρακτηριστικά και αντοχές **Πίνακας 1.1**. ή από πλαστικό (HDPE), με εσωτερική διάμετρο με τιμές από 4 έως 48 ίντσες (100 – 200 mm). Ένα άλλο υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί είναι το πλαστικό ενισχυμένο με γυαλί (γνωστό ως GRP). Οι περισσότεροι

αγωγοί θάβονται τυπικά σε βάθη από 0.9 έως 2.5 m. Το πετρέλαιο φυλάσσεται σε «χώρους στάθμευσης» που απέχουν μεταξύ τους 30 με 160 km, ενώ το φυσικό αέριο κάθε 70 με 500 km. Οι τιμές αυτές εξαρτώνται σαφώς από τον σχεδιασμό των αγωγών, την τοπογραφία και την ικανότητα υλοποίησης. Η συνήθης ταχύτητα της ροής πετρελαίου είναι 1 με 6 m/s και του φυσικού αερίου 20 με 60 m/s.

Είθισται στις περισσότερες περιπτώσεις οι αγωγοί να τοποθετούνται κάτω από το έδαφος. Υπάρχουν, όμως και περιπτώσεις στις οποίες πρέπει να διασχίσουν είτε μια κοιλάδα είτε ένα ποτάμι μέσω μιας γέφυρας. Αυτό συμβαίνει και σε περιπτώσεις που ο αγωγός διασχίζει ρήγματα που προκαλούν σημαντικές μετατοπίσεις εδάφους όπως ο αγωγός πετρελαίου Trans-Alaska **Σχήμα 1.3.1.**

Μία σύγκριση μεταξύ υπόγειων κι επιφανειακών αγωγών οδηγεί στα παρακάτω συμπεράσματα:

Οι **υπόγειοι αγωγοί** προστατεύονται καλύτερα από θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και ακραία καιρικά φαινόμενα καθώς κι από ατυχήματα όπως τροχαία και τρομοκρατικές επιθέσεις. Έχουν μικρή επίδραση στον περιβάλλον χώρο. Μπορούν να εκτείνονται για χιλιάδες χιλιόμετρα χωρίς να εμποδίζουν και να δημιουργούν εμπόδια όπως σε δρόμους. Επιπλέον, έχουν το ίδιο, ίσως και μικρότερο κατασκευαστικό κόστος, συγκρίνοντάς τις εκκαφές με τις ειδικές θεμελιώσεις που χρειάζονται οι υπέργιοι αγωγοί.

Οι **επιφανειακοί αγωγοί** μπορούν να παραλάβουν μεγαλύτερες σχετικές μετακινήσεις και μπορούν να ελεγχθούν πιο εύκολα.

Οι αγωγοί μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

Συνάθροισμα αγωγών

Ομάδα μικρότερων διασυνδεδεμένων αγωγών σχηματίζοντας σύνθετα δίκτυα με σκοπό να παρέχουν πετρέλαιο ή φυσικό αέριο από κοντινές πηγές προς τις μονάδες επεξεργασίας.

Αγωγοί διανομής

Αποτελείται από διασυνδεδεμένους αγωγούς με μικρή διάμετρο. Συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν προϊόντα στον τελικό καταναλωτή

Αγωγοί μεταφοράς ή μετάδοσης

Είναι κυρίως αγωγοί μεγάλου μήκους με μεγάλη διάμετρο, για την μεταφορά αγαθών (πετρέλαιο, φυσικό αέριο) μεταξύ πόλεων, χωρών ακόμη κι ηπείρων. Οι αγωγοί «μετάδοσης» είναι οι κύριες αρτηρίες της πετρελαικής βιομηχανίας.

Κατασκευαστική διαδικασία

Πριν από κάθε κατασκευαστική διαδικασία θα πρέπει ο κατασκευαστικός διάδρομος να είναι καθαρός από δέντρα, κλαδιά, μεγάλες πέτρες κι όποιο άλλο εμπόδιο. Έπειτα δημιουργείται η τάφρος που θα τοποθετηθεί ο αγωγός **Σχήμα 1.3.2**. Το εόμενο βήμα είναι η σύνδεση καμπυλωμένων αγωγών. Εφόσον, η πορεία της τάφρου δεν είναι μια ευθεία γραμμή ο αγωγός θα πρέπει να καμπυλώνεται σε κάποια σημεία ούτως ώστε να να προσαρμοστεί σ αυτό. Έπειτα, οι συνδετικοί κρίκοι από τα διαφορετικά κομμάτια χωρίζονται σε περισσότερα μέρη. Αν κι ο αγωγός θα φτάσει στην σωστή θέση επενδυμένο με αντιδιαβρωτικό υλικό, το πλήρωμα θα βάλει επιπρόσθετη αντιδιαβρωτική επένδυση στις περιοχές συγκόλλησης και θα διορθώσει τις όποιες εργοστασιακές βλάβες για να αποφευχθεί η σκουριά. Όταν οι διαδικασίες συγκόλλησης και προστασίας τελειώσουν ο αγωγός τοποθετείται πάνω από το χαντάκι, με την βοήθεια μηχανημάτων, τα οποία από την μια πλευρά έχουν ανυψωτικό μηχανισμό **Σχήμα 1.3.4, 1.3.5**. έπειτα ο αγωγός τοποθετείται στον πάτο του ορύγματος. Σε βραχώδη ή πολύ πυκνά εδάφη είναι κάποιες φορές απαραίτητο να τοποθετείται ένα στρώμα από καλό χώμα στον πάτο της τάφρου. Έτσι, προστατεύεται ο αγωγός και η προστατευτική μεμβράνη από τυχόν καταστροφή. Οι τελικές περικοπές του αγωγού έχουν κατασκευαστεί για να συνδέσουν τον αγωγό με την αντιδιαβρωτική μεμβράνη και τις συγκολλήσεις **Σχήμα 1.3.6**. Ο αγωγός μετά ελέγχεται για τυχόν διαρροές, γεμίζοντάς τον με νερό ελέγχοντας για τυχόν διαρροές. Στο τέλος, το όρυγμα καλύπτεται με έδαφος κι η επιφάνεια καθαρίζεται κι επανέρχεται αν είναι δυνατόν στην αρχική της κατάσταση.

1.4 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Το πρόβλημα των αγωγών που διασχίζουν ενεργά τεκτονικά ρήγματα έχει προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας αναλυτικές, αριθμητικές μεθόδους και πειραματική διαδικασία. Με την

αναλυτική διερεύνηση πρώτι ασχολήθηκαν οι Newmark & Hall (1975) **Σχήμα 1.4.1**. Ασχολήθηκαν με την ικανότητα του αγωγού να μπορεί να αντέξει μεγάλες μετατοπίσεις λόγω ολισθαίνοντος ρήγματος. Στο μοντέλο τους ο αγωγός θεωρείται πλήρως συγκολλημένος με το έδαφος και τα δύο ακραία σημεία βρίσκονται σε απόσταση L από το ρήγμα. Τα σύνορα αυτά είναι τέτοια ώστε να έχουν αρκετή αντοχή σε αξονική μετακίνηση. Αμελήσαν την καμπτική δυσκαμψία του αγωγού καθώς και την εγκάρσια αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους κι αγωγού. Απέδειξαν, ότι η φέρουσα ικανότητα των αγωγών υποβαλλόμενων σε ρήγμα εξαρτάται από τις εδαφικές συνθήκες, τον αγωγό και τα χαρακτηριστικά του ρήγματος κι ότι μειώνοντας την διαμήκη αντοχή του εδάφους στην κίνηση του αγωγού αυξάνεται η αντοχή του αγωγού. Επιπλέον, προτείνουν ότι ο αγωγός πρέπει να τοποθετείται σε ορύγματα με μια μικρή κλίση στις πλευρές ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί καλύτερα τόσο στις εγκάρσιες όσο και στις διαμήκεις μετατοπίσεις. Μεταγενέστερα οι Kennedy et al (1977) **Σχήμα 1.4.2** επέκτειναν την θεωρία των Newmark & Hall λαμβάνοντας υπόψιν τις παθητικές ωθήσεις του εδάφους καθώς και την μεγάλη εκτροπή. Θεωρείται ότι ο αγωγός είναι σαν ένα εύκαμπτο καλώδιο που παραμορφώνεται σε μια σταθερή καμπύλη που προσεγγίζει ασυμπτωτικά το άθικτο κομμάτι του αγωγού. Σε αυτό το μοντέλο, μόνον η εφελκυστική αξονική δύναμη ισορροπεί στο σημείο του ρήγματος. Καμία καμπτική αντοχή δεν λαμβάνεται υπόψιν. Ωστόσο, με αυτές τις παραδοχές δεν μπορεί να ικανοποιηθεί η ισορροπία του αγωγού που διασχίζει ολισθαίνον ρήγμα και προκαλεί θλίψη στον αγωγό. Οι Βουγιούκας και Καρύδης (1979) **Σχήμα 1.4.3** πρότειναν ένα μοντέλο που εφαρμόζεται και σε ολισθαίνον και σε κανονικό κι ανάστροφο ρήγμα υπολογίζοντας την οκλιμότητα που απαιτείται ώστε οι αγωγοί να αντέχουν υπό μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις. Οι Wang & Yeh (1985) **Σχήμα 1.4.4** ασχολούνται με έναν καμπύλο αγωγό για να αναλύσουν την συμπεριφορά του αγωγού σε ολισθαίνον ρήγμα. Προσομοίωσαν έναν αγωγό με μεγάλη καμπυλότητα ως ένα κομμάτι με σταθερή καμπυλότητα και το υπόλοιπο με μικρή καμπυλότητα ως ένα στοιχείο beam σε ελαστική θεμελίωση. Αυτό το μοντέλο περιλαμβάνει την καμπτική δυσκαμψία του αγωγού και συνοριακές συνθήκες με τα beam στοιχεία σε ελαστική θεμελίωση τα οποία είναι σε απόσταση από την ζώνη του ρήγματος. Η μεθοδολογία τους είναι μόνον για ολισθαίνον ρήγμα και διαχωρίζεται σε 4 μέρη, δύο στην πολύ καμπυλωμένη περιοχή εκατέρωθεν του ρήγματος και δύο έξω από αυτήν την ζώνη αντίστοιχα. Αυτό το μοντέλο έδωσε πιο ρεαλιστικά

αποτελέσματα αποδεικνύοντας ότι λήφθηκαν υπόψιν οι σωστές παράμετροι. Οι Chiou et al (1994) συμπέραναν ότι η καμπυλότητα του παραμορφωμένου αγωγού είναι άγνωστη και δύσκολα μπορεί να προβλεφθεί. Ακόμη, θεωρώντας σταθερή την καμπυλότητα του μοντέλου υπερεκτιμάται η στιβαρότητα του αγωγού κι υποεκτιμάται η παραμόρφωσή του. Οι Καραμήτρος et al (2006) **Σχήμα 1.4.5** προσπάθησαν να βελτιώσουν τα μοντέλα των Kennedy & Wang, προτείνοντας μια πιο εμπειριστατομένη αναλυτική μέθοδο για ολισθαίνον ρήγμα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για κανονικό ρήγμα. Παρουσίασαν μια αναλυτική μέθοδο, τελειοποιώντας ήδη υπάρχουσες χρησιμοποιώντας την θεωρία της δοκού πάνω σε ελαστική θεμελίωση και υπολογίζοντας την αξονική δύναμη, την καμπτική και μέγιστη παραμόρφωση του αγωγού. Συνέκριναν τα αναλυτικά αποτελέσματα με αριθμητικά, τα οποία προέκυψαν από τρισδιάστατες αναλύσεις αποτελούμενα από κελυφωειδή στοιχεία για τον αγωγό και μη γραμμικά ελατήρια για την προσομοίωση του εδάφους. Όσον αφορά σ όλες τις προηγούμενες αναλυτικές μεθόδους, δεν λαμβάνονται υπόψιν φαινόμενα δευτέρας τάξεως, όπως τοπικός λυγισμός κι εγκάρσιες παραμορφώσεις καθώς υπάρχουν κι όρια παραμορφώσεων για την εφαρμογή τους και κυρίως όταν ο εφελκυσμός κι η κάμψη είναι οι κυρίαρχοι τρόποι παραμόρφωσης.

Υπάρχει, ακόμα, ένας μεγάλος αριθμός ερευνητών που ασχολήθηκαν με την αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος. Οι περισσότεροι από αυτούς χρησιμοποιούν πεπερασμένα στοιχεία κι έχουν ασχοληθεί κυρίως με ολισθαίνοντα ρήγματα. Takada et al (2001) μελέτησαν την ελαστοπλαστική συμπεριφορά ενός αγωγού προσομοιωμένο με κελύφη υπό λυγισμό σε κανονικό κι ανάστροφο ρήγμα. Βασισμένοι στην δουλειά του Kennedy προτείνουν μια απλοποιημένη μεθοδολογία για την μέγιστη αξονική παραμόρφωση σε χαλύβδινους αγωγούς **Σχήμα 1.4.6**. Οι O'Rourke και Liu (1997) ανέπτυξαν ένα αριθμητικό μοντέλο για να αναλύσουν την απόκριση του αγωγού υποβαλλόμενο σε διάρρηξη και συνέκριναν τα αποτελέσματα με άλλες ήδη υπάρχουσες αναλυτικές προσεγγίσεις. Συμπέραναν πως η αναλυτική λύση του Kennedy είναι η πιο κατάλληλη για αγωγούς υποβαλλόμενους σε ολισθαίνον ρήγμα, κυρίως στον εφελκυσμό. Η σεισμική ανάλυση υπόγειων καθώς και επιφανειακών αγωγών, υπό στιγμιαία ή μόνιμη ή μόνιμη μετατόπιση εξετάστηκε από τους Arifin et al (2010). Χρησιμοποίησαν στοιχεία δοκού σε πεπερασμένα στοιχεία για τον αγωγό και μη γραμμικά ελατήρια για να προσομοιώσουν την συμπεριφορά του γύρω εδάφους. Το

ίδιο μοντέλο είχαν οι Odina και Tan (2009) για την διερεύνηση αγωγού υποβαλλόμενου σε σεισμικές μετακινήσεις. Το 2010 οι Odina και Conder επέκτειναν την δουλειά τους εξετάζοντας τις επιδράσεις του πλατό Luder's για την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων αγωγού ο οποίος διασχίζει ενεργά ρήγματα.

Αξίζει να δοθεί έμφαση στην έρευνα των Vazouras et al (2010,2012). Προσομοίωσαν έναν υπόγειο αγωγό υποβαλλόμενο σε ολισθαίνον ρήγμα, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ABAQUS **Σχήμα 1.4.7,1.4.8**. Λήφθηκαν υπόψιν διάφορες παράμετροι που αφορούσαν τον τύπο εδάφους, την γωνία ρήγματος, το πάχος και την διάμετρο του αγωγού **Σχήμα 1.4.9**. Εξετάστηκε κι η επίδραση της ύπαρξης εσωτερικής πίεσης στον αγωγό **Σχήμα 1.4.10**.

Αξιοσημείωτη πειραματική διερεύνηση έγινε στο πρόγραμμα NEESR στο πανεπιστήμιο του Cornell πολυτεχνείο του Rensselaer υπό την καθοδήγηση του O'Rourke (2008). Η έρευνα υπάρχει στα site των πανεπιστημίων Cornell και Rensselaer. Χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός για μεγάλης κλίμακας πειράματα με αλληλεπίδραση εδάφους- κατασκευής, καθώς και πειράματα σε φυγοκεντριστή. Ο εξοπλισμός στο Cornell αποτελείται από υδραυλικά συστήματα, δυνατότητες αποθήκευσης μεγάλης ποσότητας εδάφους για την επίτευξη πειραμάτων σε μεγάλη κλίμακα **Σχήμα 1.4.11**. Το πολυτεχνείο RPI παρείχε έναν φυγοκεντριστή για την προσομοίωση του προβλήματος με 150g **Σχήμα 1.4.14**. Επισημαίνεται πως τα πειράματα αυτά είναι μέχρι σήμερα τα μεγαλύτερης κλίμακας πειράματα που έχουν γίνει για αγωγούς σε εδαφικές παραμορφώσεις. Τα πειράματα αυτά όχι μόνον προσφέρουν μεγάλη μετακίνηση στους αγωγούς, αλλά δίνουν και σημαντικές πληροφορίες για τις αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού, τις αλλαγές στο σχήμα και την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, δίνοντας έτσι πληροφορίες για τον σχεδιασμό και την κατασκευή αγωγών σε περιπτώσεις σεισμού, πλημμύρας, κατολίσθησης, μεγάλων μετακινήσεων λόγω εκσκαφών σηράγγων ή κι από την άντληση υγρών κατά την διάρκεια εξόλκευσης πετρελαίου. Τέλος οι Sim et al (2011) (Imperial College London and University of Tokyo) έκαναν μία σειρά πειραμάτων σε σεισμική τράπεζα στα οποία αγωγοί μικρής διαμέτρου διασχίζουν κατακόρυφα ρήγματα **Σχήμα 1.4.18**. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το πεδίο των καμπτικών παραμορφώσεων επηρεάζεται κυρίως από το πεδίο των μετακινήσεων της διάρρηξης. Ακόμη, η ένταση του σεισμού δεν παίζει σημαντικό ρόλο της καμπτικής συμπεριφοράς του αγωγού που προκλήθηκε από ρήγμα.

1.5 Κίνητρα για την μελέτη

Η ενέργεια είναι ένα από τα πιο σημαντικά θέματα της σημερινής κοινωνίας. Την σημερινή εποχή κι ίσως και για πολλές δεκαετίες ακόμη οι υδρογονάνθρακες αποτελούν την κύρια πηγή ενέργειας. Η μεταφορά ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας κι η μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου γίνεται με δίκτυα αγωγών. Κάθε ώρα της ημέρας οι άνθρωποι καταναλώνουν χιλιάδες κυβικά μέτρα πετρελαίου κι αερίου και σχεδόν πάντα κινούνται μέσω αγωγών.

Χθες και σήμερα

Η πρώτη χρήση αγωγού καταγράφηκε στην Κίνα το 2500 πΧ. Οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν αγωγούς από μπαμπού για να μεταφέρουν φυσικό αέριο από ρηχές πηγές. Έβραζαν το νερό της θάλασσας για να το ξεχωρίσουν από το αλάτι ούτως ώστε να είναι πόσιμο. Σήμερα οι αγωγοί πετρελαίου και φυσικού αερίου προέρχονται από την βιομηχανία πετρελαίου. Το πετρέλαιο αντλήθηκε πρώτα στο Μπακού του Αρζεμπαιτζάν το 1848 και στην Πολωνία το 1854, αλλά η πρώτη μεγάλη και κύρια άντληση έγινε το 1859 στις ΗΠΑ. Αργότερα, οι συγκοινωνιακοί δρόμοι ήταν ο κύριος τρόπος μεταφοράς πετρελαίου. Το 1865 ένας αγωγός διαμέτρου 152 mm κατασκευάστηκε στην Πενσιλβάνια για την μεταφορά πετρελαίου, μεταφέροντας 7000 barrels/ημέρα. Ωστόσο, η πραγματική αλλαγή στην κατασκευή αγωγών συνέβησαν στην Αμερική το 1940 λόγω του Β Παγκοσμίου πολέμου.

Σήμερα το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, παρέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας. Η κατανάλωση του κόσμου για την κάλυψη των πρωταρχικών αναγκών ενέργειας είναι:

Πετρέλαιο: 34 %

Άνθρακας: 24%

Φυσικό αέριο: 21%

Πυρηνική: 4%

Υδροηλεκτρική: 2%

Άλλη μορφή: 12%

Η βιομηχανία πετρελαίου είναι αρκετά μεγάλη και πρόκειται να γίνει μεγαλύτερη. Ο οργανισμός US Energy Information Administration's World Energy Outlook εκτιμά πως τα ορυκτά καύσιμα θα παραμείνουν η πρωταρχική πηγή ενέργειας, αυξάνοντας περισσότερο

από το 90 % της ενεργειακής κάλυψης. Μεγάλες βιομηχανικές εταιρίες πετρελαίου έχουν κέρδη 36 δις \$, τα μεγαλύτερα κέρδη από κάθε άλλη εταιρία. Αυτά τα προνόμια φαίνεται να συνεχίσουν και τα επόμενα χρόνια, καθώς η τιμή των καυσίμων αυξάνεται. Η ίδια άνηση παρατηρείται και στην βιομηχανία κατασκευής αγωγών. Τα ποσά κατασκευής αγωγών πετρελαίου ήταν 23 δις \$ το 2006 και σήμερα αγγίζουν τα 45 δις \$. Εκτιμάται πως η κατασκευή των αγωγών θα είναι μέχρι 7% περισσότερη από την ήδη υπάρχουσα τα επόμενα 15 χρόνια. Διεθνώς, 32.000 km από καινούριους αγωγούς στην ξηρά κατασκευάζονται κάθε χρόνο, με κόστος 28 δις \$. Το συνολικό μήκος αγωγών εκτιμάται στα 3.500.000 km **Σχήμα 1.5.2-1.5.6**, εκ των οποίων το 64% μεταφέρει φυσικό αέριο, το 19% πετρελικά προϊόντα και το 17% ακατέργαστο πετρέλαιο.

Οι αγωγοί είναι ένας πολύ ασφαλής τρόπος μεταφοράς ενέργειας και για τους ανθρώπους και για το περιβάλλον. Έρευνες έχουν δείξει πως αυτό το είδος μεταφοράς είναι 100 φορές πιο ασφαλές από ότι η μεταφορά με φορτηγά και 40 φορές από ότι με πετρελικά τάνκερ. Επιπλέον, είναι κι ο πιο οικονομικός τρόπος μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου. Είναι μια μακροχρονικά συμφέρουσα επένδυση κι ίσως η πιο αποτελεσματική σε ενεργιακό επίπεδο, διότι καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με άλλες μορφές παραγωγής ενέργειας.

Τα συστήματα αγωγών είναι υψίστης σημασίας για την μεταφορά ενέργειας στις περισσότερες χώρες του κόσμου. Το μέλλον των αγωγών φαίνεται ενδιαφέρον και λαμπρό. Θα συνεχίσουν να αποτελούν σημαντικό πυλώνα της παροχής ενέργειας και για το λόγω αυτό οι μηχανικοί έχουν χρέος να εξασφαλίσουν την ασφαλή και αποδοτική λειτουργία τους.

Συμπεριφορά σε παλιότερους σεισμούς

Η τρωτότητα των υπόγειων αγωγών σε σεισμικά φαινόμενα έχει προκαλέσει αρκετές καταστροφές κατά την διάρκεια παλιότερων σεισμών **Σχήμα 1.5.7-1.5.10**. παραδείγματα τέτοιων καταστροφών είναι: το 1905 στο Σαν Φρανσίσκο, 1933 Long Beach, 1952 Kern Country, 1964 Alaska, 1964 Niigata, 1971 San Fernando, 1979 Imperial valley, 1987 Equador, 1989 Loma Prieta, 1990 Manjil Earthquake, 1994 Northridge, 1995 Kobe, 1999 Chi-Chi, 1999 Kocaeli, 2010 Chile, 2011 Japan, 2011 Christchurch. Τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις είναι

αυτές στο Σαν Φερνάντο, στην Αλάσκα και στο Εκουαδόρ. Το 1964, ο σεισμός στην Αλάσκα προκάλεσε πάνω από 200 βλάβες σε αγωγούς πετρελαίου και πάνω από 100 σε αγωγούς παροχής νερού. Οι περισσότερες ζημιές οφείλονται σε κατολισθήσεις και διαρρήξεων. Το 1971 στο Σαν Φερνάντο προκλήθηκαν 1400 βλάβες σε αγωγούς. Η πόλη δεν είχε για αρκετό διάστημα υδροδοτικό κι αποχετευτικό σύστημα καθώς κι οι αγωγοί πετρελαίου είχαν υποστεί σημαντικές καταστροφές. Οι κύριοι λόγοι πρόκλησης αυτής της κατάστασης ήταν η ρευστοποίηση κι η εξάπλωση της. Το 1987 στο Εκουαδόρ καταστράφηκε ένα μεγάλο μέρος αγωγών του οποίου η ανακατασκευή κι η καταστροφή του κόστισαν πάνω απο 850 εκατ \$.

Η κατάσταση στην Ελλάδα

Πρόσφατα, στην Ελλάδα, το κύριο δίκτυο αγωγών πετρελαίου ήταν 300 km Αθήνας-Θεσσαλονίκης και το ITG **Σχήμα 1.5.11**. Ωστόσο, η Ελλάδα παίζει αρκετά σημαντικό ρόλο στην παροχή ενέργειας στην Ευρώπη. Υπάρχουν τέσσερα προτεινόμενα σχέδια για την μεταφορά αερίου από την Κασπία και την Κασπία θάλασσα στην Ευρώπη: TAP(Trans-Adriatic Pipeline), ITGI (Interconnector Turkey- Greece- Italy), Nabucco and SEEP (South East Europe Pipeline). Τα δύο πρώτα θα παίξουν αρκετά σημαντικό ρόλο στην παροχή ενέργειας στην Ευρώπη. Το TAP θα είναι 800 km από την Κομοτηνή έως την Αλβανία και αθ καταλήγει στην Σαν Φόκα στην Ιταλία με ένα υποθαλάσσιο κομμάτι 110 km. Το ITGI περιλαμβάνει 600 km από αγωγό σε στεριά στην νότια Ελλάδα και 200 km υποθαλάσσια στο Ιόνιο πέλαγος. Περιλαμβάνει ακόμη ένα κομμάτι σύνδεσης Ελλάδας με Βουλγαρία. (IBG) **Σχήμα 1.5.13**. Είναι φανερό πόσο σημαντικά είναι για την Ελλάδα αυτά τα έργα καθώς από μελέτη το κόστος κάθε χιλιομέτρου για την κατασκευή ανέρχεται στα 0.8 μέχρι τα 3 εκατ ευρώ με το 20-25% το κόστος των μηχανικών και της διαχείρισης. Παρατηρώντας τον τεκτονικό χάρτη της Ευρώπης **Σχήμα 1.5.12**, είναι εύκολο να συμπεράνουμε ότι σχεδόν αναπόφευκτο να μην διασχίσουν οι αγωγοί κάποιο ρήγμα και μάλιστα ενεργό. Να σημειωθεί πως στην Ελλάδα τα περισσότερα ρήγματα στην Ελλάδα είναι κανονικά κι ανάστροφα και για τον λόγο αυτό η παρούσα έρευνα έδωσε έμφαση σ αυτά του είδους ρήγματα.

Σκοπός της έρευνας

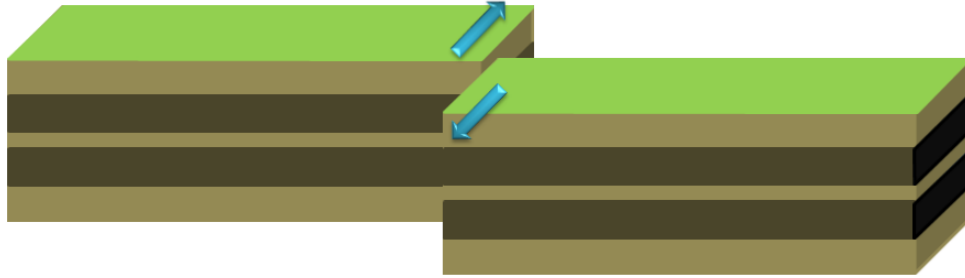
Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, δεν υπάρχει αρκετή αναλυτική διερεύνηση για την συμπεριφορά αγωγού υποβαλλόμενου σε κανονική κι ανάστροφη διάρρηξη. Όταν ο αγωγός υποβάλλεται σε κανονικό ρήγμα, το σύστημα αγωγός-έδαφος παύει να είναι συμμετρικό κι η μετακίνηση του αγωγού είναι πολύ μεγαλύτερη προς τα κάτω παρά προς τα πάνω. Αντίστοιχα, όταν ο αγωγός υποβάλλεται σε ανάστροφο ρήγμα, δεν έχει διερευνηθεί αναλυτικά η συμπεριφορά του. Η συμπεριφορά του σ αυτές τις δύο καταστάσεις είναι δύσκολο να γενικευθεί, διότι πέρα από την ασυμμετρία της εδαφικής συμπεριφοράς, υπάρχουν και δύο γωνίες διχοτόμησης. Οι διεθνείς κανονισμοί φαίνεται να παρουσιάζουν κάποιες ελλείψεις. Η έντονα μη-γραμμική φύση του προβλήματος καθιστά την αριθμητική προσομοίωσή του με πεπερασμένα στοιχεία ιδιαίτερα χρονοβόρα και απαιτητική. Για τον λόγο αυτό, στα αρχικά τουλάχιστον στάδια μιας μελέτης, προκρίνεται συχνά η χρήση απλουστευμένων αριθμητικών μεθοδολογιών, στο βαθμό βέβαια που η ακρίβειά τους είναι τεκμηριωμένη. Η ASCE προτείνει την χρήση ιδεωδώς πλαστικών ελατηρίων τα οποία λαμβάνουν υπόψιν αναλυτικές σχέσεις των O' Rourke, Hansen κι αποτελέσματα απλών πειραματικών διαδικασιών με σκοπό την προσομοίωση του εδάφους. Παρατηρείται όμως, πως οι παραδοχές αυτές δεν λαμβάνουν υπόψιν κάποιες αρκετά σημαντικές παραμέτρους, για την αποτύπωση της πραγματικής συμπεριφοράς εδάφους-αγωγού. Για τον λόγο αυτό γίνεται μια ακριβής διερεύνηση ποιες παράμετροι και παραδοχές λαμβάνει υπόψιν ο κανονισμός που είναι ο πλέον επικρατέστερος διεθνώς και προτείνονται ελατήρια, τα οποία προσομοιώνουν καλύτερα την συμπεριφορά του εδάφους, με αποτέλεσμα να υπάρχει μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για την πραγματική συμπεριφορά του αγωγού. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με μια πλήρως τρισδιάστατη προσομοίωση και θα μπορούν να συγκριθούν με τις όποιες υπάρχουσες αναλυτικές σχέσεις και πειράματα που έχουν γίνει. Τα ελατήρια αυτά αδιαστατοποιούνται με βάση πολλές παραμέτρους ούτως ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορες συνθήκες.

Κλείνοντας, σκοπός αυτής της εργασίας είναι:

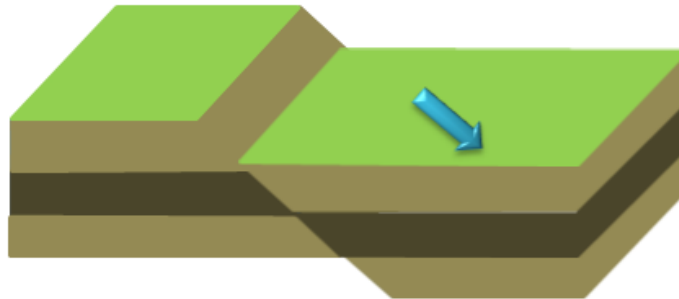
- Να κατανοηθεί πλήρως η μηχανική συμπεριφορά του αγωγού κι η επιρροή διαφόρων παραμέτρων
- Να προταθεί ένα εύχρηστο, γρήγορο κι αποτελεσματικό προσομοίωμα για την επίλυση του προβλήματος

1^ο Κεφάλαιο: Σχήματα

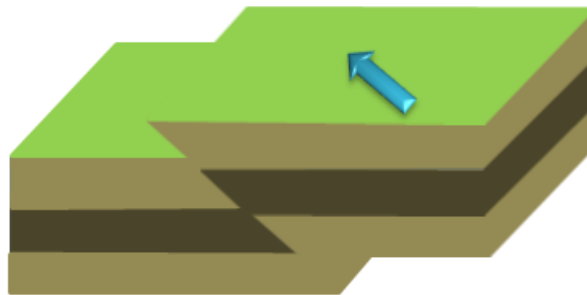
Βασικοί τύποι ρήγματος



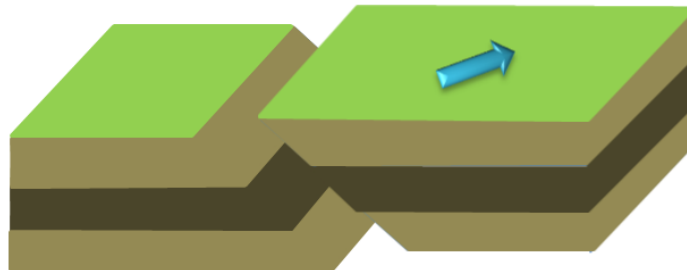
Σχήμα 1.2.1. ολισθαίνον ρήγμα.



Σχήμα 1.2.2. κανονικό ρήγμα.



Σχήμα 1.2.3. ανάστροφο ρήγμα.



Σχήμα 1.2.4. ρήγμα λοξής μετατόπισης



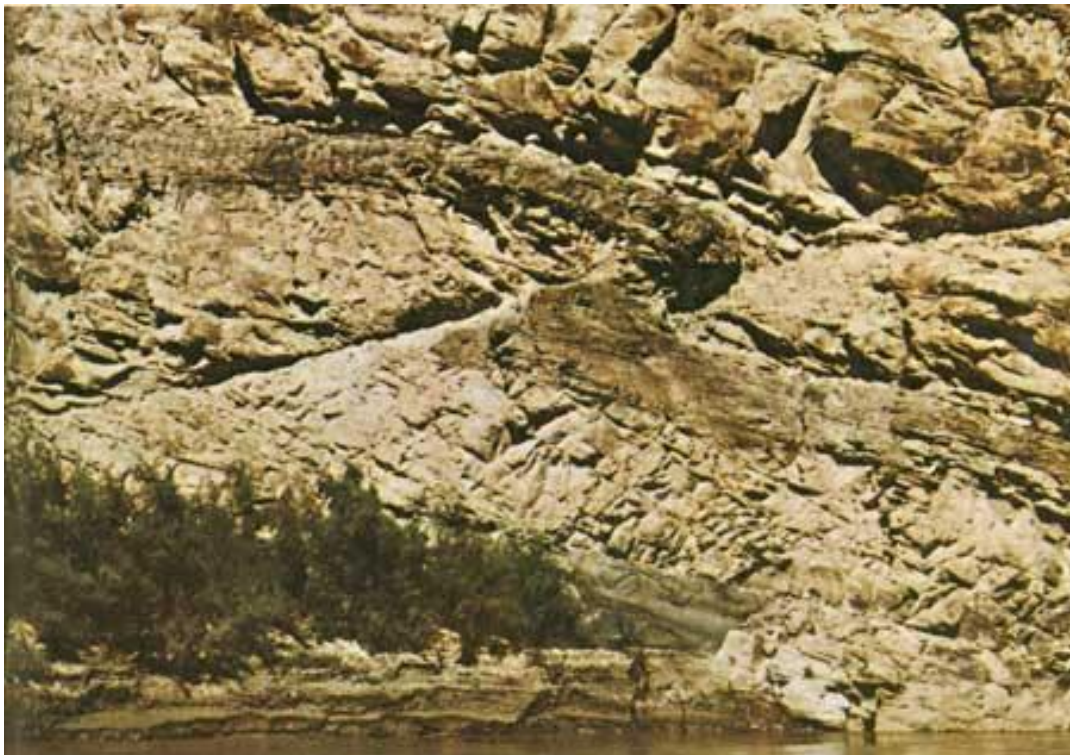
Figure 1.2.5. Το ρήγμα στο Σαν-Αντρέα, ένα ολισθαίνον ρήγμα, το οποίο προκάλεσε τον καταστροφικό σεισμό στον Σαν-Φρανσίσκο(www.SanAndreasFault.org).



Σχήμα 1.2.6. το Denali ρήγμα, Alaska (www.arcticgas.gov).



Σχήμα 1.2.7 Κανονικό ρήγμα στο Tucki Mountain, Καλιφόρνια (www.geotripper.org).



Σχήμα 1.2.8. Ανάστροφο ρήγμα στο Κολοράντο (USGS gallery).

Πίνακας 1.1. Βαθμοί χαλύβδινων αντοχών κι η ελάχιστη αντοχή τους.(American Petroleum Institute)

Grade	Yield Strength, Minimum		Ultimate Tensile Strength, Minimum	
	psi	MPa	psi	MPa
A25	25,000	(172)	45,000	(310)
A	30,000	(207)	48,000	(331)
B	35,000	(241)	60,000	(414)
X42	42,000	(290)	60,000	(414)
X46	46,000	(317)	63,000	(434)
X52	52,000	(359)	66,000	(455)
X56	56,000	(386)	71,000	(490)
X60	60,000	(414)	75,000	(517)
X65	65,000	(448)	77,000	(531)
X70	70,000	(483)	82,000	(565)



Σχήμα 1.3.1. Ο αγωγός πετρελαίου trans-Αλάσκα, όπου διασχίζει το Denali Fault. Τα ειδικά πέδιλα αφήσει το σωλήνα να κινηθεί πλευρικά 6m και 1.5m κάθετα (Alaska Natural Gas Transportation Projects).



Σχήμα 1.3.2. Εκσκαφή ορύγματος (www.constructionphotography.com).



Σχήμα 1.3.3. Εκσκαφή ορύγματος με χρήση ειδικών μηχανημάτων (Lincolnshire gas pipeline works, United Kingdom).



Σχήμα 1.3.4 Καθορίζοντας την πορεία του αγωγού φυσικού αερίου από το Edmonton στο Vancouver, Καναδάς (Canadian Energy pipeline Association).

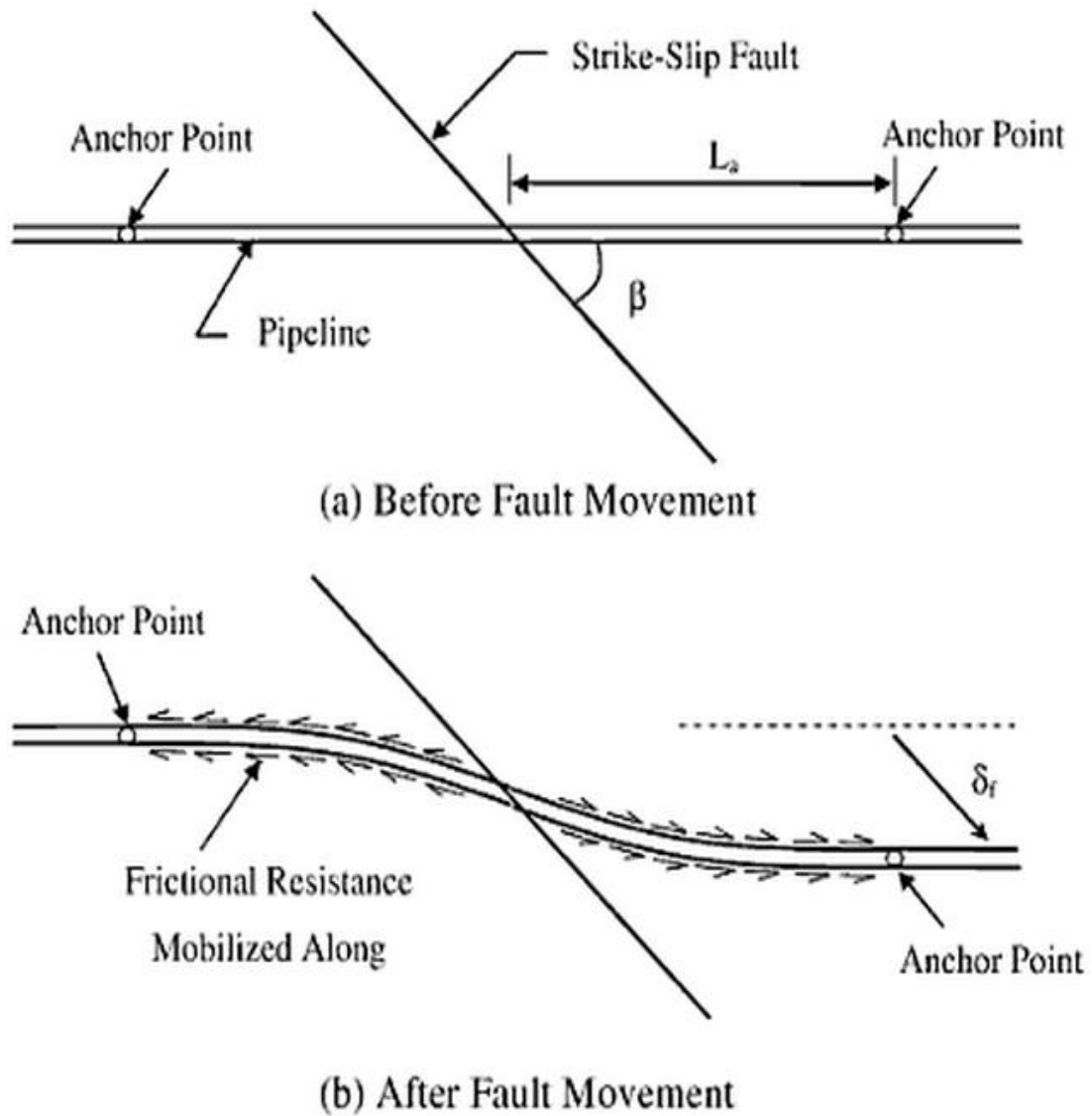


Σχήμα 1.3.5. Τοποθέτηση 170 km αγωγού πετρελαίου στα Ηνωμένα Εμιράτα (www.pipelinesinternational.com).

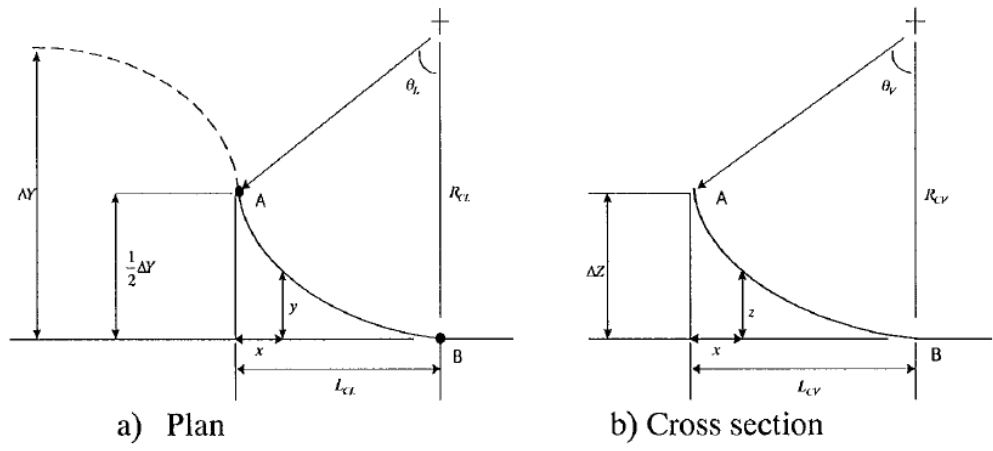
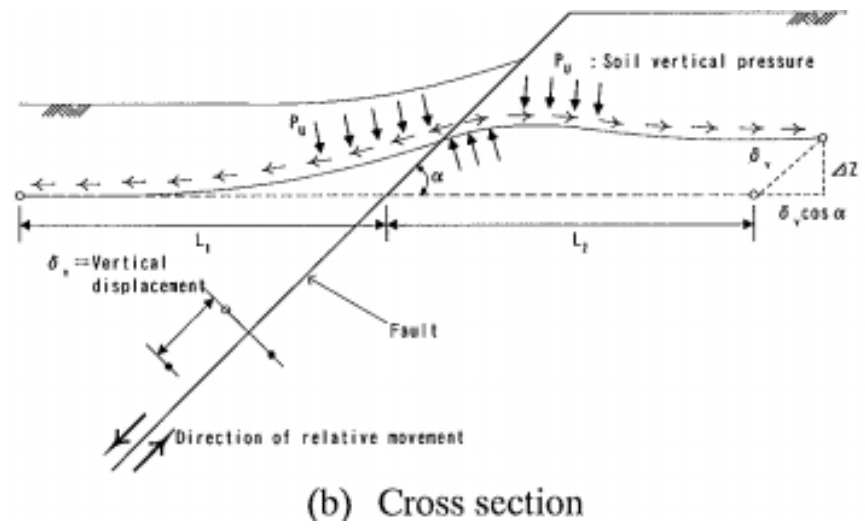
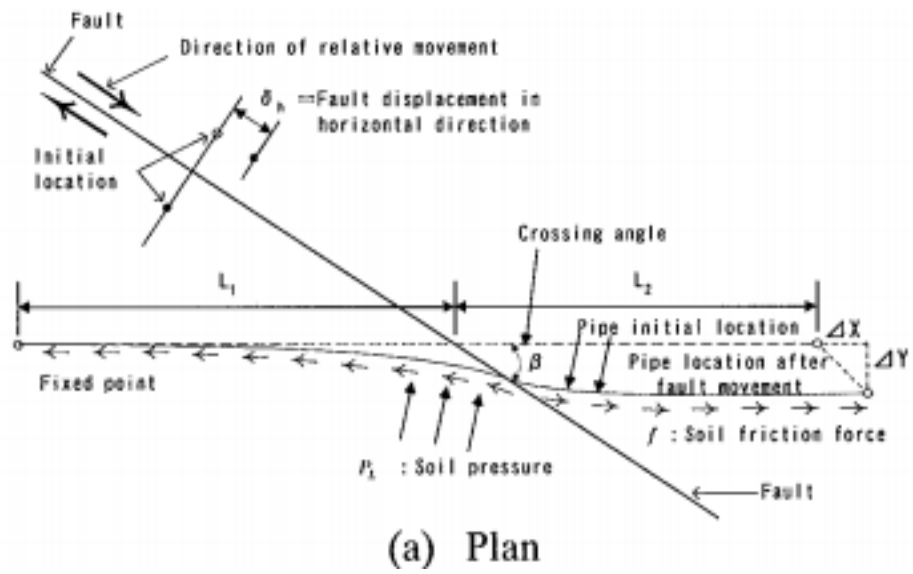


Σχήμα 1.3.6. Διαδικασία συγκόλλησης. Νότια Ουαλία αγωγός φυσικού αερίου. Ο μεγαλύτερος αγωγός φυσικού αερίου του Ηνωμένου Βασιλείου υψηλής πίεσης (317 km) (www.nationalgrid.com).

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

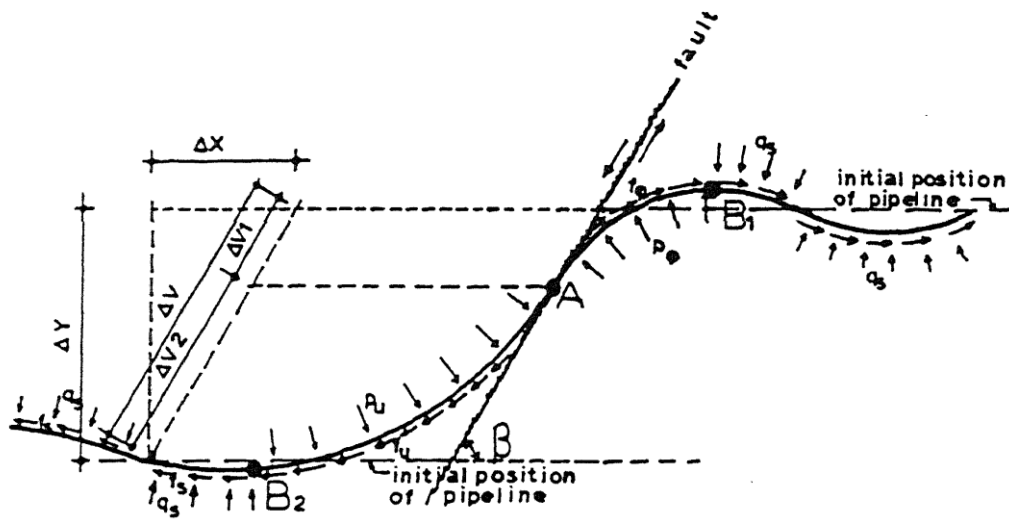


Σχήμα 1.4.1. Προσομοίωμα των Newmark and Hall(1975).

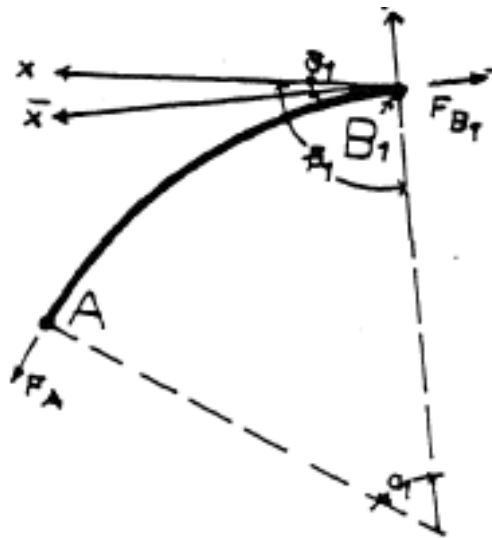


Παραμόρφωση κοντά στο ρήγμα από τους Kennedy et al.

Σχήμα 1.4.2. Προσομοίωμα Kennedy's(1977).

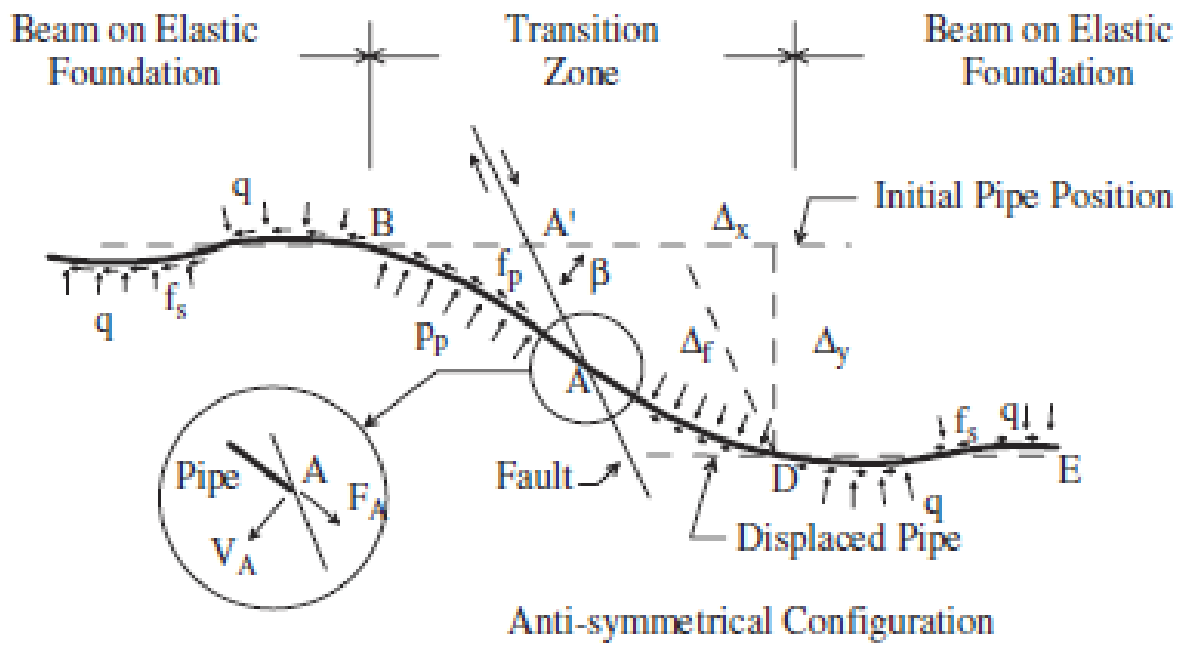


Προσομοίωμα αγωγού υποβαλλόμενου σε κατακόρυφο ρήγμα (τομή).

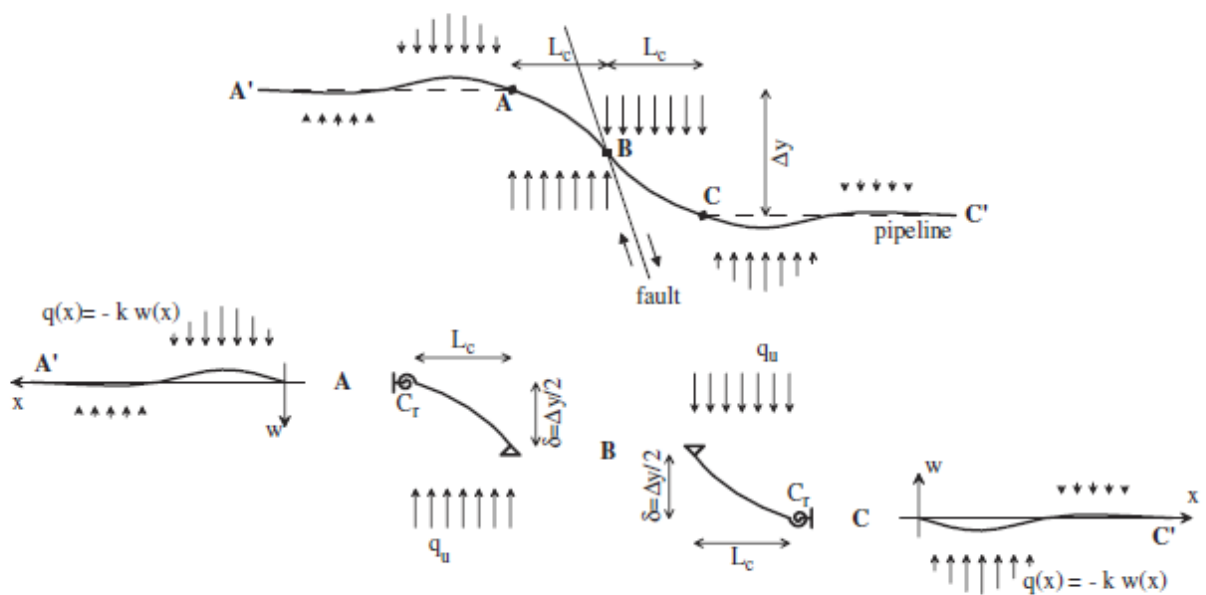


Λεπτομέρεια από μεγάλης παραμόρφωσης περιοχή του μοντέλου.

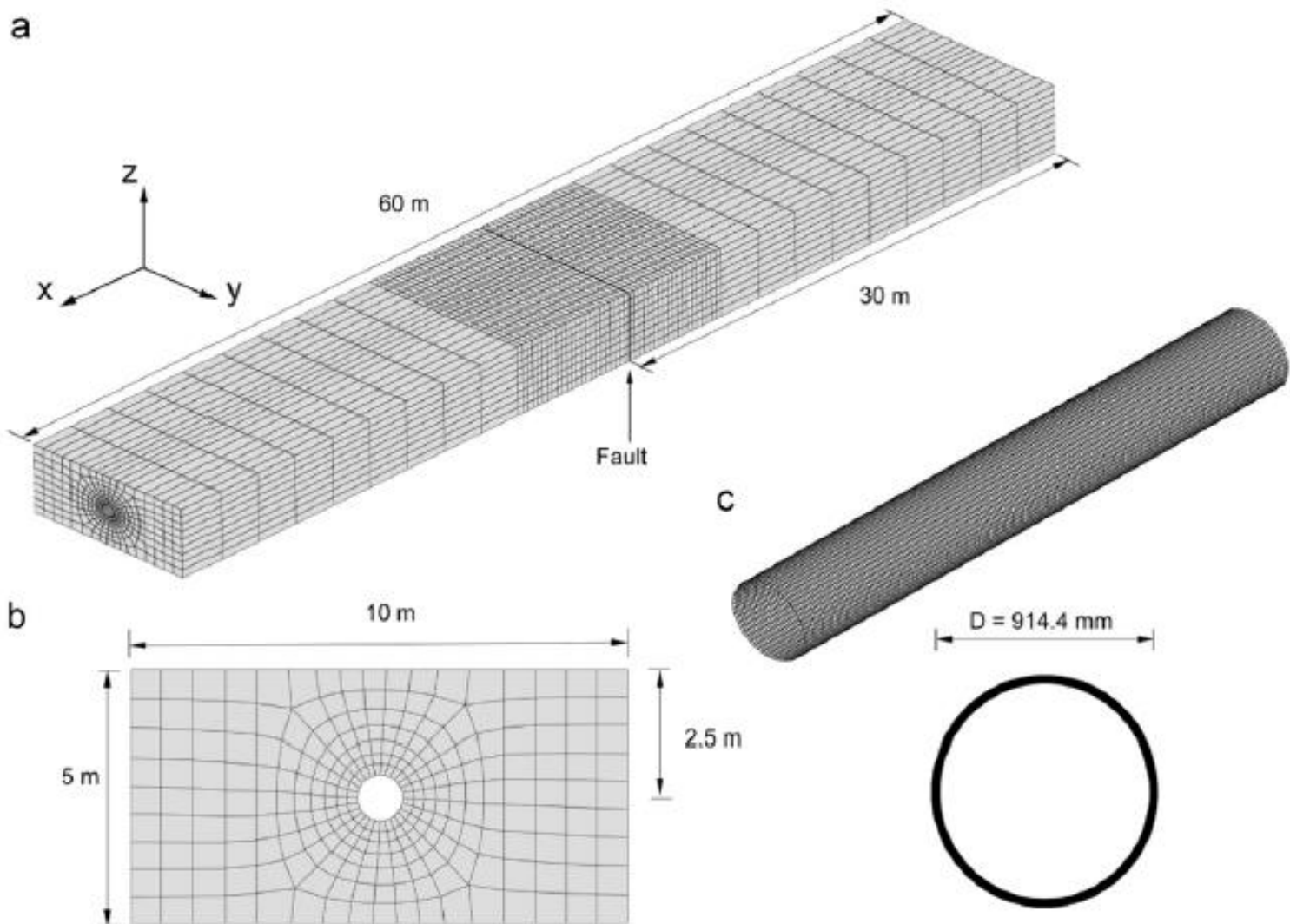
Σχήμα 1.4.3. προσομοίωμα των Βουγιούκας και Καρύδης (1979).



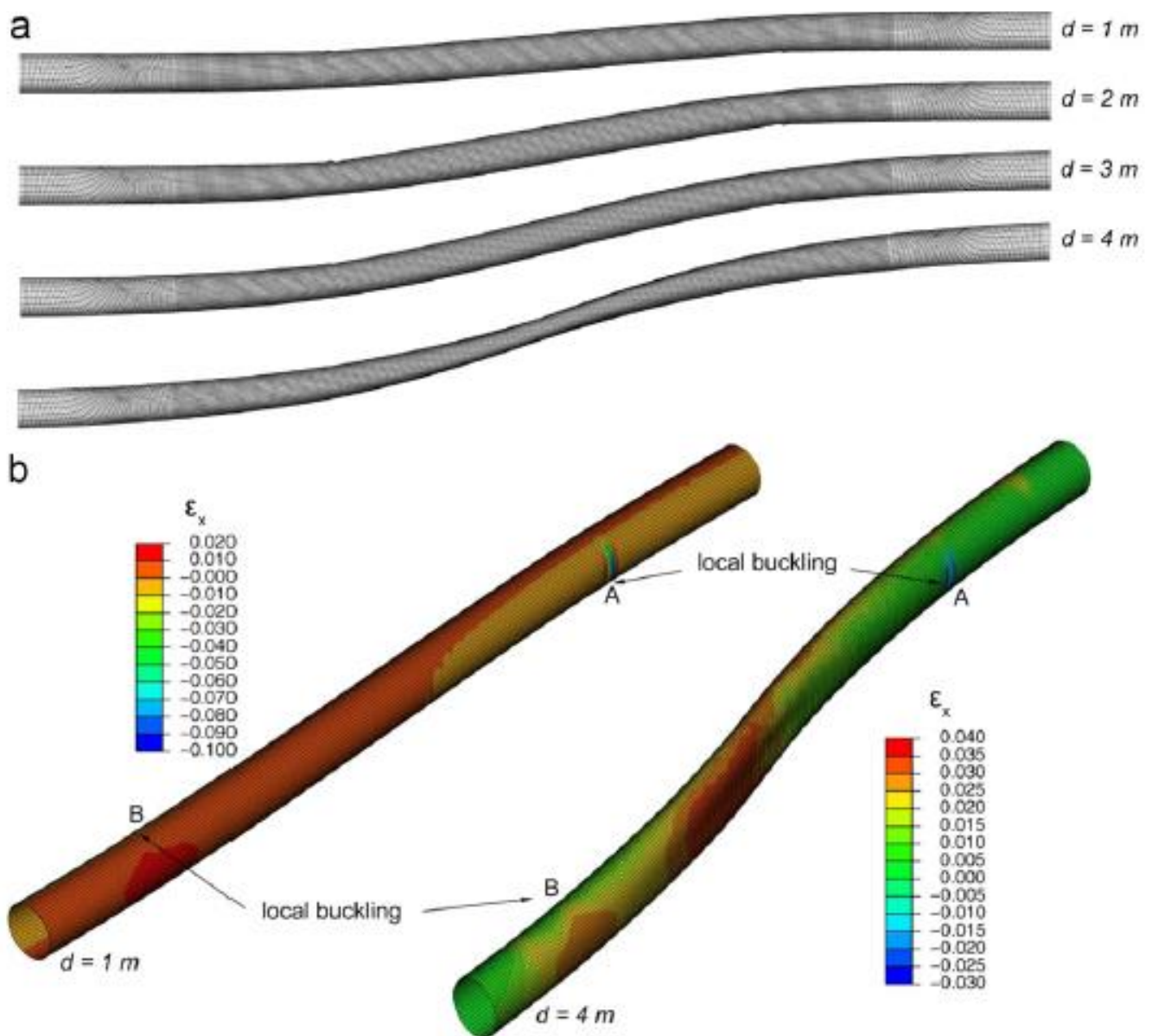
Σχήμα 1.4.4. αναλυτική προσομοίωση από τους Wang και Yeh (1985).



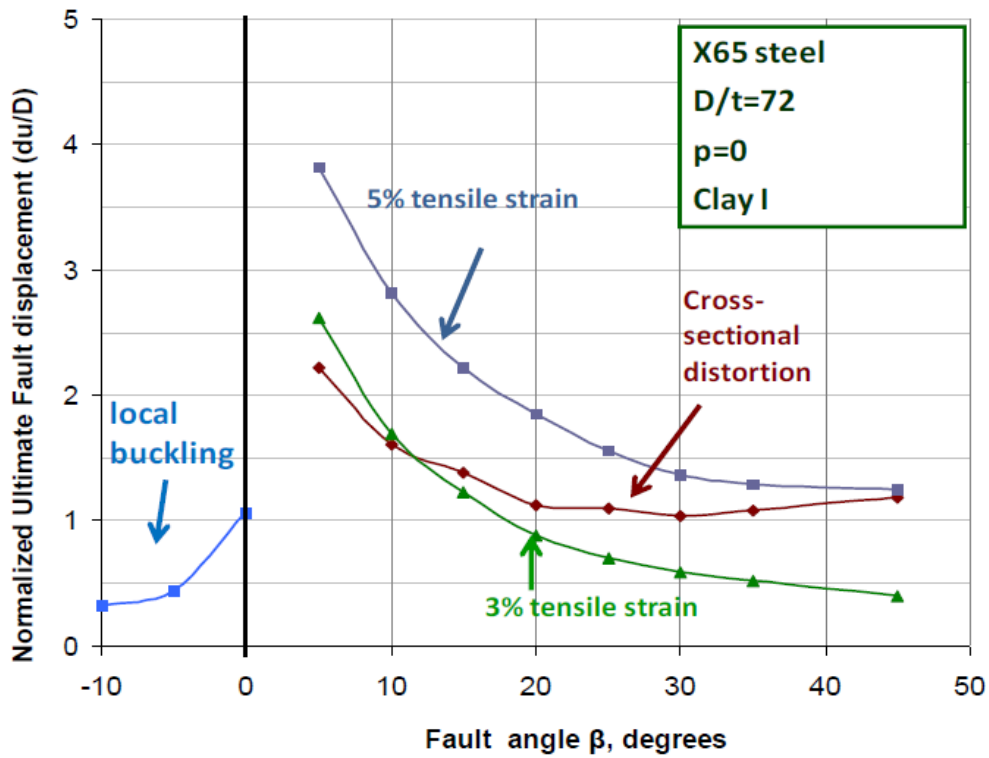
Σχήμα 1.4.5. Χωρίζοντας τον αγωγό σε τέσσερα μέρη. Η μέθοδος των Wang και Yeh πάνω στην οποία βασίστηκε του Καραμίτρου.



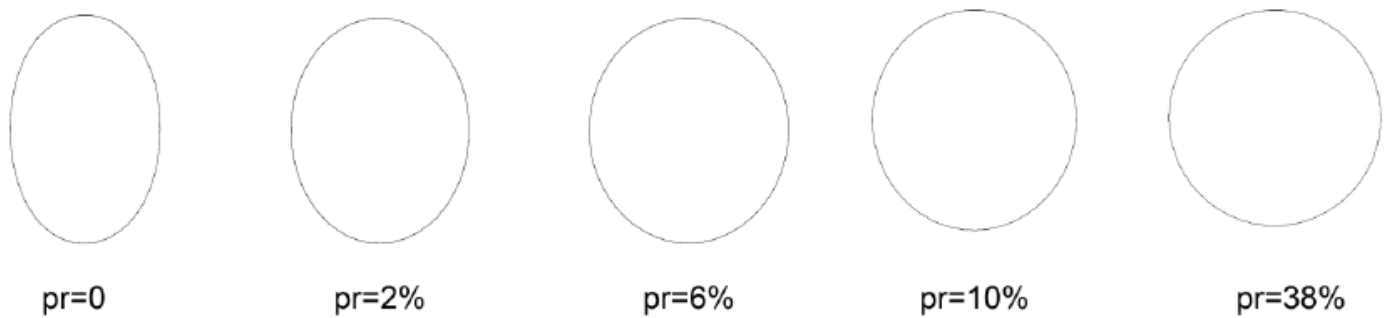
Σχήμα 1.4.7. Το αριθμητικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε από τους Vazouras et al.(2011): (a) εδαφική παραμόρφωση σε οριζόντιο τεκτονικό ρήγμα, (b) τομή (c) χαλυβδινός αγωγός.



Σχήμα 1.4.8. Αποτελέσματα από το προσομοίωμα των Vazouras et al. (2011). (a) κάτοψη του παραμορφωμένου αγωγού σε μετατόπιση $d=1-4\text{m}$ και (b) διαχωρισμός κανονικών παραμορφώσεων σε μετατόπιση ρήγματος ίση με 1 έως 4 m (X65pipe, $D/t=72$).



Σχήμα 1.4.9. Κανονικοποιημένη απόλυτη μετατόπιση για διάφορα όρια σε διαφορετικές γωνίες β (X65 pipe, Clay, $D/t=72$, μηδενική πίεση), Vazouras et al.



Σχήμα 1.4.10. Επίδραση της εσωτερικής πίεσης για την εξέλιξη της παραμόρφωσης διατομής σε αγωγούς υπό πίεση για την ίδια μετατόπιση $d=1m$ (X65, άργιλος, $D/t=96$, $\beta=35^\circ$), Vazouras et al (2011).

Πίνακας 1.2. οι πειραματικές παράμετροι των Cornell και RPI

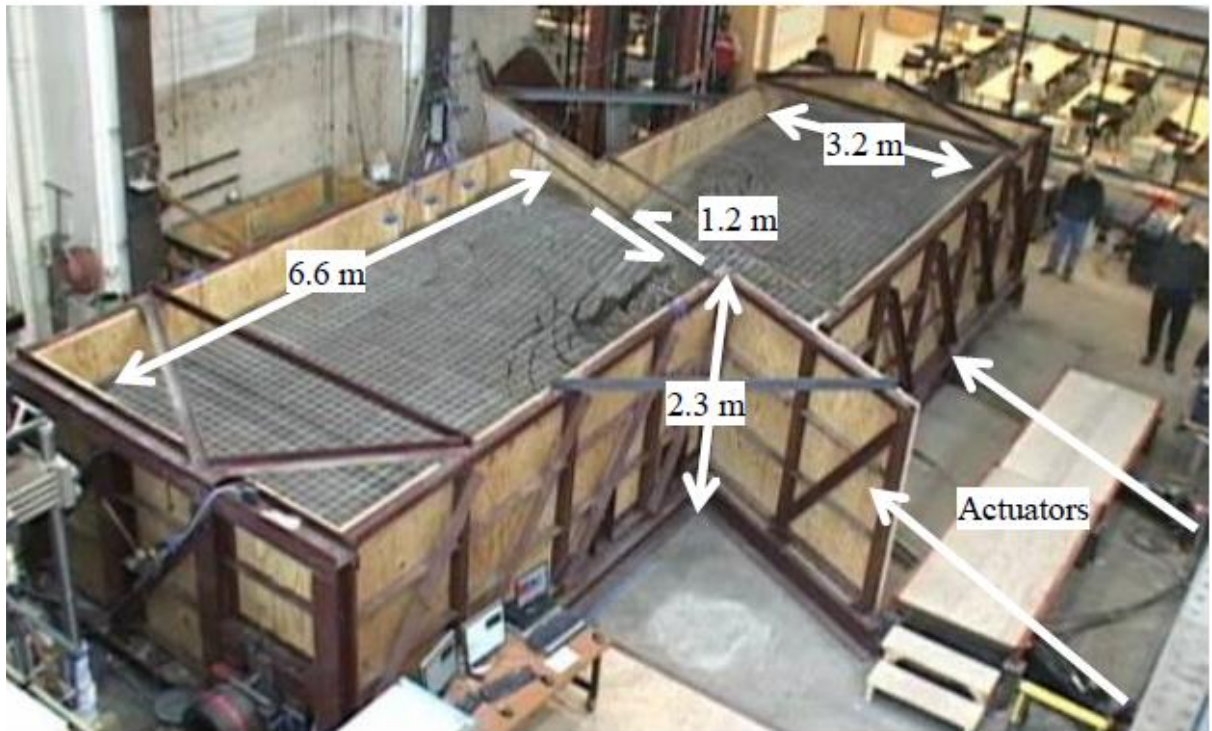
Parameter ¹	Cornell NEES Site	RPI NEES Site
Diameter, D	100-600 mm	200-5000 mm
Diameter to Thickness Ratio, D/t	10-120	10-250
Depth of Burial	0.6-1.5 m	0.6-20 m
Maximum Length of Pipeline ²	15 m	46 m
Pipeline Intersection	+30° to 90°	62° to 90°
Angle for Horizontal Deformation, α	90° to -30°	90° to -62°
Normal Deformation Angle, β_N	30° to -90°	90°
Thrust Deformation Angle, β_T	$\leq 30^\circ$	NA
Maximum Displacement	1.8 m	4.0 m
Maximum Rate of Displacement	0.1 m/s	0.9 m/s

1 refers to prototype or actual field scale
 2 refers to actual test box dimensions; the effective pipeline length can be increased experimentally through the use of actuators in the Cornell facility and special springs in the Rensselaer split box

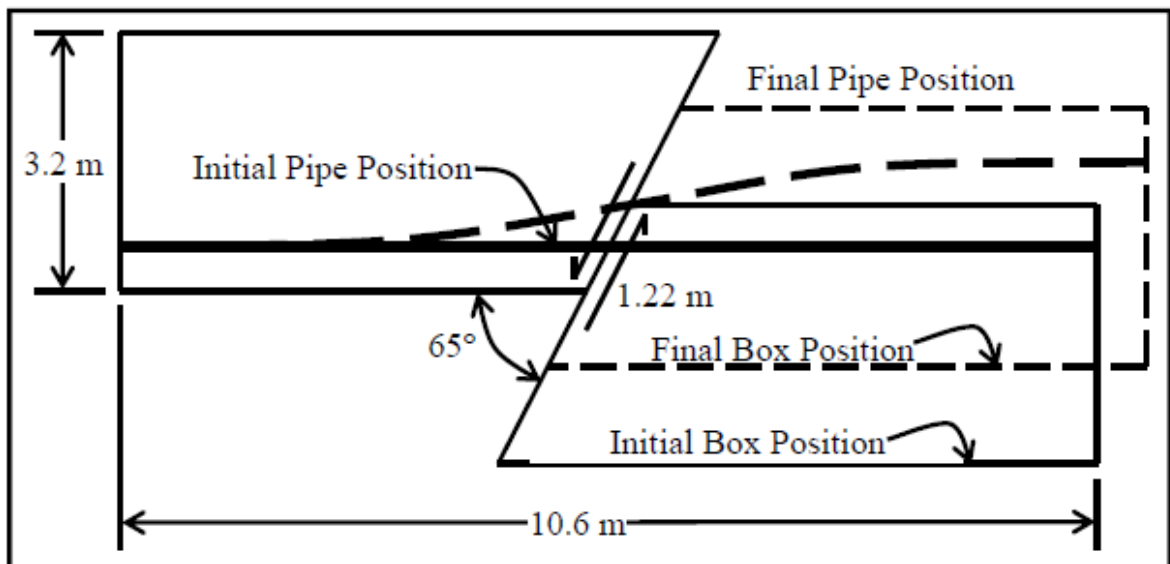
Πίνακας 1.3. Τα αποτελέσματα από τα πειράματα στον φυγοκεντριστή και μεγάλης κλίμακας NEES

Lifeline	Horizontal Deform. Angle, α					Vertical Deform. Angle, β					Oblique Deformation				
						Normal, β_N			Thrust, β_T		α/β_N			α/β_T	
	30°	65°	90°	-30°	-65°	30°	60°	90°	30°	60°	$\frac{65^\circ}{90^\circ}$	$\frac{90^\circ}{90^\circ}$	$\frac{-65^\circ}{90^\circ}$	$\frac{65^\circ}{30^\circ}$	$\frac{-65^\circ}{30^\circ}$
Welded Steel D=150-400 mm D/t = 20-50	N	R	R	N	N	C	R	N	C	R	R	R	R	N	N
Welded Steel D=400-1500 mm D/t = 50-120	N	R	R	N	N	R	R	N	C	R	R	R	R	C	N
Polyethylene D=150-400 mm D/t=10-20	N	R	R	N	N	C	R	N	R	R	R	R	R	N	N
Polyethylene D=400-1500mm D/t= 20-50	N	R	R	N	N	R	R	N	C	R	R	R	R	C	N

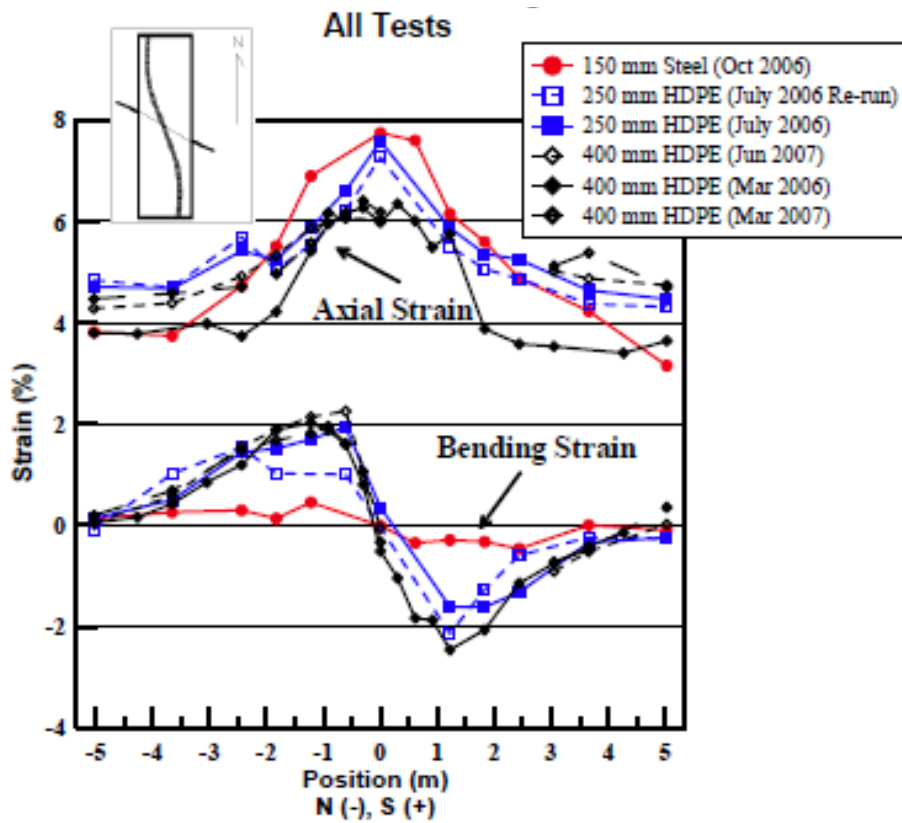
* C - Full scale tests at the Cornell NEES site, R- Centrifuge tests at the RPI NEES site, N- Numerical simulation



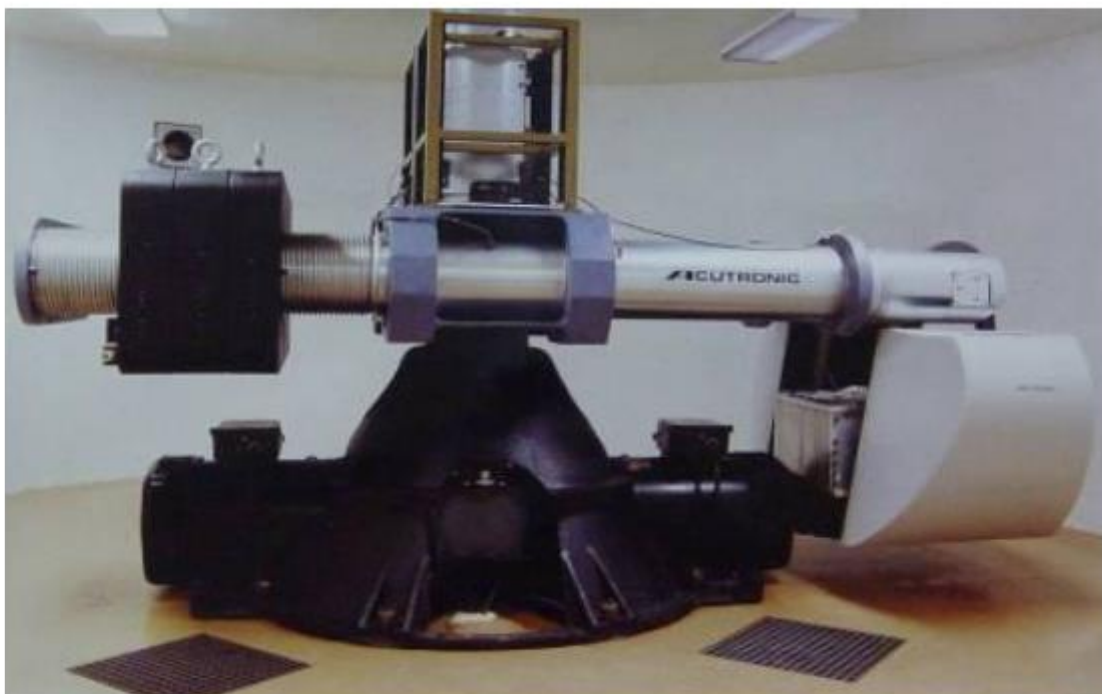
Σχήμα 1.4.11. Κατασκευή για την επίτευξη πειράματος στο πανεπιστήμιο Cornell.



Σχήμα 1.4.12. τομή της πειραματικής διαδικασίας.



Σχήμα 1.4.13. Αποτελέσματα αξονικών και καμπτικών παραμορφώσεων από τα πειράματα (NEESR Final Report 2008).



Σχήμα 1.4.14. RPI 150g-Τον Φυγοκεντριστής.

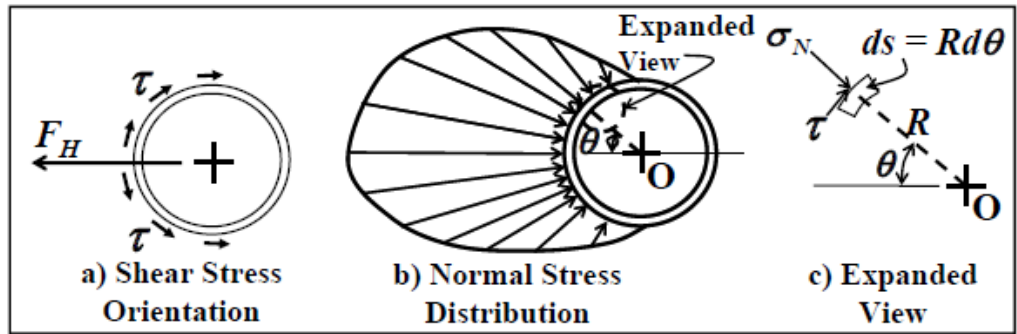
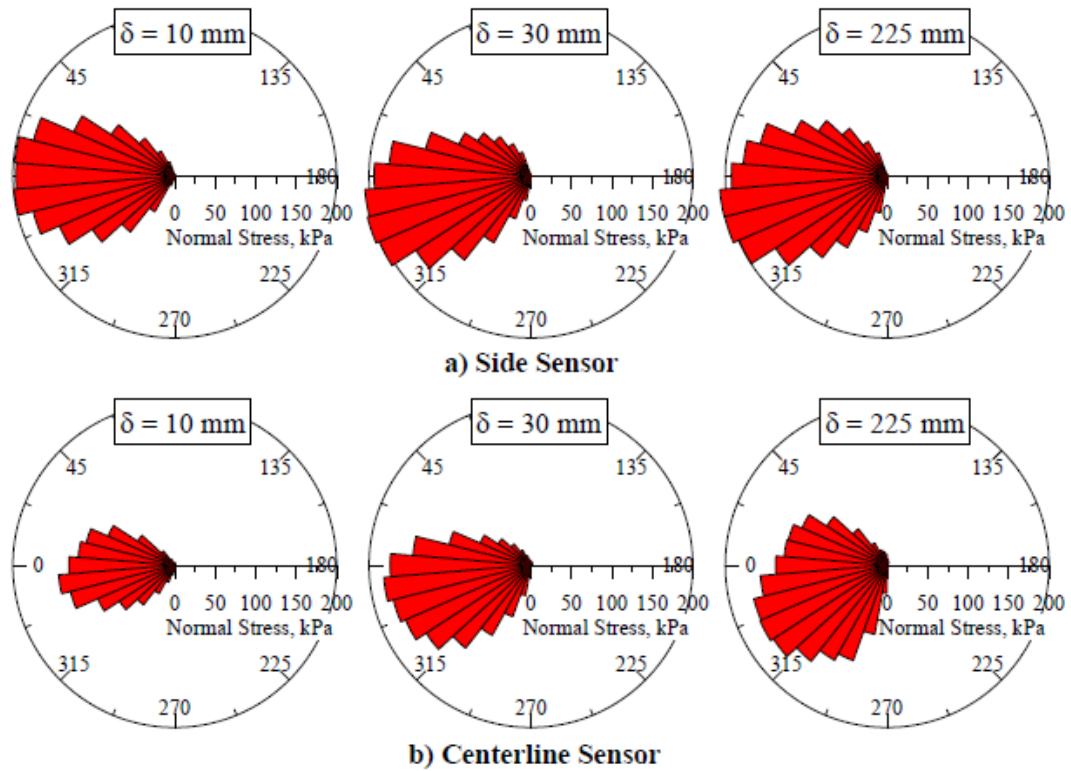
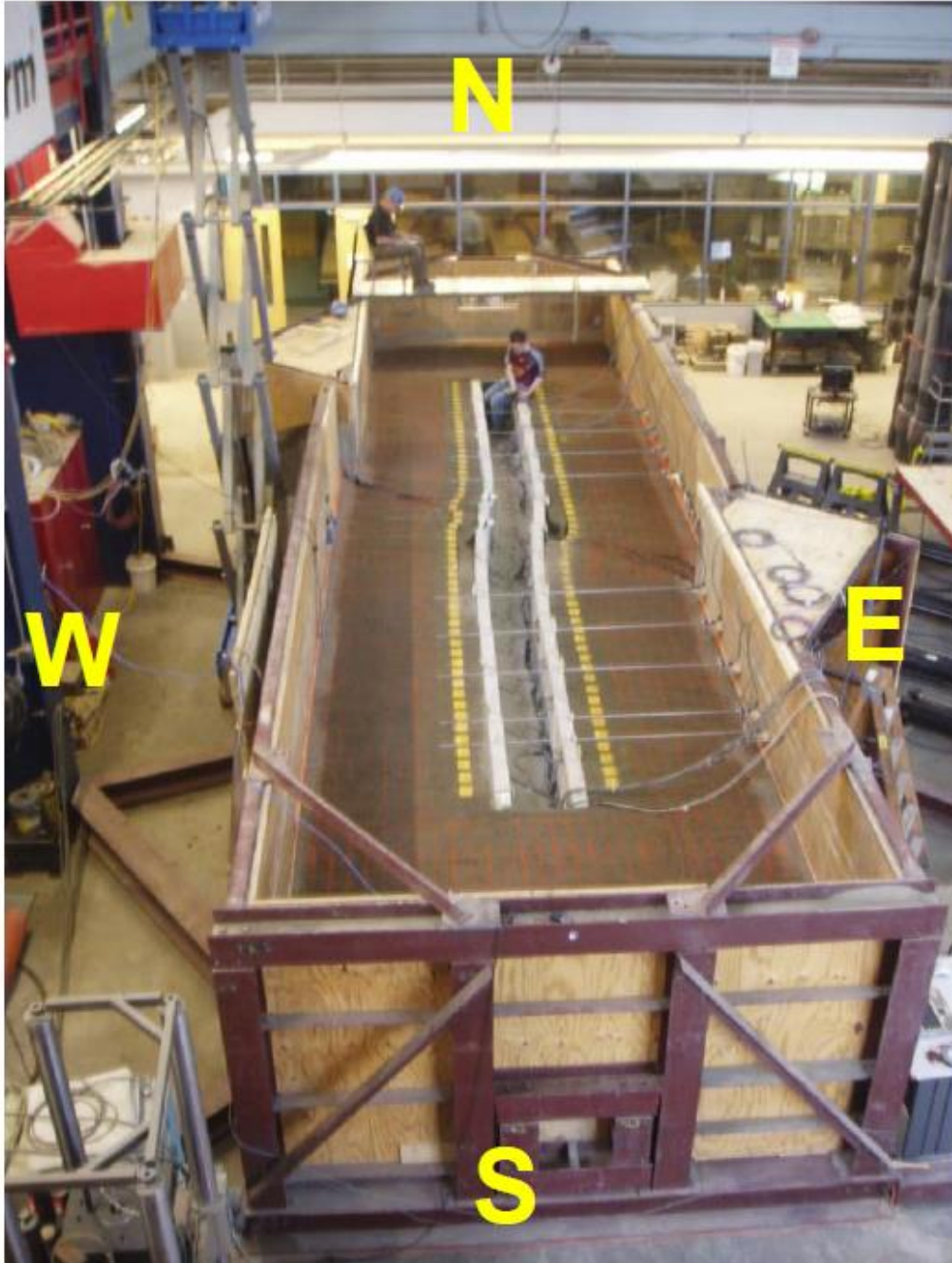


Figure 3.9. Soil-Pipe Interaction Showing Shear and Normal Stresses

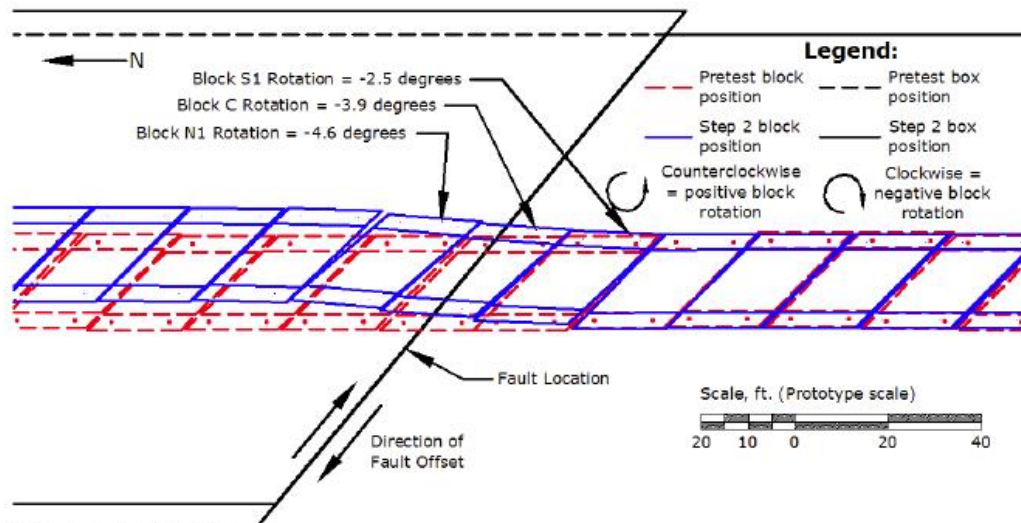
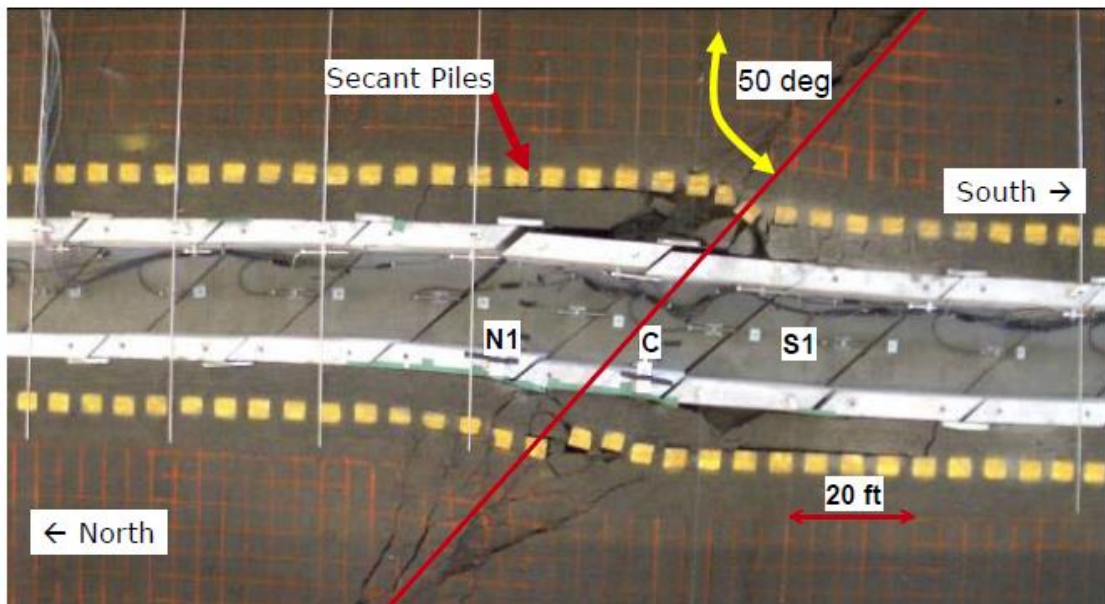


Σχήμα 1.4.15. Κατανομή της ορθής πίεσης που μετράται από Απτικούς Αισθητήρες Δύναμης (NEESR Final Report 2008).

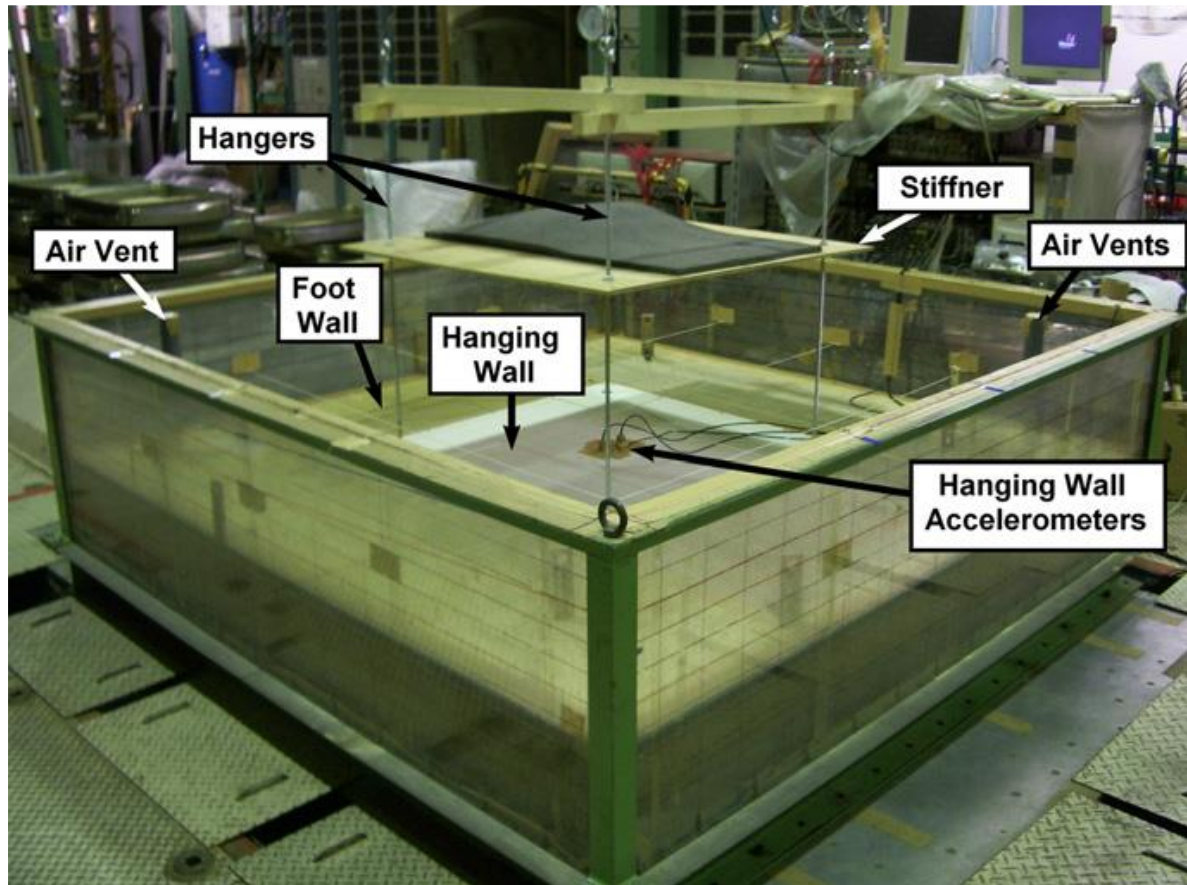


Σχήμα 1.4.16. Λεκάνη Δοκιμής στο Cornell για τον αγωγό μέσα στο σκυρόδεμα- δοκιμή μπλοκ

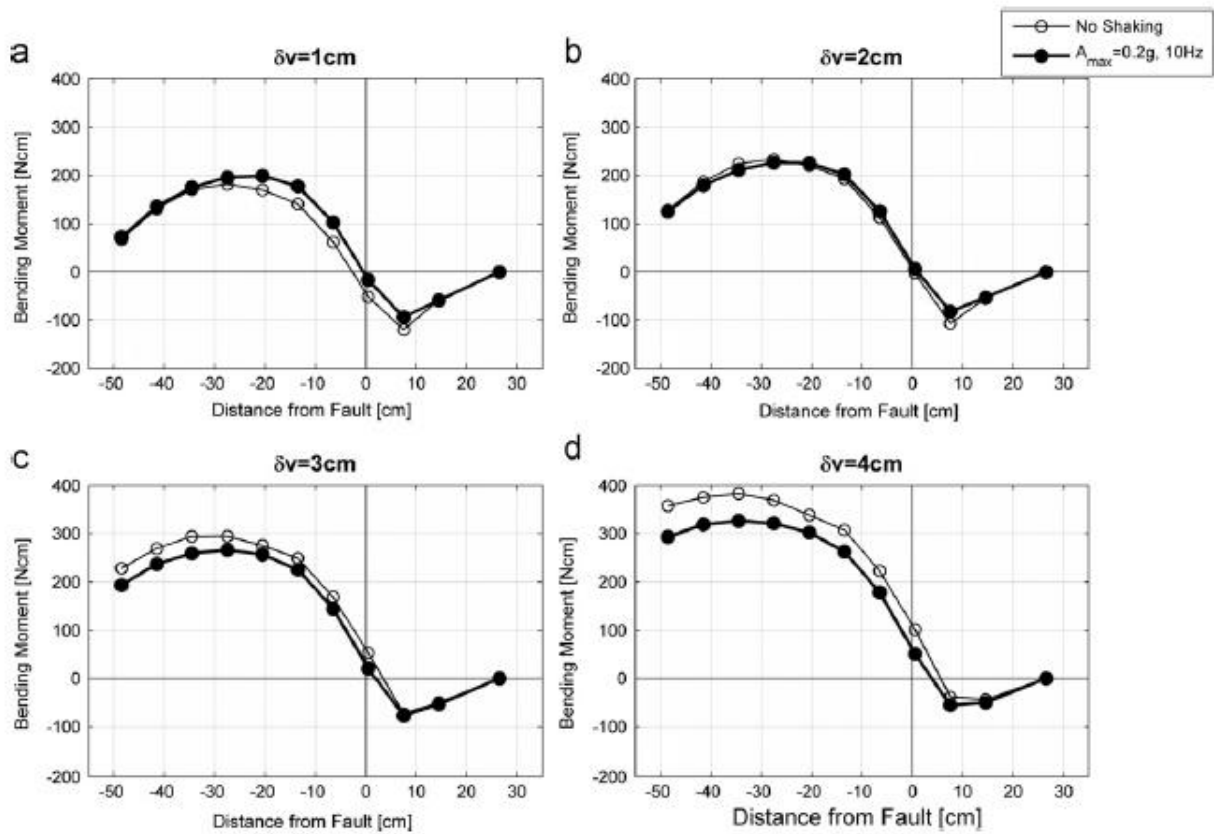
(NEESR Final Report 2008).



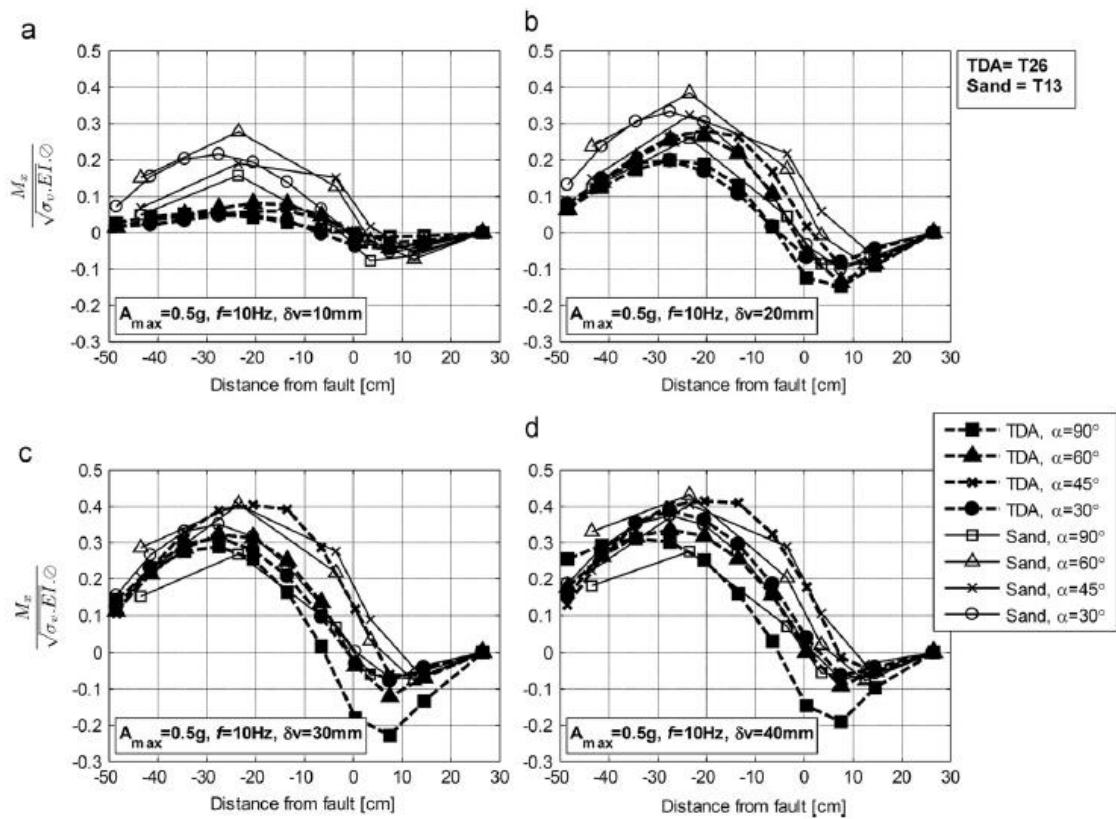
Σχήμα 1.4.17. Φωτογραφία και σχήμα της λεκάνης σε κατακόρυφη μετατόπιση 2 μέτρων (NEESR Final Report 2008).



Σχήμα 1.4.18. Η σεισμική τράπεζα στο πανεπιστήμιο του Τόκιο, ικανά για προσομοίωση στο ίδιο πείραμα για τη σεισμική δόνηση (Sim et al. 2012).



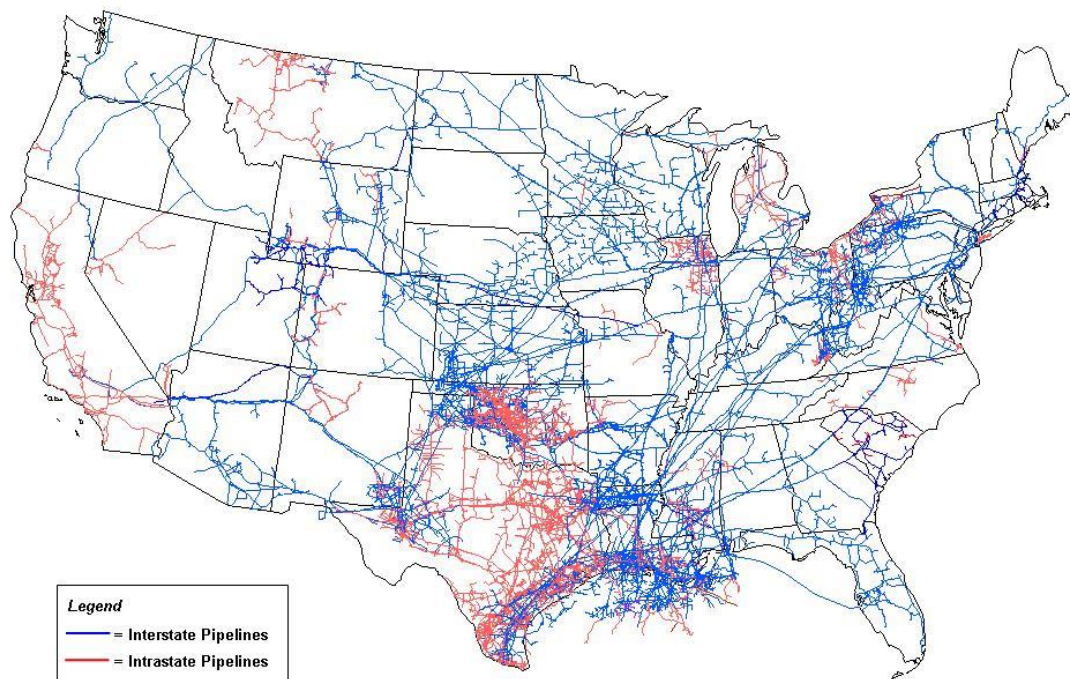
Σχήμα 1.4.19. Κάμπτική διανομή την στιγμή υπόκειται σε τίναγμα και $A_{max} = 0.2g, 10Hz$ σε διαφορετικές μετατοπίσεις (Sim et al. 2012).



Σχήμα 1.4.20. Σύγκριση καθαρής άμμου και TDA τάφρου με επιχώσεις με την απόσταση κατά μήκος του άξονα του σωλήνα που υποβάλλεται σε $A_{max} = 0,5 g, 10Hz$ σε 4 διαφορετικές μετατοπίσεις (Sim et al. 2012).

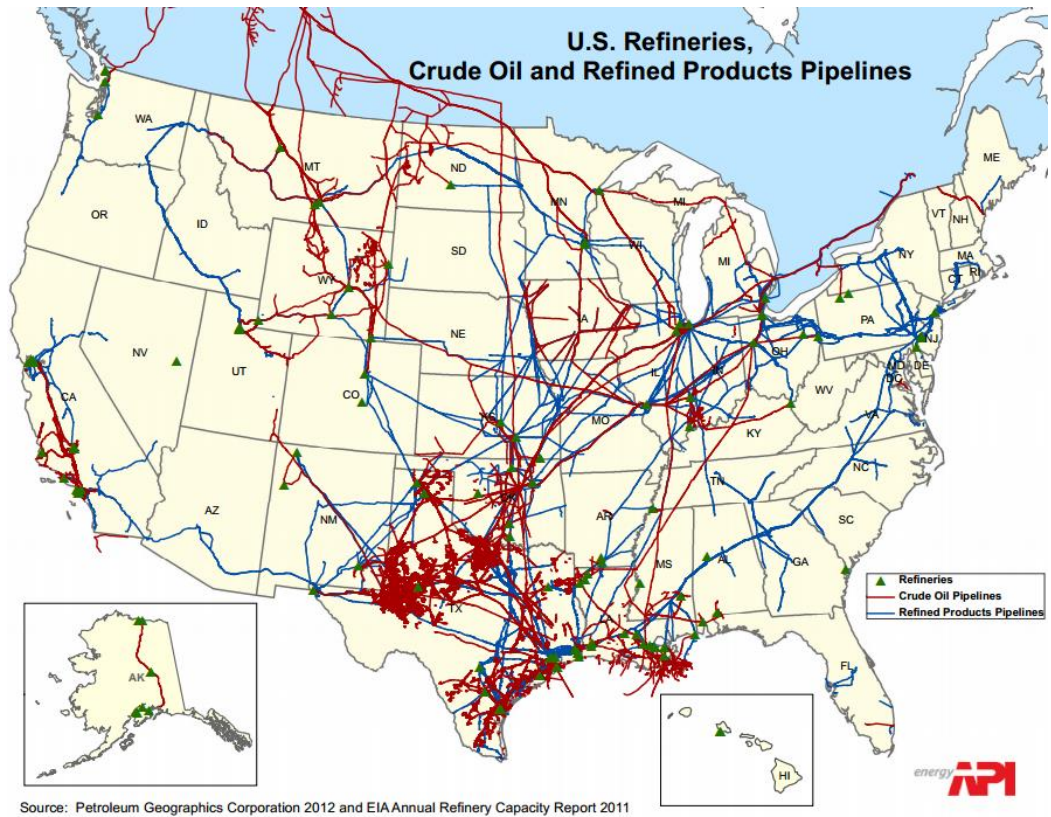


Σχήμα 1.5.1. Πενσυλβάνια, USA, 1872: Ένας από τους πρώτους μεγαλύτερους αγωγούς φυσικού αερίου έκτασης 5km από τις πηγές Newton μέχρι Titusville



Source: Energy Information Administration, Office of Oil & Gas, Natural Gas Division, Gas Transportation Information System

Σχήμα 1.5.2. Δίκτυο αγωγών στις ΗΠΑ (API).



Σχήμα 1.5.3. το δίκτυο πετρελαϊκών αγωγών στις ΗΠΑ (API).



Σχήμα 1.5.4. το κύριο δίκτυο αγωγών στην Ασία (USCC.gov).



Σχήμα 1.5.5. Δίκτυο αγωγών στην κεντρική και δυτική Ευρώπη (International Gas Union).



Σχήμα 1.5.6. Οι κύριοι αγωγοί στην Ρωσία κι Ανατολική Ευρώπη (International Gas Union).



Σχήμα 1.5.7. Fault-βλάβες που προκαλούνται από βλάβη των αγωγών στον σεισμό Manjil 1990, Iran (Sim et al.2012).



Σχήμα 1.5.8Μεγάλες παραμορφώσεις χαλύβδινου αγωγού λόγω μεγάλων μετακινήσεων εδάφους (1999 Chi-Chi earthquake, Takada et al.2001).



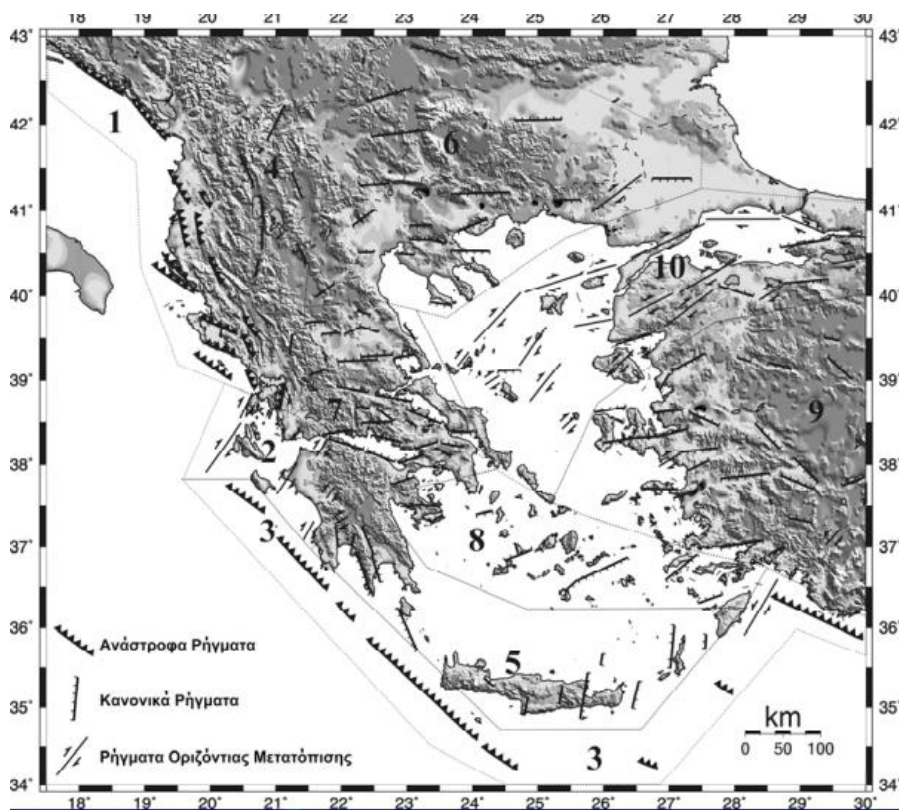
Σχήμα 1.5.9. Αστοχία μεγάλων αγωγών σε ενεργά ρήγματα. (a) 1999 Kocaeli, Τουρκία, (b) 1999 Chi-Chi, Taiwan. (Takada et al.2001)



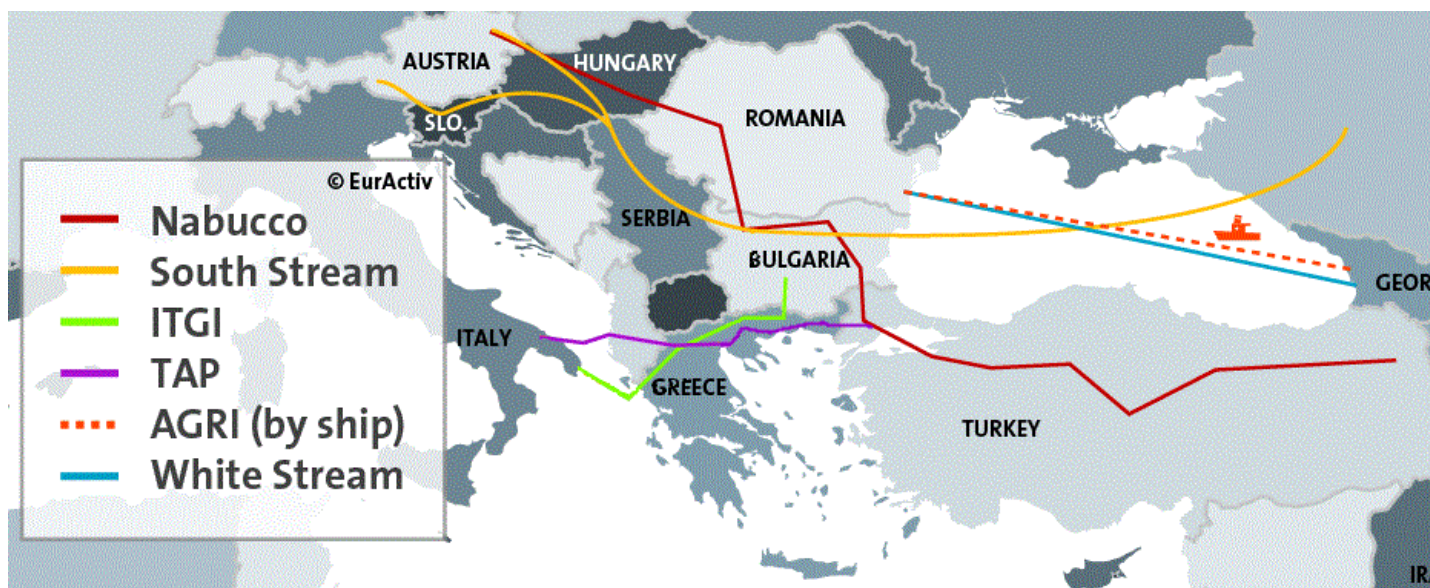
Σχήμα 1.5.10. Λυγισμός αγωγού λόγω συμπίεσης από ρήγμα (Takada et al.2001).



Σχήμα 1.5.11. το κύριο δίκτυο αγωγών στην Ελλάδα (Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου Α.Ε.).



Σχήμα 1.5.12. Οι κυριότερες τεκτονικές πλάκες στην Ελλάδα (Parazachos, 1997).



Σχήμα 1.5.13. Ο "Νότιος διάδρομος φυσικού αερίου». Τα διάφορα προτεινόμενα σχέδια και οι διαδρομές τους (European Commission Project, 2009).

2^ο Κεφάλαιο

Ορισμός του Προβλήματος και Προσομοίωση

2.1 Ορισμός του προβλήματος

2.2 Προσομοίωση και Μέθοδος Ανάλυσης

2 Ορισμός του Προβλήματος και Προσομοίωση

2.1 Ορισμός του Προβλήματος

Όπως τονίστηκε προηγουμένως η ύπαρξη υπόγειων αγωγών είναι ο ιδανικότερος τρόπος μεταφοράς πετρελαίου, φυσικού αερίου, καθώς και λυμμάτων κι υδάτων.

Μέχρι προσφάτως οι περισσότερες δημοσιεύσεις αναφέρονται σε αναλυτικές μεθόδους για αγωγούς υποβαλλόμενους σε διάρρηξη καθώς και σε αριθμητικές λύσεις τρισδιάστατων προσομοιωμάτων. Όσον αφορά στην επίλυση του προβλήματος με την χρήση ελατηριωτού μοντέλου, οι περισσότεροι αναφέρονται στις παραδοχές του Αμερικάνικου κανονισμού, οι οποίες θα φανούν παρακάτω ανεπαρκείς. Εξετάστηκαν πλήρως οι παραδοχές του Αμερικάνικου κανονισμού και προτείνονται ελατήρια αδιαστατοποιημένα τα οποία ανταποκρίνονται παρόμοια με την τρισδιάστατη ανάλυση.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των παραδοχών του Αμερικάνικου Κανονισμού καθώς κι η επισύνψη παραγόντων που πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Συγκεκριμένα, μελετάται η συμπεριφορά ενός αγωγού διαμέτρου 36 in (0.9144 m) εγκιβωτισμένος σε βάθος 1.2 m – από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι την άνω ίνα του αγωγού σε άμμο κι άργιλο. Αυτός ο αγωγός υποβάλλεται σε κανονικό κι ανάστροφο ρήγμα 30 και 60 μοιρών. Παρουσιάζεται η μετατόπιση καθώς κι η αξονική παραμόρφωση του αγωγού (κεφάλαιο 3). Εν συνεχεία, παρουσιάζονται οι παραδοχές της ASCE και συγκρίνονται με καινούρια ελατήρια, τα οποία έχουν προκύψει από αριθμητικές αναλύσεις (push tests). Εξηγούνται οι διαφορές μεταξύ αυτών των δύο ελατηρίων κι έπειτα αδιαστατοποιούνται τα καινούρια ελατήρια ούτως ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορα εδάφη (κεφάλαιο 4). Έπειτα, τα αποτελέσματα των ελατηριωτών μοντέλων συγκρίνονται με αυτά της πλήρως συζευγμένης αριθμητικής λύσης Πεπερασμένων Στοιχείων για ανάστροφο και κανονικό ρήγμα (κεφάλαιο 5). Τέλος, σχολιάζονται τα αποτελέσματα και προτείνεται μια νέα υβριδική μέθοδος για το κανονικό ρήγμα κατά την οποία θα γίνεται μια σταδιακή απομείωση των κατακόρυφων ελατηρίων κοντά στο ρήγμα. Αυτό συμβαίνει, διότι το έδαφος λόγω του το ότι εφελκύεται κοντά στο ρήγμα απομειώνεται η φέρουσα ικανότητά του (κεφάλαιο 6).

2.2 Προσομοίωμα και Μέθοδος Ανάλυσης

2.2.1 Προσομοίωμα Πεπερασμένων Στοιχείων

Το πρόβλημα αναλύεται μέσω μιας σειράς τρισδιάστατων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, v. 6.13 (2013). Το τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις απεικονίζεται στο **Σχήμα 2.1, 2.2**. Λόγω της φύσης των φορτίσεων προσομοιώθηκε ολόκληρη η γεωμετρία του προβλήματος.

Το έδαφος προσομοιώνεται με οκτακομβικά εξαεδρικά "brick-type" στοιχεία (C3D8), με κατάλληλο ελαστοπλαστικό νόμο συμπεριφοράς, όπως περιγράφεται στο επόμενο εδάφιο. Για την άργιλο η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους S_u λαμβάνεται ίση με 60 kPa και θεωρείται ομοιομόρφως κατανεμημένη με το βάθος. Αντίστοιχα ομοιόμορφο κατανεμημένο θεωρείται και το τέμνον μέτρο ελαστικότητας, το οποίο είναι ίσο με 24 MPa. Το υπό άνωσιν ειδικό βάρος του εδάφους λαμβάνεται ίσον με $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$. Για την άμμο η γωνία τριβής $\phi = 30$ μοίρες, η γωνία διαστολικότητας $\psi = 3$ μοίρες και το ειδικό βάρος $\gamma = 19.62 \text{ kN/m}^3$. Για την άμμο το τέμνον μέτρο ελαστικότητας είναι $E = 20 \text{ MPa}$. Ο αγωγός προσομοιώνεται με κελυφωτά στοιχεία (S8R).

Επειδή, όπως αναφέρθηκε εξετάζεται απειρομήκης αγωγός για το τρισδιάστατο προσομοίωμα πέρα από τα 20 m εκατέρωθεν ο αγωγός προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού (r1pe31) και το έδαφος με μη γραμμικά ανελαστικά ελατήρια (spring2) υπολογισμένα από τις αριθμητικές αναλύσεις για όλες τις κατευθύνσεις μετακίνησης (αξονικά, εγκάρσια, προς τα πάνω και προς τα κάτω). Με την ίδια μορφή είναι και το ελατηριωτό προσομοίωμα, με την διαφορά ότι είναι σ' όλο το μήκος το έδαφος προσομοιωμένο με ελατήρια και ο αγωγός με στοιχεία δοκού **Σχήμα 2.4**. Οι τιμές $F - \delta$ των καινούριων ελατηρίων προκύπτουν από τις αριθμητικές αναλύσεις μετακίνησης του αγωγού.

Όσον αφορά στην αριθμητική προσομοίωση για τον υπολογισμό των καινούριων ελατηρίων για την εγκάρσια και κατακόρυφη μετατόπιση μέσα από τα push tests χρησιμοποιήθηκε δισδιάστατο μοντέλο, το οποίο αποτελείται από τετρακομβικά συνεχή παραμορφώσιμα στοιχεία (C3D8). Για την σωστή κατανομή των γεωστατικών τάσεων, προσομοιώνεται κι ο

αγωγός με τα ίδια στοιχεία κι έπειτα για να προσομοιωθεί σωστά η μορφή του εφαρμόζεται σ αυτόν τέτοια βαρύτητα ώστε να έχει το επιθυμητό πάχος. **Σχήμα 2.5.** Τα αποτελέσματα του δισδιάστατου μοντέλου είναι ακριβώς ίδια με αυτά ενός τρισδιάστατου μοντέλου με τον αγωγό προσομοιωμένο με κελυφωτά στοιχεία. Για τον υπολογισμό των αξονικών ελατηρίων το προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν τρισδιάστατο- οι λεγόμενες δοκιμές εξόλκευσης. Το έδαφος προσομοιώθηκε με οκτακομβικά εξαεδρικά brick type στοιχεία και ο αγωγός με κελυφωτά στοιχεία **Σχήμα 2.7.**

Ο αγωγός αποτελείται από χάλυβα με μέτρο ελαστικότητας $E=210 \text{ GPa}$ κι έχει ελαστοπλαστική συμπεριφορά **Σχήμα 2.3.** Η πυκνότητα είναι $\rho=7.8 \text{ t/m}^3$.

2.2.2 Καταστατικό Προσομοίωμα Εδάφους

Αρκετές πειραματικές και αριθμητικές μελέτες έχουν δείξει ότι η έναρξη της πλαστικοποίησης του εδάφους είναι καθοριστικός παράγοντας για την διάρρηξη του ρήγματος και την πιθανή εμφάνιση του όσον αφορά στην επιφάνεια του εδάφους. Στην παρούσα εργασία το προσομοίωμα είναι ελαστικό απολύτως πλαστικό με κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb **Σχήμα 2.7 - 2.9.**

2.2.3 Τρόποι αστοχίας αγωγού

Ο σχεδιασμός αγωγών έχει ως κύριο στόχο να μην προκληθεί ασυνέχεια σ αυτούς. Είναι εξίσου σημαντικό να διατηρηθεί η λειτουργικότητα του. Για να ποσοτικοποιηθεί η βλάβη που υπέστη ο αγωγός πρέπει να τεθούν κάποια όρια αστοχίας και να γίνει ευδιάκριτο πότε είναι ασφαλής η χρήση τους και πότε όχι. Παραδοσιακά, ο σχεδιασμός του αγωγού έχει γίνει με βάση τα κριτήρια της «επιτρεπόμενης τάσης». Ωστόσο, ο χάλυβας είναι ένα όλκιμο υλικό ικανό να διατηρεί σημαντικά μεγάλες τιμές ανελαστικής παραμόρφωσης. Έτσι, σύμφωνα με τιςσοβαρές παραμορφώσεις που προκαλούνται από το ρήγμα ο αγωγός παραμορφώνεται σημαντικά. Συνεπώς, είναι λογικό να καθορίσει τις οριακές καταστάσεις ανάλογα με τα επίπεδα παραμόρφωσης κι όχι σε τιμές τάσης. Με βάση τους Βαζούρας et.al (2012) κατηγοριοποιούμε τις οριακές καταστάσεις ως εξής:

α) εφελκυσμός κατά τη διαμήκη κατεύθυνση του αγωγού που προκαλεί στο τοίχωμα του σωλήνα ρήξη

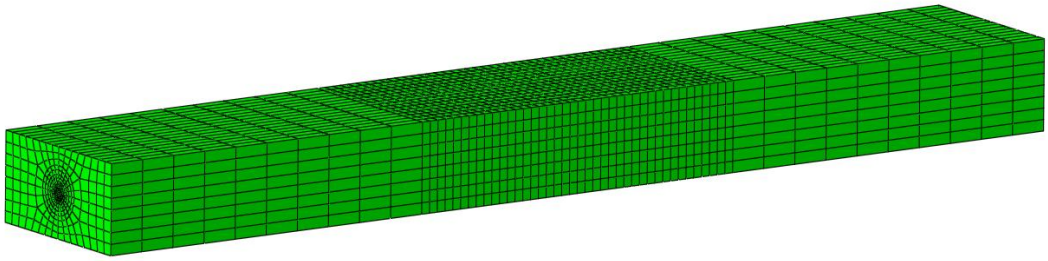
β) τοπικός λυγισμός

γ) η υπερβολική παραμόρφωση της διατομής του αγωγού (ωοειδές σχήμα)

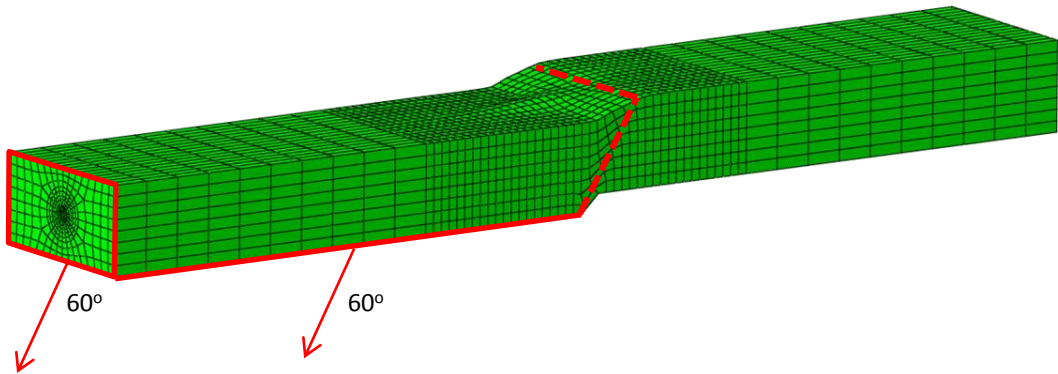
2^ο Κεφάλαιο: Σχήματα

*Ορισμός του Προβλήματος
και Προσομοίωση*

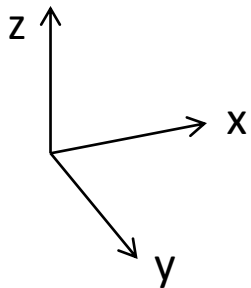
(α)



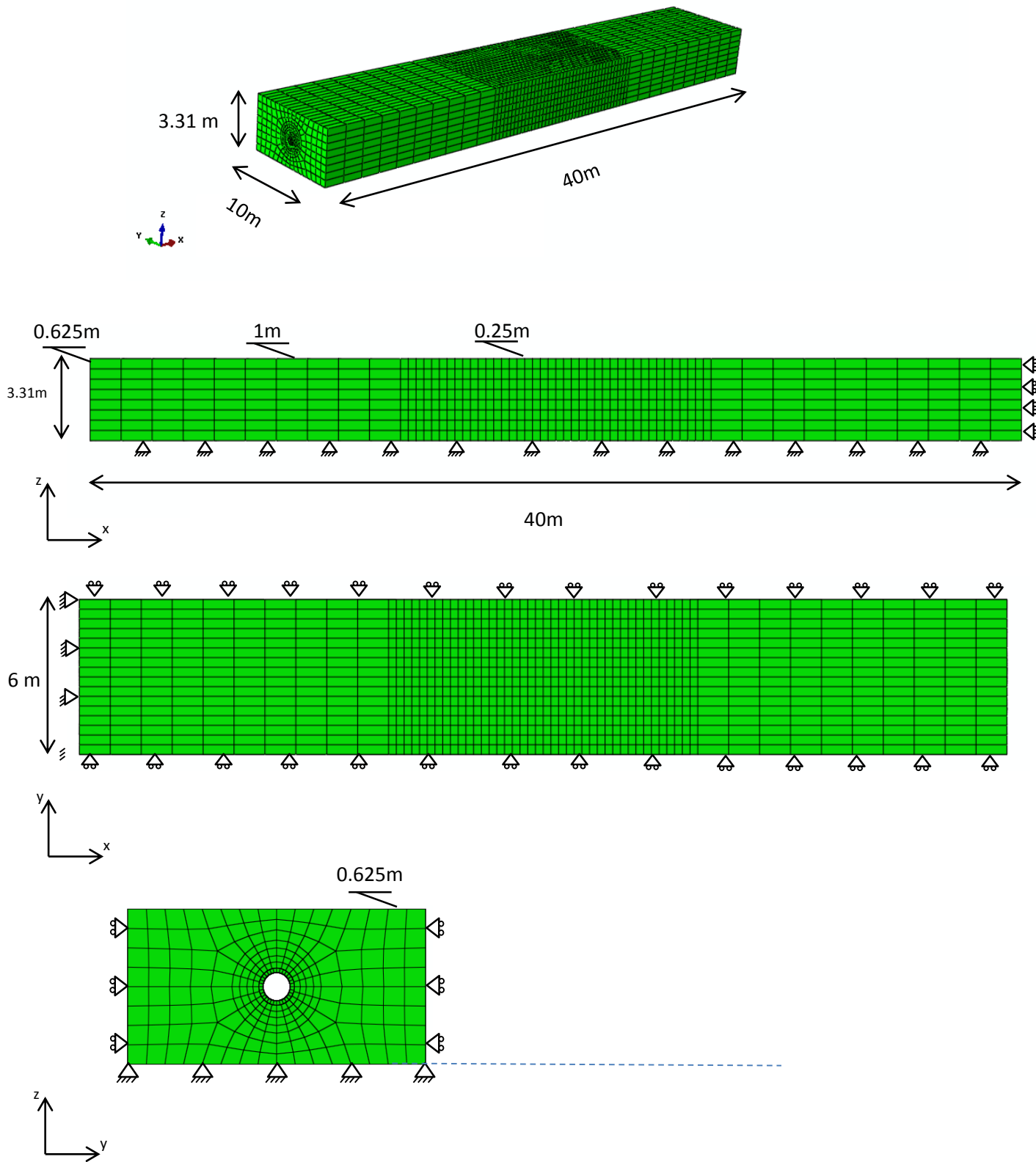
(β)



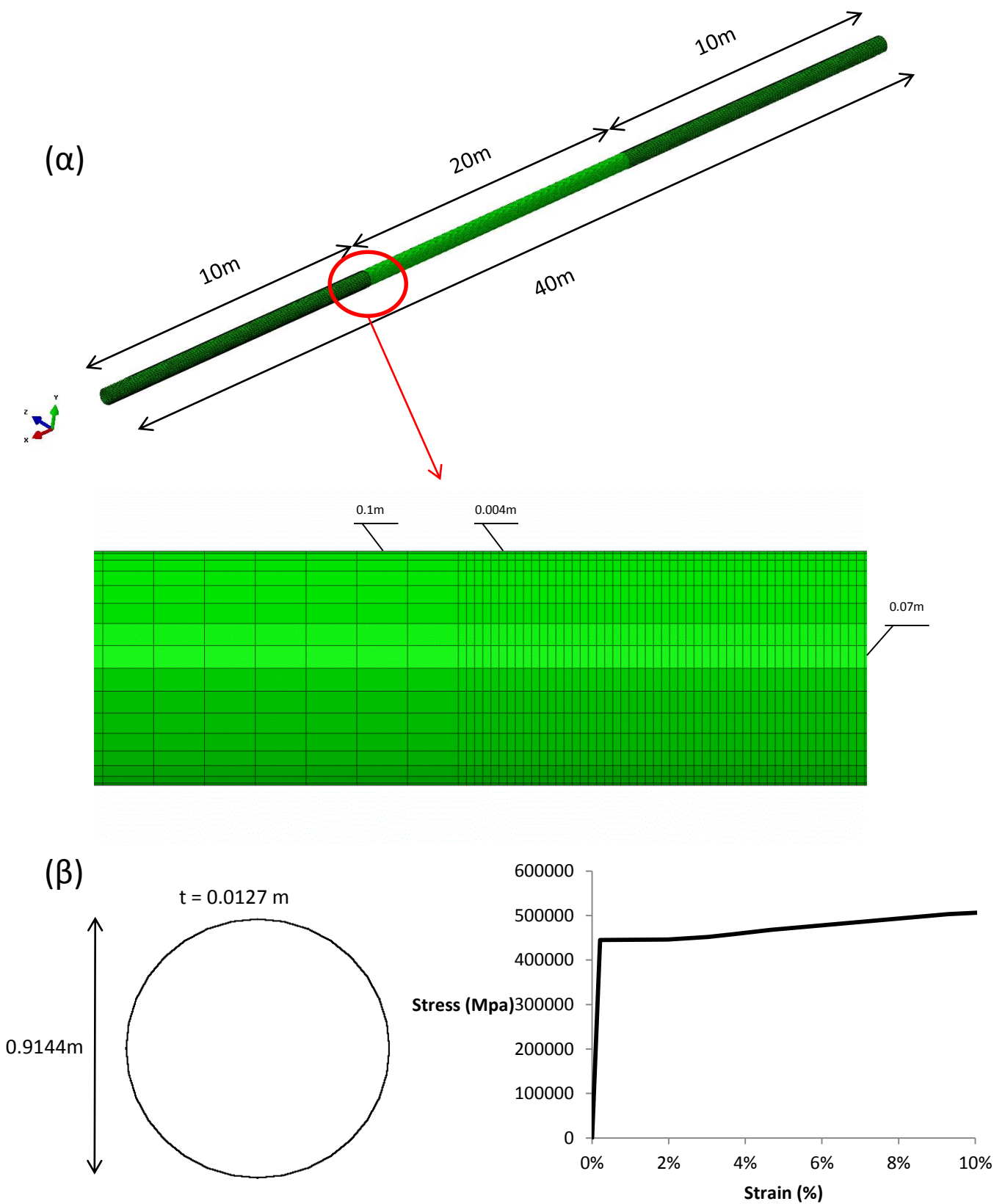
(γ)



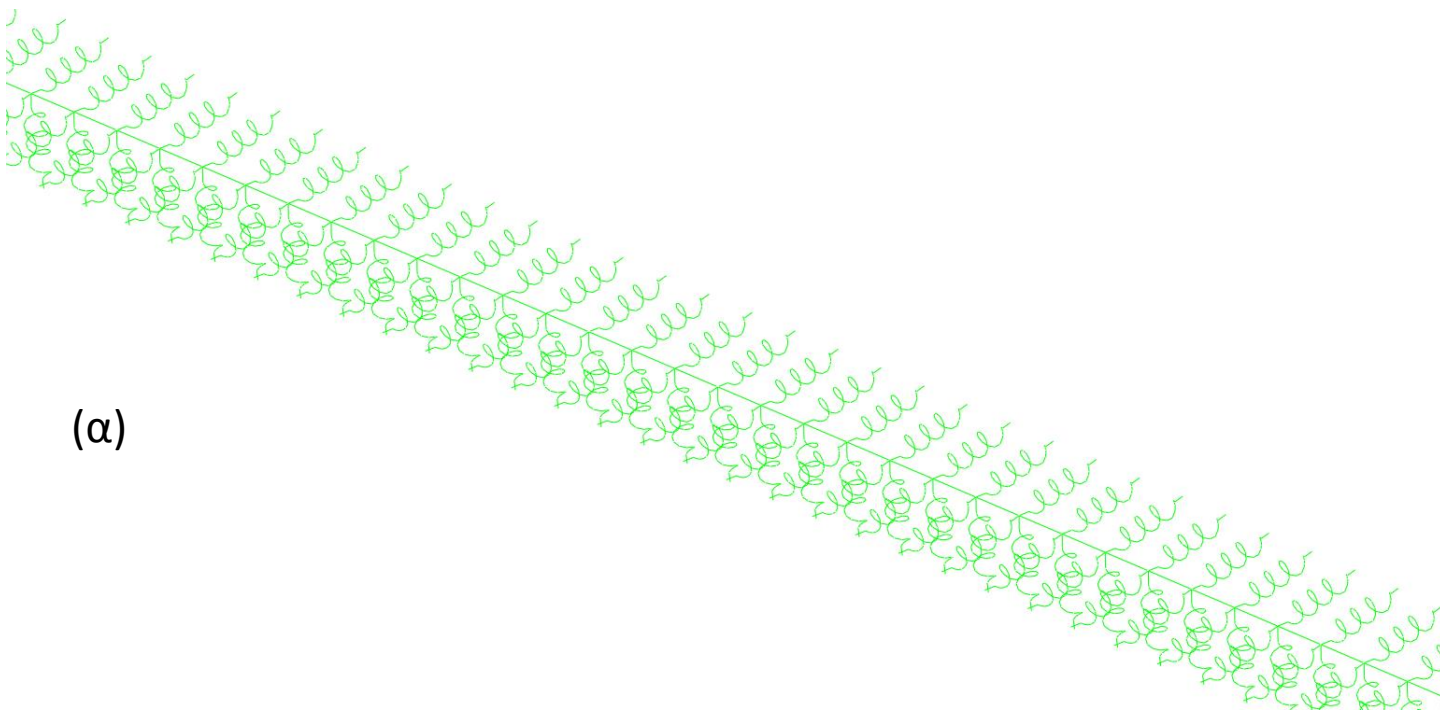
Σχήμα 2.1. (α) Το τρισδιάστατο προσομοίωμα της εργασίας (β) Το ρήγμα προκαλείται από την μετατόπιση της αριστερής πλευράς του εδάφους και ένα μέρος της βάσης (γ) Η παραμορφωμένη εικόνα του αγωγού



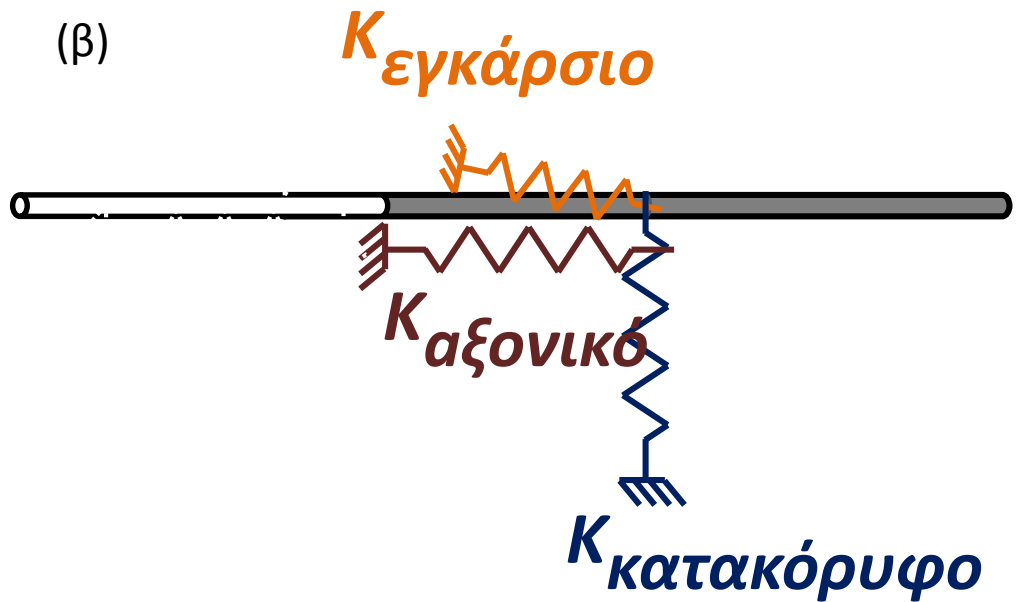
Σχήμα 2.2. Το έδαφος σε τομή και κάτοψη με τις διαστάσεις καθώς κι οι συνοριακές συνθήκες.



Σχήμα 2.3. (α) ο αγωγός για το τρισδιάστατο μοντέλο, διαιρεμένος σε τρία μέρη για την βελτιστοποίηση της διακριτοποίησης, (β) Η διατομή του αγωγού και το διάγραμμα που περιγράφει την σχέση τάσεων παραμορφώσεων του χαλύβδινου αγωγού.



(α)



(β)

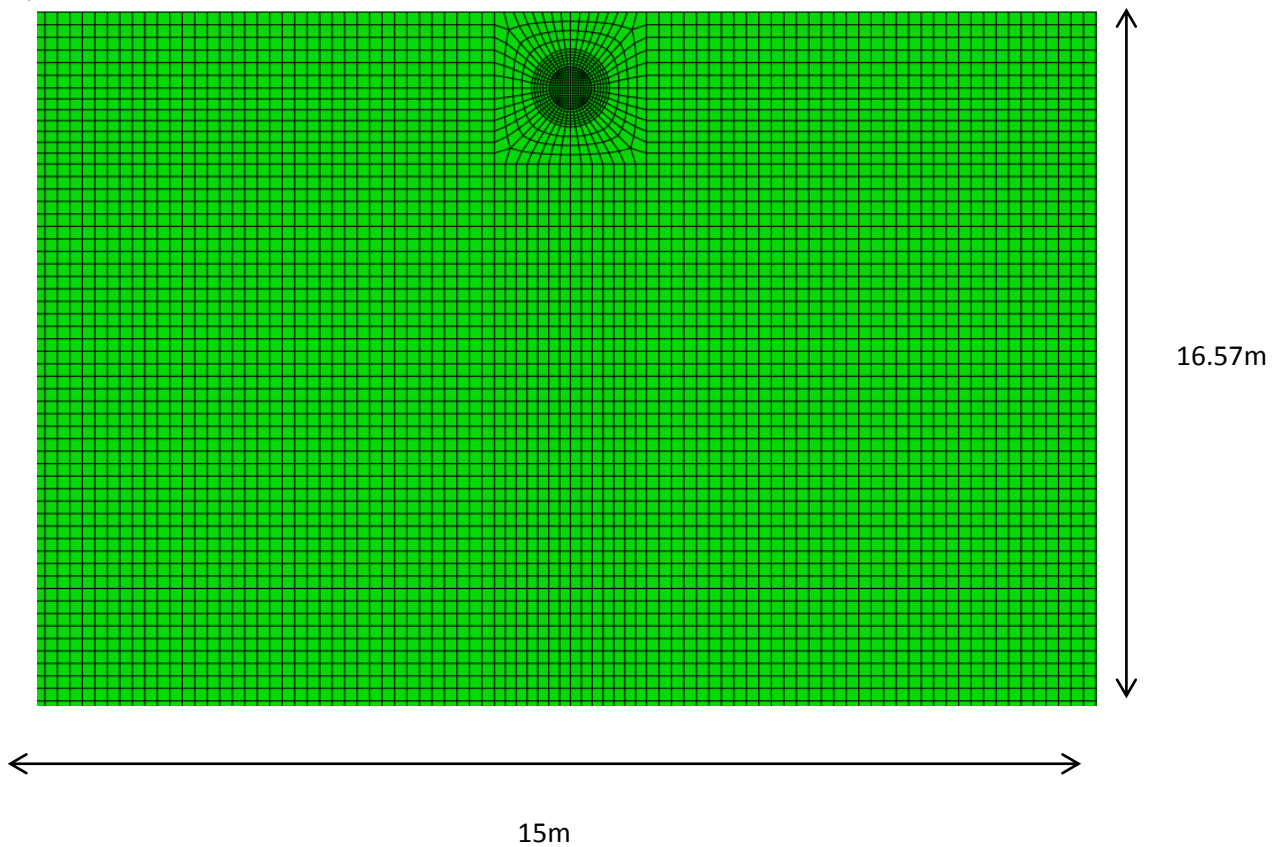
$K_{\text{εγκάρσιο}}$

$K_{\text{αξονικό}}$

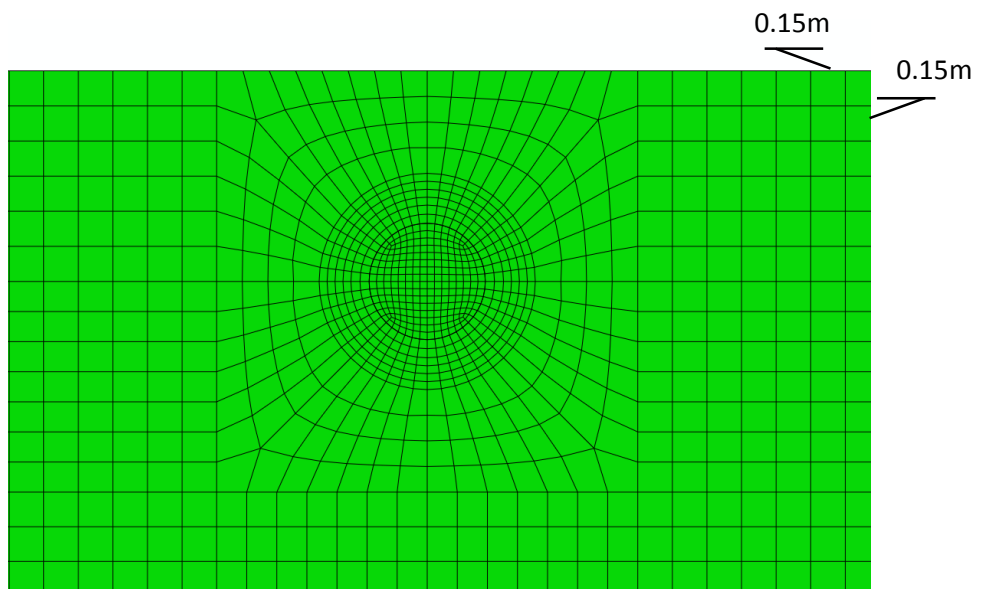
$K_{\text{κατακόρυφο}}$

Σχήμα 2.4. (α) Το ελατηριωτό προσομοίωμα συνολικού μήκους 2 km για άμμους και 1 km για αργίλους. (β) τα ελατήρια που προσομοιώνουν την συμπεριφορά του εδάφους

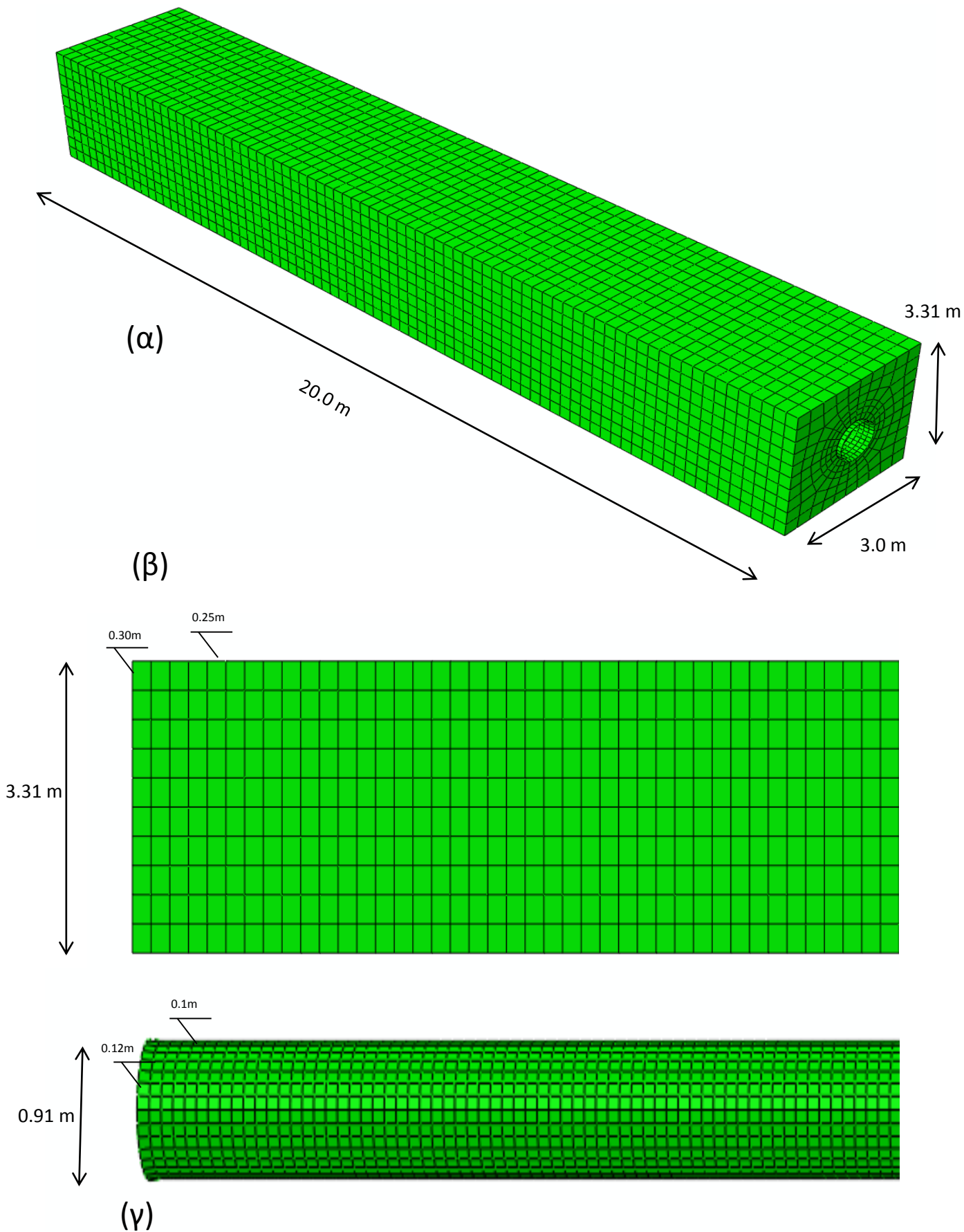
(α)



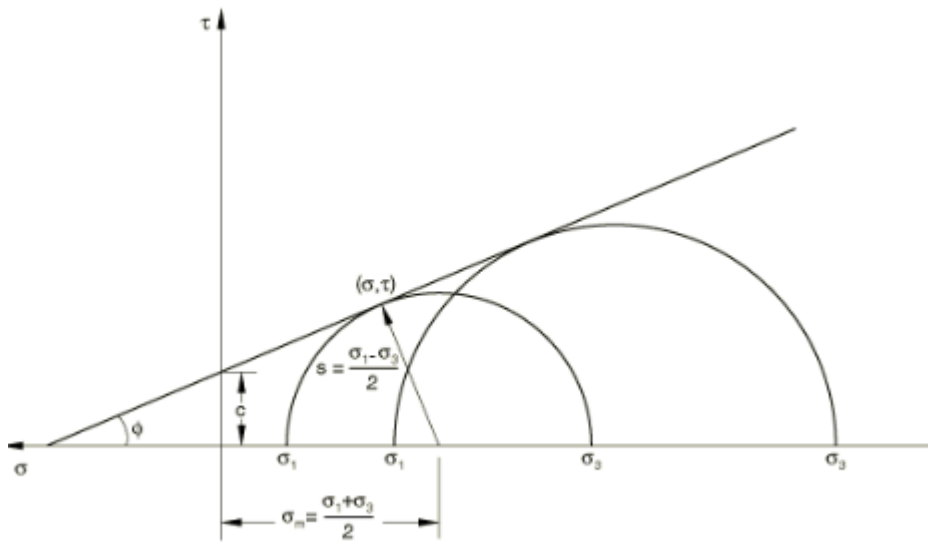
(β)



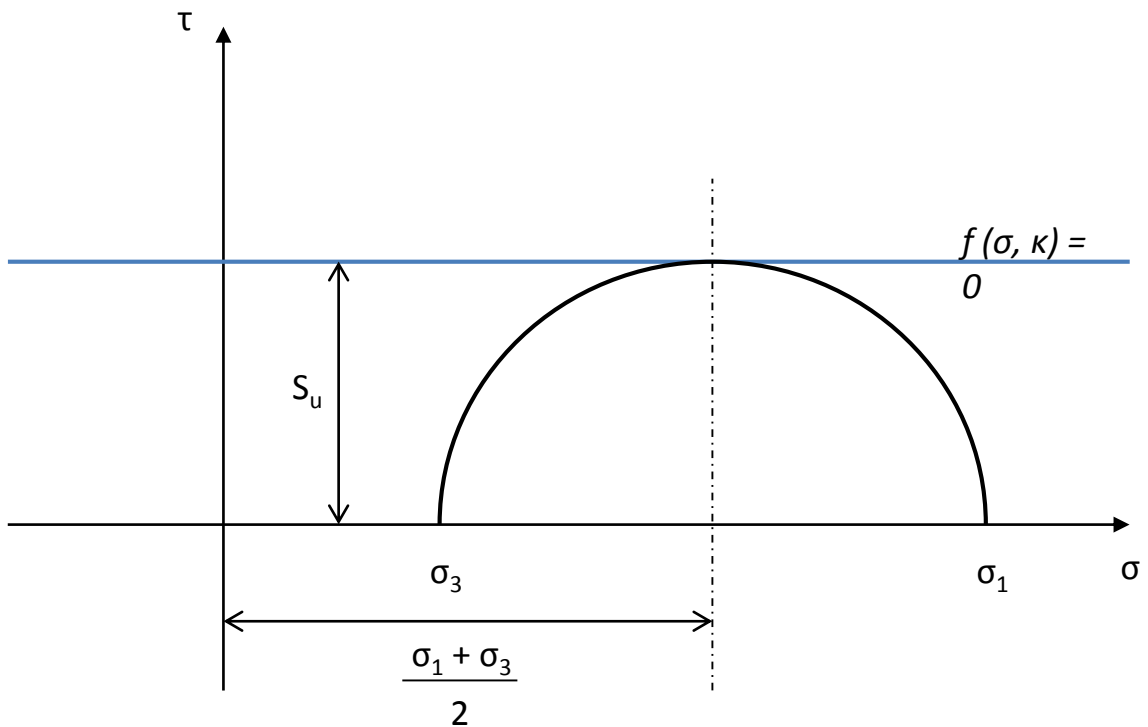
Σχήμα 2.5. (α) Το προσομοίωμα για τον υπολογισμό των εγκάρσιων, κατακόρυφων προς τα πάνω και προς τα κάτω ελατηρίων από αριθμητική επίλυση. (β) διαστάσεις διακριτοποίησης καννάβου



Σχήμα 2.6. (α) αριθμητική επίλυση δοκιμών εξόλκευσης, (β) λεπτομέρεια διακριτοποίησης καννάβου για το έδαφος, (γ) λεπτομέρεια διακριτοποίησης καννάβου για τον αγωγό .

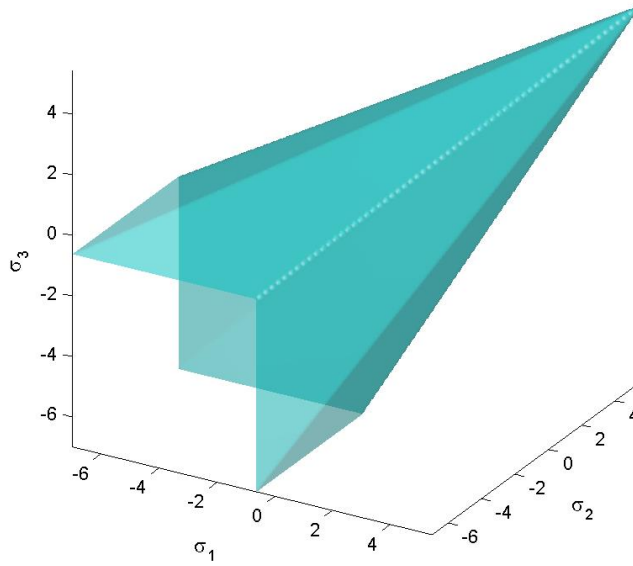


Σχήμα 2.7. (α) αριθμητική επίλυση δοκιμών εξόλκευσης, (β) λεπτομέρεια διακριτοποίησης καννάβου για το έδαφος, (γ) λεπτομέρεια διακριτοποίησης καννάβου για τον αγωγό .

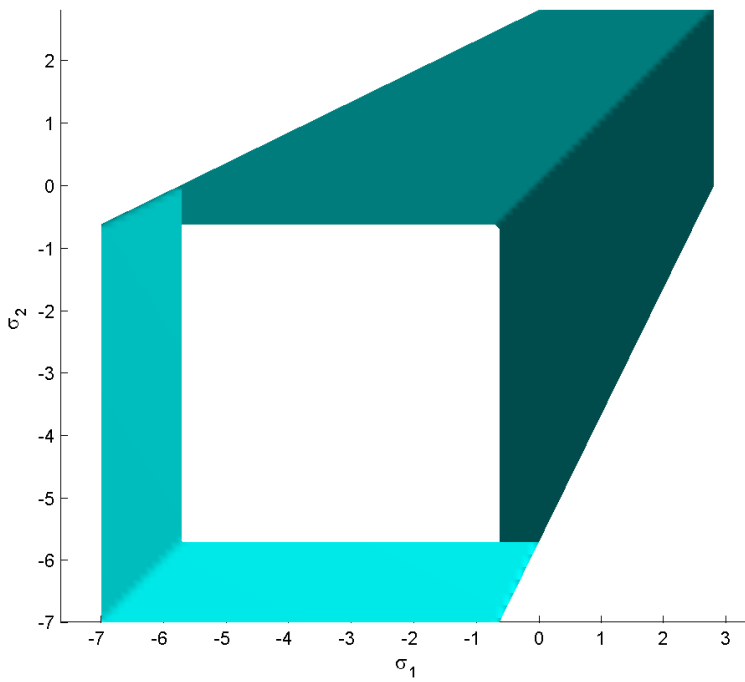


Σχήμα 2.8. Κύκλος Mohr- Coulomb , ο οποίος υποδηλώνει την ανεξαρτησία της επιφάνειας αστοχίας από την μέση ενεργό τάση

(α)



(β)



Σχήμα 2.9. (α) Επιφάνεια αστοχίας Mohr-Coulomb σε τρισδιάστατο χώρο κυρίων τάσεων. (β) Ίχνος της επιφάνειας διαρροής Mohr-Coulomb στο επίπεδο σ_1 - σ_2 .

3^ο Κεφάλαιο

Παρουσίαση του Προβλήματος

3 Παρουσίαση του Προβλήματος

Όπως έχει αναφερθεί, το πρόβλημα που ζητείται να επιλυθεί είναι η καταγραφή της συμπεριφοράς ενός υπόγειου αγωγού υποβαλλόμενου σε κανονικό κι ανάστροφο ρήγμα για τον σχεδιασμό αυτών των αγωγών. Αρχικώς, η επίλυση αυτή γίνεται με τρισδιάστατο προσομοίωμα. Στα 20 m εκατέρωθεν του ρήγματος ο αγωγός είναι προσομοιωμένος με κελυφωτά στοιχεία και το έδαφος με συνεχή παραμορφώσιμα στοιχεία, πράγμα που τα κάνει να δίνουν μια αρκετά καλή εικόνα της πραγματικότητας. Το μήκος αυτό είναι η βέλτιστη ποιοτικά αλλά και χρονικά αριθμητική λύση.

Η διάμετρος του αγωγού είναι 36 in (0.9144 m) και το πάχος 0.5 in (0.0127 m). Οι τιμές αυτές εφαρμόζονται αρκετά και στην πράξη κι είναι αρκετά συνήθεις τιμές. Επιπλέον, το βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού στην προκειμένη περίπτωση είναι 1.2 m από την επιφάνεια έως την άνω ίνα του αγωγού, δηλαδή το βάθος H μέχρι το μέσον του αγωγού είναι $H=1.6572$ m (λόγος $H/D = 1.88$ περίπου). Κι αυτός ο λόγος παρατηρείται εξίσου συχνά. **Σχήμα 3.1.**

Η πιο σημαντική παράμετρος η οποία έχει σημασία για την αποφυγή αστοχίας κατά τον σχεδιασμό είναι η γνώση των αξονικών παραμορφώσεων. Ο αγωγός που εξετάζεται είναι κατασκευασμένος από χάλυβα. Στα ανάστροφα ρήγματα ο αγωγός θλίβεται σε τέτοιο βαθμό ώστε ο αγωγός να λυγίσει τοπικά. Ο λυγισμός είναι ένα φαινόμενο αστάθειας κι ασυνέχειας για τον αγωγό πράγμα που τον κάνει μη επιθυμητό. Τα κανονικά ρήγματα είναι ένα φαινόμενο που προκαλεί έντονες εφελκυστικές παραμορφώσεις στον αγωγό, οι οποίες με την σειρά τους προκαλούν ασυνέχεια με αποτέλεσμα να υπάρξουν διαρροές του υλικού που μεταφέρει ο αγωγός προκαλώντας όχι μόνον περιβαλλοντικές αλλά κι οικονομικές επιπτώσεις.

Στην παρούσα εργασία έχουν εξεταστεί δύο γωνίες ρηγμάτων και για τα δύο είδη – 30 και 60 μοιρών. Το ρήγμα των 60 μοιρών είναι πιο κατακόρυφο πιο «βαθύ», όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία. Παρουσιάζονται δύο ειδών εδάφη, άργιλος κι άμμος, ομοιόμορφα κι ομοιογενή καθ' όλο το βάθος. Η άργιλος έχει διατμητική αντοχή $S_u = 60$ kPa κι η άμμος γωνία τριβής $\phi=30^\circ$ με γωνία διαστολικότητας $\psi=3^\circ$.

Ανάλογως την κατακόρυφη μετατόπιση του ρήγματος παρουσιάζονται οι αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για κάθε είδος και γωνία ρήγματος, αλλά κι εδάφους. Ξεκινώντας με το κανονικό ρήγμα και γωνία ρήγματος $\beta=30$ μοίρες σε αμμώδες έδαφος στο **Σχήμα 3.2** και **3.3** φαίνεται η εξέλιξη των αξονικών παραμορφώσεων. Φαίνεται πως η αστοχία του αγωγού είναι καμπτικής μορφής. Κίνδυνος λυγισμού δεν φαίνεται να υπάρχει. Ομοίως και για ρήγμα 60 μοιρών, καθώς φαίνεται η άνω ίνα να παραμορφώνεται αξονικά περισσότερο απ' ό τι η κάτω ίνα **Σχήμα 3.4, 3.5**. Στην άργιλο τα πράγματα είναι λίγο διαφορετικά. Για το ρήγμα των 30 μοιρών, για μικρές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος η παραμόρφωση του αγωγού φαίνεται να είναι «σιγμοειδής», αλλά για μεγαλύτερες τιμές φαίνεται η μέγιστη αξονική παραμόρφωση να είναι στη θέση του ρήγματος κι άνω με την κάτω ίνα να έχουν σχεδόν ίδια παραμόρφωση **Σχήμα 3.6, 3.7**. Για το ρήγμα των 60 μοιρών η αξονικές παραμορφώσεις αποτυπώνουν την εξέλιξη μιας καμπτικής αστοχίας στον αγωγό, χωρίς όμως να προκαλείται λυγισμός για τιμές κατακόρυφης μετατόπισης ρήγματος στα όρια τιμών που συμβαίνουν και στην πραγματικότητα (είναι δηλαδή συνήθεις τιμές) **Σχήμα 3.8, 3.9**.

Στα ανάστροφα ρήγματα **Σχήμα 3.11**, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο αναπτύσσονται έντονες θλιπτικές παραμορφώσεις στον αγωγό. Αποτέλεσμα αυτού είναι να αστοχεί τοπικά ο αγωγός, λόγω λυγισμού. Στα σχήματα που παρουσιάζονται φαίνονται οι παραμορφώσεις λίγο πριν και μετά που προκλήθηκε τοπικός λυγισμός. Αρχικώς, παρουσιάζεται η εξέλιξη του ανάστροφου ρήγματος σε αμμώδες έδαφος. Ξεκινώντας με το ρήγμα των 30 μοιρών φαίνεται ότι από αρκετά μικρές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος φαίνονται φαινόμενα λυγισμού σε σύγκριση με τις τιμές που φαίνονται στα κανονικά ρήγματα **Σχήμα 3.12, 3.13**. ομοίως στο ρήγμα των 60 μοιρών επικρατεί η ίδια κατάσταση, μόνον που οι τιμές h είναι λίγο μεγαλύτερες **Σχήμα 3.14, 3.15**. Παρουσιάζεται η ίδια κατάσταση και για αργιλικό έδαφος **Σχήμα 3.16, 3.17**. Σ όλες τις περιπτώσεις φαίνεται ότι πρώτα λυγίζει η κάτω ίνα κι έπειτα η άνω. Βέβαια σ' αυτό που δίνεται σημασία κατά τον σχεδιασμό είναι τότε δημιουργείται ο λυγισμός κι όχι τόσο σε ποια ίνα εμφανίζεται.

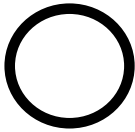
Αξίζει να σημειωθεί ότι για την μετέπειτα σύγκριση των ελατηριωτών με τρισδιάστατων προσομοιωμάτων είναι σημαντικό να είναι γνωστή η θέση του αγωγού αναλόγως με τις διάφορες κατακόρυφες μετατοπίσεις του ρήγματος. **Σχήμα 3.10, 3.18.** Με το να είναι γνωστή η θέση του αγωγού γίνεται πιο εύκολα αντιληπτή η συμπεριφορά του κι οδηγούμαστε σε πιο σωστά συμπεράσματα.

3^ο Κεφάλαιο: Σχήματα

Παρουσίαση του Προβλήματος

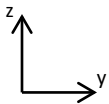
Χαρακτηριστικά εξετάζουσας περίπτωσης

(α)

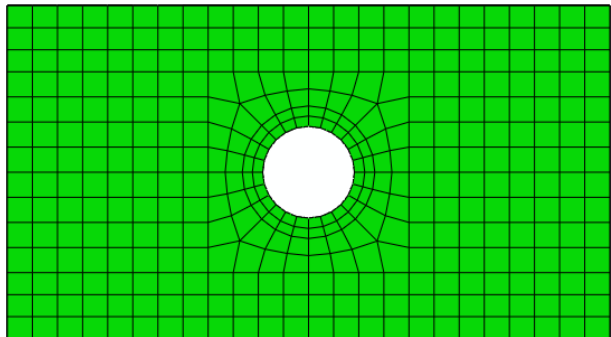


$$D = 36 \text{ in} = 0.9144 \text{ m}$$

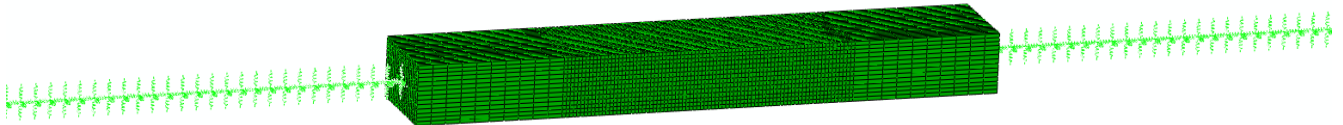
$$t = 0.5 \text{ in} = 0.0127 \text{ m}$$



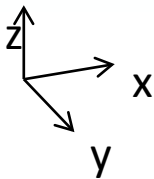
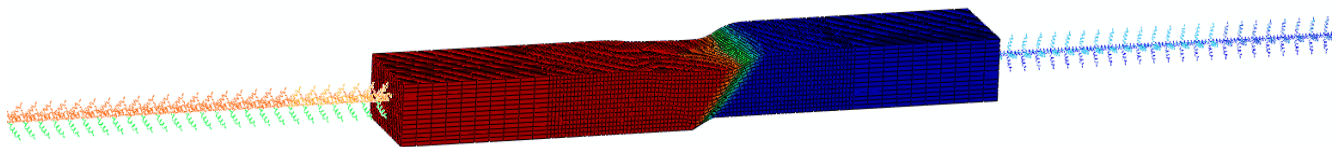
1.2 m



(β)



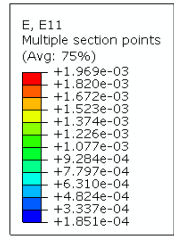
(γ)



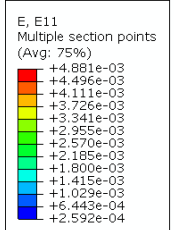
Σχήμα 3.1. (α) διαστάσεις αγωγού και βάθος εγκιβωτισμού υπόγειου αγωγού από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι την άνω ίνα του αγωγού (β) απαραμόρφωτη κατάσταση (γ) παραμορφωμένη κατάσταση για κανονικό ρήγμα

Κανονικό ρήγμα – $\beta=30^\circ$

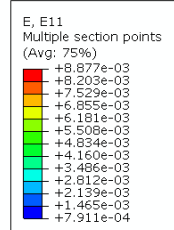
Άμμος, $\phi = 30^\circ$



h = 0.20 m

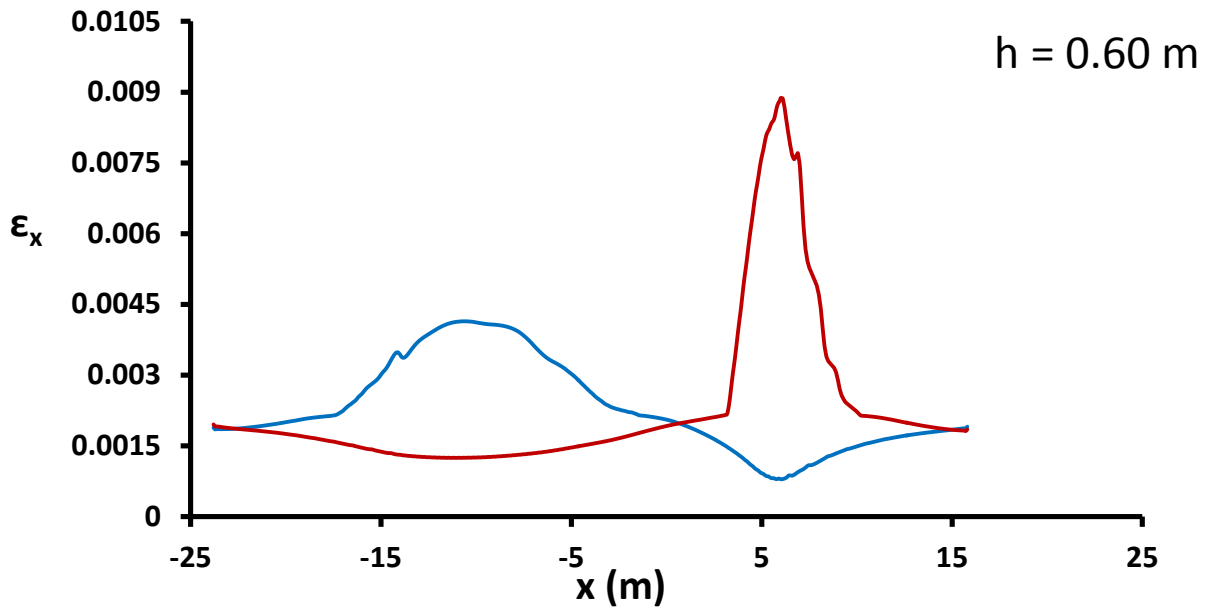
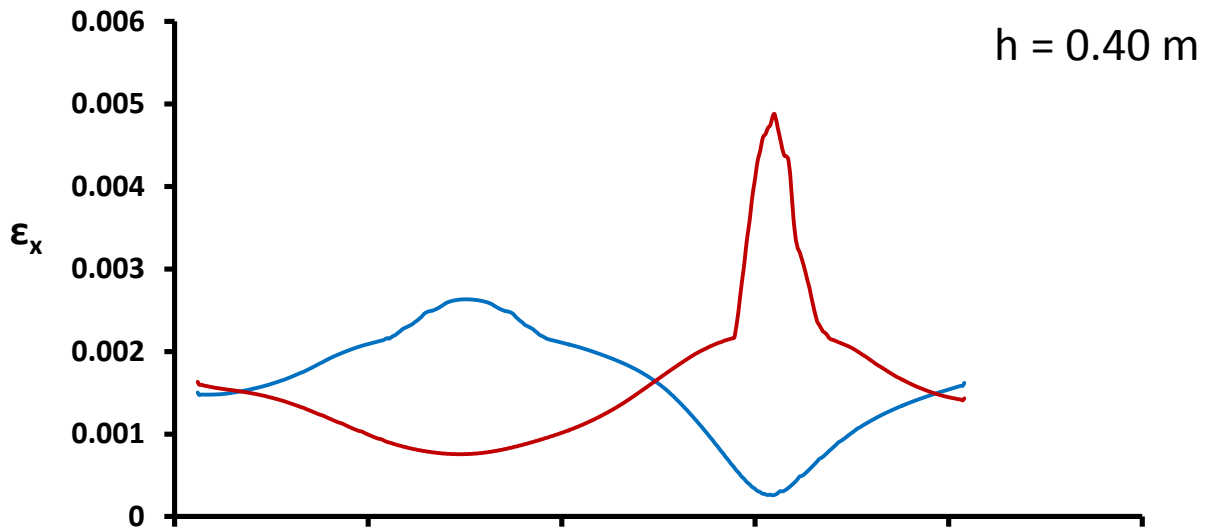
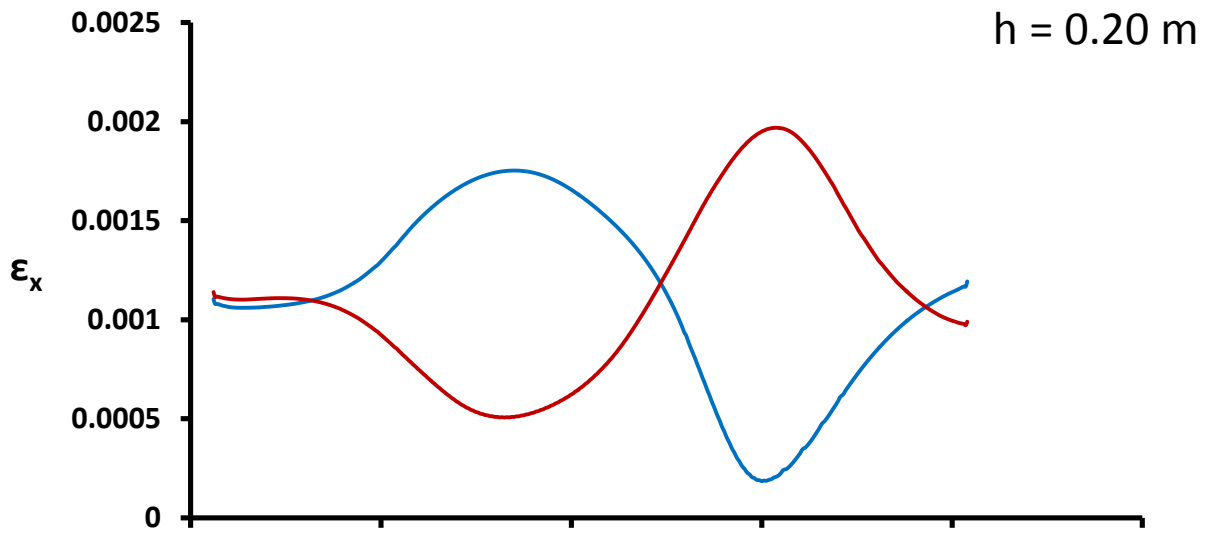


h = 0.40 m



h = 0.60 m

Σχήμα 3.2. Οι αξονικές παραμορφώσεις για τρεις διαφορετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος

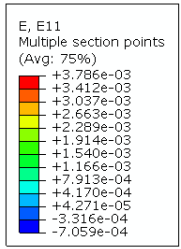


— άνω ίνα — κάτω ίνα

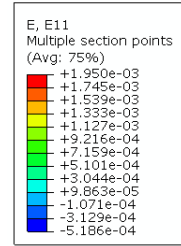
Σχήμα 3.3. Οι αξονικές παραμορφώσεις για τρεις διαφορετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος της προηγούμενης σελίδας για την άνω και κάτω ίνα του αγωγού

Κανονικό ρήγμα – $\beta=60^\circ$

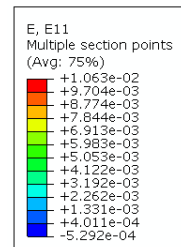
Άμμος, $\phi = 30^\circ$



h = 0.30 m

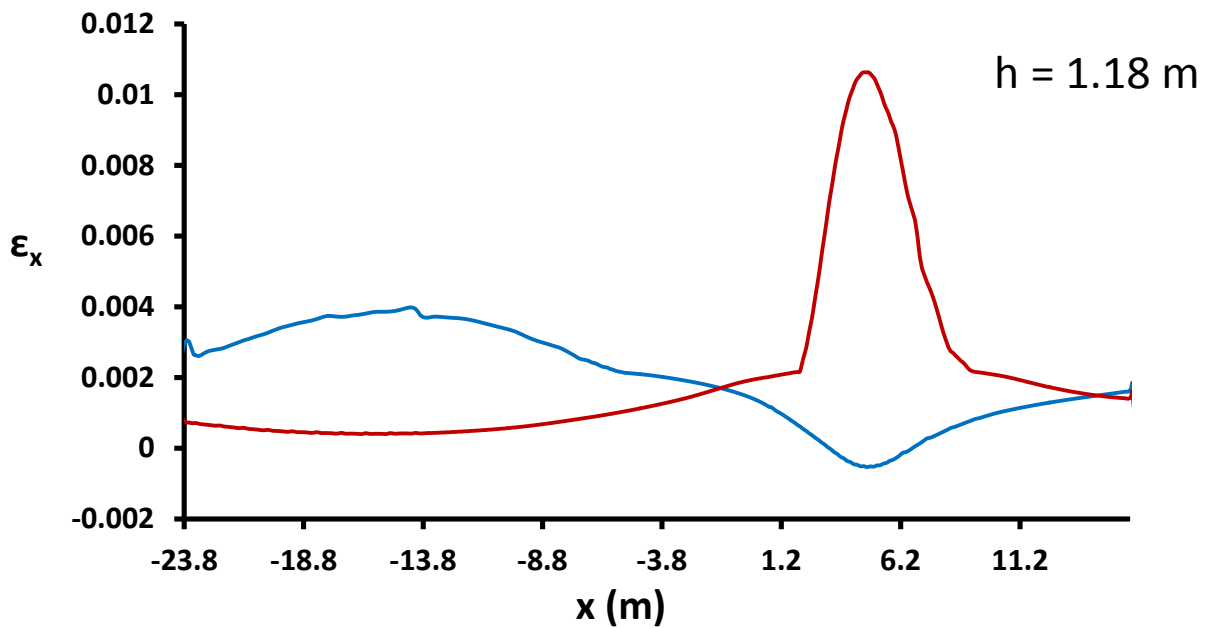
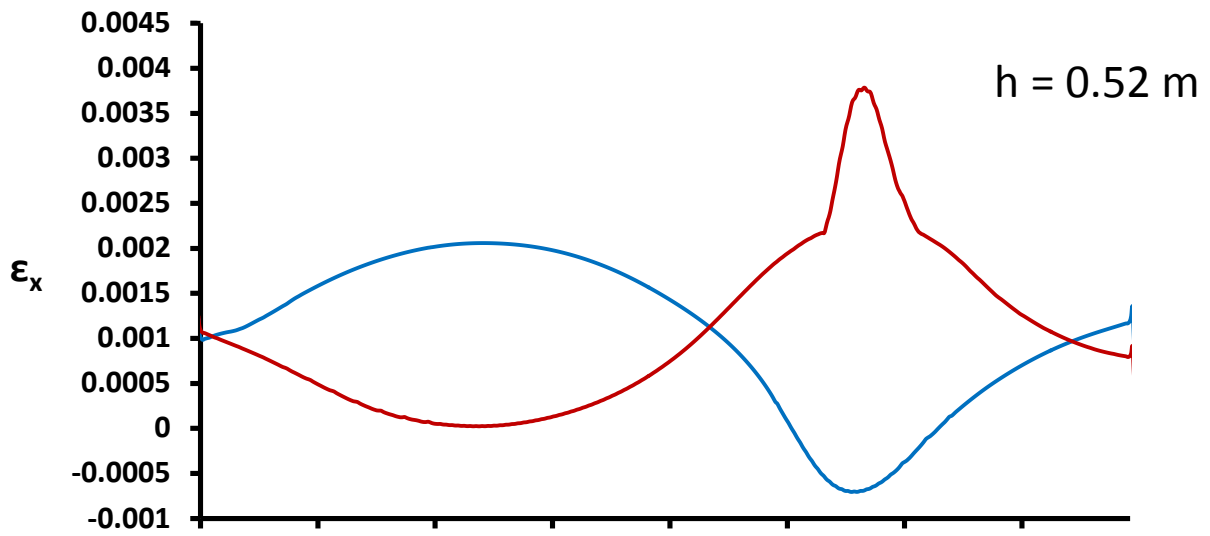
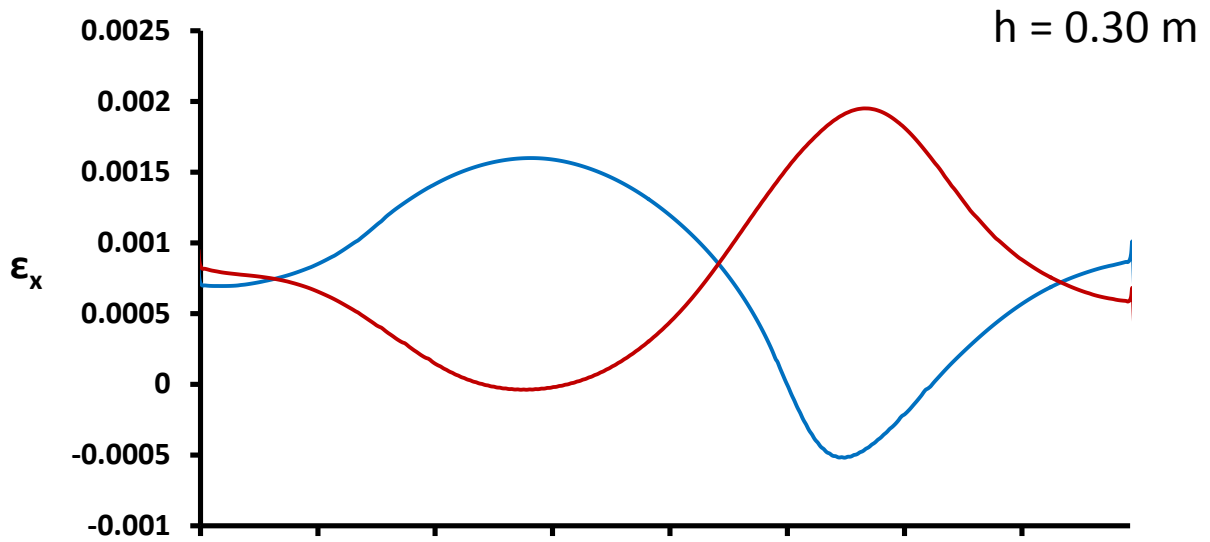


h = 0.52 m



h = 1.18 m

Σχήμα 3.4. Οι αξονικές παραμορφώσεις για τρεις διαφορετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος

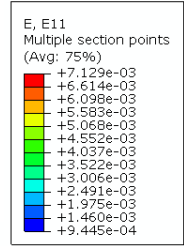


— άνω ίνα
 — κάτω ίνα

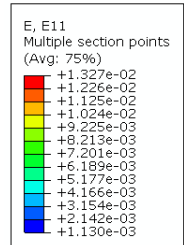
Σχήμα 3.5. Οι αξονικές παραμορφώσεις για τρεις διαφορετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος της προηγούμενης σελίδας για την άνω και κάτω ίνα του αγωγού

Κανονικό ρήγμα – $\beta=30^\circ$

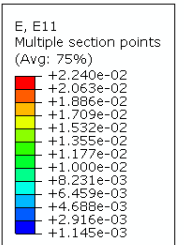
Άργιλος, $S_u = 60$ kPa



h = 0.16 m



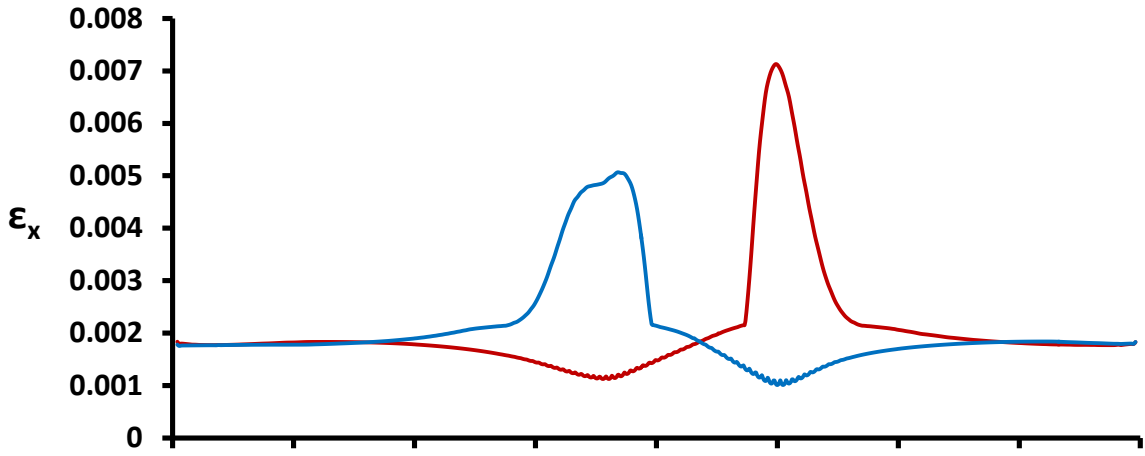
h = 0.23 m



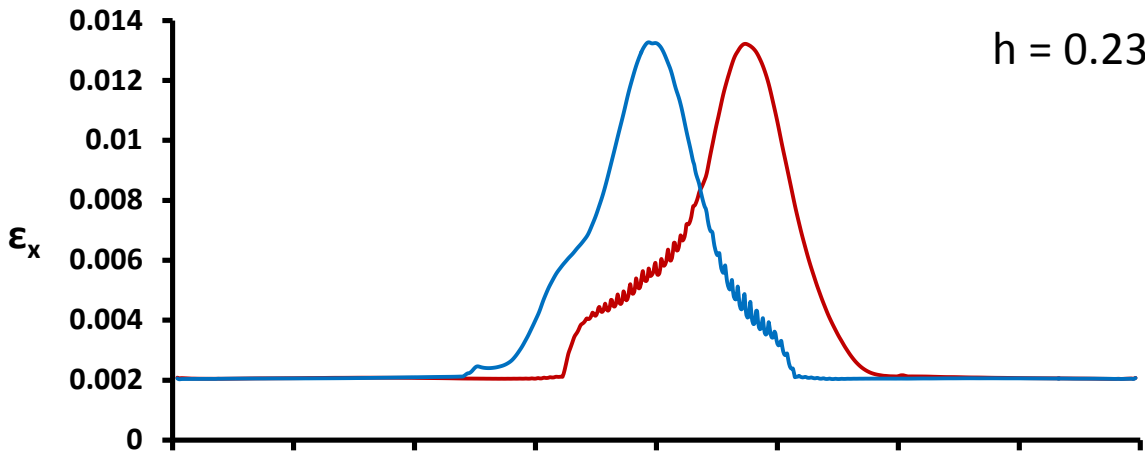
h = 0.30 m

Σχήμα 3.6. Οι αξονικές παραμορφώσεις για τρεις διαφορετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος

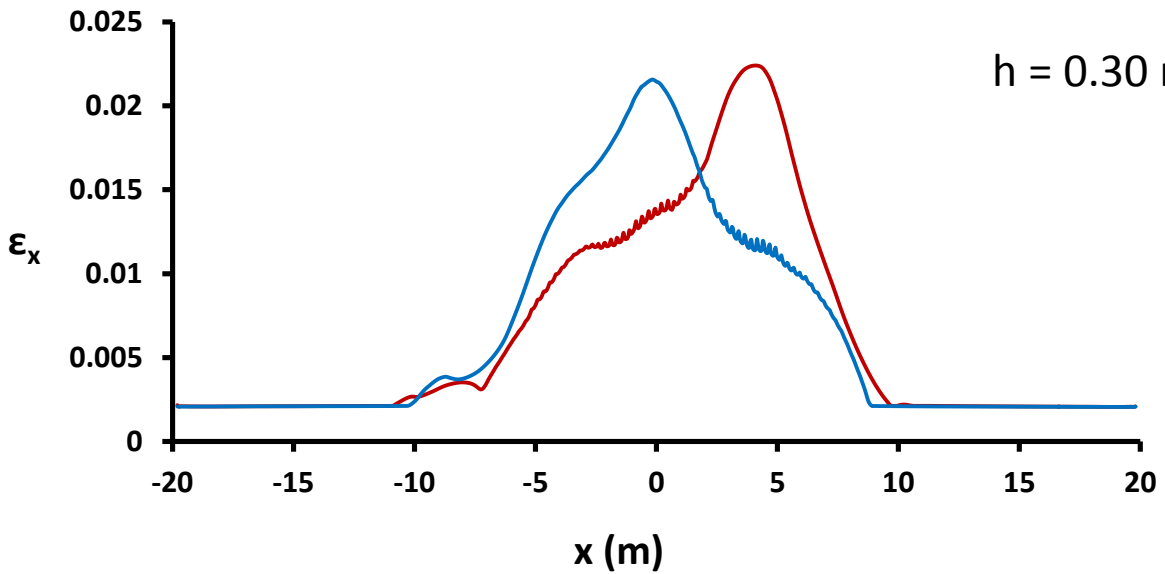
$h = 0.16 \text{ m}$



$h = 0.23 \text{ m}$



$h = 0.30 \text{ m}$



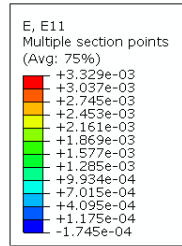
— άνω ίνα

— κάτω ίνα

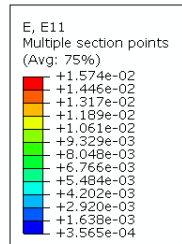
Σχήμα 3.7. Οι αξονικές παραμορφώσεις για τρεις διαφορετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος της προηγούμενης σελίδας για την άνω και κάτω ίνα του αγωγού

Κανονικό ρήγμα – $\beta=60^\circ$

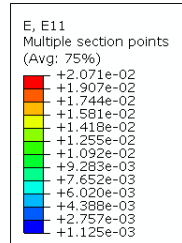
Άργιλος, $S_u = 60$ kPa



$h = 0.20$ m



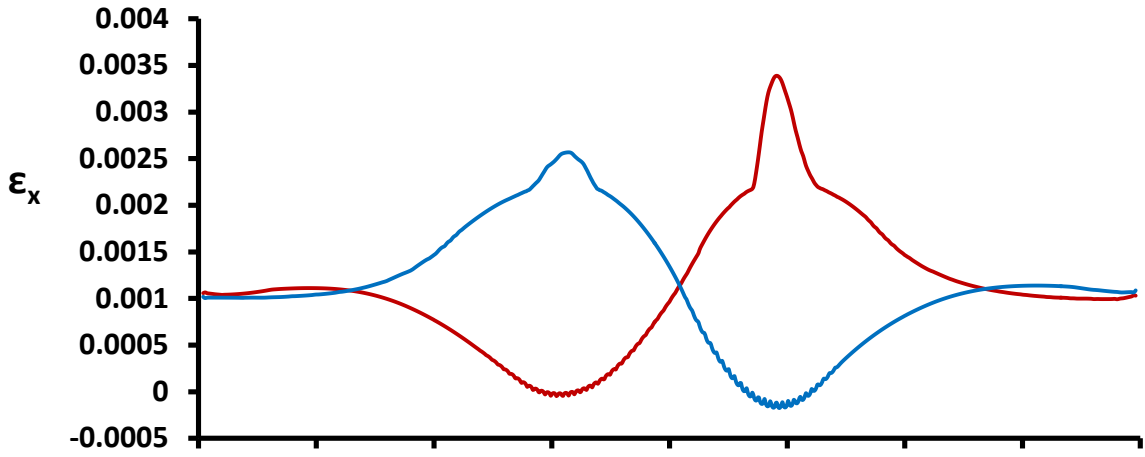
$h = 0.50$ m



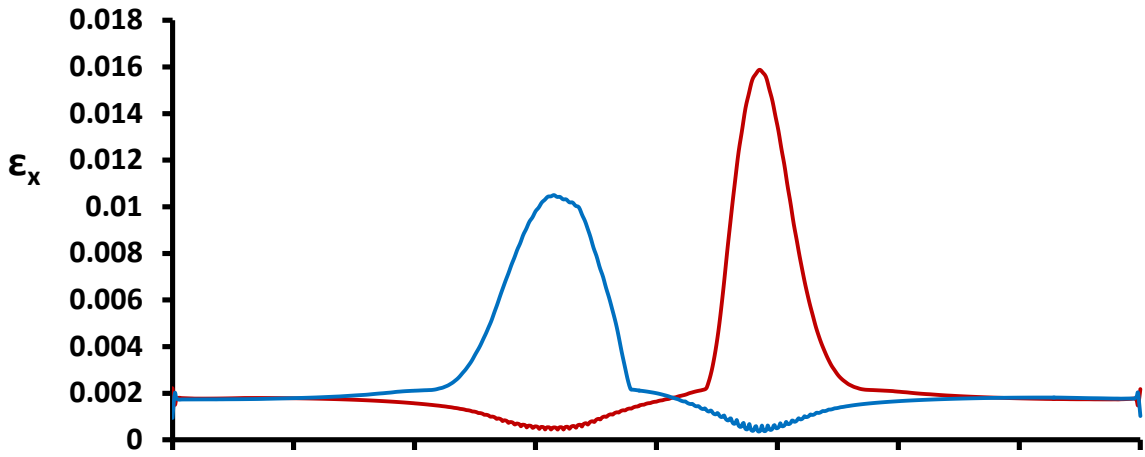
$h = 0.72$ m

Σχήμα 3.8. Οι αξονικές παραμορφώσεις για τρεις διαφορετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος

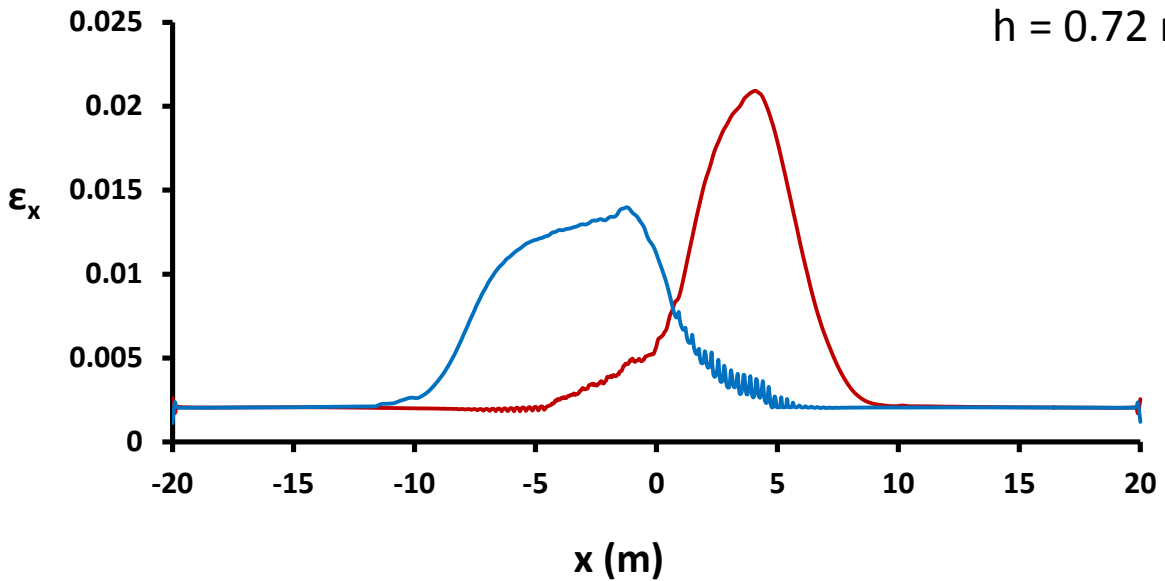
$h = 0.20 \text{ m}$



$h = 0.50 \text{ m}$



$h = 0.72 \text{ m}$

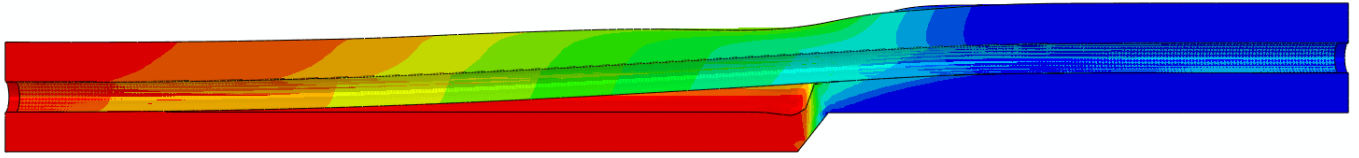


— άνω ίνα

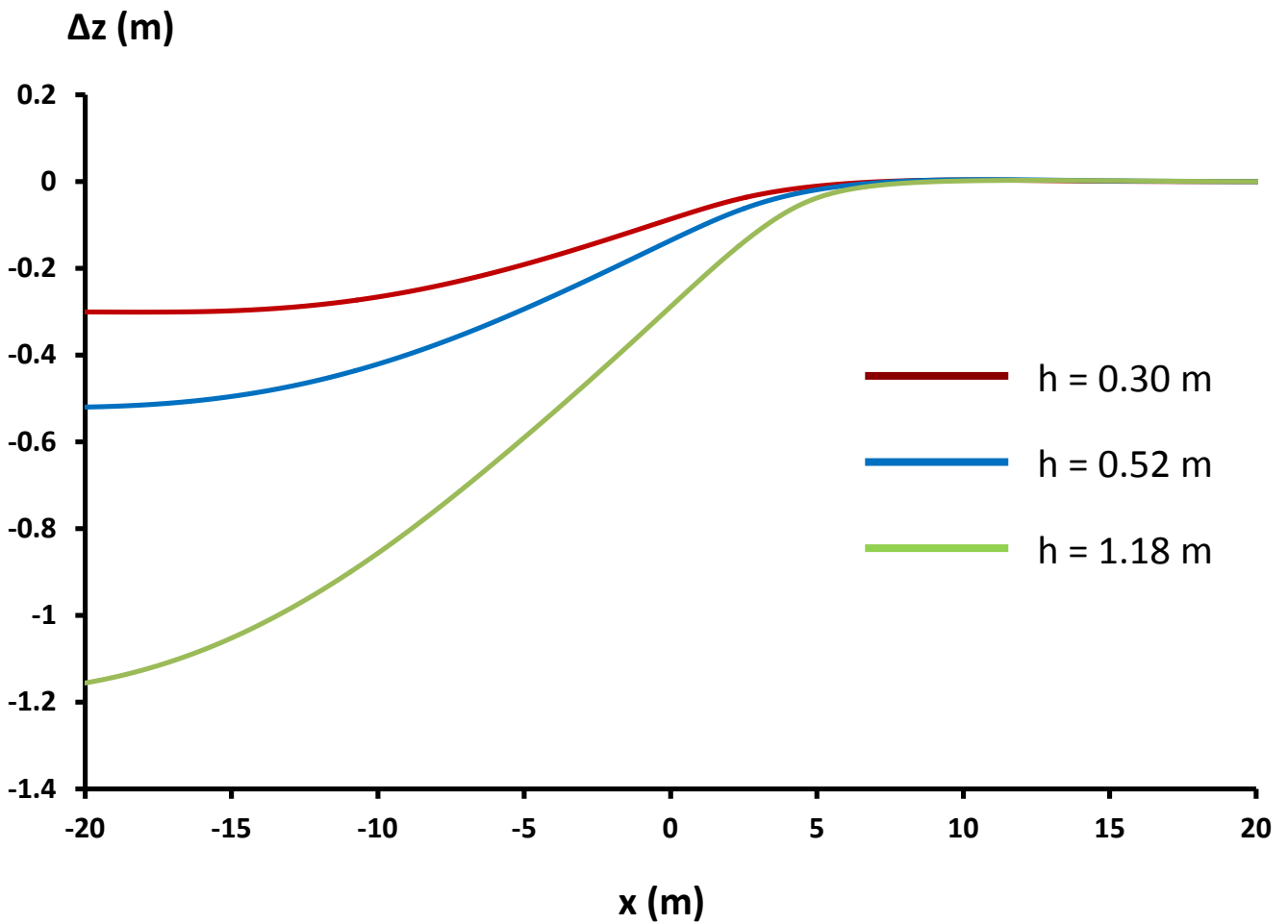
— κάτω ίνα

Σχήμα 3.9. Οι αξονικές παραμορφώσεις για τρεις διαφορετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος της προηγούμενης σελίδας για την άνω και κάτω ίνα του αγωγού

(α)



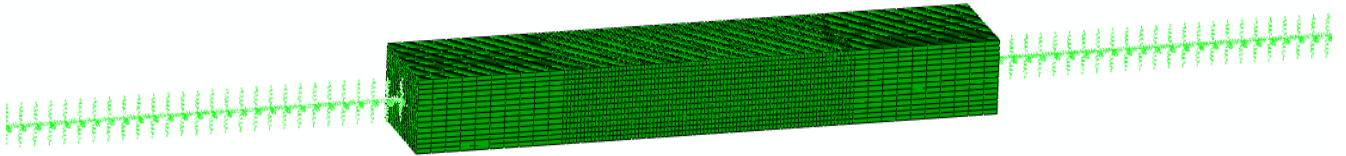
(β)



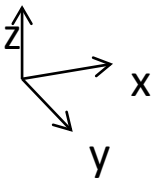
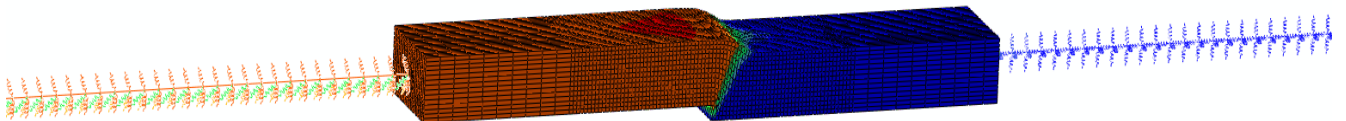
Σχήμα 3.10. (α) Η παραμορφωμένη κατάσταση εδάφους αγωγού για κανονικό ρήγμα σε άμμο για γωνία ρήγματος $\beta = 60^\circ$, (β) Η θέση του αγωγού για διάφορες κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος

Ανάστροφο ρήγμα

(α)



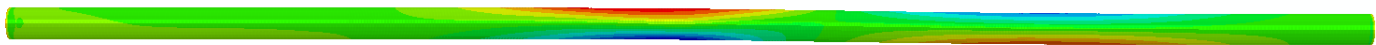
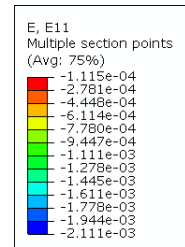
(β)



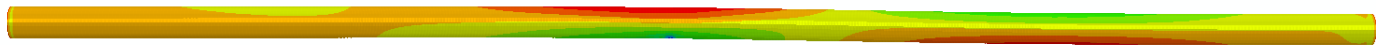
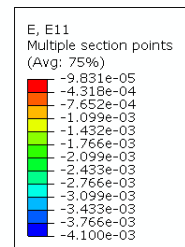
Σχήμα 3.11. (α) απαραμόρφωτη κατάσταση (β) παραμορφωμένη κατάσταση ανάστροφου ρήγματος

Ανάστροφο ρήγμα – $\beta=30^\circ$

Άμμος, $\phi = 30^\circ$



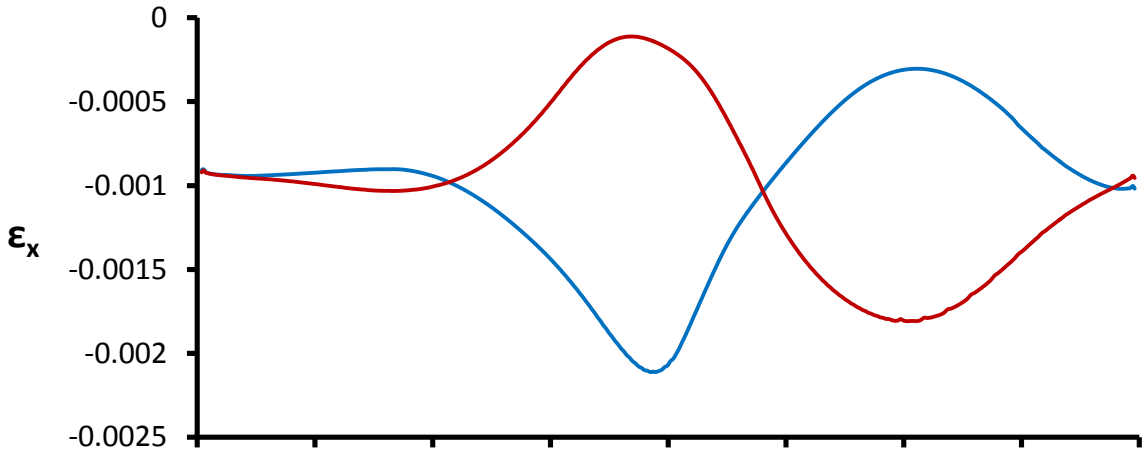
h = 0.17 m



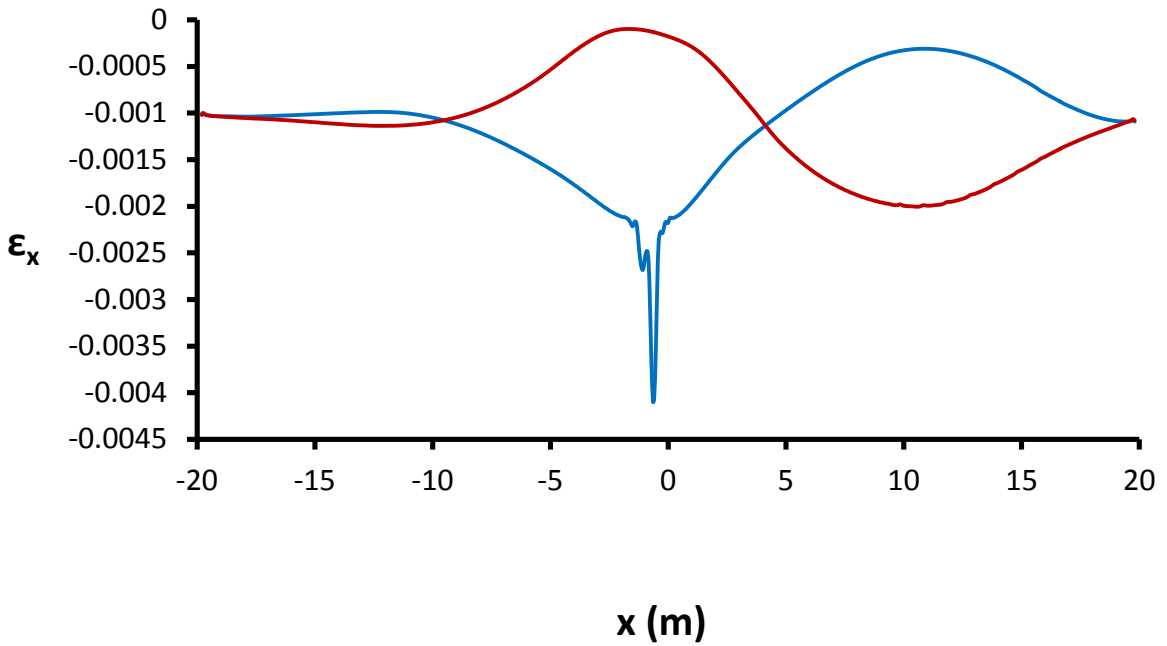
h = 0.20 m

Σχήμα 3.12. Οι αξονικές παραμορφώσεις για τρεις διαφορετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος

$h = 0.17 \text{ m}$



$h = 0.20 \text{ m}$



— άνω ίνα

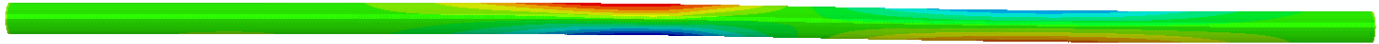
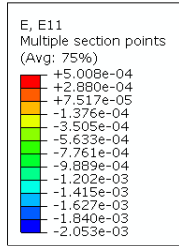
— κάτω ίνα

Σχήμα 3.13. Οι αξονικές παραμορφώσεις για τρεις διαφορετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος της προηγούμενης σελίδας για την άνω και κάτω ίνα του αγωγού

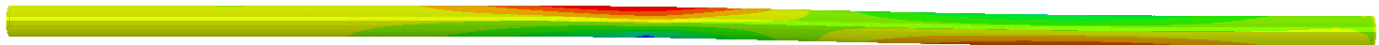
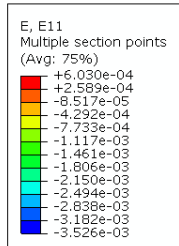
Ανάστροφο ρήγμα – $\beta=60^\circ$

Άμμος, $\phi = 30^\circ$

(α)

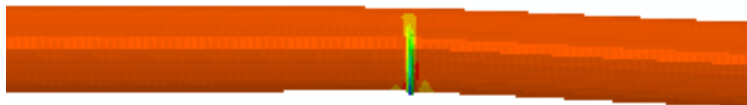


h = 0.24 m



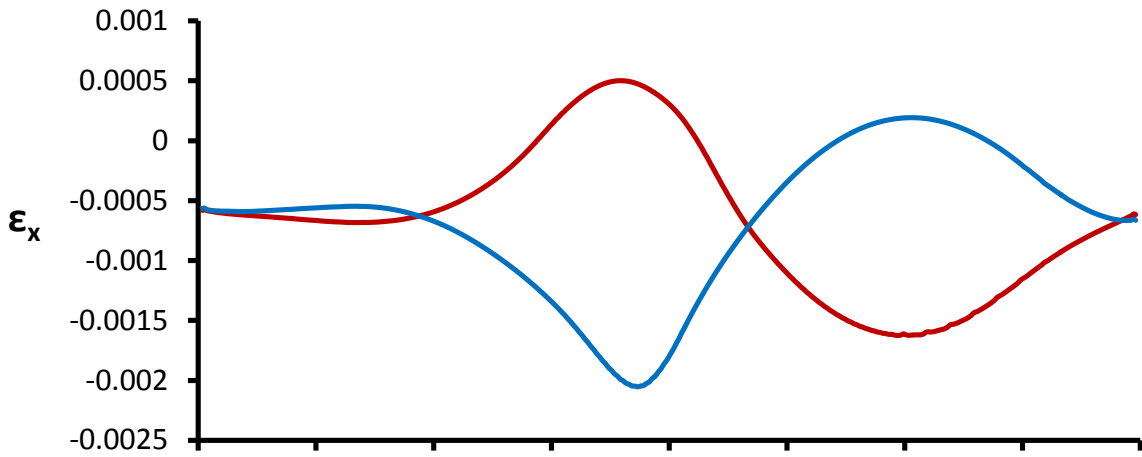
h = 0.30 m

(β)

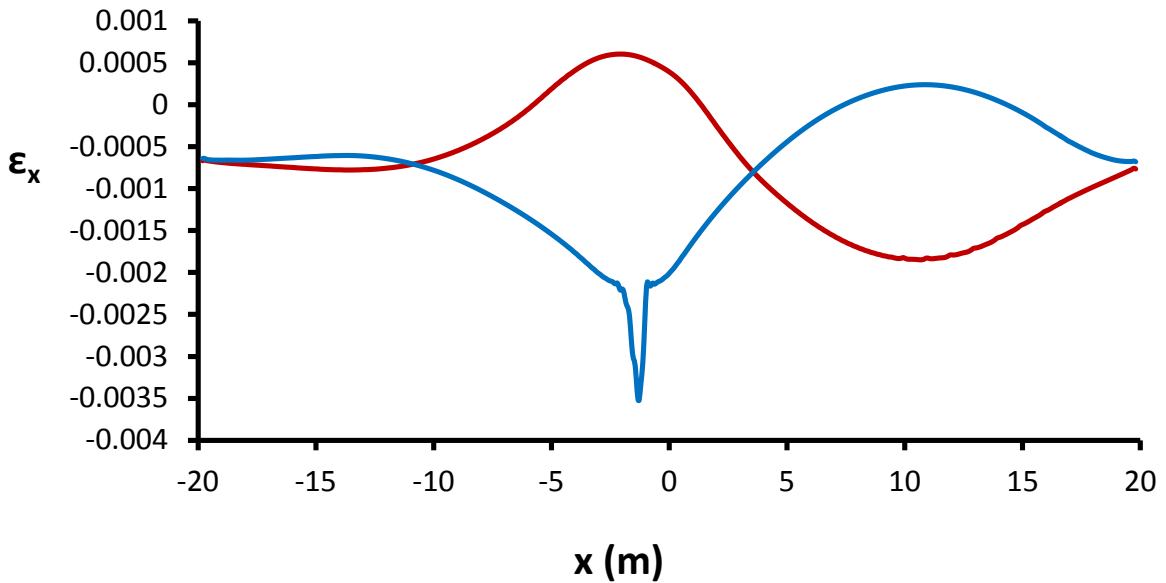


Σχήμα 3.14. (α) Οι αξονικές παραμορφώσεις για τρεις διαφορετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος **(β)** δημιουργία τοπικού λυγισμού στον αγωγό για $h = 0.48$ m

$h = 0.24 \text{ m}$



$h = 0.30 \text{ m}$



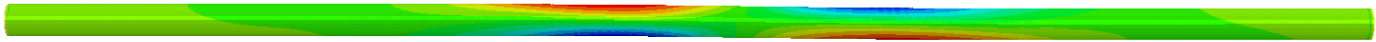
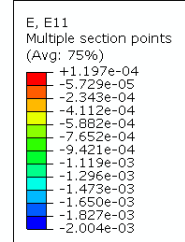
— άνω ίνα

— κάτω ίνα

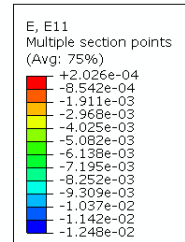
Σχήμα 3.15. Οι αξονικές παραμορφώσεις για τρεις διαφορετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος της προηγούμενης σελίδας για την άνω και κάτω ίνα του αγωγού

Ανάστροφο ρήγμα – $\beta=60^\circ$

Άργιλος, $S_u = 60$ kPa



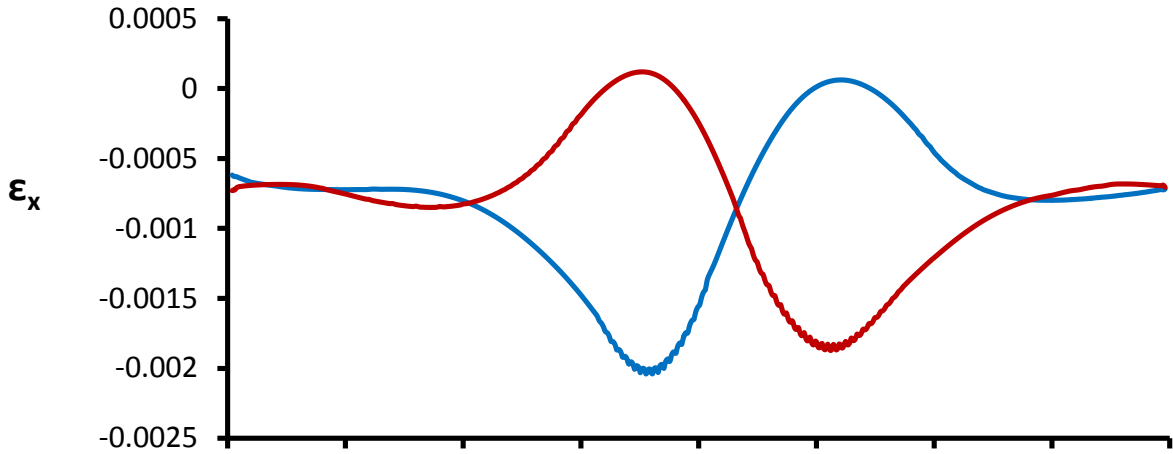
h = 0.12 m



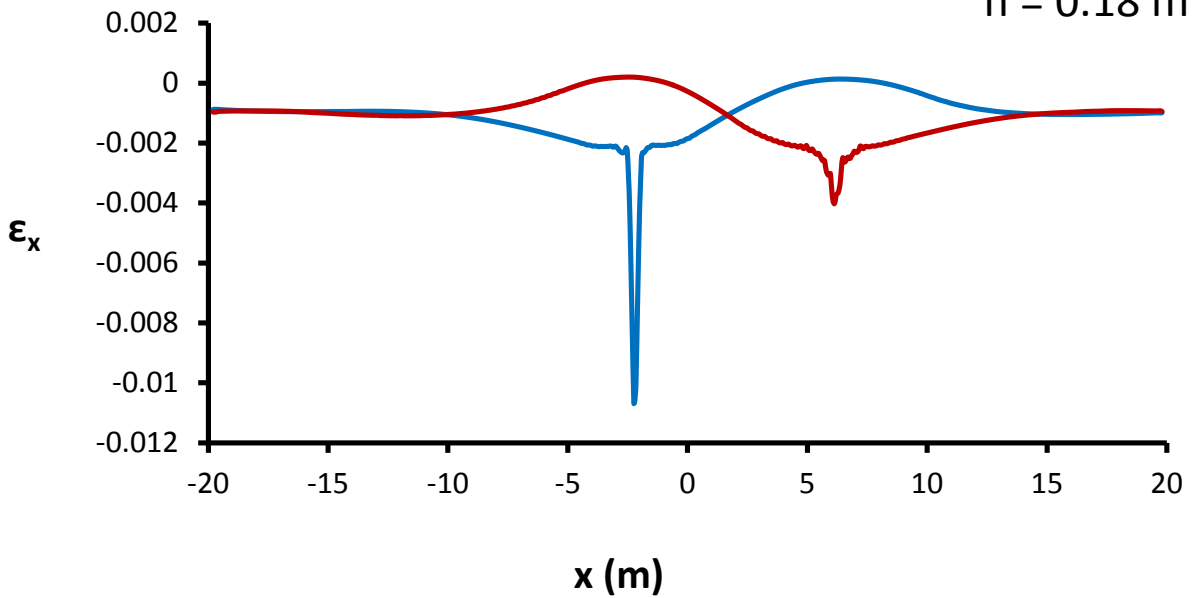
h = 0.18 m

Σχήμα 3.16. Οι αξονικές παραμορφώσεις για τρεις διαφορετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος

$h = 0.12 \text{ m}$



$h = 0.18 \text{ m}$

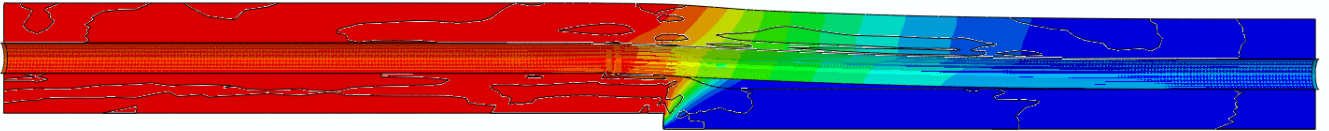


— άνω ίνα

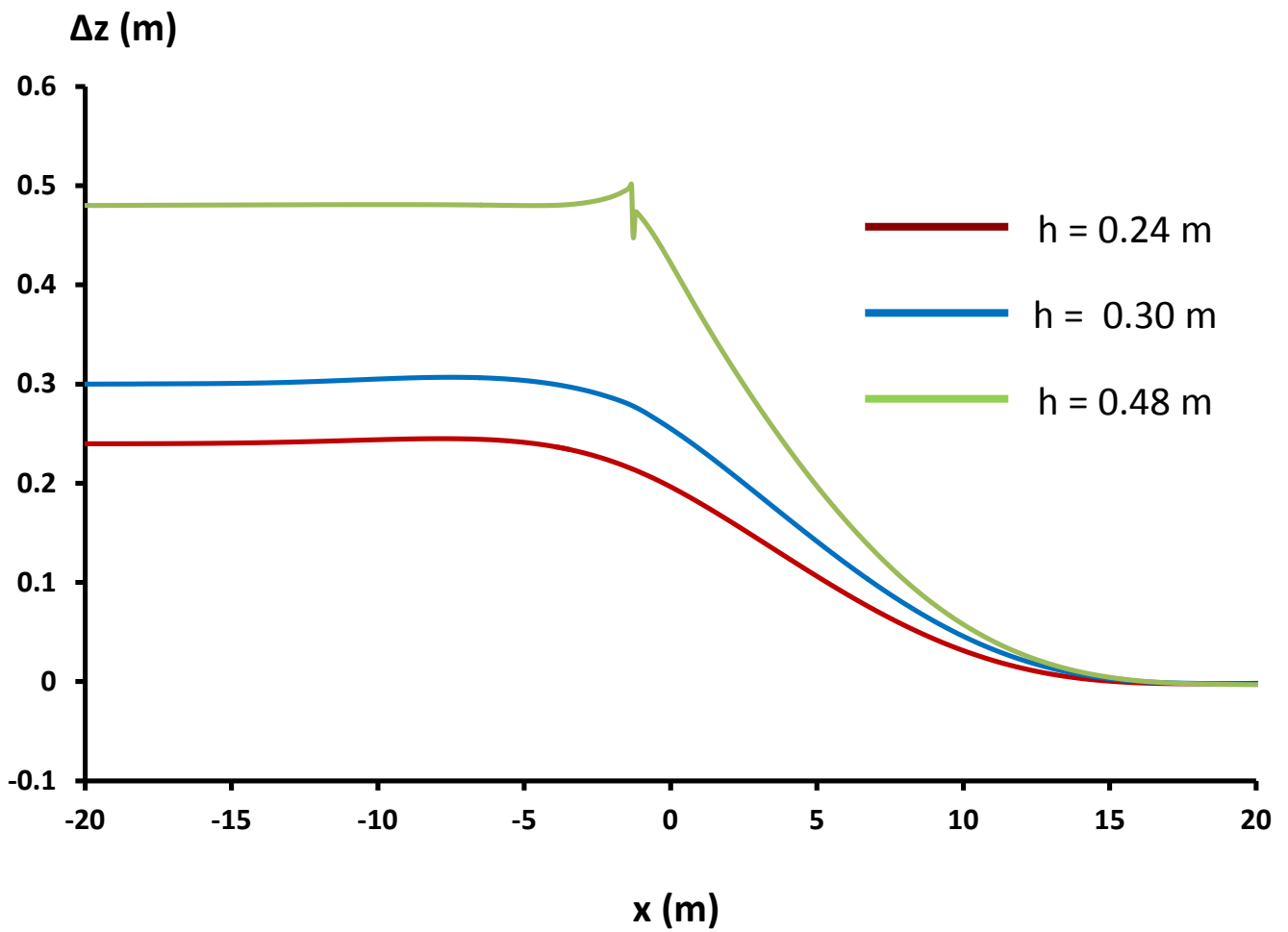
— κάτω ίνα

Σχήμα 3.17. Οι αξονικές παραμορφώσεις για τρεις διαφορετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος της προηγούμενης σελίδας για την άνω και κάτω ίνα του αγωγού

(α)



(β)



Σχήμα 3.18. (α) Η παραμορφωμένη κατάσταση εδάφους αγωγού για ανάστροφο ρήγμα σε άμμο για γωνία ρήγματος $\beta = 60^\circ$, (β) Η θέση του αγωγού για διάφορες κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος

4^ο Κεφάλαιο

Πρόταση βελτίωσης ελατηριωτού προσομοιώματος

4.1 Σύγκριση νέων ελατηρίων με της ALA (2001)

4.2 Αιτιολόγηση διαφορών

4.3 Αδιαστοτοποίηση προτεινομένων ελατηρίων

4 Πρόταση βελτίωσης ελατηριωτού προσομοιώματος

Εισαγωγή

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, τα ελατηριωτά προσομοιώματα χρησιμοποιούν τις προτεινόμενες δυσκαμψίες του Αμερικάνικου κανονισμού, δηλαδή της ASCE (American Society of Civil Engineering) και πιο συγκεκριμένα της ALA (American Lifelines Alliance). Είναι γνωστό πως για την συμπεριφορά εδάφους αγωγού χρειάζονται τεσσάρων ειδών ελατήρια: τα αξονικά, τα εγκάρσια και τα κατακόρυφα τα οποία έχουν διαφορετική δυσκαμψία για μετακίνηση προς τα πάνω και προς τα κάτω. Τα τέσσερα αυτά ελατήρια στον Αμερικάνικο Κανονισμό δεν έρχονται σε συμφωνία μεταξύ τους. Στην παρούσα εργασία για την αδιαστατοποίηση λαμβάνονται υπόψιν οι προτεινόμενοι συντελεστές συνοχής από την ALA για τις αργίλους και για τις άμμους συντελεστής τριβής $\mu=0.5$ (μια μέση τιμή από τους εκάστοτε προτεινόμενους συντελεστές για κάθε συντελεστή τριβής άμμου), έτσι ώστε η σύγκριση να είναι όσο πιο αντικειμενική γίνεται. Τα νέα αυτά ελατήρια θα είναι σε πλήρη συμφωνία μεταξύ τους κι εκτός αυτού αδιασταστοποιήθηκαν ούτως ώστε να είναι εφαρμόσιμα σε διάφορα εδάφη.

4.1 Σύγκριση νέων ελατηρίων με της ALA (2001)

Όπως είναι γνωστό, τα νέα ελατήρια έχουν προκύψει από αριθμητικές αναλύσεις, τα λεγόμενα push tests. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για δύο είδη εδαφών, καθαρής άμμου (με γωνία τριβής $\phi = 30^\circ$ κι αργίλου (με διατμητική αντοχή $S_u = 60$ kPa).

Παρακάτω, παρατίθενται οι τύποι υπολογισμού της μέγιστης δύναμης ανά τρέχον μέτρο του αγωγού καθώς κι η μετατόπιση διαρροής σύμφωνα με την ALA:

Για τα αξονικά:

$$T_u = \pi D \alpha c + \gamma D H \gamma \frac{1+K_0}{2} \tan \delta$$

D = εξωτερική διάμετρος αγωγού

c = συνοχή εδάφους

H = βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού από το μέσον της διατομής του

γ = ειδικό βάρος εδάφους

K_o = συντελεστής πλευρικής τάσης

$\alpha = 0.608 - 0.123 c - 0.274 / (c^2 + 1) + 0.695 / (c^3 + 1)$ όπου c σε kPa / 100 **Σχήμα 4.1.1**

$\delta = f \phi$

ϕ = γωνία τριβής εδάφους

f = συντελεστής επένδυσης, όπου για τραχείς χάλυβες είναι 0.8 και κυμαίνεται από 0.6 – 1

Δ_t = μετατόπιση για T_u

= 3 mm για χαλαρές άμμους

= 5 mm για πυκνές άμμους

= 8 mm για μαλακές αργίλους

= 10 mm για στιφρές αργίλους

Για τα κατακόρυφα προς τα κάτω:

$$Q_d = N_c c D + N_q \gamma H D + N_\gamma \gamma D^2 / 2$$

$$N_c = [\cot(\phi + 0.001)] \{ \exp[\pi \tan(\phi + 0.001)] \tan^2(45 + (\phi + 0.001)/2) - 1 \}$$

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

$$N_\gamma = \exp(0.18 \phi - 2.5)$$

Δ_{qd} = μετατόπιση για Q_d

= 0.1 D για αμμώδεις σχηματισμούς

= 0.2 D για συνεκτικά εδάφη

Για τα κατακόρυφα προς τα πάνω:

$$Q_u = N_{cv} c D + N_{qv} \gamma H D$$

$N_{cv} = 2 H/D \leq 10$, ισχύει για $H/D \leq 10$ (0 για $c=0$)

$N_{qv} = \phi H / (44 D) \leq N_q$ (0 για $\phi=0^\circ$)

Δ_{qu} = μετατόπιση για Q_u

= 0.01 H - 0.02 H για πυκνές χαλαρές άμμους < 0.1 D

= 0.1 H - 0.2 H για στιφρές μαλακές αργίλους < 0.2 D

Για τα εγκάρσια:

$$P_u = N_{ch} c D + N_{qh} \gamma H D$$

$N_{cv} = a + b x + c / (x + 1)^2 + d / (x+1)^3 \leq 9$ (0 για $c=0$)

$N_{qv} = a + b x + c x^2 + d x^3 + e x^4$ (0 για $\phi=0^\circ$) **Σχήμα 4.1.2**

Δ_p = μετατόπιση για P_u

= 0.04 (H + D / 2) <= 0.1 D – 0.15 D

Πίνακας 4.1.1 τιμές συντελεστών a, b, c, d και e για τον υπολογισμό των N_{cv} και N_{qv}

Factor	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	$-6.443(10)^{-3}$	$-1.299(10)^{-4}$

Αργλικό έδαφος

Ο προτεινόμενος συντελεστής τριβής για άργιλο από την ALA είναι $\alpha=0.9$ και σύμφωνα με αυτόν τον συντελεστή υπολογίστηκαν όλα τα διαγράμματα $F = f(\delta)$ για όλες τις μετακινήσεις.

Ξεκινώντας με τα *αξονικά* ελατήρια παρατηρείται ότι ως προς την δυσκαμψία δεν έχουμε διαφορές. Ως προς την αντοχή ο Αμερικάνικος κανονισμός δίνει μια λίγο μεγαλύτερη τιμή της τάξης του 5 % **Σχήμα 4.1.3.**

Συνεχίζοντας με τα *κατακόρυφα* ελατήρια προς τα κάτω ως προς την δυσκαμψία τα νέα ελατήρια είναι αρκετά πιο δύσκαμπτα σε σχέση με τις παραδοχές της ALA (2001). Ως προς την αντοχή δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές **Σχήμα 4.1.4.**

Εν συνεχεία, συγκρίνοντας τα *κατακόρυφα* ελατήρια προς τα πάνω παρατηρούνται οι ίδιες διαφορές που υπάρχουν και με τα προς τα κάτω" μεγάλη διαφορά στην δυσκαμψία και ίδια αντοχή **Σχήμα 4.1.5.**

Τέλος, όσον αφορά στα *εγκάρσια* ελατήρια , παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν διαφορές τόσο ως προς την δυσκαμψία όσο κι ως προς την αντοχή **Σχήμα 4.1.6.**

Αμμώδες έδαφος

Σύμφωνα με την ALA ο προτεινόμενος συντελεστής τριβής για άμμο με γωνία τριβής $\phi=30^\circ$, είναι ίσος με $\tan\delta = 0.445$ όπου $\delta = f * \phi$ και για χαλύβδινους αγωγούς τραχείας επιφάνειας $f = 0.8$.

Αρχικώς, στα *αξονικά ελατήρια* παρατηρείται ότι ως προς την δυσκαμψία τα ελατήρια της ASCE είναι λίγο περισσότερα εύκαμπτα σε σχέση με αυτά των αριθμητικών αναλύσεων. Ως προς την αντοχή ο Αμερικάνικος κανονισμός δίνει μια λίγο μεγαλύτερη τιμή της τάξης του 10% **Σχήμα 4.1.7**.

Συνεχίζοντας με τα *κατακόρυφα ελατήρια προς τα κάτω* ως προς την δυσκαμψία τα νέα ελατήρια είναι αρκετά πιο εύκαμπτα σε σχέση με τις παραδοχές της ALA (2001). Ως προς την αντοχή οι αριθμητικές αναλύσεις δίνουν λίγο μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα **Σχήμα 4.1.8**.

Εν συνεχεία, συγκρίνοντας τα *κατακόρυφα ελατήρια προς τα πάνω* η ALA προτείνει ελατήρια με μικρότερη αντοχή καθώς και με μικροτέρη δυσκαμψία **Σχήμα 4.1.9**.

Τέλος, όσον αφορά στα *εγκάρσια ελατήρια*, παρατηρείται ότι ο Αμερικάνικος κανονισμός θεωρεί ότι το έδαφος μεγαλύτερη αντοχή καθώς κι ότι είναι αρκετά πιο εύκαμπτο **Σχήμα 4.1.10**.

4.2 Αιτιολόγηση διαφορών

Παρατηρείται ότι αυτές οι διαφορές είναι αρκετά σημαντικές κι αξίζει να εξεταστούν που οφείλονται μέσα από την διερεύνηση των παραδοχών του Αμερικάνικου Κανονισμού.

Ξεκινώντας με τα *αξονικά ελατήρια*, για τις αργίλους οι διαφορές δεν είναι σημαντικές τόσο ως προς την δυσκαμψία, αλλά κι ως προς την αντοχή. Όπως σχολιάστηκε παραπάνω η αντοχή στην αριθμητική ανάλυση δίνει λίγο μικρότερη τιμή, η διαφορά όμως είναι σχεδόν ασήμαντη. Έπειτα, στις άμμους παρατηρείται μια μικρότερη αντοχή σε σχέση με την εκτιμητέα της ALA. Η δύναμη αντοχής είναι το ολοκλήρωμα των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται γύρω από τον αγωγό. Σύμφωνα με την ALA η διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται γύρω από τον

αγωγό είναι η μέση τάση στο βάθος H . Στην πραγματικότητα οι τάσεις αυτές είναι λίγο μικρότερες από την μέση τιμή για αυτό είναι και λίγο μικρότερη ως προς την αντοχή. Οι διατμητικές τάσεις είναι ίσες με τις κατακόρυφες τάσεις επί τον συντελεστή τριβής. Στο **Σχήμα 4.2.1** φαίνονται οι κατακόρυφες κύριες τάσεις γύρω από τον αγωγό, οι οποίες έχουν μέση τιμή $c_{press} = 22.41 \text{ kPa}$ ενώ η ALA θεωρεί $c_{press} = \gamma H (1+K_o) / 2 = 24.39 \text{ kPa}$. Το σημείο που ξεκινάει η διαρροή είναι σε μικρότερη αξονική μετακίνηση του αγωγού. Με μικρότερη θεώρηση του μέτρου ελαστικότητας, υπάρχει και μείωση της αντοχής στις αριθμητικές αναλύσεις. Επιπλέον, η εκτίμηση της τιμής του μέτρου ελαστικότητας είναι λογική κι έχει προκύψει από εμπειρικούς τύπους. Συνεπώς, η εκτίμηση της δυσκαμψίας των αξονικών ελατηρίων δεν συνάδει με την πραγματικότητα. Βέβαια, όπως θα δούμε και στα επόμενα κεφάλαια αυτή η διαφορά δεν είναι τόσο σημαντική στο ελατηριωτό προσομοίωμα, διότι οι τιμές αυτές είναι χιλιοστά.

Εν συνεχεία, αιτιολογούνται οι διαφορές για τα *κατακόρυφα ελατήρια προς τα κάτω*. Ξεκινώντας με τις αργίλους ως προς την αντοχή δεν υπάρχουν διαφορές. Ως προς την δυσκαμψία, τα αποτελέσματα από τις αριθμητικές αναλύσεις δίνουν πολύ μεγαλύτερη στιβαρότητα. Όπως έχει επισημανθεί επιλέχθηκε άργιλος με συνοχή $c=60 \text{ kPa}$. Ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας $E_o / S_u = 1800$ και το $E = E_o / (3-10)$ δηλαδή $E / S_u = (180 - 600)$. Επιλέχθηκε $E = 400 S_u$, λογική τιμή και παρατηρείται να είναι αρκετά πιο δύσκαμπτη η αντίδραση του εδάφους. Ακόμη, και με την μικρότερη επιτρεπτή τιμή ($E / S_u = 180$) και πάλι υπάρχει σημαντική διαφορά στην δυσκαμψία. Η παραδοχή αυτή είναι λάθος κι ούτε καν συντηρητική. Στο **Σχήμα 4.2.2** φαίνεται η διαφορά με μικρότερη δυσκαμψία κι ο μηχανισμός αστοχίας του εδάφους για την μετατόπιση αυτή. Έπειτα, για τις άμμους η ASCE θεωρεί ένα μέτρο ελαστικότητας μεγαλύτερο από το εκτιμώμενο και με έναν συντελεστή τριβής μικρότερο από τον προτεινόμενο για τα αξονικά ελατήρια και συγκεκριμένα $\mu = 0.25$ **Σχήμα 4.2.3**. Παρατηρείται πως ο μηχανισμός αστοχίας είναι Prandtl, πράγμα αναμενόμενο. Κατά DIN 4017 προκύπτει $Q_d = 847 \text{ kN/m}$, όσο εκτιμάται κι από τις αριθμητικές αναλύσεις. Η ASCE δίνει μια μικρότερη τιμή $Q_d = 697 \text{ kN/m}$. Οι Meyerhof και Terzaghi δεν ικανοποιούν τις παραδοχές της εξετάζουσας περίπτωσης διότι θεωρούν $H/D < 1$.

Επιπλέον, αξίζει να σχολιασθούν οι διαφορές για τα *κατακόρυφα ελατήρια προς τα πάνω*. Ξεκινώντας, με τις αργίλους πάλι έχοντας την μικρότερη επιτρεπτή λογική τιμή η διαφορά στην δυσκαμψία εξακολουθεί να υπάρχει. Στην αντοχή όπως αναφέρθηκε προηγουμένως διαφορές δεν υπάρχουν **Σχήμα 4.2.4**. Όσον αφορά στις άμμους, με το μισό μέτρο ελαστικότητας εξακολουθεί να υπάρχει διαφορά στην δυσκαμψία. Για πολύ μικρότερα μέτρα ελαστικότητας, τα οποία εκτός του ότι δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, δίνουν κι αρκετά μικρότερη αντοχή και δεν εκπροσωπούν τον ελαστικό κλάδο της καμπύλης $F - \delta$, πράγμα που δεν αιτιολογεί την τιμή του u_y που προτείνει ο Κανονισμός. Η δύναμη αυτή είναι το άθροισμα των δυνάμεων του βάρους του αγωγού, του βάρους του εδάφους άνωθεν του αγωγού και των διατμητικών δυνάμεων αγωγού - εδάφους. Οι διατμητικές δυνάμεις φαίνεται να μην λαμβάνει υπόψιν ο Αμερικάνικος Κανονισμός, διότι η αριθμητική ανάλυση με συντελεστή τριβής δίνει την ίδια αντοχή **Σχήμα 4.2.5**.

Τέλος, παρουσιάζονται τα *εγκάρσια ελατήρια*. Στις αργίλους η σύγκριση είναι αρκετά ικανοποιητική. Ο μηχανισμός μοιάζει με one-sided scoop **Σχήμα 4.2.6**. Σύμφωνα με τα εγκιβωτισμένα θεμέλια από τον τύπο της Gouvenec προκύπτει ότι $Q_{max} = Q_{uo} [1 + 5.56 (D / B)]$ όπου $Q_{uo} = S_u A_{base}$. Αν θεωρηθεί ότι $A_{base} \sim \pi 0.9144 / 4$ (η βάση είναι κοίλη) τότε προκύπτει $Q_{max} = 477 \text{ kN}$ (ASCE 317 kN). Λογικό, να προκύπτει μεγαλύτερη τιμή στο εγκιβωτισμένο θεμέλιο, εφόσον ο αγωγός είναι μια κοίλη διατομή. Τέλος, για τις άμμους ο Αμερικάνικος Κανονισμός λαμβάνει υπόψιν τις παραδοχές του Hansen κατά την οποία δεν λαμβάνεται υπόψιν η ύπαρξη διεπιφάνειας, δηλαδή το έδαφος δεν αποκολλάται από τον αγωγό με αποτέλεσμα να προσδίδεται στο έδαφος κι εφελκυστική αντοχή, η οποία δεν υφίσταται στην πραγματικότητα. Θεωρώντας, λοιπόν, την απώλεια διεπιφάνειας η αντοχή που προκύπτει είναι αυτή του κανονισμού. Κι εδώ βάζοντας ένα μικρότερο μέτρο ελαστικότητας μειώνεται ταυτόχρονα κι η αντοχή κι εξακολουθούν να υπάρχουν διαφορές στην δυσκαμψία. Ο μηχανισμός αστοχίας είναι ο λεγόμενος scoop, όπου ενεργοποιούνται πρώτα οι ενεργητικές ωθήσεις, πίσω από τον αγωγό όπως κινείται κι έπειτα οι παθητικές από μπροστά. Το έδαφος από πίσω χαλαρώνει κι έχουμε μια υποχώρηση, ενώ από μπροστά συμπιέζεται **Σχήμα 4.2.7**.

4.3 Αδιαστατοποίηση προτεινομένων ελατηρίων

Η διαστατική ανάλυση είναι ιδιαίτερος σημαντική στην γεωτεχνική μηχανική κι όχι μόνον, διότι συνάγεται μια εξίσωση που διέπει ένα φυσικό φαινόμενο, προϋποθέτοντας μόνον την γνώση των μεταβλητών του προβλήματος και την γνώση των διαστάσεων των μεταβλητών. Το βασικότερο πλεονέκτημα της διαστατικής ανάλυσης είναι ότι είναι πολύ γενική κι εφαρμόσιμη σε οποιοδήποτε σχεδόν πρόβλημα. Στην περίπτωση μας σε οποιοδήποτε εδαφικό σχηματισμό. Επιπλέον, οδηγεί σε ποιοτικό προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ των αδιάστατων μεταβλητών του προβλήματος. Επομένως, καθοδηγούνται τα επόμενα βήματα της μελέτης. Τέλος, η χρησιμοποίηση των αδιάστατων όρων κατά την ανάλυση καθιστά τα αποτελέσματά της ανεξάρτητα από την μικρή ή μεγάλη κλίμακα του φαινομένου κι από τις μονάδες μέτρησης.

Σύμφωνα με το θεώρημα των Π (Buckingham 1915) εάν στην αλγεβρική έκφραση μιας φυσικής σχέσης υπεισέρχονται n μεταβλητές, η έκφραση αυτή μπορεί να γραφεί ως συνάρτηση γινομένου n -μ αδιάστατων μονονύμων (Π), όπου μ το πλήθος των θεμελιωδών διαστάσεων (στην περίπτωσή μας 3 μήκος, μάζα και χρόνος). Πιο συγκεκριμένα:

$$F = f(u, E, D, H, \phi \text{ ή } S_u, \gamma)$$

F η δύναμη δηλαδή η ανεξάρτητη μεταβλητή κι οι υπόλοιπες οι εξαρτημένες, όπου για τις αργίλους:

$$\frac{F}{S_u D} = \left(\frac{u}{D}, \frac{H}{D}, \frac{E}{S_u} \right)$$

και για τις άμμους:

$$\frac{F}{\gamma H D \tan \phi} = \left(\frac{u}{D}, \frac{H}{D}, \frac{E}{\gamma H \tan \phi} \right)$$

Με την ύπαρξη αυτών των μονονύμων οδηγούμαστε πιο εύκολα στην ποιοτική λύση.

Στα ελατήρια που θα εφαρμοσθούν στην προσομοίωση του εδάφους θα αδιαστατοποιηθούν τα εγκάρσια και κατακόρυφα ελατήρια. Τα αξονικά ελατήρια δεν παρουσιάζουν σημαντικές

διαφορές με αυτά του Αμερικάνικου κανονισμού, οπότε θα εφαρμοσθούν οι παραδοχές του Αμερικάνικου κανονισμού.

Ξεκινώντας με τις *αργίλους* ο λόγος μέτρου ελαστικότητας προς συνοχή εδάφους E/S_u θεωρείται σταθερός κι ίσως με 400 και παρουσιάζονται 3 λόγοι εγκιβωτισμού προς διάμετρο $H/D = 1, 2, 5$ και για διάμετρο $D=1$ m.

Εγκάρσια ελατήρια

Αρχικώς, για έναν συγκεκριμένο λόγο εγκιβωτισμού ($H/D = 2$) και διαμέτρου αγωγού $D=1$ m και πάχους $t=1$ cm, εξετάσθηκαν 4 διαφορετικές άργιλοι με συνοχή 25, 50, 100 και 200 kPa αντίστοιχα. Παρατηρείται πως η αδιαστατοποίηση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί **Σχήμα 4.3.1**, πράγμα αναμενόμενο, εφόσον υπάρχουν δύο σημαντικοί παράγοντες που επιδρούν εξίσου στην αντίδραση του εδάφους. Αυτοί είναι:

α) η συμπίεση του εδάφους

β) η οριζόντια συνιστώσα του βάρους της μετακινούμενης εδαφικής σφήνας **Σχήμα 4.3.2**.

Για τον λόγο αυτό, το πρόβλημα καθορίζεται και σε δύο καταστάσεις, κατά τις οποίες στην πρώτη είναι η δύναμη λόγω συμπίεσης του εδάφους, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν το βαρυτικό πεδίο και στην δύναμη λόγω βαρυτικού πεδίου. Συνεπώς, στις αριθμητικές αναλύσεις εξετάσθηκε αρχικώς η επιρροή της συνεκτικότητας του εδάφους χωρίς βαρύτητα κι έπειτα έγιναν αναλύσεις με βαρύτητα, ούτως ώστε η διαφορά της δύναμης που θα προκύψει με την βαρύτητα (F_{total}) από την δύναμη που θα προκύψει χωρίς αυτήν (F_{comp}) να μας δίνει την οριζόντια συνιστώσα του βάρους (F_{weight}).

Η αντίδραση λόγω συμπίεσης φαίνεται να είναι συνάρτηση της συνοχής του εδάφους επί της διαμέτρου **Σχήμα 4.3.3**. Στο **Σχήμα 4.3.4** για έναν συγκεκριμένο λόγο εγκιβωτισμού $H/D=2$ και για συγκεκριμένη συνοχή εδάφους $S_u= 50$ kPa παρατηρείται ότι η παράμετρος διάμετρος αδιαστατοποιείται για διαμέτρους $D=1, 0.5, 0.25$ m. Τα ίδια ισχύουν και για τους υπόλοιπους λόγους εγκιβωτισμού, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.3.5**.

Όσον αφορά στην βαρυντική αντίσταση του εδάφους η τιμή της εξαρτάται από το βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού, από την διάμετρο και φυσικά από το ειδικό βάρος του εδάφους. Για παράδειγμα για $H/D = 2$ φαίνεται η αδιαστατοποίηση. Αυτή η αδιαστατοποιημένη καμπύλη που προκύπτει είναι η ίδια για όλα τα βάθη εγκιβωτισμού καθώς και διαμέτρους

Σχήμα 4.3.6.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι για συγκεκριμένο λόγο εγκιβωτισμού (πχ. $H/D = 2$) και για μια συγκεκριμένη συνοχή (πχ. $S_u = 50$ kPa) για διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας προκύπτει πως η δυσκαμψία του ελατηρίου είναι ανάλογη αυτού, όπως φαίνεται κι από την αδιαστατοποίηση **Σχήμα 4.3.7**. Ας σημειωθεί πως αυτή η επίδραση ισχύει και για όλα τα υπόλοιπα ελατήρια κι ας έχουμε διατηρήσει τον λόγο E/S_u σταθερό.

Τελικώς, για κάθε μετατόπιση u προκύπτει ότι $F = N_{ccomp} S_u D + N_{cw} \gamma H D$

Ελατήρια προς τα πάνω

Η λογική που ακολουθήθηκε είναι παρόμοια με αυτή για τα εγκάρσια. Και πάλι εδώ διαχωρίστηκε το πρόβλημα με και χωρίς την επίδραση της βαρύτητας. Ο μηχανισμός, όμως, αστοχίας δεν είναι ίδιος με αυτόν που αναπτύσσεται κατά την εγκάρσια μετατόπιση. Η αντίδραση του εδάφους που προκύπτει οφείλεται στις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται μεταξύ μετακινούμενης και σταθερής μάζας εδάφους. Οι δυνάμεις αυτές είναι ανάλογες της συνοχής και της διαμέτρου του αγωγού για κάθε H/D **Σχήμα 4.3.8**. Στο **Σχήμα 4.3.9** φαίνονται οι αδιαστατοποιημένες καμπύλες για όλα τα βάθη εγκιβωτισμού. Επιπλέον, εξαρτάται από το βάρος του εδάφους άνωθεν, το οποίο είναι ανάλογο του ειδικού βάρους του εδάφους του βάθους H και της διαμέτρου D **Σχήμα 4.3.10**. Κι εδώ η καμπύλη αυτή ισχύει για όλα τα βάθη εγκιβωτισμού και διαμέτρους.

Τελικώς, για κάθε μετατόπιση u προκύπτει ότι $F = N_{ccomp} S_u D + N_{cw} \gamma H D$

Ελατήρια προς τα κάτω

Μετακινώντας τον αγωγό προς τα κάτω η συμπεριφορά του εδάφους είναι σαν την κατακόρυφη μετακίνηση θεμελίων προς τα κάτω. Η φέρουσα ικανότητα που αναπτύσσεται είναι ανάλογη της συνοχής και της διαμέτρου **Σχήμα 4.3.11, 4.3.12.**

Τελικώς, για κάθε μετατόπιση u προκύπτει ότι $F = N_{c\text{comp}} S_u D$

Έπειτα, ακολουθεί η αδιαστατοποίηση των ελατηρίων που αντιπροσωπεύουν *αμμώδεις σχηματισμούς*. Στις άμμους η κατάσταση είναι περισσότερο περίπλοκη σε σχέση με τις άμμους. Ο λόγος $E / (\gamma H \tan\phi)$ διατηρείται σταθερός και ίσος περίπου με 900 για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Συνεπώς, όχι μόνον για διαφορετική γωνία τριβής, αλλά και για διαφορετικό βάθος εγκιβωτισμού H το μέτρο ελαστικότητας είναι διαφορετικό. Στον **Πίνακα 4.3.1** φαίνονται οι τιμές που εφαρμόστηκαν.

Πίνακας 4.3.1 τιμές μέτρου ελαστικότητας αναλόγως με την γωνία τριβής εδάφους και το βάθος H

H/D=1				H/D=2		H/D=5	
ϕ	$\tan\phi$	E	E/ $\tan\phi$	E	E/ $\tan\phi$	E	E/ $\tan\phi$
20	0.36397	6305	17322.85	12610	34645.69	31525	86614.23
25	0.466308	8080	17327.62	16160	34655.23	40400	86638.08
30	0.57735	10000	17320.51	20000	34641.02	50000	86602.54
35	0.700208	12130	17323.44	24260	34646.87	60650	86617.18
40	0.8391	15000	17876.3	30000	35752.61	75000	89381.52

Εγκάρσια ελατήρια

Και στην περίπτωση της άμμου επιδρούν δύο παράγοντες για την αντίδραση του εδάφους. Ο πρώτος είναι η ανάπτυξη παθητικών ωθήσεων κατά μέτωπο του αγωγού κι ο δεύτερος είναι η οριζόντια συνιστώσα του βάρους της μετακινούμενης σφήνας. Στις άμμους, το πρόβλημα είναι δύσκολο να το διαχωρίσουμε με και χωρίς βαρυτικό, όπως στην περίπτωση της αργίλου,

λόγω έλλειψης συνοχής. Παρόλα αυτά όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.3.13** αυτοί είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση του εδάφους. Για μεγαλύτερο λόγο εγκιβωτισμού $H/D=5$, παρατηρούμε πως η αντοχή φαίνεται να είναι πιο αυξημένη σε σχέση με μικρότερους λόγους εγκιβωτισμού **Σχήμα 4.3.14**. Αυτό οφείλεται στο ότι ο μηχανισμός αστοχίας αναπτύσσεται σε περισσότερη έκταση και γι αυτό το έδαφος φέρει μεγαλύτερη αντίδραση.

Τελικώς, για κάθε μετατόπιση u προκύπτει ότι $F = N_s (\gamma H D \tan (45 + \varphi/2)^2 + \gamma H D)$

Ελατήρια προς τα πάνω

Για τις άμμους οι παράγοντες που επιδρούν είναι κι εδώ ίδιοι με αυτοί που επιδρούσαν στην άργιλο, μόνον που τώρα δεν έχουμε συνοχή S_u , αλλά οριζόντιες τάσεις οι οποίες είναι ίσες με $K_0 \sigma_v$ και για λόγους διευκόλυνσης για την αδιαστατοποίηση χρησιμοποιούμε την κατακόρυφη τάση, δηλαδή γH **Σχήμα 4.3.15, 4.3.16**.

Τελικώς, για κάθε μετατόπιση u προκύπτει ότι $F = N_s (\gamma H D \tan \varphi + \gamma H D)$

Ελατήρια προς τα κάτω

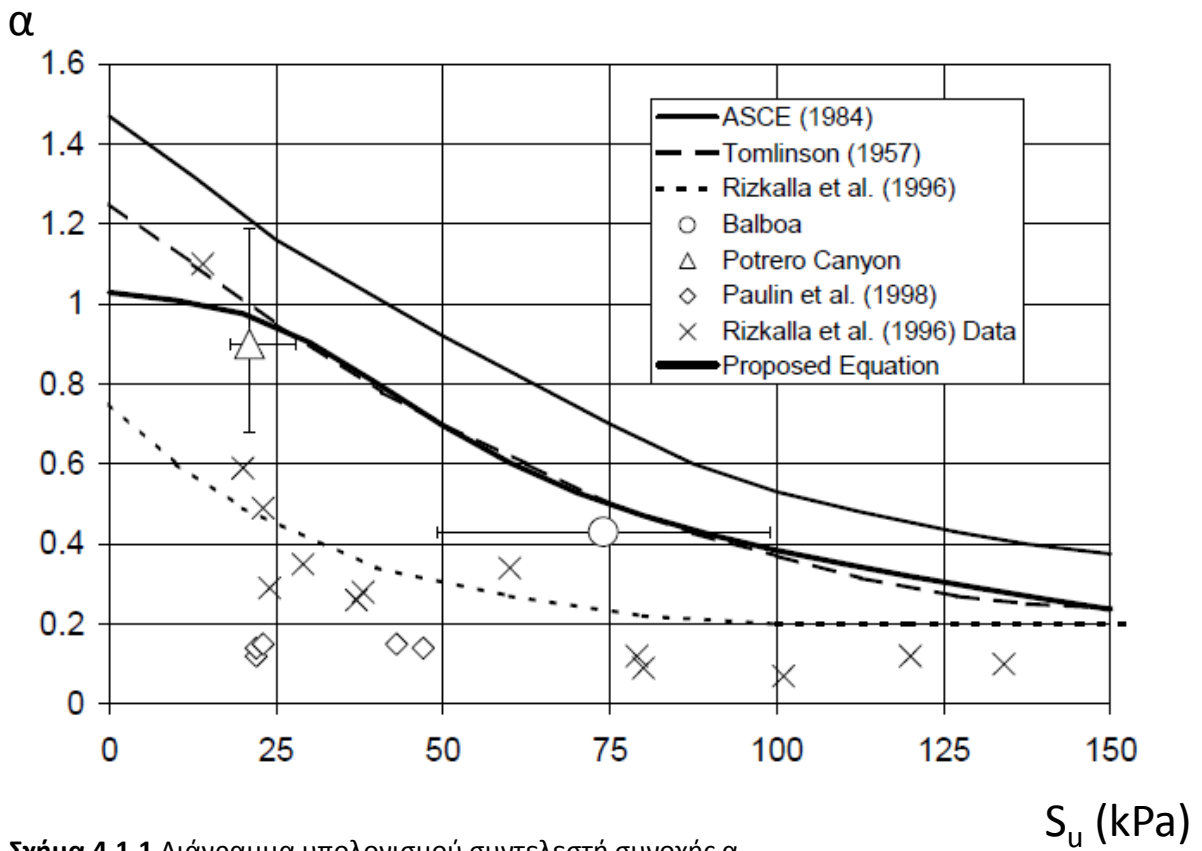
Για τα ελατήρια προς τα κάτω δεν είναι εύκολο να βρεθεί μια αναλυτική λύση όπως στα υπόλοιπα ελατήρια. Όπως αναφέρθηκε και πιο πριν δημιουργείται αστοχία κατά Prandtl. Συνεπώς, γνωρίζοντας την μηχανική του προβλήματος κι εφόσον ως προς την αντοχή δεν υπάρχει μεγάλη απόκλιση με τον Αμερικάνικο Κανονισμό, για την αδιαστατοποιημένη καμπύλη η δύναμη F θα διαιρεθεί με την προτεινόμενη τιμή της ALA. Αυτό το νέο που προτείνεται, σε σύγκριση με τα ελατήρια της ALA, είναι δηλαδή ένα μεγαλύτερο u , **Σχήμα 4.3.17, 4.3.18**.

Τέλος, ας επισημανθεί και για τις άμμους ότι για συγκεκριμένη γωνία τριβής σε συγκεκριμένο βάθος H και για ίδια διάμετρο, μεταβάλλοντας το μέτρο ελαστικότητας, δηλαδή μην

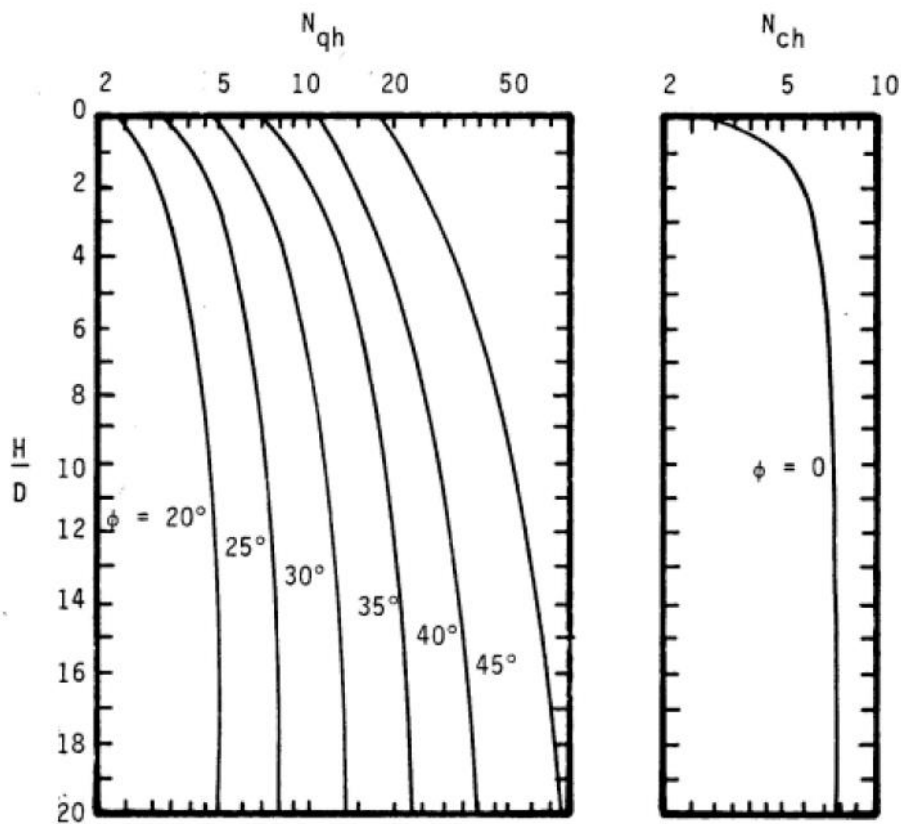
διατηρώντας σταθερό τον λόγο $E / (\gamma H \tan\phi)$, τότε όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.3.19** υπάρχει αναλογική μεταβολή της δυσκαμψίας του ελατηρίου. Τέλος, για διαφορετική διάμετρο προκύπτουν πάλι οι ίδιες καμπύλες μετά από αδιαστατοποίηση, για κάθε H/D και για συγκεκριμένο λόγο $E / (\gamma H \tan\phi)$ **Σχήμα 4.3.20**.

4^ο Κεφάλαιο: Σχήματα

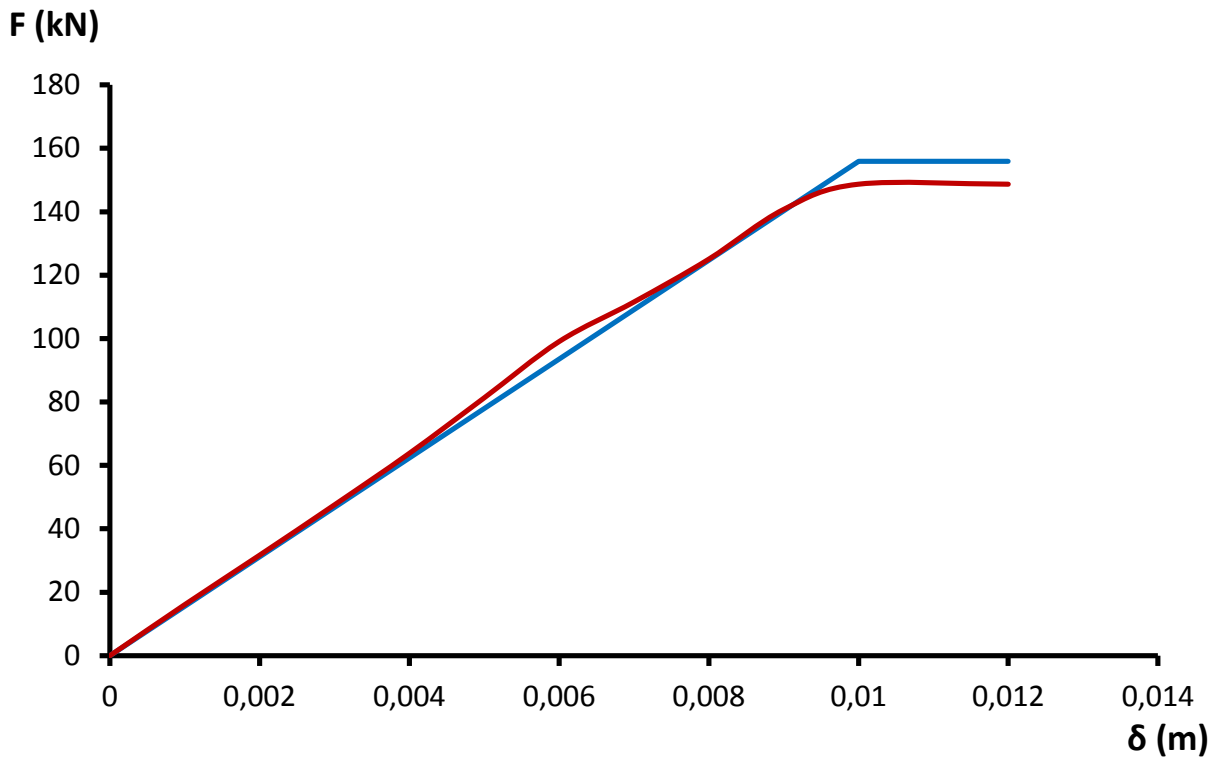
Πρόταση βελτίωσης ελατηριωτού προσομοιώματος



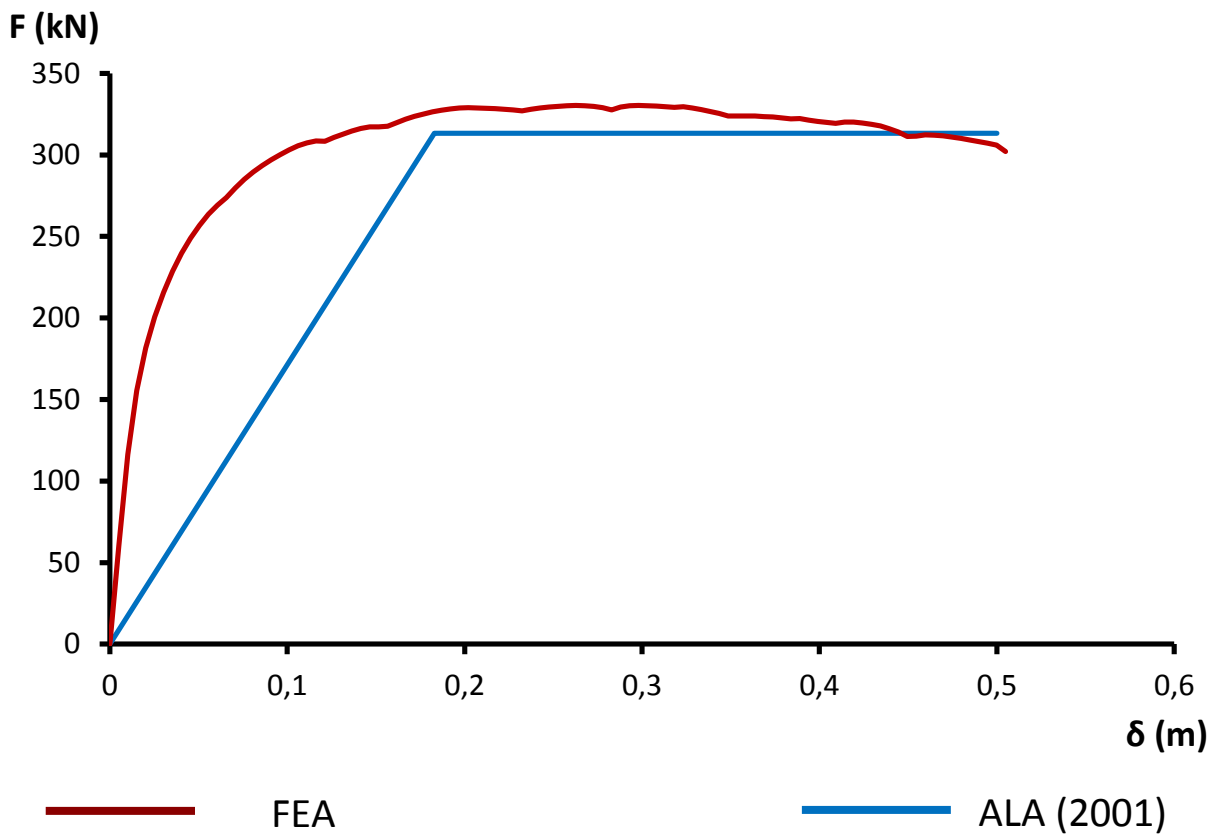
Σχήμα 4.1.1 Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή συνοχής α



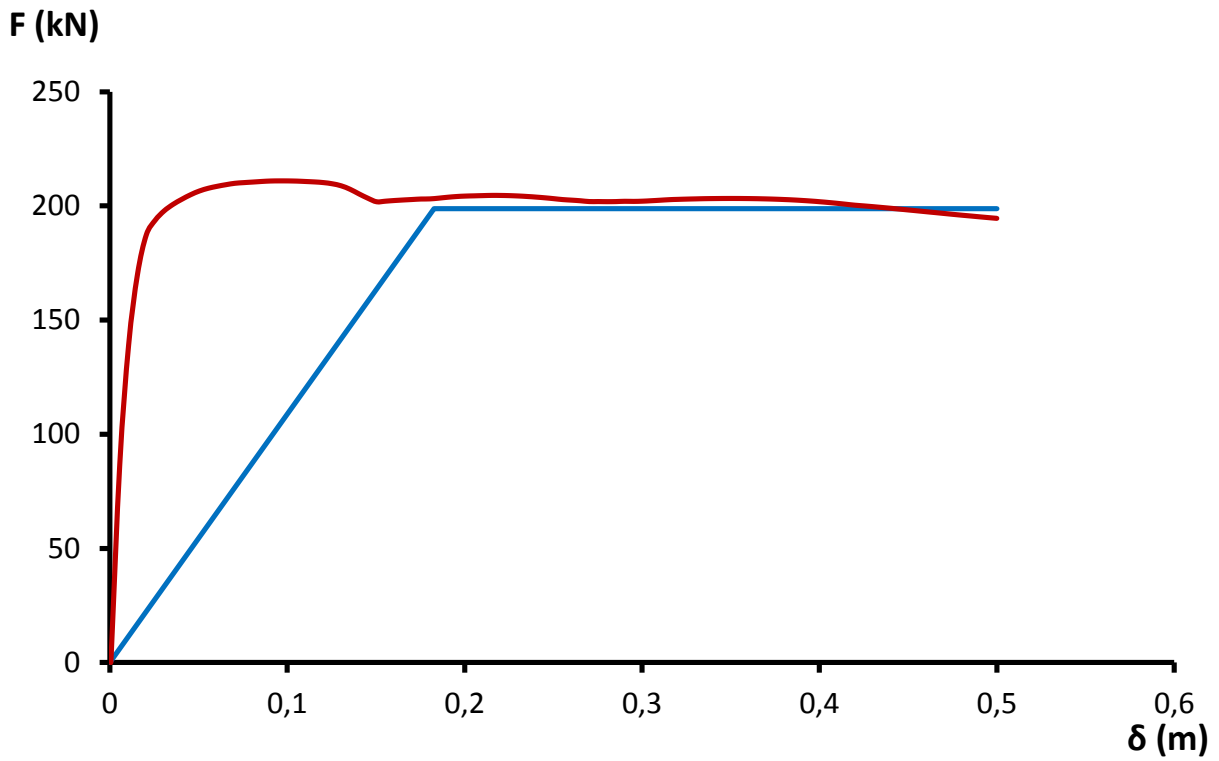
Σχήμα 4.1.2 Διαγράμματα για τον υπολογισμό των συντελεστών N για τα εγκάρσια ελατήρια για άμμο κι άργιλο



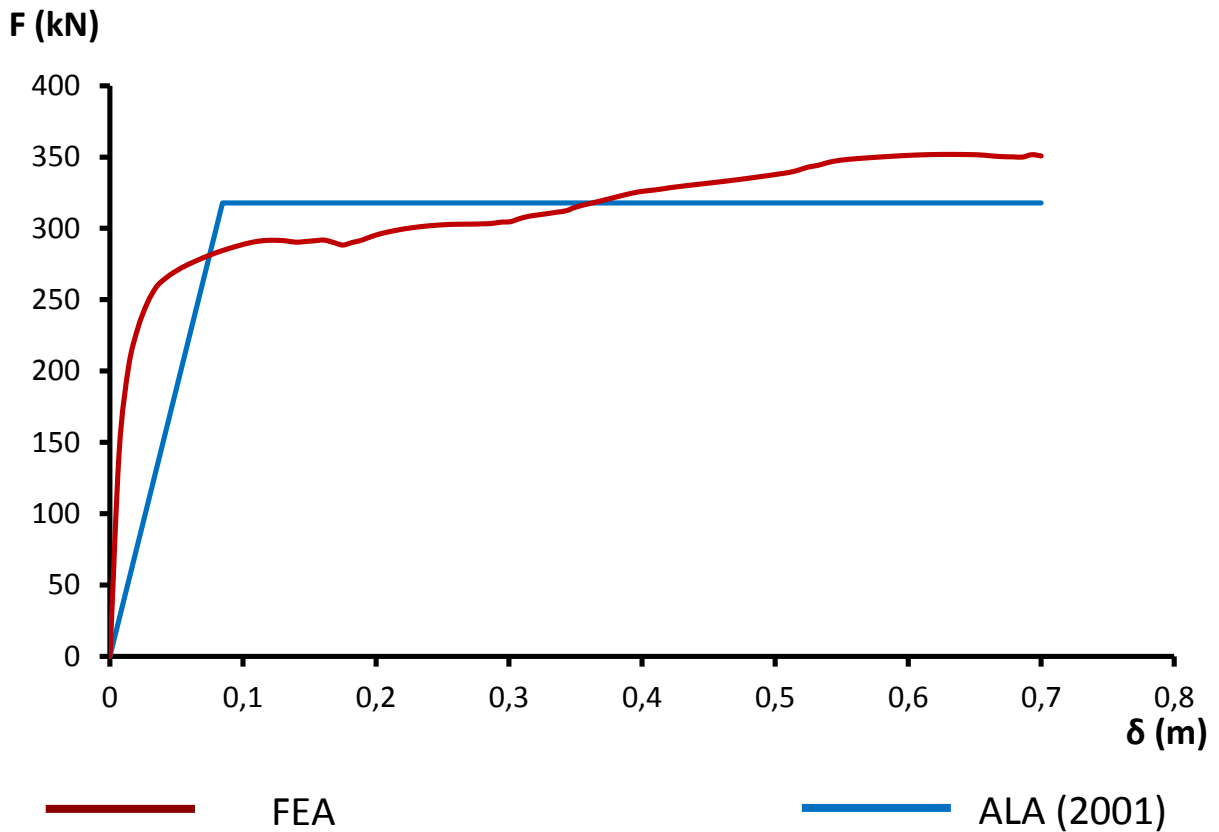
Σχήμα 4.1.3 Διάγραμμα F – δ για άργιλο για τα αξονικά ελατήρια



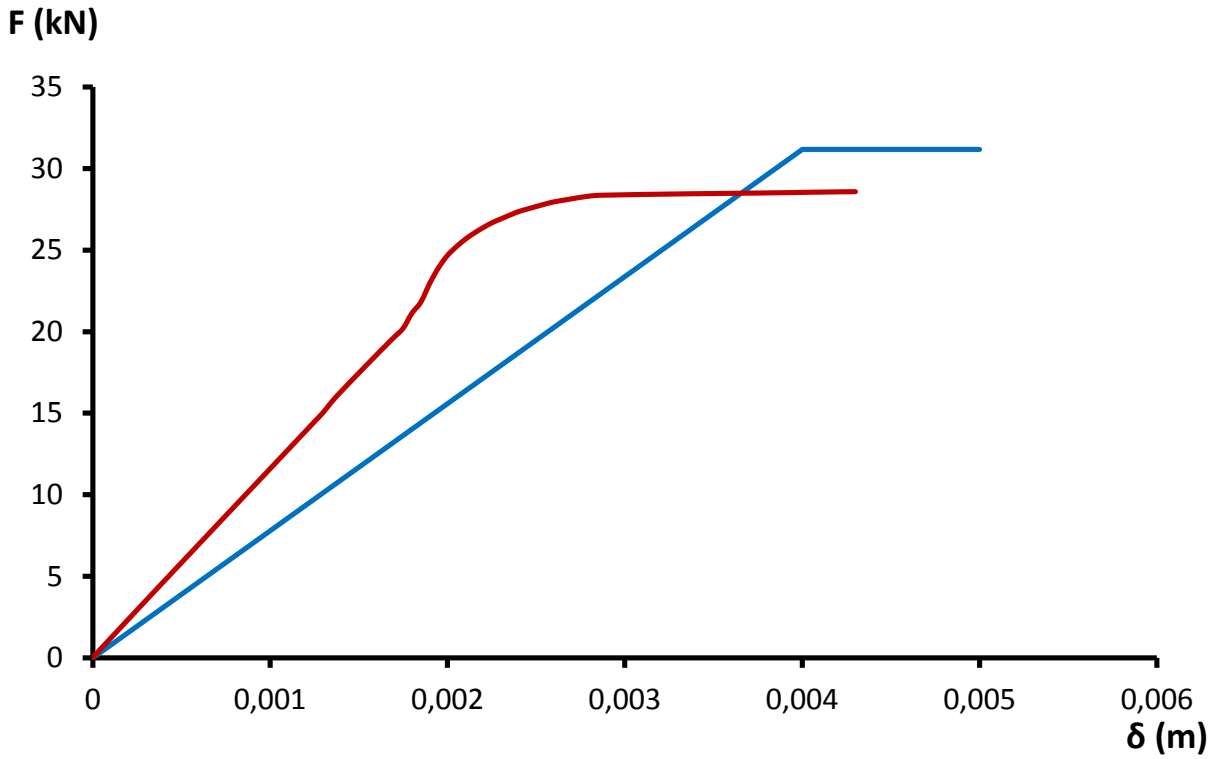
Σχήμα 4.1.4 Διάγραμμα F – δ για άργιλο για τα κατακόρυφα ελατήρια προς τα κάτω



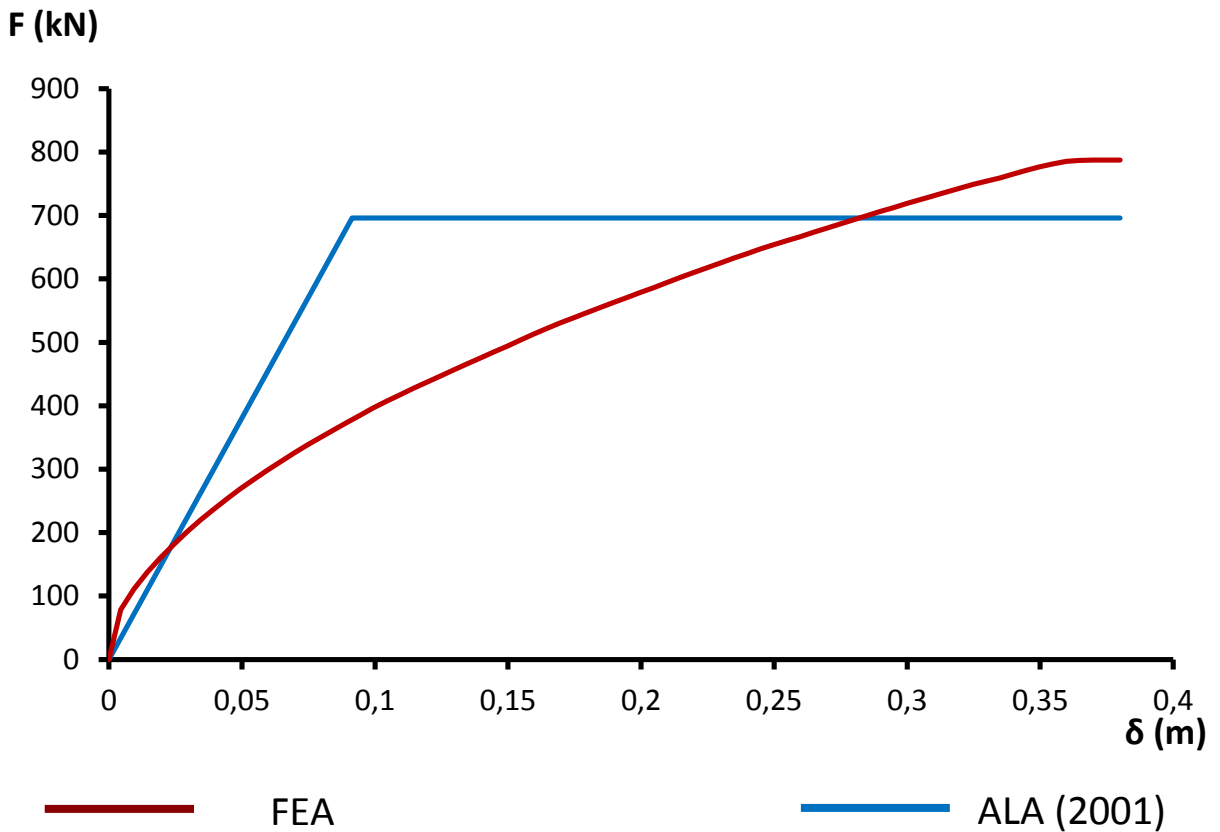
Σχήμα 4.1.5 Διάγραμμα F – δ για άργιλο για τα κατακόρυφα ελατήρια προς τα πάνω



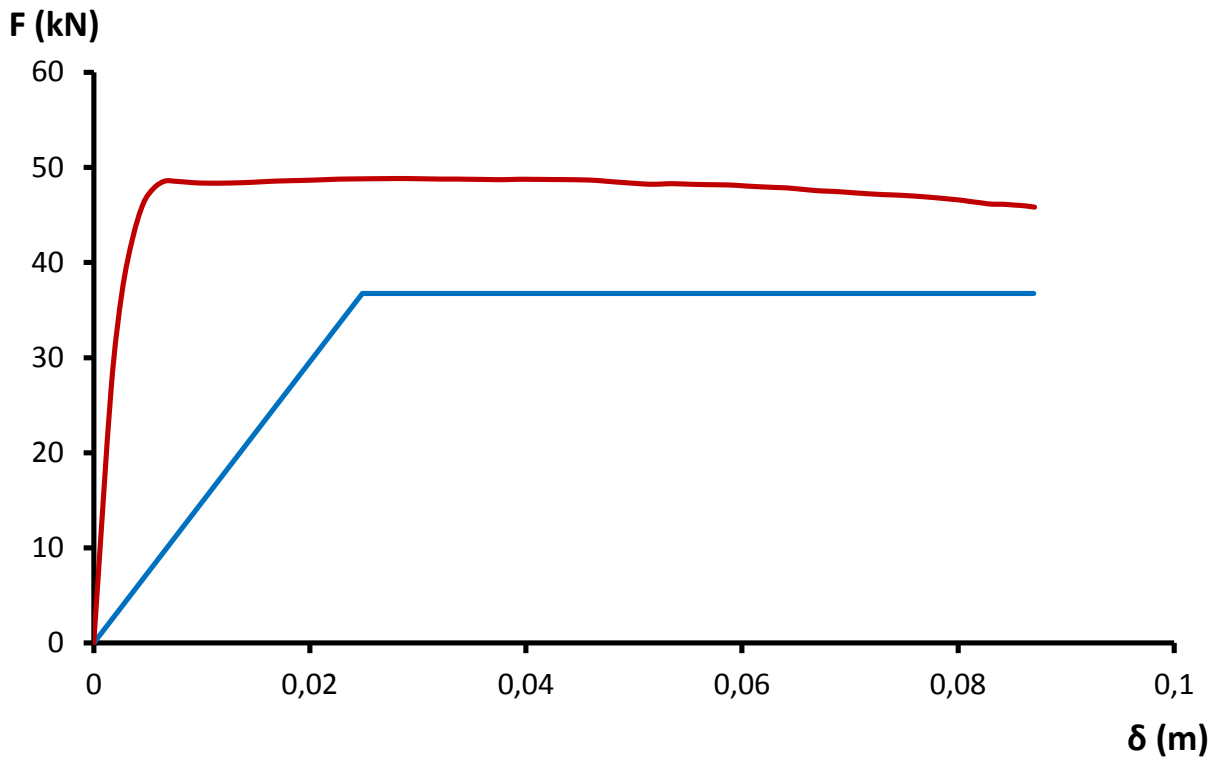
Σχήμα 4.1.6 Διάγραμμα F – δ για άργιλο για τα εγκάρσια ελατήρια



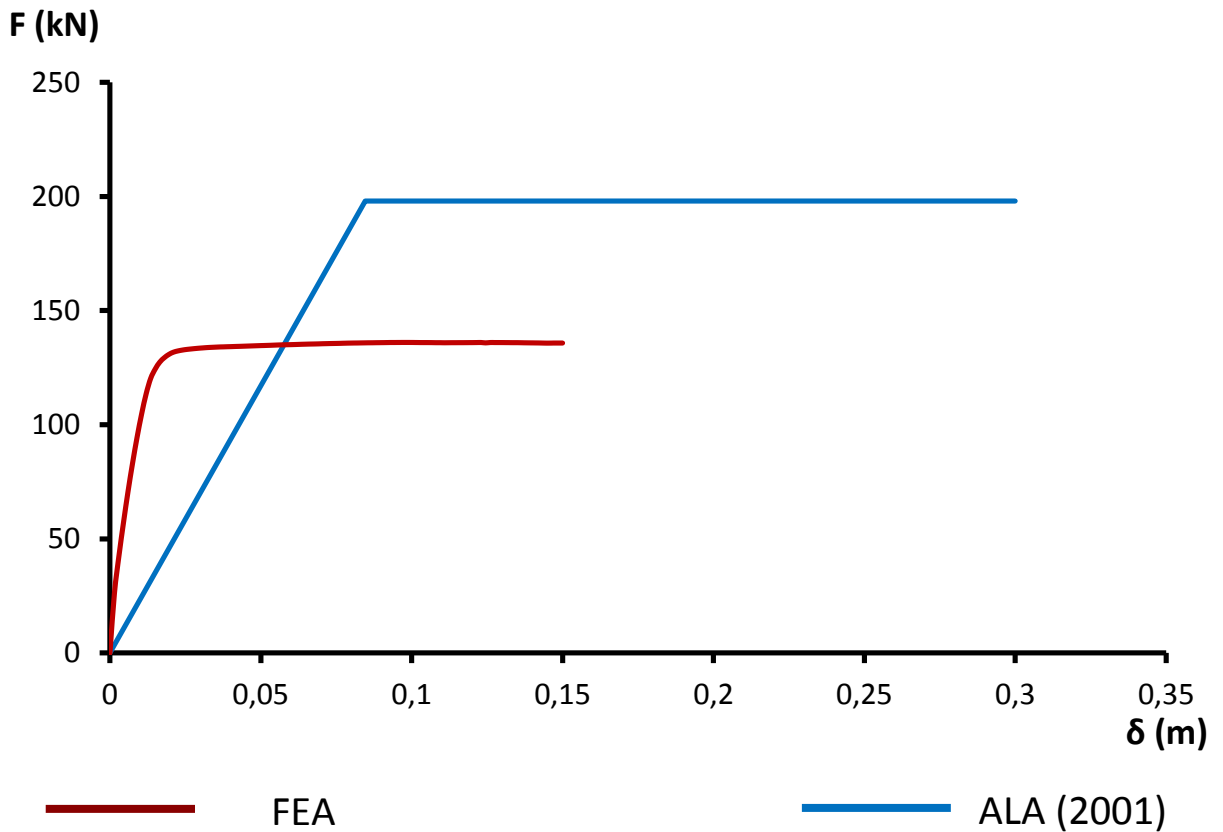
Σχήμα 4.1.7 Διάγραμμα $F - \delta$ για άμμο για τα αξονικά ελατήρια



Σχήμα 4.1.8 Διάγραμμα $F - \delta$ για άμμο για τα κατακόρυφα ελατήρια προς τα κάτω

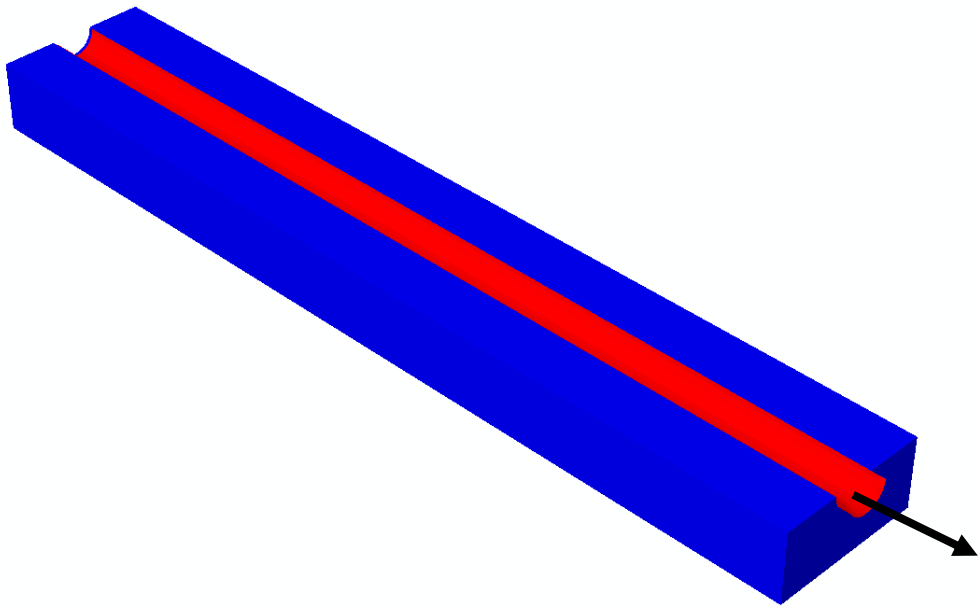


Σχήμα 4.1.9 Διάγραμμα F – δ για άμμο για τα κατακόρυφα ελατήρια προς τα πάνω

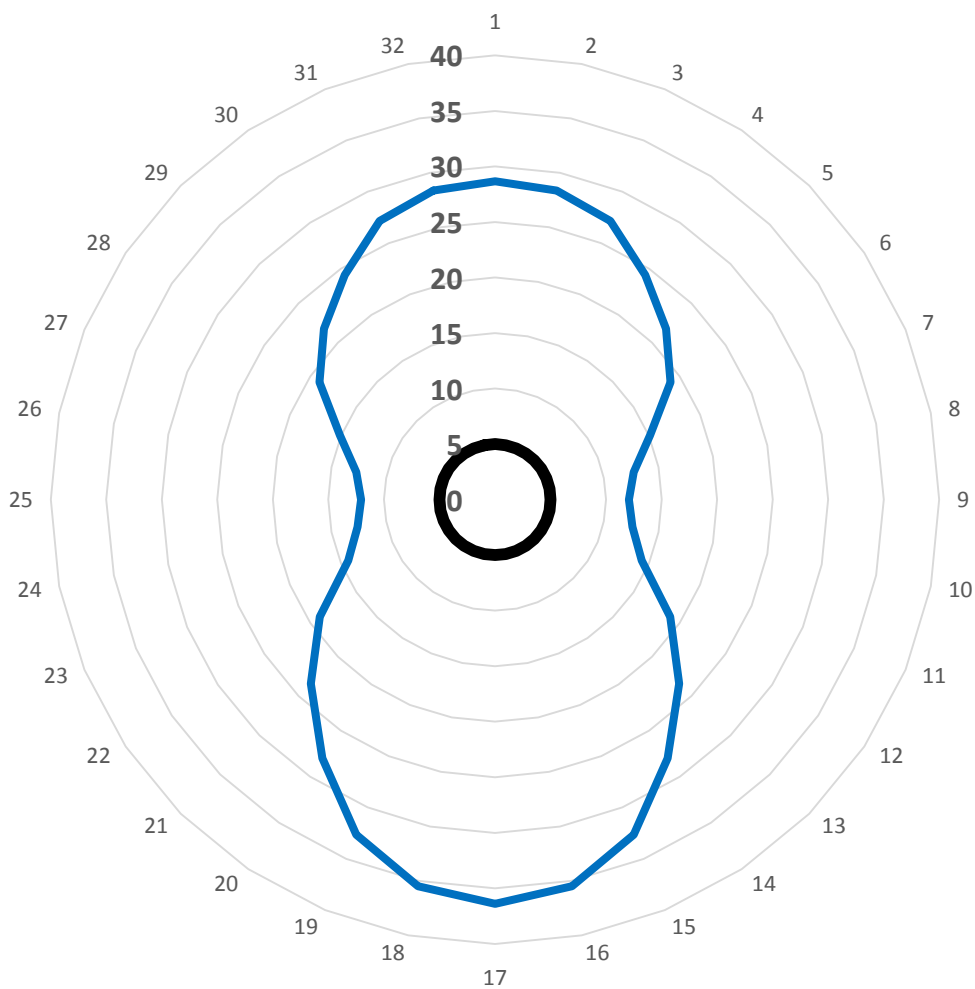


Σχήμα 4.1.10 Διάγραμμα F – δ για άμμο για τα εγκάρσια ελατήρια

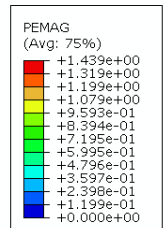
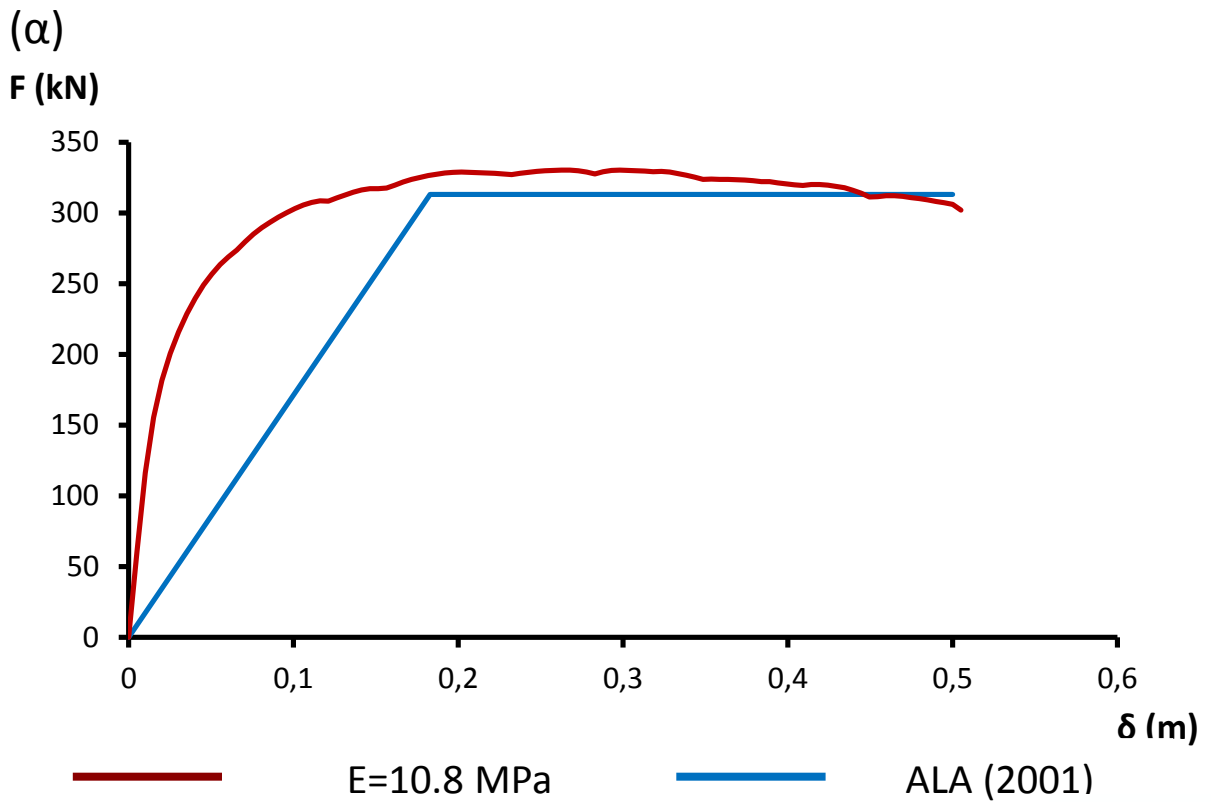
(α)



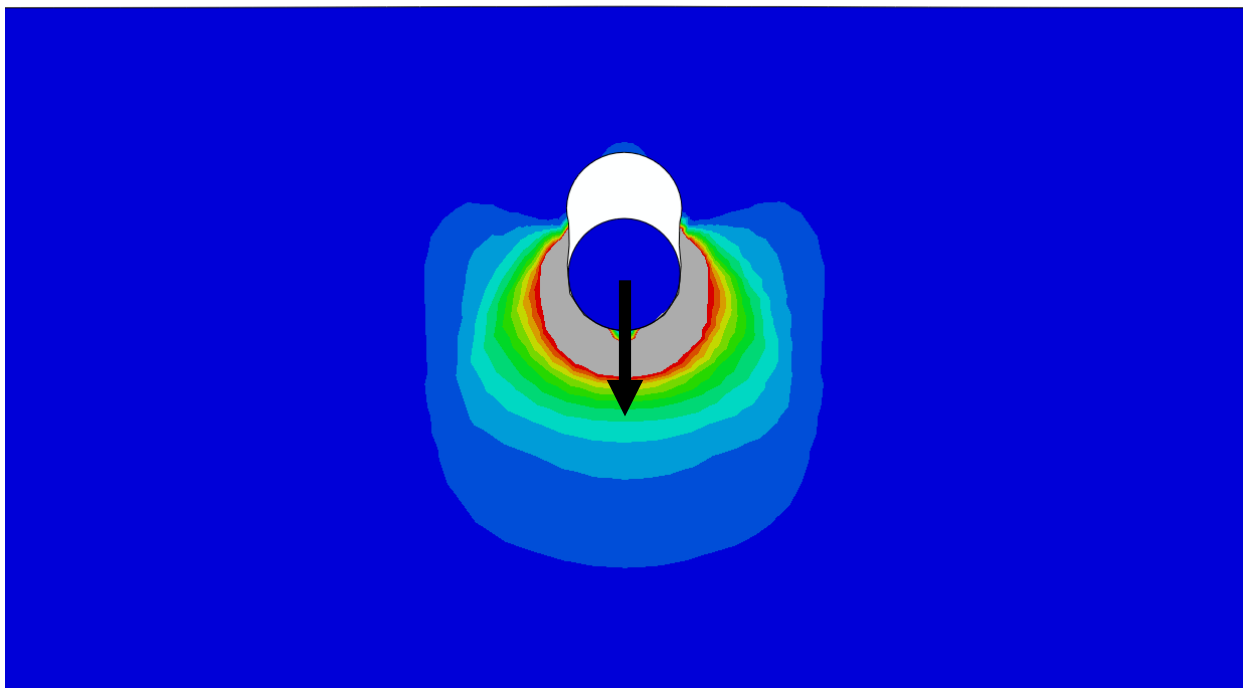
(β)



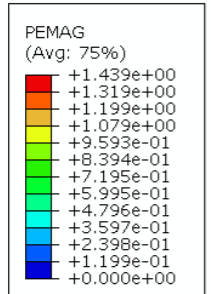
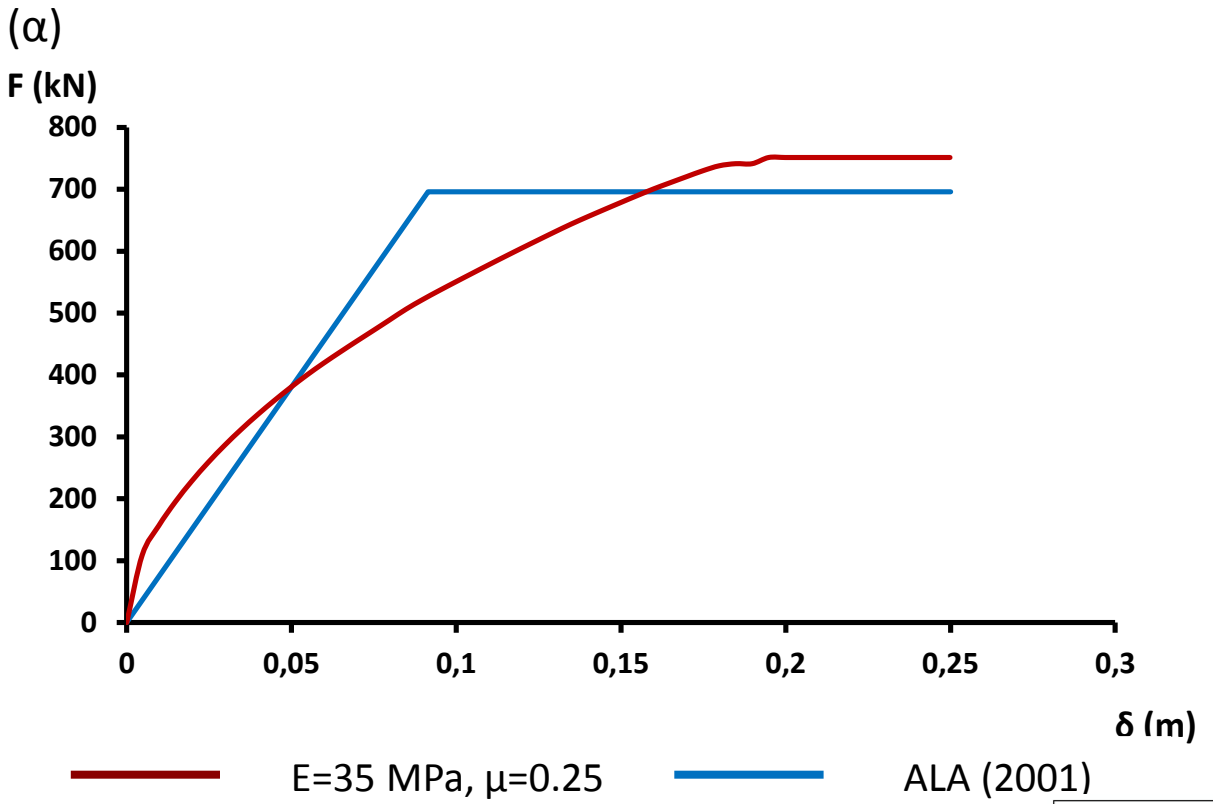
Σχήμα 4.2.1 (α) Εξόλκευση αγωγού (pull out test) για τον υπολογισμό των αξονικών ελατηρίων, **(β)** Κατανομή κάθετων κυρίων τάσεων γύρω από τον αγωγό στα pull out tests για τις άμμους



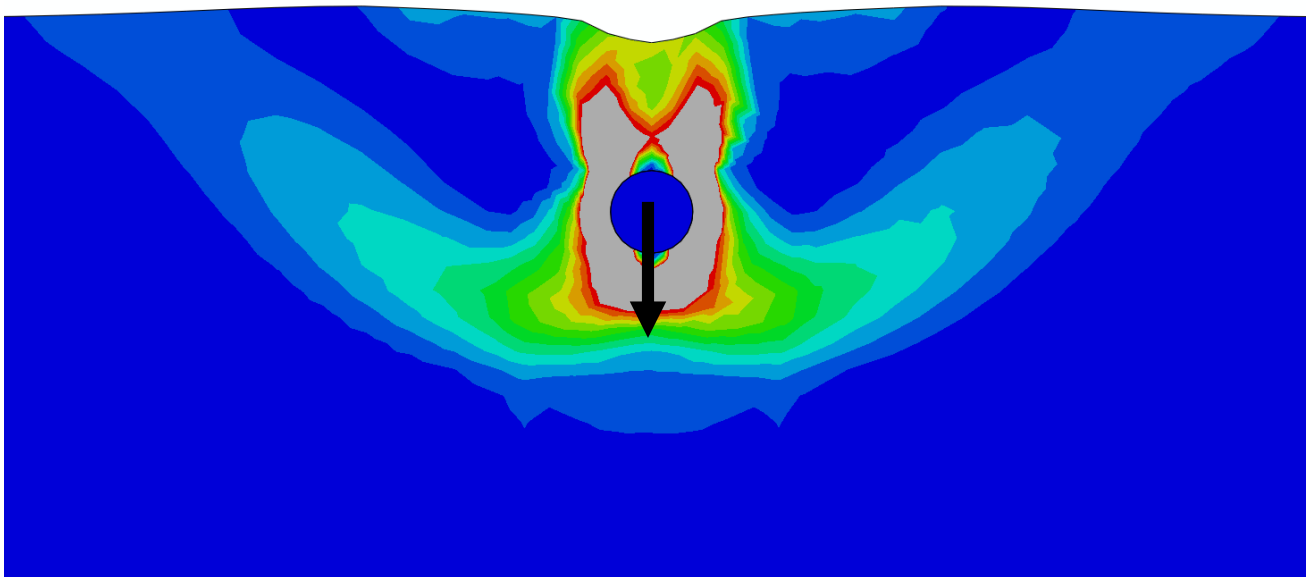
(β)



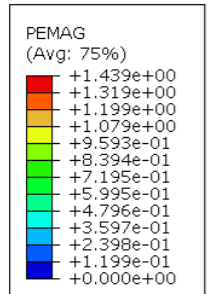
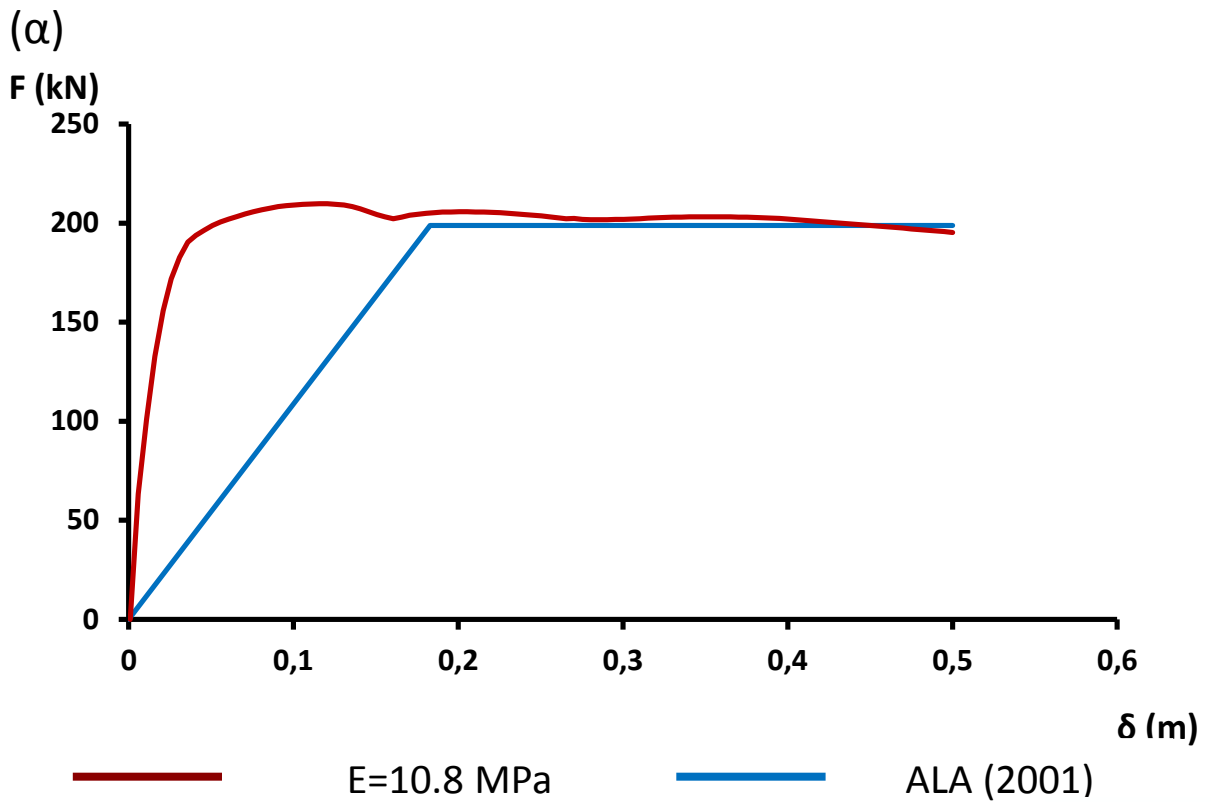
Σχήμα 4.2.2 (α) Διάγραμμα F – δ για την ερμηνεία των παραδοχών της ASCE για τα κατακόρυφα ελατήρια προς τα κάτω για την άργιλο, (β) Ο μηχανισμός αστοχίας



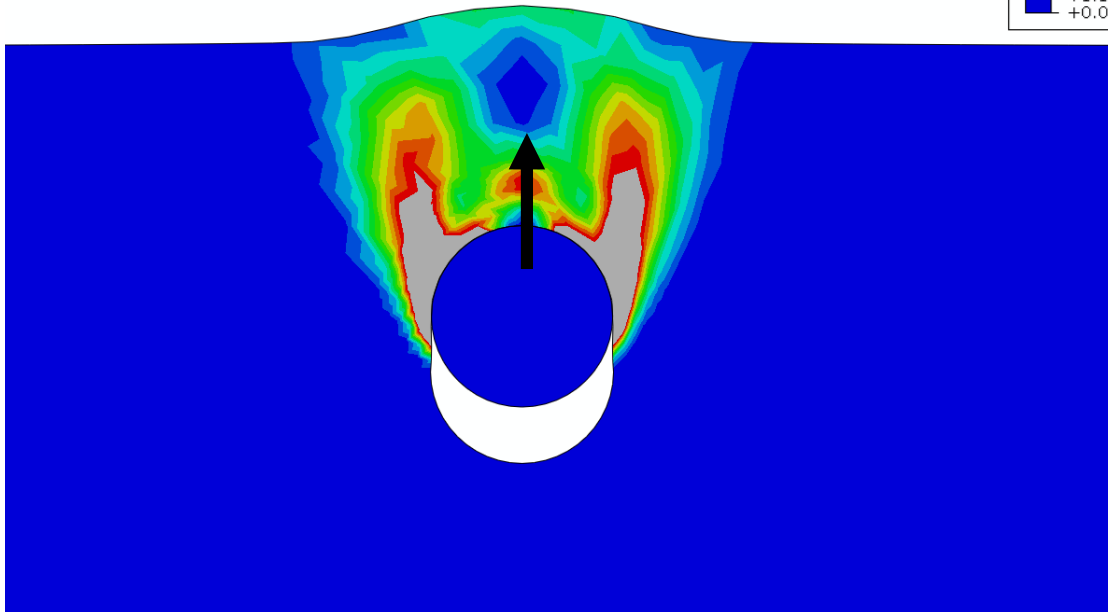
(β)



Σχήμα 4.2.3 (α) Διάγραμμα F – δ για την ερμηνεία των παραδοχών της ASCE για τα κατακόρυφα ελατήρια προς τα κάτω για την άμμο, (β) Ο μηχανισμός αστοχίας Prandtl



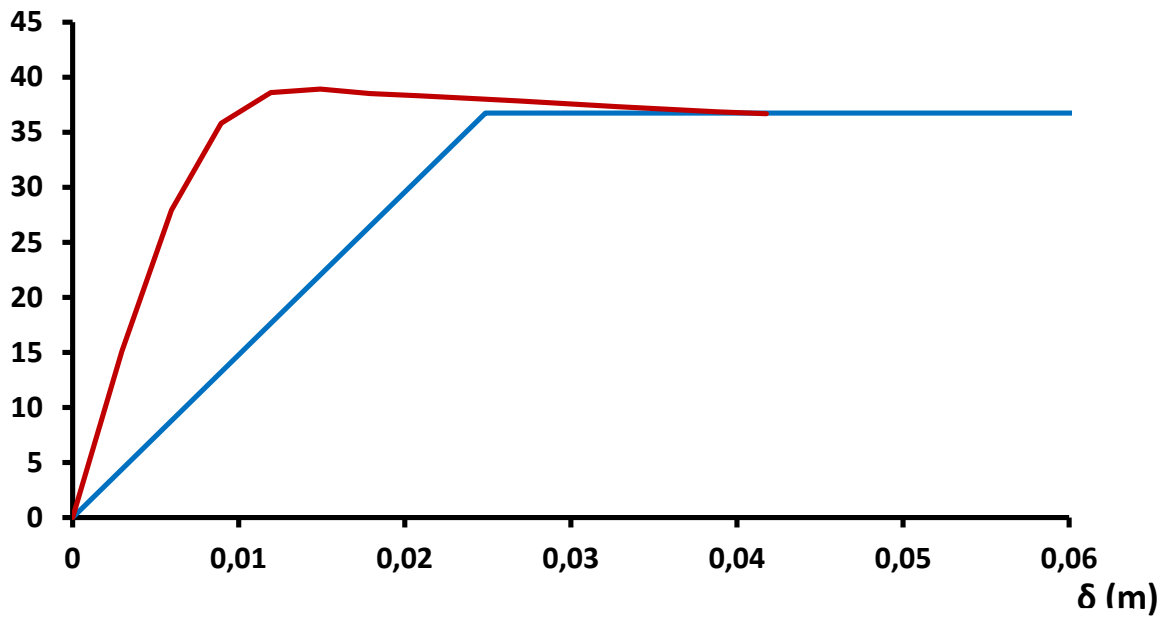
(β)



Σχήμα 4.2.4 (α) Διάγραμμα F – δ για την ερμηνεία των παραδοχών της ASCE για τα κατακόρυφα ελατήρια προς τα πάνω για την άργιλο, (β) Ο μηχανισμός αστοχίας

(α)

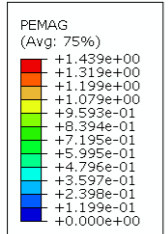
F (kN)



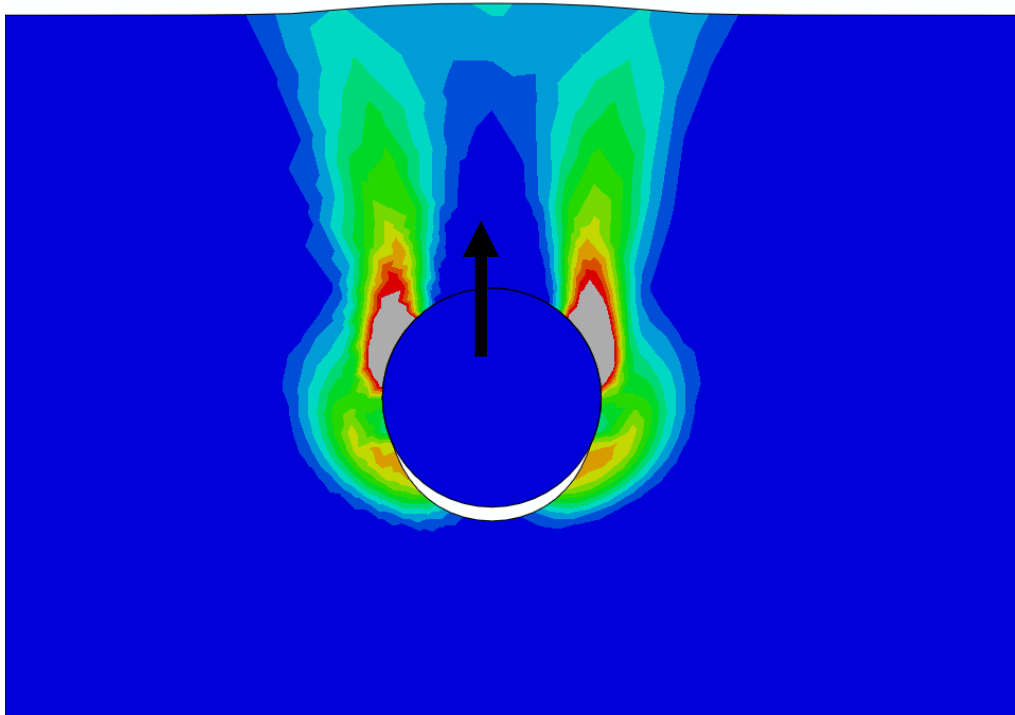
E=10 MPa, $\mu=0.0$



ALA (2001)



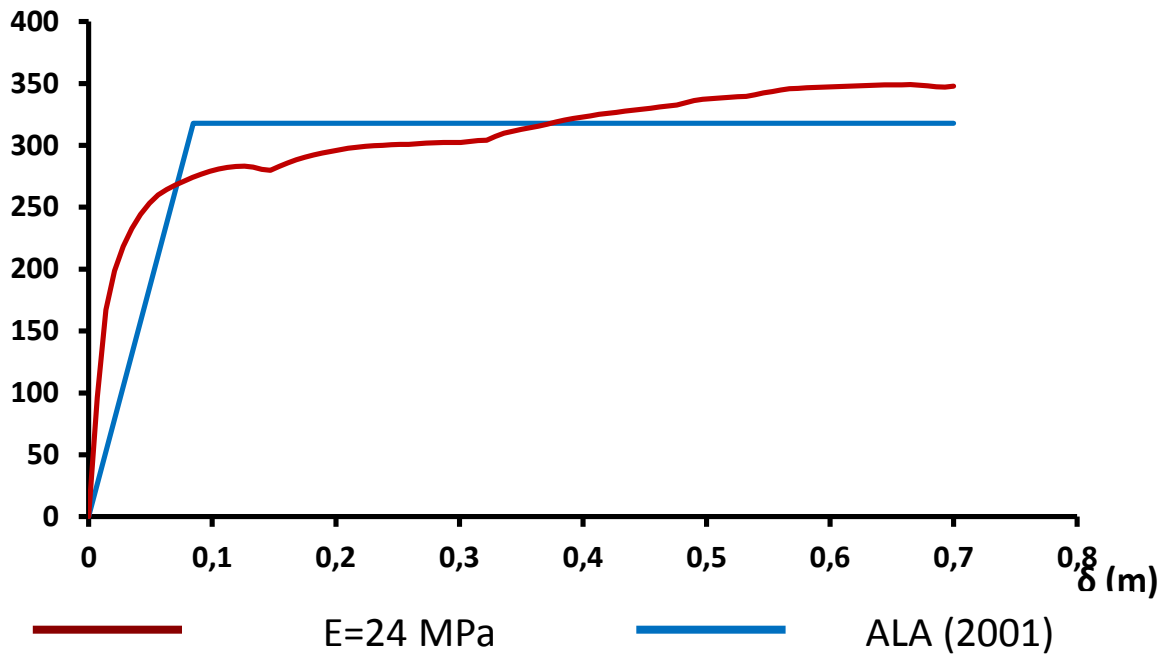
(β)



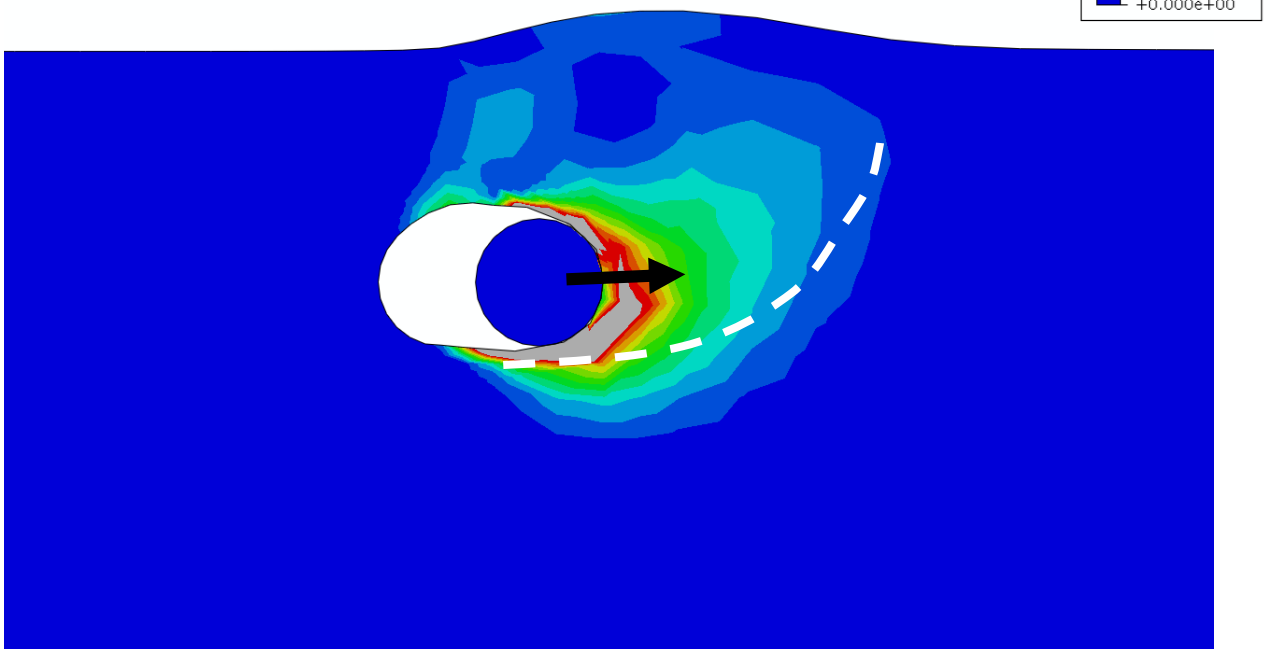
Σχήμα 4.2.5 (α) Διάγραμμα F – δ για την ερμηνεία των παραδοχών της ASCE για τα κατακόρυφα ελατήρια προς τα πάνω για την άμμο, (β) Ο μηχανισμός αστοχίας

(α)

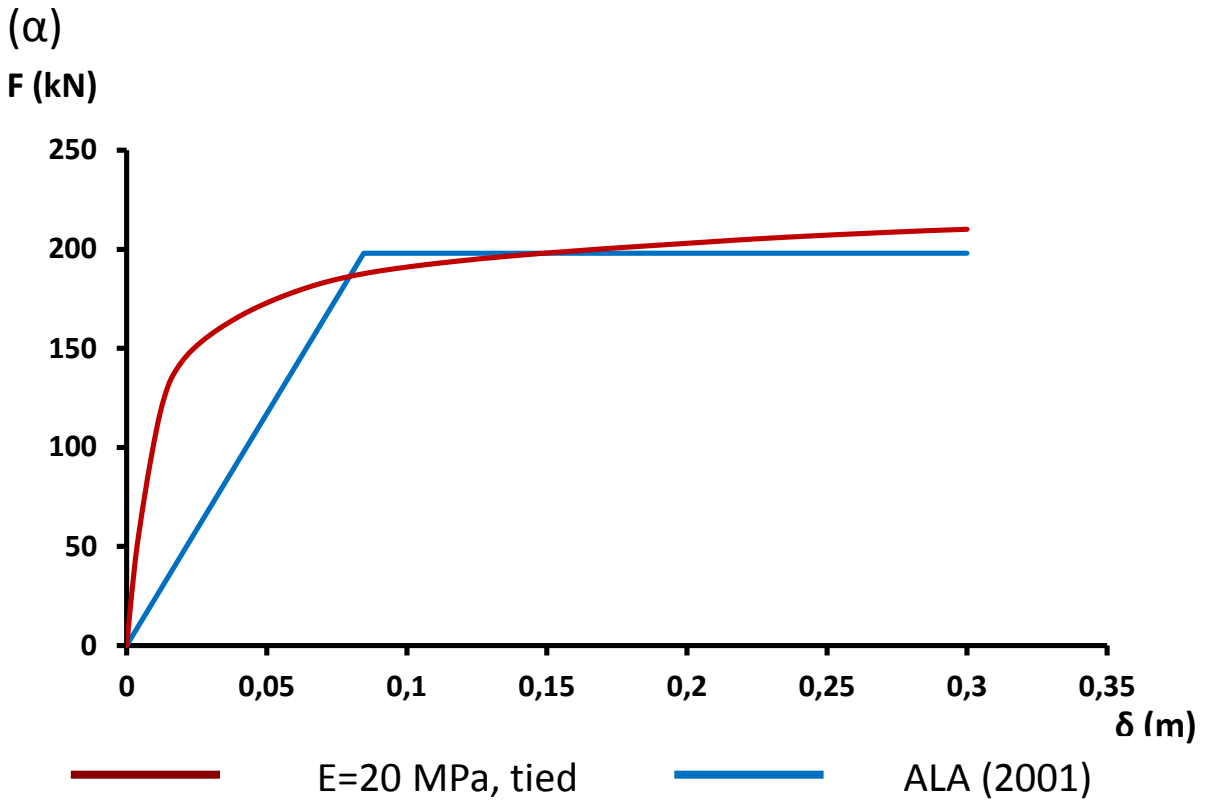
F (kN)



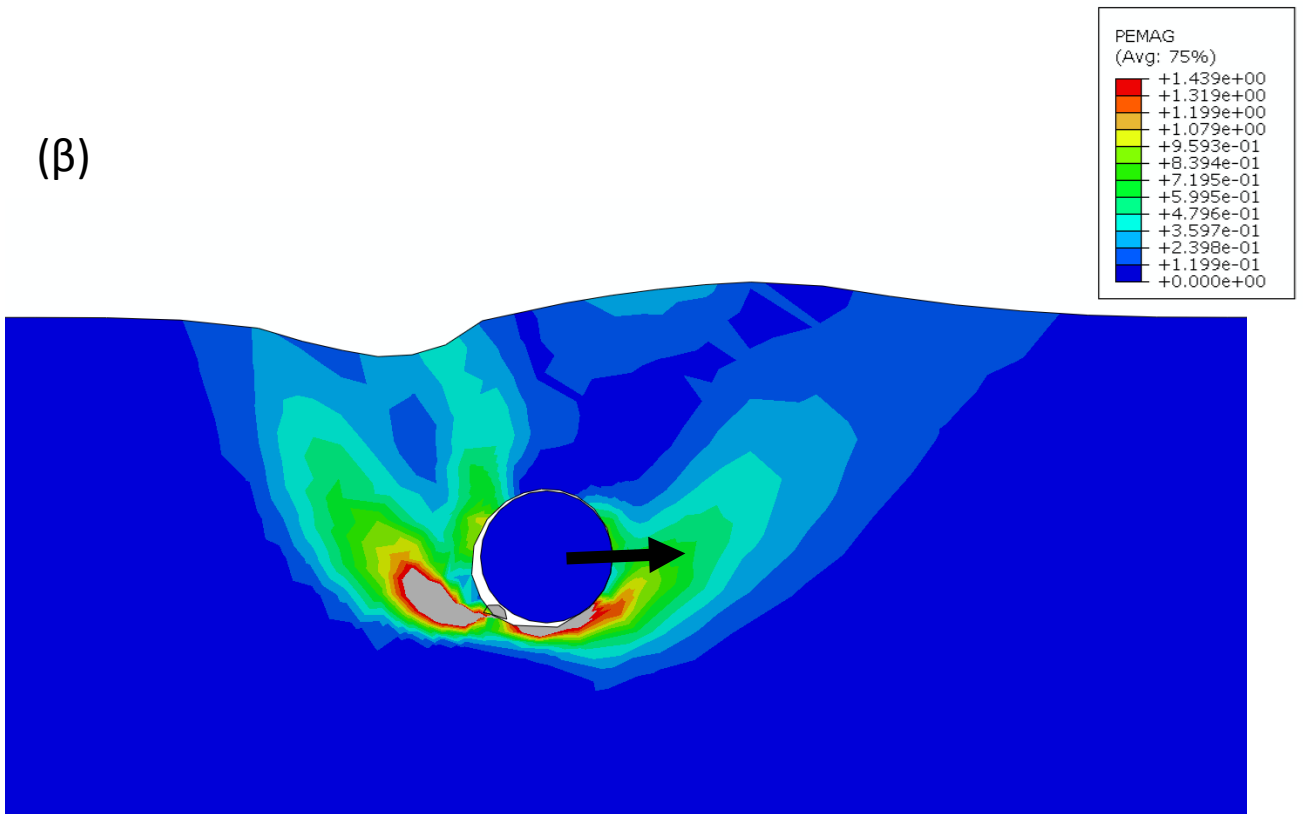
(β)



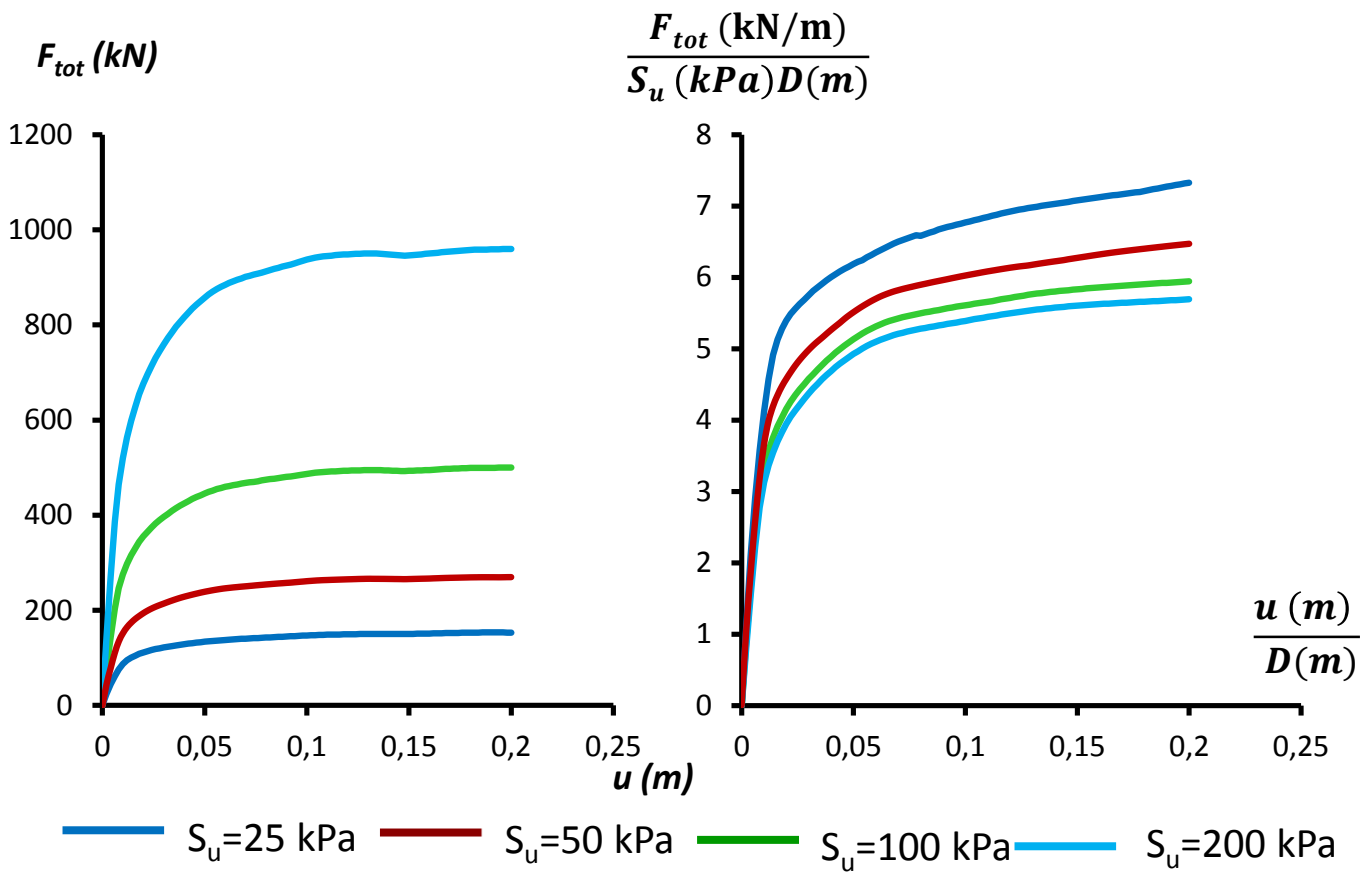
Σχήμα 4.2.6 (α) Διάγραμμα F – δ για την ερμηνεία των παραδοχών της ASCE για τα εγκάρσια ελατήρια για την άργιλο, (β) Ο μηχανισμός αστοχίας (one – sided scoop)



(β)

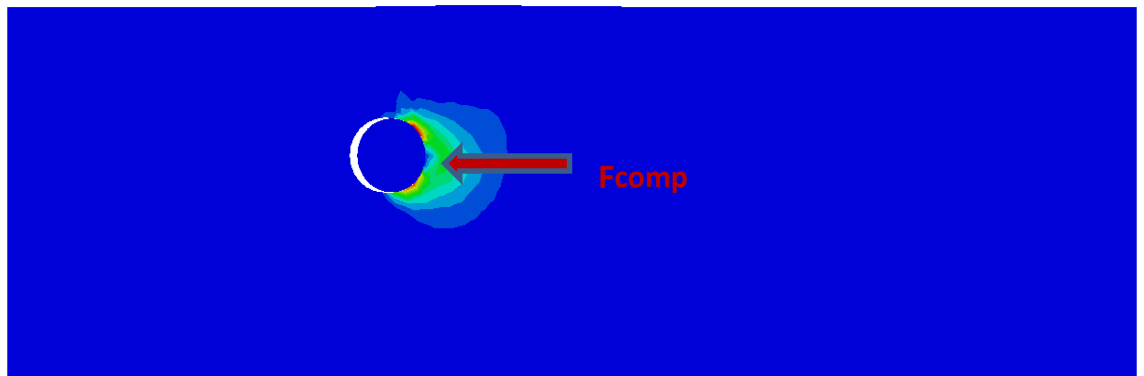


Σχήμα 4.2.7 (α) Διάγραμμα $F - \delta$ για την ερμηνεία των παραδοχών της ASCE για τα εγκάρσια ελατήρια για την άμμο, (β) Ο μηχανισμός αστοχίας (scoop)

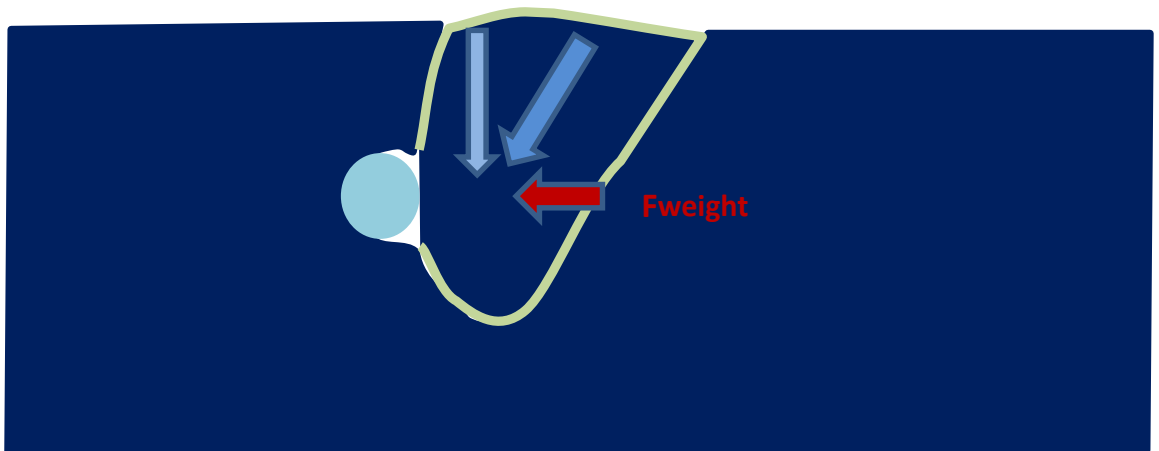


Σχήμα 4.3.1 Διαγράμματα F – δ για εγκάρσια ελατήρια για αργίλους $S_u=25,50,100,200$ kPa για $H/D=2, D=1$ m

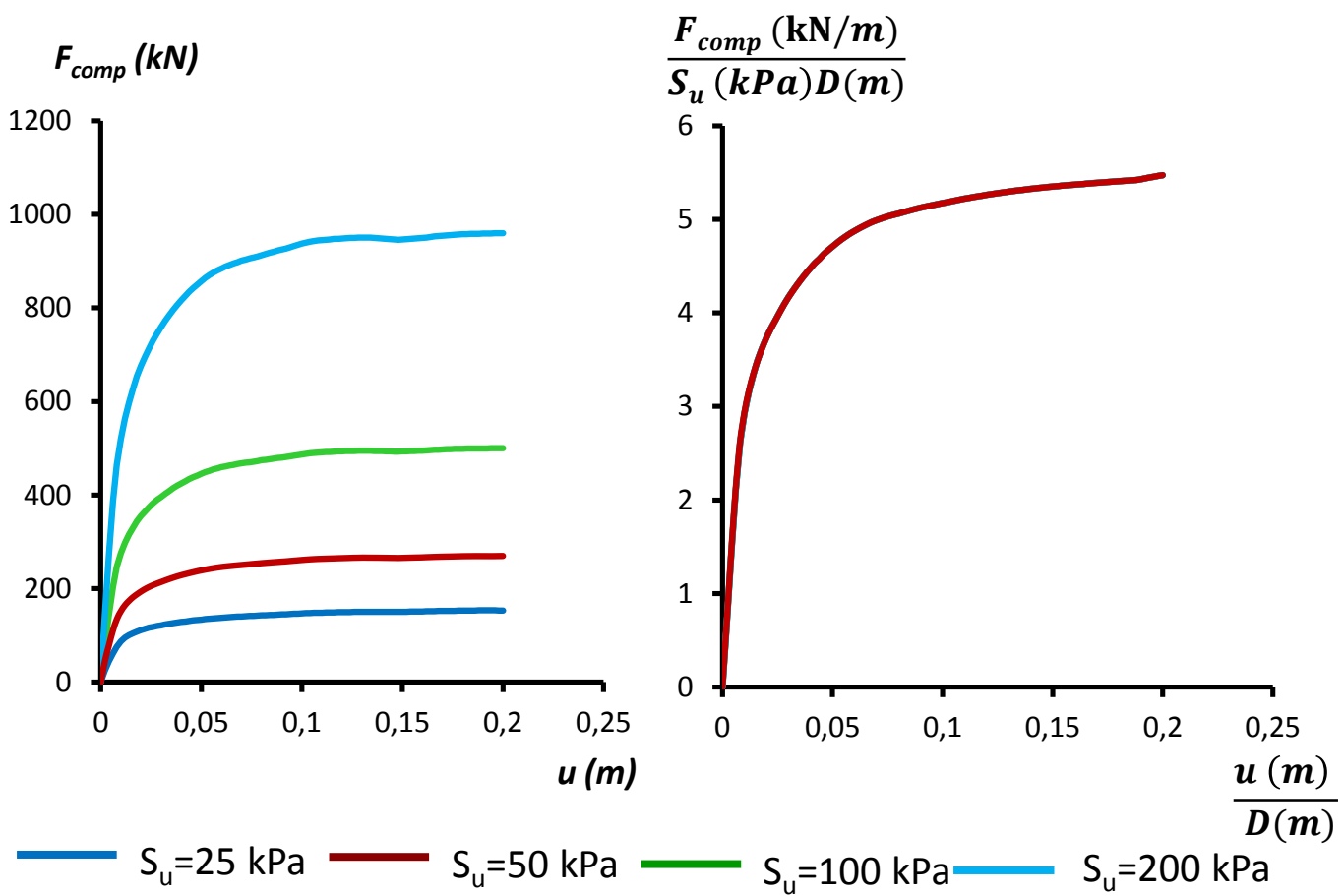
(α)



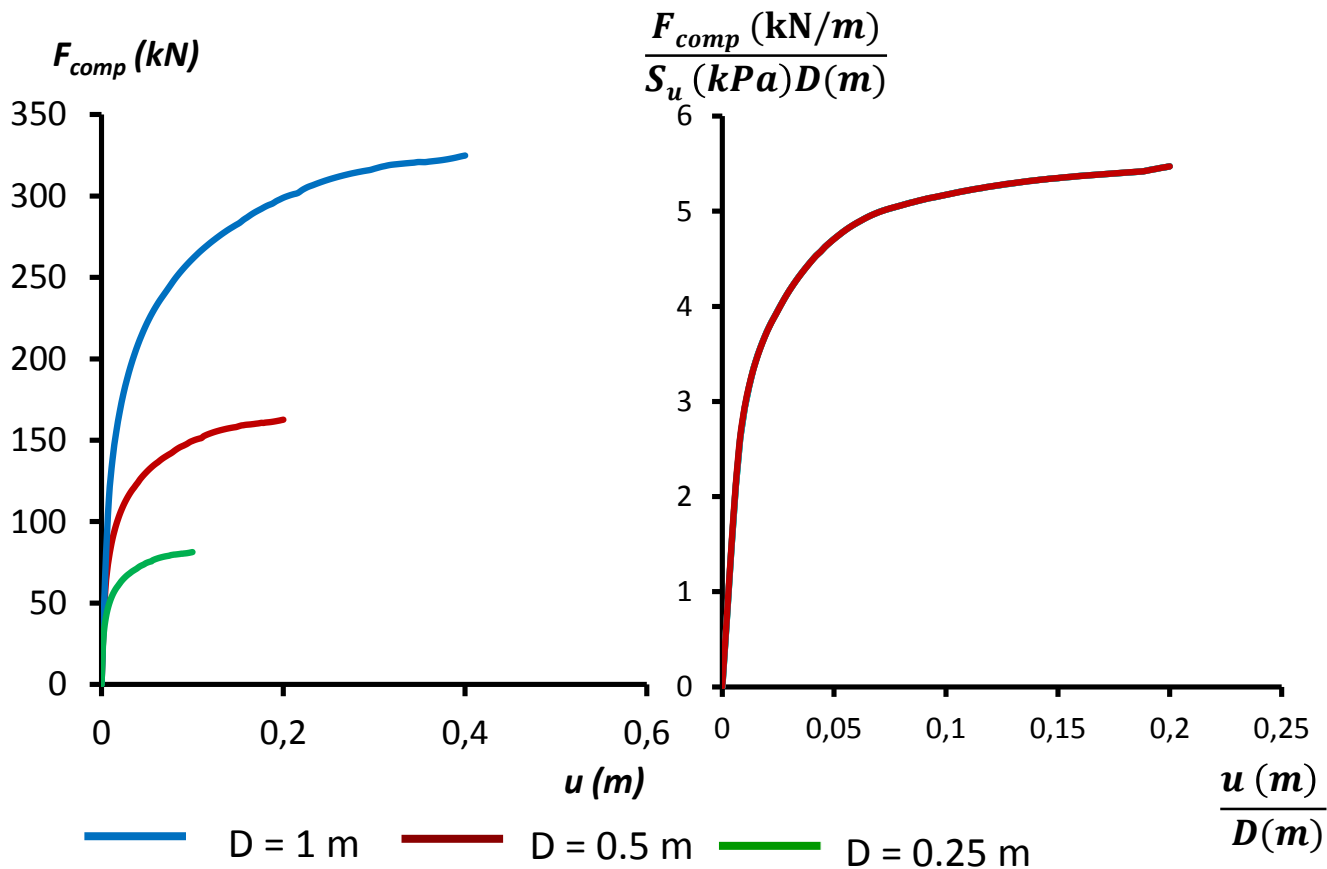
(β)



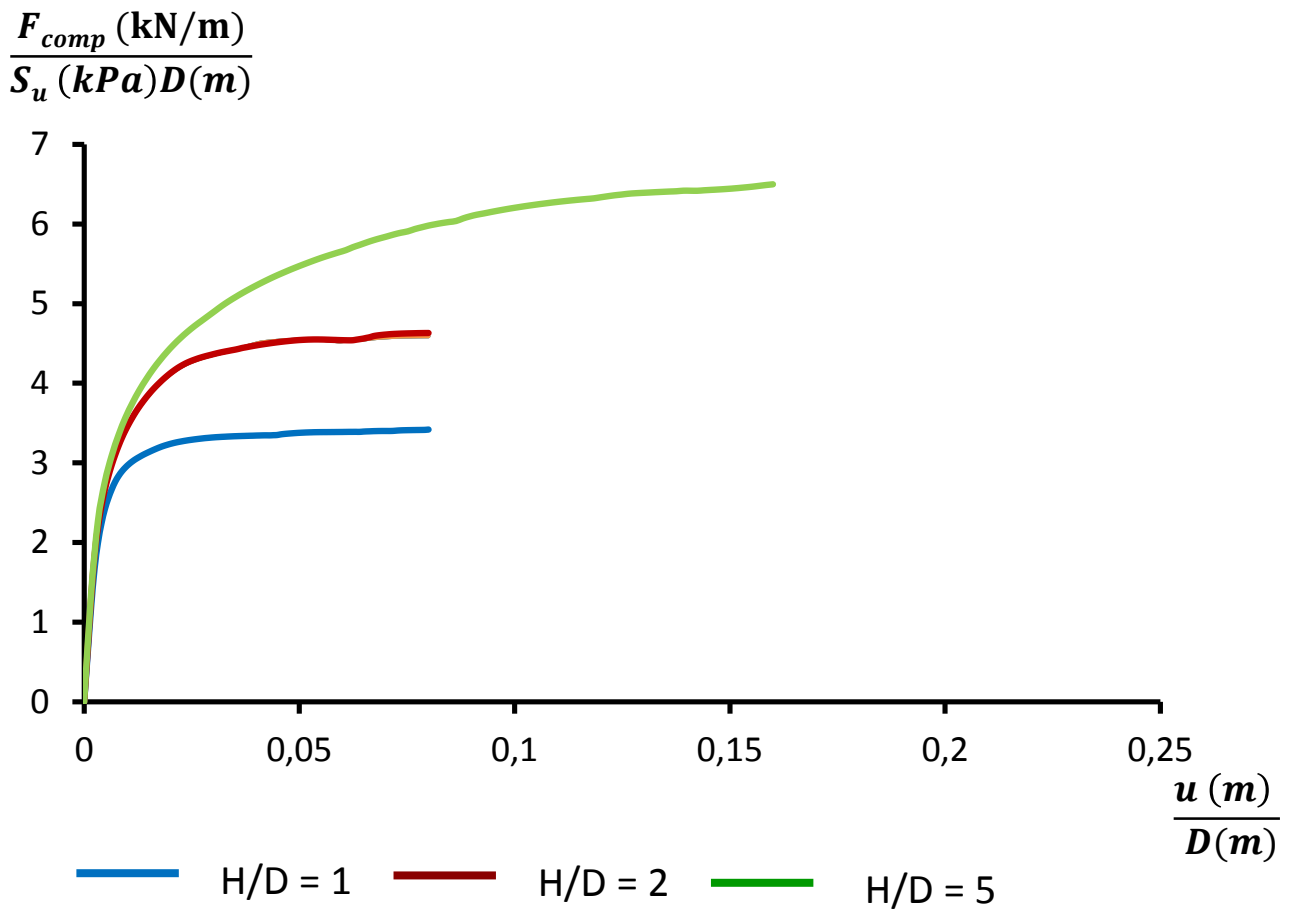
Σχήμα 4.3.2 Δυνάμεις αντίστασης εδάφους για εγκάρσια μετακίνηση αγωγού (α) λόγω συμπίεσης και (β) λόγω βάρους μετακινούμενης σφήνας



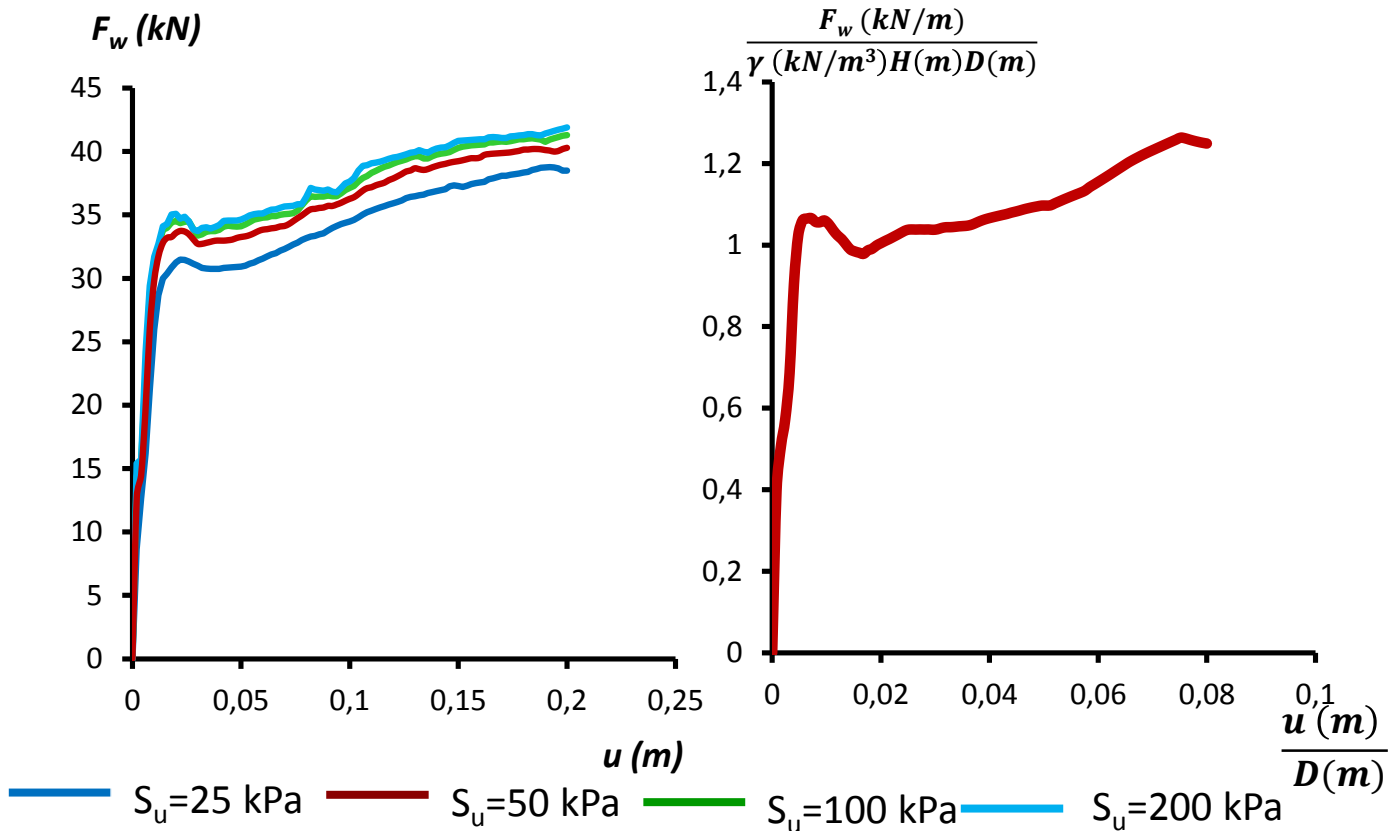
Σχήμα 4.3.3 Διαγράμματα F – δ με δυνάμεις συμπίεσης για εγκάρσια ελατήρια για αργίλους $S_u=25,50,100,200 \text{ kPa}$ για $H/D=2$, $D=1 \text{ m}$



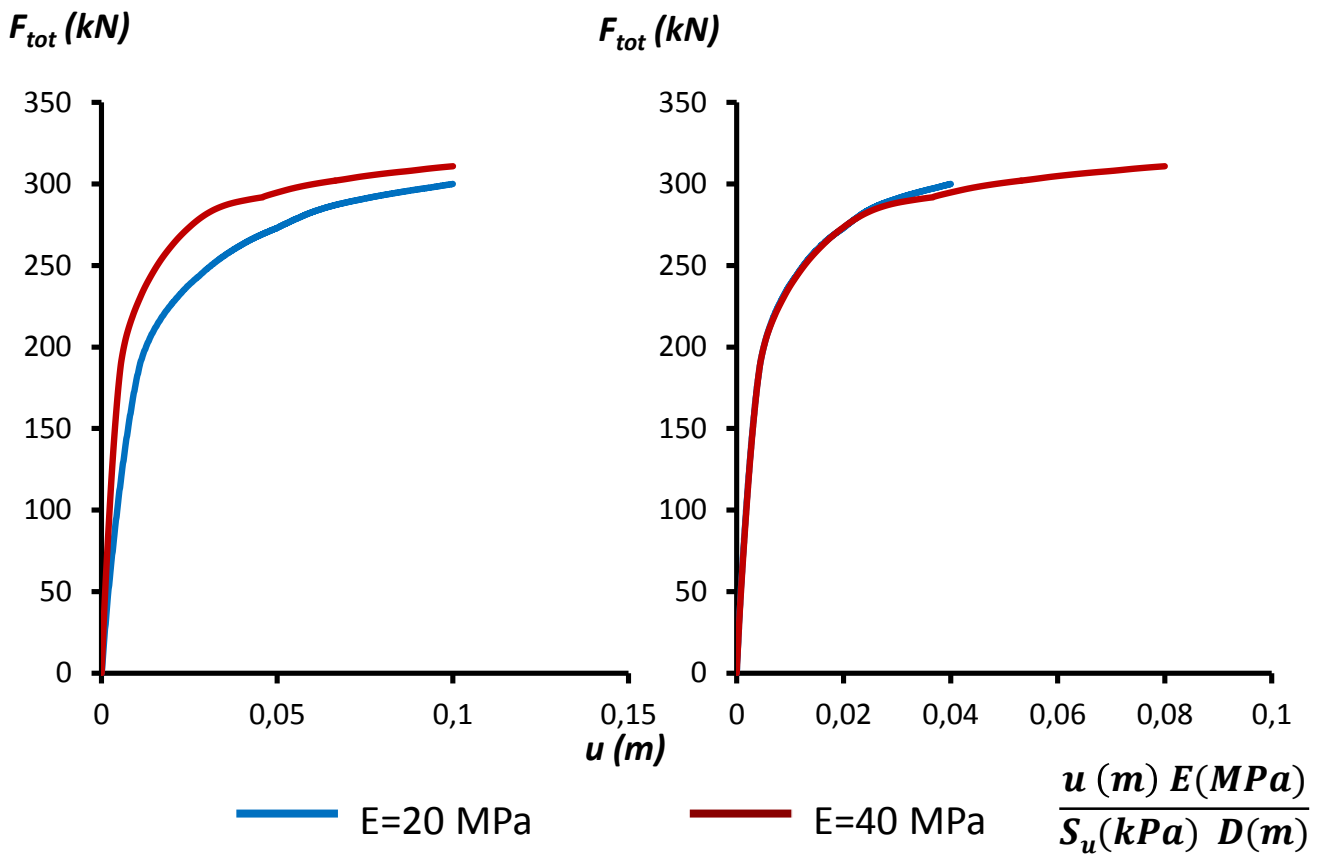
Σχήμα 4.3.4 Διαγράμματα F – δ με δυνάμεις συμπίεσης για εγκάρσια ελατήρια για άργιλο $S_u = 50 \text{ kPa}$ για $H/D=2$ και $D = 1, 0.5, 0.25 \text{ m}$



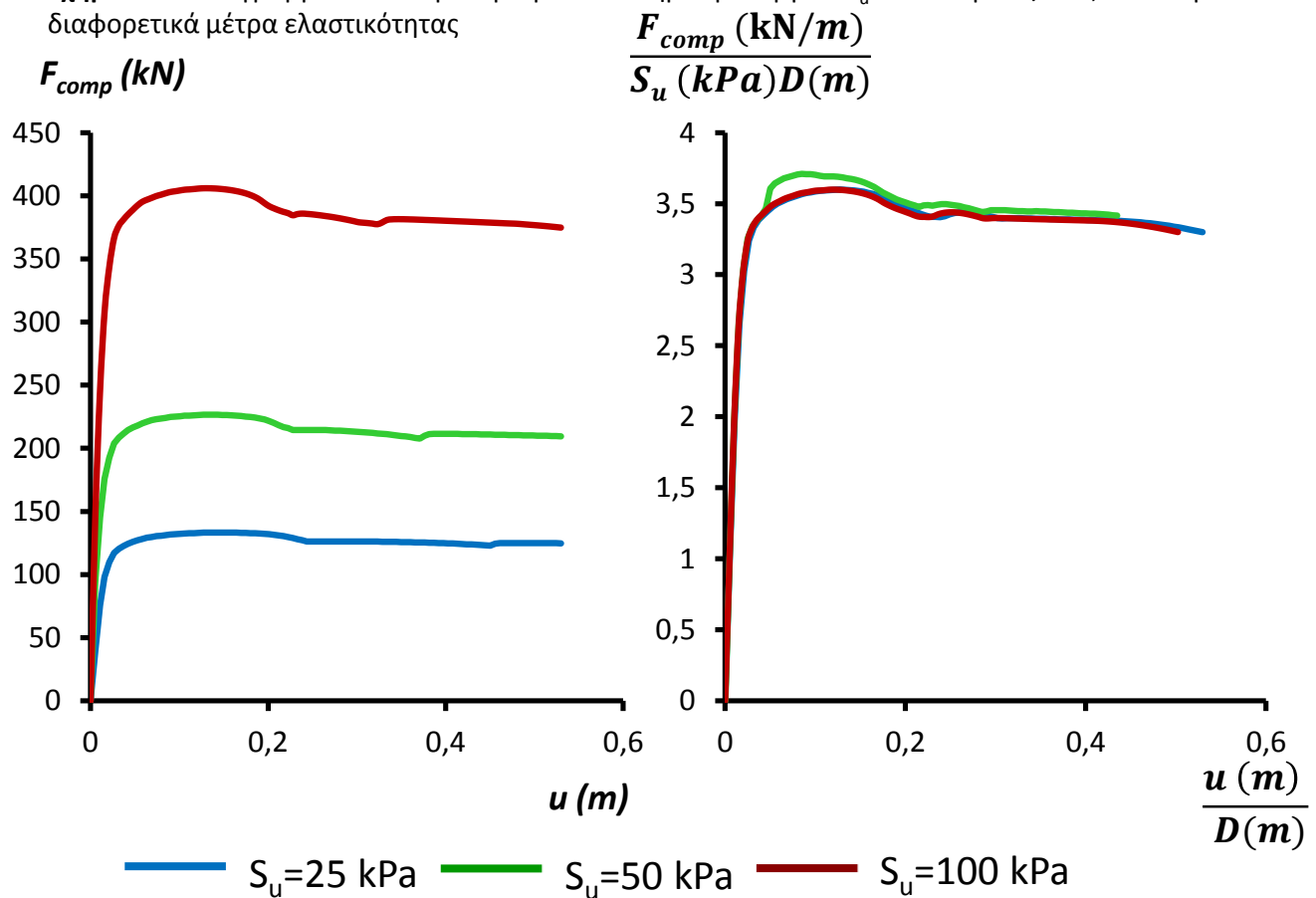
Σχήμα 4.3.5 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα F – δ για εγκάρσια ελατήρια για H/D = 1, 2, 5



Σχήμα 4.3.6 Διαγράμματα F – δ με δυνάμεις βαρύτητας για εγκάρσια ελατήρια για αργίλους $S_u=25,50,100,200 \text{ kPa}$ για H/D=2, D=1 m

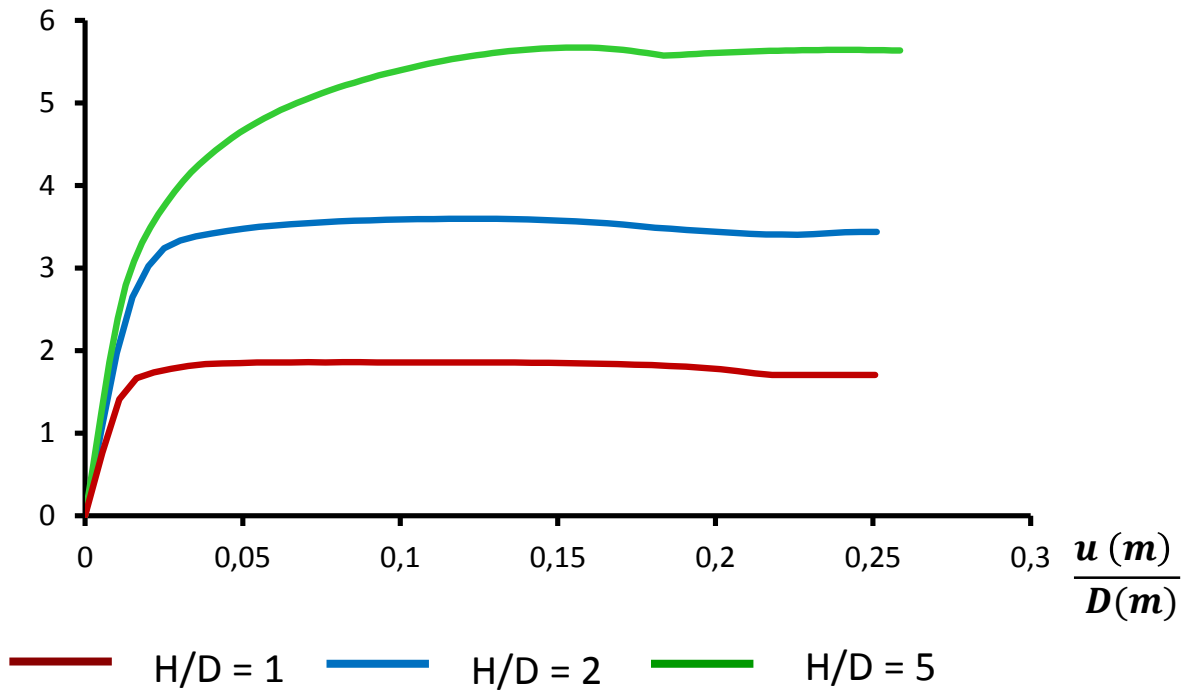


Σχήμα 4.3.7 Διαγράμματα $F - \delta$ για εγκάρσια ελατήρια για άργιλο $S_u=50 \text{ kPa}$ για $H/D=2$, $D=1 \text{ m}$ για διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας

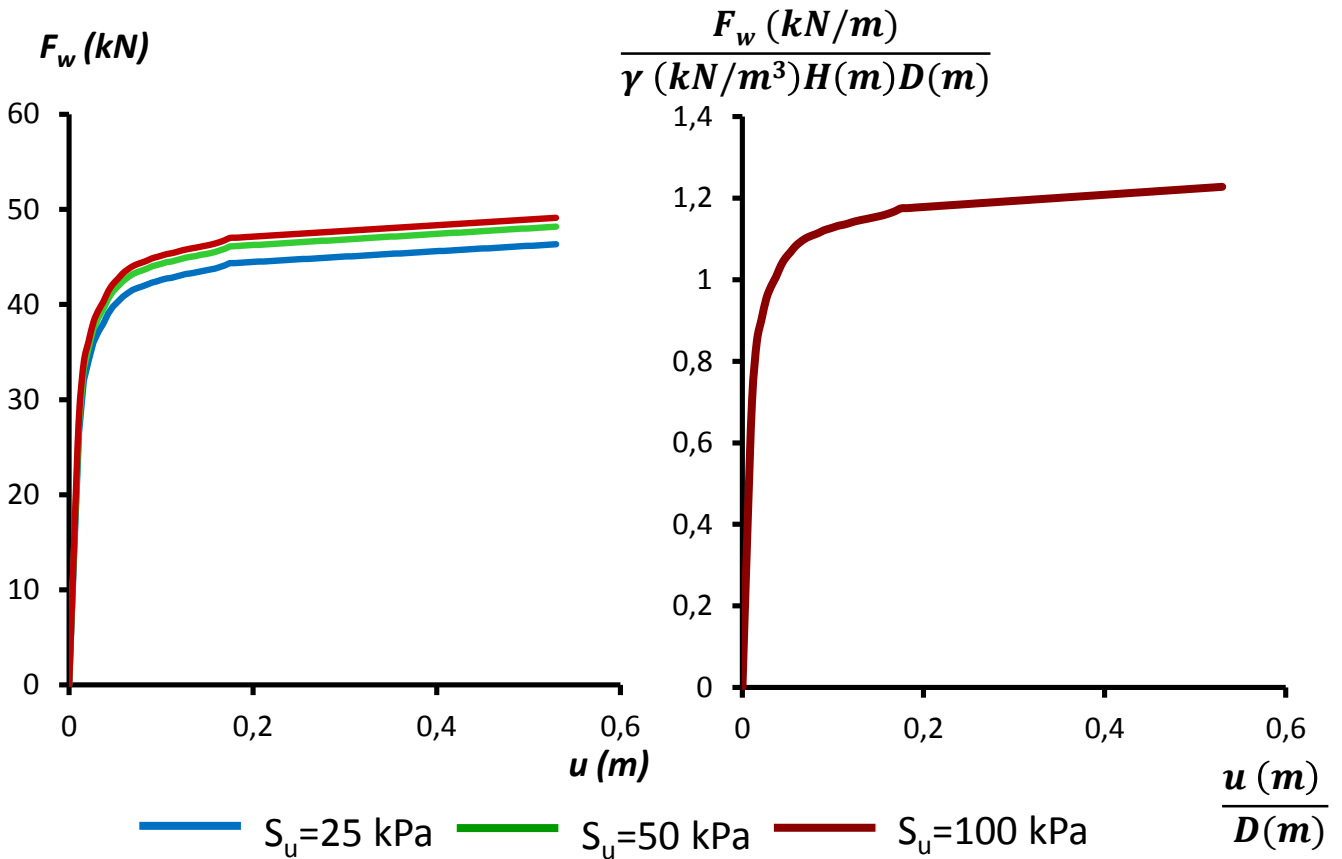


Σχήμα 4.3.8 Διαγράμματα $F - \delta$ για κατακόρυφα ελατήρια προς τα πάνω για αργίλους με $S_u= 25, 50, 100 \text{ kPa}$ για $H/D=2$, $D=1 \text{ m}$ λόγω συνοχής εδάφους

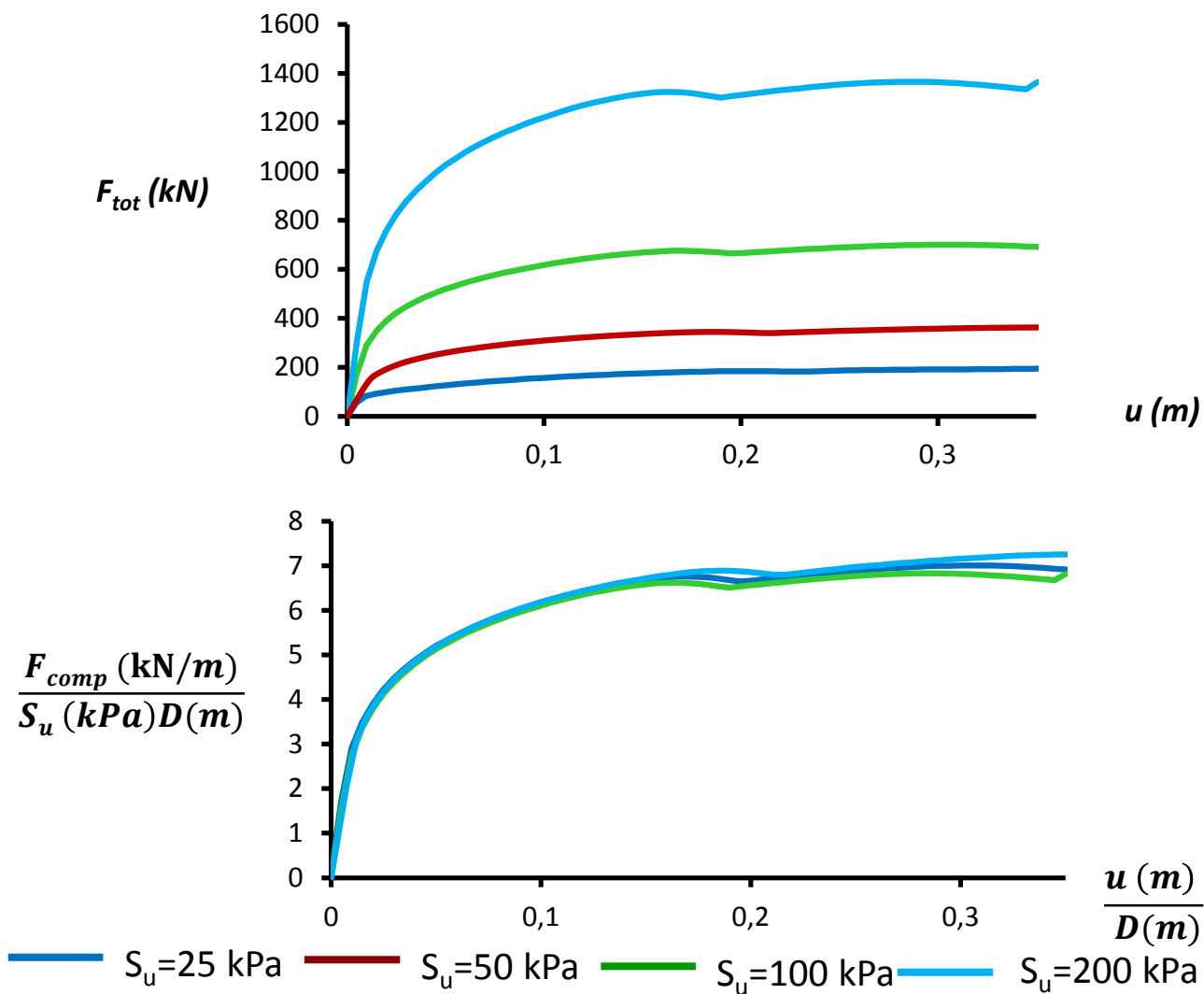
$$\frac{F_{comp} \text{ (kN/m)}}{S_u \text{ (kPa)}D \text{ (m)}}$$



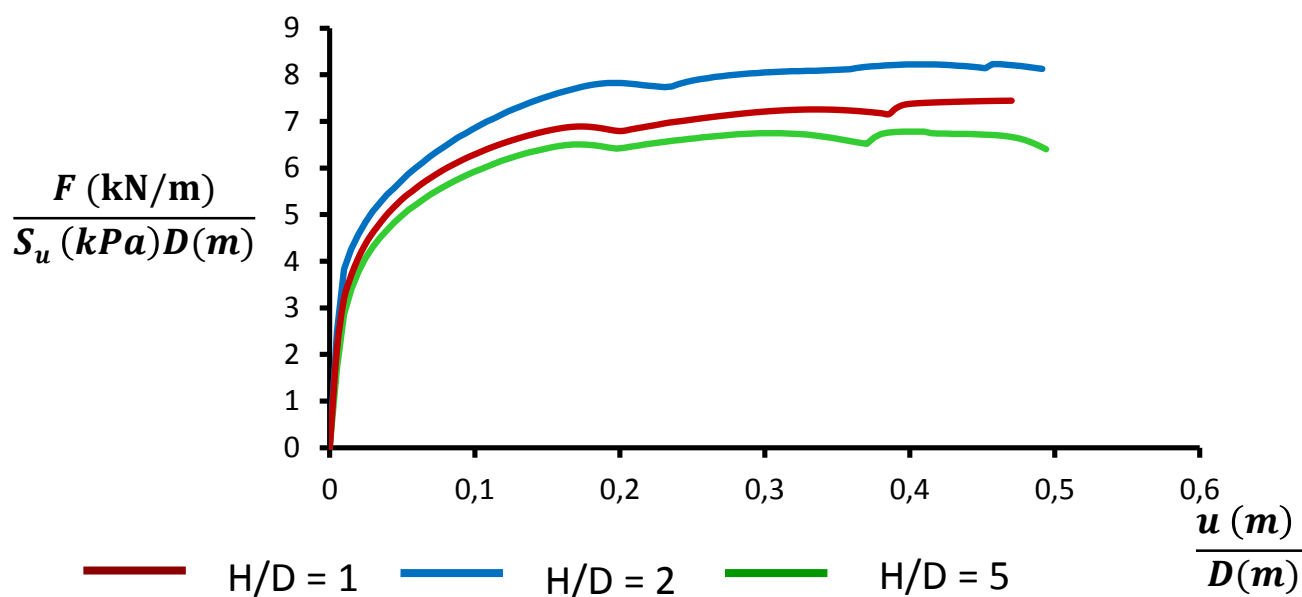
Σχήμα 4.3.9 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $F - \delta$ για κατακόρυφα ελατήρια προς τα πάνω για $H/D = 1, 2, 5$



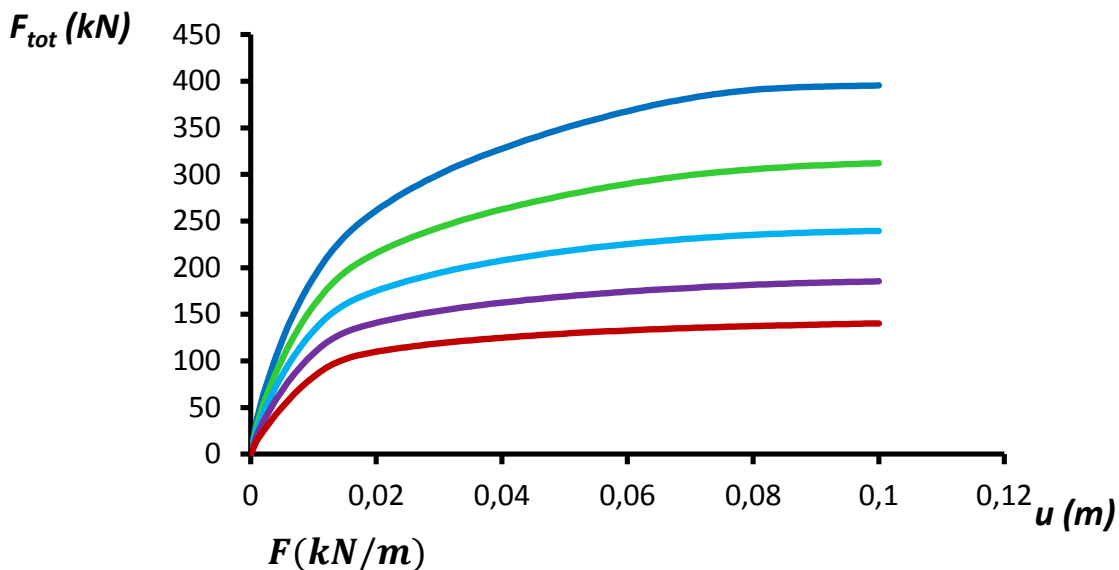
Σχήμα 4.3.10 Διαγράμματα $F - \delta$ με δυνάμεις βαρύτητας για κατακόρυφα ελατήρια για αργίλους $S_u = 25, 50, 100 \text{ kPa}$ για $H/D = 2, D = 1 \text{ m}$



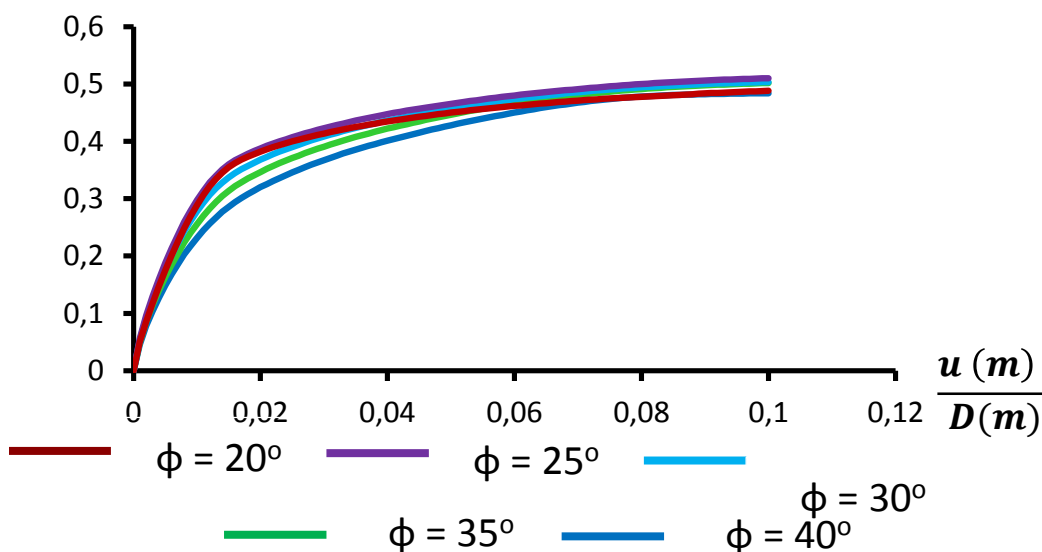
Σχήμα 4.3.11 Διαγράμματα $F - \delta$ για κατακόρυφα ελατήρια προς τα κάτω για αργίλους $S_u=25,50,100$ kPa για $H/D=2, D=1$ m



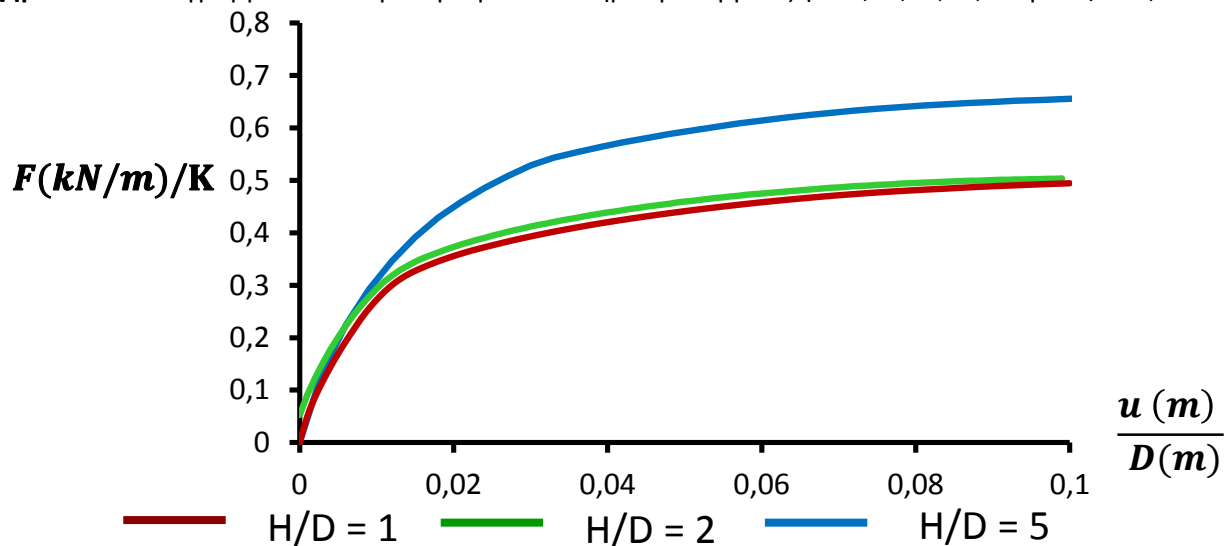
Σχήμα 4.3.12 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $F - \delta$ για κατακόρυφα ελατήρια προς τα κάτω για αργίλους για $H/D = 1, 2, 5$



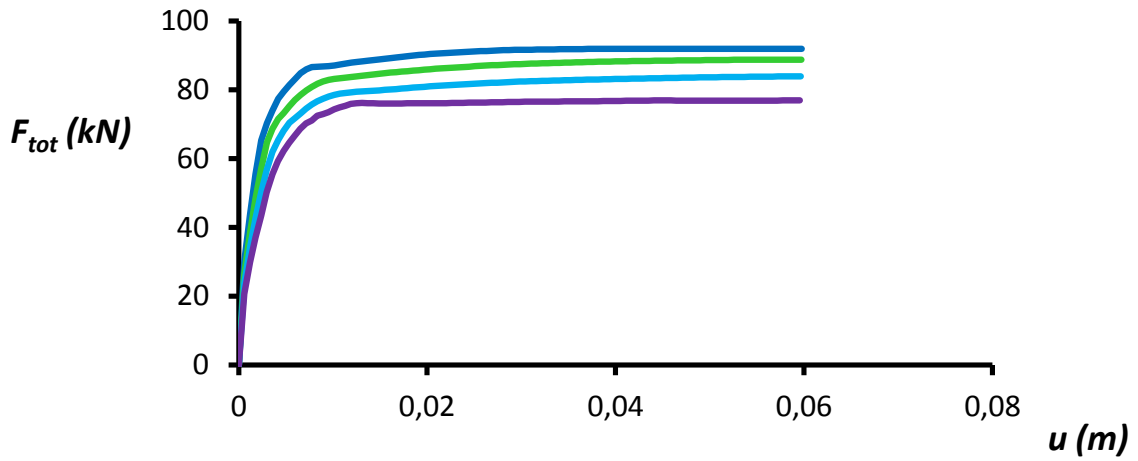
$$\sigma_v (kPa) \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) D(m) + \gamma H (kPa) D(m)$$



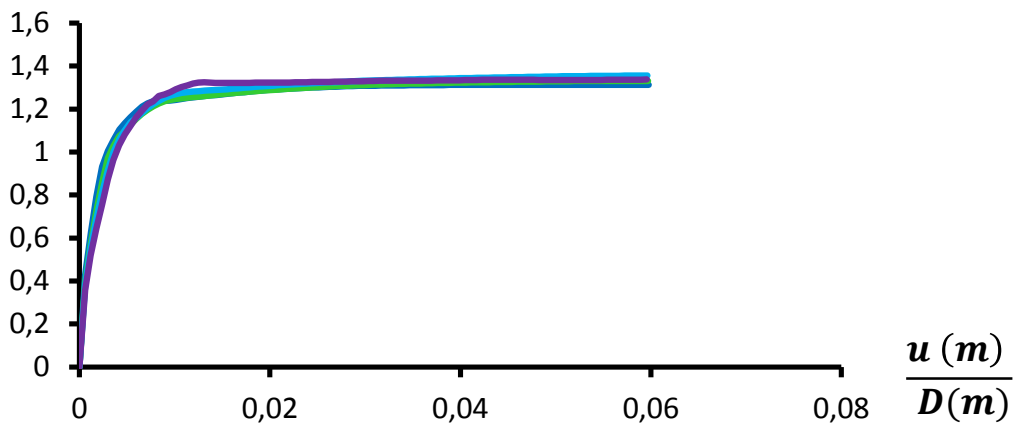
Σχήμα 4.3.13 Διαγράμματα $F - \delta$ για εγκάρσια ελατήρια για άμμους $\phi=20,25,30,35,40^\circ$ για $H/D=2$, $D=1$ m



Σχήμα 4.3.14 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $F - \delta$ για κατακόρυφα ελατήρια προς τα κάτω για $H/D = 1, 2, 5$, όπου $K = \sigma_v (kPa) \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) D(m) + \gamma H (kPa) D(m)$



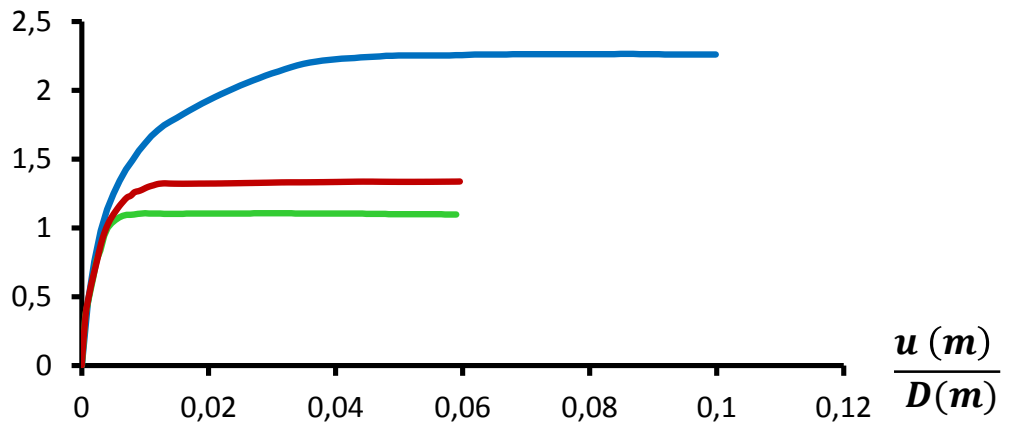
$$\frac{F(kN/m)}{\sigma_v(kPa) \tan(\varphi) D(m) + \gamma H(kPa) D(m)}$$



— $\phi = 25^\circ$
 — $\phi = 30^\circ$
 — $\phi = 35^\circ$
 — $\phi = 40^\circ$

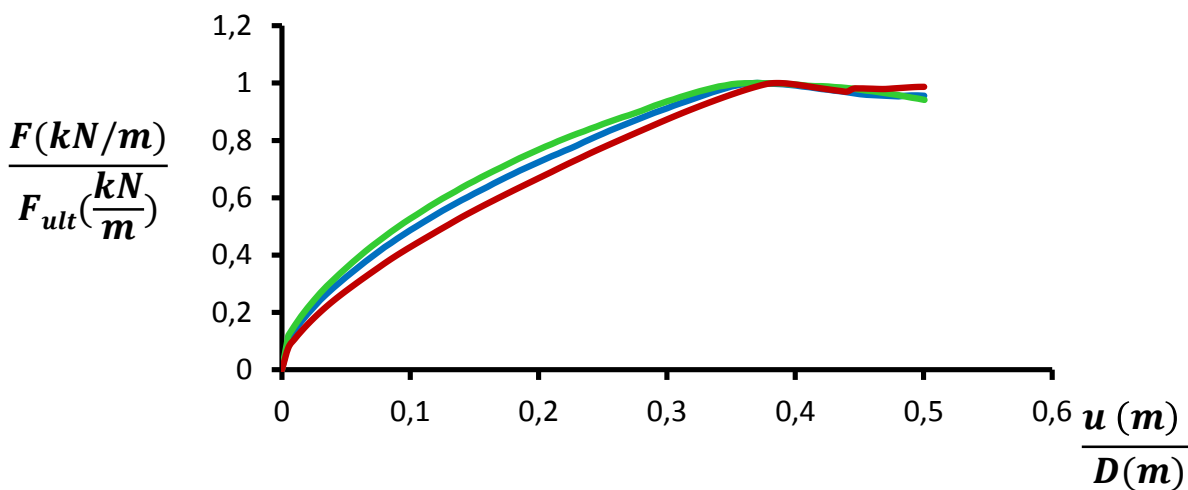
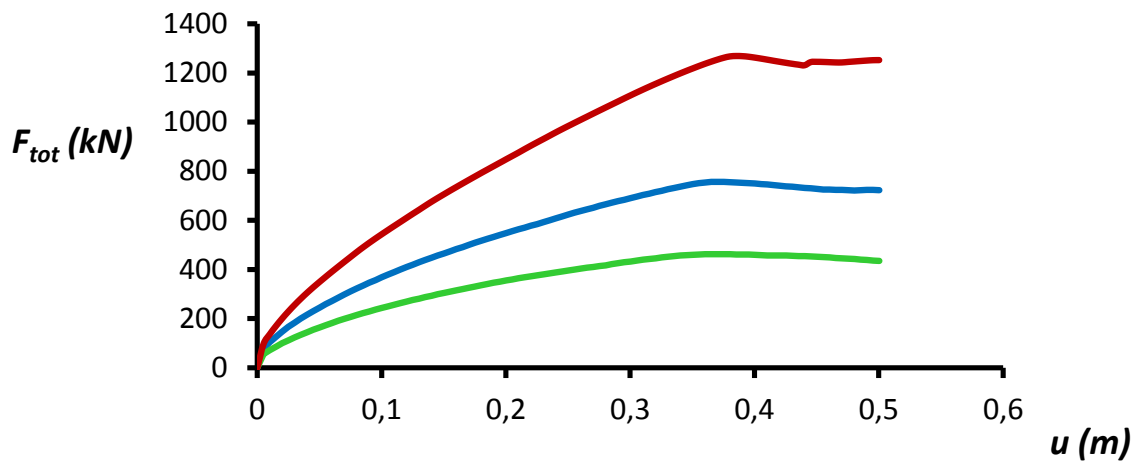
Σχήμα 4.3.15 Διαγράμματα $F - \delta$ για κατ. ελατήρια προς τα πάνω για άμμους $\phi=20,25,30,35,40^\circ$ για $H/D=2$, $D=1$ m

$$\frac{F(kN/m)}{\sigma_v(kPa) \tan(\varphi) D(m) + \gamma H(kPa) D(m)}$$



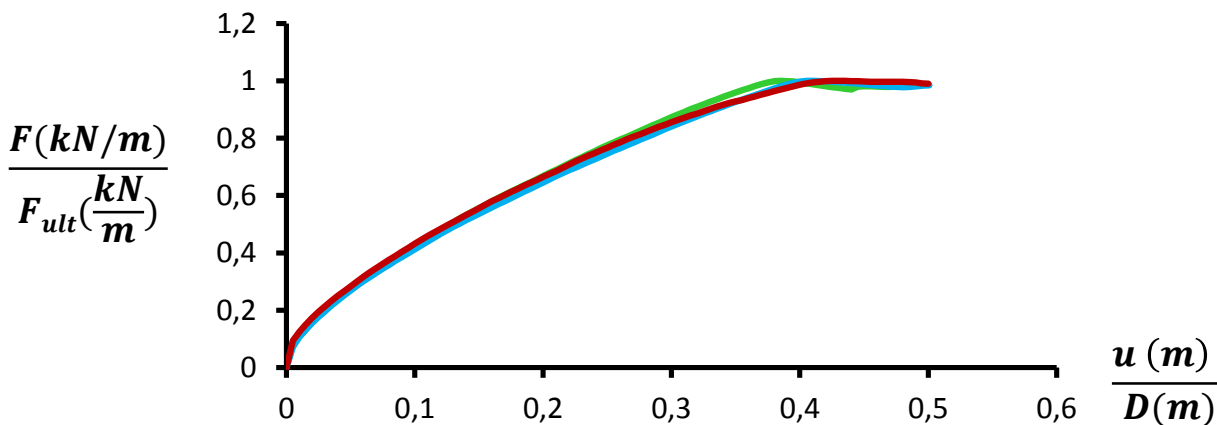
— $H/D = 1$
 — $H/D = 2$
 — $H/D = 5$

Σχήμα 4.3.16 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $F - \delta$ για κατακόρυφα ελατήρια προς τα πάνω για $H/D = 1, 2, 5$



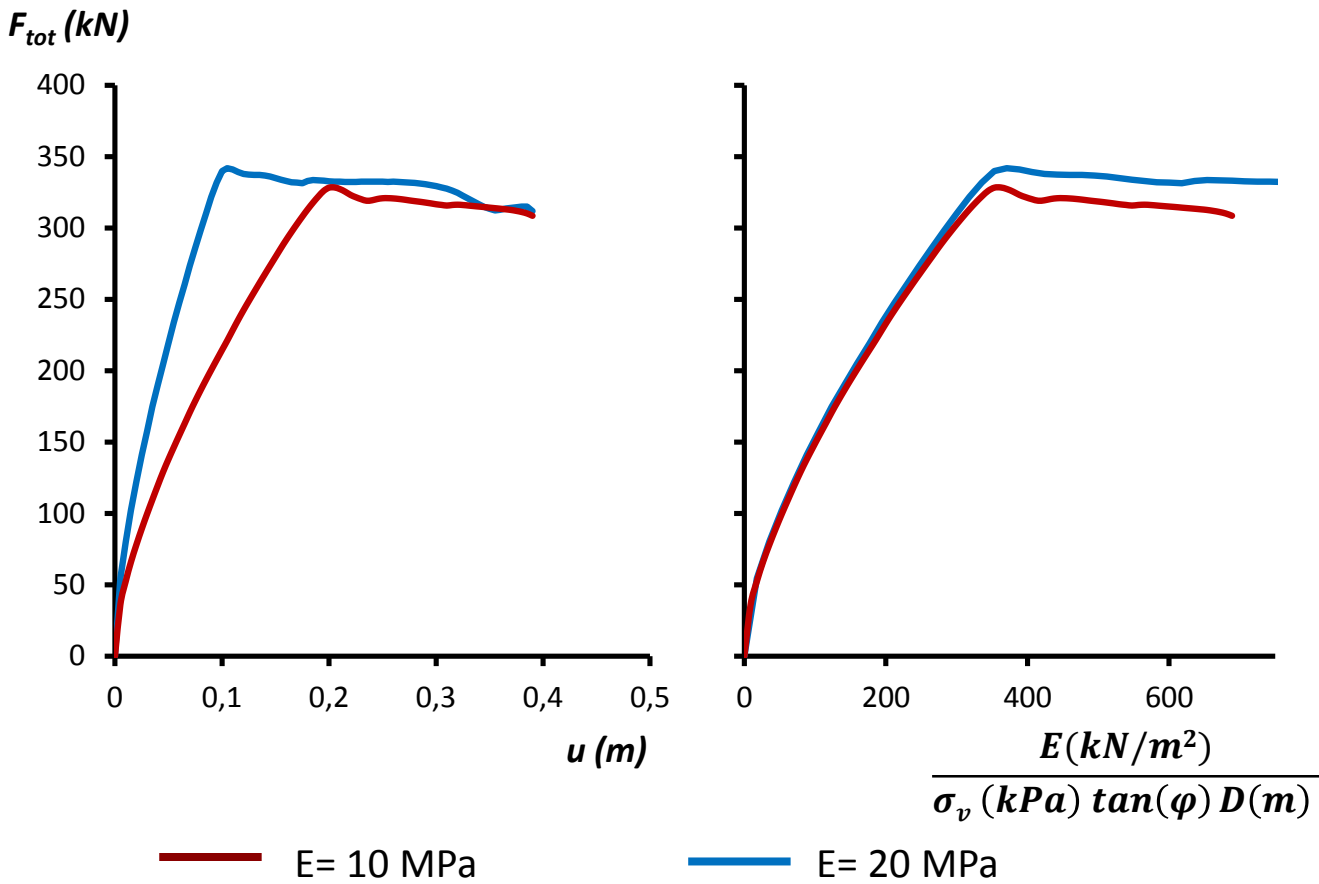
— $\phi = 25^\circ$
 — $\phi = 30^\circ$
 — $\phi = 35^\circ$

Σχήμα 4.3.17 Διαγράμματα $F - \delta$ για κατ. ελατήρια προς τα κάτω για άμμους $\phi=20,25,30,35,40^\circ$ για $H/D=2$, $D=1$ m

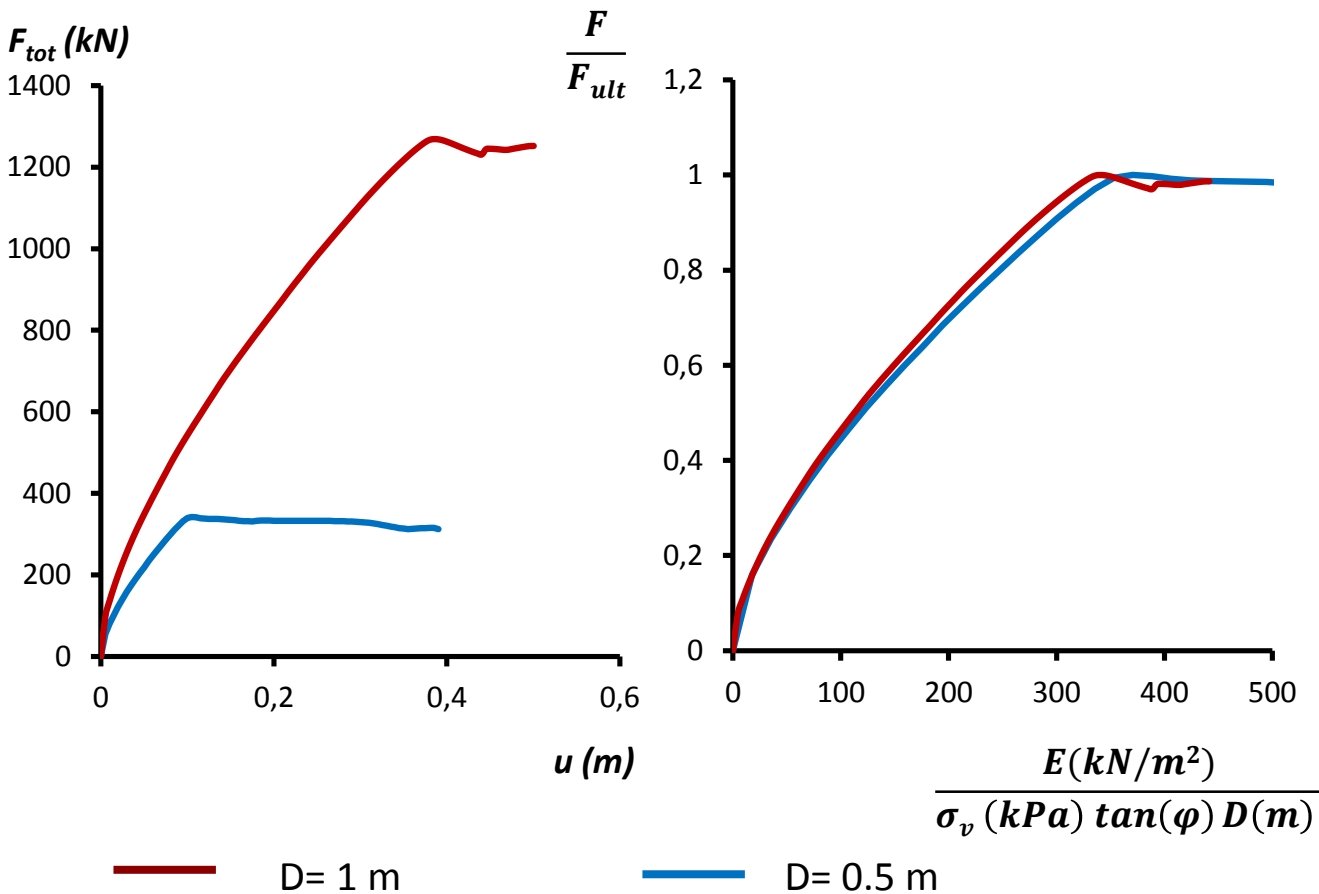


— $H/D = 1$
 — $H/D = 2$
 — $H/D = 5$

Σχήμα 4.3.18 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα $F - \delta$ για κατακόρυφα ελατήρια προς τα κάτω για $H/D = 1, 2, 5$



Σχήμα 4.3.19 Επιρροή μέτρου ελαστικότητας E για συγκεκριμένο H/D (=2), διάμετρο D=1m και $\phi=30^\circ$



Σχήμα 4.3.20 Επιρροή διαμέτρου D για συγκεκριμένο H/D (=2) και $\phi=30^\circ$

5^ο Κεφάλαιο

Αγωγός Υποβαλλόμενος σε Ρήγμα: Σύγκριση Ελατηριωτών Προσομοιωμάτων με Πλήρως Συζευγμένη Αριθμητική Λύση Πεπερασμένων Στοιχείων

5.1 Κανονικό ρήγμα

5.2 Ανάστροφο ρήγμα

5 Αγωγός Υποβαλλόμενος σε Ρήγμα: Σύγκριση Ελατηριωτών Προσομοιωμάτων με Πλήρως Συζευγμένη Αριθμητική Λύση Πεπερασμένων Στοιχείων

Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, συγκρίνεται το ελατηριωτό προσομοίωμα με το πλήρως συζευγμένο αριθμητικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων. Υπάρχουν δύο ειδών ελατήρια· τα προτεινόμενα του Αμερικάνικου Κανονισμού και αυτά που προκύπτουν από αριθμητικές επιλύσεις οι οποίες εξηγήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Θα εξετασθεί η συμπεριφορά του αγωγού για δύο ειδών ρήγματα· για κανονικό και για ανάστροφο καθώς και για δύο γωνίες 30 και 60 μοιρών. Κατά τον σχεδιασμό υπόγειων αγωγών λαμβάνονται υπόψιν οι αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού. Παρόλα αυτά για την κατανόηση της συμπεριφοράς του αγωγού πρέπει να είναι γνωστή κι η θέση του αγωγού κατά την εξέλιξη της διάρρηξης. Συνεπώς, θα συγκριθούν οι αξονικές παραμορφώσεις κι η θέση του αγωγού για τις τρεις αριθμητικές προσεγγίσεις του προβλήματος. Τα ελατήρια τοποθετήθηκαν άνα 0.5 m, όσο περίπου κι η μισή διάμετρος του αγωγού. Δίνει ίδια εικόνα με το να τοποθετούνταν τα ελατήρια σε μικρότερη απόσταση μεταξύ τους. Αυτό, όμως, που παρατηρήθηκε ότι έχει μεγαλύτερη σημασία είναι το μήκος του αγωγού εκατέρωθεν του ρήγματος, αναλόγως με το έδαφος που εκπροσωπούν τα ελατήρια. Όσο πιο συνεκτικό – πυκνό είναι το έδαφος, τόσο μικρότερο είναι και το μήκος επιρροής. Για άμμο $\phi = 30$ μοίρες, όπως στην προκειμένη, με συντελεστή τριβής $\mu = 0.45$ το μήκος αυτό είναι 1 km από το ρήγμα και για αυτό το συνολικό μήκος του ελατηριωτού προσομοιώματος είναι 2 km με το ρήγμα στο μέσον.

5.1 Κανονικό ρήγμα

Όσον αφορά στον αγωγό που βρίσκεται σε αμμώδες έδαφος, προσομοιώθηκε για συνολικό μήκος 2 km, στον οποίο το ρήγμα περνά από το μέσον. Το μήκος αυτό είναι τόσο μεγάλο ούτως ώστε στα άκρα του αγωγού η μετακίνηση του αγωγού να είναι μηδενική. Τα αξονικά ελατήρια λειτουργούν μέχρι 450 m απόσταση από το ρήγμα περίπου και για τις δύο γωνίες ρήγματος **Σχήμα 5.1.1**. παρατηρείται ότι από πολύ νωρίς φτάνουν στην οριακή κατάσταση αστοχίας. Τα εγκάρσια, για κανονικό ρήγμα, δεν λειτουργούν καθόλου. Τα κατακόρυφα προς

τα κάτω λειτουργούν στο κομμάτι στο οποίο το έδαφος, ουσιαστικώς, δεν κινείται λόγω διάρρηξης και για μήκος 4.5 m περίπου **Σχήμα 5.1.2** και για τις δύο γωνίες ρήγματος. Τα κατακόρυφα ελατήρια προς τα πάνω ενεργοποιούνται για ένα μήκος 23 m για το ρήγμα των 30 μοιρών από την μεριά του μετακινούμενου εδάφους, διότι ο αγωγός δεν έχει την ίδια μετατόπιση με το έδαφος, μετακινείται λιγότερο από αυτό **Σχήμα 5.1.3**. Για το ρήγμα των 60 μοιρών λειτουργούν μόνον τα 15 m περίπου.

Στην σύγκριση φαίνονται τρεις στιγμές κατά την διάρκεια της διάρρηξης. Η πρώτη είναι για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος 20 – 30 cm, η οποία είναι μια συνήθης τιμή και για τις δύο γωνίες ρήγματος, η επόμενη για 50 – 60 cm εξίσου συνήθης κι αυτή κι η άλλη είναι για 1 m περίπου, δηλαδή μια ακραία κατάσταση **Σχήμα 5.1.4 - Σχήμα 5.1.9**. Η θέση $x = 0$ m είναι η θέση επιβολής ρήγματος. Παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις των αποτελεσμάτων της τρισδιάστατης ανάλυσης με τα αποτελέσματα του Αμερικάνικου Κανονισμού, αλλά και με τα προτεινόμενα ελατήρια. Στο επόμενο κεφάλαιο, προτείνεται μια απομείωση των κατακόρυφων ελατηρίων προς τα κάτω στην περιοχή, στην οποία λειτουργούν. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό εξηγείται στο επόμενο κεφάλαιο.

5.2 Ανάστροφο ρήγμα

Το ανάστροφο ρήγμα είναι ένα φαινόμενο το οποίο συμπιέζει το έδαφος με αποτέλεσμα να προκαλεί θλιπτικές παραμορφώσεις. Η θλιπτική παραμόρφωση σε μεταλλικά στοιχεία, ως γνωστόν, μετά από ένα σημείο προκαλεί λυγισμό. Ο λυγισμός προκαλεί μια κατάσταση ασυνέχειας, αστάθειας με αποτέλεσμα ο αγωγός να χάνει την ικανότητά του να παραλάβει φορτία, πράγμα μη επιθυμητό. Για τον λόγο αυτό, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε για τι μετατοπίσεις ο αγωγός μπορεί να λυγίσει και στην θέση στην οποία θα συμβεί αυτό κατά την διαδικασία του σχεδιασμού.

Στο ελατηριωτό προσομοίωμα ο αγωγός προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού. Στα στοιχεία αυτά δεν μπορεί να απεικονιστεί το φαινόμενο του λυγισμού, όπως γίνεται στα κελυφωτά στοιχεία και φαίνεται και στην τρισδιάστατη ανάλυση. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκαν εμπειρικές σχέσεις, οι οποίες υπολογίζουν την αξονική παραμόρφωση ενός στοιχείου δοκού πάνω από την οποία εκτιμάται ότι ο αγωγός θα έχει λυγίσει. Για την εξετάζουσα περίπτωση

άμμου και χαρακτηριστικών αγωγού, δηλαδή $\phi = 30$ μοίρες, διαμέτρου $D = 0.9144$ m και πάχους $t = 0.0127$ m ο καταλληλότερος τύπος είναι:

$$\varepsilon_{cr} = 2.42 \left(\frac{t}{d} \right)^{1.59} = 2.3 \text{ ‰}$$

Στο ανάστροφο ρήγμα, όπως και στο κανονικό το συνολικό μήκος του αγωγού είναι 2 km για τους ίδιους λόγους. Ομοίως, τα αξονικά ελατήρια λειτουργούν για 450 m εκατέρωθεν του ρήγματος και τα εγκάρσια δεν λειτουργούν καθόλου και για τις δύο γωνίες ρήγματος. Τα κατακόρυφα ελατήρια προς τα κάτω ενεργοποιούνται έως 5 m από το ρήγμα περίπου, από την μεριά της μετακινούμενης μάζας στην προκειμένη **Σχήμα 5.2.1**. Τα ελατήρια προς τα πάνω ενεργοποιούνται για 15 m περίπου από το ρήγμα στην περιοχή που το έδαφος δεν κινείται προς τα πάνω, καθώς και 5 m πέρα από το ρήγμα από την μεριά που μετακινείται το έδαφος. Το φαινόμενο αυτό, οφείλεται στο ότι ο αγωγός σε εκείνο το κομμάτι συμπαρασύρεται από το κοντινότερο στο ρήγμα και μετατοπίζεται προς τα πάνω περισσότερο σε σχέση με το έδαφος **Σχήμα 5.2.2**. Φαίνεται κι από τα σχήματα, ότι σε σημεία που λειτουργούν τα ελατήρια προς τα πάνω δεν λειτουργούν τα προς τα κάτω κι αντίστοιχα.

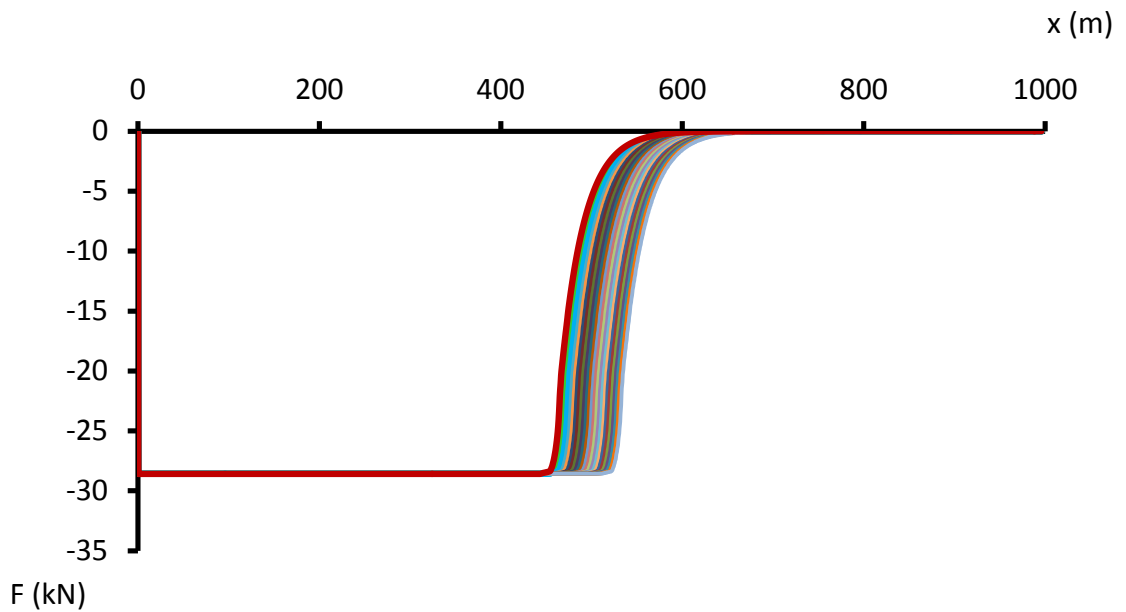
Το ελατηριωτό μοντέλο με τα καινούρια προτεινόμενα ελατήρια φαίνεται να προσεγγίζει αρκετά ικανοποιητικά την πλήρως συζευγμένη αριθμητική λύση πεπερασμένων στοιχείων και φτάνει στην αξονική παραμόρφωση που προτείνει ο εμπειρικός τύπος όταν έχει λυγίσει ο αγωγός. Ο Αμερικάνικος Κανονισμός φαίνεται να έχει κι εδώ σημαντικές αποκλίσεις από την εικόνα που δίνει η τρισδιάστατη προσομοίωση **Σχήμα 5.2.3 - Σχήμα 5.2.6**.

Ο Αμερικάνικος Κανονισμός, όπως φαίνεται και στο κεφάλαιο 4, θεωρεί πως τα κατακόρυφα ελατήρια έχουν απομειωμένη αντοχή, διότι δεν λαμβάνει υπόψιν τον συντελεστή τριβής μεταξύ αγωγού κι εδάφους. Αυτή η επιπλέον δύναμη που δίνει είναι καθοριστικής σημασίας σε συνδυασμό με το ότι στην πραγματικότητα είναι μικρότερο το u_y από το προτεινόμενο του Κανονισμού. Επιπλέον, τα καινούρια ελατήρια προς τα κάτω έχουν μεγαλύτερο u_y , το οποίο συμβάλλει κι αυτό με την σειρά του στην καλύτερη προσομοίωση με τα καινούρια ελατήρια σε σχέση με αυτά του Αμερικάνικου Κανονισμού. Το έδαφος, δηλαδή, για κατακόρυφη μετατόπιση προς τα κάτω είναι περισσότερο εύκαμπτο από αυτό που θεωρείται στον Κανονισμό. Η εικόνα των αξονικών ελατηρίων είναι σχεδόν ίδια για το συγκεκριμένο

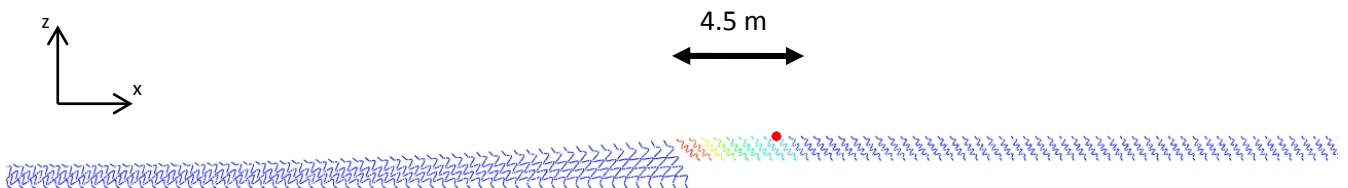
πρόβλημα. Τα αξονικά ελατήρια αστοχούν από τα πρώτα εκατοστά κατακόρυφης μετακίνησης ρήγματος. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, το u_y είναι χιλιοστά και γι αυτό συμβαίνει το παραπάνω φαινόμενο. Αλλάζοντας δραματικά τόσο η τιμή της αντοχής, αλλά και του u_y θα υπήρχε μια διαφορετική εικόνα, η οποία όπως φαίνεται κι από το πλήρως συζευγμένο μοντέλο, δεν θα συνάδει με την πραγματική εικόνα.

5^ο Κεφάλαιο: Σχήματα

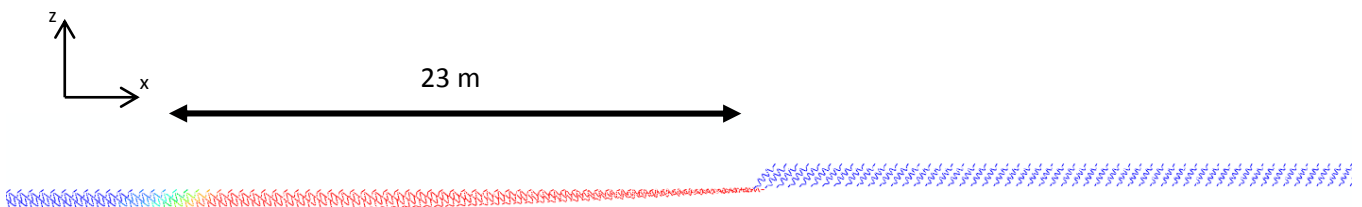
*Αγωγός υποβαλλόμενος σε ρήγμα: Σύγκριση
ελατηριωτών προσομοιωμάτων με πλήρως
συζευγμένη αριθμητική λύση πεπερασμένων
στοιχείων*



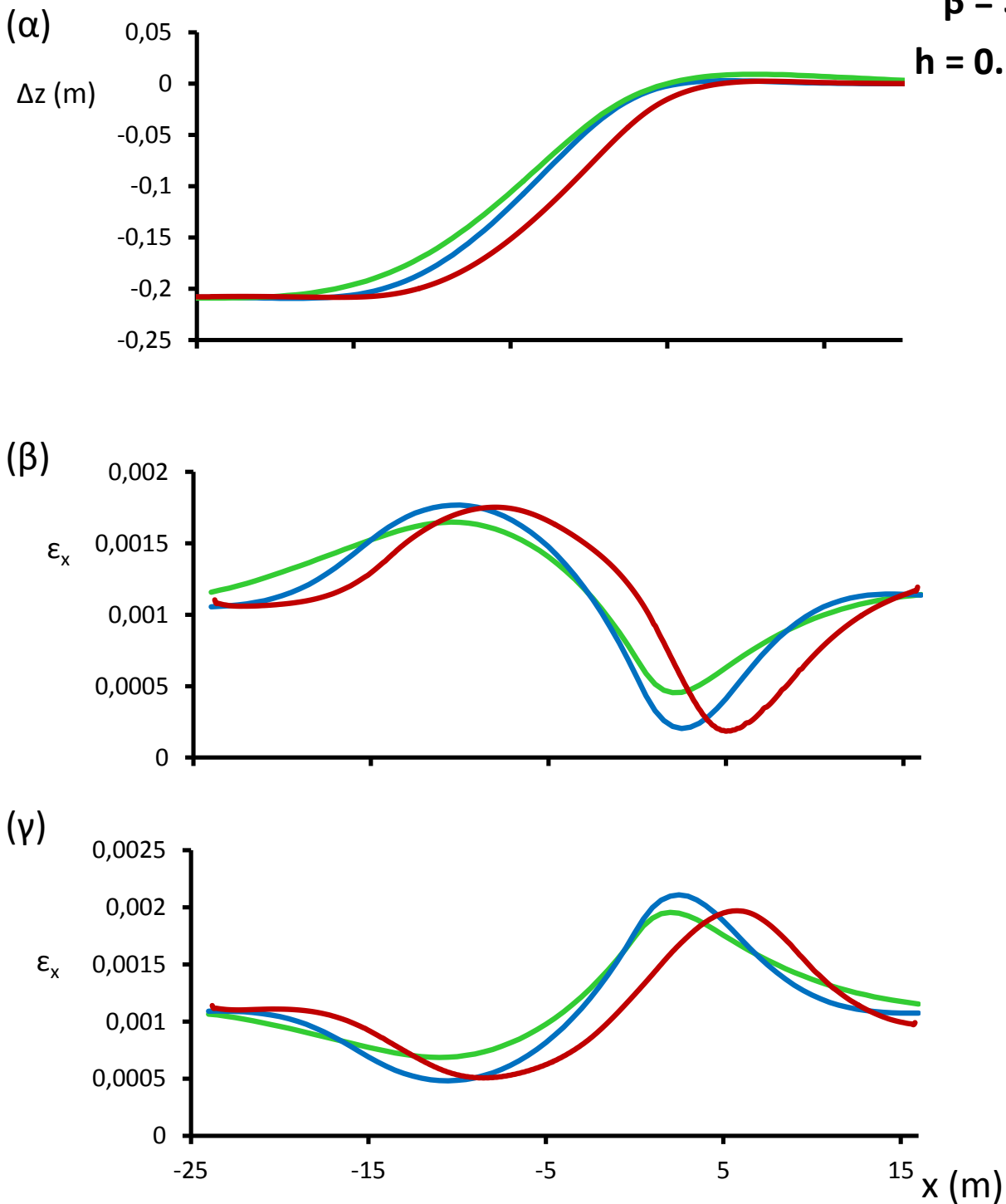
Σχήμα 5.1.1 Αξονικά ελατήρια σε κανονικό ρήγμα. Το μήκος που ενεργοποιούνται και για τις δύο εξεταζόμενες γωνίες ρήγματος είναι 450 m περίπου



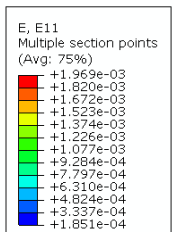
Σχήμα 5.1.2 κατακόρυφα ελατήρια προς τα κάτω σε κανονικό ρήγμα. Το μήκος που ενεργοποιούνται και για τις δύο εξεταζόμενες γωνίες ρήγματος είναι 4.5 m περίπου. Τα ελατήρια με μπλε χρώμα δεν έχουν μετακινηθεί και με κόκκινο έχουν φτάσει στην οριακή κατάσταση αστοχίας.



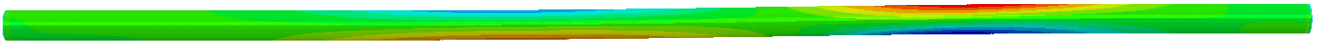
Σχήμα 5.1.3 κατακόρυφα ελατήρια προς τα πάνω σε κανονικό ρήγμα. Το μήκος που ενεργοποιούνται για γωνία ρήγματος 30 μοιρών είναι 23 m περίπου και για 60 μοίρες 15 m. Τα ελατήρια με μπλε χρώμα δεν έχουν μετακινηθεί και με κόκκινο έχουν φτάσει στην οριακή κατάσταση αστοχίας.

$\beta = 30^\circ$ $h = 0.20 \text{ m}$ 

— 3D — bs - ASCE — bs - FEA



(δ)

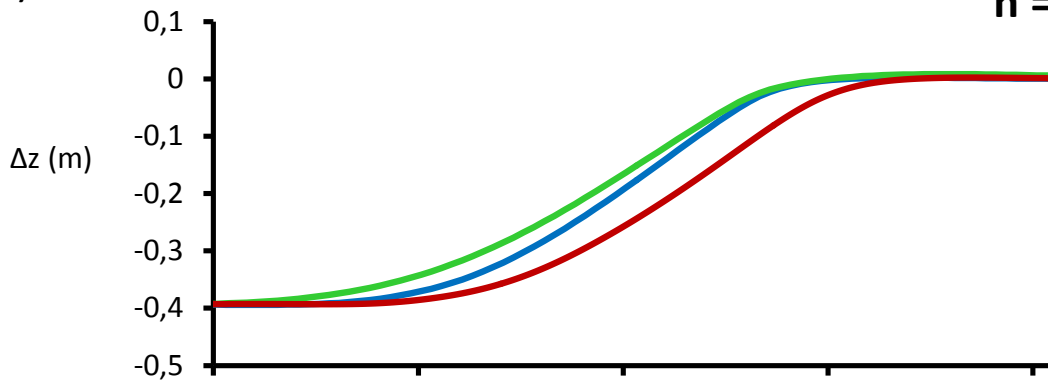


Σχήμα 5.1.4 (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για κανονικό ρήγμα γωνίας $\beta=30^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την (β) κάτω ίνα και (γ) άνω ίνα (δ) οι αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού στο πλήρως αριθμητικά συζευγμένο προσομοίωμα.

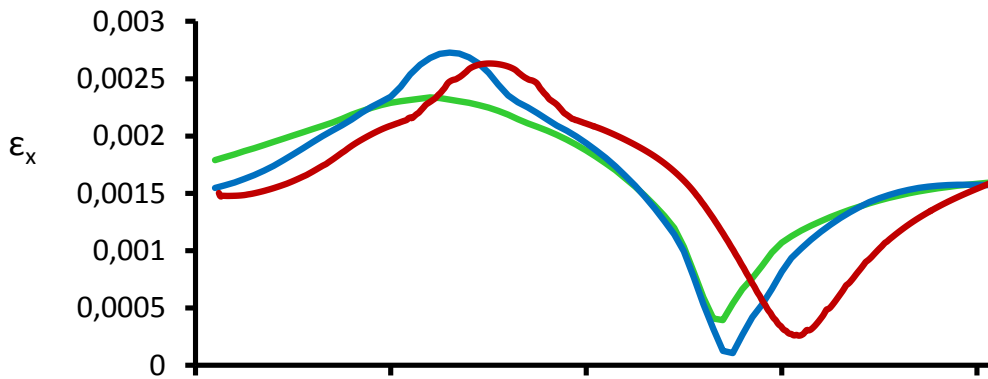
$\beta = 30^\circ$

$h = 0.40 \text{ m}$

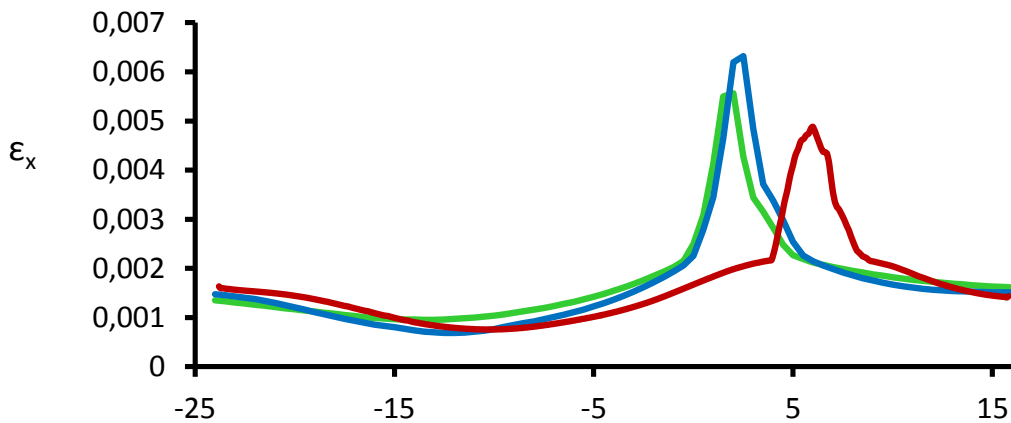
(α)



(β)

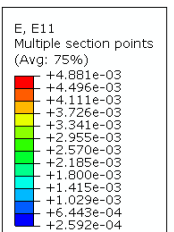


(γ)



x (m)

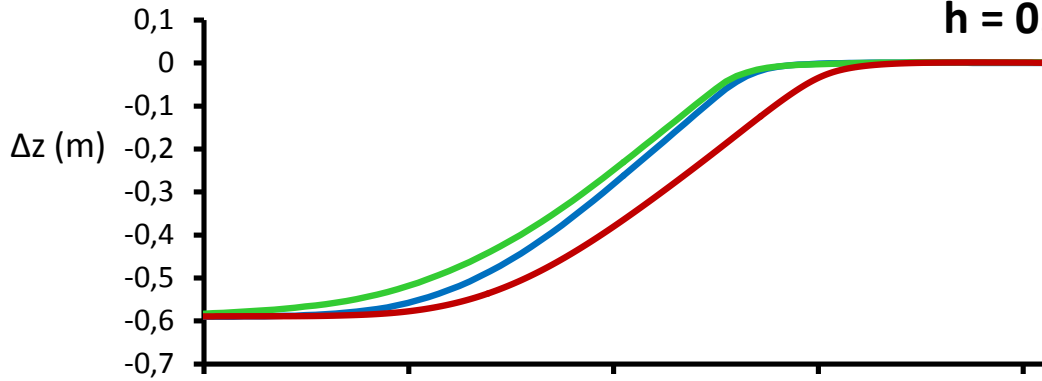
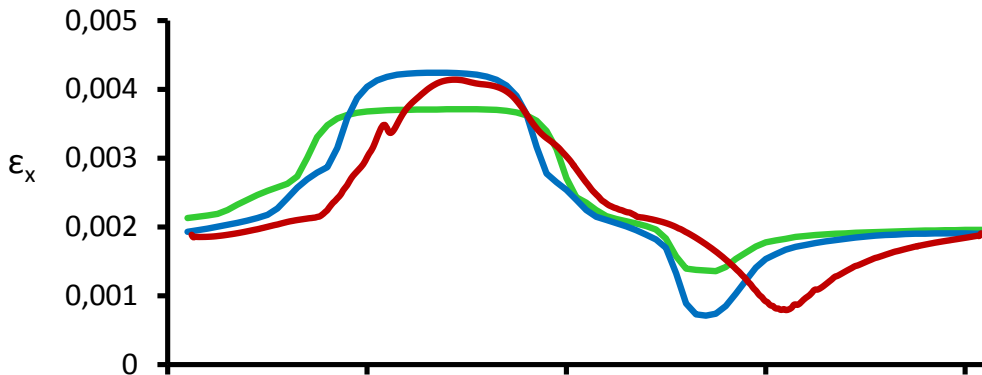
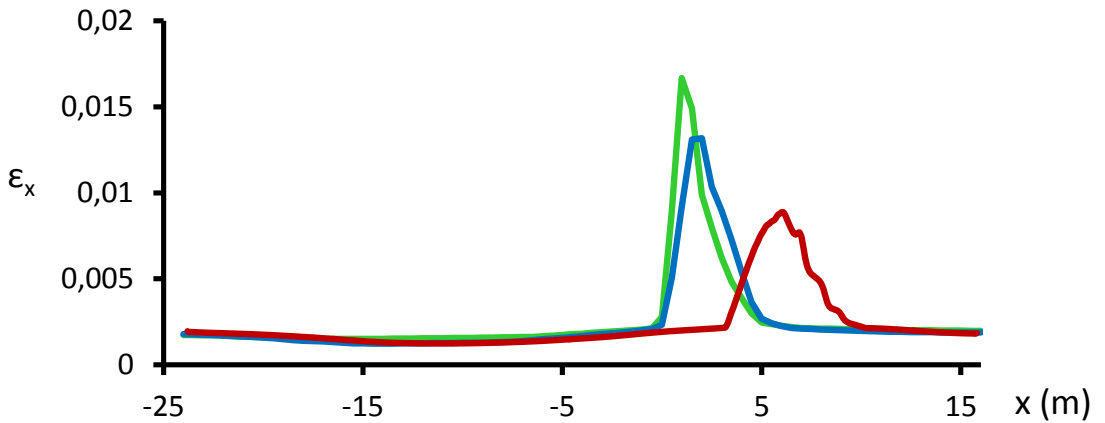
— 3D — bs - ASCE — bs - FEA



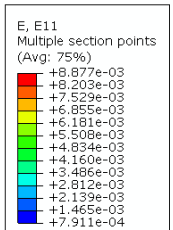
(δ)



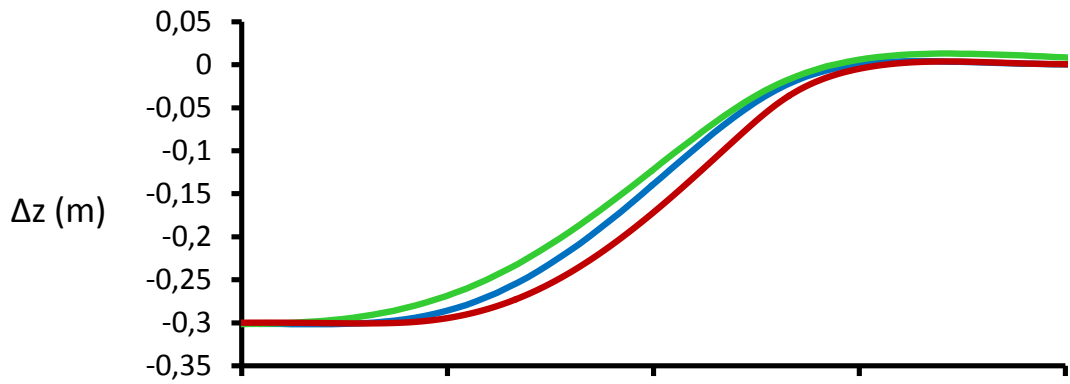
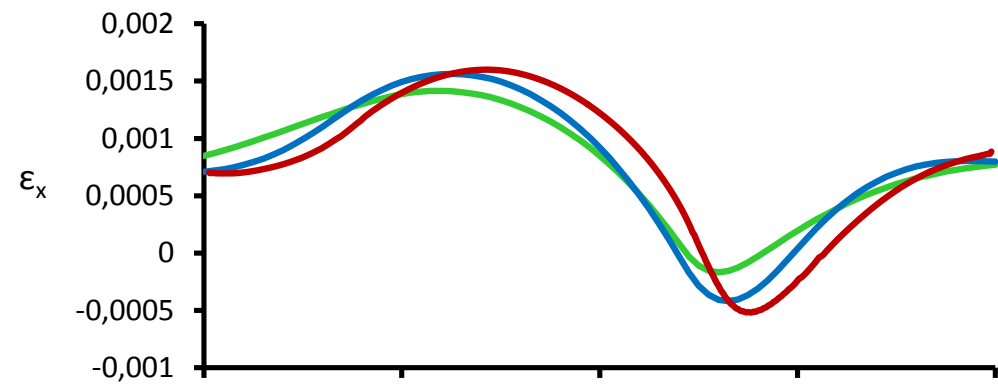
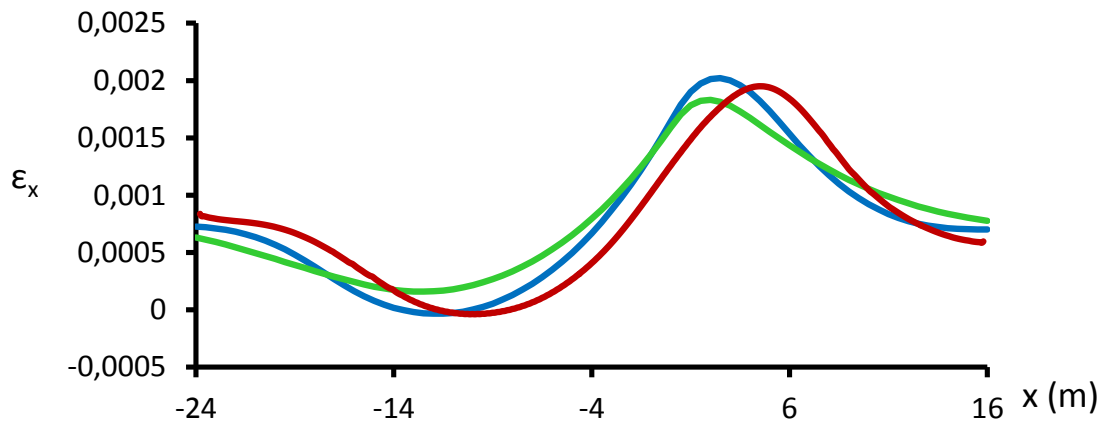
Σχήμα 5.1.5 (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για κανονικό ρήγμα γωνίας $\beta=30^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την (β) κάτω ίνα και (γ) άνω ίνα (δ) οι αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού στο πλήρως αριθμητικά συζευγμένο προσομοίωμα.

$\beta = 30^\circ$ $h = 0.60 \text{ m}$ (α)  (β)  (γ) 

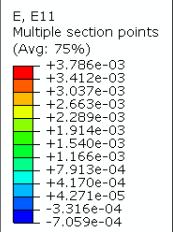
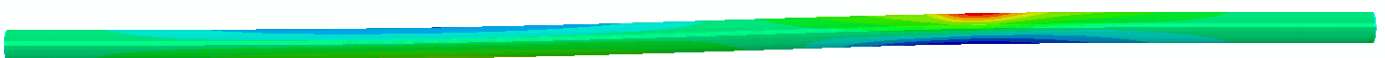
— 3D — bs - ASCE — bs - FEA

 (δ) 

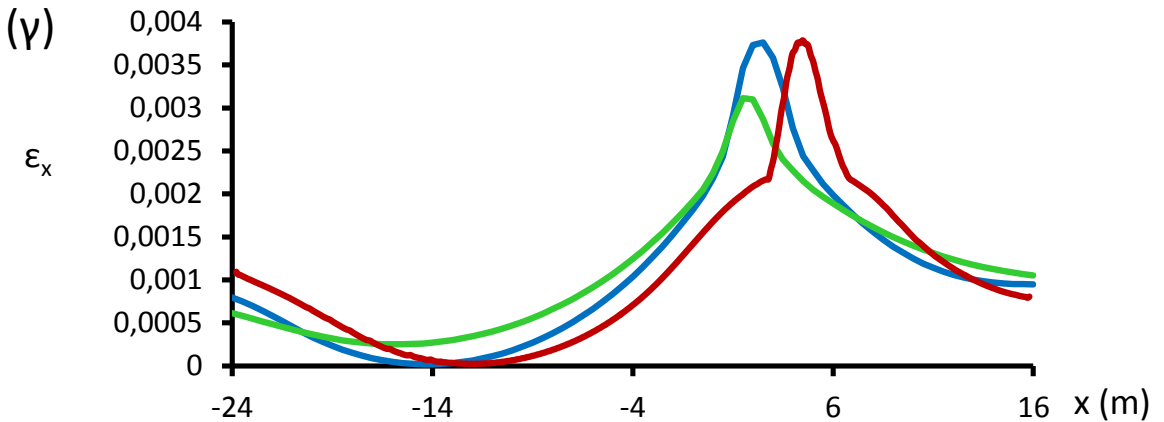
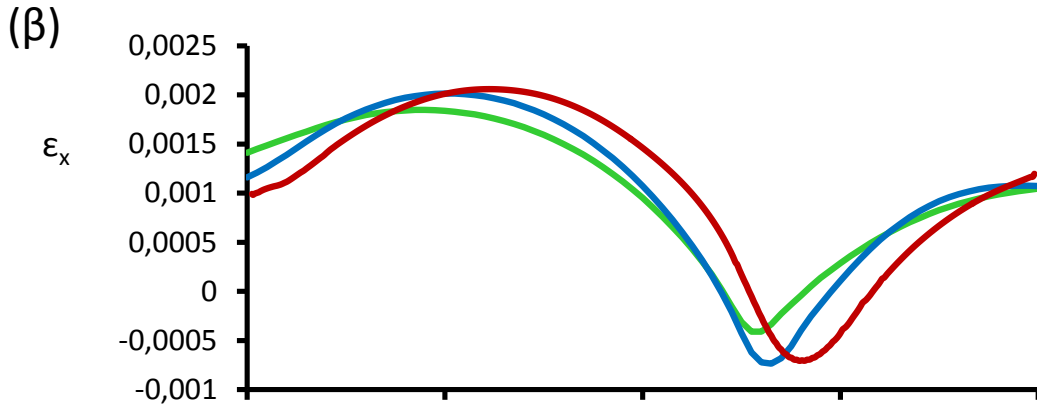
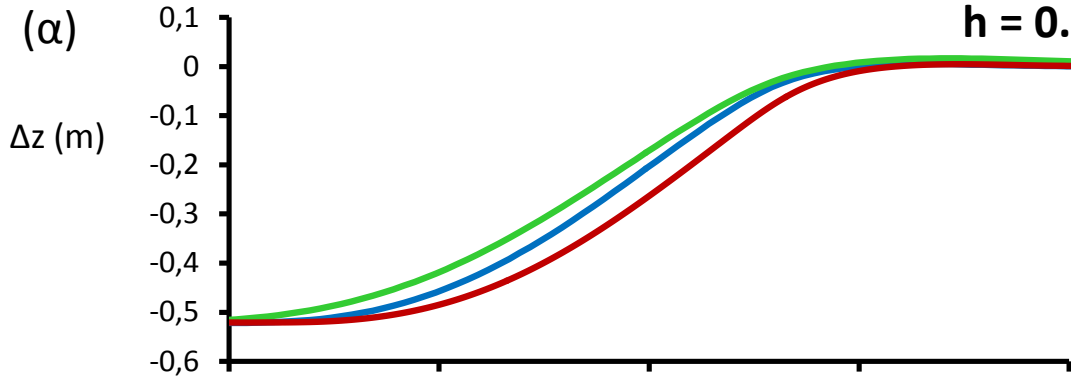
Σχήμα 5.1.6 (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για κανονικό ρήγμα γωνίας $\beta=30^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την **(β)** κάτω ίνα και **(γ)** άνω ίνα **(δ)** οι αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού στο πλήρως αριθμητικά συζευγμένο προσομοίωμα.

$\beta = 60^\circ$ $h = 0.30 \text{ m}$ (α)  (β)  (γ) 

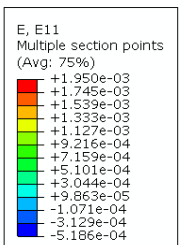
— 3D — bs - ASCE — bs - FEA

 (δ) 

Σχήμα 5.1.7 (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για κανονικό ρήγμα γωνίας $\beta=60^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την **(β)** κάτω ίνα και **(γ)** άνω ίνα **(δ)** οι αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού στο πλήρως αριθμητικά συζευγμένο προσομοίωμα.

$\beta = 60^\circ$ $h = 0.52 \text{ m}$ 

— 3D — bs - ASCE — bs - FEA

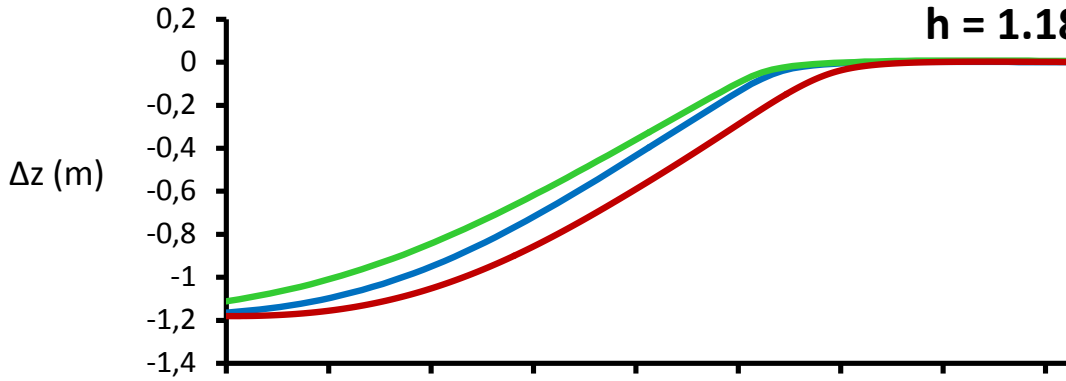


(δ)

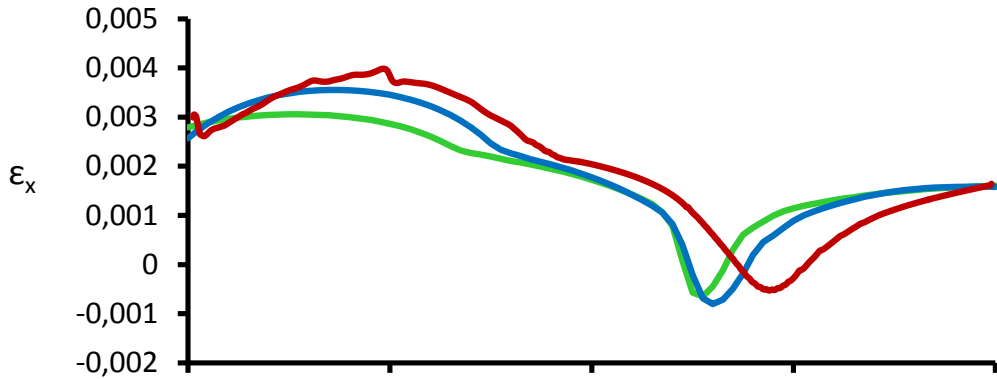
Σχήμα 5.1.8 (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για κανονικό ρήγμα γωνίας $\beta=60^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την (β) κάτω ίνα και (γ) άνω ίνα (δ) οι αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού στο πλήρως αριθμητικά συζευγμένο προσομοίωμα.

$\beta = 60^\circ$ $h = 1.18 \text{ m}$

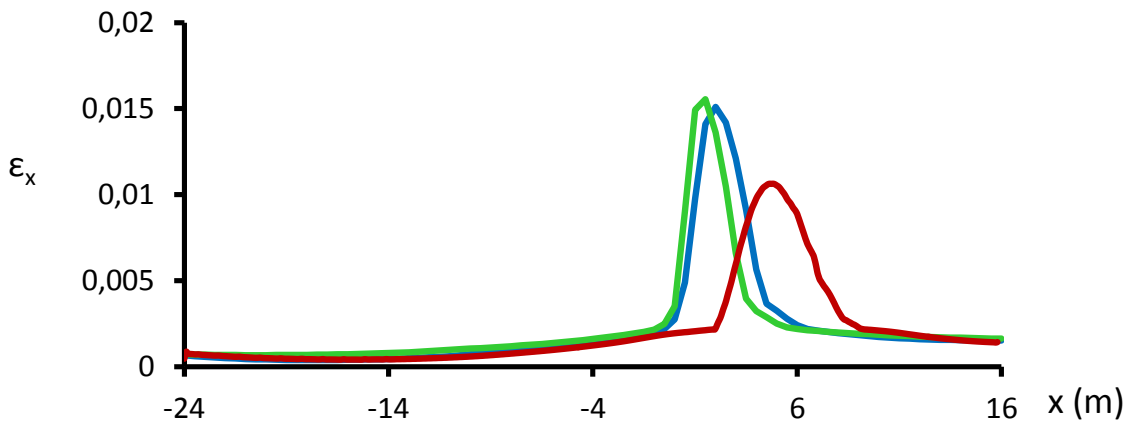
(α)



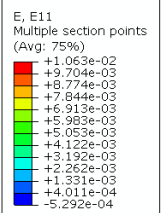
(β)



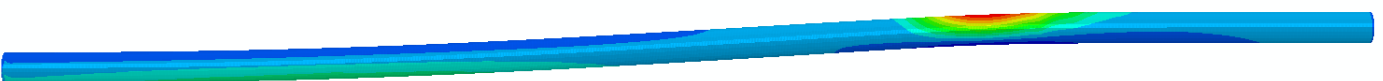
(γ)



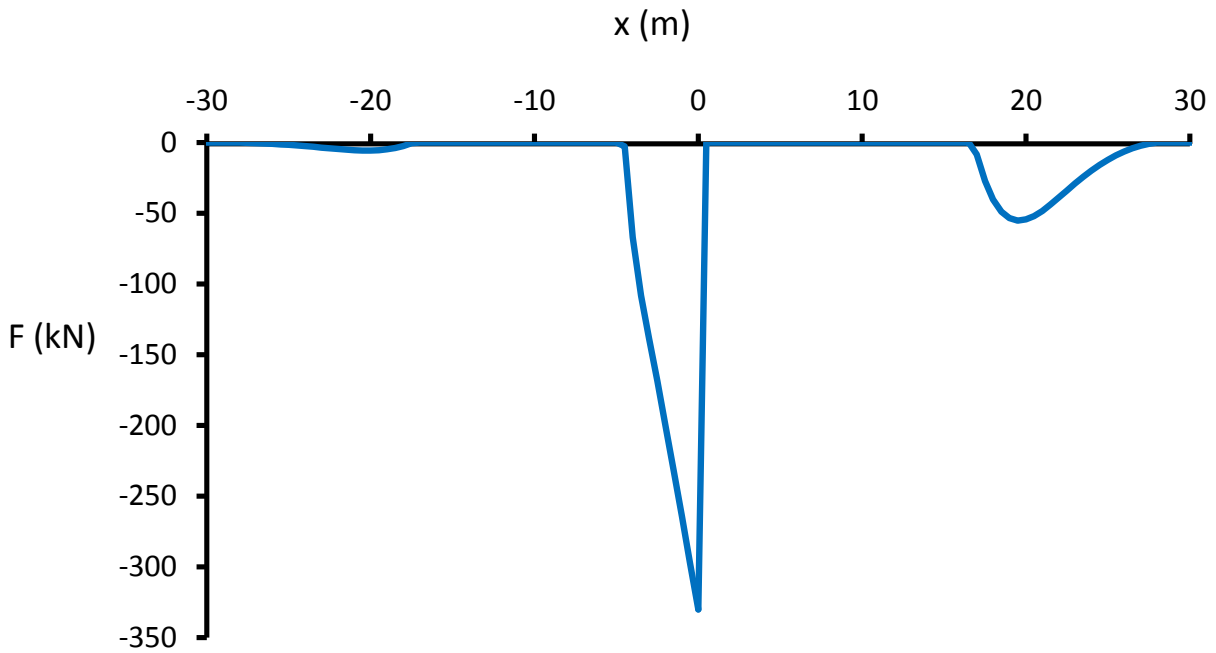
— 3D — bs - ASCE — bs - FEA



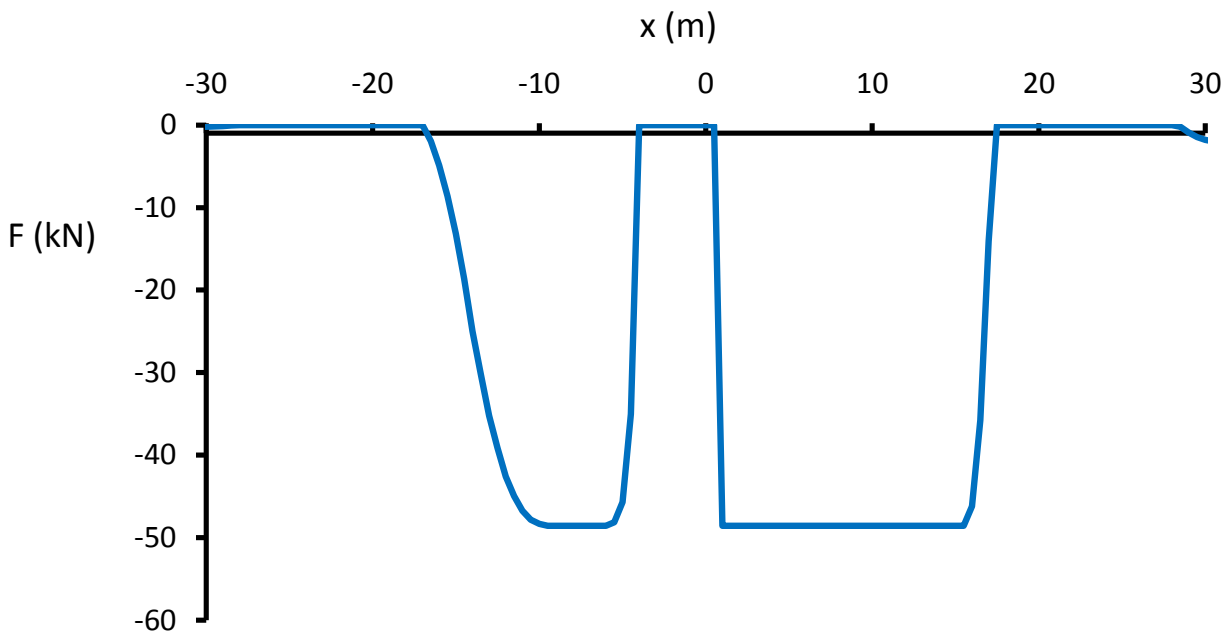
(δ)



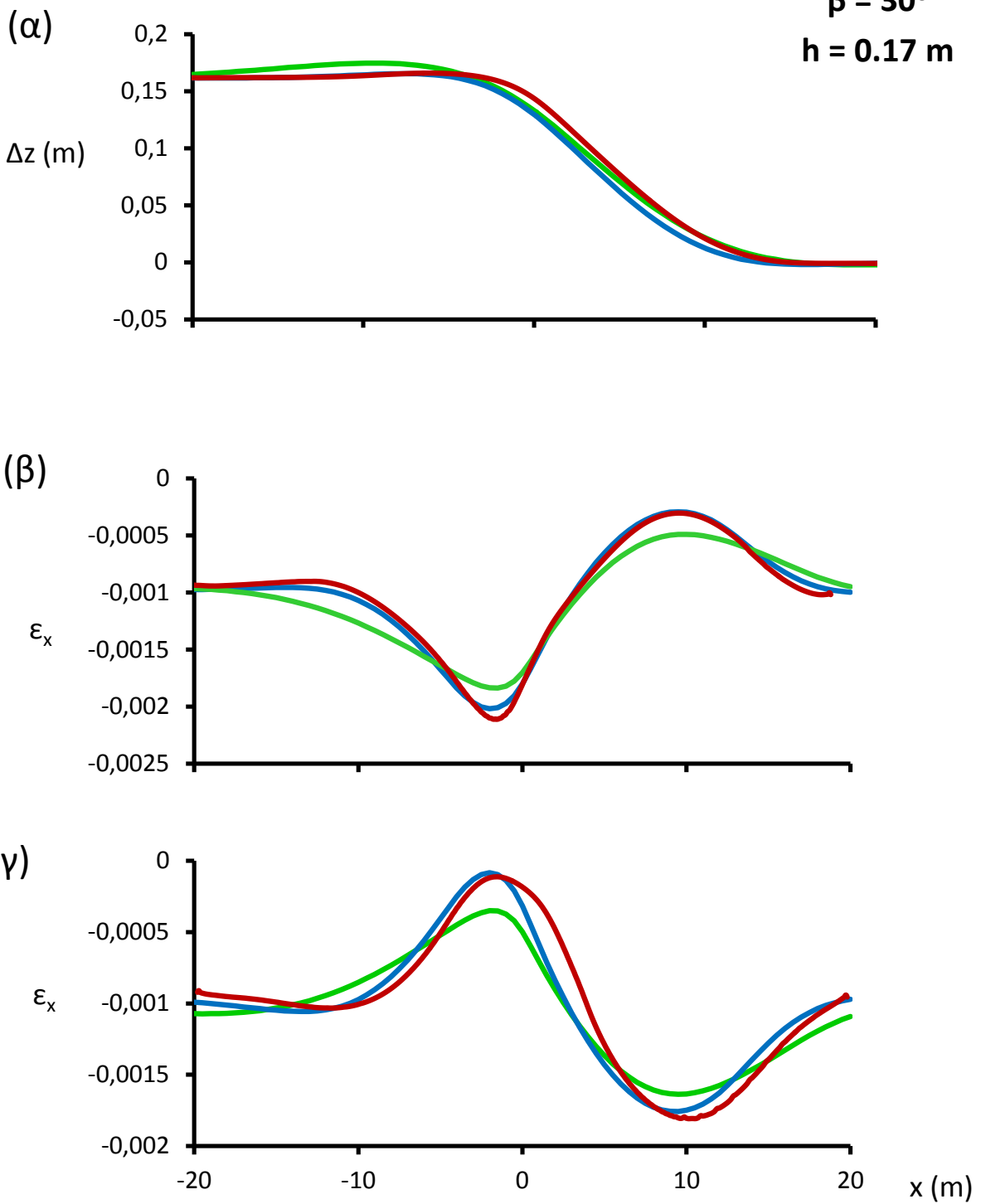
Σχήμα 5.1.9 (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για κανονικό ρήγμα γωνίας $\beta=60^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την (β) κάτω ίνα και (γ) άνω ίνα (δ) οι αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού στο πλήρως αριθμητικά συζευγμένο προσομοίωμα.



Σχήμα 5.2.1 κατακόρυφα ελατήρια προς τα κάτω σε ανάστροφο ρήγμα. Το μήκος που ενεργοποιούνται και για τις δύο εξεταζόμενες γωνίες ρήγματος είναι 4.5 m περίπου. Παρατηρείται πως η οριακή τιμή επικρατεί τοπικά και σ αυτή την περίπτωση.

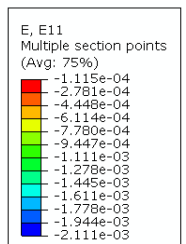


Σχήμα 5.2.2 κατακόρυφα ελατήρια προς τα κάτω σε ανάστροφο ρήγμα. Το μήκος που ενεργοποιούνται και για τις δύο εξεταζόμενες γωνίες ρήγματος είναι 15 m περίπου δεξιά του ρήγματος και 5 m από δεξιά.



— 3D — bs - ASCE — bs - FEA

(δ)

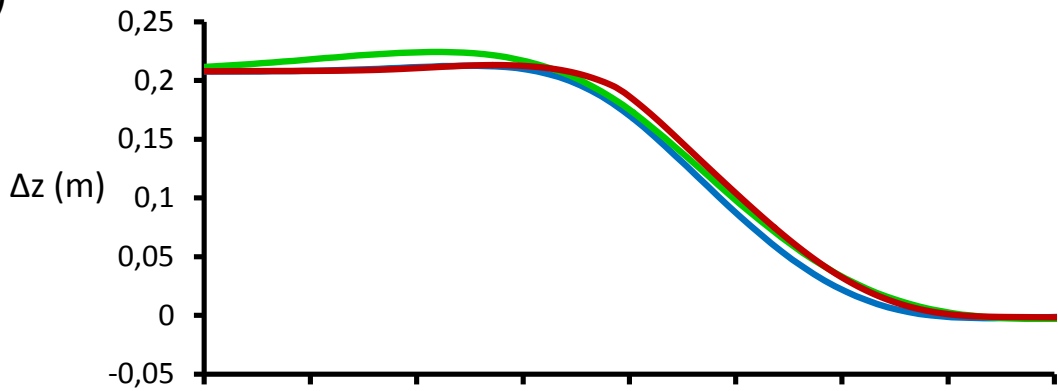


Σχήμα 5.2.3 (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για ανάστροφο ρήγμα γωνίας $\beta=30^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την **(β)** κάτω ίνα και **(γ)** άνω ίνα **(δ)** οι αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού στο πλήρως αριθμητικά συζευγμένο προσομοίωμα.

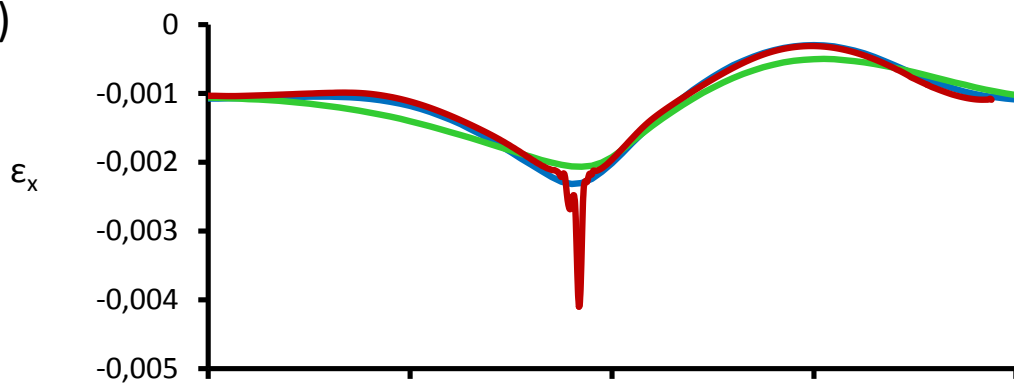
$$\beta = 30^\circ$$

$$h = 0.21 \text{ m}$$

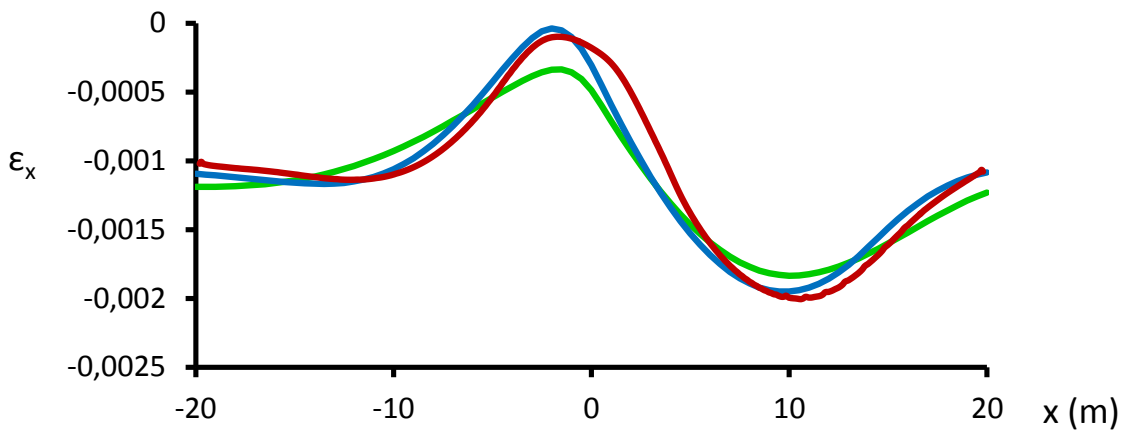
(α)



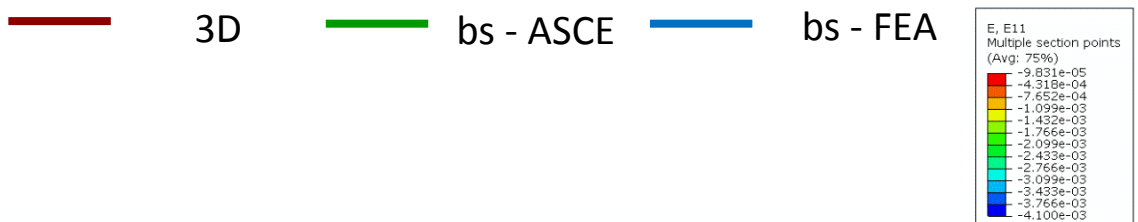
(β)



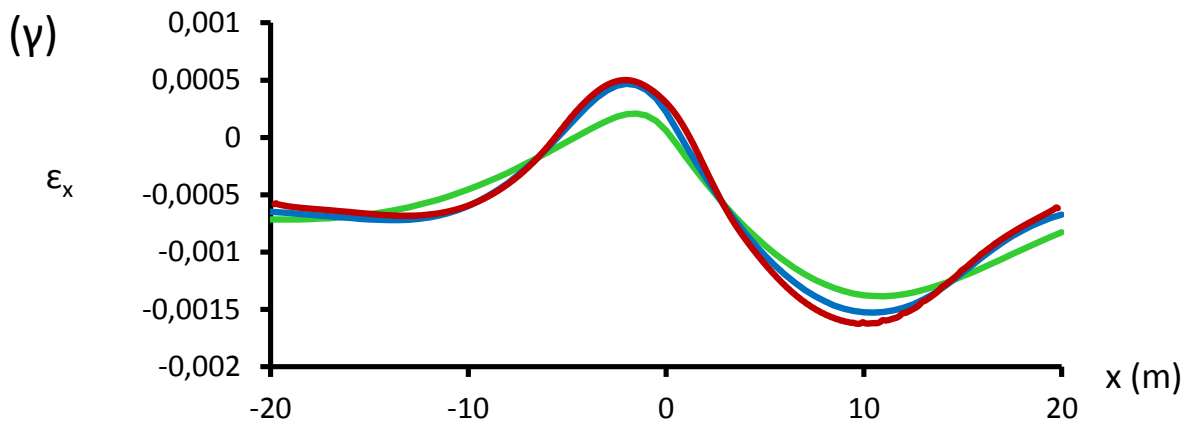
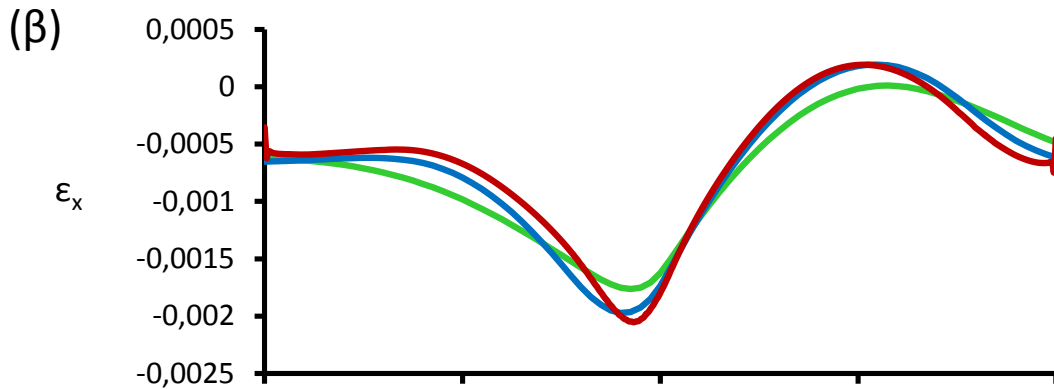
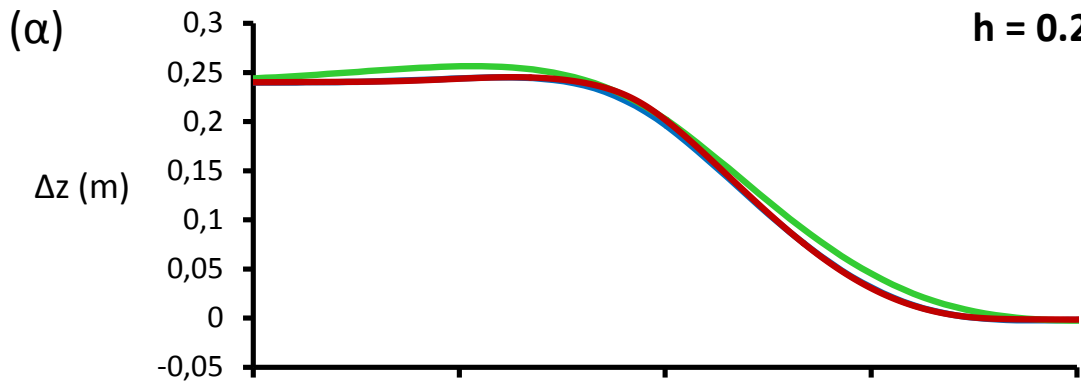
(γ)



(δ)

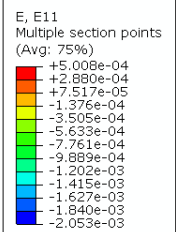


Σχήμα 5.2.4 (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για ανάστροφο ρήγμα γωνίας $\beta=30^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την **(β)** κάτω ίνα και **(γ)** άνω ίνα **(δ)** οι αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού στο πλήρως αριθμητικά συζευγμένο προσομοίωμα.

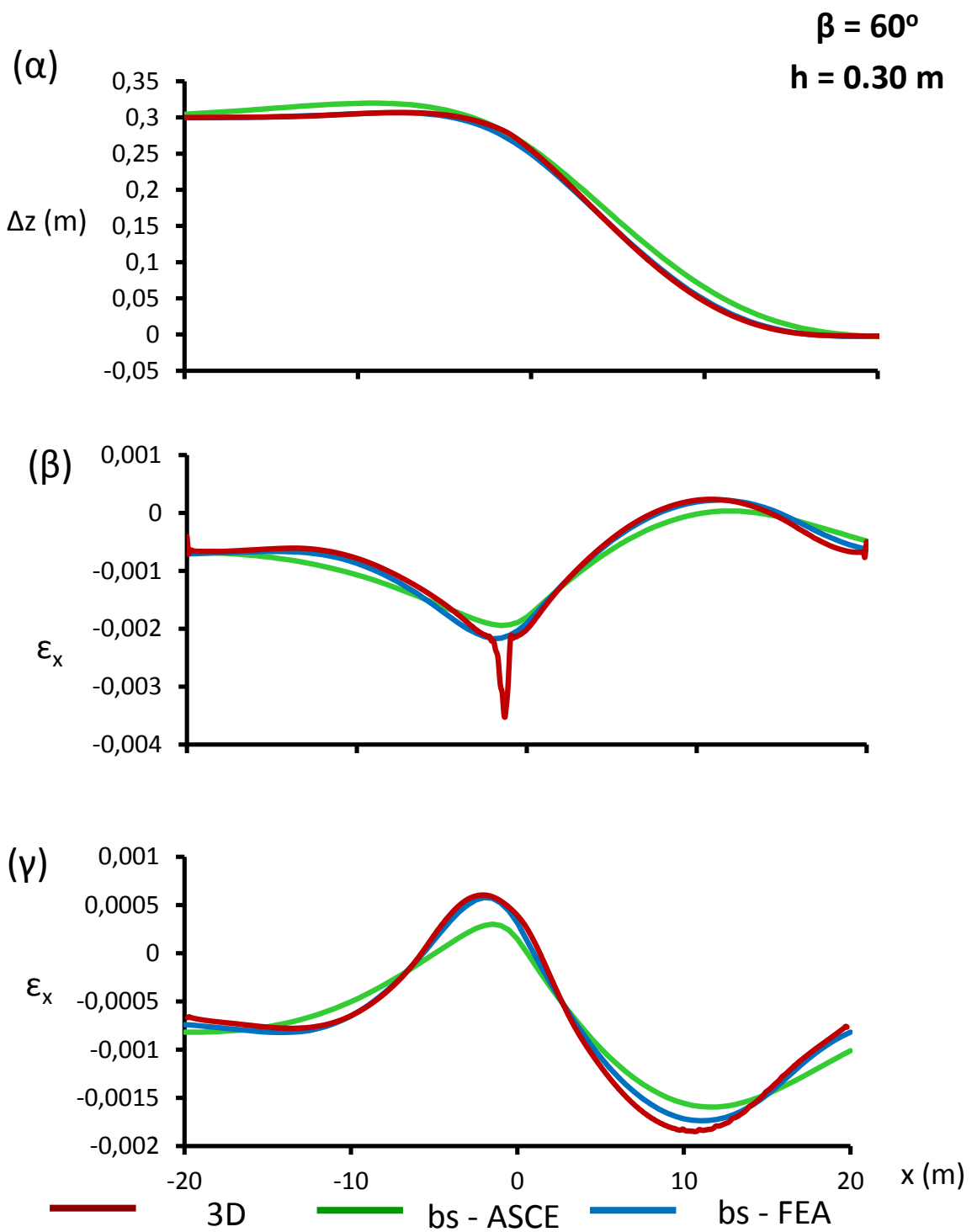
$\beta = 60^\circ$ $h = 0.24 \text{ m}$ 

— 3D — bs - ASCE — bs - FEA

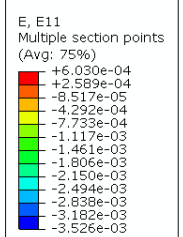
(δ)



Σχήμα 5.2.5 (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για ανάστροφο ρήγμα γωνίας $\beta=60^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την (β) κάτω ίνα και (γ) άνω ίνα (δ) οι αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού στο πλήρως αριθμητικά συζευγμένο προσομοίωμα.



(δ)



Σχήμα 5.2.6 (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για ανάστροφο ρήγμα γωνίας $\beta=60^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την **(β)** κάτω ίνα και **(γ)** άνω ίνα **(δ)** οι αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού στο πλήρως αριθμητικά συζευγμένο προσομοίωμα.

6^ο Κεφάλαιο

*Πρόταση Υβριδικής Μεθοδολογίας Σχεδιασμού
Αγωγών σε Κανονικό Ρήγμα*

6 Πρόταση Υβριδικής Μεθοδολογίας Σχεδιασμού Αγωγών σε Κανονικό Ρήγμα

Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο συγκρίθηκε το πλήρως συζευγμένο αριθμητικό προσομοίωμα με ένα πιο απλοποιημένο μοντέλο, το ελατηριωτό. Τα νέα προτεινόμενα ελατήρια φαίνεται να προσεγγίζουν καλύτερα την συμπεριφορά του αγωγού σε σύγκριση με αυτά του Αμερικάνικου Κανονισμού. Για το ανάστροφο ρήγμα, το ελατηριωτό προσομοίωμα με τα προτεινόμενα ελατήρια της παρούσας εργασίας δίνει μια αρκετά ικανοποιητική εικόνα και σχεδόν ίδια με το τρισδιάστατο προσομοίωμα. Για το κανονικό ρήγμα, όμως, αυτό δεν συμβαίνει, διότι το κανονικό ρήγμα είναι σαν ένα φαινόμενο «εφελκυσμού» κοντά στην περιοχή του ρήγματος **Σχήμα 6.1** με αποτέλεσμα το έδαφος στην εγγύς περιοχή του ρήγματος να χάνει την φέρουσα ικανότητά του. Για τον λόγο αυτό προτείνεται, μια απομείωση της δύναμης των κατακόρυφων ελατηρίων προς τα κάτω σε εκείνη την περιοχή.

Ανάπτυξη πρότασης

Από το προηγούμενο κεφάλαιο, παρατηρείται πως στο ελατηριωτό προσομοίωμα ο αγωγός δεν έχει τις αξονικές παραμορφώσεις που παρουσιάζονται στο τρισδιάστατο προσομοίωμα. Τόσο οι τιμές είναι προσαυξημένες για μεγάλες κατακόρυφες μετατοπίσεις διάρρηξης, αλλά κι η μέγιστη αξονική παραμόρφωση φαίνεται να παρουσιάζεται πιο κοντά στο ρήγμα, πράγμα που δεν συμβαίνει στο πλήρως συζευγμένο. Επιπλέον, από το διάγραμμα που απεικονίζει την θέση του ρήγματος φαίνεται ο αγωγός να μετακινείται λιγότερο στην κατακόρυφη διεύθυνση, όχι όμως λιγότερο κι από αυτόν στον οποίο τα ελατήρια είναι του Αμερικάνικου Κανονισμού.

Αρχικώς, εξετάστηκε η εξέλιξη της αντιδράσης του εδάφους λόγω μετακίνησης του αγωγού στην προς τα κάτω διεύθυνση, στην μισή περίμετρο του αγωγού. Η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων φαίνεται στο **Σχήμα 6.2**. Το ολοκληρωμα των κατακόρυφων τάσεων του εδάφους το οποίο βρίσκεται κάτω από την ημιπερίμετρο του αγωγού δίνουν την

κατακόρυφη αντίδραση του εδάφους προς τα κάτω **Σχήμα 6.3**. Η δύναμη αυτή για το ελατηριωτό προσομοίωμα είναι ανάλογη της αντίδρασης των κατακόρυφων ελατηρίων προς τα κάτω **Σχήμα 6.4**. Ας σημειωθεί ότι για το τρισδιάστατο προσομοίωμα για $h=0$ m η δύναμη είναι 50 kN, λόγω των αρχικών γεωστατικών συνθηκών. Η τιμή 50 δείχνει απλή επαφή αγωγού – εδάφους. Όταν μηδενίζεται σημαίνει ότι υπάρχει αποκόλληση κι όταν είναι μεγαλύτερη από 50 δηλώνει συμπίεση εδάφους. Παρατηρείται πως στο τρισδιάστατο προσομοίωμα το έδαφος δεν φτάνει στην μέγιστη φέρουσα ικανότητά του· στο σύστημα έδαφος – αγωγός, αστοχεί πρώτα ο αγωγός. Ακόμη και για μικρές μετακινήσεις ρήγματος, η αντίδραση του εδάφους είναι μικρότερη, από αυτή που φαίνεται να είναι στο ελατηριωτό. Επιπλέον, η θέση που εμφανίζεται η μέγιστη δύναμη, φαίνεται να είναι απομακρυσμένη από το ρήγμα εκτός από απομειωμένη **Σχήμα 6.5**. Με την γνωστή μέθοδο trial and error προτείνεται μια απομείωση της δύναμης των κατακόρυφων ελατηρίων προς τα κάτω, κοντά στο ρήγμα, από την μεριά φυσικά που ενεργοποιούνται, δηλαδή από εκεί που το έδαφος δεν μετακινείται. Το συνολικό μήκος της απομείωσης είναι περίπου 5.5 m **Σχήμα 6.6**.

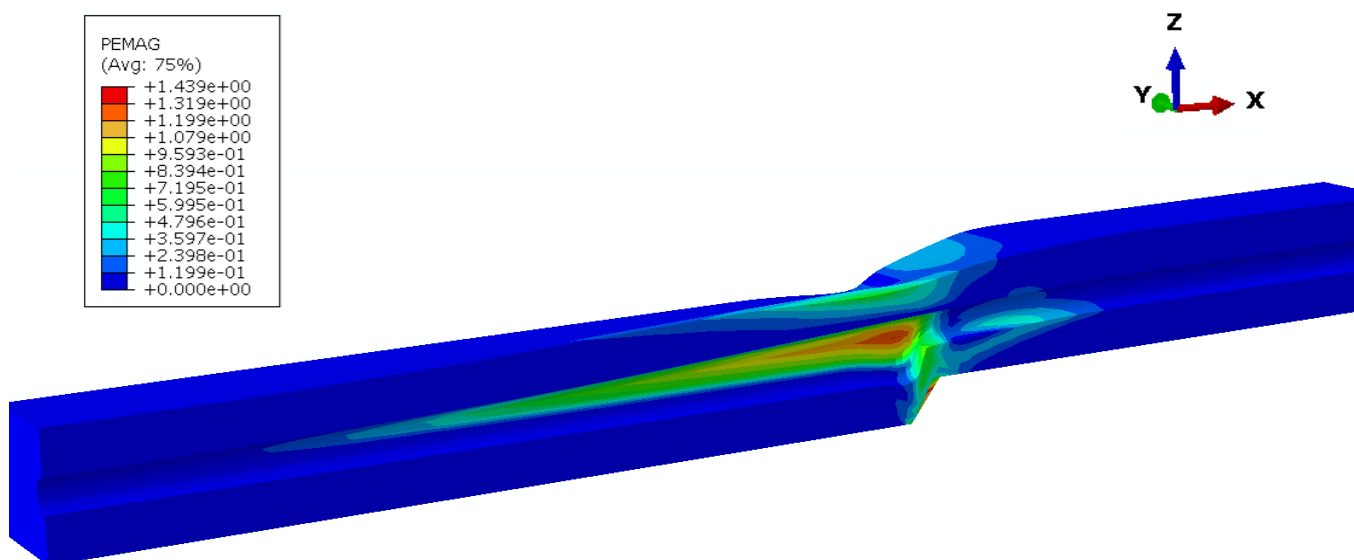
Με την προτεινόμενη απομείωση παρατηρείται πως οι δυνάμεις για δύο χαρακτηριστικές μετακινήσεις ανταποκρίνονται αρκετά ικανοποιητικά σε σύγκριση με την αριθμητική ανάλυση **Σχήμα 6.7**. Όπως στο προηγούμενο κεφάλαιο έτσι κι εδώ εξετάζεται αμμώδες έδαφος με $\phi = 30$ μοίρες για γωνίες ρήγματος 30 και 60 μοιρών. Για το ρήγμα με γωνία 60 μοίρες φαίνεται η σύγκριση για τρεις χαρακτηριστικές μετατοπίσεις ($h = 0.30, 0.52$ & 1.18 m) **Σχήμα 6.8 – 6.10**. Ως προς την θέση της μέγιστης παραμόρφωσης, αλλά κι ως προς την τιμή της η εικόνα φαίνεται πως είναι αρκετά ικανοποιητική. Η ίδια απομείωση εφαρμόζεται και για ρήγμα 30 μοιρών. Κι σ αυτήν την περίπτωση παρουσιάζονται 3 χαρακτηριστικές κατακόρυφες μετατοπίσεις, όπου και στις τρεις η εικόνα είναι αρκετά κοντά στην πραγματική εικόνα **Σχήμα 6.11 – 6.13**.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η απομείωση δεν ισχύει μόνον για άμμο με γωνία τριβής $\phi = 30^\circ$ αλλά ισχύει και για άλλες γωνίες τριβής όπως εξετάσθηκε για διάφορες κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος. Παρουσιάζεται και μια πιο πυκνή $\phi=38$ μοίρες **Σχήμα 6.15**. Η απομείωση αυτή, δηλαδή ισχύει για αμμώδεις σχηματισμούς, λόγω του ότι η άμμος είναι ένα μη συνεκτικό υλικό το οποίο δεν μπορεί να παραλάβει εφελκυσμό. Αποτέλεσμα αυτού είναι

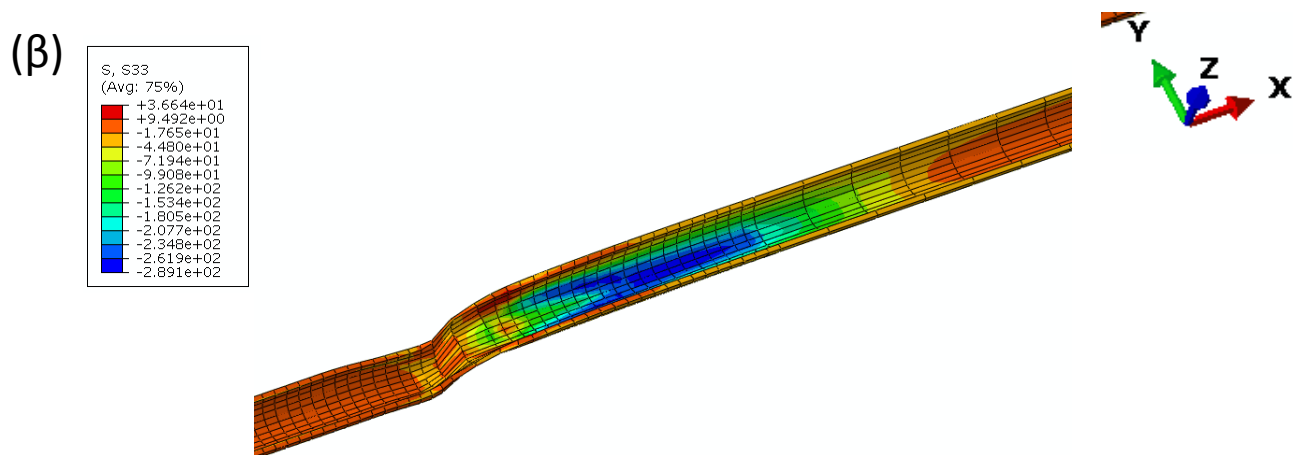
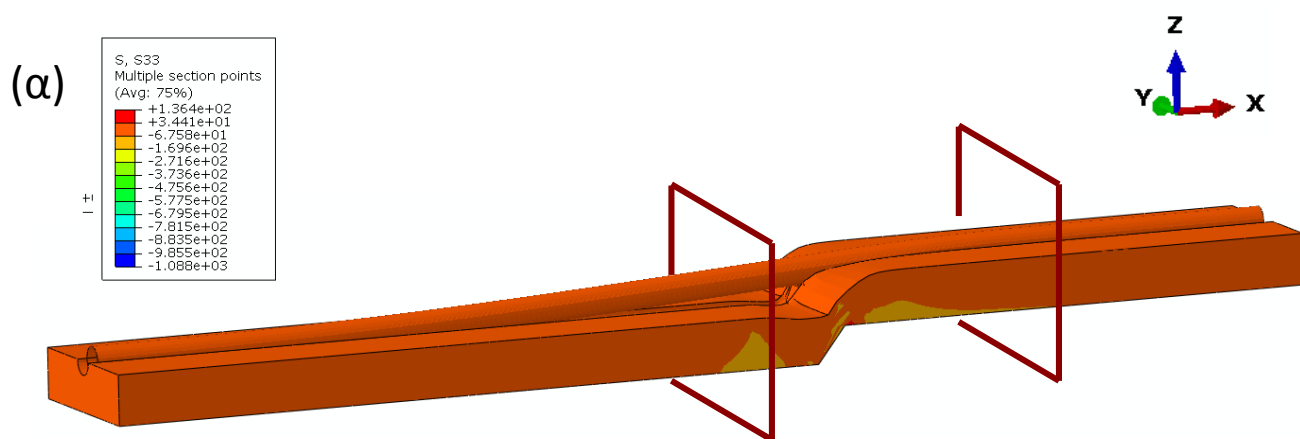
να χάνει την φέρουσα ικανότητά του κι έτσι έχει μια απομειωμένη αντοχή για την παραλαβή κατακόρυφων φορτίων.

6^ο Κεφάλαιο: Σχήματα

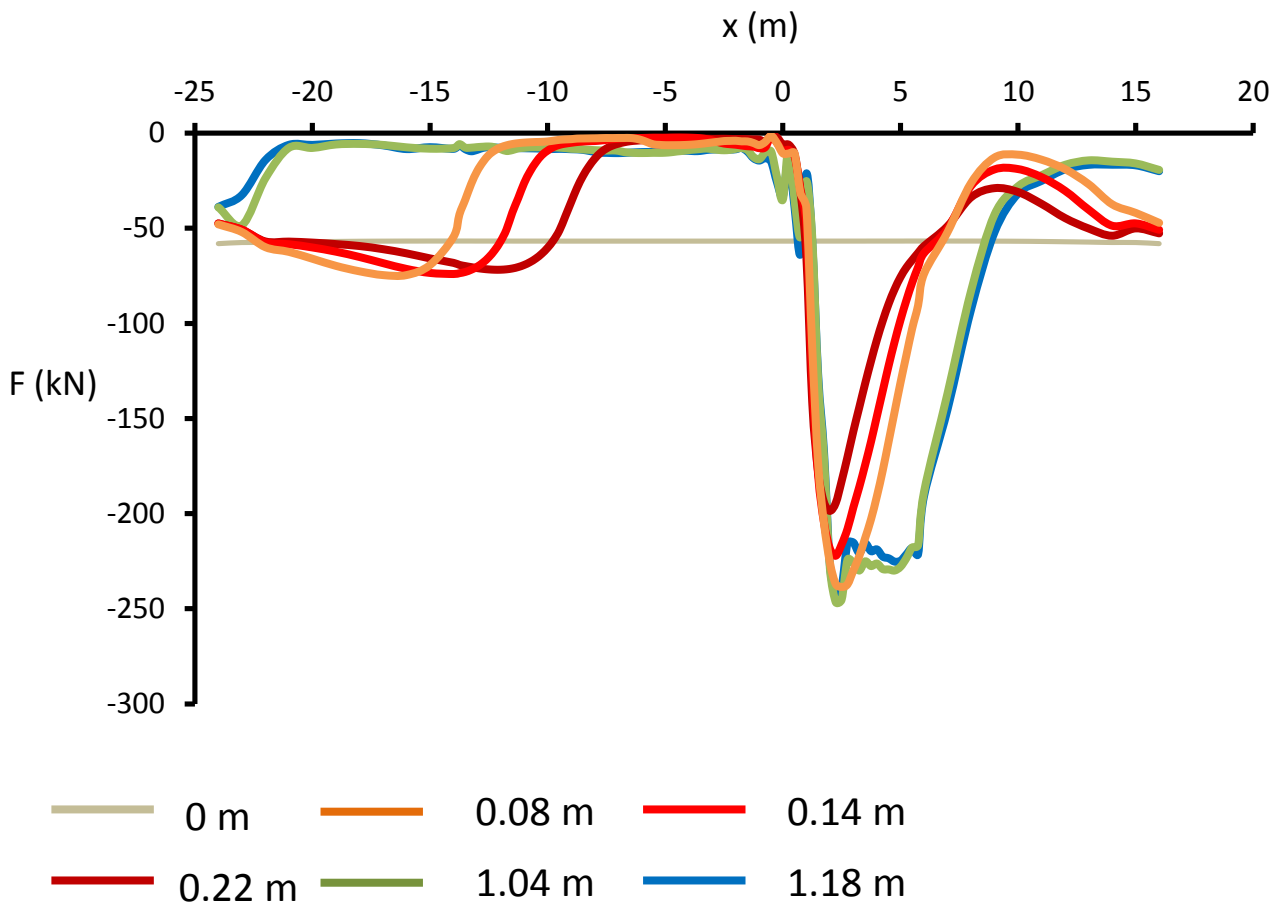
*Πρόταση υβριδικής μεθοδολογίας σχεδιασμού
για το κανονικό ρήγμα*



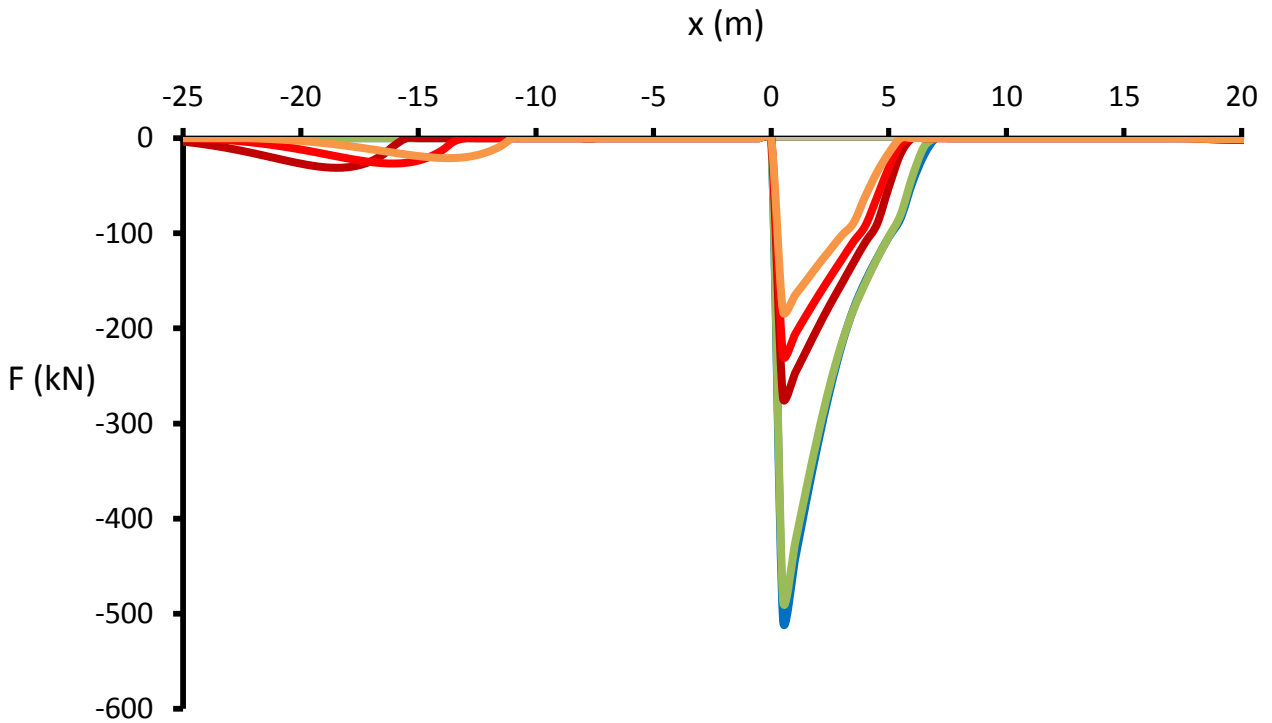
Σχήμα 6.1 Η παραμορφωμένη εικόνα του εδάφους σε κανονικό ρήγμα. Κοντά στο ρήγμα είναι εμφανής η μεγάλη παραμόρφωση του.



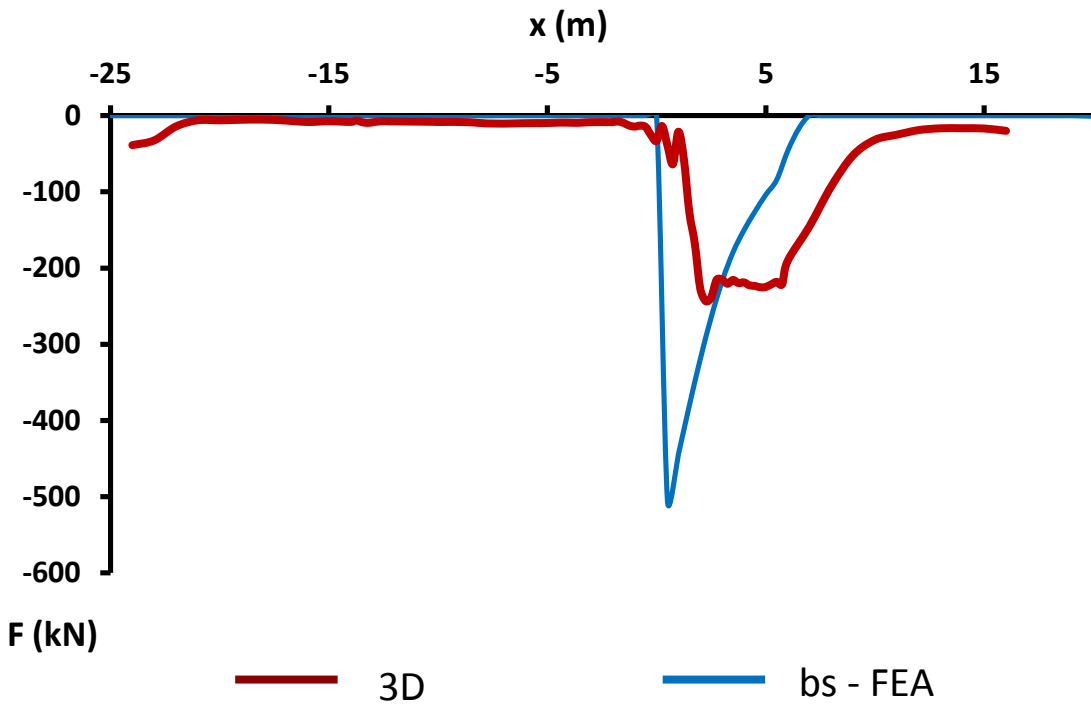
Σχήμα 6.2 (α) Οι κατακόρυφες τάσεις στον αγωγό και στο έδαφος **(β)** λεπτομέρεια επιφάνειας εδάφους κάτω από τον αγωγό με τις κατακόρυφες τάσεις.



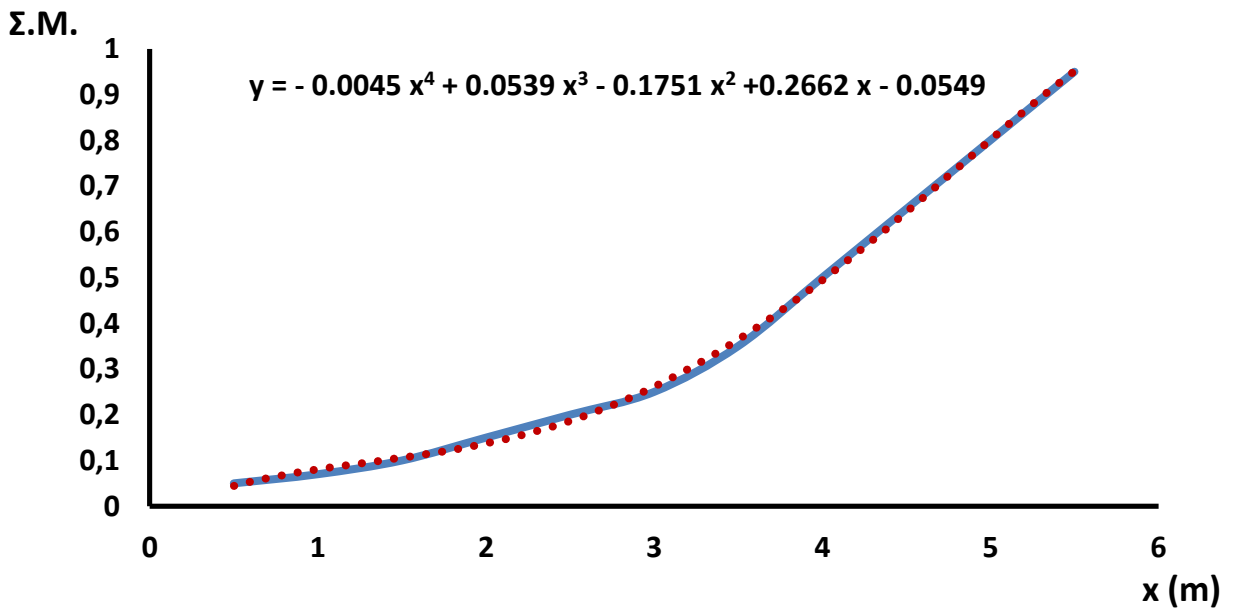
Σχήμα 6.3 Η κατακόρυφη αντίδραση του εδάφους στον αγωγό για διαφορετικά h για άμμο με $\phi=30^\circ$ σε κανονικό ρήγμα γωνίας $\beta=60^\circ$.



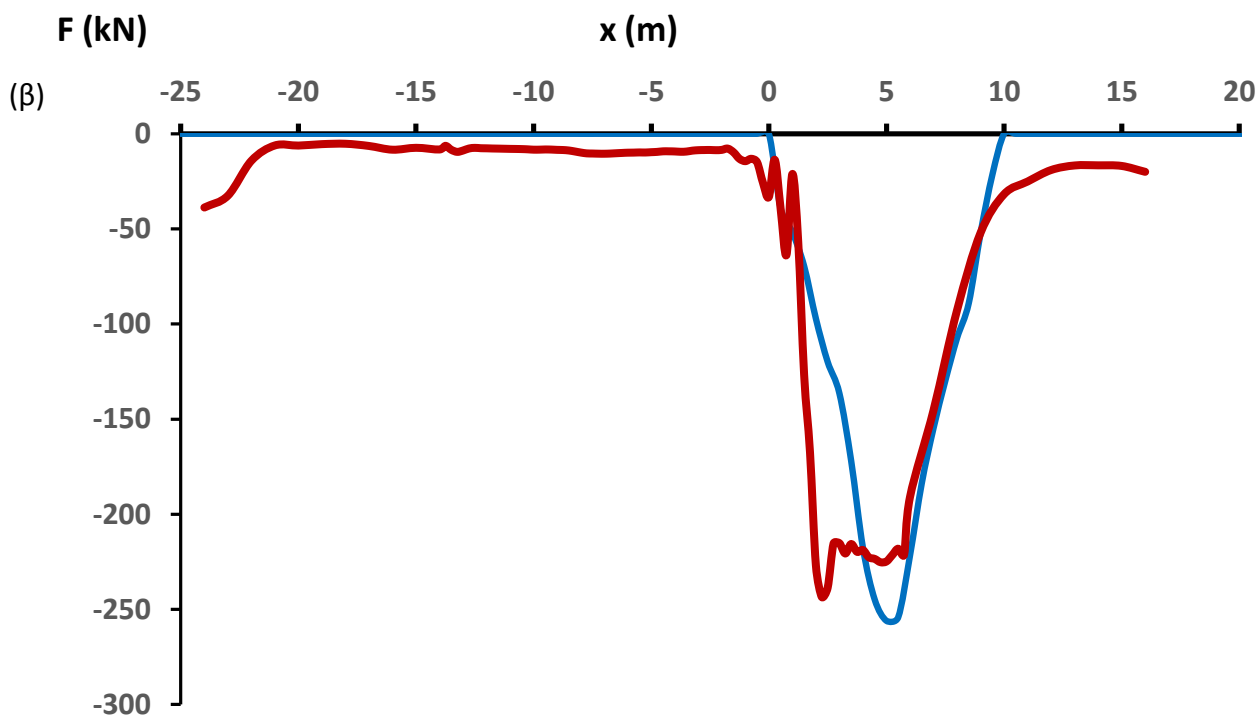
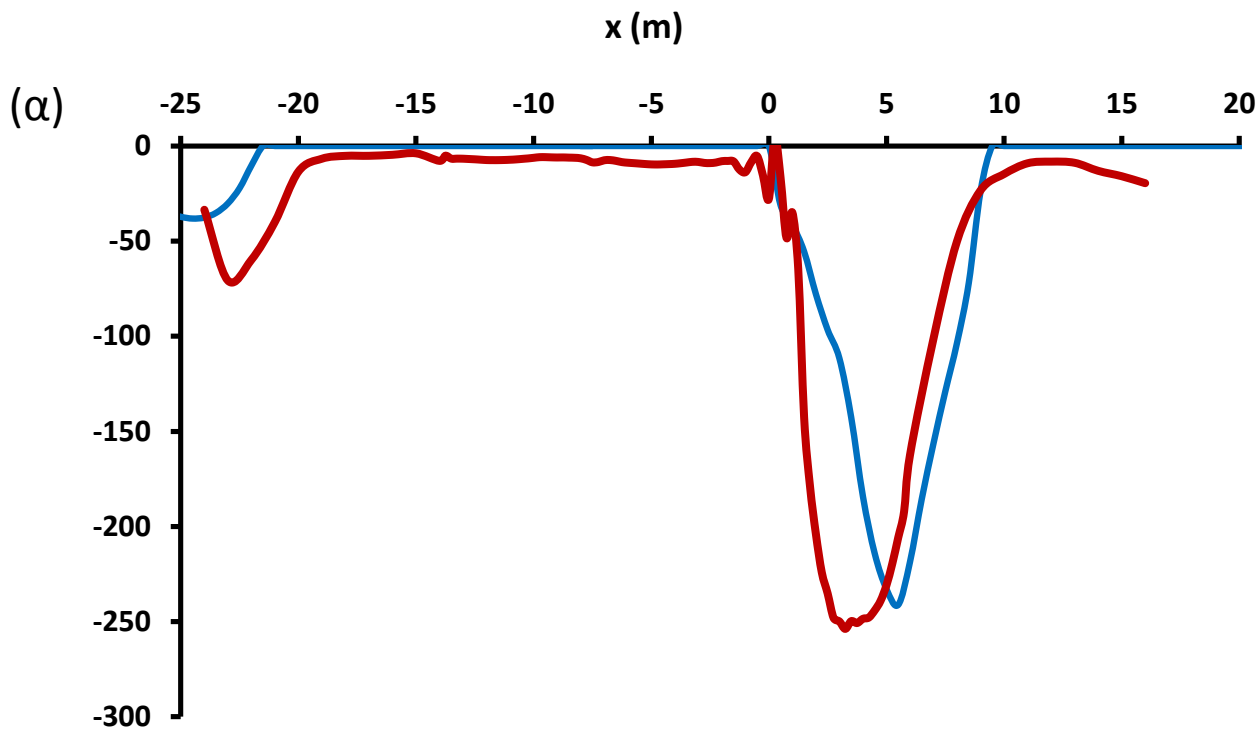
Σχήμα 6.4 Η δύναμη των κατακόρυφων ελατηρίων προς τα κάτω για διαφορετικά h για άμμο με $\phi=30^\circ$ σε κανονικό ρήγμα γωνίας $\beta=60^\circ$.



Σχήμα 6.5 Η δύναμη των κατακόρυφων ελατηρίων προς τα κάτω με την αντίδραση του εδάφους από την τρισδιάστατη ανάλυση για $h = 1.18$ m.

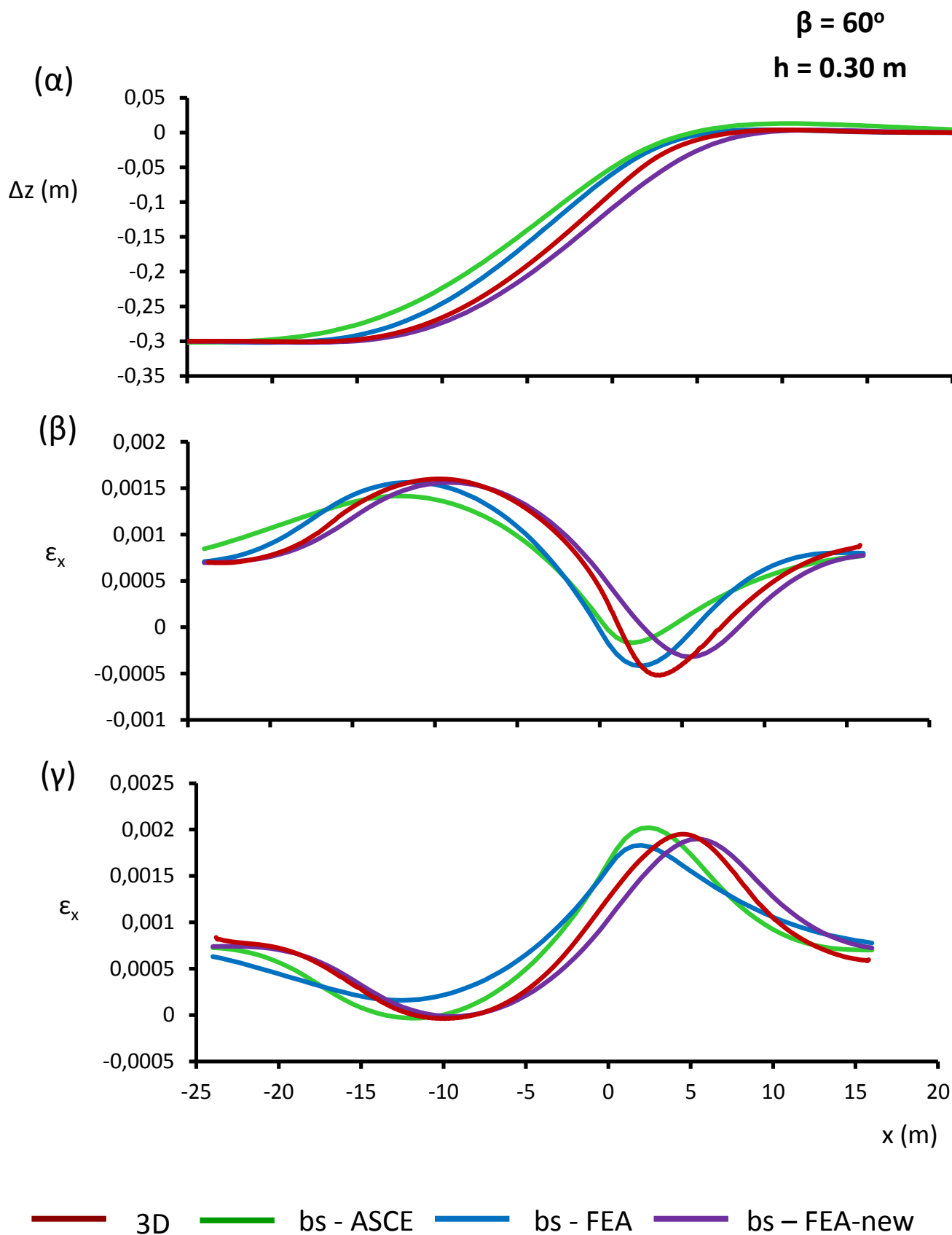


Σχήμα 6.6 Ο προτεινόμενος συντελεστής μείωσης συναρτήσει της απόστασης από το ρήγμα για τα κατακόρυφα ελατήρια προς τα κάτω.

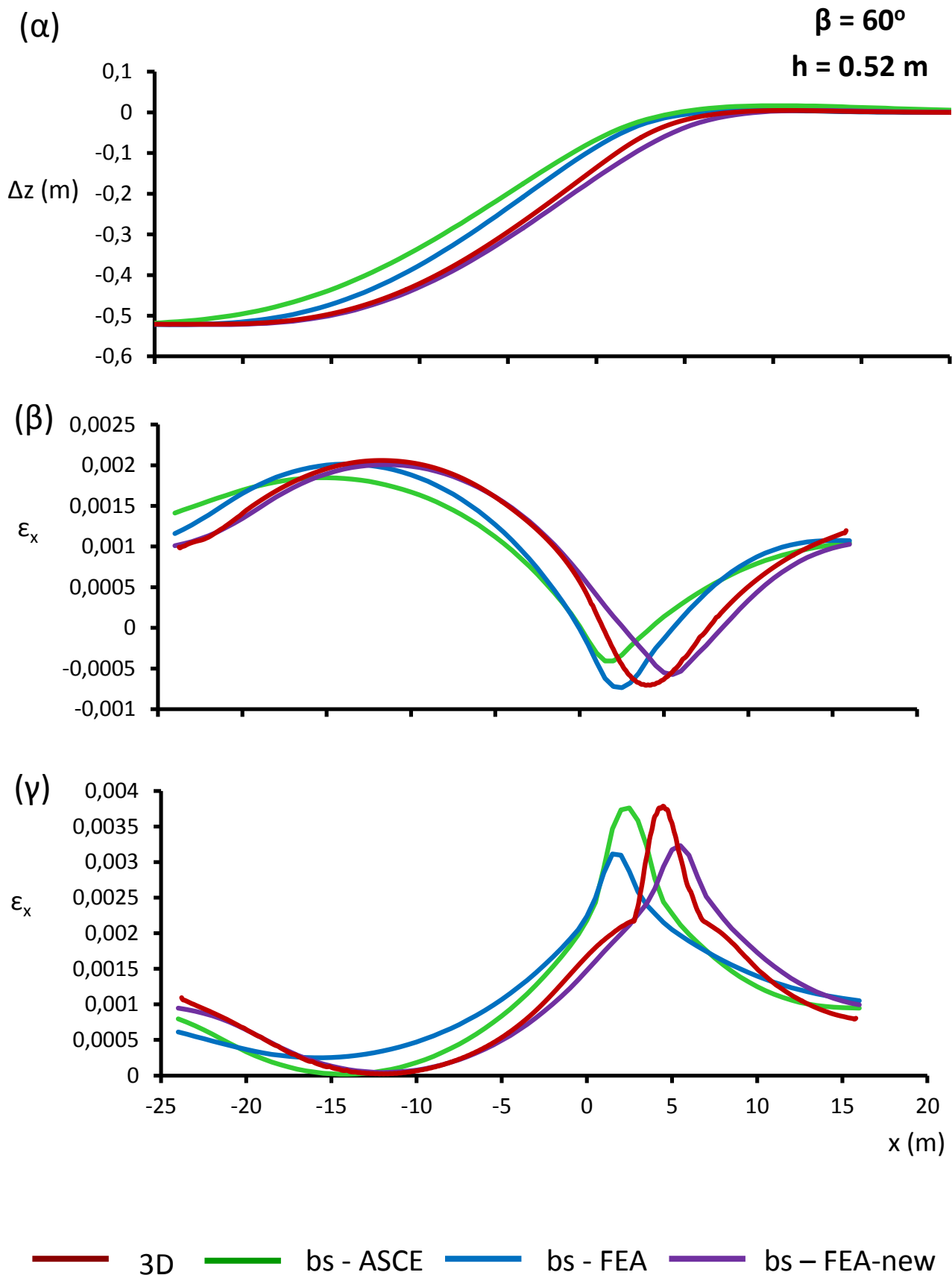


— 3D — bs – FEA-new

Σχήμα 6.7 Σύγκριση κατακόρυφων δυνάμεων της συζευγμένης αριθμητικής ανάλυσης με την υβριδική πρόταση για **(α)** $h = 0.7 \text{ m}$ **(β)** $h = 1.18 \text{ m}$

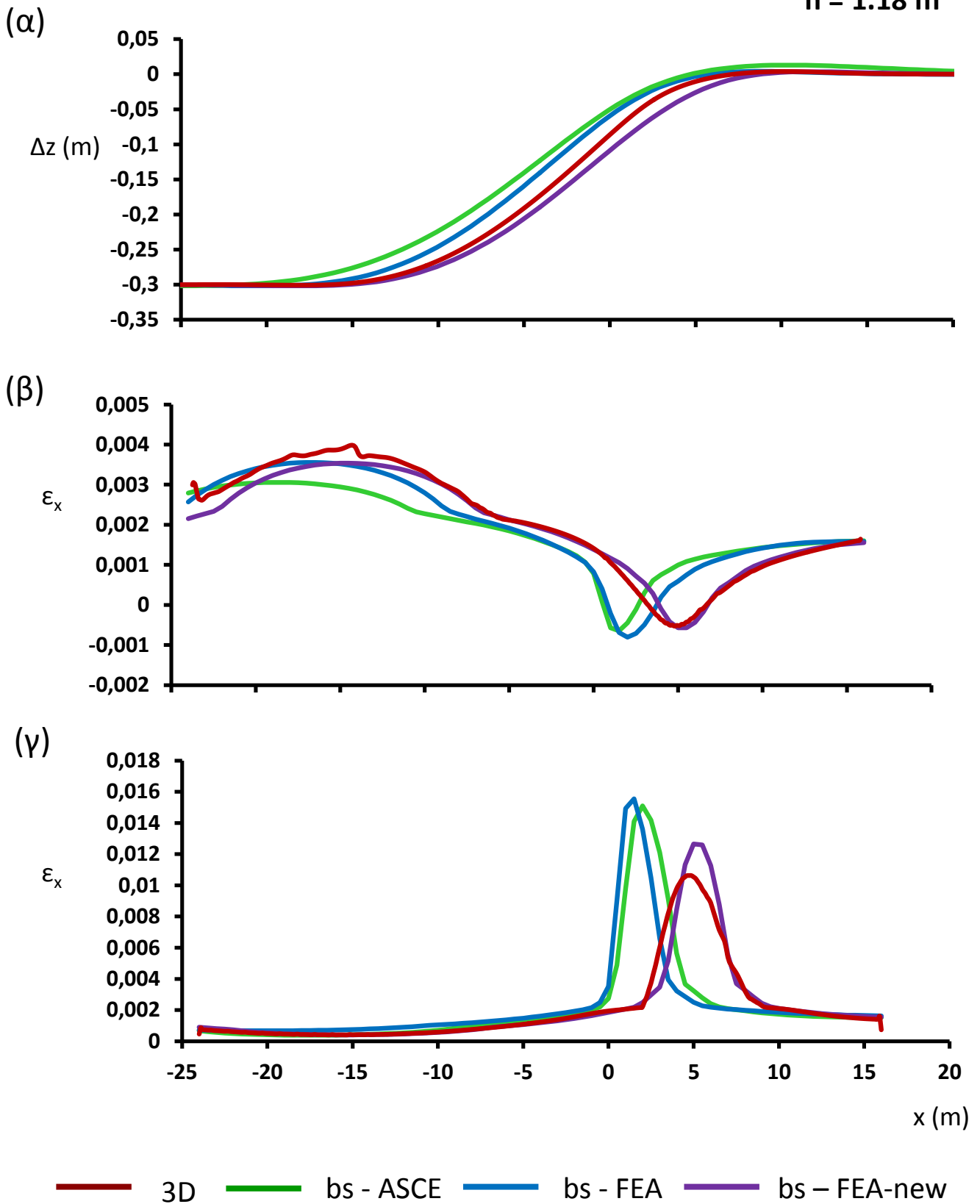


Σχήμα 6.8 (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για κανονικό ρήγμα γωνίας $\beta=60^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την (β) κάτω ίνα και (γ) άνω ίνα



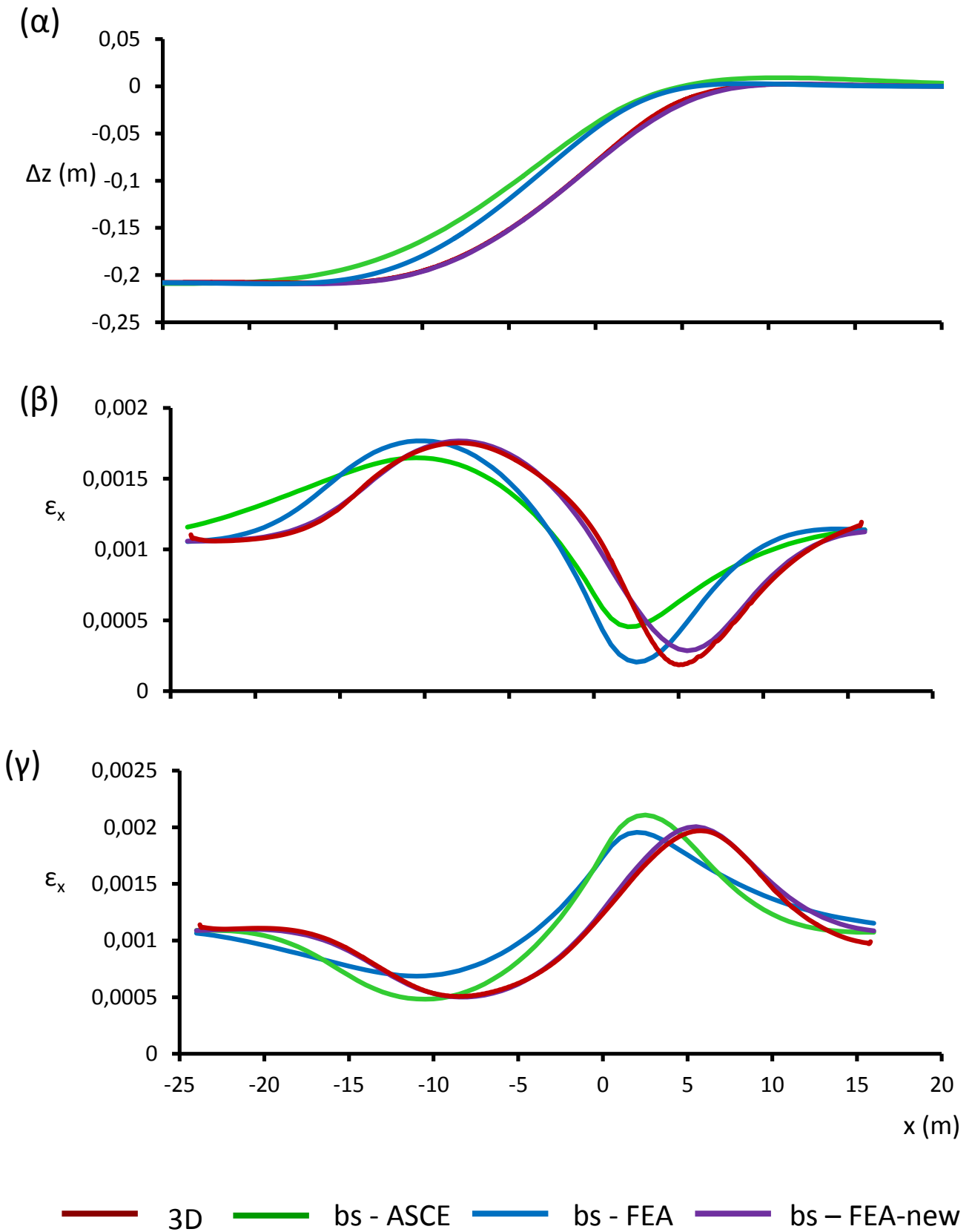
Σχήμα 6.9 (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για κανονικό ρήγμα γωνίας $\beta=60^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την (**β**) κάτω ίνα και (**γ**) άνω ίνα

$\beta = 60^\circ$
 $h = 1.18 \text{ m}$



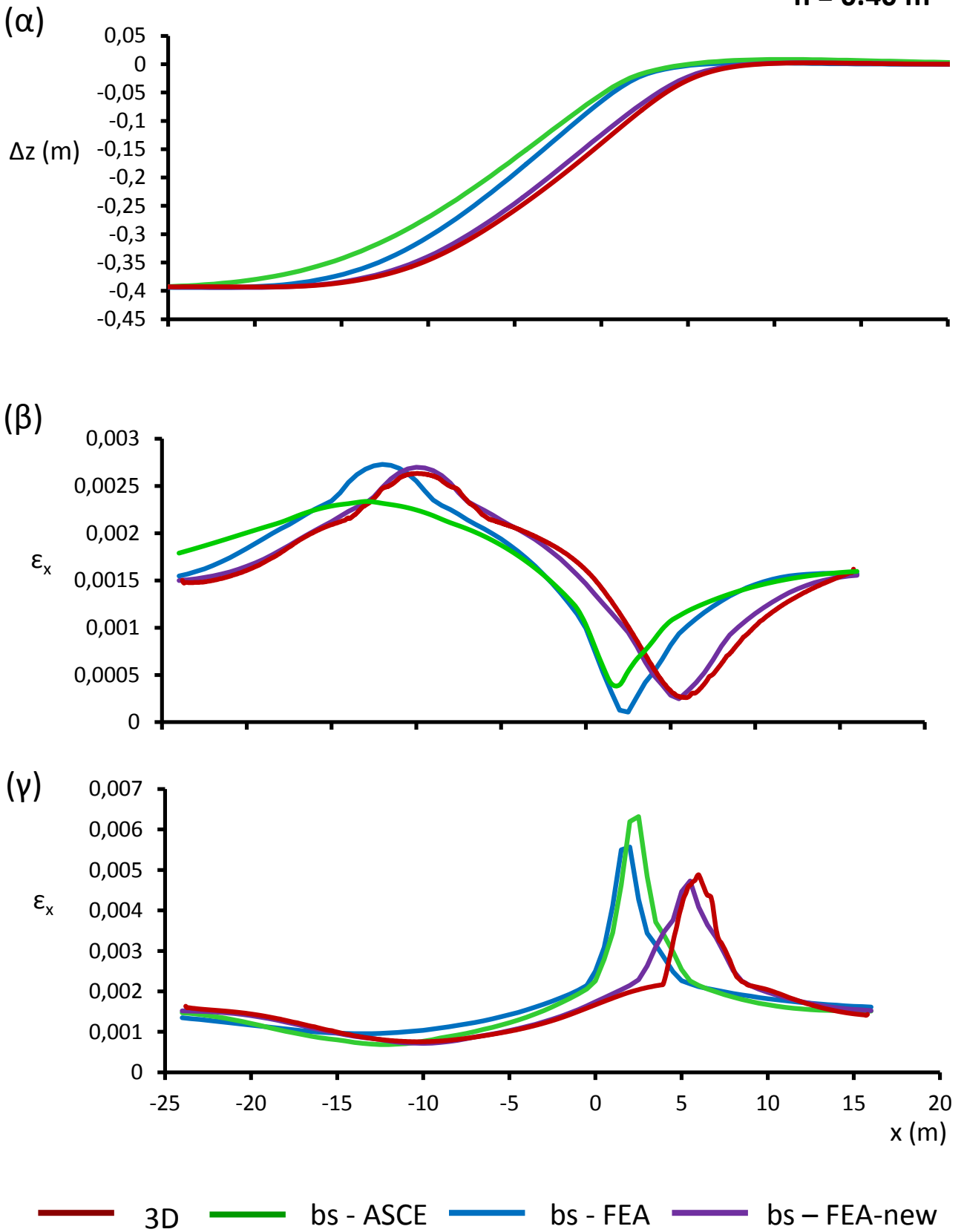
Σχήμα 6.10 (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για κανονικό ρήγμα γωνίας $\beta=60^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την **(β)** κάτω ίνα και **(γ)** άνω ίνα

$\beta = 30^\circ$
 $h = 0.20 \text{ m}$



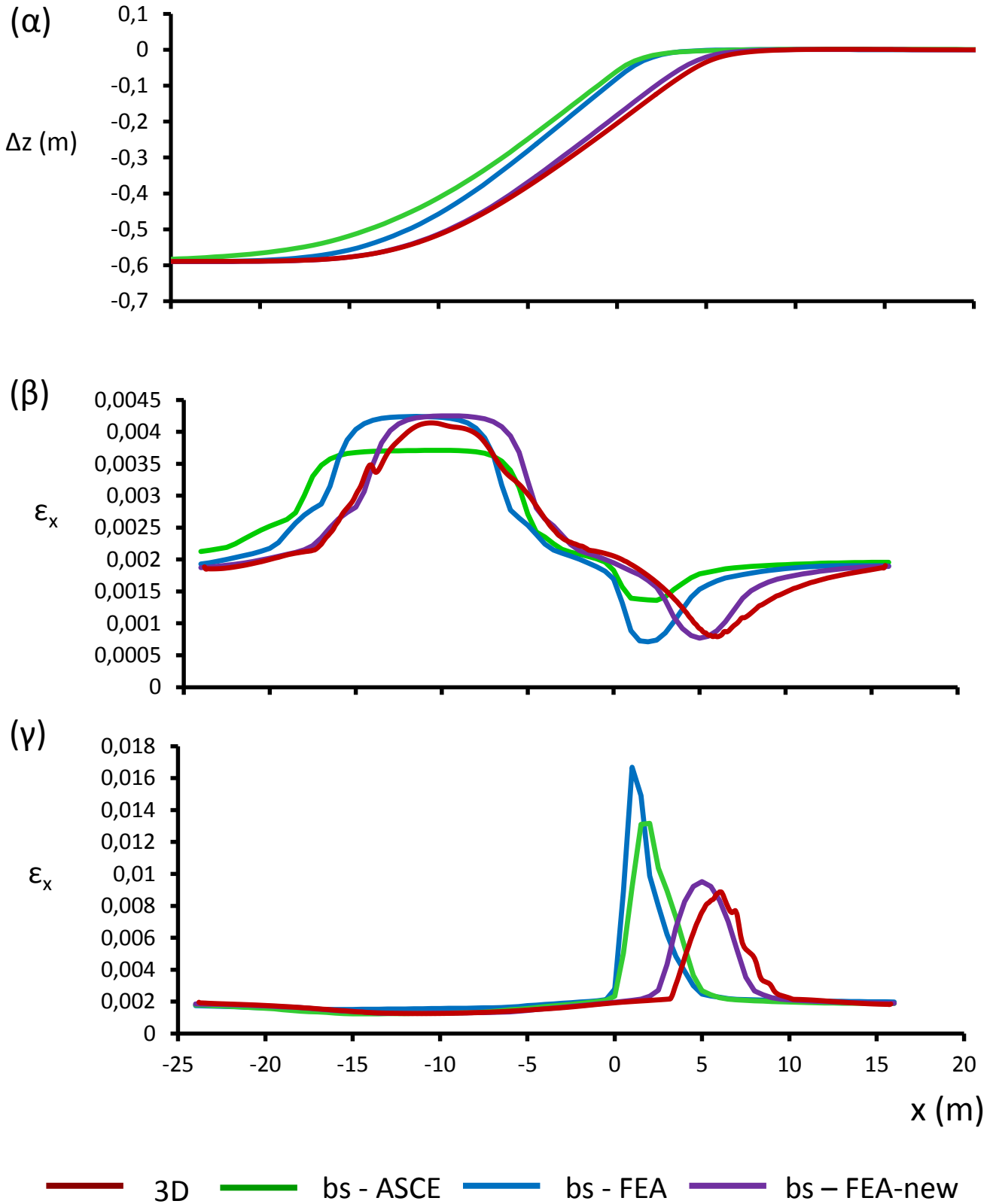
Σχήμα 6.11 (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για κανονικό ρήγμα γωνίας $\beta=30^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την **(β)** κάτω ίνα και **(γ)** άνω ίνα

$\beta = 30^\circ$
 $h = 0.40 \text{ m}$

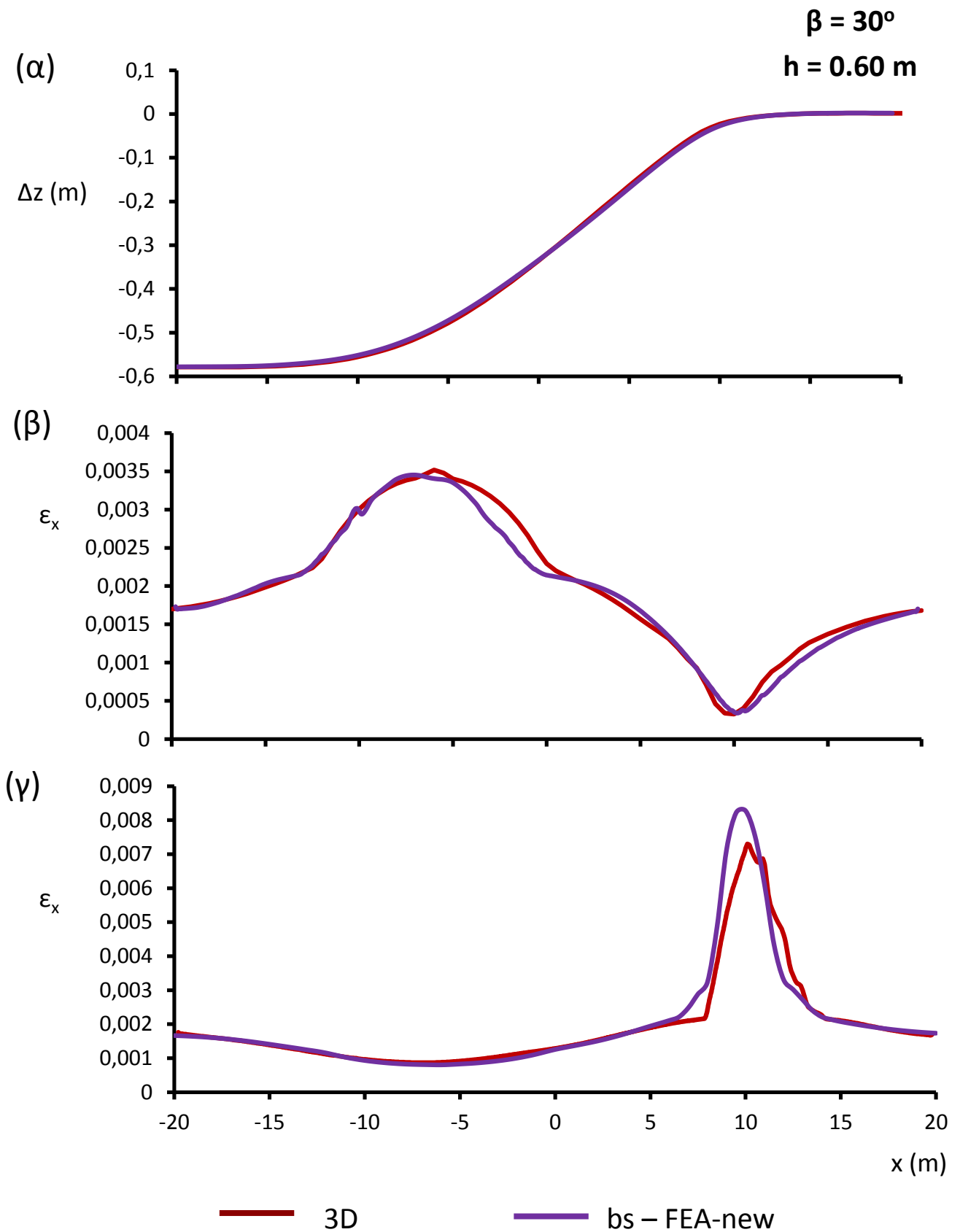


Σχήμα 6.12 (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για κανονικό ρήγμα γωνίας $\beta=30^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την **(β)** κάτω ίνα και **(γ)** άνω ίνα

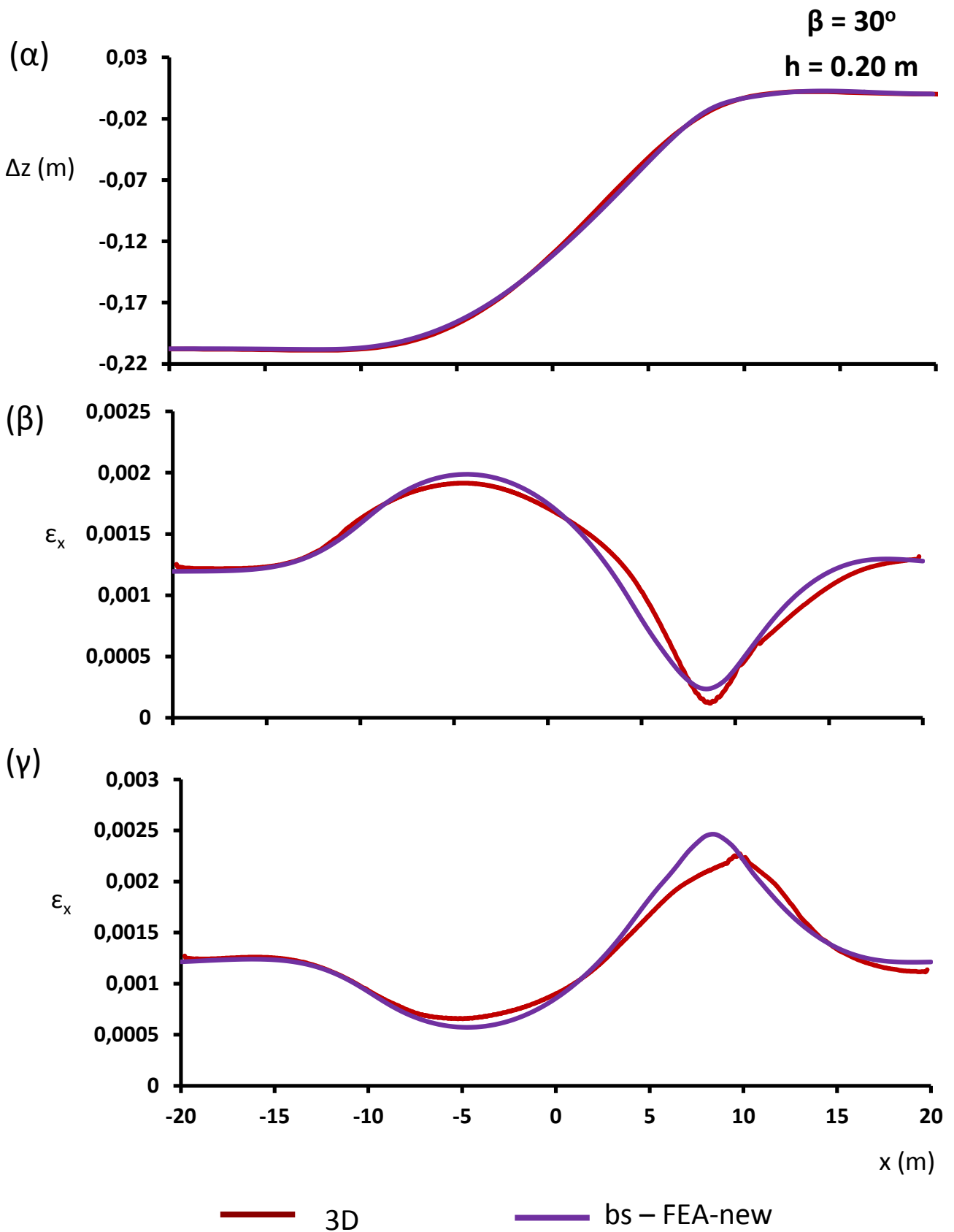
$\beta = 30^\circ$
 $h = 0.60 \text{ m}$



Σχήμα 6.13 (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για κανονικό ρήγμα γωνίας $\beta=30^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την (β) κάτω ίνα και (γ) άνω ίνα



Σχήμα 6.14 Για $\phi=25^\circ$ (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για κανονικό ρήγμα γωνίας $\beta=30^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την (β) κάτω ίνα και (γ) άνω ίνα



Σχήμα 6.15 Για $\phi=38^\circ$ (α) Η θέση του αγωγού για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος h για κανονικό ρήγμα γωνίας $\beta=30^\circ$. Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για την (β) κάτω ίνα και (γ) άνω ίνα

7^ο Κεφάλαιο

Συμπεράσματα

- 7.1 Συμπεράσματα
- 7.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

7 Συμπεράσματα

7.1 Συμπεράσματα

Ο κύριος σκοπός της εργασίας είναι να μελετηθεί μια νέα απλοποιημένη μέθοδος υπολογισμού απόκρισης υπόγειου αγωγού υποβαλλόμενου σε κανονικό κι ανάστροφο ρήγμα. Η νέα αυτή μέθοδος είναι το ελατηριωτό προσομοίωμα, στο οποίο το έδαφος προσομοιώνεται με ελατήρια κι ο αγωγός με στοιχεία δοκού (ribebeams). Κατανοώντας τις παραμέτρους οι οποίες επηρεάζουν την συμπεριφορά του αγωγού, αδιαστατοποιήθηκαν τα ελατήρια που υπολογίσθηκαν μέσα από αριθμητικές αναλύσεις και παράλληλα εξετάσθηκαν κι οι παράμετροι που λαμβάνει υπόψιν ο Αμερικάνικος Κανονισμός.

Παρουσιάζεται στην αρχή το πρόβλημα με την επίλυση του φαινομένου με πλήρως συζευγμένη αριθμητική προσομοίωση τόσο για το κανονικό όσο και για το ανάστροφο ρήγμα. Συνολικά ο αγωγός είναι 2 km και για τα δύο είδη ρήγματος σε αμμώδες έδαφος και 1 km για αργίλους. Ο αγωγός προσομοιώθηκε με κελυφωτά στοιχεία και το έδαφος με παραμορφώσιμα στοιχεία (brick elements) για 20 m εκατέρωθεν του ρήγματος. Το μήκος αυτό είναι ένας συμβιβασμός απαίτησης με δυνατότητας της ανάλυσης. Το υπόλοιπο μήκος προσομοιώνεται με ελατήρια και στοιχεία δοκού για το έδαφος και τον αγωγό αντίστοιχα. Τα ελατήρια είναι 4: αξονικά, εγκάρσια, κατακόρυφα προς τα πάνω και προς τα κάτω. Για τον σχεδιασμό υπόγειων αγωγών πρέπει να γνωρίζουμε τις αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού για χαρακτηριστικές κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος. Επιπλέον, για την κατανόηση της συμπεριφοράς του αγωγού είναι καλό να είναι γνωστή κι η θέση του αγωγού.

Εν συνεχεία, ο Αμερικάνικος Κανονισμός προτείνει κάποια ελατήρια για την προσομοίωση του εδάφους. Εξετάζονται οι παραδοχές που κάνει ο κανονισμός και φαίνεται πως είναι αντικρουόμενες μεταξύ τους για κάθε ελατήριο, καθώς δεν λαμβάνει υπόψιν κάποιες σημαντικές παραμέτρους. Για τον λόγο αυτό προτείνονται νέα ελατήρια, τόσο για άμμους όσο και για αργίλους, τα οποία έχουν κοινές παραδοχές μεταξύ τους. Τα ελατήρια αυτά αδιαστατοποιούνται ούτως ώστε να μπορούν να εφαρμοσθούν για όλους τους εδαφικούς σχηματισμούς.

Έπειτα, η απόκριση των ελατηριωτών προσομοιωμάτων συγκρίνεται με την απόκριση του πλήρως συζευγμένου αριθμητικού προσομοιώματος. Το μόντελο με τα νέα προτεινόμενα ελατήρια αντικατοπτρίζει πολύ καλά την εικόνα του τρισδιάστατου μοντέλου για το ανάστροφο ρήγμα. Για το κανονικό ρήγμα, φαίνεται τα προτεινόμενα ελατήρια να δίνουν μια καλύτερη εικόνα σε σχέση με τα προτεινόμενα του Αμερικάνικου Κανονισμού, όχι όμως πλήρως ικανοποιητική.

Το κανονικό ρήγμα είναι ένα φαινόμενο «χαλάρωσης» του εδάφους κοντά στο ρήγμα. Το έδαφος εκεί εφελκείται έντονα με αποτέλεσμα να απομειώνεται η φέρουσα ικανότητά του. Για τον λόγο αυτό, προτείνεται μια απομείωση των κατακόρυφων ελατηρίων προς τα κάτω στην εγγύς περιοχή του ρήγματος. Η απομείωση αυτή ισχύει και για ρήγμα 30 και 60 μοιρών, καθώς και για όλες τις γωνίες τριβής σε άμμους.

7.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα εργασία αφορά κυρίως σε μια απλοποιημένη επίλυση απόκρισης υπόγειου αγωγού σε κανονικό κι ανάστροφο ρήγμα. Πέραν όμως αυτού υπάρχουν κι άλλες περιπτώσεις που αξίζουν την προσοχή:

1. *Υπαρξη υδροφόρου ορίζοντα* στην επιφάνεια του εδάφους.
2. *Εξέταση εφαρμογής απλοποιημένης μεθοδολογίας σε άλλα είδη ρήγματος.* Πέραν της παρούσας εργασίας η οποία αφορά σε κανονικά κι ανάστροφα ρήγματα και πέρα από τα ρήγματα ολίσθησης, τα οποία έχουν μελετηθεί διεξοδικά, αξίζει να εξεταστούν και τα ρήγματα αποκόλλησης –ρήγμαλοξής μετατόπισης (oblique faults). Στο ρήγμα ο αγωγός έχει σχετική μετακίνηση ως προς όλες τις κύριες διευθύνσεις. Αξίζει επίσης να εξετασθεί και η επιρροή της γωνίας του ρήγματος.

3. *Το περιβάλλον έδαφος.* Η προσομοίωση έγινε με το έδαφος που περιβάλλει τον αγωγό να έχει τις ίδιες ιδιότητες με το υπόλοιπο έδαφος. Στην πραγματικότητα, όμως το έδαφος που είναι πολύ κοντά στον αγωγό είναι πολύ χαλαρότερου εδάφους κι αξίζει το πρόβλημα να προσεγγιστεί κατ' αυτόν τον τρόπο.

4. *Εφαρμογή ελατηριωτού προσομοιώματος για έδαφος με γωνία τριβής αλλά και συνοχή.* Τα εδάφη στην πραγματικότητα έχουν και κάποια συνοχή. Συνεπώς, αξίζει να μελετηθεί αν τα ελατηριωτά προσομοιώματα μπορούν να αντικατοπτρίσουν την απόκριση του αγωγού σε τέτοιους εδαφικούς σχηματισμούς

Βιβλιογραφικές παραπομπές

ABAQUS (2013): Users' Manual, Simulia, Providence, RI, USA.

Abdoun T. H., Ha, D., O'Rourke, M. J., Symans, M. D., O'Rourke, T. D., Palmer, M. C., and Stewart, H. E. (2009), "Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake faulting.", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 29, pp. 415– 427.

American Society of Civil Engineers (2009). Buried flexible steel pipe; design and structural analysis. In: Whidden WR, editor. *ASCE Manual of Practice, MOP*. p. 119.

American Society of Mechanical Engineers (2007), *Gas Transmission and Distribution Piping Systems*, ANSI/ASME B31.8.

Anastasopoulos I., Gazetas G., M. ASCE, Bransby M. F., Davies M. C. R., Nahas A. El, (2007), "Fault Rupture Propagation through Sand: Finite-Element Analysis and Validation through Centrifuge Experiments", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, p. 943-958

Anastasopoulos I., Callerio A., Bransby M. F., Davies M. C., Nahas A. El, Faccioli E., Gazetas G., Masella A., Paolucci R., Pecker A., Rossigniol E. (2008), "Numerical analyses of fault foundation interaction.", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Springer, 6(4), 645-675.

Canadian Standard Association (2007), *Oil and Gas Pipeline Systems*, CSA-Z662, Mississauga, Ontario, Canada.

Chiou YJ, Chi SY, Chang HY. "A study on buried pipeline response to fault movement". *Pressure Vessel Technology*, ASME 1994; Vol: 116, 36-41.

Karamitros D.K., Bouckovalas G.D., Kouretzis G.P., Gkesouli V., "An analytical method for strength verification of buried steel pipeline at normal fault crossings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31 (2011), p. 1452-1464.

Kennedy, R.P., Chow, A. W. and Williamson, R. A. (1977), "Fault movement effects on buried oil pipeline", *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 103, pp. 617-633.

Kennedy R. P., Kincaid R. H. (1983). "Fault crossing design for buried gas oil pipelines". *ASME,PVP conference*; 77:1–9.

Liu, X. and O'Rourke, M. J. (1997), Behaviour of continuous pipeline subject to transverse PGD. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 26: 989–1003.

"NEESR-SG Final Report", Cornell University, Rensselaer Polytechnic Institute, The Sciencenter Discovery Center, June 25, 2008.

Newmark, N.M., Hall W.J. (1975), "Pipeline design to resist large fault displacement". *Proceedings of U.S. National Conference on Earthquake Engineering*; 416– 425.

- O'Rourke T.D., "Geohazards and large, geographically distributed systems.", (2010), *Geotechnique* 60, No. 7, 507-543
- Trifonov, O. V. and Cherniy, V. P. (2010), "A semi-analytical approach to a nonlinear stress-strain analysis of buried steel pipelines crossing active faults.", *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, Vol. 30, pp. 1298-1308.
- Trifonov, O. V. and Cherniy, V. P. (2012), "Elastoplastic stress-strain analysis of buried steel pipelines subjected to fault displacements with account for service loads.", *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, Vol. 33, No. 1, pp. 54-62.
- U.S. Energy Information Administration, Office of Oil and Gas, Report: "Natural gas compressor stations on the Interstate pipeline network: Developments since 1996", November 2007
- Vougioukas E. A., Theodossis, C., Carydis P. G. (1979), "Seismic analysis of buried pipelines subjected to vertical fault movement.", *Journal of Technical Councils*, ASCE, Vol. 105(TCI), pp. 432-441.
- Vazouras P., Karamanos S. A., Dakoulas P., (2010), "Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements.", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (2010), doi: 10.1016/j.soildyn.2010.06.011
- Vazouras P., Karamanos S. A., Dakoulas P., (2012), "Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 41, October 2012, Pages 164-180
- Wang, L. R. L. and Yeh, Y. A. (1985), "A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 13, pp. 75-96.
- Πιτλάκης Δ.Κ., "ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ", Εκδόσεις ΖΗΤΗ

Αναφορές από το Διαδίκτυο

- American Oil and Gas Historical Society, www.aoghs.com
- American Petroleum Institute, www.api.org
- United States Geological Survey, www.USGS.org
- Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου Α.Ε., www.desfa.gr
- International Gas Union, www.inu.org
- Interconnector Turkey-Greece-Italy Pipeline, www.edison.it/en/company/gas-infrastructures/itgi.shtml
- Trans Adriatic Pipeline, www.trans-adriatic-pipeline.com

