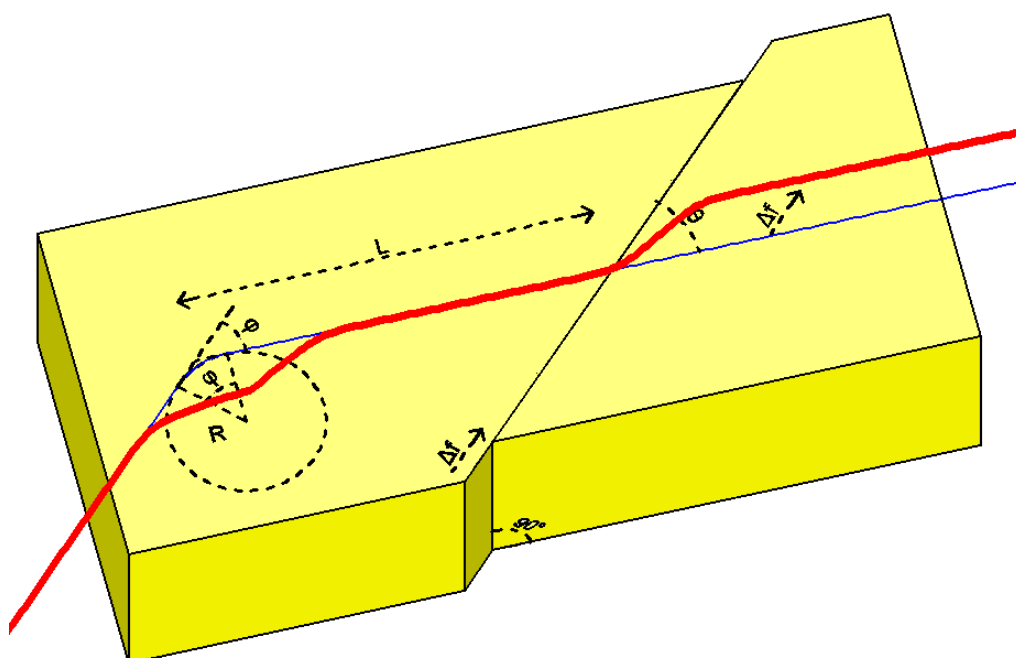




ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
**ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ  
ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΜΕΝΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΣΕ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΕΙΣ  
ΜΕ ΕΝΕΡΓΑ ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΡΗΓΜΑΤΑ**

**Ζουπαντής Χρήστος**

*Επιβλέπων: Μπουκοβάλας Γεώργιος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.*



DIPLOMA THESIS  
**ANALYTICAL ESTIMATION OF STRAINS OF BURIED STEEL  
CURVED PIPELINES CROSSING ACTIVE FAULTS**

**Zoupantis Christos**

*Supervisor: Bouckovalas George, Prof. N.T.U.A.*

Ιούλιος/July 2013

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Τελειώνοντας αυτή τη διπλωματική εργασία θέλω να ευχαριστήσω αρχικά τον επιβλέποντα μου καθηγητή Γεώργιο Μπουκοβάλα και το συνεργάτη του μεταδιδακτορικό ερευνητή Δημήτρη Καραμήτρο. Έδειξαν προς εμένα απεριόριστη εμπιστοσύνη και ενδιαφέρον, μου έδωσαν συμβουλές ως προς τη διπλωματική εργασία, οι οποίες δεν είχαν στόχο μόνο τη βελτίωση της εργασίας αλλά και τη βελτίωση των ικανοτήτων μου γενικότερα, και εκτίμησα ιδιαίτερα την προσήλωση τους στη μεθοδικότητα, την υπευθυνότητα με την οποία αντιμετωπίζουν τη δουλειά τους και το χαρακτήρα τους συνολικά.

Οι γονείς μου Γιώργος και Δήμητρα και ο αδερφός μου Πάνος μου συμπαραστάθηκαν κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας με αυτοθυσία και ικανοποιώντας πάντοτε τις ανάγκες μου. Ένωθα ότι έχω κάποιο στήριγμα ώστε να συνεχίζω και τους ευχαριστώ. Επίσης ευχαριστώ τη Βάνα Σαχά για την ιώβεια υπομονή της ως προς τις απαιτήσεις της διπλωματικής και τη συμπαράσταση της.

Με αυτή τη διπλωματική εργασία κλείνουν πέντε (5) υπέροχα και αξέχαστα χρόνια στο πολυτεχνείο στο οποίο γνώρισα συμφοιτητές και καθηγητές που καθόρισαν εμένα και τον τρόπο σκέψης μου. Οπότε, εμμέσως συνέβαλαν στη διπλωματική εργασία και για αυτό τους ευχαριστώ.

**Σημείωση:** Οι παραμορφώσεις στην εικόνα του αγωγού στο εξώφυλλο έχουν πολλαπλασιαστεί κατά 5 φορές για λόγους ευκρίνειας.



## **ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

### **Περιγραφή του Προβλήματος**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προτείνεται μία αναλυτική μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της εντατικής κατάστασης χαλύβδινου αγωγού με καμπυλότητα σε κοντινή απόσταση από ενεργό τεκτονικό ρήγμα. Εδώ εξετάζονται ρήγματα οριζόντιας διατομής, τα οποία προκαλούν εφελκυσμό και κάμψη στον αγωγό. Τα αποτελέσματα όμως μπορούν εύκολα να επεκταθούν και σε κανονικά ρήγματα.

Στην περίπτωση όπου το ρήγμα μετακινηθεί, τότε το έδαφος που περιβάλλει τον αγωγό θα αναπτύξει σχετική μετακίνηση σε σχέση με τον αγωγό με αποτέλεσμα ο αγωγός να υποστεί εφελκυσμό ή θλίψη και να καμφθεί, ανάλογα με τη διεύθυνση της μετακίνησης που θα επιβληθεί. Η περίπτωση της θλίψεως είναι αρκετά δυσμενής, διότι για πολύ μικρές μετακινήσεις ο αγωγός μπορεί να εμφανίσει μη γραμμικότητες γεωμετρίας, δηλαδή να πάθει τοπικό ή καθολικό λυγισμό. Επίσης αυτή η περίπτωση αφορά κυρίως ανάστροφα ρήγματα τα οποία δεν απαντώνται συχνά στον ελληνικό χώρο, για τους παραπάνω λόγους δεν εξετάζονται εδώ. Μεγάλες μετακινήσεις του ρήγματος της τάξης του 1m είναι ικανές να παραμορφώσουν τον αγωγό σε σημείο που να αστοχήσει, είτε ως υλικό του χάλυβα της διατομής του αγωγού ή οι συγκολλήσεις που τοποθετούνται κάθε 10 με 15m μεταξύ των τμημάτων του αγωγού.

Κατά το σχεδιασμό ενός αγωγού, απαιτείται να ληφθεί υπόψη μία πιθανή μετακίνηση ρήγματος με βάση τη γεωλογική έρευνα της περιοχής ώστε να προβλεφθούν οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις, και εάν δεν είναι αποδεκτές να διαστασιοποιηθεί ξανά ο αγωγός. Η επανάληψη της διαστασιολόγησης ενδέχεται να αφορά την αλλαγή της χάραξης του αγωγού, ώστε να διασταυρώνεται με το ρήγμα υπό πιο ευνοϊκές συνθήκες. Ενδεχόμενη είναι και η αλλαγή του υλικού και της διατομής του αγωγού, η αλλαγή του βάθους ταφής του ή εναλλακτικά των ιδιοτήτων του υλικού επίχωσης του (μη συνεκτικά υλικά), διότι πιο μικρά βάθη οδηγούν σε μικρότερη αντίσταση του περιβάλλοντος εδάφους. Η θεμελίωση του αγωγού επιφανειακά σε κατάλληλα βάρθρα ή υπόγεια με προστατευτικό κάλυμμα (casing) του επιτρέπει να παραμορφωθεί ελεύθερα χωρίς την αντίσταση του εδάφους.

Μία ακόμη παράμετρος του προβλήματος αφορά τη χάραξη του αγωγού. Για πολλούς λόγους οι αγωγοί δεν σχηματίζουν μονάχα ευθυγραμμίες αλλά αλλάζει και η διεύθυνση τους, ώστε να αποφευχθεί για παράδειγμα κάποιο φυσικό εμπόδιο. Αυτό επιτυγχάνεται με την καμπύλωση του αγωγού μέσω τόξων συναρμογής. Επομένως, τίθεται το πρόβλημα της απόκρισης του αγωγού στην περίπτωση όπου το ενεργό τεκτονικό ρήγμα βρίσκεται κοντά σε ένα τόξο καμπύλωσης του αγωγού σε βαθμό που να το επηρεάζει.

### **Βιβλιογραφική Αναδρομή**

Οι προβλεπόμενες παραμορφώσεις μέχρι και τη δεκαετία του 80 υπολογίζονταν συνήθως με αναλυτικές μεθόδους των Kennedy et al. (1977) και Wang & Yeh(1985). Οι οποίες βέβαια στηρίζονταν σε παραδοχές μη ρεαλιστικές για το σχεδιασμό, δηλαδή την παραμόρφωση του αγωγού σε σημείο που να συμπεριφέρεται ως καλώδιο (δηλαδή να μην διαθέτει πλέον καμπτική

στιβαρότητα), πράγμα που ξεπερνάει τα όρια των αποδεκτών παραμορφώσεων για το υλικό του χάλυβα αλλά και για την αντοχή των συγκολλήσεων.

Εκείνη την εποχή, με την ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων (για παράδειγμα η μέθοδος των Πεπερασμένων στοιχείων) εγκαταλείφθηκαν οι προσπάθειες για τη βελτίωση των αναλυτικών μεθοδολογιών. Παρόλα αυτά, είναι γνωστό πλέον, πως για την ανάλυση ενός αγωγού απαιτείται χρήση λογισμικού από προσωπικό με βαθιά εξειδίκευση πάνω σε θέματα αριθμητικών αναλύσεων, εμπειρία και ικανότητα να αξιολογούνται τα αποτελέσματα για το αν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Επίσης, η παραμετρική διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων, και η βελτιστοποίηση του προβλήματος καθίσταται αρκετά χρονοβόρα και κοπιαστική, ιδιαίτερα αφού είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι μη γραμμικότητες του προβλήματος (γεωμετρίας και υλικού), οι οποίες αυξάνουν σε μεγάλο βαθμό το υπολογιστικό κόστος κάθε ανάλυσης.

Επομένως, σχετικά πρόσφατα αναζωπυρώθηκε το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη ρεαλιστικών αναλυτικών μεθόδων ώστε να ελέγχεται η αξιοπιστία της χρήσης λογισμικού αριθμητικών αναλύσεων και των αποτελεσμάτων του, να διευκολύνεται η παραμετρική ανάλυση του προβλήματος, να παρακάμπτονται οι αριθμητικές μέθοδοι για τα πολύ απλά προβλήματα και να επιταχύνεται γενικότερα ο σχεδιασμός.

Όπως καταδεικνύεται και από τη βιβλιογραφική αναδρομή της διπλωματικής εργασίας, έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι για την περίπτωση του ρήγματος που αλληλεπιδρά μόνο με ευθύγραμμο τμήμα αγωγού. Μάλιστα, τα αποτελέσματά τους σε σχέση με αντίστοιχες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζουν ικανοποιητική συμφωνία. Πρώτα από όλα, με τη μέθοδο των Karamitros et al. (2007) επιλύεται η περίπτωση ρήγματος οριζόντιας διατομής εισάγοντας τη μη γραμμικότητα γεωμετρίας του προβλήματος μέσω μίας προσεγγιστικής σχέσης εκτίμησης των καμπτικών παραμορφώσεων και τη μη γραμμικότητα υλικού επαναληπτικά με ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας. Ακολούθως, οι Trifonov et al. (2010) επεκτείνουν τη μέθοδο και για κανονικά ρήγματα και προτείνουν έναν εναλλακτικό και πολυπλοκότερο τρόπο επίλυσης των εξισώσεων ισορροπίας ώστε να αποφευχθεί η χρήση της προσεγγιστικής σχέσης για τις καμπτικές παραμορφώσεις. Με τη μέθοδο των Karamitros et al. (2011) επεκτείνεται η μέθοδος των Karamitros et al. (2007) διατηρώντας τις βασικές παραδοχές της για κανονικά ρήγματα και για συνδυασμό ρήγματος οριζόντιας διατομής και κανονικού. Ακόμη, οι Trifonov et al. (2011) διεύρυναν τα όρια εφαρμογής των προαναφερθέντων μεθόδων και για περιπτώσεις όπου λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό του αγωγού και τα φορτία λειτουργίας του (μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας και εσωτερική πίεση λόγω ροής) παράλληλα με τη μετακίνηση του ρήγματος.

Ως προς την εισαγωγή της γωνίας σε αναλυτική μέθοδο μέχρι στιγμής έχουν υπάρξει δύο προσπάθειες. Η πρώτη αφορά τους O'Rourke & Liu περιγράφουν μία ελαστική μέθοδο για αγωγό με γωνία, εκτιμώντας τις παραμορφώσεις στην περιοχή της γωνίας. Επίσης η Γκεσούλη στη μεταπτυχιακή της διπλωματική εργασία (ΕΜΠ,2008) πρότεινε μία μέθοδο για την επέκταση της παραπάνω μεθόδου πέραν της ελαστικότητας και για την πρόβλεψη των παραμορφώσεων μέσω κάποιων εμπειρικών συσχετίσεων για την περιοχή του ρήγματος. Παρόλα αυτά, οι παραπάνω μέθοδοι στηρίζονται στην παραδοχή της γωνίας ως ορθής και χωρίς τόξο συναρμογής. Στην πρακτική του σχεδιασμού πάντοτε χρησιμοποιούνται τόξα συναρμογής τα οποία απομειώνουν σημαντικά τις παραμορφώσεις που προβλέπονται με αριθμητική μέθοδο χωρίς τόξο συναρμογής.

Οπότε οι παραπάνω μέθοδοι είναι υπερβολικά συντηρητικές για το σχεδιασμό. Ακόμη, αφορούν τη μεμονωμένη περίπτωση της ορθής γωνίας, η οποία δεν είναι η συνηθισμένη στην πράξη, περισσότερο οι παραδοχές αυτές αφορούν αστικά δίκτυα διανομής. Επίσης, από την αριθμητική διερεύνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας προκύπτει ότι σε γωνίες λίγο μικρότερες των  $45^\circ$  οι παραμορφώσεις είναι αρκετά μεγαλύτερες της ορθής. Συμπερασματικά, οι μέχρι τώρα μεθοδολογίες αποτυγχάνουν να εισάγουν βασικές παραμέτρους του προβλήματος υπερεκτιμώντας υπέρμετρα τις παραμορφώσεις (πραγματική γεωμετρία του τόξου συναρμογής) και περιορίζεται η χρήση τους μόνο σε ορθές γωνίες, οι οποίες δεν αποτελούν τη δυσμενέστερη περίπτωση.

### **Παραμετρική Ανάλυση**

Με βάση τις παρατηρήσεις που έγιναν στη βιβλιογραφική αναδρομή διενεργήθηκε παραμετρική διερεύνηση του προβλήματος για ρήγμα οριζοντίας διατμήσεως μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS 12.0). Πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις αρχικά για ευθύγραμμο αγωγό ώστε να κατανοηθεί τι αλλάζει στη συμπεριφορά του αγωγού με την προσθήκη της γωνίας. Η εγκάρσια επιβαλλόμενη μετακίνηση προκαλεί κάμψη στον αγωγό και την οριακή εγκάρσια κατανομημένη αντίδραση του εδάφους η οποία αφορά μία περιοχή της τάξης των 10 με 20m εκατέρωθεν της γωνίας και στην οποία εντοπίζονται οι κρισιμότερες παραμορφώσεις. Παράλληλα η αξονική συνιστώσα της μετακίνησης προκαλεί την οριακή αντίδραση του εδάφους (τριβή) για ένα αρκετά μεγάλο μήκος της τάξης των 150 με 400m, το οποίο ονομάζεται μήκος αγκύρωσης και στο οποίο μειώνεται γραμμικά η αξονική δύναμη του αγωγού. Λόγω συμμετρίας του προβλήματος, στο σημείο της μέγιστης αξονικής δύναμης (τομή αγωγού και ρήγματος) η καμπτική ροπή είναι μηδέν, για αυτό και στο σημείο αυτό οι παραμορφώσεις δεν είναι κρισιμότερες, εκτός και αν διαρρεύσει αξονικά η διατομή του αγωγού σε εκείνο το σημείο για μεγάλες μετακινήσεις.

Έπειτα διερευνήθηκε η επιρροή της γωνίας στο πρόβλημα. Αρχικά αναλύθηκε αγωγός χωρίς τόξο συναρμογής, για διάφορες γωνίες. Προέκυψε έτσι το προαναφερθέν συμπέρασμα ότι η ορθή γωνία δεν αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση από άποψη παραμορφώσεων στην περιοχή της γωνίας. Στην περιοχή του ρήγματος οι παραμορφώσεις είναι μειωμένες σε σχέση με τον ευθύγραμμο αγωγό διότι αναλαμβάνεται η αξονική μετακίνηση και από την περιοχή της γωνίας, χωρίς να εξαρτάται τόσο από την τιμή της γωνίας αλλά από την απόσταση ρήγματος και γωνίας. Για τη δεδομένη γεωμετρία ρήγματος προέκυψαν οι μέγιστες παραμορφώσεις στην περιοχή της γωνίας κρισιμότερες σε σχέση με την περιοχή του ρήγματος. Τέλος, εισάγοντας την πραγματική γεωμετρία του τόξου συναρμογής για διάφορες ακτίνες συναρμογής (5 έως 10 διάμετροι του αγωγού-hot bend-χρησιμοποιείται σε σπάνιες περιπτώσεις όπου ο χώρος είναι περιορισμένος και 20 έως 40 διάμετροι του αγωγού-field bend-η συνήθης πρακτική) παρατηρήθηκε το πώς αυξανόμενης της ακτίνας οι παραμορφώσεις στην περιοχή της γωνίας μειώνονται συνεχώς και απότομα. Υπήρχαν μάλιστα περιπτώσεις για μικρή μετακίνηση ρήγματος και μεγάλη ακτίνα συναρμογής όπου ο αγωγός ουσιαστικά συμπεριφέρθηκε ως ευθύγραμμος, δηλαδή οι παραμορφώσεις στην περιοχή της γωνίας ήταν αμελητέες σε σχέση με την περιοχή του ρήγματος. Το συμπέρασμα από όλη την αριθμητική διερεύνηση ήταν πως είναι απαραίτητη η πρόταση μίας μεθόδου η οποία περιλαμβάνει τους σημαντικούς παράγοντες του προβλήματος, τη γωνία και την ακτίνα του τόξου συναρμογής, ώστε να προβλέπονται ρεαλιστικά-όχι άκρως συντηρητικά αποτελέσματα-για όλο το εύρος των γωνιών.

## Προτεινόμενη Μεθοδολογία

Επομένως, προτείνεται η αναλυτική μέθοδος η οποία είναι και ο βασικός στόχος της διπλωματικής εργασίας. Επιλύεται το πρόβλημα σε τρία βήματα.

**ΒΗΜΑ 1<sup>ο</sup>:** Επιλύεται η περιοχή της γωνίας, απομονώνεται το καμπύλο τμήμα-τόξο συναρμογής, για δεδομένη επιβαλλόμενη μετακίνηση στο άκρο της και μέγιστη κατανεμημένη αντίδραση του εδάφους αξονικά και εγκάρσια, το οποίο παρατηρήθηκε στα αριθμητικά αποτελέσματα, καθώς τα ελατήρια του εδάφους πλαστικοποιούνται για μικρή μετακίνηση. Ως συνοριακές συνθήκες του καμπύλου τμήματος τίθενται ελατήρια τα οποία προκύπτουν από την επίλυση ημιαπειρομήκους ελαστικής δοκού σε ελατηριωτό έδαφος, προσομοιώνοντας τα υπόλοιπα τμήματα του αγωγού και τις αντιδράσεις του εδάφους που επηρεάζουν τη γωνία. Επιπλέον η επίδραση της αξονικής μετακίνησης στο άλλο άκρο του καμπύλου φορέα εισάγεται μέσω των συνοριακών συνθηκών ως ελατήριο. Βέβαια, το ελατήριο αυτό προκύπτει μη γραμμικό, για αυτό και επιλέγεται το εφαπτομενικό μέτρο δυστένιας του ελατηρίου και η περιοχή της γωνίας επιλύεται επαναληπτικά μέχρι να συγκλίνει η τιμή του. Τελικώς προκύπτει η αναπτυσσόμενη αξονική δύναμη στην περιοχή της γωνίας, και υπολογίζονται οι καμπτικές και αξονικές παραμορφώσεις στη διατομή μέγιστης ροπής. Οι καμπτικές παραμορφώσεις υπολογίζονται μέσω της καμπτικής ροπής (γραμμικώς ελαστικά), ενώ οι αξονικές παραμορφώσεις υπολογίζονται επαναληπτικά ώστε το ολοκλήρωμα των τάσεων πάνω στη διατομή του αγωγού να ισούται με την αξονική δύναμη. Η μη γραμμικότητα υλικού εισάγεται επαναληπτικά προσαρμόζοντας το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας της ανάλυσης μέχρι η ολοκλήρωση των τάσεων (λόγω των υπολογισμένων παραμορφώσεων) να ισούται με τη μέγιστη καμπτική ροπή.

**ΒΗΜΑ 2<sup>ο</sup>:** Από την αξονική δύναμη στην περιοχή της γωνίας υπολογίζεται η αξονική δύναμη στην περιοχή του ρήγματος μέσω της τριβής. Έπειτα από το συμβιβαστό των αξονικών παραμορφώσεων (οι οποίες προκύπτουν από την ολοκλήρωση των αξονικών δυνάμεων) και αξονικών μετακινήσεων κατά μήκος του αγωγού προκύπτει μία νέα εκτίμηση για τη μετακίνηση στην περιοχή της γωνίας. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 και 2 μέχρι να σταθεροποιηθεί η αξονική μετακίνηση στην περιοχή της γωνίας.

**ΒΗΜΑ 3<sup>ο</sup>:** Εφόσον έχει προσδιοριστεί η εντατική κατάσταση στην περιοχή της γωνίας, χρησιμοποιείται, η μέθοδος των Karamitros et al. (2007) ώστε να εκτιμηθούν οι παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος. Η μέθοδος χρησιμοποιείται με δεδομένη την αξονική δύναμη που προκύπτει στα δύο πρώτα βήματα και για την επιβαλλόμενη εγκάρσια μετακίνηση στην περιοχή του ρήγματος. Προτείνεται επίσης μία βελτιωμένη σχέση για την εκτίμηση της επιρροής των καμπτικών παραμορφώσεων δεύτερης τάξης η οποία λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα από την αριθμητική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, καθώς η σχέση των Karamitros et al. (2007) στηριζόταν σε λιγότερα δεδομένα. Οποιαδήποτε άλλη ισοδύναμη μέθοδος εκτός αυτής για την περιοχή του ρήγματος είναι δεκτή, όπως των Trifonov et al. (2010) για ρήγματα οριζοντίως διατμήσεως ή κανονικά.

## Συμπεράσματα-Σχόλια

Συγκρίνονται οι προβλέψεις της αναλυτικής μεθόδου με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων σε όρους μέγιστων παραμορφώσεων στην περιοχή της γωνίας και του

ρήγματος. Όσον αφορά στην περιοχή του ρήγματος η μέθοδος προβλέπει με ακρίβεια τις παραμορφώσεις, όπως και η αριθμητική ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων. Όσον αφορά στην περιοχή της γωνίας η μέθοδος είναι εύλογα ακριβής για επιβαλλόμενες μετακινήσεις ρήγματος της τάξης της μίας διαμέτρου του αγωγού (για τη δεδομένη γεωμετρία ρήγματος που εξετάστηκε), για όλο το εύρος γωνιών από τον ευθύγραμμο αγωγό μέχρι την ορθή γωνία και για ακτίνες τόξου συναρμογής από 10 διαμέτρους του αγωγού και πάνω, δηλαδή οριακά ακριβές για τα hot bends, τα οποία είναι σπάνια περίπτωση. Κοντά σε ορθές γωνίες η αναλυτική μέθοδος τείνει να υποεκτιμά τις παραμορφώσεις της αριθμητικής ανάλυσης, ενώ τις υπερεκτιμά για γωνίες κοντά στις 45°, για μετακινήσεις πέραν της 1.5 διαμέτρου του αγωγού.

Για ασφαλή εφαρμογή της μεθόδου, τίθεται δύο κριτήρια: Το πρώτο αφορά την ανηγμένη ακτίνα καμπυλότητας της γωνίας με τη διάμετρο του αγωγού μεγαλύτερη ή ίση με το 10. Το δεύτερο έχει σχέση με την ευκαμψία της γωνίας και την επιβαλλόμενη μετακίνηση όπως εξηγείται στο κεφάλαιο 6 της διπλωματικής.

Οι λόγοι όπου οδηγούν σε απόκλιση της προτεινόμενης μεθοδολογίας από τις αριθμητικές αναλύσεις είναι ο τρόπος εισαγωγής των συνοριακών συνθηκών στην επίλυση του βήματος της γωνίας και η μη γραμμικότητα γεωμετρίας η οποία έχει αμεληθεί. Τα εγκάρσια ελατήρια της μεθόδου υποθέτονται ελαστικά, όμως σύμφωνα με τα αριθμητικά αποτελέσματα πλαστικοποιείται το αντίστοιχο υλικό του χάλυβα και οι αντιδράσεις του εδάφους φθάνουν τις οριακές για μετακινήσεις ρήγματος της τάξης της μίας διαμέτρου του αγωγού. Η ελαστικότητα περιορίζει τις μετακινήσεις των άκρων του αγωγού οδηγώντας σε υπερεκτιμήσεις των παραμορφώσεων, ειδικά για μικρές ακτίνες του τόξου συναρμογής. Έπειτα το αξονικό ελατήριο εισάγεται με το εφαπτομενικό μέτρο δυστένιας του, προκαλώντας μεγάλες αξονικές μετακινήσεις οι οποίες τείνουν να υποεκτιμούν τις παραμορφώσεις, ειδικά σε 45° γωνία όπου συμμετέχει περισσότερο στην ανάληψη της αξονικής μετακίνησης. Ακόμη το ότι αμελήθηκε η μη γραμμικότητα γεωμετρίας στις εξισώσεις αγνοεί ανακουφιστικές ροπές δευτέρας τάξεως και έτσι υπερεκτιμώνται συστηματικά τα αποτελέσματα για μετακινήσεις ρήγματος της τάξης των 2 διαμέτρων του αγωγού.

### **Μελλοντική Έρευνα**

Οι ανωτέρω απλοποιητικές παραδοχές της μεθόδου οι οποίες οδηγούν σε αποκλίσεις δύνανται με περαιτέρω έρευνα να αντικατασταθούν με παραδοχές ρεαλιστικότερες. Συγκεκριμένα:

- α) Ως προς τα εγκάρσια ελατήρια, είναι πιθανό να αντικατασταθεί το μέτρο ελαστικότητας τους με το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας που χρησιμοποιείται και για τον ίδιο το φορέα της γωνίας, εφόσον και από τις αριθμητικές αναλύσεις παρατηρείται ότι οι παραμορφώσεις στην περιοχή του καμπύλου φορέα είναι ίδιας τάξης μεγέθους με αυτές των ευθυγράμμων τμημάτων-πλαστικοποιούνται στον ίδιο βαθμό. Εναλλακτικά, τα έντονα καμπυλωμένα ευθύγραμμα τμήματα μπορούν να εισαχθούν στο προσομοίωμα, τα οποία όμως είναι αγνώστου μήκους, οπότε η συνοριακή συνθήκη που χρησιμοποιείται και στη μέθοδο των Karamitros et al. (2007) για το αντίστοιχο πρόβλημα στην περιοχή του ρήγματος μπορεί να εισαχθεί.



Εάν επιλυθεί το πρόβλημα της υπερεκτίμησης των παραμορφώσεων λόγω των εγκάρσιων ελατηρίων τότε με τη χρήση του τέμνοντος μέτρου δυστένιας του αξονικού ελατηρίου μπορεί να μειωθεί η τάση για υποεκτίμηση των παραμορφώσεων.

- β) Ως προς τα φαινόμενα δευτέρας τάξης, προτείνεται η χρήση μίας αντίστοιχης σχέσης της μεθόδου των Karamitros et al. (2007) η οποία αφορά τις καμπτικές παραμορφώσεις, ώστε να αποφευχθεί η περίπλοκη επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας εκφρασμένων στον παραμορφωμένο φορέα της γωνίας.
- γ) Εκτός των ανωτέρω, προτείνεται η διερεύνηση των ορίων αξιοπιστίας της μεθόδου για περισσότερες περιπτώσεις γεωμετρίας και τύπων ρηγμάτων, όπως και για διαφορετικές διατομές αγωγού και αντιδράσεων του εδάφους.
- δ) Τέλος, προτείνεται για περαιτέρω έρευνα η επέκταση της μεθόδου για την περίπτωση όπου το έντονα καμπύλο τμήμα της περιοχής της γωνίας συναντάται με το έντονα καμπυλωμένο τμήμα της περιοχής του ρήγματος, το οποίο αφορά περιπτώσεις όπου το ρήγμα απέχει πολύ λίγο από την περιοχή της γωνίας. Ακόμη, προτείνεται η διερεύνηση της επιρροής της εσωτερικής πίεσης του αγωγού στην περιοχή της γωνίας και ενδεχομένως η εισαγωγή της μέσα στη μέθοδο ως αρχικές συνθήκες.

## **EXTENDED SUMMARY**

### **Description of the Problem**

A new analytical methodology is proposed for the strain estimation of buried, steel, curved pipelines crossing active faults. The analysis is presented only for strike slip faults, which result in the tension and bending of the pipeline, although the results of the methodology can be easily extended to normal faults.

In the case of a fault movement, the surrounding soil will move in respect of the pipeline, resulting in tension or compression and bending of the pipeline, depending on the direction of the movement. Large fault displacements up to 1m can cause extreme deformations that can lead to failure of the pipe material or of the welds that are made every 10 to 15m across the pipeline. Note that the case of compression is the most critical, as geometrical nonlinearities will occur even from small displacements, due to buckling or wrinkling. This case refers mainly to reverse faults, which are rarely present in Greece, and so it is not examined here.

While designing a pipeline strain estimation due to a fault movement is required, as defined in the relevant geological survey of the site. When these strains are excessive, the pipeline has to be designed accordingly to maintain the resulting strains within the limits imposed by the regulations. The process of redesigning may consider the change of the pipeline's horizontal alignment, in order to have a more comfortable crossing angle, or change of the material strength, the cross section, the burying depth, or the properties of the non-cohesive backfilling material, as smaller depths lead to reduced soil resistance.

The existence of nearby surface foundations or an underground protective shell (casing) can allow the pipeline to deform without of the surrounding soil's resistance. Another important aspect regarding the horizontal alignment is the existence of curved bends in the vicinity of the fault trace. The later causes a lot of concern about the strain distribution, both at the fault trace and at the area of the bend, since there are no reliable analytical solutions that can be employed in practice.

### **Literature Review**

Until the 80s strains were estimated through the analytical methods of Kennedy et al. (1977) and Wang & Yeh (1985). Those methods were based on the non realistic over conservative assumption that the pipe deforms so much as to behave as a cable (no flexural stiffness) which only refers to extreme deformations.

After that time, the research upon improving the above-mentioned methods was abandoned due to the evolution of the numerical methods (for instance the Finite Elements Method). However, it is a common knowledge that nowadays pipeline design demands sophisticated software and experienced users who can evaluate the quality of the results. Moreover, the parametric analysis of alternative solutions, or the optimization of the problem is very time and resource consuming, as geometrical and material nonlinearities have to be considered.

For the above-mentioned reasons, interest for development of realistic analytical methods has revived. As a result, there are today sufficient methods related to the straight pipeline, which may predict accurately the pipeline response. In brief, the method of Karamitros et al. (2007) estimates

the strains caused by a strike slip fault. In this method, the geometrical nonlinearities are introduced through an empirical equation for the estimation of the bending strains of the pipeline, and the material nonlinearities are introduced iteratively through the equivalent secant elastic modulus. Trifonov et al. (2010) extend the above method for normal faults and proposed an alternative but more complex way to introduce the geometrical nonlinearities. Karamitros et al. (2011) extend the method of Karamitros et al. (2007) to normal and oblique faults, maintaining the basic assumptions of the method for strike slip faults. Moreover, Trifonov et al. (2011) extend the above methods for service loads (extreme temperature conditions and internal pressure) alongside the fault movement.

The respective methodologies for curved pipelines are very limited and not as reliable. Namely, there are two methods concerning pipelines with bends crossing faults. O'Rourke & Liu (1999) developed an elastic method for the strain estimation close to the bend. Gesouli (2008) proposed a new method in her master's thesis that extended the above method in the elastoplastic region and estimated strains in the fault area introducing empirical coefficients. However, the above mentioned methods are based on the assumption of a right angle bend with no curvature. However, in practice, bends are curved resulting to considerably reduced strains compared with the predictions of zero radius bend. As a result, the above methods are over conservative. Moreover, being limited to the rare case of a right angle bend, they are applicable in urban water and gas supply systems. Additionally, based on the findings of the present study, angles close to 45 degrees are more critical than those of close to right angles assumed by these analytical methodologies. To sum up, the existing methods fail to implement the basic parameters of the problem, overestimating strains and limiting the use of the method only to right angles, which are not only rare, but also not the worse case scenarios.

### **Parametric Analysis**

Based on the literature review's observations a parametric analysis was made for a strike slip fault with the use of the finite element method (ANSYS 12.0). Referring first to the basic case of a straight pipeline, it was found that the transverse fault movement bends the pipeline and evokes the maximum transverse reaction of the surrounding soil for an approximate length of 10 to 20m on both sides of the fault crossing, where maximum strains are present. In parallel, the axial component of the movement evokes the maximum axial soil reaction (friction) for a relatively bigger length of about 150m to 400m, called unanchored length, and in which the axial pipe force is reduced linearly. Due to the symmetry of the problem, the point where the axial force is maximum (fault crossing), there is no bending and thus total strains are not critical, except from the case where the pipeline cross section yields axially at this point for large displacements.

Following that, the influence of the curved bend was examined. At first, the curvature radius was set to zero (no curvature-assumption of the previous methods) and the bending angle was changed from zero to a 90 degrees angle. In that way, it was concluded that the right angle is not the most critical angle in terms of strains. In the fault region, strains are less compared to the pipeline with no bends, because the axial component of the movement is undertaken also from the bend displacements, depending more on the distance of fault and bend, rather than the angle itself. For this case study, maximum strains were more critical in the region of the bend. Lastly, a more realistic geometry was examined, implementing the actual curvature of the pipeline (radius 5 to 10 times the cross section's diameter-hot bends- which are rarely used in practice when there is not much space for bigger radii

and radius 40 times the diameter-field bend-which is the most common practice), resulting in very big reduction on the strains with increasing radius. There were also cases of small displacements and large radii when the strains in the curved region were negligible compared to the fault region, and the pipeline behaved like a straight pipeline. The conclusions from the parametric analysis indicated that a new method shall be proposed that will take into account the crucial factors of the problem, the real geometry of the curved bend, in order to predict realistically, and not over conservatively, strains for all possible bend angles.

### **Proposed Methodology**

In extent of all the above, a new analytical method is proposed which is the basic goal of this diploma thesis. The problem is broken into three steps.

**1<sup>st</sup> STEP:** The curved bend is isolated from the rest of the pipeline and it is solved for an imposed axial displacement, the soil distributed resistance is set to maximum, because it has small yielding displacement. The boundary conditions of the curved bend are transverse and rotational springs that represent the pipeline segments and soil reactions on both sides of the bend, which are calculated from the solution of a semi-infinite beam on elastic foundation. The axial resistance of the pipeline beyond the curved bend is introduced with an axial spring, which is eventually non-linear, and so the problem has to be solved iteratively with the tangent modulus of the spring. Finally, the axial force, which is developed due to the axial displacement, and the resulting axial and bending strains in the cross section of maximum bending moment are calculated. The bending strains are calculated immediately through the maximum bending moment. The axial strains are calculated iteratively until the integral of stresses equals to the axial force. The material nonlinearity is introduced through the iteratively change of the equivalent secant modulus of elasticity until the integral of stresses due to calculated strains is equal to the maximum bending moment.

**2<sup>nd</sup> STEP:** Based on the axial force that was derived from the curved region, the axial force in the region of the fault is calculated through the friction. The compatibility of axial strains (calculated from the distribution of the axial forces along the pipeline) and the axial displacements is used in order to estimate the axial displacement of the curved bend. Steps 1 and 2 are repeated until the axial displacement of the curved bend is stabilized.

**3<sup>rd</sup> STEP:** After the strain estimation in the curved region, the method of Karamitros et al. (2007) is used for the strain estimation in the fault region. The method takes as input the axial force of the fault region as calculated in the first two steps and the transverse fault movement. A refinement is proposed for the bending strains estimation due to first and second order effects (geometrical nonlinearities). As the relevant equation used by Karamitros et al. (2007) was based to limited data, this refinement was based on the parametric analysis of the present study. Every other equivalent method for the strain estimation of the fault region is accepted, for example that of Trifonov et al. (2010) for strike slip and normal faults.

### **Conclusions**

The numerical results of maximum total strains in the region of the fault and of the curved bend are compared with the analytical predictions of the method. Concerning the fault region the analytical

predictions are quite accurate for all cases. In the curved region the predictions are also accurate but only (i) for fault displacements up to one times the diameter of the cross section (this refers only to the geometry of the strike slip fault that was used), (ii) for all the angles between the straight pipeline and the right angle bend and (iii) for the radii starting from 10 times the diameter and above, meaning that the method is marginally accurate for the case of hot bends, that are although rarely encountered. The analytical method tends to underestimate strains close to angles of 90 degrees and overestimate them close to 45 degrees, for fault movements of 1.5 times the diameter of the pipeline cross section.

In order to safely apply the method, two criteria are implemented. The first limits the use of the method for radii equal or larger than 10 times the diameter of the pipeline cross section. The second refers to the flexibility of the curved bend and the fault displacement as it is explained in the 6<sup>th</sup> chapter of this thesis.

The deviation of the method results compared to the numerical results is due to the implementation of the boundary conditions of the curved bend and the negligence of the geometrical nonlinearities of the curved bend. Although the transverse and rotational springs are implemented as elastic, the pipe material and the soil reactions close to the curvature are not elastic. The assumption for elasticity limits the displacements of the bend, resulting to overestimating the strains, especially for short radii of curvature. Moreover, the axial spring is implemented with the tangent modulus, resulting to large displacements that underestimate strains, especially for angles close to 45 degrees, where the axial spring contributes much more to the mitigation of the axial displacement. Last but not least, the negligence of the geometrical nonlinearities leads to not taking into account the relieving bending moments of second order, overestimating the resulting strains for fault displacements up to 2 times the diameter of the pipeline cross section.

### **Future Research**

The above simplifying assumptions of the method that result in divergence can be substituted with more realistic assumptions through future research. To be more precise:

- a) As regards the transverse and rotational springs, their modulus of elasticity can be substituted with the equivalent secant modulus of the curved bend, as the numerical results showed that the strains of the straight segments that deform a lot close to the pipeline curved bend are close to the strains of the curved bend region. Alternatively, the highly curved initially straight segments can become implemented into the method, whose length is not known from start, so the boundary condition used also in the method of Karamitros et al. (2007) for a corresponding problem in the region of the fault can be used.

When the above problem is solved, then the use of the secant modulus of the axial spring shall diminish the underestimation of strains.

- b) As regards the second order effects, an analogous equation of the method of Karamitros et al. (2007) that estimates bending strains shall be proposed, in order to avoid the complex solution of the equilibrium equations of the deformed curved bend.

- c)        Apart from the above, the parametric study of the problem is proposed in order to evaluate the accuracy of the method for more cases of geometries, types of faults, pipeline cross sections and reaction of the surrounding soil.
  
- d)        Lastly, for future research is proposed the extension of the method for cases where the highly curved length of the initially straight pipeline segment close to the curved bend meets the highly curved length of the pipe of the fault region, which happens when the fault crosses the pipeline close to the curved bend. Moreover, the influence of the pipeline internal pressure shall be investigated in the curved bend region and possibly the implementation of the internal pressure in the method as initial conditions.



## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....</b>	<b>1</b>
<b>ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....</b>	<b>3</b>
<b>EXTENDED SUMMARY .....</b>	<b>9</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....</b>	<b>15</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>19</b>
1.1. Το πρακτικό πρόβλημα.....	19
1.2. Τι έχει γίνει μέχρι σήμερα .....	19
1.3. Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας .....	20
1.4. Μεθοδολογία της Διπλωματικής Εργασίας .....	20
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΝΤΟΜΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....</b>	<b>21</b>
2.1. Ευθύγραμμοι Αγωγοί .....	21
2.1.1. Γενικές παραδοχές .....	21
2.1.2. Αναλυτικές μέθοδοι .....	21
2.1.3. Αριθμητική και Πειραματική Διερεύνηση .....	38
2.2. Αγωγοί με Γωνία .....	44
2.2.1. Αναλυτικές μέθοδοι .....	44
2.2.2. Αριθμητική και Πειραματική Διερεύνηση .....	50
2.3. Σημερινή Πρακτική και Σχετικοί Κανονισμοί .....	51
2.4. Σύνοψη .....	53
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ .....</b>	<b>57</b>
3.1. Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων .....	57
3.2. Προσομοίωση Υλικού .....	58
3.3. Ισοδύναμα Ελατήρια Εδάφους .....	58
3.4. Εδαφικές Μετατοπίσεις λόγω Τεκτονικής Διάρρηξης .....	66
3.5. Μη Γραμμικός Αλγόριθμος Επίλυσης .....	68
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ .....</b>	<b>73</b>
4.1. Γενικά.....	73
4.2. Αριθμητικές αναλύσεις για ευθύγραμμο αγωγό .....	74
4.2.1. Δεδομένα αριθμητικών αναλύσεων .....	74
4.2.2. Τυπικά αποτελέσματα.....	76



4.2.3. Αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων .....	84
4.2.4. Παρατηρήσεις και συμπεράσματα .....	88
4.3. Αριθμητικές αναλύσεις για αγωγό με γωνία χωρίς τόξο καμπυλότητας .....	89
4.3.1. Δεδομένα αριθμητικών αναλύσεων .....	89
4.3.2. Τυπικά αποτελέσματα .....	90
4.3.3. Αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων .....	98
4.3.4. Παρατηρήσεις και συμπεράσματα .....	104
4.4. Αριθμητικές αναλύσεις για αγωγό με γωνία με τόξο καμπυλότητας .....	105
4.4.1. Δεδομένα αριθμητικών αναλύσεων .....	105
4.4.2. Τυπικά αποτελέσματα .....	106
4.4.3. Αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων .....	114
4.4.4. Παρατηρήσεις και συμπεράσματα .....	124
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ .....</b>	<b>125</b>
5.1. Βασικά βήματα της μεθόδου .....	125
5.1.1. Ανάλυση της εντατικής κατάστασης του αγωγού στην περιοχή της γωνίας .....	126
5.1.2. Ανάλυση της αλληλεπίδρασης του αναλυόμενου τμήματος αγωγού στην περιοχή της γωνίας με το αντίστοιχο τμήμα αγωγού στην περιοχή του ρήγματος .....	127
5.1.3. Ανάλυση της εντατικής κατάστασης και παραμόρφωσης του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος .....	128
5.2. Αποδείξεις των βασικών μητρώων της αναλυτικής μεθόδου .....	129
5.2.1. Βασικός φορέας του προβλήματος και συμβολισμοί .....	129
5.2.2. Μητρώο Στιβαρότητας Καμπύλου Φορέα .....	130
5.2.3. Δράσεις Παγίωσης .....	134
5.2.4. Συνοριακές συνθήκες δοκού .....	135
5.3. Η προτεινόμενη αναλυτική μέθοδος .....	139
5.3.1. ΒΗΜΑ 1: Ανάλυση της περιοχής της γωνίας .....	139
5.3.2. ΒΗΜΑ 2: Συμβιβαστό των παραμορφώσεων .....	144
5.3.3. ΒΗΜΑ 3: Ανάλυση της περιοχής του ρήγματος .....	145
5.4. Διάγραμμα ροής της μεθόδου .....	150
5.5. Βήμα προς βήμα η μέθοδος με όλους τους τύπους σε διάγραμμα .....	152
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ .....</b>	<b>157</b>
6.1. Γενικά .....	157

6.2. Ανεξάρτητη αξιολόγηση των επιμέρους βημάτων της μεθόδου .....	157
6.2.1. Επίλυση της γωνίας.....	157
6.2.2. Αλληλεπίδραση γωνίας ρήγματος .....	160
6.2.3. Περιοχή του ρήγματος .....	161
6.3. Επίδραση βασικών παραμέτρων στη συνολική μέθοδο .....	164
6.4. Επίδραση των βασικών παραμέτρων στην ακρίβεια της μεθοδολογίας .....	172
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....</b>	<b>181</b>
7.1. Περίληψη-Συμπεράσματα.....	181
7.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	183
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>185</b>



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1. Το πρακτικό πρόβλημα**

Κατά τη διασταύρωση ρήγματος με αγωγό (μεταφοράς πετρελαίου ή αερίου) σε κοντινή απόσταση με γωνία της χάραξης του αγωγού, σε μία ενδεχόμενη μετακίνηση του ρήγματος θα προκληθούν παραμορφώσεις τόσο στην περιοχή του ρήγματος όσο και στην περιοχή της γωνίας. Αυτές οι παραμορφώσεις πιθανώς θα θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια του αγωγού και θα έχουν μεγάλες οικονομικές και οικολογικές επιπτώσεις.

Η ανάλυση της επίδρασης τεκτονικών διαρρήξεων σε αγωγό, με τυχούσα πρακτικά γεωμετρία χάραξης, επιτυγχάνεται με την χρήση αριθμητικών μεθόδων (για παράδειγμα με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων). Η προσέγγιση αυτή όμως απαιτεί σημαντική εξειδίκευση καθώς και σημαντικό χρόνο για την προετοιμασία των δεδομένων, την πραγματοποίηση και την ερμηνεία των αναλύσεων. Εναλλακτικά, για προκαταρκτικούς τουλάχιστον υπολογισμούς και παραμετρικές αναλύσεις του προβλήματος, υπάρχει σημαντικό ενδιαφέρον στην χρήση αναλυτικών μεθόδων οι οποίες επιτρέπουν την άμεσα πρακτικά διερεύνηση του προβλήματος, με ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο και προσπάθεια. Τέτοιες αναλύσεις υπάρχουν, και χρησιμοποιούνται ευρέως, για ευθύγραμμα τμήματα του αγωγού, αλλά δεν καλύπτουν επαρκώς τις περιπτώσεις με γωνία του αγωγού πλησίον του ίχνους του ρήγματος, οι οποίες εξετάζονται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

### **1.2. Τι έχει γίνει μέχρι σήμερα**

Η πλειονότητα των διαθέσιμων σήμερα αναλυτικών μεθοδολογιών για την ανάλυση της εντατικής κατάστασης υπόγειων αγωγών στην περιοχή της διασταύρωσης με ενεργά ρήγματα αφορούν ευθύγραμμα τμήματα αγωγού. Συγκεκριμένα, αναφέρονται οι παλαιότερες μέθοδοι των Newmark & Hall (1975), Kennedy et al. (1977) και Wang & Yeh (1985), οι οποίες ήταν πρωτοποριακές για την εποχή τους, αλλά θεωρούνται σήμερα πλέον ξεπερασμένες δεδομένου ότι αφορούν μεγάλες μετακινήσεις ρήγματος που οδηγούν σε υπερ-συντηρητικά προβλεπόμενες μεγάλες παραμορφώσεις. Πρόσφατα σχετικά, έχουν αναπτυχθεί περισσότερο ακριβείς αναλυτικές μέθοδοι, οι οποίες επιλύουν το πρόβλημα επαρκώς για συνήθεις συνθήκες αγωγού και ρήγματος, τόσο για κανονικά όσο και για οριζοντίως διατεταγμένα ρήγματα (Karamitros et al., 2007, Trifonov et al., 2010, Trifonov et al., 2011, Karamitros et al., 2011).

Οι αναλυτικές μέθοδοι για καμπυλωμένο αγωγό με γωνία, είναι σαφώς λιγότερες από τις προαναφερθείσες και αφορούν αποκλειστικά στην σπάνια (αν όχι ανύπαρκτη) περίπτωση ορθής γωνίας στην χάραξη του αγωγού. Συγκεκριμένα, η μεθοδολογία των O'Rourke & Liu(1999) αφορά στην καταπόνηση που υφίσταται ο αγωγός στην περιοχή της γωνίας, ενώ η Διπλωματική Εργασία της Β. Γκεσούλη (ΕΜΠ,2008) προτείνει εμπειρικά διαγράμματα υπολογισμού των επιπτώσεων της γωνίας στις τάσεις και στις παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή του ίχνους του ρήγματος. Καμία από τις εν λόγω μεθοδολογίες δεν εξετάζει την πραγματική, και ευνοϊκή όπως θα αποδείξουμε, κατάσταση όπου η «γωνία» της χάραξης του αγωγού επιτυγχάνεται στο πεδίο με τόξο συναρμογής αρκετά μεγάλης ακτίνας καμπυλότητας.

### 1.3. Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Κατ' επέκταση των ανωτέρω, στόχος της Διπλωματικής Εργασίας είναι η πρόταση μιας νέας αναλυτικής μεθοδολογίας για την ανάλυση καμπύλων τμημάτων αγωγού πλησίον τεκτονικών διαρρήξεων. Θα γίνει προσπάθεια για μια ενιαία αντιμετώπιση τόσο της καμπύλης προσαρμογής όσο και του ευθύγραμμου τμήματος του αγωγού στην διασταύρωση με το ίχνος του ρήγματος, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις βασικές παραμέτρους που διέπουν το πρόβλημα: απόσταση αγωγού από ρήγμα, σύσταση εδάφους, χάλυβα κατασκευής αγωγού, γεωμετρία διατομής αγωγού, καθώς και γωνία και ακτίνα του τόξου συναρμογής.

Παράλληλα με τα ανωτέρω, πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις και εξάγονται πρακτικά συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση του τόξου συναρμογής στις παραμορφώσεις του αγωγού, καθώς και με τις συνθήκες υπό τις οποίες η εν λόγω επίδραση είναι σημαντική και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό του αγωγού.

### 1.4. Μεθοδολογία της Διπλωματικής Εργασίας

Για την επίτευξη των στόχων της Διπλωματικής Εργασίας, προηγήθηκε μια εκτενής και συστηματική βιβλιογραφική έρευνα, και ακολούθησε παραμετρική αριθμητική διερεύνηση του προβλήματος με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Ακολούθως, με οδηγό τις παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα των αριθμητικών αναλύσεων, διατυπώθηκε και ελέγχθηκε η προτεινόμενη, νέα αναλυτική μεθοδολογία. Συγκεκριμένα:

- Στο Κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται μία βιβλιογραφική αναδρομή σχετικά με τις υπάρχουσες μεθοδολογίες υπολογισμού της εντατικής κατάστασης σε ευθύγραμμους αγωγούς και με γωνία.
- Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η αριθμητική μέθοδος προσομοίωσης του προβλήματος, καθώς και τα βασικά δεδομένα: είδος και αριθμός πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν, προσομοίωση του εδάφους, επιβολή της μετακίνησης του ρήγματος και οι σχετικές παραδοχές.
- Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα από τις παραμετρικές αναλύσεις που έγιναν για ευθύγραμμους αγωγούς καθώς και για αγωγούς με γωνία και διάφορα χαρακτηριστικά του τόξου συναρμογής. Βασικές παράμετροι που εξετάστηκαν είναι η επιβαλλόμενη μετακίνηση του εδάφους, η γωνία της χάραξης του αγωγού, η ακτίνα του τόξου συναρμογής και η απόσταση του από το ίχνος του ρήγματος.
- Στο Κεφάλαιο 5 διατυπώνεται η προτεινόμενη αναλυτική μέθοδος με όλες τις παραδοχές της, τις αποδείξεις των τύπων της και διάγραμμα ροής για την ευκολότερη κατανόηση της.
- Στο Κεφάλαιο 6 παρατίθεται η αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας, με σύγκριση των αναλυτικών προβλέψεων με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα του κεφαλαίου 4.
- Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής, και προτείνονται πεδία για μελλοντική έρευνα και βελτίωση-επέκταση της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΝΤΟΜΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ**

### **2.1. Ευθύγραμμοι Αγωγοί**

#### **2.1.1. Γενικές παραδοχές**

Σημαντικός αριθμός εργασιών στη διεθνή βιβλιογραφία ασχολείται με την ανάλυση ή την πειραματική και αριθμητική διερεύνηση ενός χαλύβδινου αγωγού που διέρχεται από ένα ρήγμα. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται ποιες είναι οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στη διατομή του αγωγού λόγω πιθανής διάρρηξης του ρήγματος και μετακίνησης του εδάφους.

Εν γένει, το ρήγμα θεωρείται ότι δεν έχει πάχος και ούτε κάποιο υλικό πλήρωσης ενώ ο χαλύβδινος αγωγός κατασκευάζεται εντός τάφρου, σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους (π.χ. 1-2m). Το ρήγμα θεωρείται ότι προκαλεί μεγάλες μετακινήσεις, σε σχέση με τη διάμετρο του αγωγού (π.χ. 0.20 έως 2m), οπότε δεν ισχύει η θεωρία των μικρών παραμορφώσεων. Επιπλέον, η μετακίνηση θεωρείται ότι επιβάλλεται οιονεί στατικά, διότι η μετακίνηση του ρήγματος είναι αργή και έτσι μπορούν να αμεληθούν αδρανειακές δυνάμεις, οπότε εκτελείται στατική ανάλυση. Ο χάλυβας του αγωγού δεν επιτρέπεται να αναπτύξει παραμόρφωση πάνω από το όριο διαρροής σε εφελκυσμό (4-5%) ή πάνω από το όριο λυγισμού σε θλίψη (0.5-0.7% ανάλογα με την γεωμετρία της διατομής). Στην περιοχή των περιμετρικών συγκολλήσεων, οι ανωτέρω επιτρεπόμενες εφελκυστικές παραμορφώσεις μειώνονται σημαντικά (π.χ. σε 0.5%) λόγω της θερμικής αλλοίωσης που υφίστανται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα.

Οι ανωτέρω παραδοχές είναι κοινές στις περισσότερες από τις μεθόδους που αναφέρονται στα επόμενα, και επομένως δεν επαναλαμβάνονται. Αντίθετα, κατά περίπτωση, αναφέρονται οι αποκλίσεις από τις ανωτέρω γενικές παραδοχές.

#### **2.1.2. Αναλυτικές μέθοδοι**

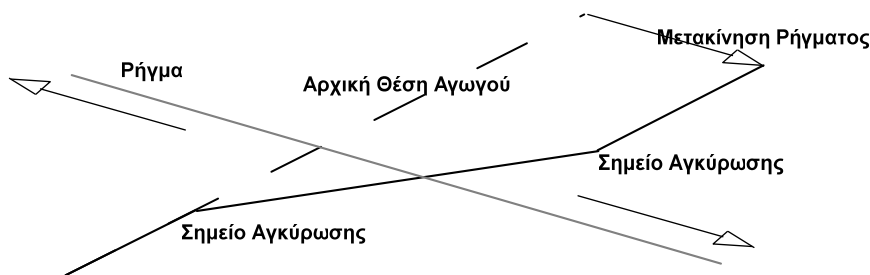
**Newmark & Hall(1975).** \_Οι Newmark & Hall(1975) εισήγαγαν μία αναλυτική μεθοδολογία για την ανάλυση αγωγού σε διασταύρωση με ρήγματα οριζόντιας διατομής.

Εδώ χρησιμοποιήθηκε θεωρία μικρών παραμορφώσεων σε αντίθεση με τις μεταγενέστερες μεθόδους. Θεωρήθηκε ότι υπάρχουν δύο σημεία εκατέρωθεν του αγωγού, τα σημεία αγκύρωσης, πέραν των οποίων ο αγωγός μετακινείται μαζί με το έδαφος. Μεταξύ των σημείων αγκύρωσης θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχουν πλευρικές αντιστάσεις από το έδαφος και έτσι ο αγωγός παραμορφώνεται ως ευθύγραμμο στέλεχος (καλώδιο) μεταξύ των σημείων αγκύρωσης (βλ. Σχήμα 2.1). Οι θέσεις των σημείων αγκύρωσης επηρεάζονται από έντονες στροφές του αγωγού (εάν υπάρχουν). Η συμπεριφορά του αγωγού θεωρήθηκε ως γραμμικώς ελαστική ή γραμμικώς πλαστική με μειωμένο μέτρο ελαστικότητας. Έγινε η παραδοχή ότι ενεργοποιείται όλη η αντίσταση του εδάφους στην αξονική διεύθυνση του αγωγού και επομένως θεωρήθηκε ότι στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού ασκείται η μέγιστη πλαστική αντίσταση (τριβής) του εδάφους.

Η εν λόγω μεθοδολογία συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

1. Υποτίθεται αρχικά μια τάση τριβής επί της επιφάνειας του αγωγού και υπολογίζονται, μέσω της τριβής και της αντίστοιχης δύναμης που δέχεται ο αγωγός, τα μήκη στα οποία οι διατομές είναι ελαστικές και πλαστικές.
2. Με βάση τις τάσεις, υπολογίζονται οι μέσες παραμορφώσεις και έπειτα πολλαπλασιάζονται με τα αντίστοιχα ελαστικά και πλαστικά μήκη του αγωγού για να βρεθεί η συνολική επιμήκυνση του.
3. Υπολογίζεται γεωμετρικά η επιμήκυνση συναρτήσει της γεωμετρίας της μετακίνησης του ρήγματος και συγκρίνεται με την προηγούμενη επιμήκυνση.
4. Με βάση την αρχική εκτίμηση και τη διαφορά των μηκών, υπολογίζεται μία νέα τάση στην επιφάνεια του αγωγού και επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί μέχρι να υπάρξει σύγκλιση.

Η εν λόγω μέθοδος είναι απλή στην εφαρμογή της, αλλά έχει ένα βασικό μειονέκτημα: δεν λαμβάνει υπόψη την αντίσταση του εδάφους σε πλευρική μετακίνηση καθώς και την καμπτική δυσκαμψία του αγωγού.



**ΣΧΗΜΑ 2.1:** Το προσομοίωμα ανάλυσης του αγωγού όπως προτάθηκε από τους Newmark & Hall (1975).

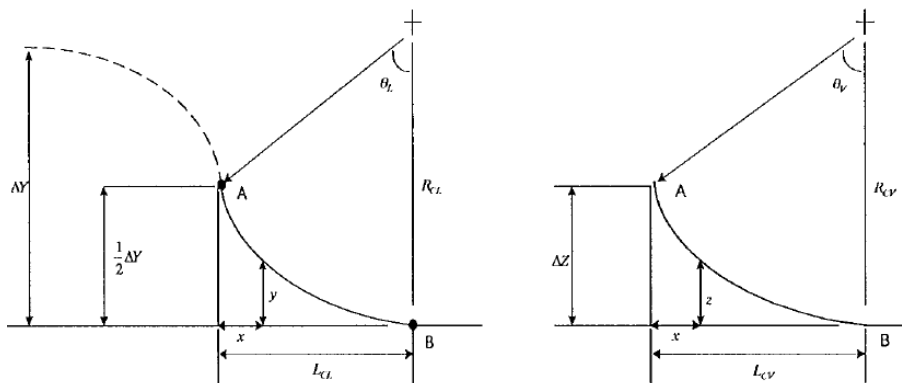
**Kennedy et al. (1977).** Οι Kennedy et al. (1977) πρότειναν μία επέκταση της αναλυτικής μεθόδου των Newmark and Hall(1975).

Πιο συγκεκριμένα, θεώρησαν ότι το υλικό του αγωγού υπακούει στην μη γραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων Ramberg-Osgood. Άλλες βασικές παραδοχές της μεθόδου είναι ότι η αξονική δύναμη του αγωγού είναι ανεξάρτητη της καμπυλότητας και ότι η καμπτική στιβαρότητα του αγωγού γίνεται αμελητέα λόγω διαρροής του χάλυβα με αποτέλεσμα ο αγωγός να συμπεριφέρεται ως καλώδιο. Λόγω της "καλωδιακής" λειτουργίας, συμπέραναν ότι ο αγωγός παραλαμβάνει τις πλευρικές δυνάμεις από το έδαφος αξονικά, με δημιουργία καμπυλότητας παρά κάμψης. Υποστήριξαν μάλιστα ότι όταν δεν ισχύει αυτή η παραδοχή, να αμεληθεί δηλαδή η καμπτική στιβαρότητα του αγωγού, τότε τα αποτελέσματα θα είναι συντηρητικά.

Η τριβή κατά την αξονική μετακίνηση του αγωγού επιδρά στο μήκος του αγωγού που επηρεάζεται από το ρήγμα. Όσο πιο μικρή είναι η τριβή τόσο πιο μεγάλο είναι αυτό το μήκος και τότε ο αγωγός μπορεί να αναλάβει πιο ομαλά τη φόρτιση (αναπτύσσονται μικρότερες εφελκυστικές παραμορφώσεις). Και στην εν λόγω μεθοδολογία, τα δύο σημεία εκατέρωθεν του ρήγματος, όπου ο

αγωγός κινείται πλέον μαζί με το έδαφος, χωρίς κάποια σχετική μετακίνηση ονομάστηκαν σημεία αγκύρωσης. Μάλιστα, έντονες στροφές (γωνίες) στη χάραξη του αγωγού θεωρήθηκε συντηρητικά ότι αποτελούν και αυτές σημεία αγκύρωσης. Βασισμένοι σε οδηγίες της ASCE χρησιμοποίησαν τις αντίστοιχες αντιστάσεις του εδάφους σε εγκάρσιες (οριζόντιες και κατακόρυφες) και σε αξονικές μετακινήσεις του αγωγού.

Στρέβλωση της διατομής, λόγω τοπικού λυγισμού και μεγάλων παραμορφώσεων, μπορεί να αμεληθεί λόγω της μεγάλης αξονικής παραμόρφωσης του αγωγού και της μεγάλης εσωτερικής πίεσης. Κοντά στο ρήγμα ο αγωγός καμπυλώνεται είτε κατά την οριζόντια διεύθυνση είτε κατά την κατακόρυφη είτε και κατά τις δύο ανάλογα με τη μετακίνηση του ρήγματος. Στο τμήμα που καμπυλώνεται θεωρείται ότι η αντίδραση του εδάφους παραμένει σταθερή, ίση με την αντίσταση διαρροής, καθώς η μετακίνηση διαρροής είναι ιδιαίτερα μικρή. Κατά συνέπεια, και η καμπυλότητα παραμένει σταθερή, και υπολογίζεται ως ο λόγος της αξονικής δύναμης προς την εγκάρσια (οριζόντια και κατακόρυφη αντίστοιχα) τάση του εδάφους. Η αξονική δύναμη του αγωγού παραμένει κατ'ουσίαν σταθερή στο τμήμα του αγωγού που καμπυλώνεται, ενώ λαμβάνεται (προαιρετικά) υπόψη και αύξηση της αξονικής τριβής του αγωγού στο εν λόγω καμπύλο τμήμα.



**ΣΧΗΜΑ 2.2:** Το προσομοίωμα ανάλυσης του αγωγού όπως προτάθηκε από τους Kennedy et al. (1977) σε κάτοψη (αριστερά) και τομή (δεξιά).

Η εν λόγω μεθοδολογία συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

1. Εκτίμηση της μέγιστης τάσης του αγωγού και άρα της μέγιστης αξονικής δύναμης στο σημείο του ρήγματος.
2. Υπολογισμός των οριζοντίων και κατακόρυφων ακτίνων καμπυλότητας, ως το λόγο της μέγιστης αξονικής δύναμης προς την αντίστοιχη μέγιστη αντίδραση του εδάφους. (βλ. Σχήμα 2.2)
3. Προσδιορισμός του μήκους των τόξων προβαλλόμενο πάνω στον αρχικό άξονα του αγωγού και τελικά της επιμήκυνσης του αγωγού. Ο προσδιορισμός γίνεται γεωμετρικά, με βάση τα στοιχεία της μετακίνησης του ρήγματος.
4. Υπολογισμός της επιμήκυνσης του αγωγού μέσω του ολοκληρώματος των παραμορφώσεων. Η ολοκλήρωση γίνεται ξεχωριστά για τα καμπύλα και για τα ευθύγραμμα τμήματα του αγωγού.
5. Επανεκτίμηση της μέγιστης τάσης και δύναμης στο σημείο του ρήγματος και επανάληψη των βημάτων 1 έως 4 μέχρις ότου οι επιμηκύνσεις των βημάτων 3 και 4 να είναι ίσες.



6. Μέσω του νόμου Ramberg-Osgood εκτίμηση της μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης.

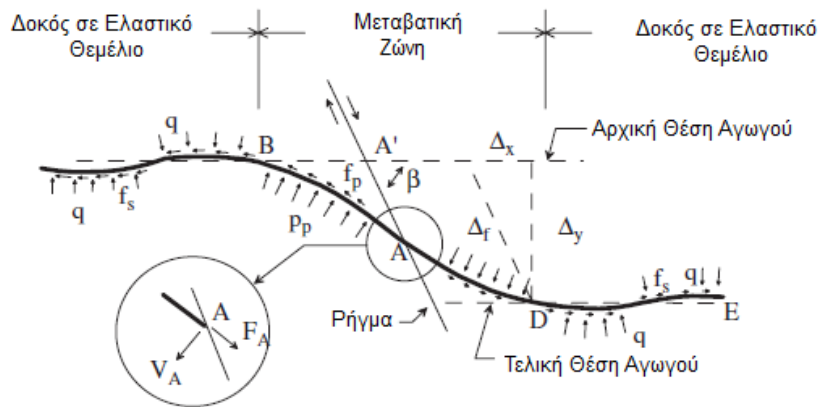
Η βασική βελτίωση σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο είναι ότι εδώ δεν έχουν αμεληθεί οι εγκάρσιες αντιδράσεις του εδάφους. Σημαντικό όμως μειονέκτημα είναι η παραδοχή ότι αμελείται η καμπτική στιβαρότητα του αγωγού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μέθοδος να έχει εφαρμογή μόνο σε μεγάλες μετακινήσεις ρηγμάτων, όπου όμως οι προκύπτουσες παραμορφώσεις ξεπερνούν τα επιτρεπόμενα όρια σε εφελκυσμό ή/και θλίψη.

**Wang & Yeh(1985).** \_Οι Wang & Yeh(1985) προτείνουν μία επέκταση της αναλυτικής μεθόδου των Kennedy et al. (1977) όσον αφορά ρήγματα οριζοντίου διατομής.

Πιο συγκεκριμένα, δεν αμελήθηκε η καμπτική στιβαρότητα του αγωγού. Επιπλέον, εκμεταλλεύθηκαν τη συμμετρία του προβλήματος, κάτι που δεν ισχύει για κανονικά ρήγματα (βλ. Σχήμα 2.3) και χώρισαν τον αγωγό σε 4 τμήματα:

- Δύο τμήματα που ξεκινούν από το ρήγμα, δηλαδή τα AB και AD του Σχήματος 2.3, έχουν σταθερή καμπυλότητα, συμπεριφέρονται ως κυκλικά τόξα και δέχονται τις μέγιστες εγκάρσιες αντιδράσεις από το έδαφος.
- Δύο πιο απομακρυσμένα τμήματα από το ρήγμα, τα BC και DE, τα οποία θεωρήθηκαν ως δοκοί απείρου μήκους επί ελαστικού εδάφους. Δηλαδή η οριζόντια εγκάρσια αντίσταση του εδάφους παραμένει ανάλογη της εγκάρσιας σχετικής μετακίνησης του αγωγού.

Από την επίλυση της δοκού απείρου μήκους σε ελαστικό θεμέλιο προέκυψαν σχέσεις που συνδέουν τη στροφή, τη ροπή και την τέμνουσα στα σημεία B και D (βλ. Σχήμα 2.3). Παράλληλα, από την ισοροπία ενός εκ των δύο τμημάτων στη μεταβατική ζώνη (AB ή AD) βρέθηκε μία σχέση που συνδέει την αξονική δύναμη συναρτήσει της εγκάρσιας αντίδρασης και των χαρακτηριστικών του αγωγού. Επιπλέον, συναρτήθηκε η καμπυλότητα του αγωγού με τη μετακίνηση του ρήγματος και συνδέθηκε η κάμψη του αγωγού με την καμπυλότητα. Τέλος, εξισώθηκε η επιμήκυνση του αγωγού που υπολογίζεται γεωμετρικά με αυτήν που υπολογίζεται από την ολοκλήρωση των παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού. Για τον υπολογισμό της επιμήκυνσης μέσω των παραμορφώσεων, ο αγωγός χωρίστηκε σε 3 περιοχές: στην πρώτη η τάση ήταν ανελαστική με το έδαφος στην παθητική του κατάσταση, στη δεύτερη η τάση ήταν ελαστική αλλά το έδαφος ήταν πάλι στην πλήρη παθητική του κατάσταση, ενώ στην τρίτη (η οποία αφορά το τμήμα του αγωγού που προσομοιώνεται ως δοκός επί ελαστικού εδάφους) η τάση στον αγωγό είναι ελαστική και το έδαφος στην ουδέτερη κατάσταση.

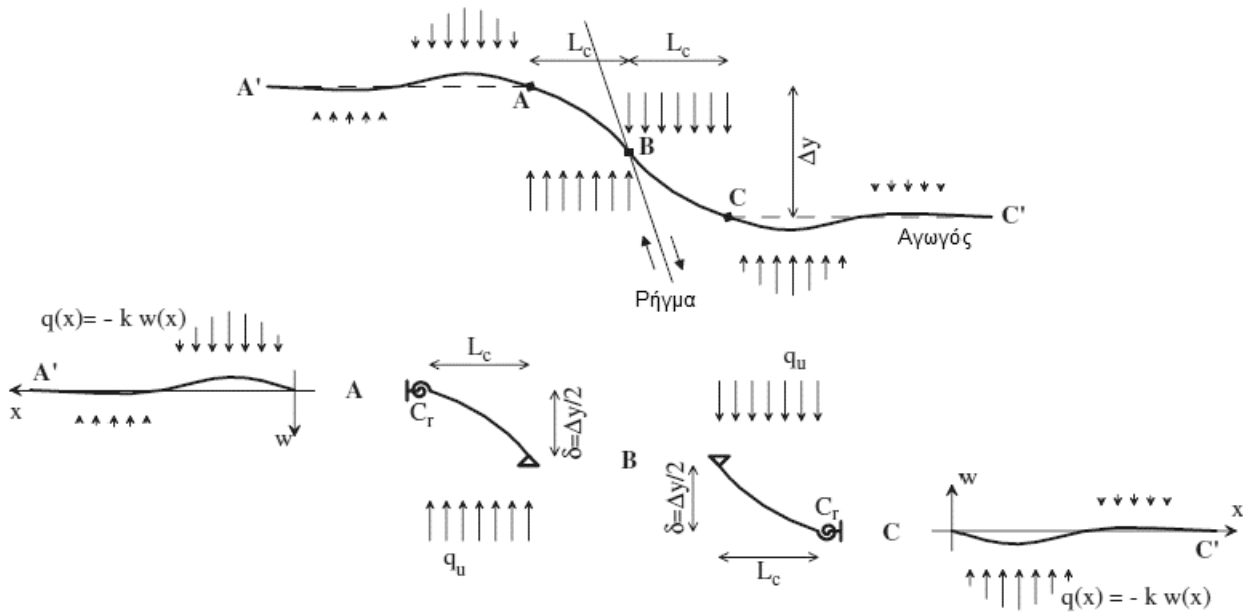


**ΣΧΗΜΑ 2.3:** Το προσομοίωμα ανάλυσης του αγωγού όπως προτάθηκε από τους Wang & Yeh(1985).

Οι ανωτέρω παραδοχές οδηγούν σε σαφώς βελτιωμένες προβλέψεις, παρά το γεγονός ότι αγνοείται η επιρροή της αξονικής δύναμης του αγωγού στην καμπτική του στιβαρότητα.

**Karamitros et al. (2007).** Οι Karamitros et al. (2007) παρατήρησαν την ανωτέρω παράληψη της μεθόδου των Wang & Yeh(1985) όπως επίσης ότι η δυσμενέστερη ροπή δεν εμφανίζεται στο τέλος του καμπύλου τμήματος αλλά πιο κοντά στο ρήγμα. Επίσης, απέρριψαν το συντελεστή ασφαλείας ροπών της προηγούμενης μεθόδου, ως μη αξιόπιστο καθώς πρόκειται για πρόβλημα επιβαλλόμενης μετακίνησης και όχι επιβαλλόμενης δύναμης.

Μία άλλη βασική διαφορά είναι ότι η εν λόγω μέθοδος λαμβάνει υπόψη ότι οι εφελκυστικές παραμορφώσεις του αγωγού περιορίζονται από το όριο του 0.5% λόγω των περιμετρικών συγκολλήσεων, όπως περιγράφεται και στις γενικές παραδοχές της εισαγωγής. Για αυτόν το λόγο αμελούνται φαινόμενα τοπικού λυγισμού και στρέβλωσης της διατομής. Όπως και στη μέθοδο των Wang & Yeh(1985), διατηρείται ο χωρισμός του αγωγού σε 4 τμήματα καθώς και η παραδοχή της συμμετρίας περί το ρήγμα (αφού η μέθοδος αφορά ρήγμα οριζοντίου διατομής). Το έδαφος προσομοιώνεται με μη γραμμικά ελατήρια, υπολογισμένα σύμφωνα με του κανονισμούς της ASCE. Επιπλέον, παρατηρήθηκε σε αριθμητικές αναλύσεις ότι στις κρίσιμες διατομές στα μήκη AB και BC, όπου εμφανίζεται η μέγιστη καμπτική ένταση, αυξάνεται και τοπικά η αξονική παραμόρφωση του αγωγού. Επομένως, για να βρεθεί με ακρίβεια η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση, η οποία αποτελεί το βασικό κριτήριο σχεδιασμού, υιοθετήθηκε μία επαναληπτική μέθοδος για την εύρεση της ακριβούς κατανομής των παραμορφώσεων στην κρίσιμη διατομή.



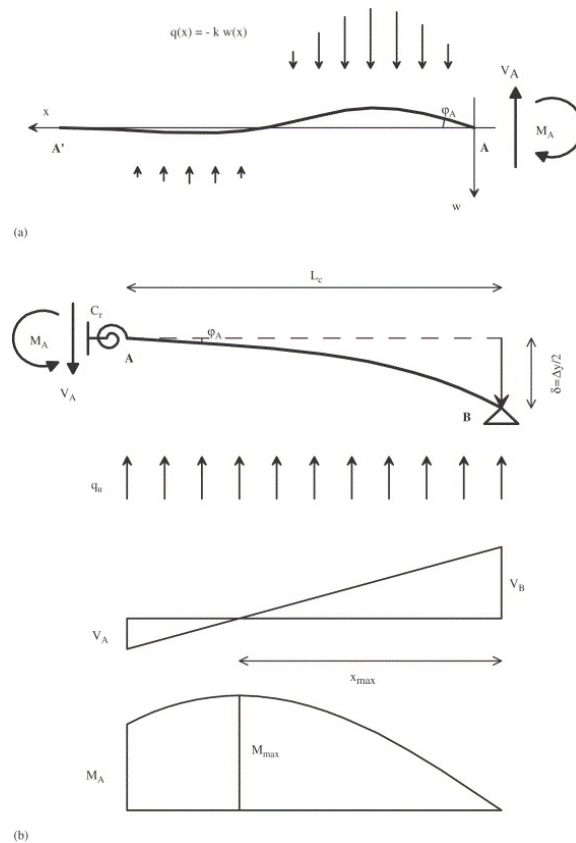
**ΣΧΗΜΑ 2.4:** Το προσομοίωμα ανάλυσης του αγωγού όπως προτάθηκε από τους Karamitros et al. (2007).

Η εν λόγω μεθοδολογία συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

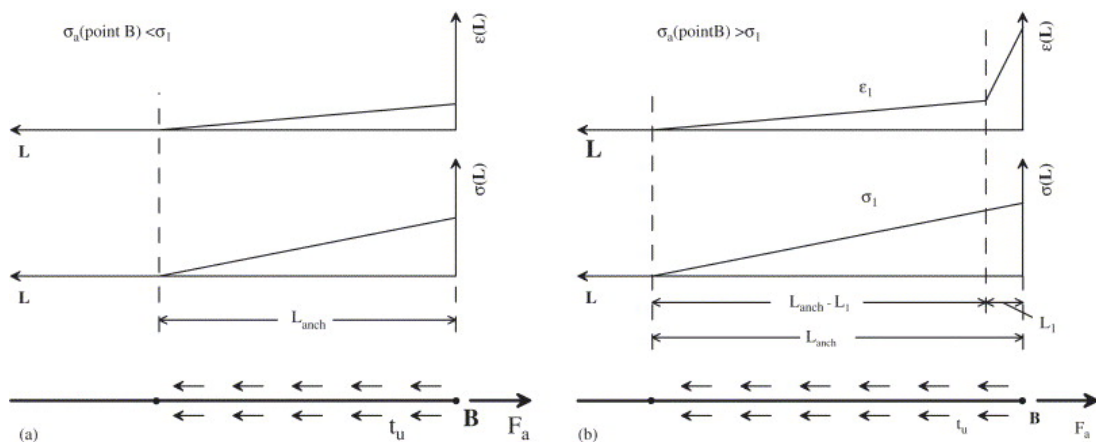
1. Αναλύεται το τμήμα Α'Α όπως και στη μέθοδο των Wang & Yeh(1985). (βλ. Σχήμα 2.4)
2. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης επιβάλλονται ως συνοριακές συνθήκες στο καμπύλο τμήμα AB στο κοινό τους σημείο A ώστε να υπολογιστεί το μήκος του καμπύλου τμήματος  $L_c$  και έπειτα η μέγιστη καμπτική καταπόνηση  $M_{max}$ . (βλ. Σχήμα 2.5)
3. Υπολογίζεται γεωμετρικά η επιμήκυνση του αγωγού(κατά προσέγγιση είναι ίση με την κατά μήκος συνιστώσα της μετακίνησης του ρήγματος  $\Delta L_{req} \approx \Delta x$ ). Έπειτα υπολογίζεται η επιμήκυνση του αγωγού  $\Delta L_{av}$  ως το ολοκλήρωμα των παραμορφώσεων συναρτήσει της άγνωστης τάσης του αγωγού στο σημείο του ρήγματος. Εξισώνοντας τις δύο επιμηκύνσεις βρίσκεται η τάση, άρα και η αξονική δύναμη του αγωγού  $F_a$ . Διακρίνονται δύο περιπτώσεις ανάλογα με το εάν έχουν διαρρεύσει τα κατά μήκος ελατήρια του αγωγού. (βλ. Σχήμα 2.6)
4. Υπολογίζονται οι καμπτικές παραμορφώσεις  $\epsilon_b$ . Για μικρές μετακινήσεις ισχύει η σχέση της ελαστικής θεωρίας  $\epsilon_b^I$  συναρτήσει της ροπής, ενώ για μεγάλες παραμορφώσεις όπου μπορεί να αμεληθεί η καμπτική στιβαρότητα (καλωδιακή λειτουργία) της δοκού υπολογίζονται γεωμετρικά  $\epsilon_b^{II}$  συναρτήσει της αξονικής δύναμης του αγωγού. Για να υπάρχει μία σχέση ενιαία για τις καμπτικές παραμορφώσεις αθροίζονται τα αντίστροφα των καμπτικών παραμορφώσεων. Αυτή η άθροιση επιβεβαιώθηκε ποσοτικά και από τα αριθμητικά αποτελέσματα, παρόλο που δεν έχει απόλυτα φυσικό νόημα.
5. Για να ευρεθεί επαναληπτικά η αξονική παραμόρφωση του αγωγού  $\epsilon_a$  στην κρίσιμη διατομή του αγωγού υποτίθεται μία αρχική τιμή και υπολογίζονται ακολούθως οι συνολικές παραμορφώσεις (άθροισμα αξονικών και καμπτικών παραμορφώσεων), από τις οποίες προκύπτουν οι τάσεις. Το ολοκλήρωμα των τάσεων πάνω στη διατομή απαιτείται να είναι ίσο με την αξονική δύναμη του

αγωγού  $F_a$ . Προτείνεται η μέθοδος Newton-Raphson ώστε να επιλυθεί η εξίσωση επαναληπτικά. (βλ. Σχήμα 2.7)

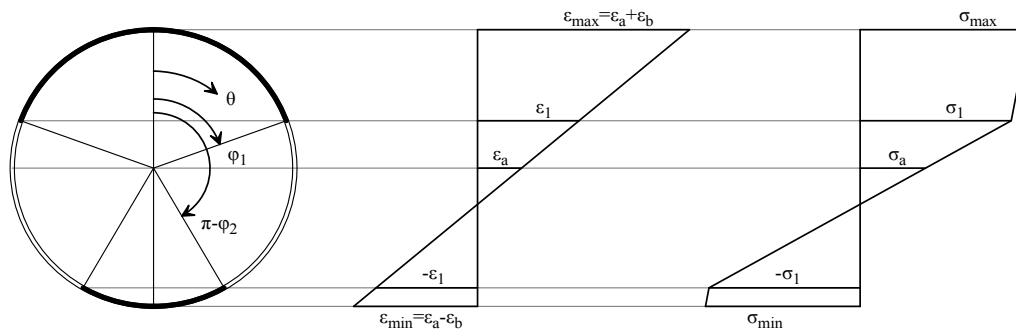
6. Υπολογίζεται το νέο τέμνον μέτρο ελαστικότητας  $E_{sec}$  για να ληφθεί υπόψη η μη γραμμικότητα του υλικού καθώς η μέχρι τώρα μεθοδολογία χρησιμοποιούσε ελαστική θεωρία. Υπολογίζεται η κάμψη της διατομής μέσω ολοκλήρωσης των τάσεων του βήματος 5. Από τη σχέση που συνδέει την καμπτική ένταση με τις καμπτικές παραμορφώσεις υπολογίζεται το νέο μειωμένο μέτρο ελαστικότητας. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 έως 6 μέχρι να υπάρξει σύγκλιση.



**ΣΧΗΜΑ 2.5:** Στατικό προσομοίωμα για (a) το ημιαπειρομήκες τμήμα και (b) το καμπύλο τμήμα.



**ΣΧΗΜΑ 2.6:** (a) Γραμμική και (b) μη γραμμική κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων κατά μήκος του μη αγκυρωμένου μήκους του αγωγού.

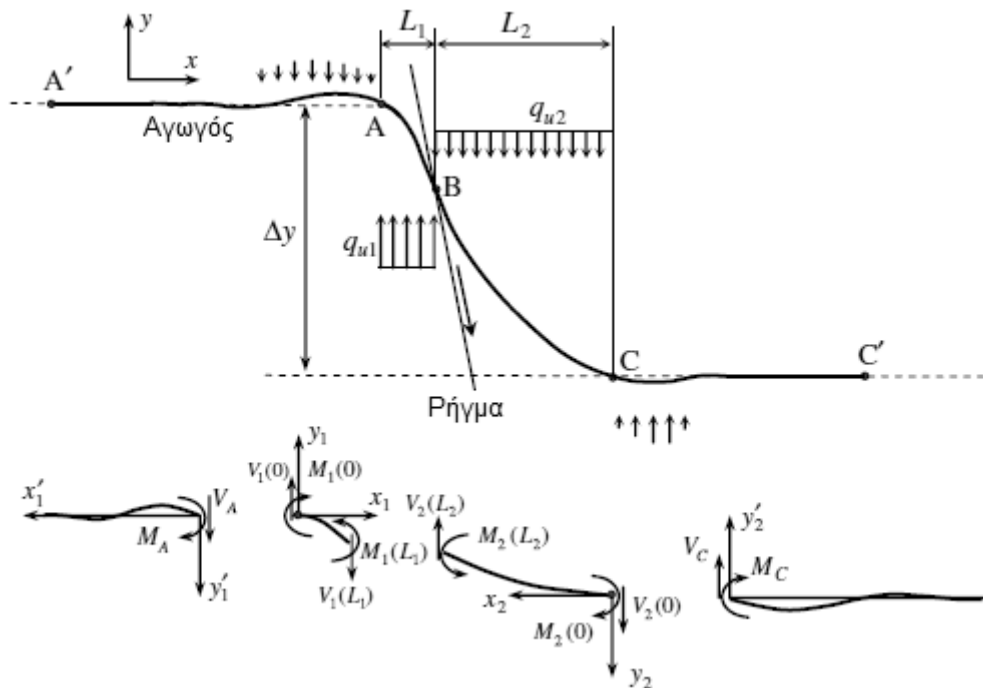


**ΣΧΗΜΑ 2.7:** Μη γραμμική κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων σε μία διατομή του αγωγού.

Έγινε σύγκριση της εν λόγω μεθόδου, των Kennedy et al. (1977) και των Wang & Yeh(1985) με αριθμητικές αναλύσεις για διάφορες γωνίες ρήγματος και μετακινήσεις. Η αξονική παραμόρφωση στη θέση του ρήγματος προβλέφθηκε ικανοποιητικά με όλες τις μεθόδους, δεδομένου ότι προκύπτει από την εξίσωση των επιμηκύνσεων που υπολογίζονται γεωμετρικά και αναλυτικά. Η μέγιστη αξονική παραμόρφωση, η καμπτική παραμόρφωση και η μέγιστη συνολική παραμόρφωση όμως προβλέφθηκαν με καλή ακρίβεια με την εν λόγω μόνο μεθοδολογία. Οι άλλες μεθοδολογίες επέδειξαν ικανοποιητική ακρίβεια μόνο σε υψηλές μετακινήσεις όπου μπορεί να αμεληθεί η καμπτική στιβαρότητα (μέθοδος Kennedy et al., 1977) και όπου μπορεί να θεωρηθεί ότι το καμπύλο τμήμα είναι κυκλικό τόξο (μέθοδος Wang & Yeh, 1985).

**Trifonov et al. (2010).** Οι Trifonov et al. (2010) ασχολήθηκαν με την επέκταση της αναλυτικής μεθόδου των Karamitros et al. (2007) σε κανονικά ρήγματα αλλά και με τη γενικότερη βελτίωση της ακόμη και στα ρήγματα οριζοντίας διατμήσεως.

Πιο συγκεκριμένα, γενίκευσαν τις εξισώσεις και για μη συμμετρική συμπεριφορά του αγωγού, ώστε να αναλυθεί και η περίπτωση του κανονικού ρήγματος. (βλ. Σχήμα 2.11) Τα δύο άγνωστα μήκη των καμπύλων τμημάτων ευρέθηκαν με διαδικασία ελαχιστοποίησης του συστήματος των εξισώσεων με τη μέθοδο Nelder & Mead. Στον υπολογισμό της επιμήκυνσης του αγωγού γεωμετρικά έλαβαν υπόψη και την επιρροή της κάμψης του αγωγού, η οποία είναι σημαντική όταν ο αγωγός κάμπτεται πολύ, δηλαδή σε μεγάλες μετακινήσεις και γωνίες ρήγματος. Αυτό επιβεβαιώθηκε και με αριθμητικές αναλύσεις. Εισήγαγαν την αξονική δύναμη στις εξισώσεις ισορροπίας αντί να προσθέσουν στις ελαστικές καμπτικές παραμορφώσεις  $\epsilon_b^I$ , τις καμπτικές παραμορφώσεις δευτέρας τάξεως  $\epsilon_b^{II}$  όπως έκαναν οι Karamitros et al. (2007). Υποστήριξαν πως έτσι υπάρχει καλύτερο φυσικό νόημα στη μεθοδολογία ως προς την επιρροή της αξονικής δύναμης στην καμπτική στιβαρότητα.



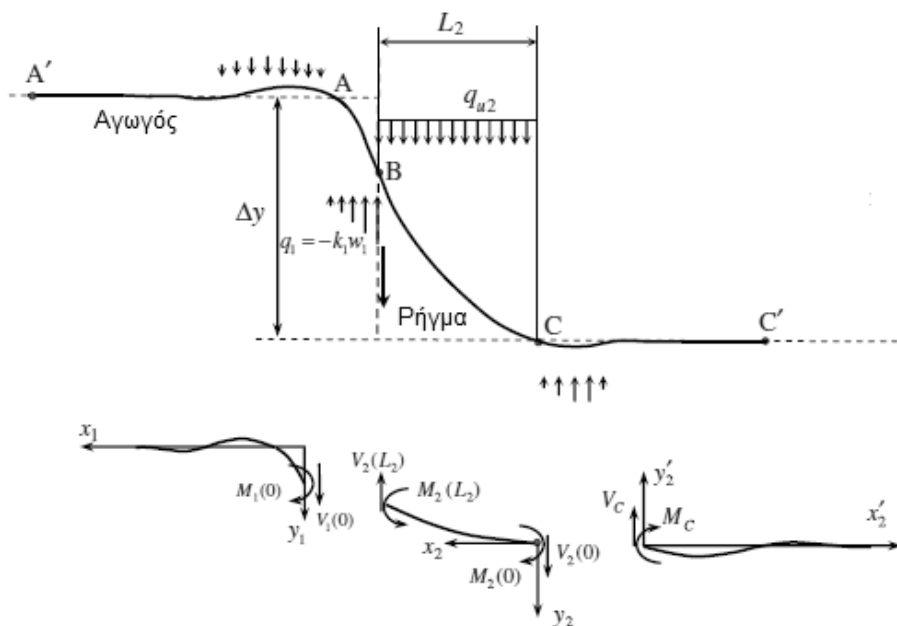
**ΣΧΗΜΑ 2.8:** Το προσομοίωμα ανάλυσης του αγωγού όπως προτάθηκε από τους Trifonov et al. (2010).

Ειδικότερα για το κανονικό ρήγμα προσέφεραν δύο εναλλακτικές αντιμετώπισης του προβλήματος ανάλογα με το μέγεθος της μετακίνησης. Για μικρή μετακίνηση, το μέρος του αγωγού που ωθείται προς τα κάτω δέχεται αντίδραση από το έδαφος ανάλογη της μετακίνησης καθώς το έδαφος δεν έχει διαρρεύσει ακόμη. Έτσι επιλύθηκε το πρόβλημα με γραμμικά ελατήρια στο αντίστοιχο τμήμα (βλ. Σχήμα 2.9). Για μεγάλες μετακινήσεις όπου υπάρχει διαρροή τέθηκε ομοιόμορφα κατανεμημένη αντίδραση (βλ. Σχήμα 2.8). Τέλος, εισήγαγαν μία αδιάστατη παράμετρο η οποία δείχνει πότε ο αγωγός συμπεριφέρεται ως δοκός και πότε ως καλώδιο, δηλαδή πότε μπορεί να αμεληθεί η καμπτική στιβαρότητα, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούνται άλλες μέθοδοι πιο απλούστερες, για παράδειγμα των Kennedy et al. (1977) όταν συμπεριφέρεται ως καλώδιο. (Σχήμα 2.10)

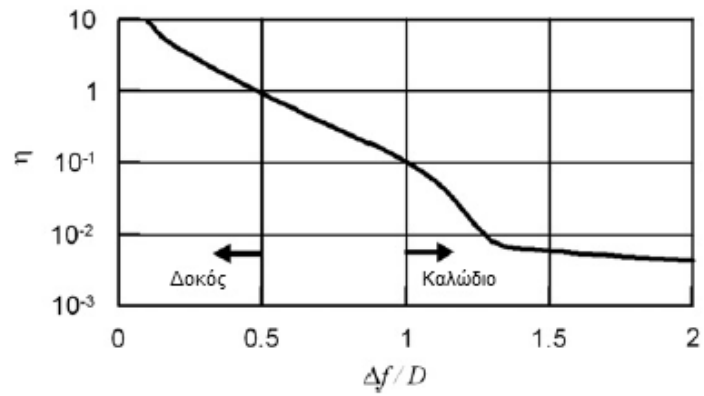
Η εν λόγω μεθοδολογία συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

1. Θεωρούνται μηδενικές οι πλευρικές μετακινήσεις του αγωγού, ή λαμβάνονται οι μετακινήσεις του προηγούμενου βήματος φόρτισης ή επανάληψης, ώστε να υπολογιστεί η επιμήκυνση του αγωγού γεωμετρικά. Έπειτα υπολογίζεται η επιμήκυνση του αγωγού ως το ολοκλήρωμα των παραμορφώσεων και εξισώνονται. Έτσι προκύπτει η μέγιστη τάση στον αγωγό άρα και η αξονική δύναμη στο σημείο του ρήγματος.
2. Υπολογίζονται τα άγνωστα καμπύλα μήκη  $L_1$  και  $L_2$  λύνοντας το σύστημα των εξισώσεων ισορροπίας και συμβιβαστών μετατοπίσεων (βλ. Σχήμα 2.8).
3. Εκ νέου υπολογισμός των πλευρικών μετακινήσεων του αγωγού.
4. Υπολογισμός των μέγιστων καμπτικών καταπονήσεων (εφόσον έχουν βρεθεί παραπάνω οι συνοριακές συνθήκες των δοκών) και των καμπτικών παραμορφώσεων (θεώρηση μόνο των παραμορφώσεων ελαστικής δοκού, βλ. Σχήματα 2.8, 2.9 και 2.12).

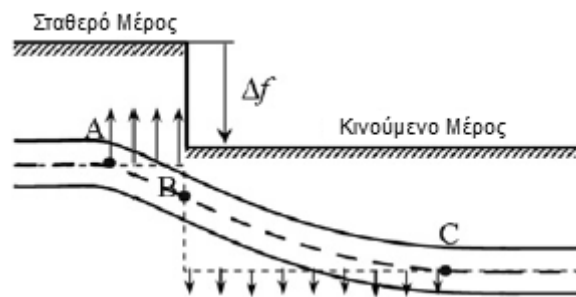
5. Εύρεση επαναληπτικά της αξονικής παραμόρφωσης του αγωγού στην κρίσιμη διατομή. Όπως και στη μέθοδο των Karamitros et al. (2007) θεωρείται το άθροισμα αξονικής και καμπτικής παραμόρφωσης, από το οποίο προκύπτουν οι τάσεις. Το ολοκλήρωμα των τάσεων πάνω στη διατομή πρέπει να ισούται με την αξονική δύναμη του αγωγού. Επιλέγεται η μέθοδος Newton-Raphson για την εύρεση της λύσης.
6. Όμοια πάλι με τη μέθοδο Karamitros et al. (2007) υπολογίζεται το νέο τέμνον μέτρο ελαστικότητας για να ληφθεί υπόψη η μη γραμμικότητα του υλικού καθώς η μέχρι τώρα μεθοδολογία χρησιμοποιούσε ελαστική θεωρία. Υπολογίζεται η κάμψη της διατομής μέσω ολοκλήρωσης των τάσεων του βήματος 5. Από τη σχέση που συνδέει την καμπτική ένταση με τις καμπτικές παραμορφώσεις υπολογίζεται το νέο μειωμένο μέτρο ελαστικότητας. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 έως 6 μέχρι να υπάρξει σύγκλιση.



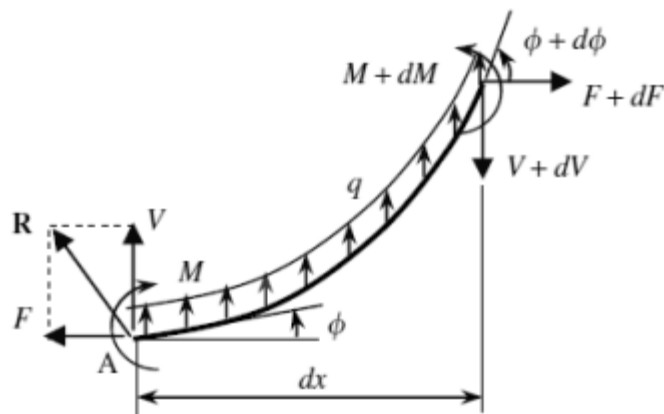
**ΣΧΗΜΑ 2.9:** Εναλλακτικό προσομοίωμα ανάλυσης του αγωγού σε περίπτωση μικρής μετακίνησης κανονικού ρήγματος.



**ΣΧΗΜΑ 2.10:** Μετάβαση της συμπεριφοράς του αγωγού από δοκό σε καλώδιο ως συνάρτηση του αδιάστατου συντελεστή.



**ΣΧΗΜΑ 2.11:** Μετακινήσεις του εδάφους και του αγωγού λόγω κατακόρυφης μετακίνησης του ρήγματος.



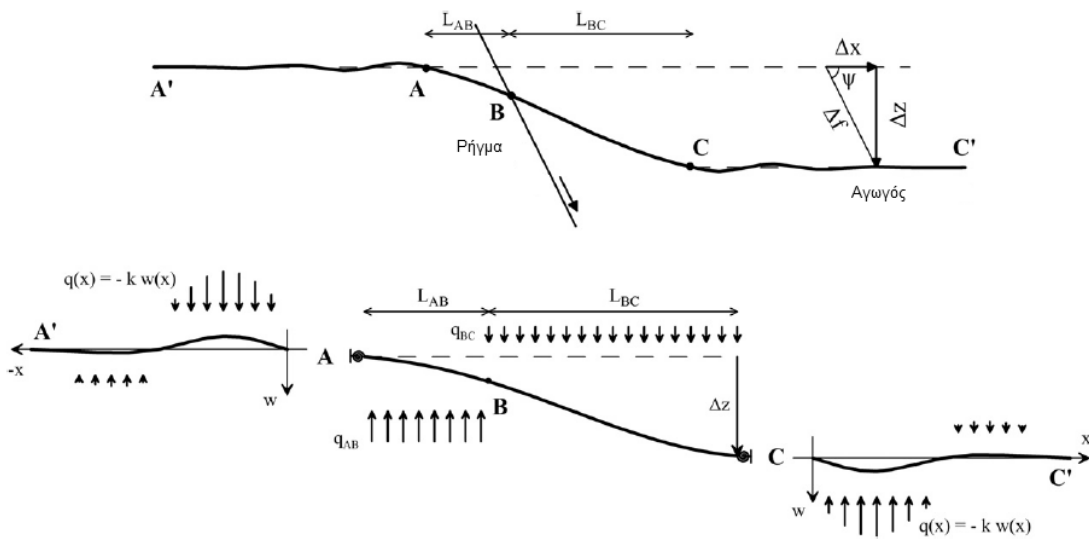
**ΣΧΗΜΑ 2.12:** Διαφορικό τμήμα δοκού υποβαλλόμενο σε κάμψη και τέμνουσα.



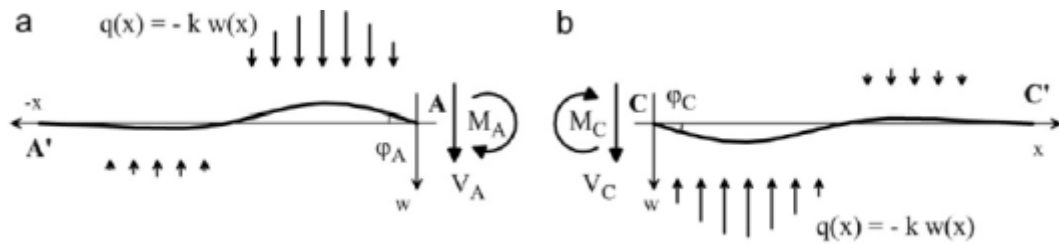
Συμπερασματικά, μετά από σύγκριση της μεθοδολογίας αυτής με των Karamitros et al. (2007), βρέθηκε πως τα αποτελέσματα δεν αλλάζουν σημαντικά όσον αφορά την επιρροή της αξονικής δύναμης του αγωγού στην καμπτική στιβαρότητα. Επισημαίνεται όμως παράλληλα ότι με αυτή τη μέθοδο υπάρχει καλύτερο φυσικό νόημα των παραδοχών, από την άλλη πλευρά η όλη διαδικασία που εφαρμόστηκε καθίσταται αρκετά περίπλοκη για την εύκολη και ευρεία εφαρμογή της μεθόδου, ειδικά εάν ληφθεί υπόψη ότι οι αναλυτικές μέθοδοι προορίζονται για γρήγορους προκαταρκτικούς υπολογισμούς.

**Karamitros et al. (2011)** .\_Οι Karamitros et al. (2011) προσάρμοσαν την υπάρχουσα μεθοδολογία των Karamitros et al. (2007) και στην περίπτωση των κανονικών ρηγμάτων με ίχνος κάθετο και υπό γωνία προς τον άξονα του αγωγού.

Λόγω της διαφορετικής αντίστασης του εδάφους στην προς τα πάνω και προς τα κάτω κίνηση του εδάφους, δεν γινόταν να διατηρηθεί η παραδοχή της συμμετρίας στην παραμόρφωση του αγωγού. Οπότε ο αγωγός χωρίστηκε σε 3 τμήματα. (βλ. Σχήματα 2.13 έως 2.15) Τα δύο είναι οι δοκοί απείρου μήκους σε ελαστικό έδαφος, που αντιμετωπίστηκαν όπως και στη μέθοδο Karamitros et al. (2007), ενώ το ενδιάμεσο κομμάτι έχει τις συνοριακές συνθήκες που επιβάλλουν τα δύο ακραία τμήματα. Επειδή χρειάζεται πολύ μικρή μετακίνηση προς τα πάνω ώστε να αναπτυχθεί η μέγιστη αντίσταση, όλο το μήκος όπου κινείται προς τα πάνω στο ενδιάμεσο τμήμα θεωρήθηκε ότι υφίσταται τη μέγιστη αντίσταση. Αφού η προς τα πάνω αντίσταση είναι αρκετά μικρή και το αντίστοιχο μήκος βρέθηκε αρκετά μεγάλο. Το μήκος που κινείται προς τα κάτω συναντά μεγαλύτερη αντίσταση, η οποία φθάνει στο όριο της σε πολύ μεγαλύτερη μετακίνηση. Έτσι, στις περισσότερες περιπτώσεις μετακινήσεων, ασκείται στον αγωγό ένα παραβολοειδές φορτίο το οποίο μπορεί να προσομοιωθεί με μία τριγωνική ή ομοιόμορφη κατανομή. Έχει επιλεγθεί η ομοιόμορφη κατανομή για λόγους απλοποίησης.

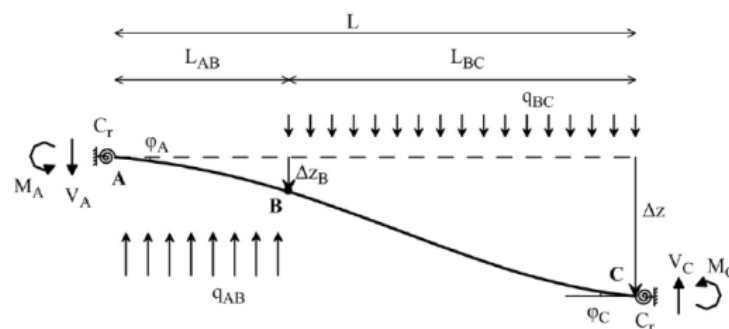


**ΣΧΗΜΑ 2.13:** Το προσομοίωμα ανάλυσης του αγωγού όπως προτάθηκε από τους Karamitros et al. (2011).



**ΣΧΗΜΑ 2.14:** Το στατικό προσομοίωμα των τμημάτων (a) A'A και (b) CC'.

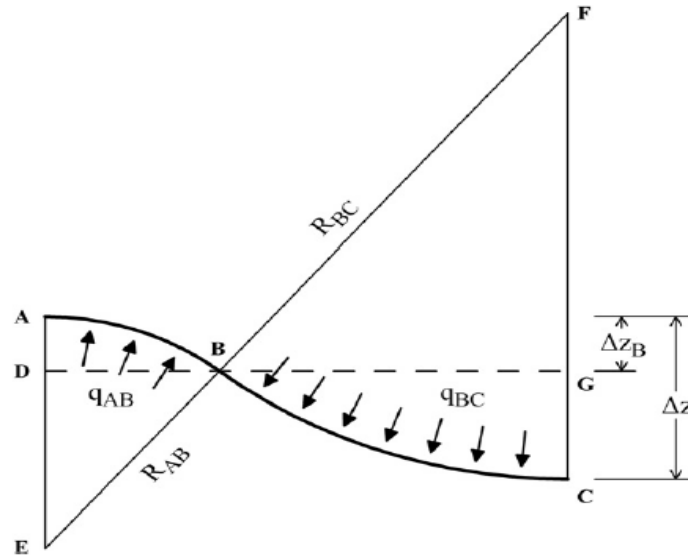
Για να υπολογισθεί η βύθιση στο σημείο του ρήγματος υιοθετείται η παραδοχή των Kennedy et al. (1977) ότι ο αγωγός συμπεριφέρεται ως καλώδιο, δηλαδή ότι δεν έχει καμπτική στιβαρότητα. (βλ. Σχήμα 2.16) Η αξονική δύναμη του αγωγού θεωρείται ότι παραμένει σταθερή στο μήκος καμπύλωσης καθώς είναι πολύ πιο μικρό σε σχέση με το μήκος που μειώνεται γραμμικά η αξονική δύναμη. Η υπόθεση του κυκλικού τόξου και η διαπίστωση της σταθερής αξονικής δύναμης διευκολύνει τον υπολογισμό της βύθισης διότι οι ακτίνες καμπυλότητας υπολογίζονται ως ο λόγος της αξονικής δύναμης προς την εγκάρσια αντίσταση του εδάφους. Αξίζει να τονιστεί πως η παραδοχή του κυκλικού τόξου αφορά, απλά και μόνο αυτό το βήμα της μεθόδου μόνο και μόνο για να διευκολυνθεί η εύρεση της βύθισης. Σε αντίθετη περίπτωση θα απαιτούνταν πολύπλοκες εξισώσεις που δεν συνάδουν με την εύρεση εύχρηστης αναλυτικής λύσης. Όλα τα υπόλοιπα βήματα της μεθόδου είναι κατ' ουσίαν ίδια με τη μέθοδο των Karamitros et al. (2007), δηλαδή αλλάζει κυρίως το βήμα 2 όπως περιγράφηκε παραπάνω.



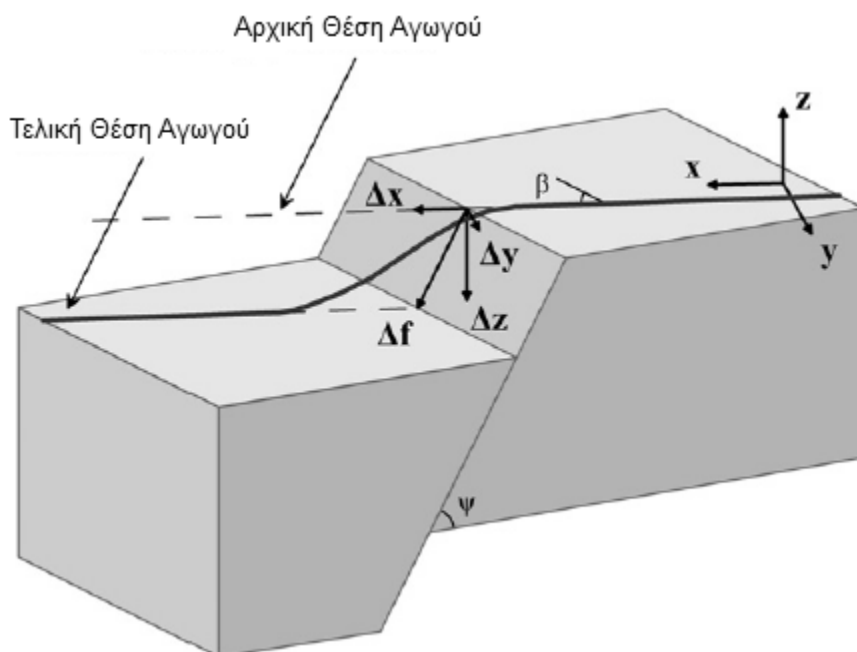
**ΣΧΗΜΑ 2.15:** Το στατικό προσομοίωμα του τμήματος ABC.

Τα παραπάνω ισχύουν στην περίπτωση ρήγματος με ίχνος κάθετο προς τον άξονα του αγωγού. Σε αντίθετη περίπτωση, η μετατόπιση αναλύεται σε δύο συνιστώσες, η μία εντός του κατακόρυφου επιπέδου που διέρχεται από τον άξονα του αγωγού και μία οριζόντια. Έτσι, η ανάλυση του ρήγματος ανάγεται σε συνδυασμό δύο αναλύσεων: η μία για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και η άλλη για ορθό ρήγμα κάθετο προς τον άξονα του αγωγού. Τα μήκη έντονης καμπύλωσης στο οριζόντιο και στο

κατακόρυφο επίπεδο είναι διαφορετικά αφού αλλάζουν οι αντιστάσεις του εδάφους. Επομένως, οι μέγιστες παραμορφώσεις εντοπίζονται σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος του αγωγού και σε διαφορετικά σημεία της διατομής του, αφού η κάμψη είναι σε διαφορετικά επίπεδα. (βλ. Σχήμα 2.17)



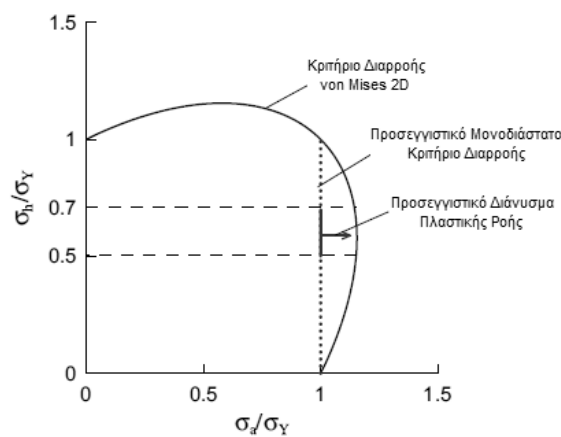
**ΣΧΗΜΑ 2.16:** Παραδοχή παραμόρφωσης ως δύο κυκλικά τόξα του τμήματος ABC μόνο για τον υπολογισμό της μετακίνησης στο σημείο του ρήγματος  $\Delta z_B$ .



**ΣΧΗΜΑ 2.17:** Ορισμός των αξόνων  $x,y,z$  και των μετακινήσεων  $\Delta x,\Delta y,\Delta z$  για τη συνδυασμένη μετακίνηση του ρήγματος.

**Trifonov et al. (2011)** .\_Οι Trifonov et al. (2011) ασχολήθηκαν με την εισαγωγή στην υπάρχουσα μεθοδολογία των Trifonov et al. (2010) την επιρροή των φορτίων λειτουργίας του αγωγού, δηλαδή διαφορά θερμοκρασίας και εσωτερική πίεση.

Μέχρι τώρα, στις προηγούμενες μεθόδους, λαμβανόταν υπόψη μόνο η αξονική τάση του αγωγού και θεωρούταν ότι ο αγωγός αστοχεί με μονοαξονικό κριτήριο διαρροής. Αυτή η παραδοχή ήταν εύλογη καθώς κατ' ουσίαν ο αγωγός αστοχούσε σε εφελκυσμό. Όμως, συμπεριλαμβάνοντας και τα φορτία λειτουργίας, εσωτερικής πίεσης και διαφοράς θερμοκρασίας, η τάση του αγωγού κάθετα στον άξονα του αγωγού γίνεται σημαντική και επηρεάζει το κριτήριο αστοχίας. Οι συνθήκες έντασης των τοιχωμάτων του αγωγού είναι επίπεδης έντασης και έτσι το κριτήριο αστοχίας πρέπει να είναι αντίστοιχο. Λόγω των ανωτέρω είναι πιο εύλογη η χρήση του διδιάστατου κριτηρίου διαρροής του von Mises (βλ. Σχήμα 2.18). Αυτή η παραδοχή επηρεάζει τον υπολογισμό των παραμορφώσεων, των τάσεων και συνεπακόλουθα των εντατικών μεγεθών της διατομής του αγωγού.



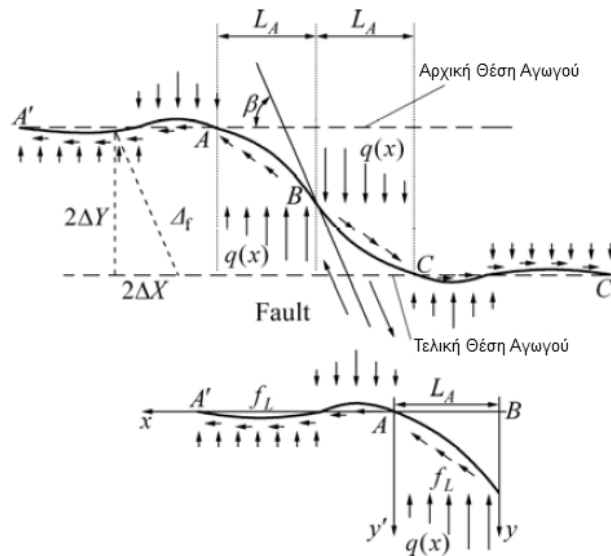
**ΣΧΗΜΑ 2.18:** Κριτήριο Διαρροής von Mises 2 Διαστάσεων που χρησιμοποιείται στην παρούσα μέθοδο σε αντίθεση με το μονοδιάστατο κριτήριο των προηγούμενων μεθόδων.

Η εν λόγω βελτιωμένη μέθοδος είναι σαφώς πιο ακριβής, αλλά παράλληλα καθίσταται πλέον περίπλοκη για πρακτικές εφαρμογές. Επίσης, αξίζει να τονιστεί πως η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη για ακραίες μεταβολές στη θερμοκρασία του αγωγού, οι οποίες συμβαίνουν σε πολύ αφιλόξενα και ασυνήθη για την περιοχή μας περιβάλλοντα.

**Wang et al. (2011)** .\_Οι Wang et al. (2011) εισήγαγαν μία επέκταση της αναλυτικής μεθόδου των Karamitros et al. (2007) για ρήγματα οριζοντίως διατομής.

Όπως και οι Trifonov et al. (2010), παρατήρησαν την έλλειψη φυσικού νοήματος στην εύρεση της καμπτικής παραμόρφωσης κατά τους Karamitros et al. (2007). Έτσι, δεν έκαναν εξαρχής την παραδοχή ότι έχει διαρρεύσει το έδαφος στο έντονα καμπυλωμένο τμήμα του αγωγού, και οι εξισώσεις ισορροπίας και συμβιβαστού των παραμορφώσεων λύθηκαν κατά περίπτωση, για να εισάγουν το μη γραμμικό χαρακτήρα του εδάφους (βλ. Σχήματα 2.20 και 2.21). Επίσης τόνισαν ότι η δυσμενέστερη διατομή δεν βρίσκεται στο σημείο μέγιστης καμπτικής καταπόνησης και υπολόγισαν

ποιο είναι το σημείο που είναι υποψήφιο για αστοχία με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ακόμη θέλησαν να συμπεριλάβουν την επιρροή της μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης στο καμπύλο τμήμα του αγωγού, στο αρχικό μέτρο ελαστικότητας ώστε να συγκλίνει πιο εύκολα η επίλυση. Για τη βέβαιη σύγκλιση της επαναληπτικής μεθόδου υιοθετήθηκε και ο νόμος του υλικού Ramberg-Osgood στον οποίο το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας φθίνει συνεχώς με την αύξηση των τάσεων. Τέλος ,χρησιμοποιήθηκε η συμμετρία του προβλήματος για την απλοποίηση των υπολογισμών όπως και στη μέθοδο των Karamitros et al. (2007).

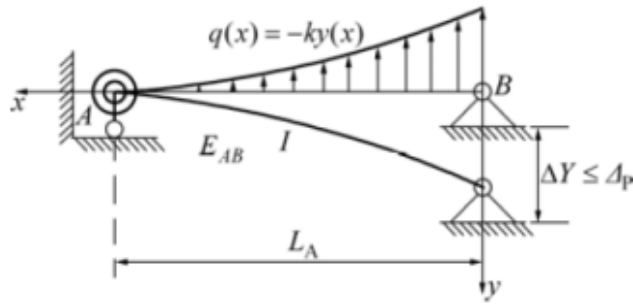


**ΣΧΗΜΑ 2.19:** Το προσομοίωμα ανάλυσης του αγωγού όπως προτάθηκε από τους Wang et al. (2011).

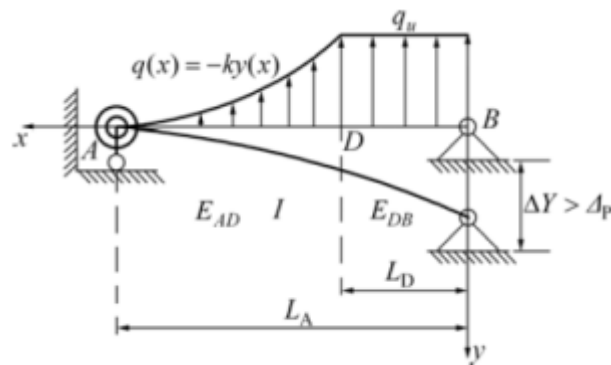
Η εν λόγω μεθοδολογία συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

1. Υπολογισμός των επιμηκύνσεων γεωμετρικά και ολοκληρώνοντας τις παραμορφώσεις του αγωγού. Εξισώνοντας τις επιμηκύνσεις προκύπτουν οι τάσεις της διατομής στο σημείο του ρήγματος.
2. Υπολογισμός των εγκάρσιων μετακινήσεων του αγωγού αναλύοντας τον αγωγό ως δοκό απείρου μήκους πάνω σε ελαστικό θεμέλιο (το πρώτο τμήμα AA') και ως ελαστική δοκό (το δεύτερο τμήμα AB). (βλ. Σχήμα 2.19) Προκύπτουν εξισώσεις ισορροπίας και εξισώσεις συμβιβαστού.
3. Αθροίζοντας τις παραμορφώσεις συναρτήσει των τάσεων κατά μήκος του αγωγού και των καμπτικών παραμορφώσεων συναρτήσει των εγκάρσιων μετακινήσεων υπολογίζονται οι συνολικές εφελκυστικές παραμορφώσεις του αγωγού.
4. Με βάση τις εξισώσεις που προκύπτουν από τα παραπάνω βήματα υπολογίζονται οι παραμορφώσεις κατά μήκος του αγωγού και η θέση πιθανής αστοχίας ,δηλαδή η θέση μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης, με επαναληπτικές μεθόδους.

Από αριθμητικές αναλύσεις βρέθηκε ότι η μέθοδος είναι ακριβής για μετακινήσεις έως 10 φορές τη διάμετρο του αγωγού, πράγμα ικανοποιητικό για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές.



**ΣΧΗΜΑ 2.20:** Το στατικό προσομοίωμα του καμπύλου τμήματος AB χωρίς να έχει διαρρεύσει το έδαφος στην εγκάρσια διεύθυνση.



**ΣΧΗΜΑ 2.21:** Το στατικό προσομοίωμα του καμπύλου τμήματος AB έχοντας διαρρεύσει το έδαφος στην εγκάρσια διεύθυνση.

Είναι σημαντικό το ότι η διάκριση που έγινε για τις εγκάρσιες αντιδράσεις ενώ περιπλέκει κατά πολύ τις πράξεις δεν προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. (βλ. Σχήματα 2.20 και 2.21) Για πολύ μικρό επίπεδο φόρτισης το μήκος AD στο Σχήμα 2.21 ελαχιστοποιείται και μπορεί να αμεληθεί. Άρα και η επιλογή διαφορετικού μέτρου ελαστικότητας για αυτό το τόσο μικρό τμήμα είναι περιττή. Για το εύρος των αποδεκτών παραμορφώσεων των κανονισμών η μέθοδος παρουσιάζει ακριβή αποτελέσματα όπως και οι προηγούμενες μέθοδοι των Karamitros et al. (2007) και Trifonov et al. (2010). Παρόλα αυτά πρέπει να τονιστεί πως η μέθοδος βγάζει ακριβή αποτελέσματα για μικρές μετακινήσεις ρήγματος καθώς πράττει δύο αλληλοαναιρούμενα σφάλματα. Για να εισάγουν την επιρροή της αξονικής δύναμης στην καμπτική στιβαρότητα απλώς χρησιμοποίησαν τη μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση κάθε επανάληψης ώστε να μειώσουν και άλλο το μέτρο ελαστικότητας. Δεν έλαβαν υπόψη τους τις καμπτικές παραμορφώσεις δευτέρας τάξεως  $\epsilon_b''$  όπως έκαναν οι Karamitros et al. (2007), ούτε εισήγαγαν στις εξισώσεις ισορροπίας την αξονική δύναμη όπως οι Trifonov et al. (2010). Για πολύ μικρές μετακινήσεις όπου φαινόμενα δευτέρας τάξεως δεν υπάρχουν αυτό δεν είναι πρόβλημα. Αυξάνοντας όμως τη φόρτιση επηρεάζουν τα φαινόμενα δευτέρας τάξεως

και τότε οι καμπτικές παραμορφώσεις φτάνουν σε ένα σταθερό πλατό όπως δείχνουν και αναλύσεις. Εν αντιθέσει, οι Wang et al. (2011) μειώνοντας συνεχώς το μέτρο ελαστικότητας οδηγούσαν στην υπερβολική αύξηση των ελαστικών καμπτικών παραμορφώσεων  $\epsilon_b$ <sup>1</sup>. Επίσης, δεν έλαβαν υπόψη την τοπική αύξηση των αξονικών παραμορφώσεων στην κρίσιμη διατομή. Επομένως, αφού το κριτήριο σύγκλισης ήταν οι μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις, η άθροιση των μειωμένων αξονικών παραμορφώσεων με τις αυξημένες καμπτικές παραμορφώσεις οδηγούσε σε αποτελέσματα φαινομενικά ορθά, αλλά στην ουσία τους με λάθος φυσικό νόημα.

### 2.1.3. Αριθμητική και Πειραματική Διερεύνηση

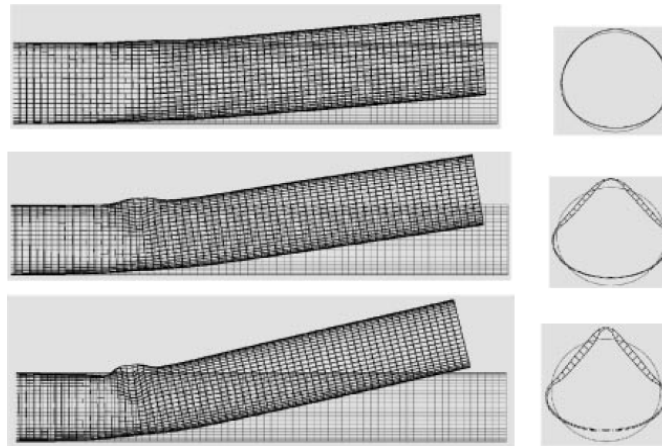
**Takada et al. (2000)** .\_Οι Takada et al. (2000) ασχολήθηκαν με την επιρροή της στρέβλωσης της διατομής, φαινόμενο το οποίο συμβαίνει σε αρκετά μεγάλες μετακινήσεις ρηγμάτων σε σχέση με τη διάμετρο του αγωγού (Σχήμα 2.23). Η μέθοδος τους αφορά μετακινήσεις ρηγμάτων που προκαλούν επιμήκυνση αλλά και θλίψη στον αγωγό.

Βασιζόμενοι στη μέθοδο των Kennedy et al. (1977) υπολόγισαν την παραμορφωμένη γεωμετρία του αγωγού. Σύμφωνα με τις παραδοχές των Kennedy et al. (1977) ο αγωγός παραμορφώνεται ως κυκλικό τόξο. Με αυτόν τον τρόπο υπολόγισαν τη γωνία που σχηματίζει ο αγωγός σε σχέση με την αρχική του θέση, ώστε να τη συσχετίσουν με τη μέγιστη παραμόρφωση του αγωγού (βλ. Σχήματα 2.24 και 2.25). Η συσχέτιση αυτή πραγματοποιήθηκε μέσα από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων κελύφους στα οποία μπορούσαν να συνυπολογιστούν φαινόμενα αλλαγής σχήματος της διατομής. Θεωρήθηκε ότι οι ακραίες παραμορφώσεις συμβαίνουν σε εκείνο το σημείο που κάμπτεται ο αγωγός, όπως παρατηρήθηκε και σε αστοχίες αγωγών στην πράξη.

Για να συσχετίσουν τη γωνία με τις παραμορφώσεις πραγματοποίησαν αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων με στοιχεία δοκού από το σημείο αγκύρωσης του αγωγού μέχρι λίγο πριν το σημείο καμπής και από εκεί μέχρι το σημείο του ρήγματος στοιχεία κελύφους εφαρμόζοντας και τη μετακίνηση του ρήγματος (βλ. Σχήμα 2.22).



**ΣΧΗΜΑ 2.22:** Το προσομοίωμα ανάλυσης του αγωγού όπως προτάθηκε από τους Takada et al. (2000)

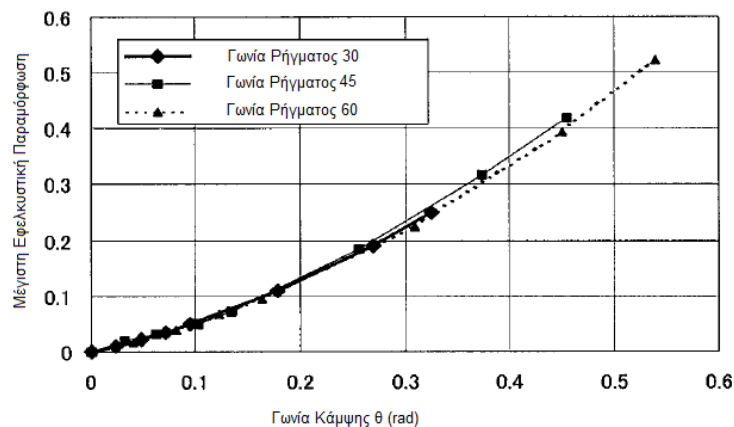


**ΣΧΗΜΑ 2.23:** Αλλαγή σχήματος της διατομής με την αύξηση της γωνίας κάμψης του αγωγού.

Η εν λόγω μεθοδολογία συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

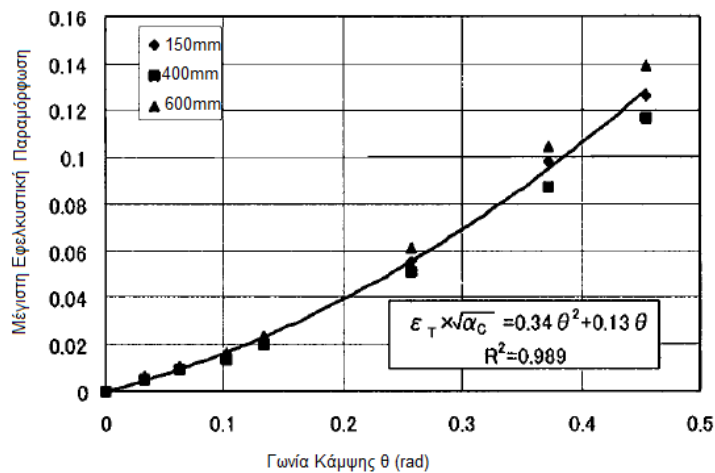
1. Προσδιορισμός του σημείου κάμψης του αγωγού σύμφωνα με τη μέθοδο των Kennedy et al. (1977). Έτσι βρίσκεται η αξονική δύναμη του αγωγού και κατ' επέκταση και η ακτίνα καμπυλότητας του αγωγού. Από την ακτίνα καμπυλότητας μπορεί να προκύψει ποιο είναι το σημείο που αρχίζει η παραμόρφωση του αγωγού.
2. Υπολογισμός της γωνίας του αγωγού με βάση τη μετακίνηση του ρήγματος και του μήκους που καμπυλώνεται.
3. Μέσα από απλές εμπειρικές σχέσεις υπολογίζονται οι μέγιστες και ελάχιστες παραμορφώσεις του αγωγού (βλ. Σχήμα 2.25).

Αξίζει να σημειωθεί πως, με βάση τις αναλύσεις, οι παραμορφώσεις δεν επηρεάζονται από τη γωνία του ρήγματος αλλά επηρεάζονται άμεσα από τη γωνία κάμψης του αγωγού (βλ. Σχήμα 2.24).



**ΣΧΗΜΑ 2.24:** Συσχέτιση γωνίας κάμψης με τη μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση για αγωγό με διάμετρο 600mm σε κανονικό ρήγμα.

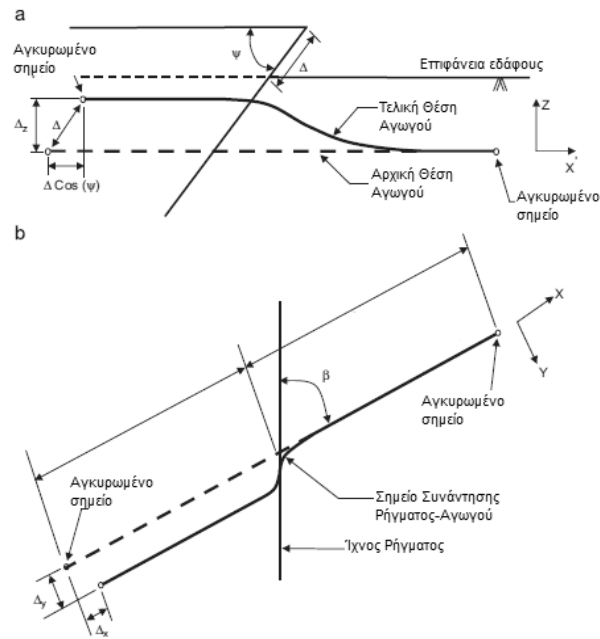




**ΣΧΗΜΑ 2.25:** Ο τύπος για τη συσχέτιση της μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης με βάση τη γωνία κάμψης για διάφορες διαμέτρους.

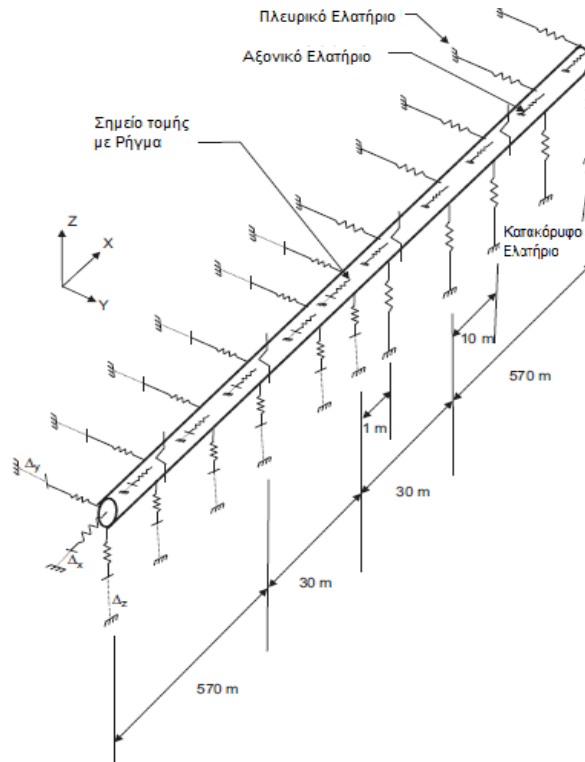
Σε αυτήν τη μέθοδο χρησιμοποιήθηκαν λίγα δεδομένα για να παραχθούν οι εμπειρικές σχέσεις. Ακόμη φαινόμενα στρέβλωσης εμφανίζονται σε μεγάλες μετακινήσεις ρηγμάτων όπου οι παραμορφώσεις είναι πέραν των αποδεκτών, άρα αυτές οι περιπτώσεις είναι πέραν του ενδιαφέροντος του σχεδιασμού. Επίσης σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι η μέθοδος είναι ημιεμπειρική οπότε έχει μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με μία αναλυτική μέθοδο.

**Joshi et al. (2011)** .\_Οι Joshi et al. (2011) ασχολήθηκαν με την αριθμητική ανάλυση αγωγών που διέρχονται από ανάστροφα ρήγματα, όπου δεν ισχύουν οι παραπάνω μέθοδοι, καθώς ακόμη και για μικρές μετακινήσεις προκαλείται λυγισμός είτε σε τοπικό επίπεδο ή σε επίπεδο όλου του φορέα. Για αυτό και οι Joshi et al. (2011) πρότειναν ένα προσομοίωμα με πεπερασμένα στοιχεία για την αντιμετώπιση του προβλήματος (βλ. Σχήμα 2.27). Για την προσομοίωση του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν οι οδηγίες της ASCE (για μη γραμμικά ελατήρια) και ο αγωγός προσομοιώθηκε με στοιχεία δοκού. Η προσομοίωση του αγωγού ως δοκού επαρκεί για την ανάλυση του λυγισμού σε επίπεδο φορέα. Το προσομοίωμα όμως αυτό δεν μπορεί να μας πληροφορήσει για το αν ο αγωγός θα υποστεί τοπικό λυγισμό, για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν όρια παραμορφώσεων όπως ορίζονται από την ASCE. Αγνοήθηκε η επίδραση της εσωτερικής πίεσης του αγωγού.



**ΣΧΗΜΑ 2.26:** Μετακίνηση του αγωγού στην περίπτωση ανάστροφου ρήγματος (α)τομή και (β)κάτοψη.

Από παραμετρική διερεύνηση προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα: (α) Όσο πιο μεγάλη γίνεται η οριζόντια γωνία της μετακίνησης τόσο αυξάνει σημαντικά η μέγιστη συνολική παραμόρφωση (βλ. Σχήμα 2.26) (β) Όσο αυξάνει η κατακόρυφη γωνία, τότε η παραμόρφωση μειώνεται σημαντικά. (γ) Όσο πιο χαλαρό είναι το υλικό πλήρωσης της τάφρου του αγωγού τόσο πιο μικρές είναι οι εντάσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται. (δ) Αντίστοιχα, μειώνεται η ένταση του αγωγού όσο είναι πιο λείος, παρόλα αυτά η γωνία τριβής του αγωγού με το περιβάλλον αυξάνει λόγω γήρανσης. (ε) Επίσης, η μέγιστη παραμόρφωση του αγωγού μειώνεται όσο μειώνεται το βάθος του αγωγού. (στ) Εάν επιλεγεί υλικό με υψηλότερη τάση διαρροής, για δεδομένη διατομή αγωγού, τότε μειώνεται περισσότερο η ένταση. (ζ) Επίσης, παρατηρήθηκε πως για σταθερό πάχος του αγωγού η μεγαλύτερη εξωτερική διάμετρος οδηγεί σε μείωση των παραμορφώσεων. Συμπερασματικά, η οριζόντια γωνία διασταυρώσεως με το ρήγμα επηρεάζει περισσότερο από όλα τα προηγούμενα τη συμπεριφορά του αγωγού (βλ. Σχήμα 2.26).



**ΣΧΗΜΑ 2.27:** Προτεινόμενο προσομοίωμα Πεπερασμένων Στοιχείων.

**Xie et al. (2011)** .\_Οι Xie et al. (2011) ασχολήθηκαν με την πειραματική και αριθμητική προσομοίωση αγωγών από HDPE σε ρήγματα οριζόντιας διατμήσεως. Παρόλο που το υλικό του αγωγού δεν είναι χάλυβας τα συμπεράσματά τους είναι εποικοδομητικά.

Συγκεκριμένα, έγιναν πειράματα μεγάλης κλίμακας στο Cornell University και πειράματα φυγοκεντριστή στο Rensselaer Polytechnic Institute. Εξετάστηκαν περιπτώσεις ρηγμάτων οριζόντιας διατμήσεως όπου προκαλούν κάμψη και εφελκυσμό στον αγωγό. Τα αποτελέσματα από τα πειράματα και από αριθμητικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν για να ελέγξουν την αξιοπιστία κάποιων αναλυτικών μεθόδων που περιγράφηκαν και παραπάνω. Διερευνήθηκε η επίδραση των παραμέτρων της γωνίας του ρήγματος, του βάθους του αγωγού, της διαμέτρου του, του ρυθμού επιβολής της μετακίνησης, της μέγιστης μετακίνησης, της υγρασίας του εδάφους και του πάχους του αγωγού. Εξετάστηκε η αξιοπιστία επίσης και των οδηγιών της ASCE ως προς τις παραμέτρους των ελατηρίων του εδάφους. Συλλέχθηκαν στοιχεία από το φυγοκεντριστή μέσω μετρητών παραμορφώσεων και τάσεων για να αξιολογήσουν τις παραμέτρους των ελατηρίων που χρησιμοποιούνται στα αριθμητικά προσομοιώματα. Όταν χρησιμοποιήθηκαν αυτές οι παράμετροι στα ελατήρια των αριθμητικών αναλύσεων τα αποτελέσματα ήταν αρκετά κοντά με τα πειραματικά.

Συμπέραναν ότι είναι αποδοτικό και λογικό να χρησιμοποιηθούν μονοδιάστατα στοιχεία δοκού στην αριθμητική ανάλυση καθώς το σφάλμα σε σχέση με τα δυσδιάστατα στοιχεία κελύφους είναι ελάχιστο. Βρέθηκε πειραματικά ότι η στιβαρότητα του εδάφους είναι μεγαλύτερη κοντά στο ρήγμα. Επίσης ενώ η τάση διαρροής ήταν κοντά στις οδηγίες της ASCE, η μετακίνηση διαρροής βρέθηκε πειραματικά μεγαλύτερη, κάτι που πρέπει να έχει σχέση με την τρισδιάστατη φύση του πειράματος

σε σχέση με τη δυσδιάστατη μέθοδο υπολογισμού της ASCE, όπως και με το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας της άμμου των πειραμάτων εν αντιθέσει με την ξηρή άμμο των οδηγιών. Παρόλα αυτά η υγρασία συντηρητικά μπορεί να αμεληθεί καθώς η ξηρή άμμος προκαλεί περισσότερες παραμορφώσεις. Το βάθος του αγωγού οδηγεί σε μεγαλύτερη αντίσταση του εδάφους και έτσι η καμπτική παραμόρφωση συγκεντρώνεται πιο κοντά στο ρήγμα. Αλλαγές στη γωνία του ρήγματος όταν αυτή είναι μεγάλη επηρεάζουν κυρίως τις αξονικές παραμορφώσεις και όταν είναι μικρή τις καμπτικές. Γενικά βγήκε το συμπέρασμα ότι οι οδηγίες της ASCE είναι συντηρητικές καθώς τα ελατήρια έχουν μεγαλύτερη στιβαρότητα.

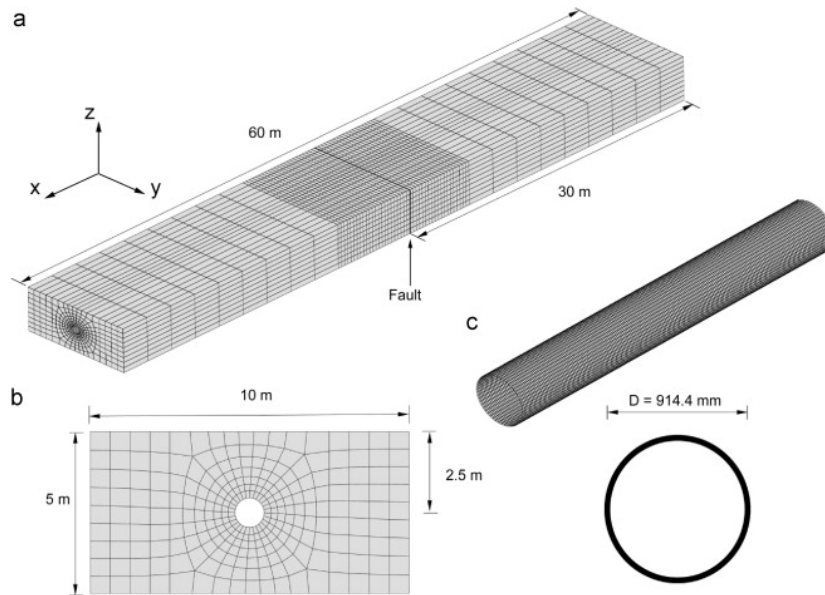
Αξιολογήθηκαν οι μέθοδοι των Kennedy et al. (1977) και Karamitros et al. (2007). Βρέθηκε ότι οι Kennedy et al. (1977) κυρίως παράγουν συντηρητικά αποτελέσματα. Οι Karamitros et al. (2007) γενικά έχουν συντηρητικά αποτελέσματα, αλλά σε μεγάλες μετακινήσεις είναι μη συντηρητικά. Αυτό εξηγείται από το ότι οι παραπάνω μέθοδοι εξελίχθηκαν πάνω σε χαλύβδινους αγωγούς, ενώ στην έρευνα τους οι Xie et al. (2011) χρησιμοποίησαν υλικό HDPE όπου φαινόμενα δευτέρας τάξης είναι πιο έντονα καθώς το υλικό είναι πιο μαλακό.

**Vazouras et al. (2012)** . \_Οι Vazouras et al. (2012) ασχολήθηκαν με την αριθμητική διερεύνηση της συμπεριφοράς αγωγού σε ρήγματα οριζόντιας διατομής.

Κατά την αριθμητική προσομοίωση το έδαφος προσομοιώθηκε με πεπερασμένα στοιχεία και όχι με ελατήρια (βλ. Σχήμα 28). Διερευνήθηκαν περιπτώσεις με και χωρίς εσωτερική πίεση του αγωγού. Ο αγωγός προσομοιώθηκε με στοιχεία κελύφους για να εξεταστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η περίπτωση τοπικού λυγισμού. Σημασία δόθηκε και στην παραμόρφωση του σχήματος της διατομής. Επίσης μέσω ενός απλοποιημένου αναλυτικού προσομοιώματος πρότειναν μία συνθήκη για τη μη αστοχία σε λυγισμό.

Παρατηρήθηκε ότι, όποτε δεν υπάρχει εφελκυσμός του αγωγού τότε ο αγωγός αστοχεί κυρίως σε τοπικό λυγισμό. Η εσωτερική πίεση αυξάνει την αντοχή του αγωγού όπως και η καλύτερη ποιότητα του υλικού του αγωγού και το μαλακότερο έδαφος.

Επισημαίνεται ότι ορισμένες θεωρήσεις και παραδοχές της εργασίας αυτής δεν ανταποκρίνονται σε εφαρμογές της πράξης (π.χ. αργιλικό έδαφος σε επαφή με τον αγωγό).



**ΣΧΗΜΑ 2.28:** Αριθμητικό προσομοίωμα του αγωγού που χρησιμοποίησαν οι Vazouras et al. (2012).

## 2.2. Αγωγοί με Γωνία

### 2.2.1. Αναλυτικές μέθοδοι

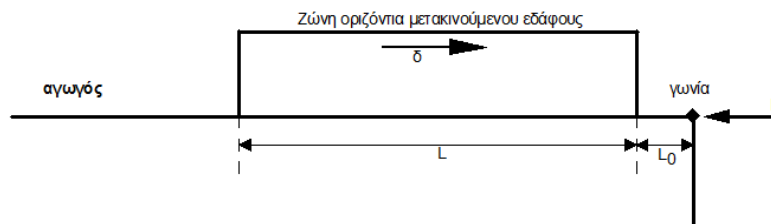
**Ο'Rourke & Liu(1999)** . \_Οι Ο'Rourke & Liu(1999) ασχολήθηκαν με την περίπτωση όπου ο αγωγός σχηματίζει ορθή γωνία. Πιο συγκεκριμένα, θεώρησαν τμήμα του εδάφους όπου μετατοπίζεται αξονικά ως προς τον αγωγό ως επιβαλλόμενη μετακίνηση και υπολόγισαν την ένταση που προκαλείται στη γωνία. (βλ. Σχήμα 2.29)

Θεώρησαν ότι ο αγωγός συμπεριφέρεται ελαστικά και ότι τα αξονικά ελατήρια του εδάφους στο τμήμα όπου μετακινείται αξονικά έχουν διαρρεύσει. Επίσης θεώρησαν ότι τα εγκάρσια ελατήρια του εδάφους παραμένουν ελαστικά. Διακρίθηκαν δύο περιπτώσεις μετακινήσεων: 1. Μετακινείται ένα τμήμα του εδάφους σχετικά μικρό ώστε σε κάποιο σημείο ο αγωγός να εφελκύεται και σε κάποιο άλλο να θλίβεται, δηλαδή τα δύο φαινόμενα του εφελκυσμού και της θλίψης αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Εδώ η μέγιστη αξονική μετακίνηση είναι μικρότερη της επιβαλλόμενης στην γωνία. 2. Το τμήμα του εδάφους που μετακινείται είναι τόσο μεγάλο ώστε να μην αλληλεπιδρούν τα δύο φαινόμενα. Εδώ η μέγιστη αξονική μετακίνηση του αγωγού είναι και επιβαλλόμενη. Θα σχολιαστεί μόνο η δεύτερη περίπτωση καθώς είναι αυτή που μας ενδιαφέρει ειδικά στις περιπτώσεις ρηγμάτων.

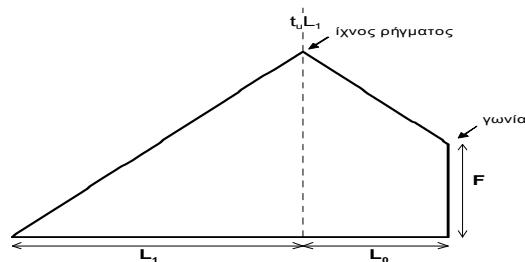
Η εν λόγω μεθοδολογία συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

1. Συσχέτιση της μετακίνησης της γωνίας του αγωγού  $\delta'$  με τη δύναμη  $F$  και τη ροπή  $M$  που δέχεται η γωνία. Η συσχέτιση πραγματοποιείται με την ανάλυση του αγωγού πέραν της γωνίας ως ελαστικής δοκού σε ελατηριωτό έδαφος με την κατάλληλη εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών.

2. Συσχέτιση της δύναμης  $F$  της γωνίας με τα μήκη αγκύρωσης του αγωγού  $L_1$  και  $L_0$  (βλ. Σχήμα 2.30). Επιβάλλεται το συμβιβαστό των μετακινήσεων όπου ορίζει ότι η μετακίνηση του ρήγματος  $\delta$  είναι ίση με το άθροισμα της μετακίνησης της γωνίας  $\delta'$  και της επιμήκυνσης του αγωγού πριν τη γωνία. Η επιμήκυνση υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα των παραμορφώσεων ή των αντίστοιχων τάσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.30.
3. Επίλυση του ανωτέρω συστήματος εξισώσεων με αγνώστους την αξονική δύναμη  $F$  και το αγκυρωμένο μήκος του αγωγού  $L_1$ .
4. Υπολογισμός της μέγιστης τάσης του αγωγού στη γωνία μέσω της δύναμης  $F$  και της ροπής  $M$  που καταπονούν τη γωνία.



**ΣΧΗΜΑ 2.29:** Η μετακίνηση του εδάφους παράλληλα στον άξονα του αγωγού στη μεθοδολογία των O'Rourke & Liu(1999).



**ΣΧΗΜΑ 2.30:** Κατανομή της αξονικής δύναμης στον αγωγό μέχρι τη γωνία.

Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η παραδοχή της ελαστικής απόκρισης του αγωγού. Με αυτήν την παραδοχή τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι ακριβή όσο η μετακίνηση είναι μικρή σε σχέση με τη διάμετρο του αγωγού και δεν έχει διαρρεύσει, όμως μετά τη διαρροή υποεκτιμώνται τα αποτελέσματα σύμφωνα με τη μεταπτυχιακή εργασία της Gesouli(2008), η οποία παρουσιάζεται παρακάτω. Επιπλέον, με την εν λόγω μεθοδολογία δεν υπολογίζεται η επίδραση της γωνίας στις παραμορφώσεις του αγωγού περί το ίχνος του ρήγματος.

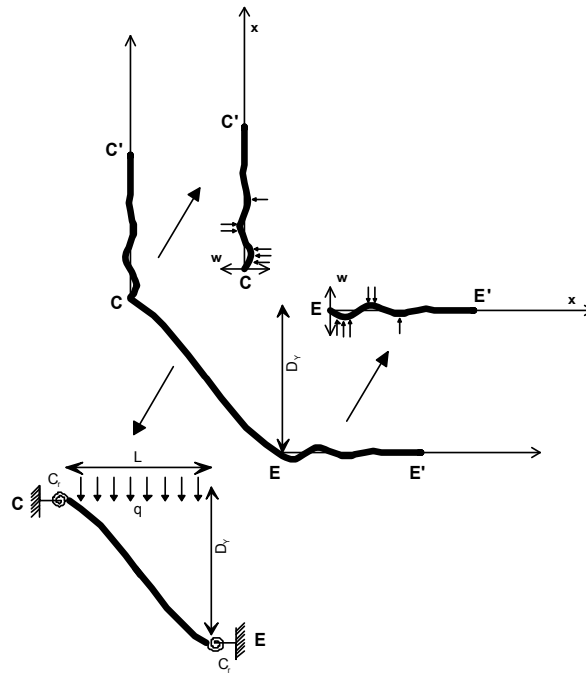
**Gesouli(2008).** Στη μεταπτυχιακή της εργασία η Gesouli(2008) αξιολόγησε την προηγούμενη μεθοδολογία μέσω αριθμητικών αναλύσεων και ακολούθως επικεντρώθηκε στην επίδραση μίας ορθής γωνίας στη συμπεριφορά του αγωγού περί την διασταύρωση με κανονικό ρήγμα.

Όπως προαναφέρθηκε, η Gesouli(2008) αξιολόγησε αρχικά τη μέθοδο των O'Rourke & Liu(1999) για την περίπτωση κανονικού ρήγματος μέσω αριθμητικών αναλύσεων. Προέκυψε το συμπέρασμα πως για τις περιπτώσεις όπου ο αγωγός και τα ελατήρια έχουν ελαστική συμπεριφορά, δηλαδή δεν έχουν ακόμη διαρρεύσει, η μέθοδος είναι ακριβής. Πέραν αυτού του σημείου όμως, υποεκτιμούνται οι μέγιστες παραμορφώσεις οι οποίες είναι και το κριτήριο του σχεδιασμού. Για αυτό και η Gesouli(2008) αναπτύσσει ακολουθώς μία βελτίωση στη μεθοδολογία ώστε να συμπεριλάβει και την μετελαστική συμπεριφορά του αγωγού.

Ο αγωγός στην περιοχή της γωνίας χωρίζεται σε τρία τμήματα (βλ. Σχήμα 2.31). Το πρώτο CC' είναι μέχρι τη γωνία και επιλύεται ως ελαστική δοκός σε ελατηριωτό έδαφος όπου τα ελατήρια δεν έχουν διαρρεύσει, το δεύτερο CE εκτείνεται από τη γωνία μέχρι το πρώτο σημείο μηδενισμού της εγκάρσιας μετατόπισης του αγωγού όπου επιλύεται ως ελαστοπλαστική δοκός με τα ελατήρια του εδάφους να έχουν διαρρεύσει και το τρίτο EE' είναι το υπόλοιπο τμήμα του αγωγού όπου επιλύεται όπως το πρώτο τμήμα.

Επιλύονται οι δοκοί EE' και CC' ώστε να προκύψουν οι σχέσεις που συνδέουν στροφές, τέμνουσες και ροπές στα σημεία C και E. Από τις εξισώσεις ισορροπίας της δοκού CE συναρτώνται τα εντατικά μεγέθη και οι στροφές από τα άγνωστα μέχρις στιγμής μεγέθη της μετακίνησης  $D_y$  του σημείου C και από το έντονα καμπυλωμένο μήκος L (βλ. Σχήμα 2.31). Τέλος επιβάλλεται το συμβιβαστό των μετακινήσεων όπου ορίζει ότι η μετακίνηση του ρήγματος είναι ίση με τη μετακίνηση  $D_y$  μαζί με την επιμήκυνση του αγωγού πριν τη γωνία. Η επιμήκυνση υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα των παραμορφώσεων ή των αντίστοιχων τάσεων όπως στο Σχήμα 2.30 της προηγούμενης μεθόδου. Αυτό το σύστημα των εξισώσεων επιλύεται επαναληπτικά ώστε να προκύψει το έντονα καμπυλωμένο μήκος L. Έπειτα δύναται να βρεθεί η δύναμη και η ροπή που καταπονεί τη γωνία, από τις οποίες υπολογίζονται οι αξονικές και καμπτικές παραμορφώσεις. Επαναληπτικά λαμβάνεται υπόψη και η επιρροή της μη γραμμικότητας του υλικού του χάλυβα υπολογίζοντας το τέμνον μέτρο ελαστικότητας στο τέλος της διαδικασίας.

Με την εν λόγω μέθοδο υπολογίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η μετακίνηση της γωνίας, παρόλα αυτά υποεκτιμώνται το μη αγκυρωμένο μήκος εκατέρωθεν του ρήγματος όπου δεν υπάρχει γωνία, το έντονα καμπυλωμένο μήκος στην περιοχή του ρήγματος και το μήκος του δεύτερου τμήματος της γωνίας. Ακόμη, με αυτήν τη μέθοδο υπερεκτιμώνται οι παραμορφώσεις στην περιοχή της γωνίας είτε αξονικές ή καμπτικές.



**ΣΧΗΜΑ 2.31:** Το στατικό προσομοίωμα του αγωγού στην περιοχή της γωνίας σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Gesouli(2008).

Για να ξεπεραστούν τα παραπάνω προβλήματα εισάγονται διορθωτικοί συντελεστές οι οποίοι μειώνουν την πραγματική μετακίνηση του ρήγματος (βλ. Σχήμα 2.32). Ακολουθεί η επίλυση ενός αντίστοιχου ευθύγραμμου αγωγού για την μειωμένη μετακίνηση ρήγματος. Επίσης παρατηρείται πως για μέγιστη παραμόρφωση 0.5% (επιτρεπόμενη με βάση τους κανονισμούς) τα καμπυλωμένα μήκη για τον ευθύγραμμο αγωγό και για τον αγωγό με γωνία ταυτίζονται πρακτικά.

Η εν λόγω μεθοδολογία συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

Για την περιοχή του ρήγματος:

1. Για τον προσδιορισμό του μειωτικού συντελεστή υπάρχουν δύο εναλλακτικές: α)Υπολογισμός του μη αγκυρωμένου μήκους ευθύγραμμου αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση που προκαλεί παραμόρφωση 0.5%(όριο κανονισμών). β)Υπολογισμός του μη αγκυρωμένου μήκους για διαρροή του χάλυβα.
2. Ανάλογα με την επιλογή του πρώτου βήματος από το αντίστοιχο διάγραμμα προκύπτει και ο μειωτικός διορθωτικός συντελεστής (βλ. Σχήμα 2.32).
3. Ελέγχεται η επίδραση της γωνίας στον αγωγό μέσω ενός ποσοτικού κριτηρίου. Έτσι συμπεραίνεται εάν πρέπει να αμεληθεί ή όχι η επίδραση της γωνίας.
4. Εφόσον η επίδραση της γωνίας δεν πρέπει να αμεληθεί ο μειωτικός συντελεστής εφαρμόζεται στην μετακίνηση του ρήγματος.
5. Υπολογίζονται οι μέγιστες παραμορφώσεις ενός ευθύγραμμου αγωγού υποκειμένου στη διορθωμένη μετακίνηση.
6. Υπολογισμός του καμπυλωμένου μήκους του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος.



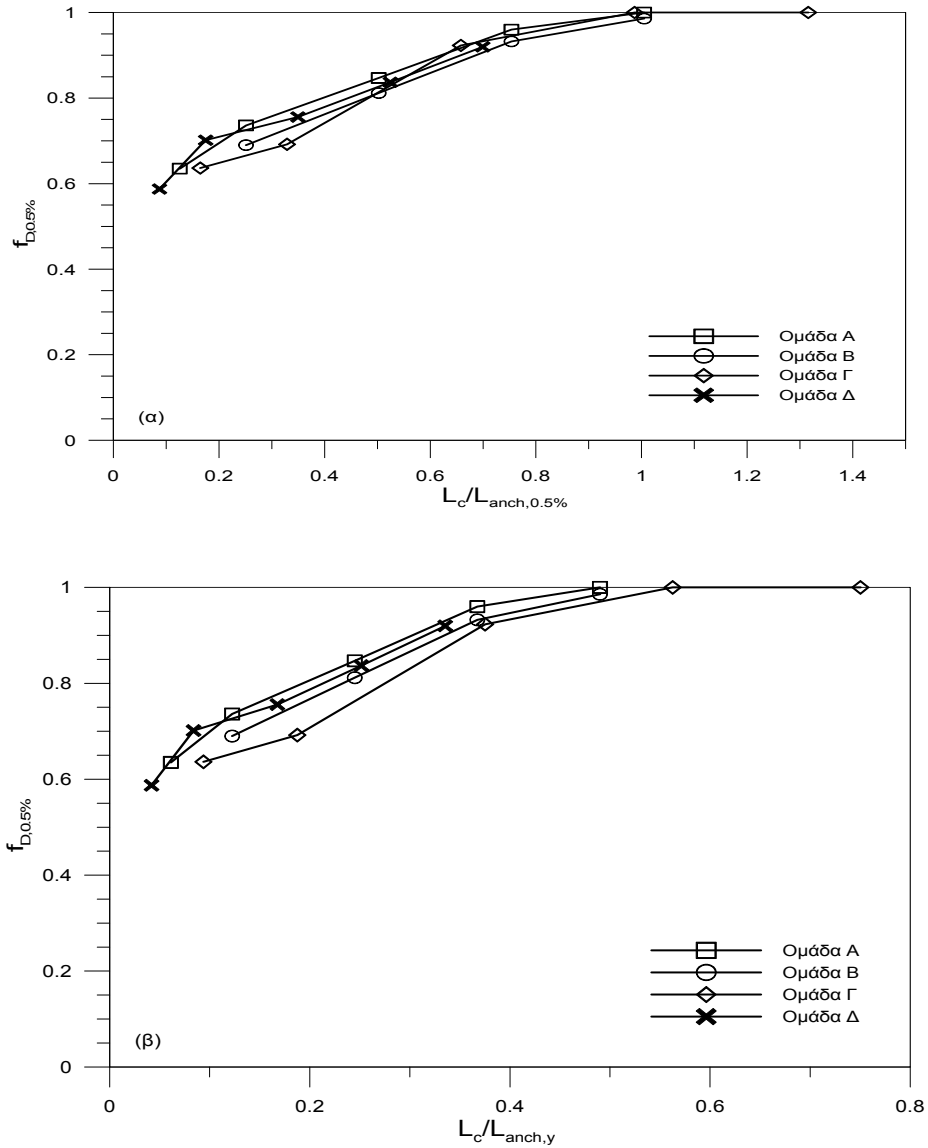
Για την περιοχή της γωνίας:

7. Επιλύονται οι ελαστικές δοκοί  $CC'$  και  $EE'$  σε ελατηριωτό έδαφος (βλ. Σχήμα 2.31).
8. Υπολογισμός του καμπυλωμένου μήκους  $L$  κοντά στη γωνία και των εντατικών μεγεθών του αγωγού κοντά στη γωνία. Ο υπολογισμός γίνεται επαναληπτικά μέχρι να συγκλίνει το έντονα καμπυλωμένο μήκος  $L$ . Όπως περιγράφηκε και ανωτέρω χρησιμοποιούνται οι σχέσεις που προκύπτουν από το προηγούμενο βήμα, οι εξισώσεις ισορροπίας του έντονα καμπυλωμένου τμήματος  $CE$  και το συμβιβαστό των παραμορφώσεων όπου η μετακίνηση του ρήγματος  $D_x$  πρέπει να ισούται με την επιμήκυνση του αγωγού πέραν της γωνίας  $D_1$  και της μετακίνησης του τμήματος  $CE$   $D_y$  (βλ. Σχήμα 2.31).
9. Με βάση τα εντατικά μεγέθη κάμψεως και δυνάμεως υπολογίζονται οι καμπτικές και αξονικές παραμορφώσεις.
10. Νέα εκτίμηση του τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας  $E_{sec}$  του αγωγού από τα προηγούμενα αποτελέσματα και επανάληψη της μεθόδου από το βήμα 7 ώστε να συγκλίνει το τέμνον μέτρο ελαστικότητας  $E_{sec}$ .

Συμπερασματικά, η παρουσία της γωνίας επηρεάζει τον αγωγό εάν βρίσκεται σε απόσταση από το ρήγμα μικρότερη του μη αγκυρωμένου μήκους. Μειώνεται η αξονική δύναμη του αγωγού και το μη αγκυρωμένο μήκος σε σχέση με αντίστοιχο ευθύγραμμο αγωγό. Επιπλέον, αναπτύσσονται σημαντικές καμπτικές παραμορφώσεις στην περιοχή της γωνίας λόγω των εγκάρσιων ελατηρίων που αναλαμβάνουν τη μετακίνηση του αγωγού.

Η Gesouli(2008) παρατηρεί πως η μεθοδολογία της για μεγάλες μετατοπίσεις υπερεκτιμά τις εφελκυστικές παραμορφώσεις και υποεκτιμά το μη αγκυρωμένο μήκος. Επίσης η μεθοδολογία δεν είναι ακριβής καθώς δεν λαμβάνει υπόψη τη διαρροή του χάλυβα κοντά στη γωνία και επιλύει τη δοκό  $CC'$  ως ελαστική σε ελατηριωτό έδαφος.

Για αυτούς τους λόγους η Gesouli(2008) προτείνει για τη βελτίωση της μεθοδολογίας της, (α) να συμπεριληφθεί η μη γραμμική συμπεριφορά του χάλυβα στο τμήμα του αγωγού μεταξύ του ρήγματος και της γωνίας  $CC'$ , (β) να γίνεται ακριβής υπολογισμός της κατανομής των τάσεων και παραμορφώσεων στη διατομή μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης στη γωνία ώστε να υπολογίζεται καλύτερα το τέμνον μέτρο ελαστικότητας σε κάθε επανάληψη της μεθόδου, και (γ) να γίνει επέκταση της αναλυτικής μεθοδολογίας για τον αναλυτικό υπολογισμό των εντατικών μεγεθών και στην περιοχή του ρήγματος.

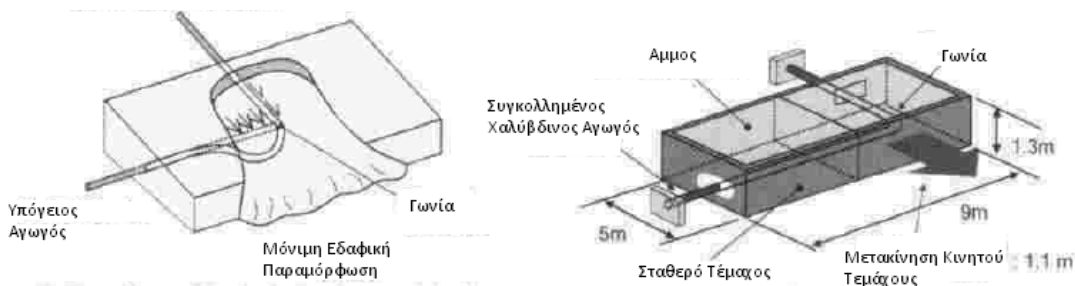


**ΣΧΗΜΑ 2.32:** Εξέλιξη διορθωτικού συντελεστή των μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης της γωνίας κανονικοποιημένης ως προς το μη αγκυρωμένο μήκος:  
 α) ευθύγραμμου αγωγού για επιβαλλόμενη μετατόπιση που προκαλεί εφελκυστική παραμόρφωση 0.5%.  
 β) για διαρροή του χάλυβα κατασκευής λόγω αξονικής δύναμης.

### 2.2.2. Αριθμητική και Πειραματική Διερεύνηση

Yoshizaki et al. (2004).-Στο παρών άρθρο διερευνήθηκε πειραματικά και αριθμητικά η συμπεριφορά αγωγού με γωνία σε πρόβλημα επιβαλλόμενης μετατόπισης. Ας τονισθεί ότι εδώ η επιβαλλόμενη μετατόπιση δεν αφορά μετατόπιση ρήγματος σε κάποια απόσταση από τη γωνία όπως στη μέθοδο της Gesouli(2008), ούτε επιβαλλόμενη μετακίνηση αξονικά στον αγωγό πάλι σε κάποια απόσταση από την περιοχή της γωνία όπως οι O'Rourke & Liu(1999). Εδώ διερευνήθηκε η μετατόπιση ολόκληρης της περιοχής της γωνίας σχετικά με τον αγωγό (βλ. Σχήμα 2.33α), η οποία μπορεί να οφείλεται σε ολίσθηση πλαγιάς ή σε πλευρική εξάπλωση ή και μετακίνηση ρήγματος, όπου παρόλο που δεν είναι ακριβώς το ίδιο πρόβλημα είναι αρκετά κοντά στο παρών αντικείμενο. Κατούσιαν επιβάλλεται αξονική μετακίνηση στο ένα σκέλος του αγωγού και στο άλλο σκέλος εγκάρσια μετακίνηση, ενώ είναι ένα πρόβλημα που απαντάται στην πράξη, για την εύρεση αναλυτικής μεθόδου δεν εξυπηρετεί διότι εμπλέκει δύο διαφορετικές φορτίσεις.

Ως προς το πειραματικό σκέλος τοποθετήθηκε αγωγός διαμέτρου 100mm σε πλήρη κλίμακα μέσα σε μία συσκευή δύο τεμαχίων που επέτρεπε τη σχετική τους μετακίνηση (βλ. Σχήμα 2.33β). Τα δύο μέρη του αγωγού ενώνονταν με ένα στοιχείο γωνίας, και ο αγωγός είχε εσωτερική πίεση 0.1MPa, ακόμη εξετάστηκε η επίδραση της ξηρής αλλά και της υγρής άμμου στο πρόβλημα. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις του Cornell University. Ως προς το αριθμητικό σκέλος προσομοιώθηκε ο αγωγός με πεπερασμένα στοιχεία με τις αντίστοιχες διαστάσεις και του επιβλήθηκε η ίδια φόρτιση, το έδαφος προσομοιώθηκε με εδαφικά ελατήρια. Τα αποτελέσματα των δύο διερευνήσεων παρουσίασαν ικανοποιητική σύγκλιση.



**ΣΧΗΜΑ 2.33:** α) Αριστερά: Σχηματική απεικόνιση του προβλήματος που εξετάζεται.  
β) Δεξιά: Η πειραματική διάταξη.

### 2.3. Σημερινή Πρακτική και Σχετικοί Κανονισμοί

Οι κανονισμοί της ASCE (2001) για την αντιμετώπιση του προβλήματος προτείνουν την ανάλυση του αγωγού με πεπερασμένα στοιχεία. Έτσι απαιτούν την εισαγωγή της μη γραμμικότητας στο υλικό και τη γεωμετρία. Σαφώς ,ορίζουν πως πρέπει να εισαχθεί και η μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους.

Επισημαίνεται ότι οι προγενέστεροι κανονισμοί της ASCE (1984) πρότειναν εναλλακτικά προς τα πεπερασμένα στοιχεία την χρήση των τότε μόνον γνωστών αναλυτικών λύσεων των Kennedy et al. (1977) και Newmark & Hall (1975).

Η μέχρι σήμερα πρακτική σχεδιασμού αγωγών όταν διασταυρώνονται με τεκτονικό ρήγμα ορίζει την ανάλυση του αγωγού με πεπερασμένα στοιχεία. Προαιρετικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν αναλυτικές μέθοδοι για να επιταχύνουν τη διαδικασία του σχεδιασμού και για να επιβεβαιώσουν τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων. Ένα σημαντικό ερώτημα που προκύπτει λοιπόν είναι το ποια μέθοδος είναι προσφορότερη. Το ερώτημα αυτό απαντάται συναρτήσει του τύπου του ρήγματος και του αγωγού, δηλαδή:

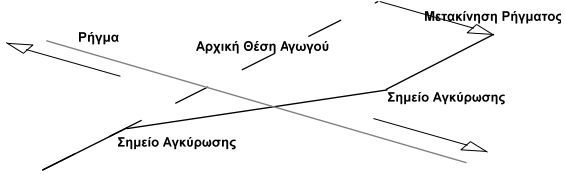
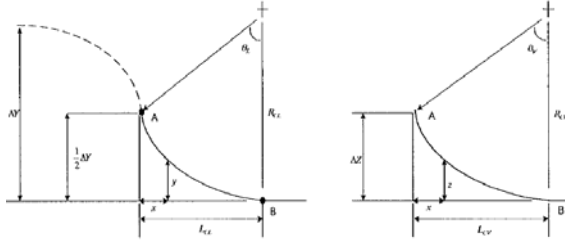
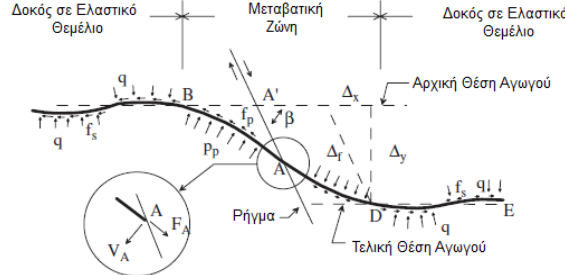
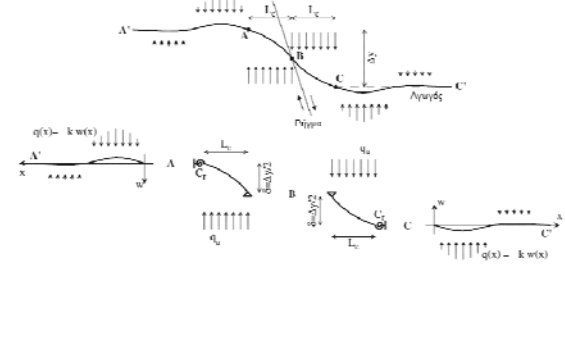
Για ευθύγραμμους αγωγούς οι παλαιότερες μέθοδοι των Newmark & Hall(1975), Kennedy et al. (1977) και Wang & Yeh(1985) θεωρούνται πλέον αρκετά ξεπερασμένες και καλό είναι να μην εφαρμόζονται εφόσον αφορούν μεγάλες μετακινήσεις ρήγματος που προκαλούν παραμορφώσεις μακράν μεγαλύτερες των επιτρεπτών από τους κανονισμούς. Αντίστοιχα και η ημι-εμπειρική μέθοδος των Takada et al. (2000) δεν προτιμάται καθώς ως αριθμητική δεν είναι τόσο ακριβής και μάλιστα στηρίζεται σε λίγα δεδομένα. Στην περίπτωση ευθύγραμμου αγωγού προτιμότερο είναι να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των Karamitros et al. (2007) για ρήγματα οριζοντίας διατμήσεως όπως και η μέθοδος των Trifonov et al. (2010), η οποία είναι πιο περίπλοκη χωρίς ουσιαστικά διαφορετικά αποτελέσματα. Εάν ο αγωγός βρίσκεται σε πολύ δυσμενή περιβάλλοντα με μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας και όπου τα φορτία λειτουργίας είναι μία σημαντική καταπόνηση στον αγωγό μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των Trifonov et al. (2011). Ως προς τα κανονικά ρήγματα απλούστερη στην εφαρμογή της ή και στον προγραμματισμό της καθίσταται η μέθοδος των Karamitros et al. (2011) έναντι των Trifonov et al. (2010) με σαφώς παρόμοια και ορθά αποτελέσματα. Η μέθοδος των Wang et al. (2011) δεν κρίνεται ότι προσφέρει κάτι ουσιαστικά περισσότερο στις παραπάνω μεθόδους, χωρίς αυτό να είναι απαγορευτικό στο να χρησιμοποιείται.

Για αγωγούς με γωνία οι παλαιότερες μέθοδοι των Newmark & Hall(1975), Kennedy et al. (1977) λαμβάνουν υπ'όψιν τους τις γωνίες ως σημεία αγκύρωσης του αγωγού αγνοώντας την πιθανότητα αστοχίας στην περιοχή της γωνίας. Οπότε καινοτόμα ήταν η μέθοδος των O'Rourke & Liu(1999) οι οποίοι ανέπτυξαν μία μέθοδο υπολογισμού της έντασης στην περιοχή της γωνίας για επιβολή αξονικής μετακίνησης σε αγωγό με ορθή γωνία. Παρόλα αυτά πριν την εφαρμογή της καλό είναι να τονιστεί ότι το υλικό του αγωγού θεωρείται ελαστικό και το ότι η γωνία του αγωγού έχει μηδενική ακτίνα καμπυλότητας, ενώ είναι γνωστό ότι ενδιαφέρει και η ανελαστική απόκριση του αγωγού και δεν έχει διερευνηθεί το πόσο υπέρ της ασφαλείας είναι η παραδοχή της γωνίας χωρίς τόξο συναρμογής, οι αγωγοί όταν έχουν γωνία στην πραγματικότητα έχουν πάντα κάποιο τόξο συναρμογής ακτίνας της τάξης των 10 με 40 διαμέτρων του αγωγού. Η Gesouli(2008) κατά τη μεταπτυχιακή της διπλωματική εργασία βελτίωσε με αριθμητικό τρόπο την παραπάνω μέθοδο και

για μη γραμμικότητα του υλικού και του περιβάλλοντος εδάφους, όμως στηριζόμενη πάνω στις ίδιες παραδοχές της ορθής γωνίας χωρίς τόξο καμπυλότητας. Συμπερασματικά, οι μέθοδοι που αφορούν την περιοχή της γωνίας δεν έχουν διερευνηθεί πλήρως ως προς την εγκυρότητα των παραδοχών τους και εφόσον χρησιμοποιούνται πρέπει να δίνεται παραπάνω προσοχή σε σχέση με τις μεθόδους για ευθύγραμμους αγωγούς.

## 2.4. Σύνοψη

Τα κύρια στοιχεία από τη βιβλιογραφική αναδρομή που προηγήθηκε συνοψίζονται ακολούθως υπό μορφή πίνακα:

<p><b>Newmark and Hall(1975)</b></p>	
<p>Θεωρία μικρών παραμορφώσεων Ο αγωγός παραμορφώνεται ως ευθύγραμμο στέλεχος Κινητοποιείται όλη η αντίσταση του εδάφους στην αξονική διεύθυνση Αμελείται η εγκάρσια αντίσταση του εδάφους</p>	<p><b>Kennedy et al. (1977)</b></p> 
<p>Νόμος υλικού Ramberg-Osgood Αξονική δύναμη του αγωγού είναι ανεξάρτητη της καμπυλότητας Ο αγωγός συμπεριφέρεται ως καλώδιο Αλλαγή του σχήματος της διατομής μπορεί να αμεληθεί Καμπυλότητα παραμένει σταθερή</p>	<p><b>Wang &amp; Yeh(1985)</b></p> 
<p>Δεν αμελείται η καμπτική στιβαρότητα του αγωγού Χώρισαν τον αγωγό σε 4 τμήματα Τμήματα σταθερής καμπυλότητας(κυκλικά τόξα) Δοκοί απείρου μήκους πάνω σε ελαστική θεμελίωση Εισηγάγαν συντελεστές ασφαλείας ροπών και αξονικών παραμορφώσεων</p>	<p><b>Karamitros et al. (2007)</b></p> 
<p>Επιρροή της αξονικής δύναμης του αγωγού στην κάμψη και στην καμπτική στιβαρότητα Το δυσμενέστερο ζεύγος δυνάμεων εμφανίζεται πιο κοντά στο ρήγμα Αμελούνται φαινόμενα τοπικού λυγισμού και αλλαγής του σχήματος της διατομής Αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού μέχρι 0.5% για κατασκευαστικούς λόγους Παραδοχή της συμμετρίας</p>	

<p style="text-align: center;"><b>Trifonov et al. (2010)</b></p> <p>Επέκταση εξισώσεων πέραν της συμμετρίας για τα κανονικά ρήγματα</p> <p>Διαδικασία ελαχιστοποίησης του συστήματος των εξισώσεων με τη μέθοδο Nelder &amp; Mead</p> <p>Στον υπολογισμό της επιμήκυνσης του αγωγού γεωμετρικά έλαβαν υπό όψιν και την επιρροή της κάμψης του αγωγού</p> <p>Εισήγαγαν την αξονική δύναμη στις εξισώσεις ισορροπίας</p> <p>Για μεγάλες μετακινήσεις όπου υπάρχει διαρροή τέθηκε ομοιόμορφα κατανεμημένη αντίδραση</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Karamitros et al. (2011)</b></p> <p>Ο αγωγός χωρίστηκε σε 3 τμήματα</p> <p>Όλο το μήκος όπου κινείται προς τα πάνω στο ενδιάμεσο τμήμα θεωρήθηκε ότι έχει τη μέγιστη αντίσταση</p> <p>Το μήκος που κινείται προς τα κάτω συναντά μεγαλύτερη αντίσταση, μπορεί να προσαρμοστεί με ομοιόμορφη κατανομή για λόγους απλοποίησης</p> <p>Για να βρεθεί η βύθιση στο σημείο του ρήγματος, ο αγωγός θεωρείται καταχρηστικά πως συμπεριφέρεται ως καλώδιο</p> <p>Στην περίπτωση που ένα ρήγμα είναι και οριζόντια διατμήσεως και κανονικό μπορεί να γίνει η ανάλυση του ξεχωριστά για τις 2 συνιστώσες και έπειτα να προστεθούν τα αποτελέσματα</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Trifonov et al. (2011)</b></p> <p>Οι συνθήκες έντασης των τοιχωμάτων του αγωγού είναι επίπεδης έντασης</p> <p>Χρήση του δυσδιάστατου κριτηρίου διαρροής του von Mises</p>	

<p style="text-align: center;"><b>Wang et al. (2011)</b></p> <p>Λύθηκαν οι εξισώσεις με περιπτώσεις για να εισάγουν το μη γραμμικό χαρακτήρα του εδάφους</p> <p>Η δυσμενέστερη διατομή δεν βρίσκεται στο σημείο μέγιστης καμπτικής καταπόνησης</p> <p>Χρησιμοποιήθηκε η συμμετρία του προβλήματος</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Takada et al. (2000)</b></p> <p>Επιρροή της αλλαγής σχήματος της διατομής</p> <p>Συσχέτιση της γωνίας στροφής του αγωγού με τη μέγιστη παραμόρφωση του αγωγού</p> <p>Οι ακραίες παραμορφώσεις συμβαίνουν σε εκείνο το σημείο που κάμπτεται ο αγωγός</p>	
<p style="text-align: center;"><b>O'Rourke &amp; Liu(1999)</b></p> <p>Μετακίνηση παράλληλη στον αγωγό</p> <p>Ελαστική συμπεριφορά αγωγού και εγκάρσιων αντιδράσεων πέραν της γωνίας</p> <p>Μέγιστη αντίσταση (τριβή) παράλληλα στη μετακίνηση του αγωγού</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Gesouli(2008)</b></p> <p>Εισάγεται η μετελαστική συμπεριφορά του αγωγού</p> <p>Χωρίζεται ο αγωγός στην περιοχή της γωνίας σε τρία τμήματα</p> <p>Μη γραμμική συμπεριφορά εδάφους και στην εγκάρσια διεύθυνση</p> <p>Εισαγωγή μειωτικού συντελεστή στη μετακίνηση του ρήγματος ώστε να βρεθούν με ακρίβεια οι παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος</p>	





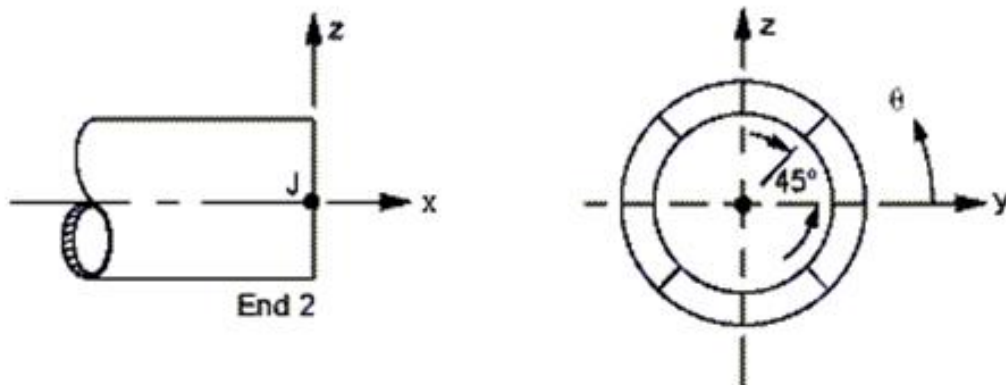
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ**

### **3.1. Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων**

**Βασικές Αρχές.-** Η ανάλυση του αγωγού έγινε με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων και λαμβάνει υπόψη μεγάλες μετατοπίσεις, υπό την έννοια ότι στην επαναληπτική διαδικασία επίλυσης οι εξισώσεις ισορροπίας ικανοποιούνται στην τρέχουσα παραμορφωμένη κατάσταση. Επιπλέον, λαμβάνει υπόψη την ελαστοπλαστική συμπεριφορά του χάλυβα. Είναι επομένως μη γραμμική, τόσο από άποψη γεωμετρίας όσο και από άποψη υλικού.

**Διακριτοποίηση.-** Η συμπεριφορά του αγωγού προσομοιώνεται με ισοπαραμετρικά τρισδιάστατα στοιχεία σωλήνα 2-κόμβων, τα οποία έχουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός κοίλου σωλήνα, όμοιου με την εξεταζόμενη διατομή του αγωγού.

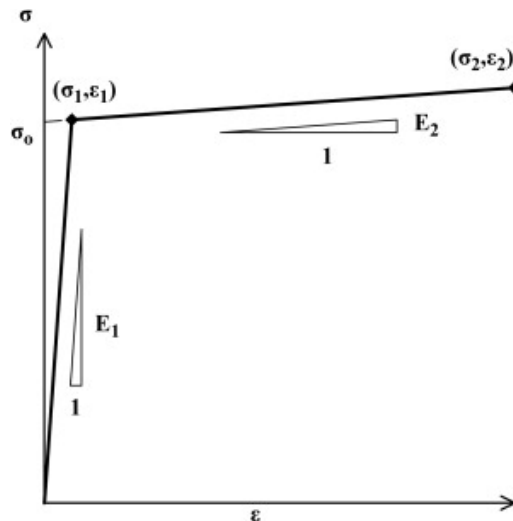
Στην περίμετρο του σωλήνα ορίζονται οκτώ (8) σημεία ολοκλήρωσης (integration points), που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1 (ο άξονας  $z$  ταυτίζεται με την κατακόρυφο). Οι τάσεις σε κάθε διατομή υπολογίζονται σε αυτά τα σημεία, λαμβάνοντας υπόψη τη συνεισφορά των αξονικών δυνάμεων, των καμπτικών ροπών και της εσωτερικής πίεσης του σωλήνα. Η ύπαρξη οκτώ (8) σημείων ολοκλήρωσης επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό τάσεων και παραμορφώσεων ακόμη και στην περιοχή των μεγάλων παραμορφώσεων, όταν τμήμα της διατομής του αγωγού έχει διαρρεύσει.



**ΣΧΗΜΑ 3.1:** Σημεία ολοκλήρωσης στη διατομή των στοιχείων σωλήνα

### 3.2. Προσομοίωση Υλικού

Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του χάλυβα εισάγεται στο προσομοίωμα ως μια τριγωνική καμπύλη, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2. Ο λόγος του Poisson έχει ληφθεί ίσος προς 0.20.



**ΣΧΗΜΑ 3.2:** Σχέση τάσεων-παραμορφώσεων που χρησιμοποιήθηκε στο προσομοίωμα για το χάλυβα.

### 3.3. Ισοδύναμα Ελατήρια Εδάφους

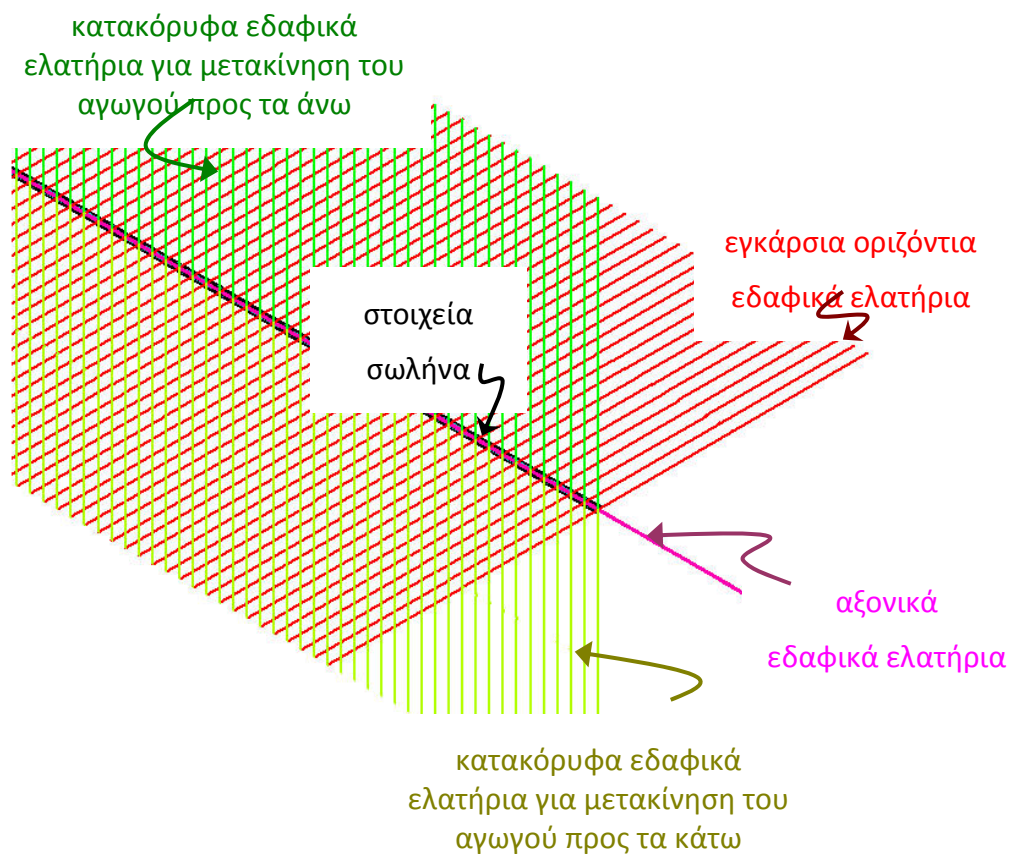
Η αλληλεπίδραση εδάφους-αγωγού προσομοιώνεται μέσω πέντε ανελαστικών ελατηρίων ανά διατομή: ένα στην αξονική και τέσσερα στις δύο (2) εγκάρσιες διευθύνσεις (Σχήμα 3.3), με δύο ξεχωριστά ελατήρια για κάθε εγκάρσια διεύθυνση. Η μετακίνηση του εδάφους επιβάλλεται ως μετατόπιση στην άκρη των εν λόγω ελατηρίων.

Ο αγωγός θεωρείται ότι θα εγκατασταθεί μέσα σε τάφρο επίχωσης, ικανού μεγέθους, έτσι ώστε να μπορούμε να θεωρήσουμε ότι θα παραμορφωθεί εξ ολοκλήρου μέσα σε αυτή. Συνεπώς, τα ελατήρια θα αντιστοιχούν στις ιδιότητες του υλικού επίχωσης και όχι του φυσικού εδάφους. Οι καταστατικές σχέσεις αυτών των ελατηρίων θεωρούνται διγραμμικές ελαστοπλαστικές, αν και ουσιαστικά η κύρια παράμετρος είναι η αντοχή θραύσης του εδάφους και όχι η οριζοντιοειδής «ελαστική» συμπεριφορά των ελατηρίων έως το φορτίο διαρροής.

Η θεωρία για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών των ελατηρίων του εδάφους περιγράφεται εν συντομία στις ακόλουθες παραγράφους. Η παρουσίαση εστιάζεται σε μη συνεκτικά υλικά (άμμους), όπως το έδαφος επίχωσης που χρησιμοποιείται κατά μήκος του αγωγού.

Καθώς πρέπει να εισαχθούν στο αριθμητικό προσομοίωμα τα ισοδύναμα ελατήρια, γεννάται το ερώτημα του ποιο θα είναι το κατάλληλο μήκος τους. Αυτό το ερώτημα αφορά παρασιτικές αντιδράσεις που είναι πιθανό να δημιουργηθούν. Εάν για παράδειγμα, μετακινηθεί ένας κόμβος του

αγωγού αξονικά 30cm, και το μήκος του εγκάρσιου οριζόντιου ελατηρίου είναι 10m, τότε το εγκάρσιο ελατήριο θα έχει επιμηκυνθεί κατά 0.45cm χωρίς καν να έχει μετακινηθεί ο αγωγός εγκάρσια. Αυτή η επιμήκυνση είναι τάξης μεγέθους (περίπου η μισή με βάση τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις του Κεφαλαίου 4 , Σχήμα 4.2) με τη μέγιστη ελαστική μετακίνηση. Άρα ενδέχεται κάποια ελατήρια που πρέπει λόγω βράχυνσης να αντιδράσουν, να μην αντιδράσουν στο βαθμό που έπρεπε λόγω της παρασιτικής επιμήκυνσης. Οπότε ύστερα από διαδοχικές διερευνητικές αναλύσεις στις οποίες άλλαζε μόνο το μήκος των ελατηρίων, προέκυψε ότι ελατήρια 1000m παράγουν ικανοποιητικά αποτελέσματα ελαχιστοποιώντας οποιεσδήποτε παρασιτικές αντιδράσεις.



**ΣΧΗΜΑ 3.3:** Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους-αγωγού με ελαστοπλαστικά ελατήρια

**Αξονικά ελατήρια.**- Οι οριακές αξονικές δυνάμεις των ελατηρίων αντιστοιχούν στην τριβή που ασκείται στην εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια κατά μήκος του αγωγού, και υπολογίζονται με βάση θεωρίες ανάλογες προς αυτές που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της μεταφοράς φορτίων στις αξονικώς φορτιζόμενες διεπιφάνειες πασσάλου-εδάφους. Για τις άμμους και άλλα μη συνεκτικά εδάφη (π.χ. αμμοχάλικο), οι εν λόγω δυνάμεις λαμβάνονται μετά την ολοκλήρωση των διατμητικών τάσεων κατά μήκος της επαφής μεταξύ του αγωγού και του εδάφους. Έτσι, για έναν πλήρως θαμμένο αγωγό η μέγιστη αξονική αντίσταση  $t_u$  ανά μονάδα μήκους μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$t_u = \frac{\pi \cdot D}{2} \gamma \cdot H \cdot (1 + K_o) \tan \delta \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (3.3)$$

όπου:

$K_o$  = συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών

$H$  = απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους ως το κέντρο του αγωγού

$D$  = εξωτερική διάμετρος αγωγού

$\gamma$  = υπό άνωση ειδικό βάρος επίχωσης

$\delta$  = γωνία τριβής μεταξύ αγωγού και επίχωσης

Ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας του αγωγού, η γωνία τριβής  $\delta$  είναι ίση με το 50÷100% της γωνίας τριβής  $\phi$  της επίχωσης. Σε αυτήν την μελέτη χρησιμοποιείται μία μέση τιμή γωνίας  $\delta=2/3\phi$ .

Η μέγιστη αξονική αντίσταση επιτυγχάνεται αρχικά σε μία σχετική μετατόπιση  $x_u$  της τάξης των 2.5 έως 5.1 mm (0.1 έως 0.2 in), για πυκνή έως χαλαρή άμμο αντίστοιχα [Singhal, 1980].

**Εγκάρσια οριζόντια ελατήρια.**- Τα ελατήρια αυτά προσομοιώνουν την αντίσταση που ασκείται από το περιβάλλον έδαφος σε οποιαδήποτε οριζόντια μετατόπιση του αγωγού. Κατά συνέπεια, οι μηχανισμοί της αλληλεπίδρασης εδάφους-αγωγού είναι παρόμοιοι με εκείνους των κατακόρυφων πλακών αγκύρωσης ή των θεμελίων που κινούνται οριζόντια σχετικά με το περιβάλλον έδαφος, ενεργοποιώντας έτσι έναν μηχανισμό παθητικής ώθησης γαιών.

Για τα μη συνεκτικά εδάφη, η σχέση μεταξύ της δύναμης  $p$  ανά μονάδα μήκους του αγωγού και της οριζόντιας μετατόπισης  $y$ , εκφράζεται από μια υπερβολική σχέση της μορφής [Trautmann and O'Rourke, 1983a]:

$$p = \frac{y}{A + B \cdot y} \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (3.4)$$

όπου:

$$A = 0.15 \gamma_u / \rho_u \quad (3.5)$$

$$B = 0.85 / \rho_u \quad (3.6)$$

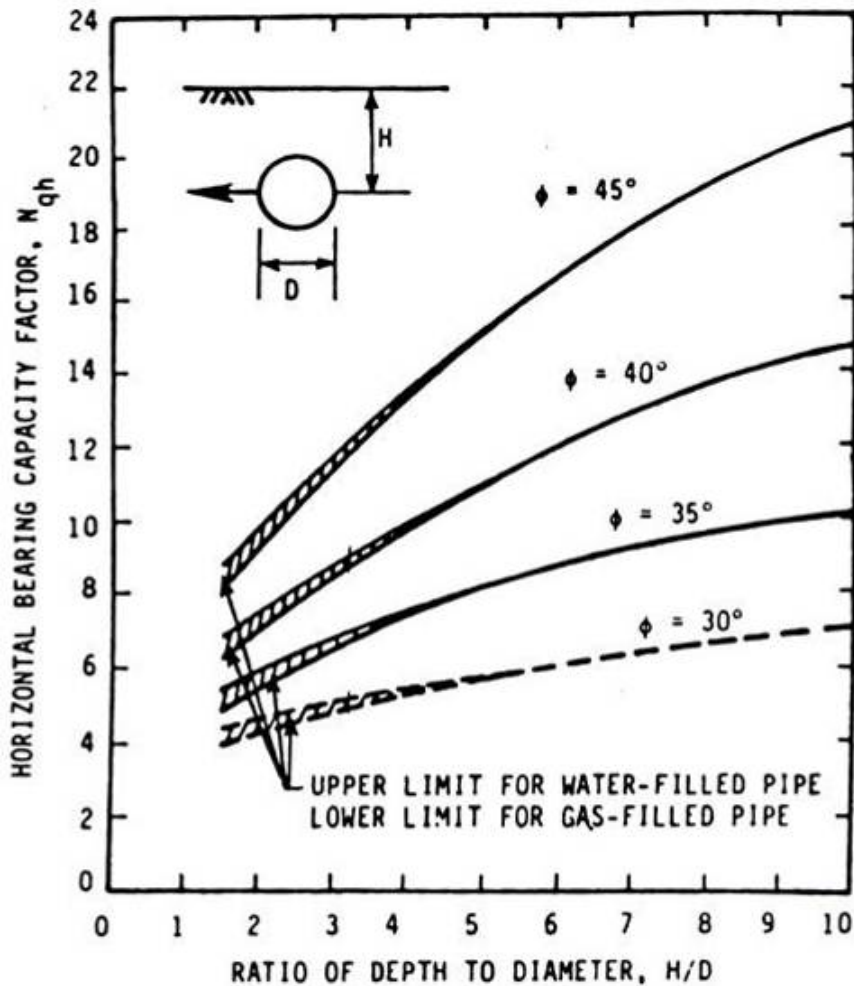
$$\rho_u = \gamma H N_{qh} D \quad (3.7)$$

$N_{qh}$  = συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας που υπολογίζεται συντηρητικά από το Σχήμα 3.4 [Trautman and O'Rourke, 1983a].

$\gamma_u$  = 0.07 έως 0.10 (H+D/2) για χαλαρή άμμο

0.02 έως 0.03 (H+D/2) για πυκνή άμμο

Αποδεικνύεται ότι, στην περίπτωση προσάρτησης μιας διγραμμικής ελαστοπλαστικής σχέσης στην Εξ. 3.4 για  $\rho=0.5\rho_u$ , οι προηγούμενες τιμές του  $\gamma_u$  θα πρέπει να πολλαπλασιασθούν επί 0.26.



ΣΧΗΜΑ 3.4: Συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας (after Trautmann and O'Rourke, 1983a).

**Εγκάρσια κατακόρυφα ελατήρια.**- Οι δυνάμεις αντίστασης για τα κατακόρυφα ελατήρια είναι μη συμμετρικές, δηλαδή η απόκριση είναι διαφορετική για τις «προς τα κάτω» και για τις «προς τα πάνω» μετακινήσεις, δεδομένου ότι η αντίσταση που εφαρμόζεται από το σχετικά λεπτό στρώμα της επίχωσης πάνω από το αγωγό είναι σημαντικά μικρότερη.

Για την προς τα κάτω κατεύθυνση της κίνησης, ο αγωγός θεωρείται ότι ενεργεί ως κυλινδρικό θεμέλιο-λωρίδα και η μέγιστη εδαφική αντίσταση  $q_u$  δίνεται από τη συμβατική θεωρία φέρουσας ικανότητας. Για μη συνεκτικά εδάφη:

$$q_u = \gamma \cdot H \cdot N_q \cdot D + 0.5 \cdot \gamma \cdot D^2 \cdot N_\gamma \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (3.8)$$

όπου:

$N_q, N_\gamma =$  συντελεστές φέρουσας ικανότητας για λωριδωτά θεμέλια που φορτίζονται κατακόρυφα προς τα κάτω-υπολογίζονται από το Σχήμα 3.5 συναρτήσει της γωνίας τριβής  $\varphi$  (Meyerhof, 1955),

$\gamma =$  υπό άνωση ειδικό βάρος επίχωσης

$H =$  βάθος επίχωσης του άξονα του αγωγού

$D =$  διάμετρος του αγωγού

Θεωρώντας διγραμμική ελαστοπλαστική σχέση φορτίου-μετατόπισης για πλήρως θαμμένους αγωγούς, η μετατόπιση κατά την έναρξη της διαρροής είναι της τάξης του 10% έως 15% της διαμέτρου του αγωγού ( $z_{u,dn} = 0.10D \div 0.15D$ ), για πυκνές έως χαλαρές άμμους αντίστοιχα.

Με βάση δοκιμές που εκτελέστηκαν σε αγωγούς θαμμένους σε ξηρή ομοιόμορφη άμμο, προκύπτει ότι ισχύει η ακόλουθη υπερβολική σχέση μεταξύ της δύναμης  $q$  και της κατακόρυφης προς τα άνω μετατόπισης  $z$  [Trautmann and O'Rourke 1983b]:

$$q = \frac{z}{A + B \cdot z} \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (3.9)$$

όπου:

$$A = 0.07 z_u / q_u \quad (3.10)$$

$$B = 0.93 / q_u \quad (3.11)$$

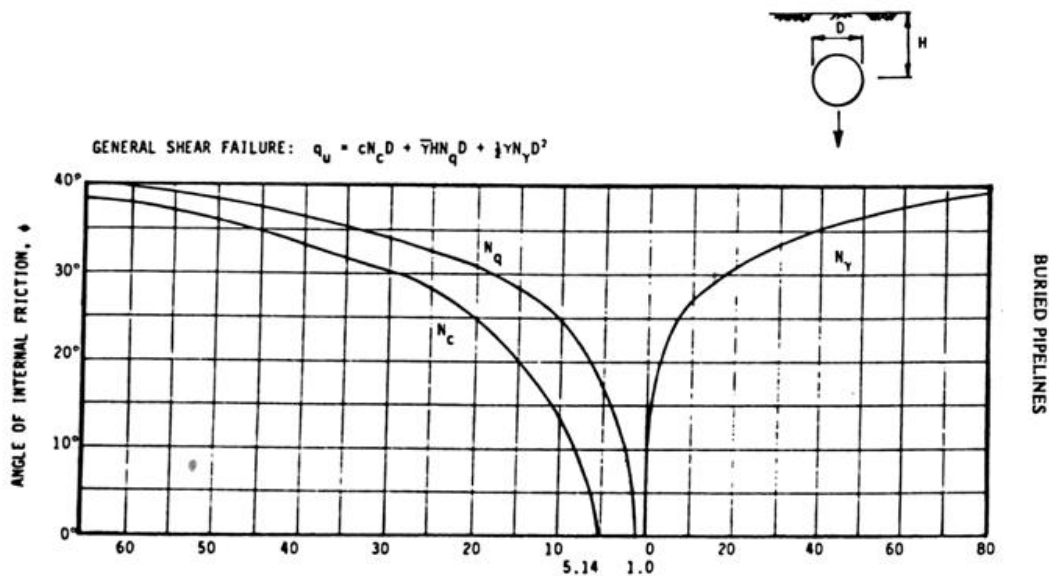
Για μη συνεκτικά εδάφη, η μέγιστη αντίσταση σε κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση εκφράζεται ως [Trautmann and O'Rourke, 1983b]:



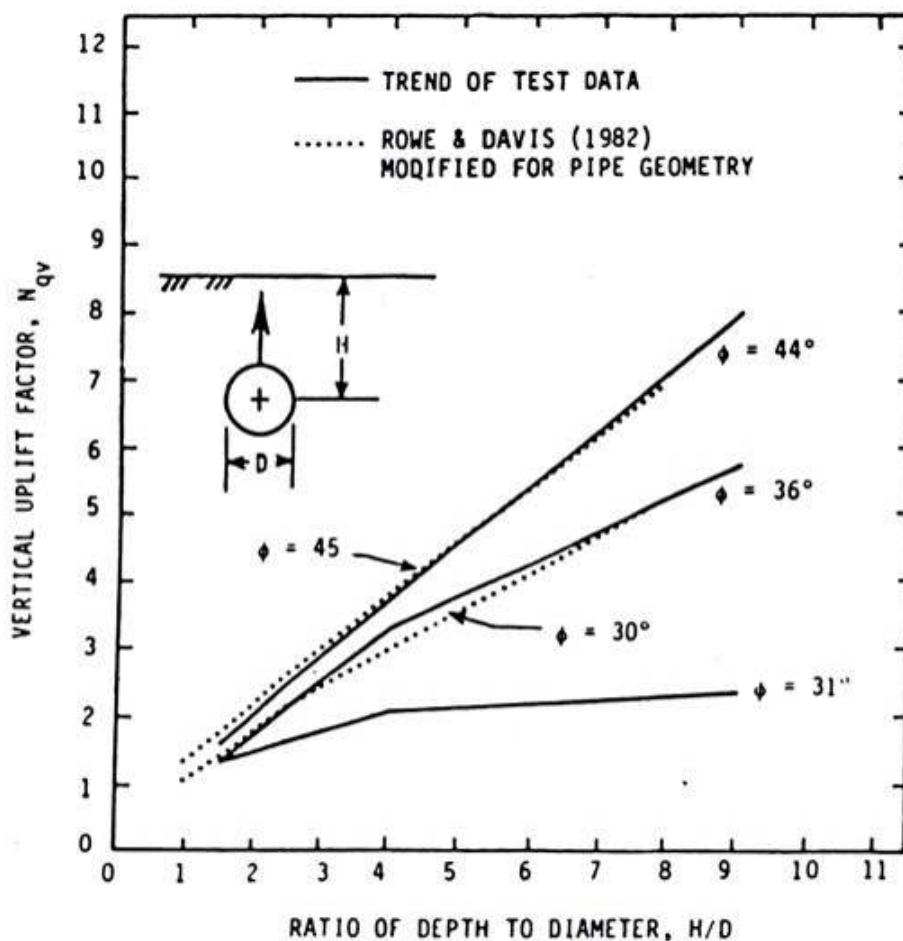
$$q_u = \gamma \cdot H \cdot N_{qv} \cdot D \quad (3.12)$$

όπου ο συντελεστής κατακόρυφης ανύψωσης  $N_{qv}$  δίνεται στο Σχήμα 3.6 ως συνάρτηση του λόγου του βάθους του άξονα του αγωγού προς τη διάμετρο  $H/D$  και της γωνίας τριβής της επίχωσης  $\phi$ .

Με βάση τις δοκιμές πεδίου [Esquivel-Diaz, 1967, Trautman and O'Rourke 1983a], η τιμή της προς τα άνω μετατόπισης που απαιτείται για έναρξη της διαρροής είναι  $z_{u,up}=(0.010\pm 0.015)H$ , για πυκνές έως χαλαρές άμμους αντίστοιχα. Όταν στην Εξ. 3.9 προσαρμόζεται μια διγραμμική ελαστοπλαστική έκφραση για  $q=0.50q_u$ , το  $z_{u,up}$  θα πρέπει να πολλαπλασιασθεί επί 0.13 περίπου.



**ΣΧΗΜΑ 3.5:** Συντελεστές κατακόρυφης (προς τα κάτω) φέρουσας ικανότητας, προτεινόμενοι από τον Meyerhof (1955).



**ΣΧΗΜΑ 3.6:** Συντελεστής κατακόρυφης (προς τα άνω) φέρουσας ικανότητας (after Trautmann and O'Rourke, 1983a).

### 3.4. Εδαφικές Μετατοπίσεις λόγω Τεκτονικής Διάρρηξης

Όπως προαναφέρθηκε, οι εδαφικές μετατοπίσεις λόγω της διάρρηξης του ρήγματος εφαρμόζονται στη βάση των ισοδύναμων ελατηρίων του εδάφους, υπό μορφή «αναβαθμού», είναι δηλαδή ομοιόμορφες κατά μήκος του τμήματος του αγωγού που αντιστοιχεί στο ολισθαίνον τμήμα του ρήγματος.

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται μία σχηματική απεικόνιση της διασταύρωσης του αγωγού με ένα ενεργό ρήγμα. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται επίσης το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, με αναφορά στο οποίο υπολογίζονται οι μετατοπίσεις του ρήγματος. Συγκεκριμένα, ο άξονας  $x$  ορίζεται οριζόντιος και παράλληλος με τον άξονα του αγωγού, ο άξονας  $y$  είναι οριζόντιος και κάθετος στον  $x$ , ενώ ο άξονας  $z$  είναι κατακόρυφος.

Η διάρρηξη που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις είναι οριζοντίως διατμήσεως, δηλαδή το διάνυσμα της μετατόπισης  $\delta$  είναι παράλληλο στο οριζόντιο ίχνος του ρήγματος. Επιπλέον, το επίπεδο του ρήγματος είναι κατακόρυφο και σχηματίζει γωνία  $\beta=45^\circ$  με τον άξονα του αγωγού.

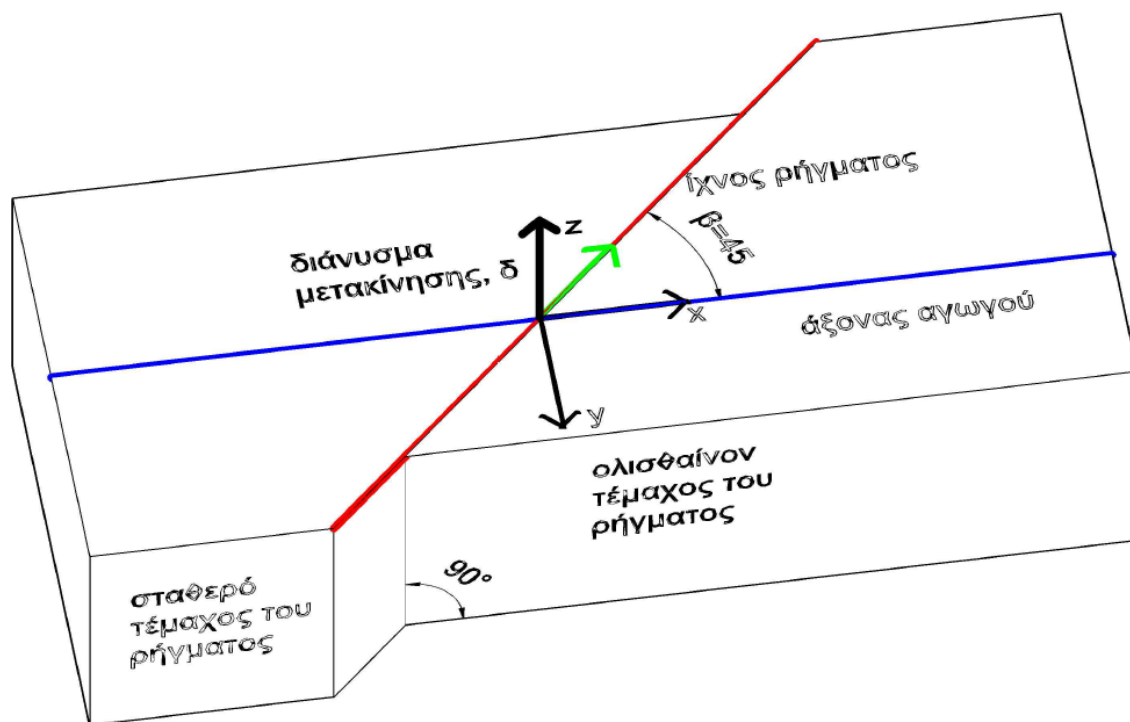
Με βάση τη γεωμετρία του Σχήματος 3.7, οι μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των συνολικών μετατοπίσεων  $\delta$  ως εξής:

$$\Delta X = \delta \cos\beta \quad (3.13)$$

$$\Delta Y = -\delta \sin\beta \quad (3.14)$$

$$\Delta Z = 0 \quad (3.15)$$

Σημειώνεται ότι οι ανωτέρω εκφράσεις αναφέρονται αυστηρά στο σύστημα συντεταγμένων που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7.



**ΣΧΗΜΑ 3.7:** Σχηματική απεικόνιση της διασταύρωσης του αγωγού με ρήγματα.

### 3.5. Μη Γραμμικός Αλγόριθμος Επίλυσης

Η επίλυση προβλημάτων με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων οδηγεί σε ένα σύστημα εξισώσεων, με την ακόλουθη μητρική μορφή:

$$[K]\{u\} = \{F^a\} \quad (3.16)$$

όπου:

$[K]$  = μητρώο δυσκαμψίας

$\{u\}$  = διάνυσμα αγνώστων τιμών των βαθμών ελευθερίας του συστήματος (αγνώστων μετατοπίσεων και στροφών των κόμβων, στην περίπτωση στατικής ανάλυσης)

$\{F^a\}$  = διάνυσμα επιβαλλόμενων επικόμβιων φορτίων

Στην περίπτωση που το μητρώο δυσκαμψίας  $[K]$  αποτελεί συνάρτηση των αγνώστων τιμών των βαθμών ελευθερίας, ή των παραγώγων αυτών, τότε η Εξίσωση 3.16 είναι μη γραμμική. Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την επίλυση τέτοιων μη γραμμικών εξισώσεων είναι η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson, η οποία συνοψίζεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$[K_i^T]\{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F_i^{nr}\} \quad (3.17)$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} - \{\Delta u_i\} \quad (3.18)$$

όπου:

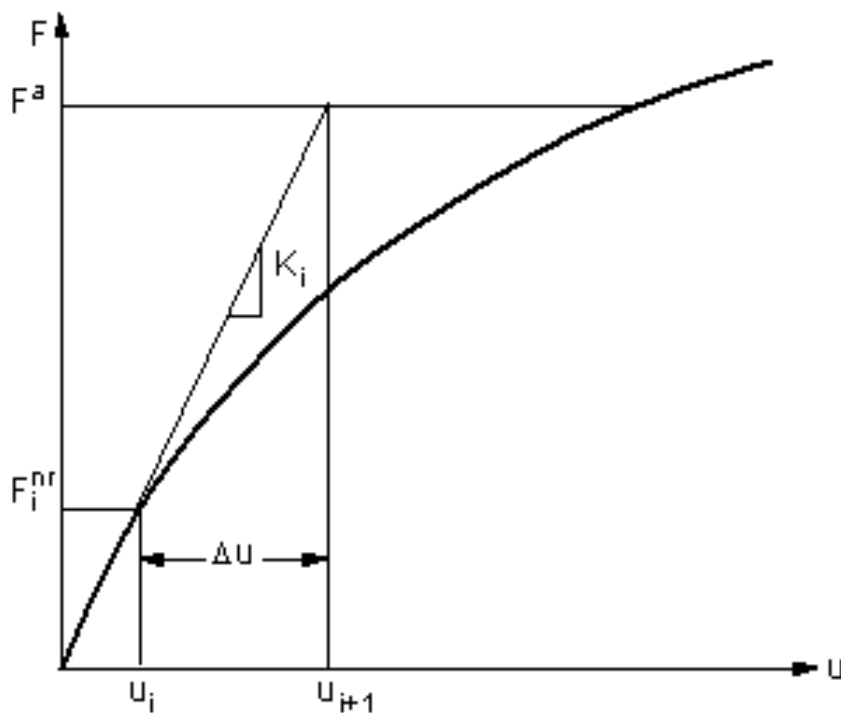
$[K_i^T]$  = εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας

$i$  = δείκτης που υποδηλώνει την τρέχουσα επανάληψη

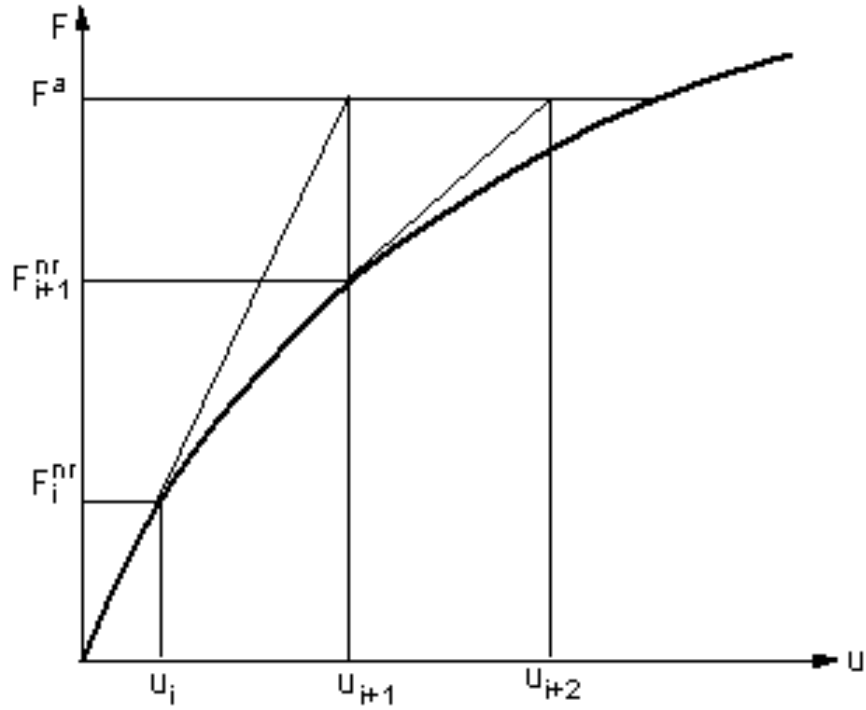
$\{F_i^{nr}\}$  = διάνυσμα επικόμβιων δράσεων που απαιτούνται για την εξισορρόπηση των εσωτερικών τάσεων των στοιχείων

Σε κάθε επανάληψη, τα  $[K_i^T]$  και  $\{F_i^{nr}\}$  υπολογίζονται συναρτήσει των τιμών του  $\{u_i\}$ . Έτσι, το δεξί τμήμα της Εξίσωσης 3.17 είναι ουσιαστικά το διάνυσμα των απομένοντων (εκτός-ισορροπίας) φορτίων. Αποτελεί, δηλαδή, μέτρο της «απόκλισης» από την τελική λύση.

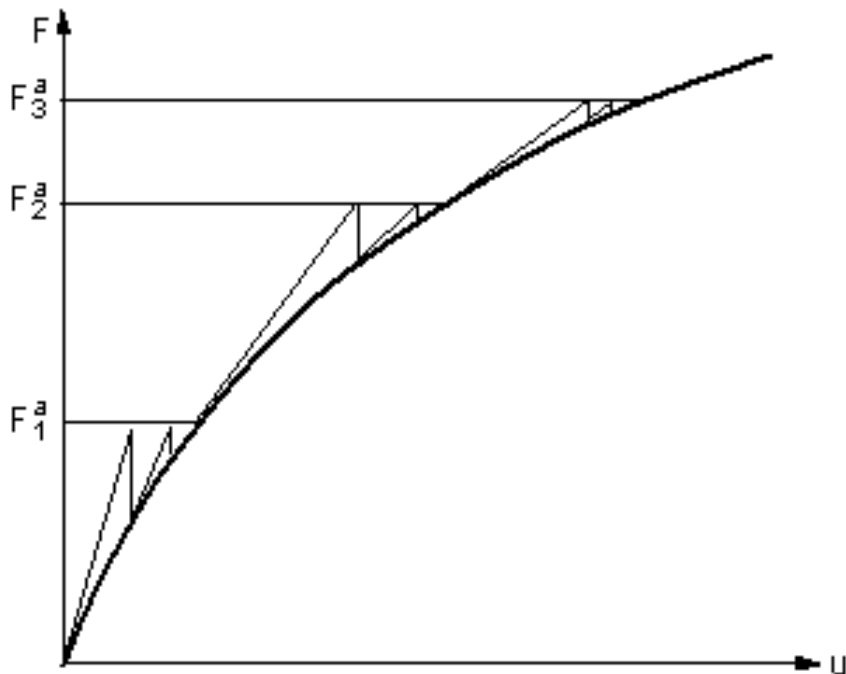
Μια επανάληψη της μεθόδου Newton-Raphson παριστάνεται γραφικά στο Σχήμα 3.8, για ένα απλό προσομοίωμα με ένα μόνο βαθμό ελευθερίας.



**ΣΧΗΜΑ 3.8:** Επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson – μία επανάληψη.



ΣΧΗΜΑ 3.9: Επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson – η επόμενη επανάληψη.



ΣΧΗΜΑ 3.10: Επαυξητική μέθοδος Newton-Raphson (από ANSYS Inc., 2004).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8, για να επιτευχθεί σύγκλιση απαιτούνται περισσότερες από μία επαναλήψεις Newton-Raphson. Έτσι, ο αλγόριθμος επίλυσης είναι ο εξής:

- i. Υποθέτουμε τις αρχικές τιμές του διανύσματος  $\{u_0\}$ . Συνήθως, το  $\{u_0\}$  λαμβάνει τη λύση της προηγούμενης επανάληψης, ενώ για την πρώτη επανάληψη θεωρείται:  $\{u_0\} = \{0\}$ .
- ii. Υπολογίζουμε το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας  $[K_i^T]$  και τις επικόμβιες δράσεις  $\{F_i^{nr}\}$  για την τρέχουσα κατάσταση  $\{u_i\}$ .
- iii. Υπολογίζουμε το διάνυσμα  $\{\Delta u_i\}$  από την εξίσωση 3.17.
- iv. Προσθέτουμε το  $\{\Delta u_i\}$  στο  $\{u_i\}$  για να υπολογίσουμε τις μετατοπίσεις στην επόμενη κατάσταση  $\{u_{i+1}\}$  (Εξίσωση 3.18).
- v. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα ii-iv έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση.

Στο Σχήμα 3.9 φαίνεται η επόμενη επανάληψη (i+1) του παραδείγματος του Σχήματος 3.8. Οι ακόλουθες επαναλήψεις θα πραγματοποιηθούν με αντίστοιχο τρόπο.

Η λύση που λαμβάνεται στο τέλος της επαναληπτικής διαδικασίας αντιστοιχεί σε ένα φορτίο  $\{F^a\}$ . Έτσι, η τελική λύση θα είναι σε ισορροπία, με το διάνυσμα των επικόμβιων φορτίων  $\{F_i^{nr}\}$ , που υπολογίζονται από τις εσωτερικές τάσεις στην τρέχουσα κατάσταση, να είναι ίσο με το διάνυσμα των εξωτερικά επιβαλλόμενων επικόμβιων φορτίων  $\{F^a\}$  (ή τουλάχιστον, εντός των ορίων ανοχής). Αντίθετα, καμία από τις ενδιάμεσες λύσεις δε βρίσκεται σε ισορροπία.

Αν η ανάλυση περιλαμβάνει μη γραμμικότητες που εξαρτώνται από τη διαδρομή της φόρτισης (όπως στην περίπτωση της πλαστικότητας), τότε η επίλυση απαιτεί την επίτευξη ισορροπίας και σε ενδιάμεσες καταστάσεις, έτσι ώστε να ακολουθείται με ακρίβεια η διαδρομή φόρτισης. Αυτό επιτυγχάνεται πραγματοποιώντας την ανάλυση σε διαδοχικά επαυξητικά βήματα. Το τελικό φορτίο  $\{F^a\}$  επιβάλλεται, δηλαδή, σε μικρότερα βήματα, και για την εύρεση της λύσης σε κάθε ένα από αυτά, εφαρμόζεται η μέθοδος Newton-Raphson:

$$[K_{n,i}^T] \{\Delta u_i\} = \{F_n^a\} - \{F_{n,i}^{nr}\} \quad (3.19)$$

όπου:

$[K_{n,i}]$  = εφαπτομενικό μητρώο για το επαυξητικό βήμα n και την εσωτερική επανάληψη i



$\{F_n^a\}$  = συνολικό εφαρμοζόμενο φορτίο στο επαυξητικό βήμα n

$\{F_{n,i}^{nr}\}$  = διάνυσμα εξωτερικών επικόμβιων φορτίων που απαιτούνται για την εξισορρόπηση των εσωτερικών τάσεων των στοιχείων κατά το επαυξητικό βήμα n και την εσωτερική επανάληψη i

Ο παραπάνω αλγόριθμος ονομάζεται επαυξητική μέθοδος Newton-Raphson, παριστάνεται γραφικά στο Σχήμα 3.10, και είναι αυτός που συνήθως χρησιμοποιείται για αριθμητικές αναλύσεις αγωγών σε διασταυρώσεις με ενεργά ρήγματα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ**

### **4.1. Γενικά**

Στόχος των αριθμητικών αναλύσεων που παρουσιάζονται στο παρόν Κεφάλαιο είναι ο προσδιορισμός της εντατικής κατάστασης που αναμένεται να αναπτυχθεί σε αγωγούς με γωνίες στην οριζοντιογραφική τους χάραξη, λόγω της διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων που τέμνουν τη χάραξη τους. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δε θα χρησιμοποιηθούν για τη βαθμονόμηση εμπειρικών σχέσεων υπολογισμού των εντατικών μεγεθών σχεδιασμού και επομένως δεν εξετάζεται παραμετρικά η επίδραση όλων των παραμέτρων που υπεισέρχονται στο πρόβλημα. Αντιθέτως θα αποτελέσουν τη βάση για τη θεμελίωση αναλυτικής μεθοδολογίας σχεδιασμού, και συνεπώς έμφαση δίνεται στα εξής:

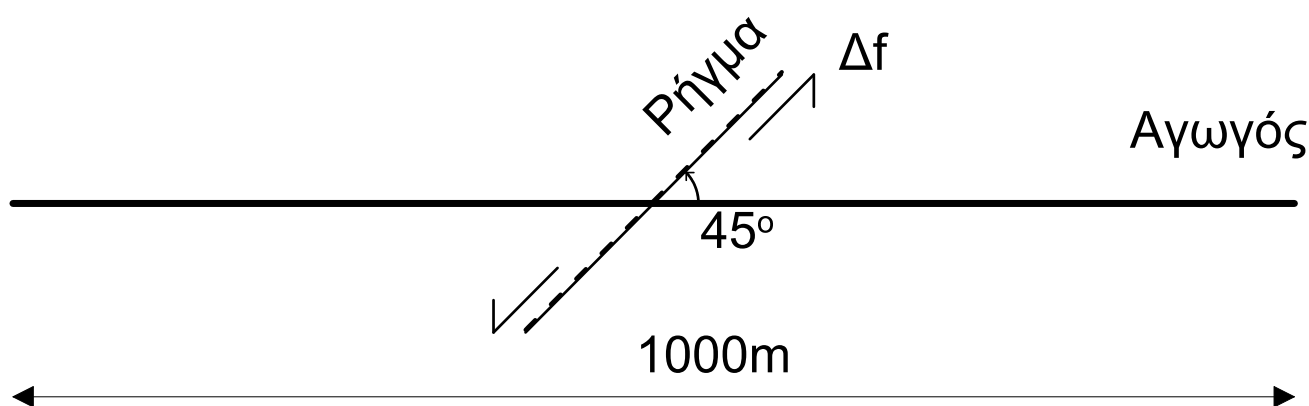
- Κατανομή μετακινήσεων, εντατικών μεγεθών και παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού.
- Μεταβολή των ανωτέρω σε κρίσιμες θέσεις με τη μεταβολή της επιβαλλόμενης μετακίνησης του ενεργού ρήγματος.

Αρχικά προσομοιώθηκε η επίδραση της μετακίνησης ενός ρήγματος μόνο σε ευθύγραμμο αγωγό, για λόγους σύγκρισης. Τα εν λόγω αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.2. Έπειτα προσομοιώθηκε αγωγός με γωνία χωρίς τόξο συναρμογής (παραδοχή των O'Rourke&Liu και της Gesouli) ώστε να εξεταστεί το πώς μεταβάλλονται τα παραπάνω μεγέθη στην περιοχή της γωνίας όσο και στην περιοχή του ρήγματος. Τα εν λόγω αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Όπως περιγράφεται αναλυτικά στην Παράγραφο 4.3.4 όπου παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα αποτελέσματα, οι παραμορφώσεις που προβλέπονται από τις αριθμητικές αναλύσεις στην περιοχή της γωνίας είναι αρκετά υψηλές. Κρίθηκε, επομένως, απαραίτητο να διερευνηθεί η αξιοπιστία των εν λόγω αποτελεσμάτων, μέσω της πραγματοποίησης επιπλέον αναλύσεων με τόξα συναρμογής στα οποία θεωρήθηκαν τυπικές τιμές για την ακτίνα καμπυλότητας, σύμφωνα με τις συνήθεις κατασκευαστικές πρακτικές. Τα εν λόγω αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.4.

## 4.2. Αριθμητικές αναλύσεις για ευθύγραμμο αγωγό

### 4.2.1. Δεδομένα αριθμητικών αναλύσεων

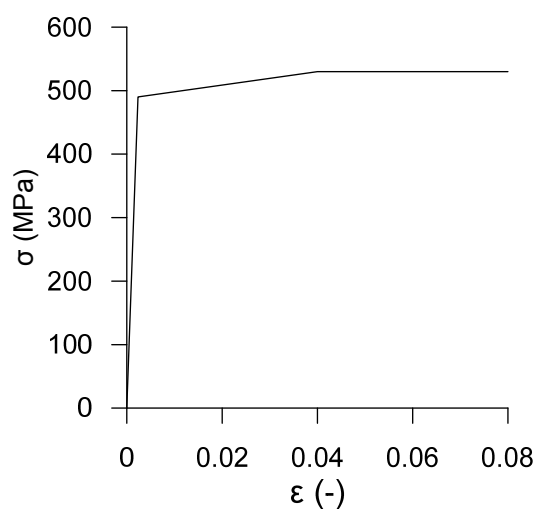
Προσομοιώθηκε τμήμα αγωγού με μήκος 1000m το οποίο διακριτοποιήθηκε σε στοιχεία δοκού μήκους 0.5m, δηλαδή σε 2000 στοιχεία δοκού. Η διάμετρος του αγωγού ήταν 0.9144m και το πάχος του ίσο με 0.0119m. Το υλικό του χάλυβα θεωρήθηκε ότι είναι ποιότητας API5L-X65, και προσομοιώθηκε ως τριγραμμικό σύμφωνα με την Παράγραφο 3.2, με τιμές περαιτέρω που δίνονται στον Πίνακα 4.1 και στο Σχήμα 4.2. Οι τιμές των εδαφικών ελατηρίων που περιγράφηκαν στην Παράγραφο 3.3 δίνονται στον Πίνακα 4.2. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν για βάθος τοποθέτησης του αγωγού 1.3m, σε άμμο μέσης πυκνότητας ειδικού βάρους  $18\text{kN/m}^2$  και γωνίας εσωτερικής τριβής  $36^\circ$ . Τα ελατήρια τοποθετήθηκαν ανά 0.5m, όσο δηλαδή και η διάσταση κάθε στοιχείου του αγωγού. Άρα για κάθε τύπο ελατηρίου χρησιμοποιήθηκαν 2001 στοιχεία. Το μήκος τους ήταν 1000m ώστε να μην επηρεάζεται η αξονική τους επιμήκυνση από τις εγκάρσιες μετακινήσεις των κόμβων του αγωγού ως προς τον άξονα του ελατηρίου και η αντίδραση τους να είναι η ορθή. Η μετακίνηση που επιβλήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Θεωρήθηκε ρήγμα οριζοντίας ολισθήσεως του οποίου το ίχνος σχημάτιζε γωνία  $45^\circ$  ως προς τον άξονα του αγωγού, ενώ η φορά της κίνησης του ήταν τέτοια ώστε να προκαλεί κάμψη και εφελκυσμό στον αγωγό. Το μέγεθος της μετακίνησης ήταν 2 φορές η διάμετρος του αγωγού και επιβλήθηκε σταδιακά σε 80 βήματα.



ΣΧΗΜΑ 4.1: Γεωμετρία του αγωγού και του ρήγματος. (κάτοψη)

Πίνακας 4.1: Στοιχεία για το χάλυβα API5L-X65

$\epsilon(-)$	$\sigma(\text{MPa})$
0	0
0.00233	490
0.04	531



**ΣΧΗΜΑ 4.2:** Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το χάλυβα.

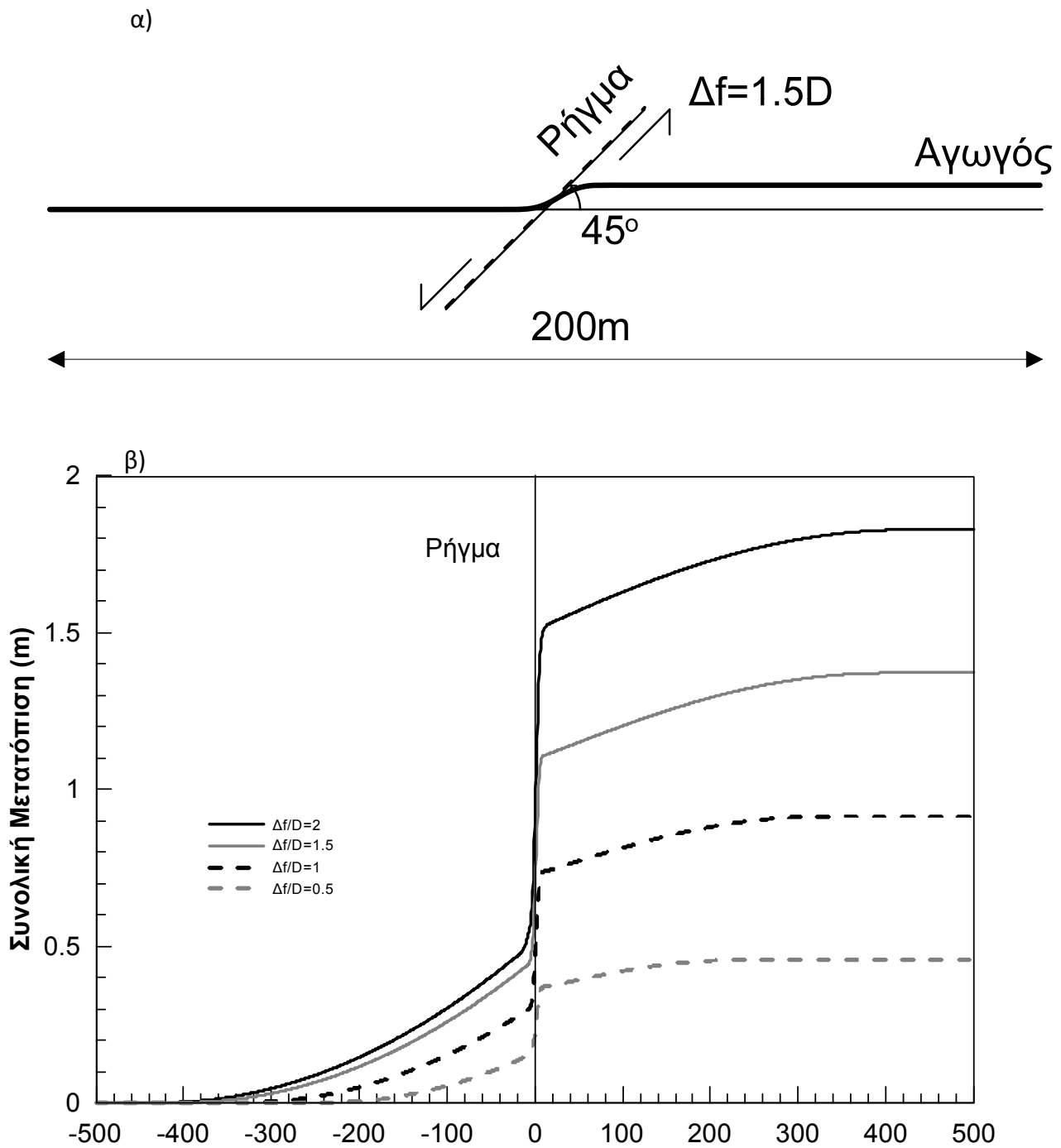
**Πίνακας 4.2:**

Στοιχεία για τα εδαφικά ελατήρια.

Ελατήρια Εδάφους	$\delta y$ (m)	$P_y$ (kN/m)
Αξονικό	0.003	40.5
Εγκάρσιο Οριζόντιο	0.0114	318.6
Εγκάρσιο Κατακόρυφο επάνω	0.0022	52
Εγκάρσιο Κατακόρυφο κάτω	0.1	1360

#### 4.2.2. Τυπικά αποτελέσματα

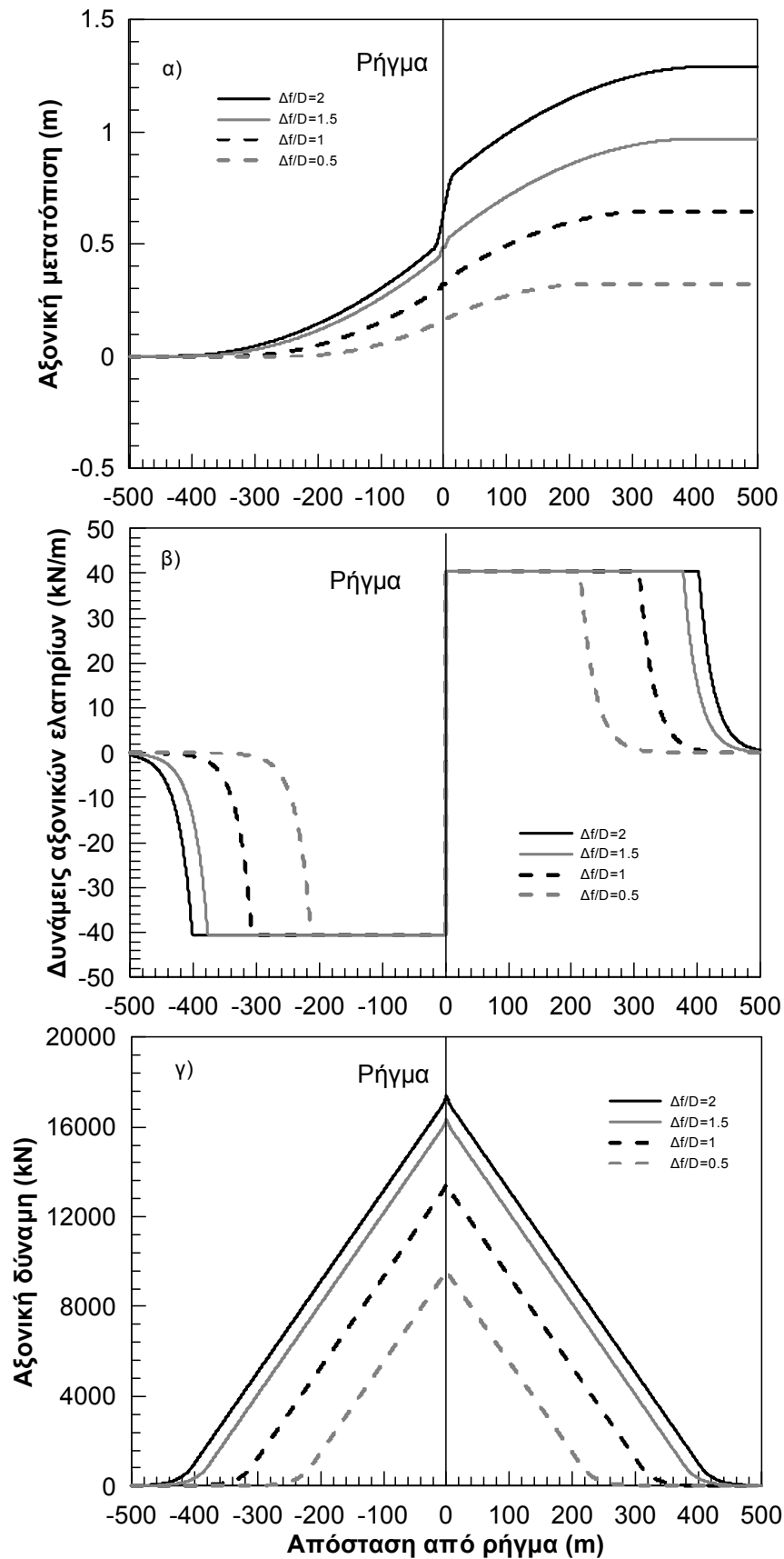
Στο Σχήμα 4.3.β παρουσιάζεται η παραμορφωμένη εικόνα του αγωγού, λόγω μετακίνησης του ρήγματος  $\Delta f$ , ίσης με  $2D$ , όπου  $D$  η διάμετρος του αγωγού. Έπειτα παρουσιάζεται η κατανομή της συνολικής μετατόπισης των κόμβων του αγωγού με την απόσταση από το ρήγμα για 4 στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων. Παρατηρείται ότι στη θέση  $-500\text{m}$  που αντιστοιχεί στο σταθερό τέμαχος του ρήγματος η μετακίνηση είναι 0. Στη θέση  $500\text{m}$  που αντιστοιχεί στο ολισθαίνον τέμαχος ο αγωγός μετακινείται όσο και το περιβάλλον έδαφος, δηλαδή έως  $2D=1.83\text{m}$ . Στα δύο άκρα, λοιπόν ο αγωγός δεν μετακινείται σχετικά με το έδαφος, γεγονός που επιβεβαιώνει την επάρκεια του μήκους προσομοίωσης ώστε να μην επηρεάζουν οι συνοριακές συνθήκες του αγωγού το πρόβλημα. Ενδιάμεσα, ο αγωγός μετακινείται σχετικά και παρατηρούμε ότι στην περιοχή του ρήγματος έχουμε τις μεγαλύτερες διαφορές. Τέλος για μικρές στάθμες μετακινήσεων επηρεάζονται (μετακινούνται σχετικά) μικρότερα τμήματα του αγωγού (κάτω των  $200\text{m}$  εκατέρωθεν) ενώ για μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετακινήσεις οδηγούν σε μεγαλύτερα μήκη επιρροής, τα οποία δείχνουν να συγκλίνουν στα  $400\text{m}$  περίπου εκατέρωθεν του ρήγματος.



**ΣΧΗΜΑ 4.3:** α) Παραμορφωμένη εικόνα του αγωγού (5 φορές μεγέθυνση των παραμορφώσεων) και β) διάγραμμα συνολικών μετακινήσεων κατά μήκος του αγωγού.

Στο Σχήμα 4.4 εξετάζεται ο αγωγός κατά την αξονική του έννοια, δηλαδή η μεταβολή των αξονικών μετακινήσεων του, των αντιδράσεων των αξονικών ελατηρίων και της αξονικής δύναμης του αγωγού με την απόσταση από το ρήγμα.

- Στο Σχήμα 4.4.α παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις του αγωγού κατά τη διεύθυνση του άξονά του για 4 στάθμες μετακινήσεων και συγκεκριμένα για  $\Delta f/D=0.5,1,1.5,2$ . Η εν λόγω κατανομή έχει πολλές ομοιότητες με την αντίστοιχη κατανομή των συνολικών μετατοπίσεων. Όπως παρουσιάζεται και παρακάτω, η εγκάρσια μετακίνηση-κάμψη του αγωγού περιορίζεται σε ένα σχετικά πολύ μικρό μήκος (το πολύ 20m εκατέρωθεν του ρήγματος) σε σχέση με το μήκος που μετακινείται αξονικά, οπότε το διάγραμμα των συνολικών μετατοπίσεων πέραν των 50m στην περιοχή του ρήγματος είναι κατ'ουσίαν ισοδύναμο με το διάγραμμα των αξονικών μετατοπίσεων.
- Ακολουθεί το διάγραμμα των αντιδράσεων των αξονικών ελατηρίων (Σχήμα 4.4.β). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα ελατήρια διαρρέουν για μετακίνηση τάξης μερικών χιλιοστών (για την ακρίβεια 3mm), οπότε σε αυτό το πρόβλημα επιβαλλόμενης μετακίνησης όπου ο αγωγός μετακινείται σχετικά με το έδαφος πολύ περισσότερο από αυτό το όριο (όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4.α) είναι λογικό να αναπτύσσεται η μέγιστη εδαφική αντίδραση σε μήκος αντίστοιχο με αυτό που επεκτείνεται και το διάγραμμα των μετακινήσεων. Φυσικά, εκεί που οι μετακινήσεις είναι μικρότερες των 3mm οι αντιδράσεις είναι ανάλογες των μετακινήσεων και για αυτό στα άκρα του διαγράμματος υπάρχουν καμπύλες.
- Στο Σχήμα 4.4.γ. παρουσιάζεται η κατανομή της αξονικής δύναμης του αγωγού. Η μέγιστη αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην περιοχή του ρήγματος όσο απομακρυνόμαστε από αυτό ελαττώνεται λόγω της τριβής του αγωγού (αξονικά ελατήρια) με το περιβάλλον έδαφος. Παρατηρείται ότι η κλίση του διαγράμματος στο μεγαλύτερο μήκος είναι σταθερή και οι γραμμές είναι παράλληλες μεταξύ τους, το οποίο είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι η κλίση του διαγράμματος είναι η αντίδραση του εδάφους ανά μονάδα μήκους, η οποία είναι σταθερή. Αντίστοιχα, η ανάπτυξη αξονικών δυνάμεων εκτείνεται σε αντίστοιχα μήκη με την αξονική μετατόπιση και την αντίδραση του εδάφους. Όπως και οι αντιδράσεις του εδάφους είναι περίπου γραμμικές στα άκρα του διαγράμματος, έτσι και στα άκρα αυτού του διαγράμματος σχηματίζονται καμπύλες. Τέλος για στάθμες μετακίνησης  $\Delta f/D \geq 1.5$  παρατηρείται μια σύγκλιση-σταθεροποίηση στα αποτελέσματα.

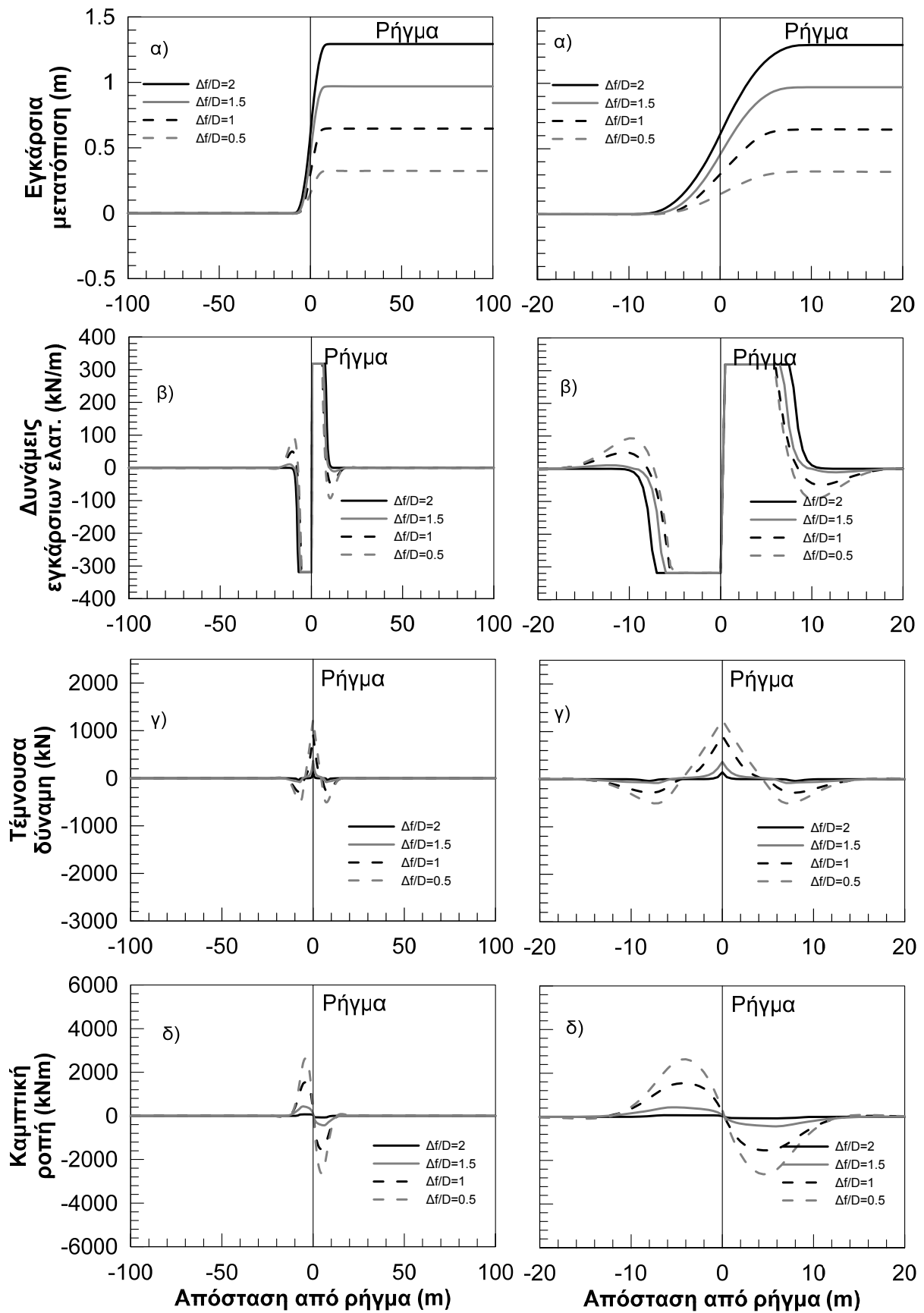


**ΣΧΗΜΑ 4.4:** Κατανομή των αξονικών μετακινήσεων, δυνάμεων ελατηρίων και δύναμης του αγωγού με την απόσταση από το ρήγμα.



Στο Σχήμα 4.5 εξετάζεται ο αγωγός κατά την εγκάρσια διεύθυνση, δηλαδή παρουσιάζονται οι κατανομές των εγκάρσιων μετακινήσεων του, των αντιδράσεων των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων, της τέμνουσας δύναμης και της καμπτικής ροπής του αγωγού. Όπως προαναφέρθηκε τα παραπάνω αναπτύσσονται σε μικρό μήκος του αγωγού, οπότε στην αριστερή στήλη παρουσιάζονται οι εν λόγω κατανομές σε μήκος του αγωγού ίσο με 200m και δεξιά δίνεται έμφαση σε μία περιοχή γύρω από το ρήγμα μήκους 40m.

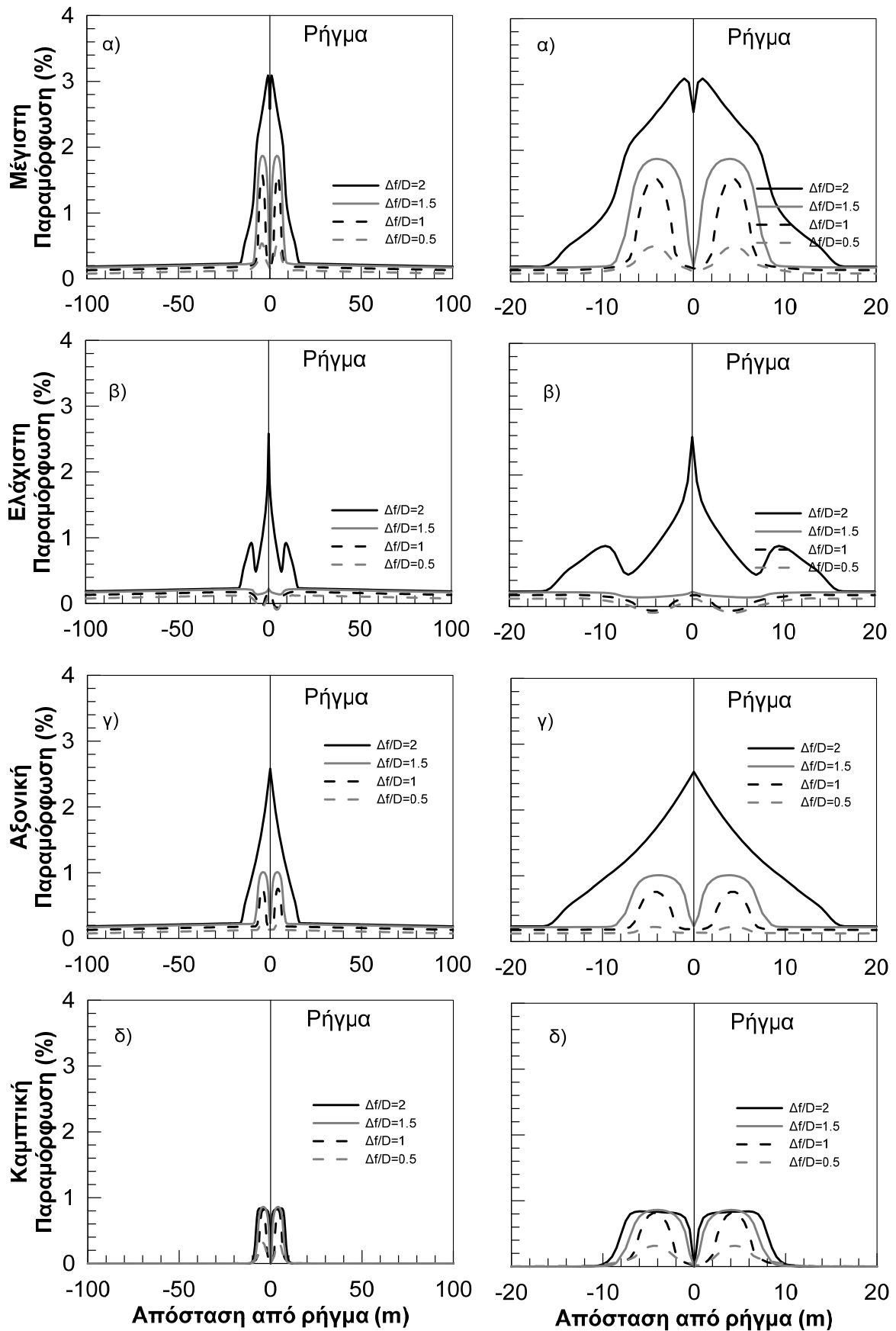
- Στο Σχήμα 4.5.α, παρατηρείται ότι το καμπτόμενο μήκος του αγωγού είναι περίπου ίσο με 10m εκατέρωθεν του ρήγματος, και δε μεταβάλλεται σημαντικά για τις διάφορες στάθμες μετακινήσεων, σε αντίθεση με την αξονική διεύθυνση.
- Στο Σχήμα 4.5.β, όπως και στην αξονική διεύθυνση, τα ελατήρια έχουν διαρρεύσει στο μεγαλύτερο καμπτόμενο μήκος, λόγω της μικρής μετακίνησης διαρροής σε σχέση με την επιβαλλόμενη μετακίνηση. Στο άκρο του καμπτόμενου μήκους τα ελατήρια δεν έχουν διαρρεύσει και η αντίδραση τους είναι ανάλογη της μετακίνησης. Αυτή η κατανομή των μετακινήσεων η οποία φθίνει και αλλάζει πρόσημο περιγράφεται μαθηματικά ως γινόμενο ημιτόνου και νεπέριου εκθέτη, όπως έχει αποδειχθεί ήδη από τους Wang & Yeh (1985) και έχει εισαχθεί ως συνοριακή συνθήκη στο καμπτόμενο μήκος με ισοδύναμο στροφικό ελατήριο στη μέθοδο των Karamitros et al (2007).
- Στα Σχήματα 4.5.γ και δ παρουσιάζονται οι κατανομές τεμνουσών και ροπών. Παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει η μετακίνηση του ρήγματος αυτά τα μεγέθη μειώνονται. Αυτή η συμπεριφορά είναι χαρακτηριστική της μετάβασης του αγωγού από μία καμπτόμενη δοκό σε ένα καλώδιο που κυρίως εφελκύεται. Στην αρχή η κάμψη είναι κυρίαρχη πάνω στη δοκό, παρόλο που υπάρχει και μικρός εφελκυσμός. Σε μεγαλύτερες μετακινήσεις όμως αυτή η κυριαρχία αντιστρέφεται (όπως θα φανεί και από την κατανομή των παραμορφώσεων στα ακόλουθα σχήματα) και ο αγωγός εφελκύεται σε ολόκληρη τη διατομή του κοντά στο ρήγμα. Μια μικρή διαφορά στις ακραίες παραμορφώσεις στη διατομή του αγωγού ισοδυναμεί με κάμψη αλλά είναι αρκετά μικρή και συνεχώς απομειώνεται, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 4.6. Παρατηρείται ότι ο εφελκυσμός του αγωγού επιδρά πάνω στην καμπτική του στιβαρότητα και δικαιολογεί την παραδοχή της συμπεριφοράς ως καλωδίου, που είχε υιοθετηθεί από τους πρώτους ερευνητές που μελέτησαν την απόκριση αγωγών σε διασταυρώσεις με ρήγματα, για παράδειγμα Kennedy et al. (1977). Όμως, αυτή η επίδραση γίνεται κυρίαρχη μόνο σε μεγάλες μετακινήσεις όπου οι παραμορφώσεις του αγωγού ξεπερνούν τα όρια που ορίζουν οι κανονισμοί, όπως θα παρατηρηθεί στις επόμενες σελίδες. Προφανώς ανάλογη μείωση δέχεται και η τέμνουσα ως κλίση του διαγράμματος ροπών. Η απομείωση των εντατικών μεγεθών συμβαίνει καθώς το πρόβλημα είναι επιβαλλόμενης μετακίνησης και όχι επιβαλλόμενης δύναμης. Τέλος, γίνεται φανερός και ο λόγος που προτάθηκε η βελτίωση της μεθόδου των Wang & Yeh (1985) στην οποία θεωρούσαν ότι η μέγιστη καμπτική ροπή εμφανίζεται στην άκρη της καμπτόμενης δοκού, από τους Karamitros et al. (2007), όπου η μέγιστη καμπτική ροπή αναπτύσσεται μέσα στο μήκος της καμπτόμενης δοκού και μάλιστα πολύ κοντά στο ρήγμα.



**ΣΧΗΜΑ 4.5:** Κατανομή των εγκάρσιων μετακινήσεων, δυνάμεων ελατηρίων, τεμνουσών και καμπτικών ροπών του αγωγού με την απόσταση από το ρήγμα.

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζονται οι κατανομές των διαμήκων παραμορφώσεων του αγωγού, (α) των μέγιστων, (β) των ελάχιστων σε κάθε διατομή όπως και (γ) της ισοδύναμης αξονικής παραμόρφωσης και (δ) καμπτικής. Η καμπτική παραμόρφωση είναι η διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη παραμόρφωση. Η αξονική παραμόρφωση είναι η μέση παραμόρφωση της διατομής, δηλαδή ο μέσος όρος της μέγιστης και της ελάχιστης παραμόρφωσης. Όπως προαναφέρθηκε, τα παραπάνω αναπτύσσονται σε μικρό μήκος του αγωγού, οπότε στην αριστερή στήλη παρουσιάζονται οι εν λόγω κατανομές σε μήκος του αγωγού ίσο με 200m και δεξιά δίνεται έμφαση σε μία περιοχή γύρω από το ρήγμα μήκους 40m.

- Από τις μέγιστες και τις ελάχιστες παραμορφώσεις επιβεβαιώνονται τα συμπεράσματα που προήλθαν από την τέμνουσα και τη ροπή. Ο αγωγός στην αρχή έχει ένα καμπτόμενο τμήμα που εφελκύεται σχετικά λίγο, χωρίς ο εφελκυσμός να αλληλεπιδρά με την κάμψη, άρα έχει ακραίες παραμορφώσεις ετερόσημες με μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή τη θετική-μέγιστη παραμόρφωση λόγω του εφελκυσμού. Αυτό το μοτίβο χάνεται με την αύξηση της μετακίνησης του ρήγματος για να δώσει τη θέση του στον καθαρό εφελκυσμό της διατομής με μια μικρή διαφορά μέγιστης και ελάχιστης παραμόρφωσης. Αυτή η μείωση δικαιολογεί τις παραδοχές των Kennedy et al. (1977) περί εφελκυσμένου καλωδίου. Παρόλα αυτά στην περίπτωση αυτή οι παραμορφώσεις είναι πολύ μεγάλες και ξεπερνούν τα επιτρεπόμενα όρια που αντιστοιχούν στην εφελκυστική αντοχή των συγκολλήσεων. Επομένως το να αμεληθεί η καμπτική στιβαρότητα του αγωγού δεν έχει πρακτικό ενδιαφέρον για το σχεδιασμό αγωγών, και οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση και έπειτα διαστασιολόγηση ενός αγωγού πρέπει να λαμβάνουν υπόψιν την καμπτική στιβαρότητα.
- Οι αξονικές παραμορφώσεις αυξάνονται τοπικά στις θέσεις των μέγιστων ροπών για μικρές και μεσαίες μετακινήσεις ρήγματος έτσι ώστε το άθροισμα όλων των τάσεων (οι οποίες εξαρτώνται από τις παραμορφώσεις) να ισούται με το αντίστοιχο ζεύγος ροπής και αξονικής δύναμης. Αυτή η αύξηση δικαιολογείται από το ότι η κράτυνση του υλικού μετά τη διαρροή είναι μικρή, οπότε για να προκύψουν οι απαιτούμενες τάσεις χρειάζονται μεγάλες παραμορφώσεις. Εάν αγνοήσουμε τις τοπικές αυξήσεις των αξονικών παραμορφώσεων λόγω της επιβαλλόμενης ροπής, οι αξονικές παραμορφώσεις μειώνονται γραμμικά από το σημείο του ρήγματος και είναι στην ελαστική περιοχή για μικρές μετακινήσεις ρήγματος όπου και η αξονική δύναμη είναι μικρή. Έπειτα για να αυξηθεί η αξονική δύναμη πρέπει να αυξηθούν οι τάσεις άρα και οι παραμορφώσεις, όμως λόγω μικρής κράτυνσης πλέον οι παραμορφώσεις πρέπει να αυξηθούν πολύ περισσότερο σε σχέση με πριν, και για αυτό το λόγο δημιουργείται για απότομη αλλαγή κλίσης στις παραμορφώσεις στο μήκος που ο αγωγός έχει διαρρεύσει.
- Οι καμπτικές παραμορφώσεις αυξάνονται στα σημεία των μέγιστων ροπών όπως είναι αναμενόμενο. Λόγω συμμετρίας του προβλήματος, η ροπή και αντίστοιχα οι καμπτικές παραμορφώσεις ακριβώς στο σημείο του ρήγματος είναι μηδενικές, για αυτό και στα υπάρχοντα προσομοιώματα ανάλυσης αγωγού (Wang & Yeh 1985, Karamitros et al. 2007, Trifonov et al. 2010) αναλύεται ο μισός αγωγός και στο σημείο του ρήγματος τοποθετείται άρθρωση. Όσο αυξάνεται η μετακίνηση του ρήγματος αυξάνεται και η καμπτική παραμόρφωση μέχρι που τείνει να σταθεροποιηθεί για τις μεγάλες μετακινήσεις.

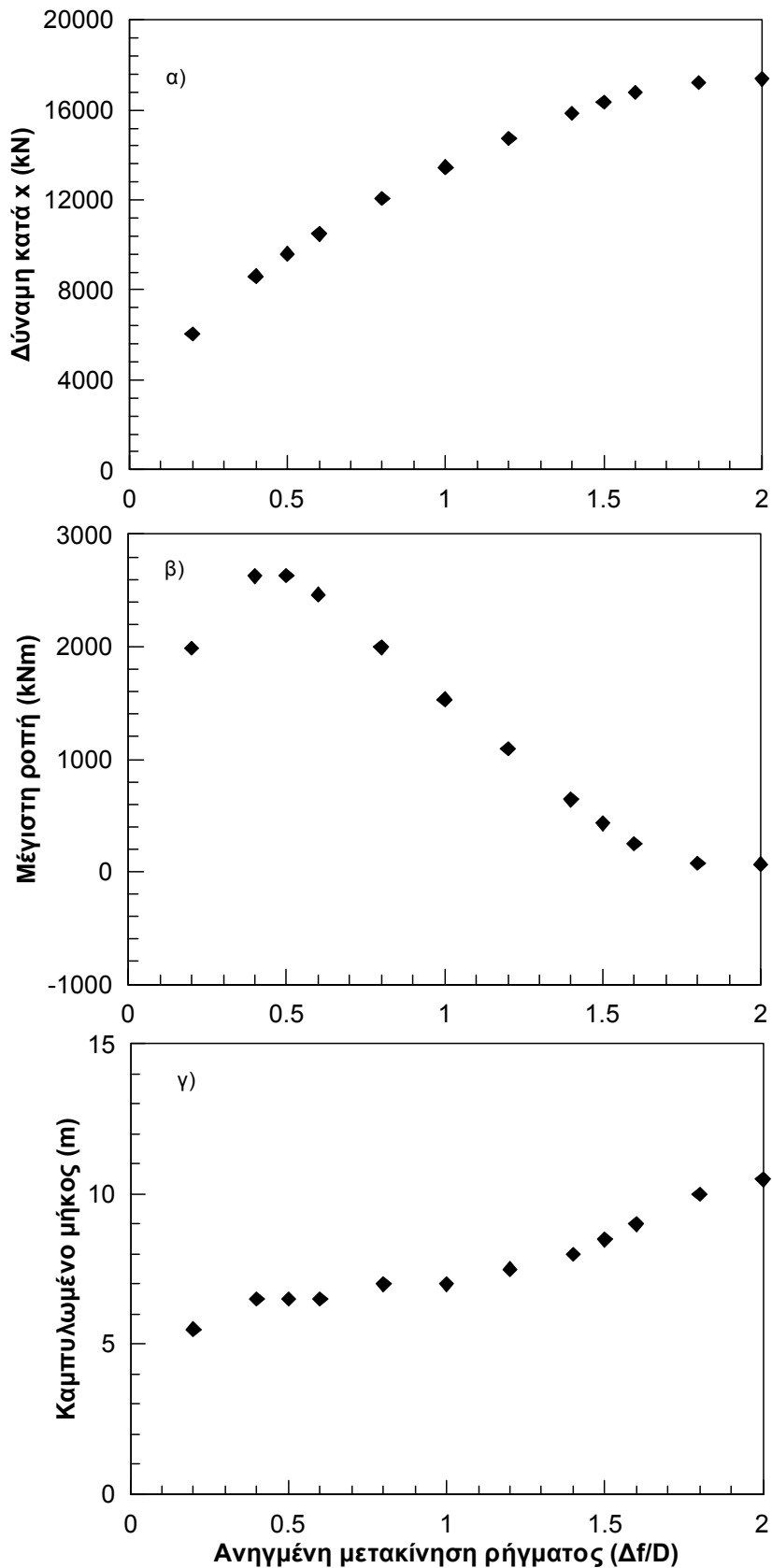


**ΣΧΗΜΑ 4.6:** Κατανομές των μέγιστων, ελάχιστων, αξονικών και καμπτικών παραμορφώσεων του αγωγού με την απόσταση από το ρήγμα.

### 4.2.3. Αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων

Στο Σχήμα 4.7. παρουσιάζονται συναρτήσεις της ανηγμένης επιβαλλόμενης μετακίνησης οι μεταβολές των ακολούθων χαρακτηριστικών μεγεθών.

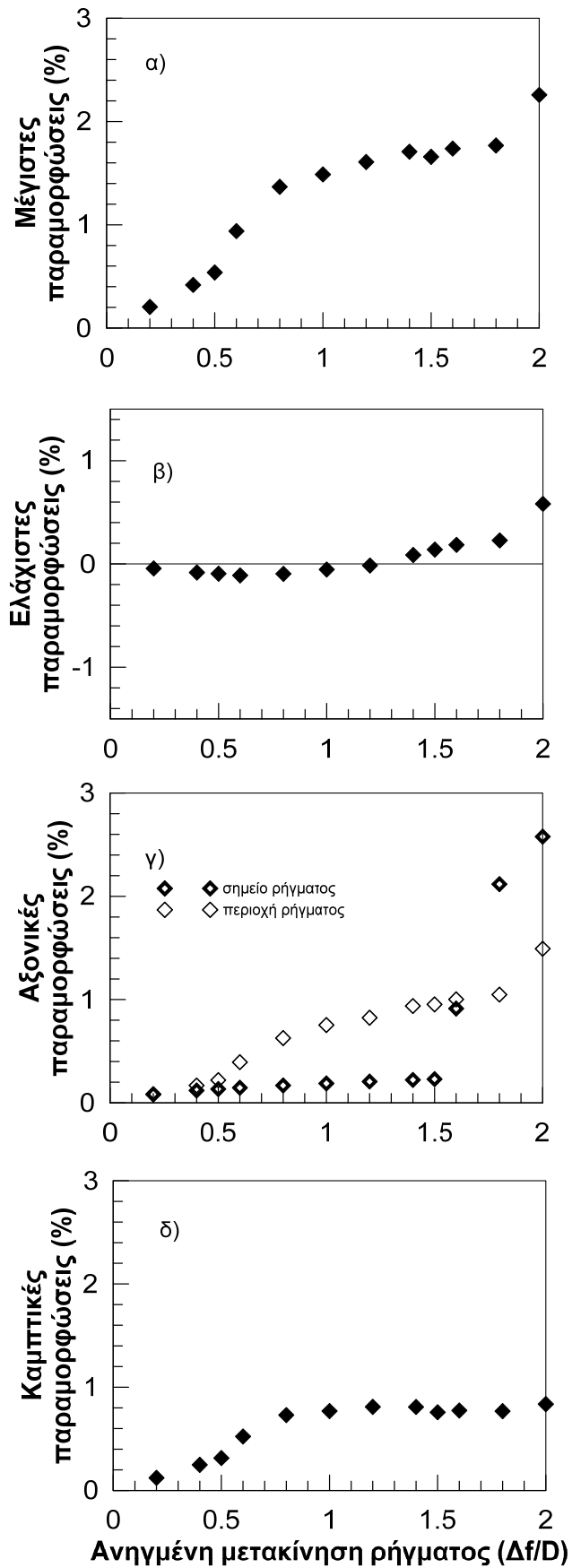
- Στο Σχήμα 4.7.α φαίνεται η αξονική δύναμη του αγωγού στο σημείο του ρήγματος. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται σαφές ότι αυξάνεται με την επιβαλλόμενη μετακίνηση, και ότι αυτή η αύξηση μειώνεται για μεγαλύτερες μετακινήσεις.
- Στο Σχήμα 4.7.β η μέγιστη καμπτική ροπή αυξάνεται αρχικά μέχρι να φθάσει μία μέγιστη τιμή για μικρή σχετικά μετακίνηση ρήγματος. Εν συνεχεία απομειώνεται λόγω του εφελκυσμού, τείνοντας τελικά σε μία μικρή τιμή για μεγάλες μετακινήσεις, όπως περιγράφηκε και νωρίτερα.
- Στο Σχήμα 4.7.γ φαίνεται το καμπτόμενο μήκος το οποίο παραμένει σταθερό για μεσαίες μετακινήσεις ρήγματος και αυξάνεται για τις μεγάλες μετακινήσεις, όπως φάνηκε και στο διάγραμμα των εγκάρσιων μετακινήσεων (Σχήμα 4.6.α).



**ΣΧΗΜΑ 4.7:** Αξονική δύναμη στο σημείο του ρήγματος, μέγιστη ροπή στην περιοχή του ρήγματος και έντονα καμπυλωμένο μήκος συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta f$  ανηγμένης προς τη διάμετρο  $D$  του αγωγού.

Στο Σχήμα 4.8 εξετάζονται οι παραμορφώσεις του αγωγού στο σημείο της μέγιστης ροπής. Επιλέγεται αυτό το σημείο διότι για μικρές και μεσαίες επιβαλλόμενες μετακινήσεις ρήγματος, είναι και αυτό που οι παραμορφώσεις είναι μέγιστες. Βέβαια, για μεγάλες επιβαλλόμενες μετακινήσεις ρήγματος η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται ακριβώς στο σημείο του ρήγματος και όχι στο σημείο της μέγιστης ροπής, απλώς δεν παριστάνεται εδώ για λόγους οικονομίας.

Κατ' αντιστοιχία με το Σχήμα 4.7.γ. οι ελάχιστες παραμορφώσεις αρχικά είναι θλιπτικές (λειτουργία καμπτόμενης δοκού) και έπειτα εφελκυστικές(λειτουργία καλωδίου). Οι αξονικές παραμορφώσεις στο σημείο του ρήγματος (Σχήμα 4.8.γ) μόλις φθάσουν στη διαρροή αυξάνονται απότομα για να αυξηθεί κατάλληλα η αξονική δύναμη. Αντίθετα, οι αξονικές παραμορφώσεις στο σημείο μέγιστης ροπής αυξάνονται και για μικρότερες μετακινήσεις, λόγω της ροπής όπως περιγράφεται στο Σχήμα 4.6.γ. Τέλος, οι καμπτικές παραμορφώσεις αυξάνονται αρχικά και έπειτα τείνουν να σταθεροποιηθούν.



**ΣΧΗΜΑ 4.8:** Μέγιστες, ελάχιστες, αξονικές και καμπτικές παραμορφώσεις συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετακίνησης μετακίνησης  $\Delta f$  ανηγμένης προς τη διάμετρο  $D$  του αγωγού.



#### 4.2.4. Παρατηρήσεις και συμπεράσματα

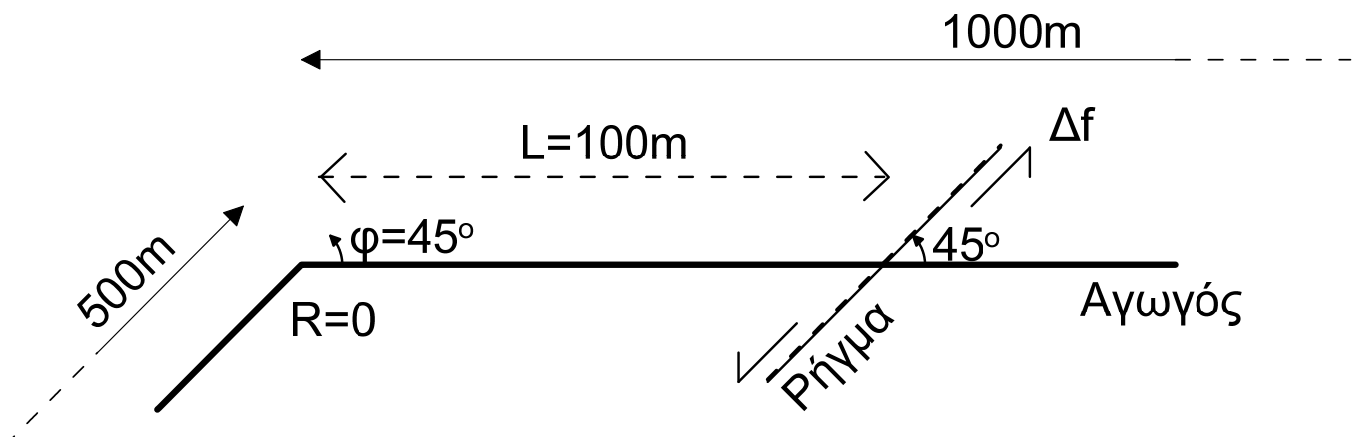
Η παραπάνω ανάλυση ήταν κατατοπιστική για τη συμπεριφορά του ευθύγραμμου αγωγού και δικαιολογεί τις παραδοχές των υφιστάμενων αναλυτικών μεθοδολογιών. Χρησιμεύει επίσης ως σύγκριση για τη συμπεριφορά του αγωγού με γωνία τόσο στην περιοχή του ρήγματος όσο και της γωνίας.

Συνοπτικά, ο αγωγός λόγω του ρήγματος επηρεάζεται αξονικά σε ένα ευρύ μήκος μεταξύ 200 με 400m εκατέρωθεν του ρήγματος, ενώ καμπτικά σε ένα μήκος μέχρι 10m εκατέρωθεν του ρήγματος. Ακόμη, για μικρές μετακινήσεις ο αγωγός λειτουργεί ως καμπτόμενη δοκός, ενώ η κάμψη επισκιάζεται από τον εφελκυσμό σε μεγάλες μετακινήσεις ρήγματος και καταλήγουμε σε λειτουργία καλωδίου. Για ενδιάμεσες μετακινήσεις η αξονική δύναμη αλληλεπιδρά με την κάμψη, και σε συνδυασμό με την μικρή κράτυνση του υλικού οι παραμορφώσεις στα σημεία μέγιστης ροπής αυξάνονται σημαντικά.

### 4.3. Αριθμητικές αναλύσεις για αγωγό με γωνία χωρίς τόξο καμπυλότητας

#### 4.3.1. Δεδομένα αριθμητικών αναλύσεων

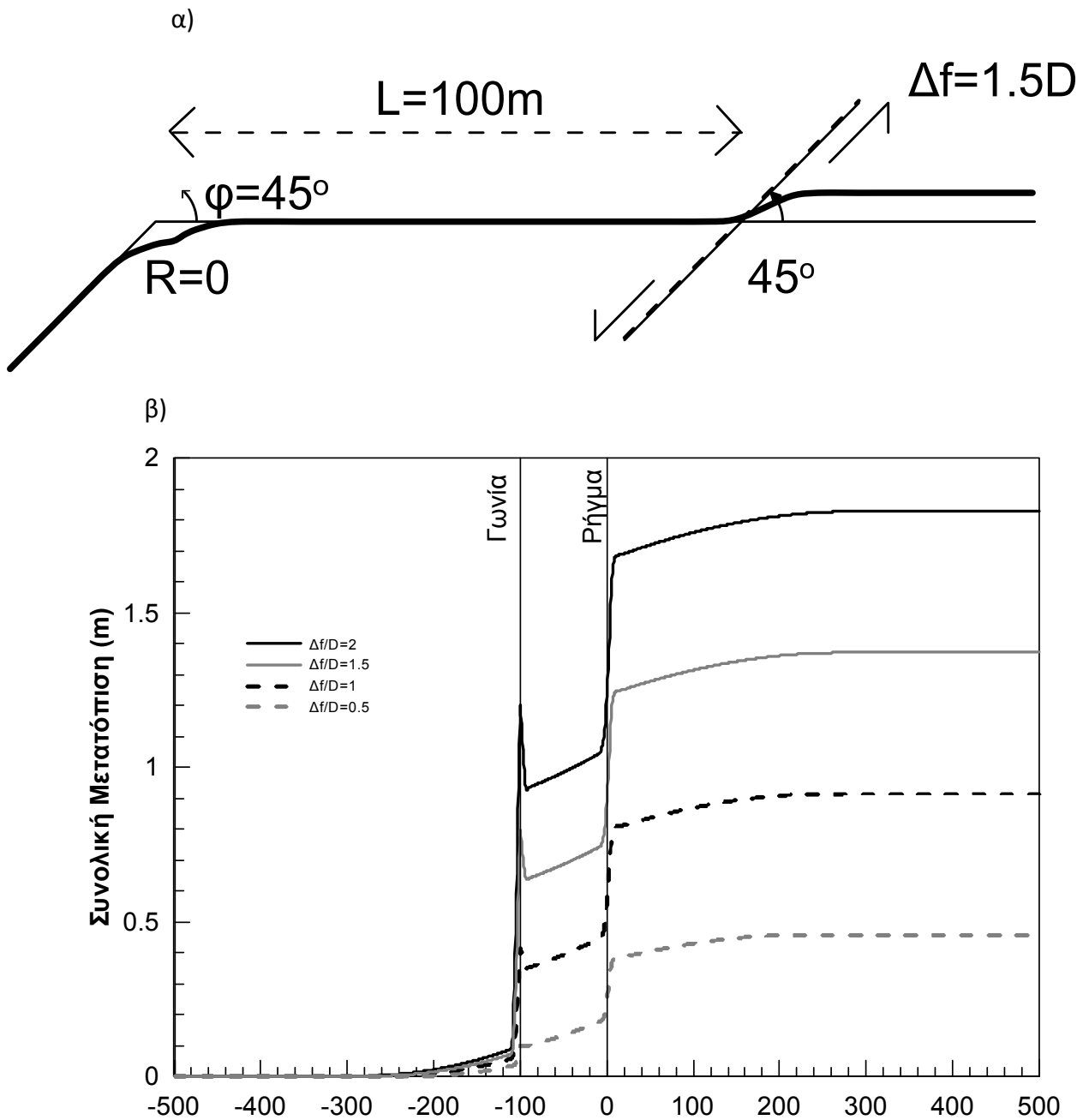
Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται αγωγός με γωνία χωρίς τόξο συναρμογής (παραδοχή των O'Rourke&Liu και της Gesouli). Αρχικά, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων, στις οποίες η χάραξη του αγωγού σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  σε απόσταση 100m από το σημείο τομής με το ίχνος του ρήγματος. Η γεωμετρία του εν λόγω προσομοιώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9. Για το προσομοίωμα θεωρήθηκαν 2 ευθύγραμμα τμήματα, μήκους 1000m και 500m αντίστοιχα. Χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία δοκού μήκους 0.5m όπως και στον ευθύγραμμο αγωγό, άρα συνολικά 3000 στοιχεία. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία της ανάλυσης (διατομή, ελατήρια, υλικό αγωγού, μετακίνηση ρήγματος, βήματα φόρτισης) ισχύουν ως έχουν και στον ευθύγραμμο αγωγό.



ΣΧΗΜΑ 4.9: Γεωμετρία του αγωγού και του ρήγματος. (κάτοψη)

### 4.3.2. Τυπικά αποτελέσματα

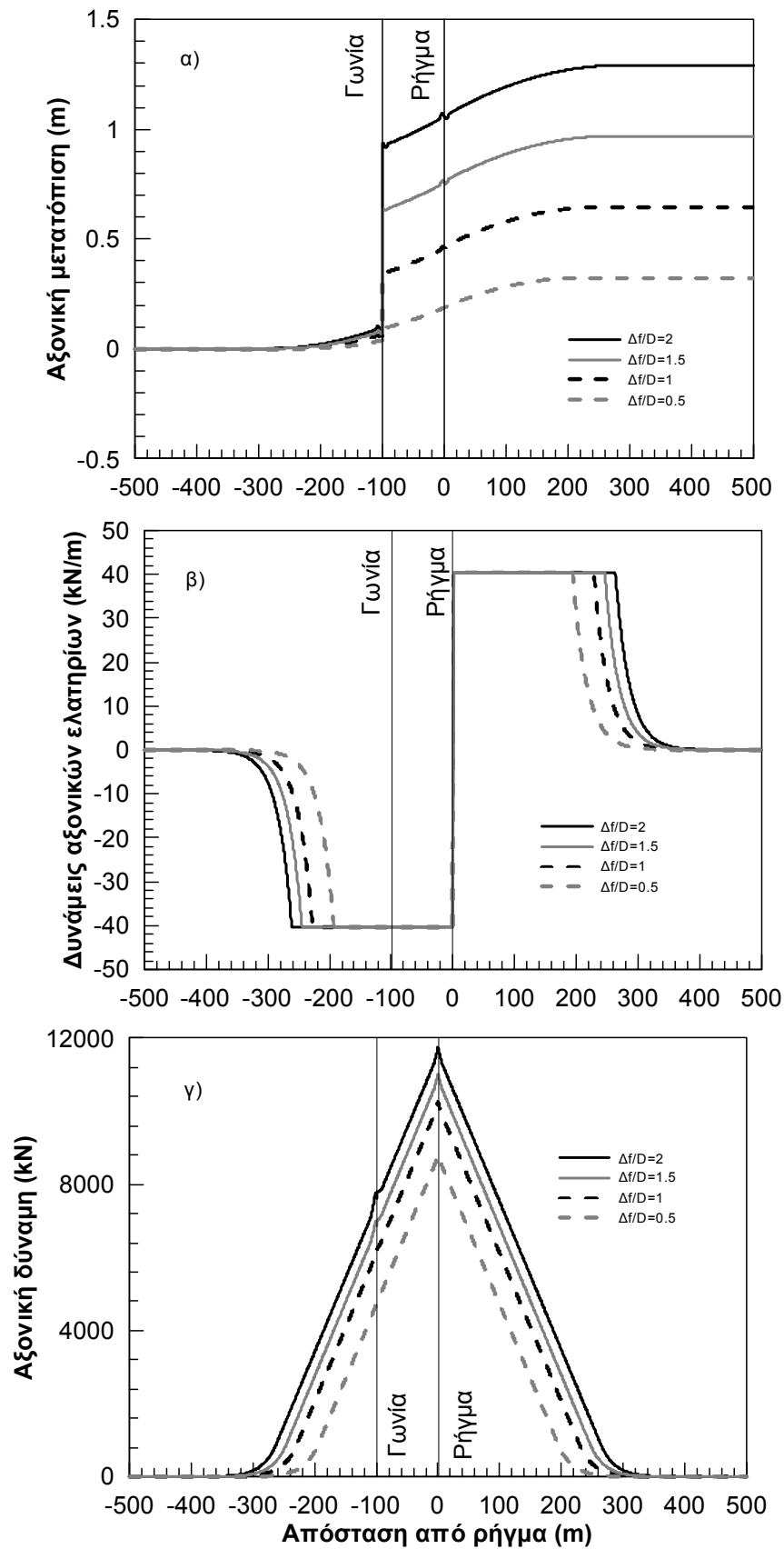
Στο Σχήμα 4.10.α. παρατηρείται η παραμορφωμένη εικόνα του αγωγού λόγω της μετακίνησης του ρήγματος όσο και 2 διάμετροι του αγωγού. Παρατηρείται ότι η γωνία βρίσκεται εκτός του καμπτόμενου τμήματος του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος και επομένως δεν επηρεάζεται από την εγκάρσια συνιστώσα της επιβαλλόμενης μετακίνησης. Παρόλα αυτά, βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη από το μήκος αγκύρωσης, και επομένως η εγκάρσια μετακίνηση του ρήγματος δεν επηρεάζει τη γωνία, αλλά η αξονική μετακίνηση επηρεάζει τη γωνία. Επίσης λόγω αυτής της μετακίνησης η γωνία δεν μετακινείται μόνο αξονικά ως προς το τμήμα των 1000m αλλά μετακινείται και εγκάρσια, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται 2 καμπτώμενα τμήματα εκατέρωθεν της γωνίας παρόμοιου μήκους με αυτά που αναπτύσσονται στην περιοχή του ρήγματος. Στο Σχήμα 4.10.β. παρατηρείται πως η σχετική μετακίνηση αγωγού και εδάφους εξασθενεί στην πλευρά του ευθύγραμμου τεμάχους σε απόσταση 300m σε αντίθεση με τον ευθύγραμμο αγωγό, όπου μηδενίζονται σε απόσταση 400m. Στην πλευρά της γωνίας η αξονική μετακίνηση μετατρέπεται σε εγκάρσια μετατόπιση στην περιοχή της γωνίας, η οποία εξασθενεί σε πολύ μικρό μήκος (όπως και στην περιοχή του ρήγματος). Στην περιοχή μετά τη γωνία, η εγκάρσια μετατόπιση μετατρέπεται σε αξονική μετατόπιση στο δεύτερο τμήμα και φθίνει στα επόμενα 200m.



**ΣΧΗΜΑ 4.10:** α) Παραμορφωμένη εικόνα του αγωγού (5 φορές μεγέθυνση των παραμορφώσεων) και β) διάγραμμα συνολικών μετακινήσεων κατά μήκος του αγωγού.

Στο Σχήμα 4.11. με ανάλογο τρόπο όπως και στον ευθύγραμμο αγωγό στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται οι κατανομές των μετακινήσεων, των αντιδράσεων και των δυνάμεων κατά την αξονική διεύθυνση. Παράλληλα, σημειώνονται οι θέσεις του ρήγματος και της γωνίας.

- Η αξονική μετακίνηση (Σχήμα 4.11.α) διαφέρει από την συνολική μετακίνηση (Σχήμα 4.10) μόνο στην περιοχή της γωνίας και του ρήγματος, όπου υπάρχουν καμπυλωμένα μήκη με έντονη εγκάρσια μετακίνηση. Εδώ φαίνεται καθαρά το άλμα στην αξονική μετακίνηση στην περιοχή της γωνίας. Στην περιοχή αυτή η εγκάρσια μετακίνηση του ενός τμήματος είναι ίση με την αξονική μετακίνηση του άλλου τμήματος. Το προφίλ των μετακινήσεων κοντά στο ρήγμα είναι παρόμοιο με τον ευθύγραμμο αγωγό μόνο που είναι λιγότερο εκτεταμένο σε μήκος και δείχνει να συγκλίνει-σταθεροποιείται σε μήκος από πιο μικρές επιβαλλόμενες μετακινήσεις ( $\Delta f/D=1$  έναντι  $\Delta f/D=1.5$ ).
- Ανάλογα συμπεράσματα με την περίπτωση ευθύγραμμου αγωγού προκύπτουν και για τα αξονικά ελατήρια (Σχήμα 4.11.β).
- Η αξονική δύναμη του αγωγού (Σχήμα 4.11.γ) μειώνεται με σταθερή κλίση όπως και στον ευθύγραμμο αγωγό μόνο που η μέγιστη αξονική δύναμη έχει μειωθεί από 17000kN σε 12000kN. Για μικρές επιβαλλόμενες μετακινήσεις, η γωνία δεν επηρεάζει τη μετακίνηση καθώς βρίσκεται στα όρια του μήκους αγκύρωσης. Οπότε, η μέγιστη αξονική δύναμη είναι και στις δύο περιπτώσεις ίση με 8000kN. Όμως, για μεγαλύτερες μετακινήσεις, η αξονική μετακίνηση μετατρέπεται σε εγκάρσια μετακίνηση η οποία ενεργοποιεί λιγότερα ελατήρια, το άθροισμα των δυνάμεων των ελατηρίων αυτών ισούται με την αξονική δύναμη στο ρήγμα που επειδή είναι λιγότερα μειώνεται και η αξονική δύναμη σε σύγκριση με τον ευθύγραμμο αγωγό (μπορούμε δηλαδή να πούμε πως τα αξονικά ελατήρια πέραν της γωνίας αντικαθίστανται από τα εγκάρσια ελατήρια, τα οποία αν και προσφέρουν πιο μεγάλη αντίσταση ενεργοποιούνται σε πολύ μικρότερο μήκος ώστε να προσφέρουν πολύ λιγότερη δύναμη συνολικά).



**ΣΧΗΜΑ 4.11:** Κατανομή των αξονικών μετακινήσεων, δυνάμεων ελατηρίων και δύναμης του αγωγού με την απόσταση από το ρήγμα.

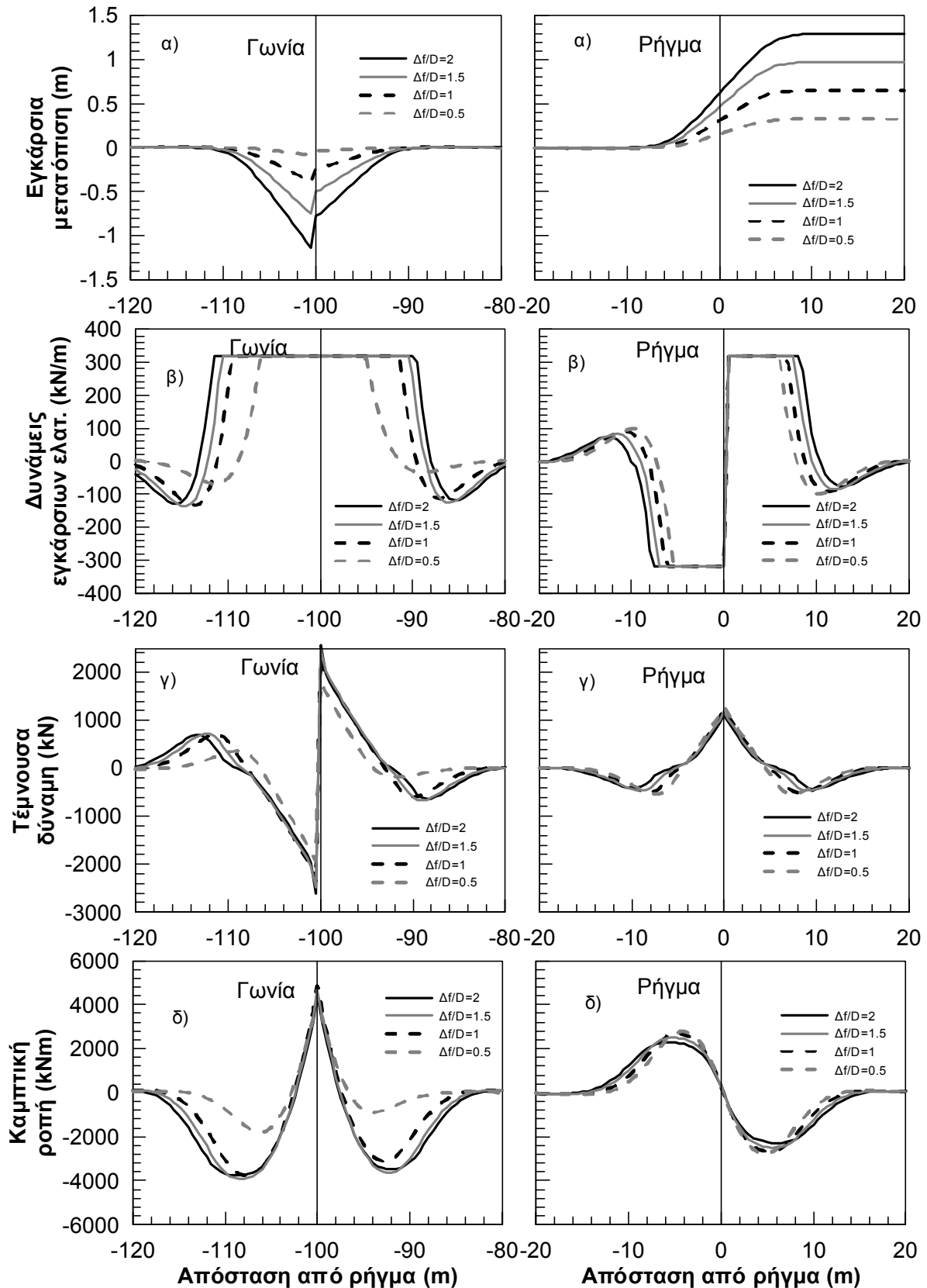
Στο Σχήμα 4.12. εξετάζεται ο αγωγός κατά την εγκάρσια διεύθυνση, δηλαδή οι εγκάρσιες μετακινήσεις του, οι αντιδράσεις των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων, η τέμνουσα δύναμη και η καμπτική ροπή του αγωγού. Όπως προαναφέρθηκε τα παραπάνω μεταβάλλονται σε μικρό μήκος του αγωγού, οπότε αριστερά παρουσιάζεται η περιοχή της γωνίας του αγωγού σε μήκος 40m και δεξιά μία μεγέθυνση της κρίσιμης θέσης του ρήγματος μήκους 40m.

Για την περιοχή του ρήγματος:

- Στο Σχήμα 4.12.α. παρατηρείται ότι το καμπτόμενο μήκος του αγωγού είναι περίπου ίσο με 10m εκατέρωθεν του ρήγματος, χωρίς αυτό να μεταβάλλεται σημαντικά για τις διάφορες στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων, σε αντιστοιχία με την περίπτωση του ευθύγραμμου αγωγού. Βέβαια εδώ μεταβάλλεται πολύ λιγότερο σε σχέση με πριν. Αυτό φαίνεται καλύτερα στα διαγράμματα αντιδράσεων, τεμνουσών και καμπτικών ροπών.
- Στο Σχήμα 4.12.β. ,όπως και στην αξονική διεύθυνση, τα ελατήρια έχουν διαρρεύσει στο μεγαλύτερο καμπτόμενο μήκος λόγω της μικρής μετακίνησης διαρροής σε σχέση με την επιβαλλόμενη μετακίνηση.
- Λόγω της μειωμένης εφελκυστικής δύναμης, η αλληλεπίδραση καμπτικής στιβαρότητας και εφελκυσμού δεν είναι τόσο έντονη όπως και στον ευθύγραμμο αγωγό, οπότε οι καμπτικές ροπές και τέμνουσες δεν απομειώνονται ιδιαίτερα με την εξέλιξη της μετακίνησης του ρήγματος.

Για την περιοχή της γωνίας:

- Στο Σχήμα 4.12.α. παρατηρείται ότι το μήκος επιρροής του αγωγού κατά την εγκάρσια έννοια είναι τα 10m εγκάρσια της γωνίας χωρίς αυτό να μεταβάλλεται σημαντικά για τις διάφορες στάθμες μετακινήσεων, σε αντιστοιχία με την περιοχή του ρήγματος. Επίσης παρατηρείται η ασυνέχεια στις εγκάρσιες μετακινήσεις στην περιοχή της γωνίας ιδιαίτερα για μεγάλες μετακινήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι πριν και μετά τη γωνία η εγκάρσια μετακίνηση μετατρέπεται σε αξονική και το αντίστροφο.
- Στο Σχήμα 4.12.β. παρατηρείται ότι όπως και στην αξονική διεύθυνση τα ελατήρια έχουν διαρρεύσει στο μεγαλύτερο καμπτόμενο μήκος λόγω της μικρής μετακίνησης διαρροής σε σχέση με την επιβαλλόμενη μετακίνηση.
- Εκ των πραγμάτων, η εφελκυστική δύναμη που δέχεται η γωνία είναι ιδιαίτερα απομειωμένη σε σχέση με το ρήγμα, οπότε η αλληλεπίδραση καμπτικής στιβαρότητας και εφελκυσμού δεν είναι τόσο έντονη όσο στον ευθύγραμμο αγωγό. Επομένως, οι καμπτικές ροπές και τέμνουσες δεν απομειώνονται ιδιαίτερα με την εξέλιξη της μετακίνησης του ρήγματος. Στην αρχή είναι βέβαια μικρές, αλλά αυτό συμβαίνει διότι η μικρή μετακίνηση δεν επηρεάζει την περιοχή της γωνίας σημαντικά.



**ΣΧΗΜΑ 4.12:** Κατανομή των εγκάρσιων μετακινήσεων, δυνάμεων ελατηρίων, τεμνουσών και καμπτικών ροπών του αγωγού με την απόσταση από το ρήγμα.



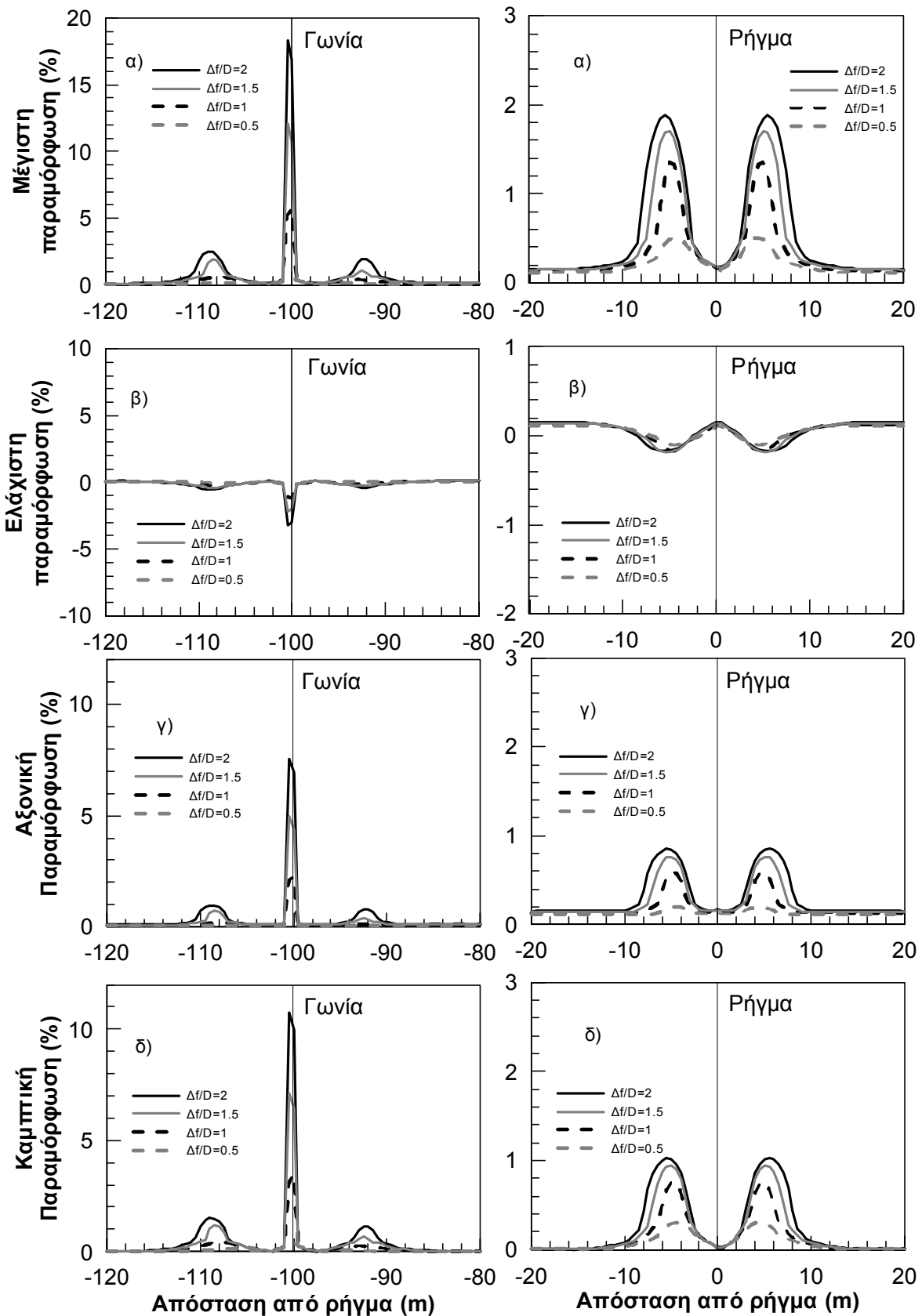
Στο Σχήμα 4.13. παρουσιάζονται οι κατανομές των διαμήκων παραμορφώσεων του αγωγού και συγκεκριμένα των μέγιστων, των ελάχιστων σε κάθε διατομή όπως και της ισοδύναμης αξονικής και καμπτικής παραμόρφωσης.

Για την περιοχή του ρήγματος:

- Από τις κατανομές των μέγιστων και των ελάχιστων παραμορφώσεων (Σχήμα 4.13.α και β.) επιβεβαιώνονται τα συμπεράσματα που προήλθαν από την τέμνουσα και τη ροπή. Ο αγωγός έχει ένα καμπτόμενο τμήμα που εφελκύεται σχετικά λίγο χωρίς να αλληλεπιδρά σημαντικά με την κάμψη, άρα έχει ακραίες παραμορφώσεις ετερόσημες με μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή τη θετική-μέγιστη παραμόρφωση λόγω του εφελκυσμού. Αυτό το μοτίβο παραμένει με την αύξηση της μετακίνησης του ρήγματος σε αντίθεση με τον ευθύγραμμο αγωγό όπου αναπτύσσεται περισσότερος εφελκυσμός.
- Οι αξονικές παραμορφώσεις (Σχήμα 4.13.γ) αυξάνονται τοπικά στις θέσεις των μέγιστων ροπών έτσι ώστε το ολοκλήρωμα των τάσεων στη διατομή να αντιστοιχεί στο αναπτυχθέν ζεύγος ροπής και αξονικής δύναμης. Δεδομένου ότι η αξονική δύναμη είναι μικρή οι αξονικές παραμορφώσεις (εάν εξαιρέσουμε την τοπική έξαρση λόγω της κάμψης) παραμένουν ελαστικές και δεν παρουσιάζουν απότομη αύξηση λόγω κράτυνσης, όπως στον ευθύγραμμο αγωγό.
- Οι καμπτικές παραμορφώσεις (Σχήμα 4.13.δ) αυξάνονται στα σημεία των μεγίστων ροπών όπως είναι αναμενόμενο. Παρόλο που η γεωμετρία και η φόρτιση δεν είναι συμμετρικές, τόσο στην περιοχή του ρήγματος, όσο και στη γωνία, υπάρχει τοπική συμμετρία, η οποία είναι εμφανής στις κατανομές των παραμορφώσεων (Σχήμα 4.13) και των εντατικών μεγεθών (Σχήμα 4.12). Όσο αυξάνεται η μετακίνηση του ρήγματος αυξάνεται και η καμπτική παραμόρφωση μέχρι που τείνει να σταθεροποιηθεί για τις μεγάλες μετακινήσεις.

Για την περιοχή της γωνίας:

- Από τις μέγιστες και τις ελάχιστες παραμορφώσεις (Σχήμα 4.13.α και β) επιβεβαιώνονται τα συμπεράσματα που προήλθαν από την τέμνουσα και τη ροπή. Ο αγωγός έχει δύο καμπτόμενα τμήματα εκατέρωθεν της γωνίας που εφελκύνονται σχετικά λίγο χωρίς να αλληλεπιδρούν σημαντικά με την κάμψη, άρα έχουν ακραίες παραμορφώσεις ετερόσημες με μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή τη θετική-μέγιστη παραμόρφωση λόγω του εφελκυσμού. Αυτό το μοτίβο παραμένει με την αύξηση της μετακίνησης του ρήγματος σε αντίθεση με τον ευθύγραμμο αγωγό όπου αναπτύσσει περισσότερο εφελκυσμό, όπου αντίστοιχα πλέον μειώνονται ασήμαντα οι ροπές και οι τέμνουσες. Εκτός των δύο καμπτόμενων τμημάτων στα οποία οι ακραίες παραμορφώσεις παρουσιάζουν έξαρση στις θέσεις των μεγίστων ροπών, υπάρχει και μία ετερόσημη ροπή ακριβώς στη θέση της γωνίας η οποία αντίστοιχα παρουσιάζει έξαρση στις παραμορφώσεις της.
- Οι αξονικές παραμορφώσεις (Σχήμα 4.13.γ) αυξάνονται τοπικά στις θέσεις των μέγιστων ροπών όπως έχει σχολιαστεί και στις υπόλοιπες περιπτώσεις.
- Οι καμπτικές παραμορφώσεις (Σχήμα 4.13.δ) αυξάνονται στα σημεία των μεγίστων ροπών όπως είναι αναμενόμενο.



**ΣΧΗΜΑ 4.13:** Κατανομές των μέγιστων, ελάχιστων, αξονικών και καμπτικών παραμορφώσεων του αγωγού με την απόσταση από το ρήγμα.

Οι ακραίες παραμορφώσεις που φθάνουν μέχρι και 18% θεωρούνται σίγουρα μη παραδεκτές. Συγκεκριμένα, τα όρια επιτρεπόμενων παραμορφώσεων ξεπερνώνται αρκετά γρήγορα, ακόμα και για μετακινήσεις της τάξης  $\Delta f/D=0.5$ . Αυτό καθιστά το σχεδιασμό δυσχερή, ιδιαίτερα συντηρητικό και αντιοικονομικό. Όμως η γωνία χωρίς τόξο συναρμογής είναι μία ασυνέχεια στον αγωγό η οποία δεν είναι πραγματική αλλά μία απλοποίηση της πραγματικότητας. Πρακτικά υπάρχουν τόξα συναρμογής της τάξης ακτίνων των 10 με 40 διαμέτρων του αγωγού. Δίνεται λοιπόν το έναυσμα να διερευνηθεί η επιρροή του τόξου συναρμογής στη συμπεριφορά του αγωγού. Διότι εάν ο σχεδιασμός χωρίς τόξο συναρμογής αποδειχθεί υπερβολικά αντιοικονομικός τότε επιβάλλεται ο σχεδιασμός λαμβάνοντας υπόψη ένα προσομοίωμα του αγωγού με τόξο συναρμογής, δηλαδή πιο κοντά στην πραγματικότητα.

### 4.3.3. Αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων

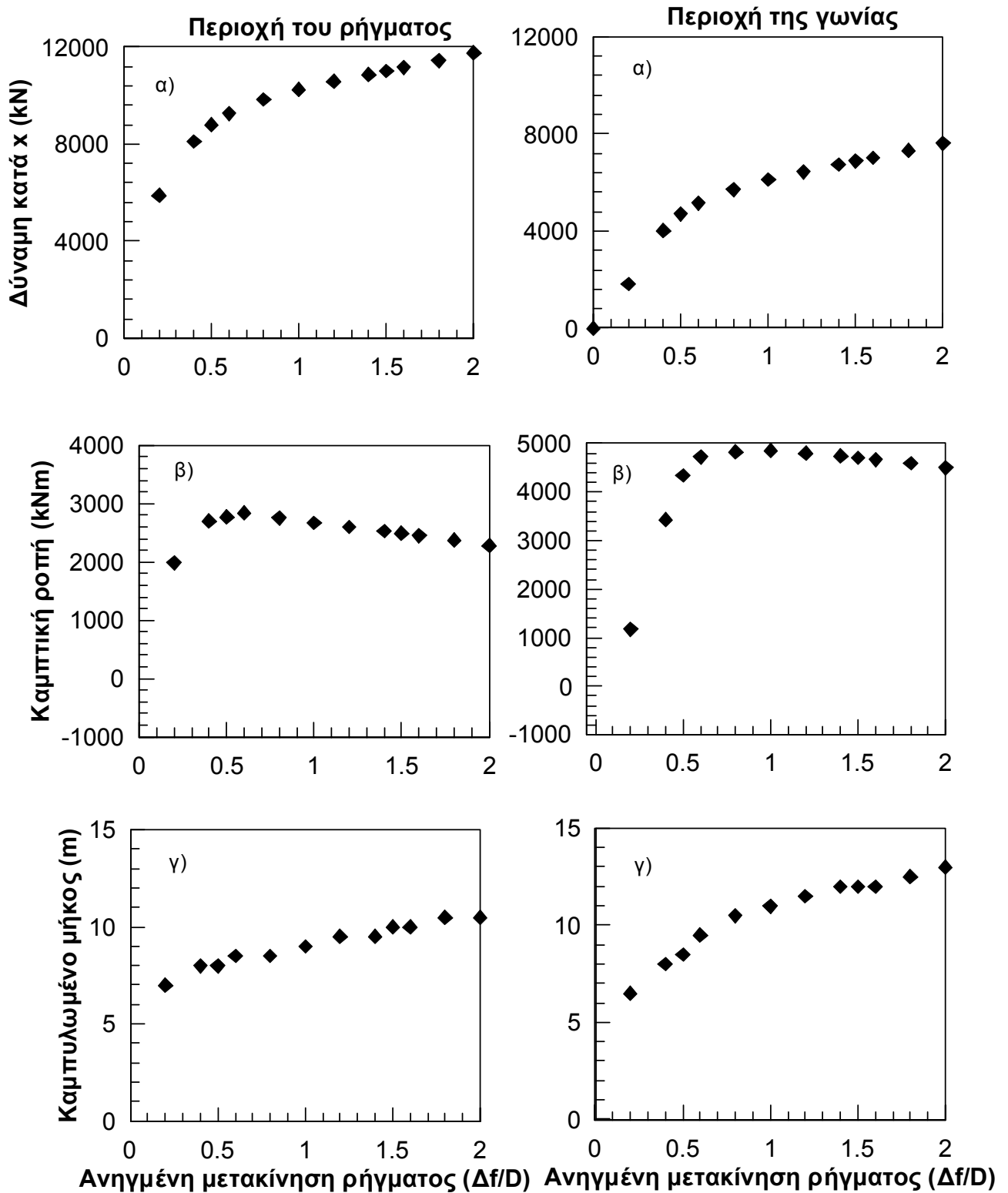
Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζονται συναρτήσεις της ανηγμένης επιβαλλόμενης μετακίνησης οι μεταβολές των ακολούθων χαρακτηριστικών μεγεθών.

Για την περιοχή του ρήγματος:

- Η αξονική δύναμη του αγωγού στο σημείο του ρήγματος (Σχήμα 4.14.α) όπως ειπώθηκε αρχικά αυξάνεται πολύ. Όταν οι επιπλέον επιβαλλόμενες μετακινήσεις αναλαμβάνονται ως εγκάρσια μετακίνηση του αγωγού στην περιοχή της γωνίας, τότε ο ρυθμός αύξησης μειώνεται.
- Η μέγιστη καμπτική ροπή στην περιοχή του ρήγματος (Σχήμα 4.14.β) αυξάνεται αρχικά και μετά μειώνεται λόγω της αλληλεπίδρασης της με την εφελκυστική δύναμη. Το φαινόμενο αυτό είναι λιγότερο έντονο σε σχέση με τον ευθύγραμμο αγωγό διότι δεν αυξάνεται πολύ η εφελκυστική δύναμη.
- Τέλος, το καμπυλωμένο μήκος στην περιοχή του ρήγματος (Σχήμα 4.14.γ) έχει εύρος τιμών μεταξύ των 6 και 10m.

Για την περιοχή της γωνίας:

- Η αξονική δύναμη του αγωγού στη γωνία (Σχήμα 4.14.α) ισούται με τη δύναμη στο σημείο του ρήγματος μείον την αντίσταση των αξονικών ελατηρίων σε 100m που χωρίζουν τα δύο σημεία, οπότε έχει παρόμοια εξέλιξη με τη δύναμη του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος.
- Η μέγιστη καμπτική ροπή στην περιοχή της γωνίας (Σχήμα 4.14.β) αυξάνεται αρχικά και μετά μειώνεται λόγω της αλληλεπίδρασης της με την εφελκυστική δύναμη αλλά πολύ λιγότερο σε σχέση με τον ευθύγραμμο αγωγό διότι η εφελκυστική δύναμη στη γωνία είναι σαφώς μικρή.
- Αντίστοιχα το καμπυλωμένο μήκος (Σχήμα 4.14.γ) έχει εύρος τιμών μεταξύ των 6 και 13m εκατέρωθεν της γωνίας. Τα δύο καμπυλωμένα μήκη εκατέρωθεν της γωνίας έχουν αρκετά κοντινές τιμές. Συνεπώς, για λόγους απλότητας, παρουσιάζεται μόνο το ένα από τα δύο μήκη.



**ΣΧΗΜΑ 4.14:** Αξονική δύναμη στο σημείο του ρήγματος, μέγιστη ροπή στην περιοχή του ρήγματος και έντονα καμπυλωμένο μήκος συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετακίνησης, στην περιοχή του ρήγματος.

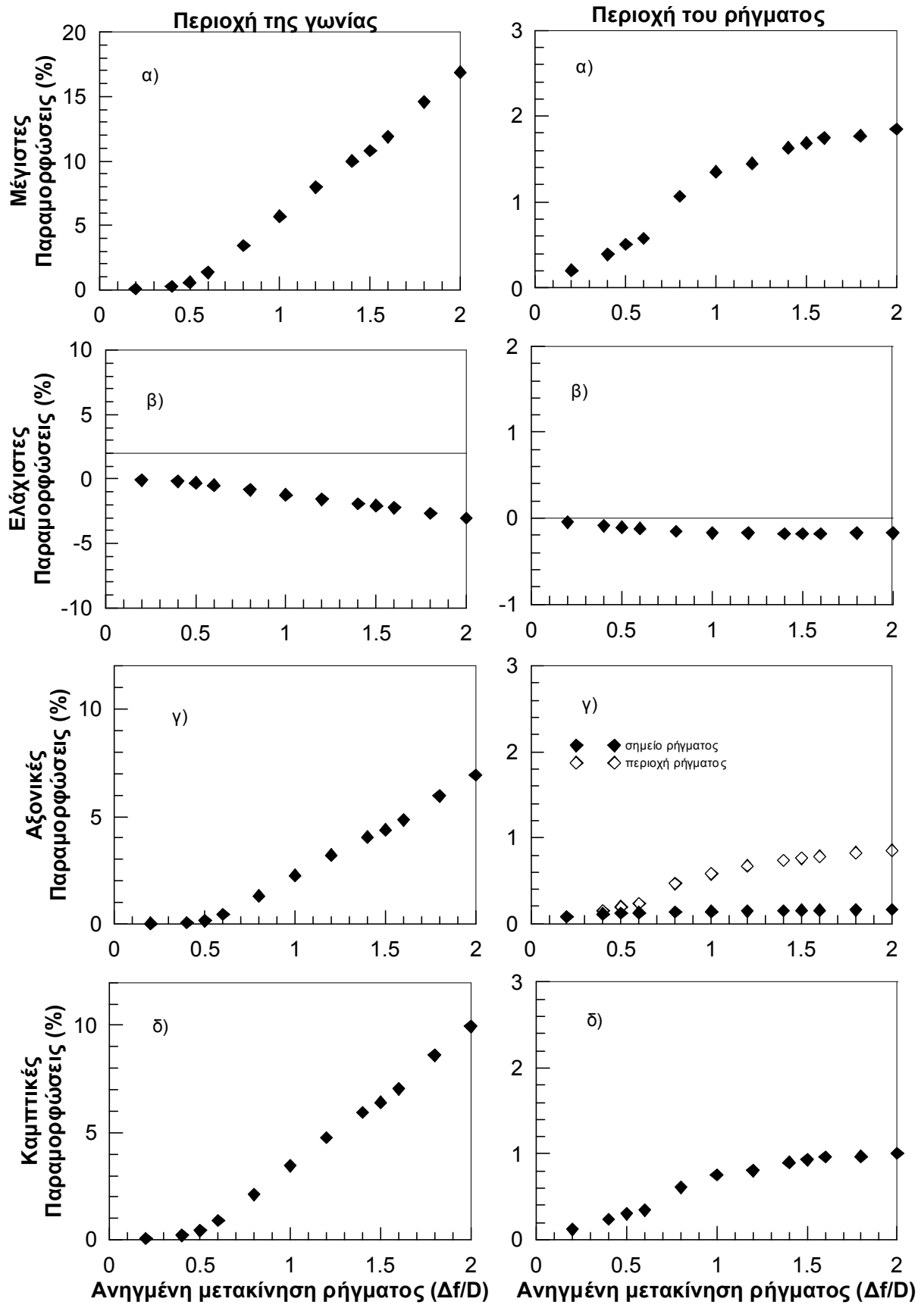
Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζονται η εξέλιξη των παραμορφώσεων στα σημεία των μέγιστων ροπών συναρτήσει της ανηγμένης επιβαλλόμενης μετακίνησης του ρήγματος.

Για την περιοχή του ρήγματος:

- Για τις μέγιστες παραμορφώσεις (Σχήμα 4.15.α) ισχύουν τα ίδια με τον ευθύγραμμο αγωγό (Σχήμα 4.8.α). Ως προς τις ελάχιστες παραμορφώσεις (Σχήμα 4.15.β) παραμένουν συνέχεια θλιπτικές σε αντίθεση με τον ευθύγραμμο επειδή ο εφελκυσμός δεν είναι προέχων.
- Οι αξονικές παραμορφώσεις (Σχήμα 4.15.γ) αυξάνονται αντίστοιχα λόγω της ροπής, ενώ στο σημείο του ρήγματος παραμένουν ελαστικές αφού δεν αυξάνεται ιδιαίτερα ο εφελκυσμός.
- Οι καμπτικές παραμορφώσεις (Σχήμα 4.15.δ) αυξάνονται ανάλογα με τη ροπή και τέλος σταθεροποιούνται, όπως και στον ευθύγραμμο αγωγό.

Για την περιοχή της γωνίας:

Ισχύει ο αντίστοιχος σχολιασμός για τις μέγιστες, ελάχιστες, αξονικές και καμπτικές παραμορφώσεις στο σημείο όπου μεγιστοποιείται η καμπτική ροπή. Εδώ φαίνεται ακόμη πιο έντονα η υπερβολική αύξηση των παραμορφώσεων στο σημείο της γωνίας, σε σημείο που να θέτει σε αμφιβολία το εάν η παραδοχή της μηδενικής ακτίνας καμπυλότητας είναι ικανοποιητική και όχι υπερβολικά συντηρητική για την ανάλυση και το σχεδιασμό αγωγών. Προκύπτει και από αυτά τα διαγράμματα ότι η γωνία επηρεάζεται μετά από ένα επίπεδο μετακινήσεων του ρήγματος της τάξης των 0.5 διαμέτρων του αγωγού, αυτό οφείλεται στο ότι το μήκος αγκύρωσης του αγωγού τότε φθάνει μέχρι την περιοχή της γωνίας και την επηρεάζει.



**ΣΧΗΜΑ 4.15:** Μέγιστες, ελάχιστες, αξονικές και καμπτικές παραμορφώσεις συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta f$  ανηγμένης προς τη διάμετρο  $D$  του αγωγού, στην περιοχή του ρήγματος.

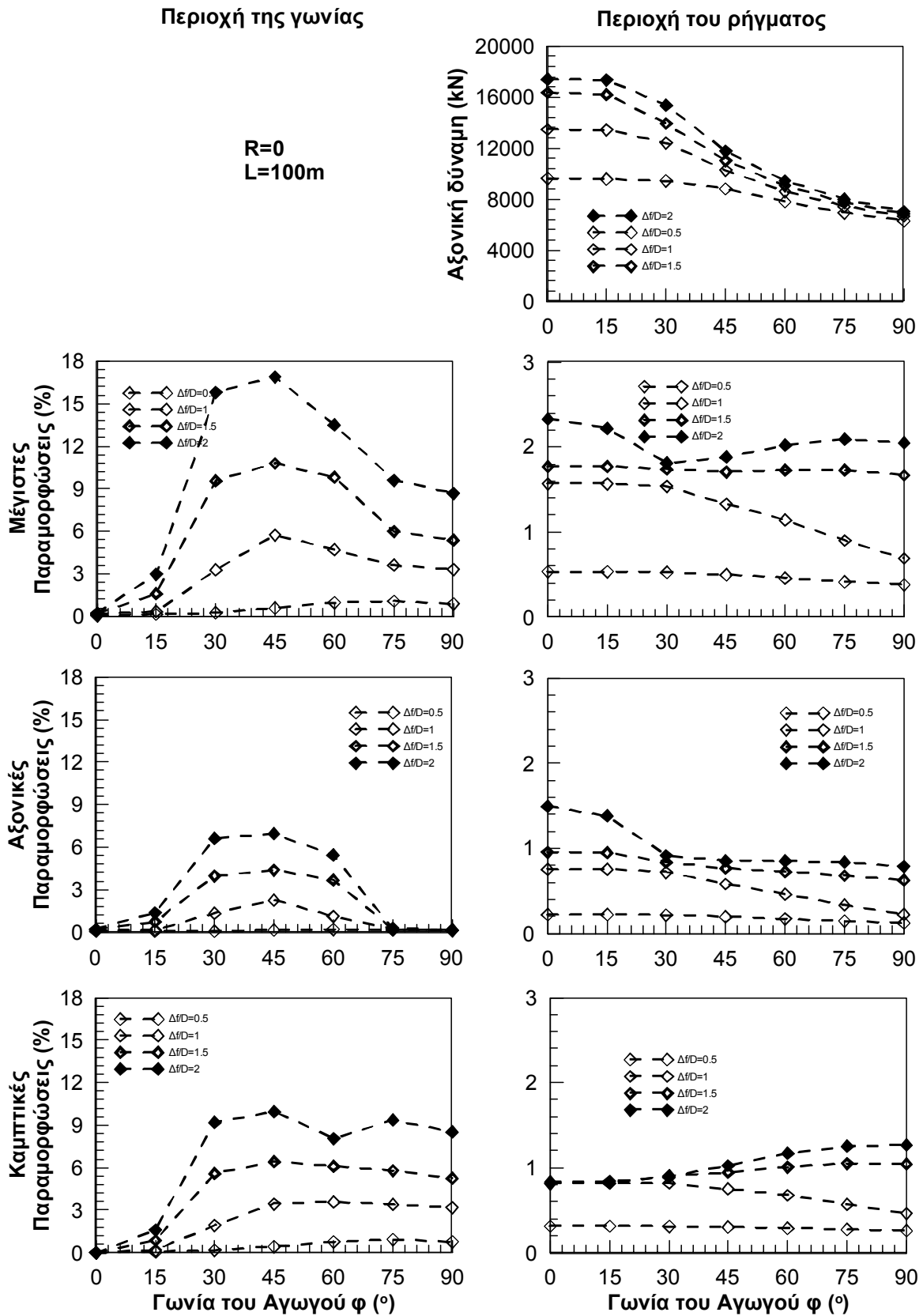
Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζονται με συνοπτικό τρόπο τα αποτελέσματα της παραμετρικής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε για την επίδραση της γωνίας που σχηματίζουν τα δύο τμήματα του αγωγού. Η παραπάνω ανάλυση (Σχήμα 4.9) ήταν για  $\phi=45^\circ$ , η πρώτη ανάλυση του ευθύγραμμου αγωγού ήταν για  $\phi=0^\circ$ . Οι υπόλοιπες αναλύσεις δεν παρουσιάζονται εδώ με την ίδια λεπτομέρεια για οικονομία χώρου και επειδή στην ουσία τους δεν παρουσιάζαν κάτι διαφορετικό.

Σε ότι αφορά στην περιοχή του ρήγματος, παρουσιάζεται η μεταβολή της αξονικής δύναμης του αγωγού και οι παραμορφώσεις (μέγιστες, αξονικές και καμπτικές) στη θέση της μέγιστης ροπής. Για την περιοχή της γωνίας, παρουσιάζονται οι αντίστοιχες παραμορφώσεις στη θέση της μέγιστης ροπής.

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.16, η αξονική δύναμη μειώνεται με την αύξηση της γωνίας  $\phi$ . Όπως δείχθηκε παραπάνω, η αξονική για  $\phi=45^\circ$  είναι μικρότερη σε σχέση με αυτήν για τον ευθύγραμμο αγωγό, γιατί το τμήμα του αγωγού μετά τη γωνία αναλαμβάνει τη μετακίνηση εν μέρει με κάμψη (άρα με εγκάρσια ελατήρια) και εν μέρει με τριβή (άρα με αξονικά ελατήρια). Αντίστοιχα για  $\phi=90^\circ$  όπου αναλαμβάνεται η μετακίνηση μόνο με τα εγκάρσια ελατήρια, η αξονική δύναμη προκύπτει ακόμη μικρότερη.

Στην περιοχή του ρήγματος οι παραμορφώσεις για κοντινές γωνίες έχουν παρόμοιες τιμές, φαίνεται ομαλά η μετάβαση από τον ευθύγραμμο αγωγό στην ορθή γωνία. Ειδικότερα για  $\phi=0$  έως  $30^\circ$  τα αποτελέσματα σχεδόν ταυτίζονται, άρα μπορεί να ειπωθεί πως εάν ένας αγωγός παρουσιάζει στροφή μέχρι και  $30^\circ$  στην περιοχή του ρήγματος αρκεί να πραγματοποιηθεί ανάλυση για ευθύγραμμο αγωγό. Για  $\phi=45$  μέχρι  $90^\circ$  πάλι υπάρχει μια σύγκλιση των αποτελεσμάτων με μικρές διαφορές κυρίως στις μεσαίες μετακινήσεις. Οι αξονικές παραμορφώσεις μόνο για  $\phi=0$  και  $15^\circ$  παρουσιάζουν άλμα από τις μεσαίες στις πολύ υψηλές επιβαλλόμενες ανηγμένες μετακινήσεις, όπως σχολιάστηκε και στο Σχήμα 4.14.α. Επίσης, λόγω της μειωμένης αξονικής δύναμης για μεγάλα  $\phi$  άνω των  $30^\circ$  παρατηρείται ότι σε μεγάλη επιβαλλόμενη ανηγμένη μετακίνηση ότι αυξάνονται οι καμπτικές παραμορφώσεις. Για τους παραπάνω λόγους για μέσες γωνίες  $30$  με  $45^\circ$  για τη μέγιστη επιβαλλόμενη ανηγμένη μετακίνηση  $\Delta f/D=2$  παρουσιάζεται ελάχιστο στη μέγιστη μετακίνηση, για μεγαλύτερα  $\phi$  αυξάνεται η καμπτική παραμόρφωση, ενώ για μικρότερα  $\phi$  αυξάνεται η αξονική παραμόρφωση.

Στην περιοχή της γωνίας παρατηρούμε ότι η δυσμενέστερη περίπτωση (για όλων των ειδών τις παραμορφώσεις) είναι για  $\phi=45^\circ$ , δηλαδή όχι για ορθή γωνία. Αυτό συμβαίνει λόγω του δυσμενέστερου συνδυασμού κάμψης και αξονικού εφελκυσμού και στα δύο τμήματα του αγωγού εκατέρωθεν της γωνίας. Για  $\phi=90^\circ$ , στο τμήμα του αγωγού προς την πλευρά του ρήγματος επιβάλλεται κυρίως αξονικός εφελκυσμός, ενώ στην άλλη πλευρά της γωνίας επιβάλλεται κυρίως κάμψη, γεγονός που αποδεικνύεται ευμενέστερο.



ΣΧΗΜΑ 4.16: Αξονική δύναμη και παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος και της γωνίας συναρτήσει της γωνίας του αγωγού.



#### 4.3.4. Παρατηρήσεις και συμπεράσματα

Διερευνήθηκε η επίδραση της γωνίας στη συμπεριφορά του αγωγού. Η παρουσία της γωνίας μειώνει την αξονική δύναμη του αγωγού διότι η αξονική μετακίνηση δεν αναλαμβάνεται μόνο ως ολίσθηση του αγωγού ως προς το περιβάλλον έδαφος, αλλά και ως εγκάρσια μετατόπιση στην περιοχή της γωνίας. Λόγω της μειωμένης αξονικής δύναμης, μειώνεται το μήκος αγκύρωσης. Επιπλέον δεν απομειώνεται ιδιαίτερα η καμπτική ροπή κοντά στο ρήγμα λόγω αλληλεπίδρασης της εφελκυστικής δύναμης με τη ροπή (όπως γίνεται στους ευθύγραμμους αγωγούς).

Στη γωνία επιβάλλεται η αξονική μόνο μετακίνηση από την μετακίνηση του ρήγματος, γιατί η εγκάρσια αποσβένυται σε λίγα μέτρα από το ρήγμα. Όμως, ειδικά για  $\phi=45^\circ$ , η γωνία μετακινείται και εγκάρσια και αξονικά, οπότε δημιουργούνται δύο καμπτώμενα τμήματα εκατέρωθεν της γωνίας. Στην περιοχή της γωνίας αναπτύσσονται ροπές με τρία τοπικά μέγιστα, τα δύο εκατέρωθεν της γωνίας στα καμπτώμενα τμήματα, και ένα πάνω ακριβώς στη γωνία. Οι ροπές στα καμπτώμενα τμήματα συνοδεύονται από αρκετά μεγάλες παραμορφώσεις, συγκρίσιμες με αυτές στην περιοχή του ρήγματος. Επιπροσθέτως, στο σημείο της γωνίας, οι παραμορφώσεις είναι πολλαπλάσιες από τις υπόλοιπες.

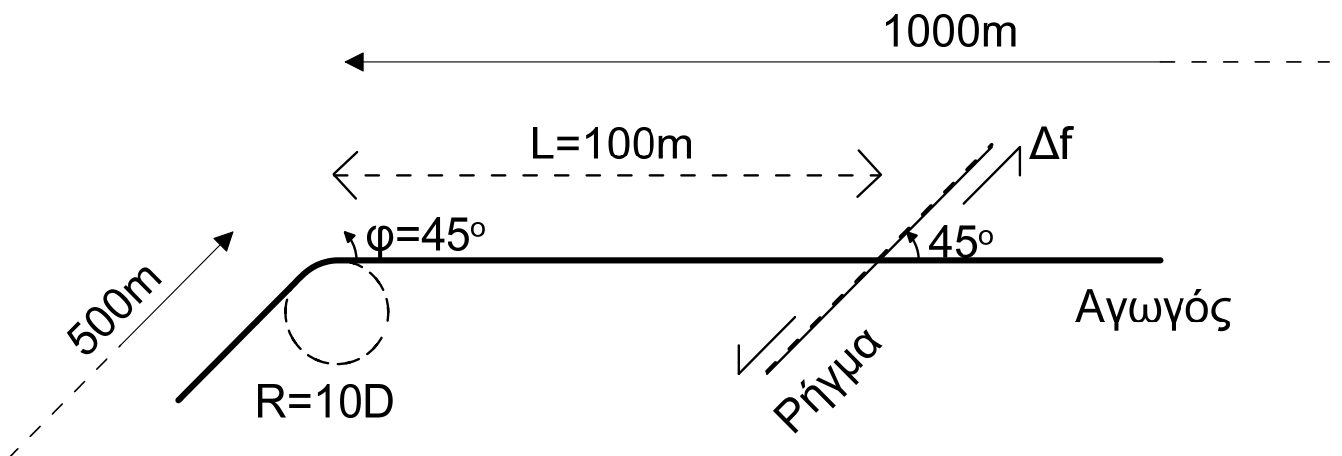
Συνεπώς, δημιουργείται το κίνητρο να διερευνηθεί το πόσο σημαντικό είναι να συμπεριλαμβάνεται το τόξο καμπυλότητας στην ανάλυση, ώστε να μην είναι αντισυμβαλτικός ο σχεδιασμός στη γωνία.

Τέλος, διερευνήθηκε η επίδραση της γωνίας που σχηματίζει ο αγωγός και βρέθηκε πως η δυσμενέστερη περίπτωση είναι για  $\phi=45^\circ$  και όχι για  $\phi=90^\circ$ , καθώς για  $\phi=45^\circ$  επιβάλλεται κάμψη και εφελκυσμός εκατέρωθεν της γωνίας.

## 4.4. Αριθμητικές αναλύσεις για αγωγό με γωνία με τόξο καμπυλότητας

### 4.4.1. Δεδομένα αριθμητικών αναλύσεων

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται αγωγός με γωνία και με τόξο συναρμογής ακτίνας όσο και 10 διαμέτροι του αγωγού. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων, στις οποίες η χάραξη του αγωγού σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  σε απόσταση 100m από το σημείο τομής με το ίχνος του ρήγματος. Η γεωμετρία του εν λόγω προσομοιώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.17. Για το προσομοίωμα θεωρήθηκαν 2 ευθύγραμμα τμήματα, μήκους 1000m και 500m αντίστοιχα και το μεταξύ τους καμπύλο τμήμα περίπου 10m. Χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία δοκού μήκους 0.5m όπως και στον ευθύγραμμο αγωγό, άρα συνολικά 3000 στοιχεία. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία της ανάλυσης (διατομή, ελατήρια, υλικό αγωγού, μετακίνηση ρήγματος, βήματα φόρτισης) ισχύουν ως έχουν στον ευθύγραμμο αγωγό (Κεφάλαιο 4.2) και στον αγωγό με γωνία (Κεφάλαιο 4.3).

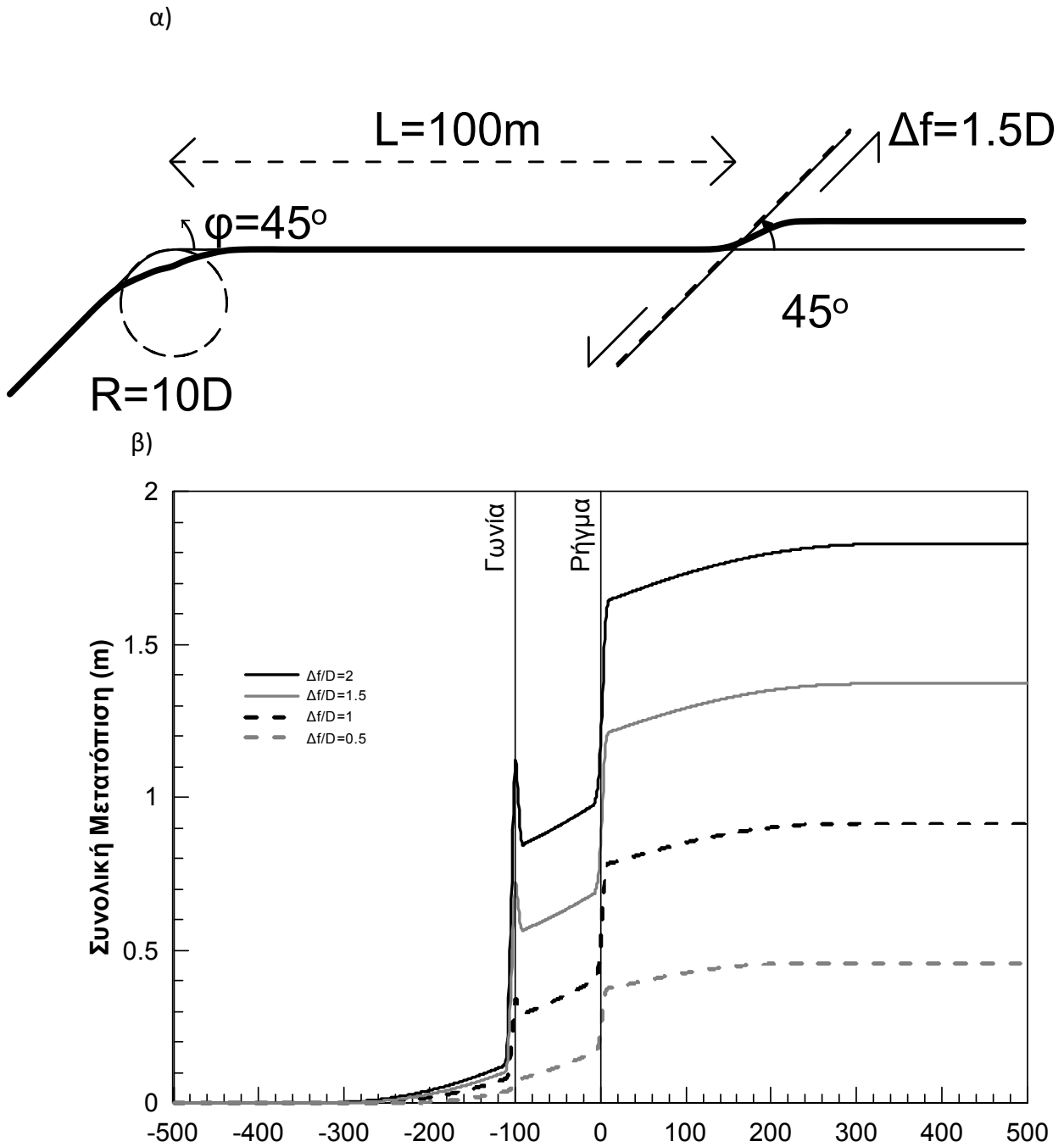


ΣΧΗΜΑ 4.17: Γεωμετρία του προσομοιώματος και του ρήγματος.

#### 4.4.2. Τυπικά αποτελέσματα

Στο Σχήμα 4.18.α. παρατηρείται η παραμορφωμένη εικόνα του αγωγού λόγω της μετακίνησης του ρήγματος όσο και 2 διάμετροι του αγωγού. Παρατηρείται ότι η γωνία βρίσκεται εκτός του καμπτόμενου τμήματος του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος και επομένως δεν επηρεάζεται από την εγκάρσια συνιστώσα της επιβαλλόμενης μετακίνησης. Παρόλα αυτά, βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη από το μήκος αγκύρωσης, και επομένως η εγκάρσια μετακίνηση του ρήγματος δεν επηρεάζει τη γωνία, αλλά η αξονική μετακίνηση επηρεάζει τη γωνία. Επίσης λόγω αυτής της μετακίνησης η γωνία δεν μετακινείται μόνο αξονικά ως προς το τμήμα των 1000m αλλά μετακινείται και εγκάρσια με αποτέλεσμα να δημιουργούνται 2 καμπτώμενα τμήματα εκατέρωθεν του τόξου της γωνίας παρόμοιου μήκους με την περιοχή του ρήγματος.

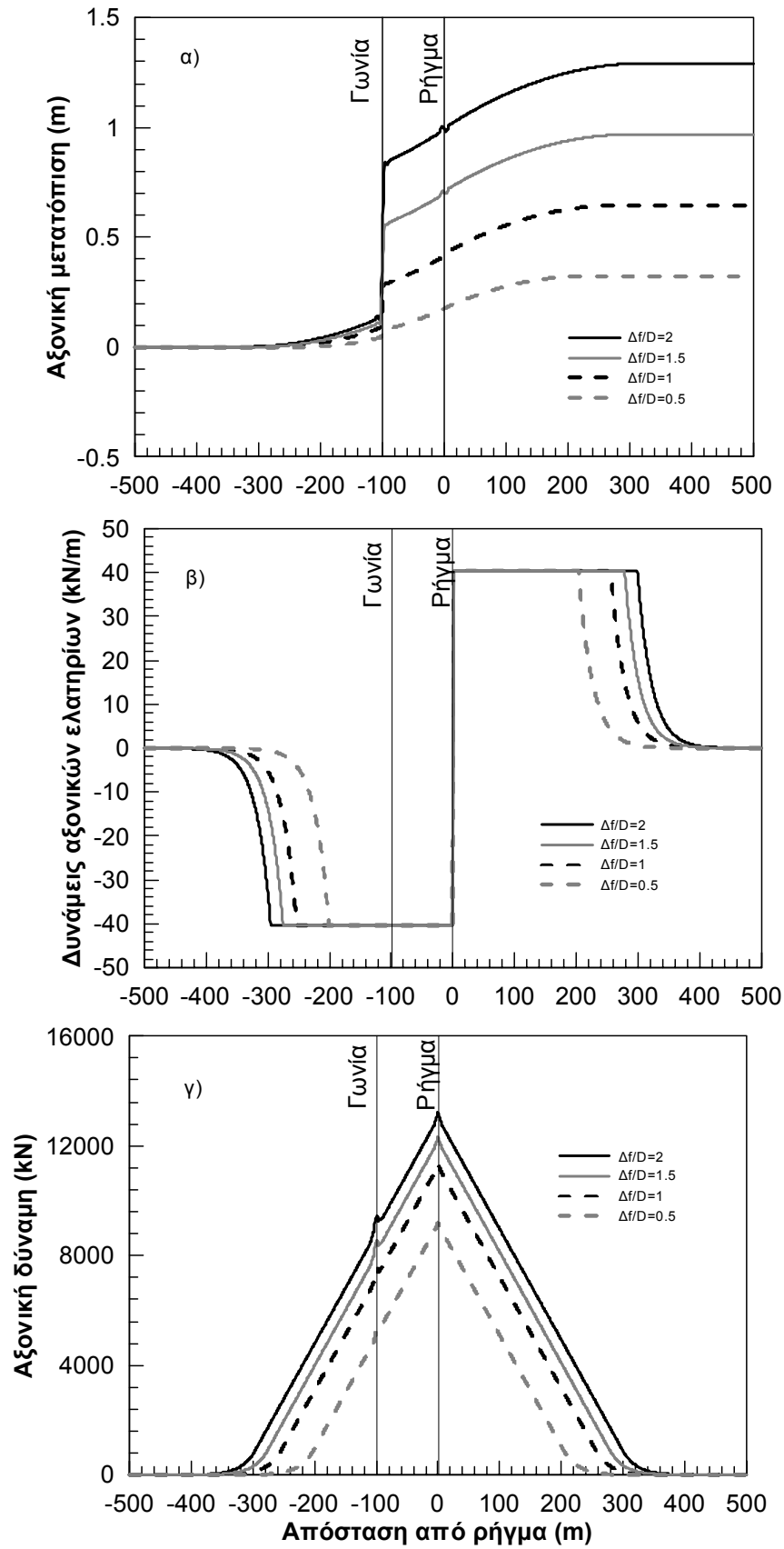
Στο Σχήμα 4.18.β. όπου παρουσιάζεται η συνολική μετακίνηση παρατηρείται πως η σχετική μετακίνηση αγωγού και εδάφους εξασθενεί στην πλευρά του ευθύγραμμου τεμάχους σε απόσταση 300m σε αντίθεση με τον ευθύγραμμο αγωγό, όπου μηδενίζονται σε απόσταση 400m. Στην πλευρά της γωνίας η αξονική μετακίνηση μετατρέπεται σε εγκάρσια μετατόπιση στην περιοχή της γωνίας, η οποία εξασθενεί σε πολύ μικρό μήκος (όπως και στην περιοχή του ρήγματος). Στην περιοχή μετά τη γωνία, η εγκάρσια μετατόπιση μετατρέπεται σε αξονική μετατόπιση στο δεύτερο τμήμα και φθίνει στα επόμενα 200m. Η γενική εικόνα στις μετακινήσεις είναι παρόμοια με του αγωγού χωρίς τόξο καμπυλότητας, μόνο που λόγω του ότι δεν υπάρχει η ασυνέχεια όπως πριν η παραμορφωμένη εικόνα φαίνεται πιο ομαλή στη γωνία.



**ΣΧΗΜΑ 4.16:** α) Παραμορφωμένη εικόνα του αγωγού (5 φορές μεγέθυνση των παραμορφώσεων) και β) διάγραμμα συνολικών μετακινήσεων κατά μήκος του αγωγού.

Στο Σχήμα 4.19. με ανάλογο τρόπο όπως και στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις (Σχήμα 4.4 και 4.11) παρουσιάζονται οι κατανομές των μετακινήσεων, των αντιδράσεων και των δυνάμεων κατά την αξονική διεύθυνση. Παράλληλα, σημειώνονται οι θέσεις του ρήγματος και της γωνίας.

- Η αξονική μετακίνηση διαφέρει από την συνολική μετακίνηση μόνο στην περιοχή της γωνίας και του ρήγματος όπου υπάρχουν τα καμπυλωμένα μήκη με την έντονη εγκάρσια μετακίνηση. Εδώ φαίνεται σε αντίθεση με την περίπτωση χωρίς τόξο καμπυλότητας ότι στην περιοχή του τόξου το άλμα στην αξονική μετακίνηση ενώνεται με μία απότομη ευθεία, οπότε χάνεται η έννοια του άλματος, και έχουμε μια πιο ομαλή μεταβολή. Αυτή η διαφορά στις αξονικές μετακινήσεις εκατέρωθεν της γωνίας αυξάνει όσο αυξάνει και η επιβαλλόμενη μετακίνηση του ρήγματος. Το προφίλ των μετακινήσεων κοντά στο ρήγμα είναι παρόμοιο με τον ευθύγραμμο αγωγό μόνο που είναι λιγότερο εκτεταμένο σε μήκος και δείχνει να συγκλίνει-σταθεροποιείται σε μήκος από πιο μικρές επιβαλλόμενες μετακινήσεις ( $\Delta f/D=1.5$  έναντι  $\Delta f/D=1.5$ ).
- Ανάλογα συμπεράσματα με την περίπτωση του Κεφαλαίου 4.3-Σχήμα 4.11.β προκύπτουν άμεσα και για τα αξονικά ελατήρια.
- Η αξονική δύναμη του αγωγού μειώνεται με σταθερή κλίση όπως και στις άλλες περιπτώσεις μόνο που η μέγιστη αξονική δύναμη έχει αυξηθεί από τα 12000kN χωρίς τόξο καμπυλότητας στα 13000kN. Επίσης η αύξηση της δύναμης στο σημείο του ρήγματος μειώνεται πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με τον ευθύγραμμο αγωγό αντίστοιχα με τον αγωγό χωρίς τόξο συναρμογής. Στις μικρές μετακινήσεις η γωνία δεν επηρεάζει τόσο τη μετακίνηση, βέβαια φαίνεται ότι επηρεάζει λίγο παραπάνω σε σχέση με τον αγωγό χωρίς τόξο συναρμογής οπότε η αξονική δύναμη είναι εδώ λίγο πιο αυξημένη στα 9000kN, όμως σε μεγαλύτερες μετακινήσεις η αξονική μετακίνηση μετατρέπεται σε κάμψη η οποία απασχολεί λιγότερα ελατήρια, το άθροισμα των δυνάμεων των ελατηρίων αυτών ισούται με την αξονική δύναμη στο ρήγμα που επειδή είναι λιγότερα μειώνεται και η αξονική δύναμη σε σύγκριση με τον ευθύγραμμο αγωγό (δηλαδή τα αξονικά ελατήρια πέραν της γωνίας αντικαθίστανται από τα εγκάρσια ελατήρια, τα οποία αν και προσφέρουν πιο μεγάλη αντίσταση ενεργοποιούνται σε πολύ μικρότερο μήκος ώστε να προσφέρουν πολύ λιγότερη δύναμη συνολικά). Αν συγκρίνουμε τις 3 περιπτώσεις προκύπτει πως η παρούσα ως προς την αξονική δύναμη βρίσκεται ενδιάμεσα, διότι η αξονική μετακίνηση στην περιοχή της γωνίας μετατρέπεται σε κάμψη αλλά διατηρείται και ένα μέρος της αξονικά (η ομαλή μεταβολή πάνω στο τόξο) και έτσι η αξονική δύναμη είναι λίγο μεγαλύτερη από την περίπτωση χωρίς τόξο, αλλά σαφώς μικρότερη από τον ευθύγραμμο αγωγό.



**ΣΧΗΜΑ 4.17:** Κατανομή των αξονικών μετακινήσεων, δυνάμεων ελατηρίων και δύναμης του αγωγού με την απόσταση από το ρήγμα.

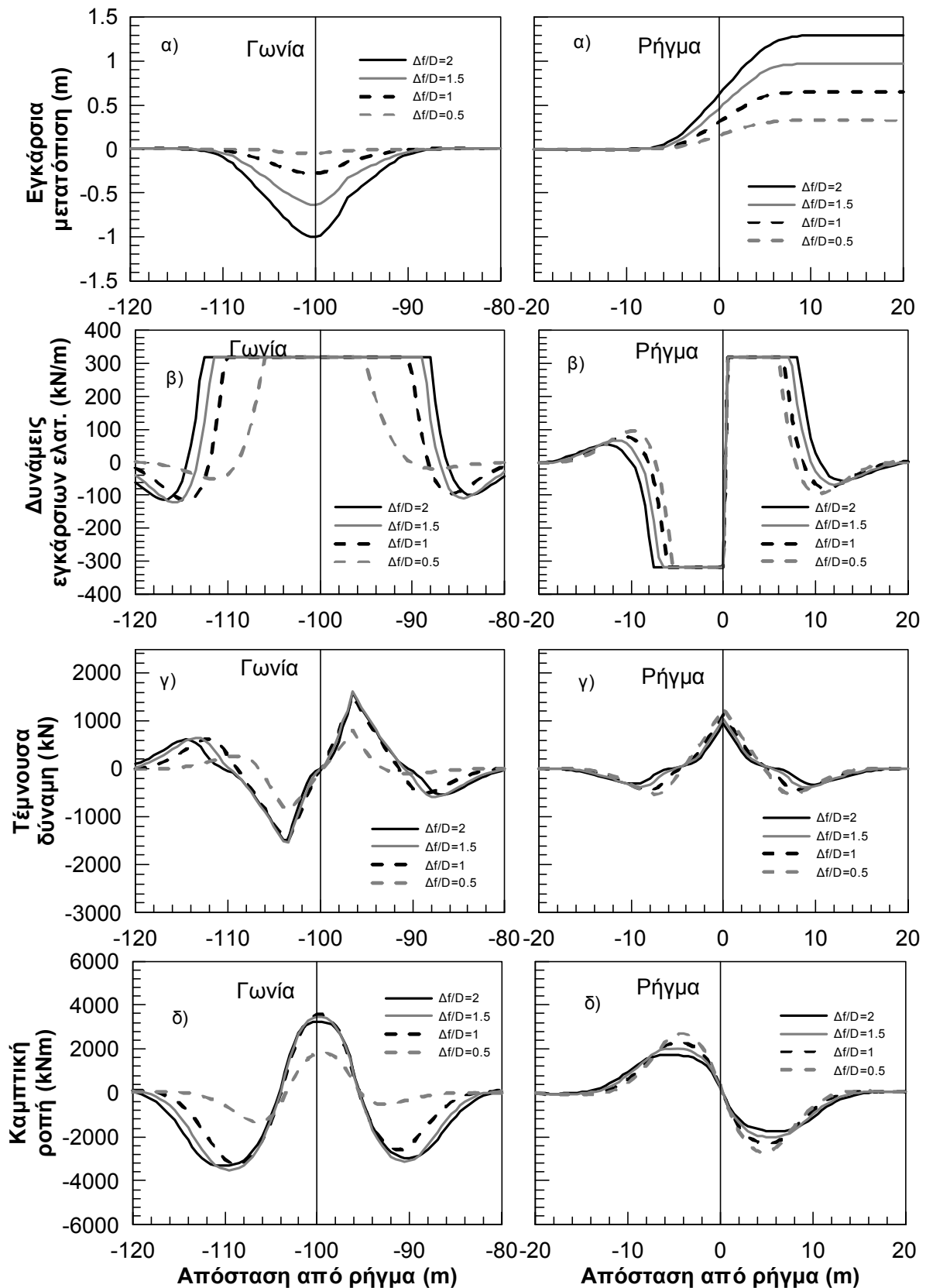
Στο Σχήμα 4.20. εξετάζεται ο αγωγός κατά την εγκάρσια διεύθυνση, δηλαδή οι εγκάρσιες μετακινήσεις του, οι αντιδράσεις των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων, η τέμνουσα δύναμη και η καμπτική ροπή του αγωγού. Όπως προαναφέρθηκε τα παραπάνω μεταβάλλονται σε μικρό μήκος του αγωγού, οπότε αριστερά παρουσιάζεται η περιοχή της γωνίας του αγωγού σε μήκος 40m και δεξιά μία μεγέθυνση της κρίσιμης θέσης του ρήγματος μήκους 40m.

Για την περιοχή του ρήγματος:

- Στο Σχήμα 4.20.α. παρατηρείται ότι το μήκος επιρροής του αγωγού κατά την εγκάρσια έννοια είναι τα 10m εγκάρσια του ρήγματος χωρίς αυτό να μεταβάλλεται σημαντικά για τις διάφορες στάθμες μετακινήσεων, σε αναλογία με την περίπτωση του ευθύγραμμου αγωγού. Όμως εδώ μεταβάλλεται πολύ λιγότερο από πριν, σχεδόν έχει σταθεροποιηθεί εξ αρχής, αυτό φαίνεται και στα διαγράμματα αντιδράσεων, τεμνουσών και καμπτικών ροπών.
- Στο Σχήμα 4.20.β. ,όπως και στην αξονική διεύθυνση, τα ελατήρια έχουν διαρρεύσει στο μεγαλύτερο καμπτόμενο μήκος λόγω της μικρής μετακίνησης διαρροής σε σχέση με την επιβαλλόμενη μετακίνηση, ισχύει ο ανάλογος σχολιασμός με τον αγωγό χωρίς τόξο συναρμογής (Σχήμα 4.12.β), επίσης εδώ όπως ήδη ειπώθηκε το μήκος στο οποίο λειτουργούν τα ελατήρια μεταβάλλεται ανεπαίσθητα.
- Λόγω της μειωμένης εφελκυστικής δύναμης η αλληλεπίδραση καμπτικής στιβαρότητας και εφελκυσμού δεν είναι τόσο έντονη όπως και στον ευθύγραμμο αγωγό, οπότε οι καμπτικές ροπές και τέμνουσες δεν απομειώνονται ιδιαίτερα με την πρόοδο της μετακίνησης του ρήγματος. Όμως η εφελκυστική δύναμη είναι λίγο μεγαλύτερη σε σύγκριση με τον αγωγό χωρίς τόξο συναρμογής, οπότε ναι μεν οι καμπτικές ροπές και τέμνουσες δεν απομειώνονται ιδιαίτερα, αλλά απομειώνονται περισσότερο σε σχέση με τον αγωγό χωρίς τόξο.

Για την περιοχή της γωνίας:

- Στο Σχήμα 4.20.α. παρατηρείται ότι το μήκος επιρροής του αγωγού κατά την εγκάρσια έννοια είναι τα 10m εγκάρσια της γωνίας χωρίς αυτό να μεταβάλλεται σημαντικά για τις διάφορες στάθμες μετακινήσεων, σε αναλογία με την περιοχή του ρήγματος. Επίσης εδώ παρατηρείται η συνέχεια στις εγκάρσιες μετακινήσεις στην περιοχή της γωνίας σε αντίθεση με τον αγωγό χωρίς τόξο συναρμογής αντίστοιχα στο Σχήμα 4.12.β.ΙΙ.
- Στο Σχήμα 4.20.β παρατηρείται ότι όπως και στην αξονική διεύθυνση τα ελατήρια έχουν διαρρεύσει στο μεγαλύτερο καμπτόμενο μήκος λόγω της μικρής μετακίνησης διαρροής σε σχέση με την επιβαλλόμενη μετακίνηση, ισχύει ο ανάλογος σχολιασμός με τη θέση του ρήγματος, μόνο που εδώ όπως ήδη ειπώθηκε το μήκος στο οποίο λειτουργούν τα ελατήρια μεταβάλλεται ανεπαίσθητα.
- Η εφελκυστική δύναμη που δέχεται η γωνία είναι ιδιαίτερα απομειωμένη σε σχέση με το ρήγμα, οπότε η αλληλεπίδραση καμπτικής στιβαρότητας και εφελκυσμού δεν είναι τόσο έντονη όσο και στις άλλες περιπτώσεις στην περιοχή της γωνίας, άρα και οι καμπτικές ροπές και τέμνουσες δεν απομειώνονται ιδιαίτερα με την πρόοδο της μετακίνησης του ρήγματος. Στην αρχή είναι μικρές, καθώς η μικρή μετακίνηση δεν επηρεάζει την περιοχή της γωνίας σημαντικά.



**ΣΧΗΜΑ 4.20:** Κατανομή των εγκάρσιων μετακινήσεων, δυνάμεων ελατηρίων, τεμνουσών και καμπτικών ροπών του αγωγού με την απόσταση από το ρήγμα.



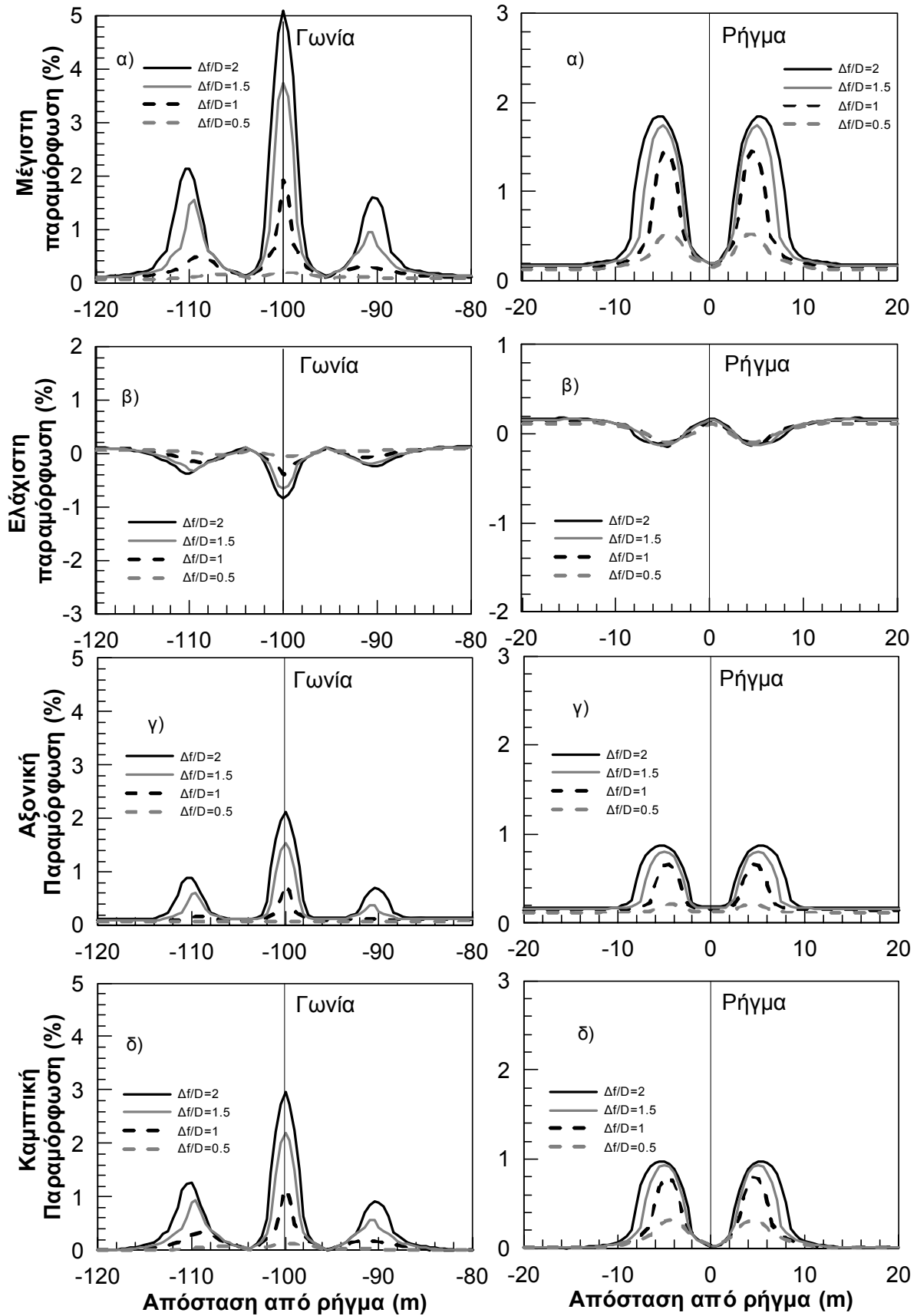
Στο Σχήμα 4.21. παρουσιάζονται οι κατανομές των διαμήκων παραμορφώσεων του αγωγού και συγκεκριμένα των μέγιστων, των ελάχιστων σε κάθε διατομή όπως και της ισοδύναμης αξονικής και καμπτικής παραμόρφωσης.

Για την περιοχή του ρήγματος:

- Από τις κατανομές των μέγιστων και των ελάχιστων παραμορφώσεων (Σχήμα 4.21.α και β.) επιβεβαιώνονται τα συμπεράσματα που προήλθαν από την τέμνουσα και τη ροπή. Ο αγωγός έχει ένα καμπτόμενο τμήμα που εφελκύεται σχετικά λίγο χωρίς να αλληλεπιδρά σημαντικά με την κάμψη, άρα έχει ακραίες παραμορφώσεις ετερόσημες με μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή τη θετική-μέγιστη παραμόρφωση λόγω του εφελκυσμού. Αυτό το μοτίβο παραμένει με την αύξηση της μετακίνησης του ρήγματος σε αντίθεση με τον ευθύγραμμο αγωγό όπου αναπτύσσει περισσότερο εφελκυσμό, όπου αντίστοιχα πλέον μειώνονται ασήμαντα οι ροπές και οι τέμνουσες.
- Οι αξονικές παραμορφώσεις (Σχήμα 4.21.γ.) αυξάνονται τοπικά στις θέσεις των μέγιστων ροπών έτσι ώστε το ολοκλήρωμα των τάσεων στη διατομή να αντιστοιχεί στο αναπτυχθέν ζεύγος ροπής και αξονικής δύναμης. Αυτή η αύξηση δικαιολογείται από το ότι η κράτυνση του υλικού μετά τη διαρροή είναι μικρή, οπότε για να προκύψουν οι απαιτούμενες τάσεις χρειάζονται μεγάλες παραμορφώσεις. Δεδομένου ότι η αξονική δύναμη είναι μικρή οι αξονικές παραμορφώσεις (εάν εξαιρέσουμε την τοπική έξαρση λόγω της κάμψης) παραμένουν ελαστικές και δεν δημιουργούν την απότομη αύξηση λόγω κράτυνσης όπως στον ευθύγραμμο αγωγό.
- Οι καμπτικές παραμορφώσεις (Σχήμα 4.21.δ.) αυξάνονται στα σημεία των μεγίστων ροπών όπως είναι αναμενόμενο. Παρόλο που η γεωμετρία και η φόρτιση δεν είναι συμμετρικές, τόσο στην περιοχή του ρήγματος, όσο και στη γωνία, υπάρχει τοπική συμμετρία, η οποία είναι εμφανής στις κατανομές των παραμορφώσεων (Σχήμα 4.13) και των εντατικών μεγεθών (Σχήμα 4.20). Όσο αυξάνεται η μετακίνηση του ρήγματος αυξάνεται και η καμπτική παραμόρφωση μέχρι που τείνει να σταθεροποιηθεί για τις μεγάλες μετακινήσεις, όμως η καμπτική ροπή μειώνεται καθώς επιδρά ο εφελκυσμός στην καμπτική στιβαρότητα του αγωγού.

Για την περιοχή της γωνίας:

- Από τις μέγιστες και τις ελάχιστες παραμορφώσεις (Σχήμα 4.21.α και β.) επιβεβαιώνονται τα συμπεράσματα που προήλθαν από την τέμνουσα και τη ροπή. Ο αγωγός έχει δύο καμπτόμενα τμήματα εκατέρωθεν της γωνίας που εφελκύνονται σχετικά λίγο χωρίς να αλληλεπιδρούν σημαντικά με την κάμψη, άρα έχουν ακραίες παραμορφώσεις ετερόσημες με μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή τη θετική-μέγιστη παραμόρφωση λόγω του εφελκυσμού. Αυτό το μοτίβο παραμένει με την αύξηση της μετακίνησης του ρήγματος σε αντίθεση με τον ευθύγραμμο αγωγό όπου αναπτύσσει περισσότερο εφελκυσμό, όπου αντίστοιχα πλέον μειώνονται ασήμαντα οι ροπές και οι τέμνουσες. Εκτός των δύο καμπτόμενων τμημάτων στα οποία οι ακραίες παραμορφώσεις παρουσιάζουν έξαρση στις θέσεις των μεγίστων ροπών, υπάρχει και μία ετερόσημη ροπή ακριβώς στη θέση της γωνίας η οποία αντίστοιχα παρουσιάζει έξαρση στις παραμορφώσεις της.



**ΣΧΗΜΑ 4.21:** Κατανομές των μέγιστων, ελάχιστων, αξονικών και καμπτικών παραμορφώσεων του αγωγού με την απόσταση από το ρήγμα.

- Οι αξονικές παραμορφώσεις (Σχήμα 4.21.γ.) αυξάνονται τοπικά στις θέσεις των μέγιστων ροπών όπως έχει σχολιαστεί και στις υπόλοιπες περιπτώσεις.
- Οι καμπτικές παραμορφώσεις (Σχήμα 4.21.δ.) αυξάνονται στα σημεία των μέγιστων ροπών όπως είναι αναμενόμενο.

Γενικά η συμπεριφορά είναι αντίστοιχη με τον αγωγό χωρίς τόξο συναρμογής, μόνο που εδώ φαίνεται η σημασία του τόξου συναρμογής, πριν χωρίς τόξο συναρμογής οι παραμορφώσεις άγγιζαν το 18%, πλέον μόνο το 5%, και μάλιστα για τόξο συναρμογής με ακτίνα 10 διαμέτρων του αγωγού που χρησιμοποιείται ως η ελάχιστη ακτίνα στην πράξη, άρα μεγαλύτερες ακτίνες βγάζουν πιο ευμενή αποτελέσματα όπως θα δειχθεί περαιτέρω. Άρα είναι απαραίτητο για να θεωρηθεί ρεαλιστική η μελέτη, και καθόλου αντιοικονομικός ο σχεδιασμός να λαμβάνεται υπόψιν το τόξο συναρμογής στους υπολογισμούς.

#### 4.4.3. Αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων

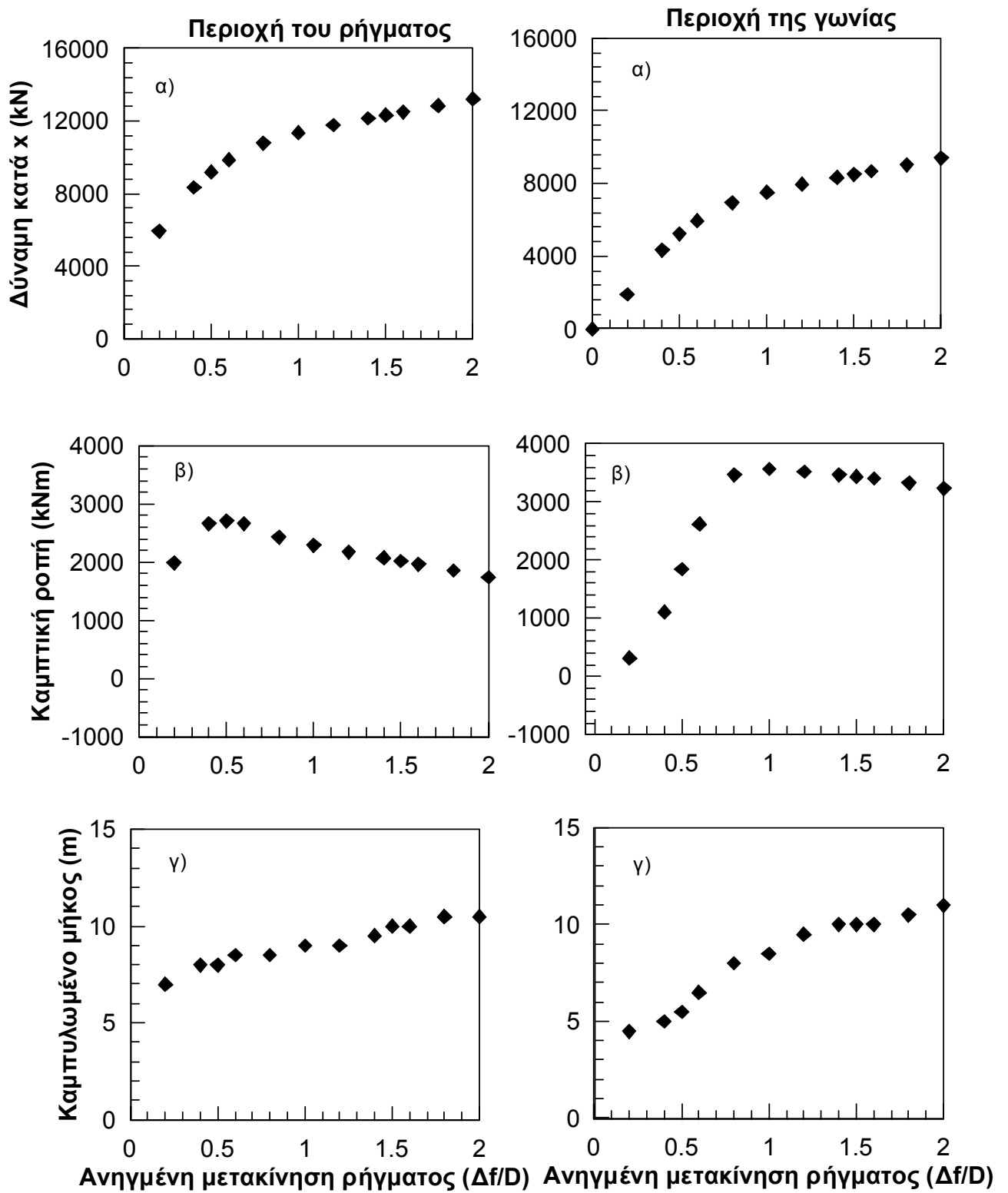
Στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζονται συναρτήσει της ανηγμένης επιβαλλόμενης μετακίνησης οι μεταβολές των ακολούθων χαρακτηριστικών μεγεθών.

Για την περιοχή του ρήγματος:

- Η αξονική δύναμη του αγωγού στο σημείο του ρήγματος (Σχήμα 4.22.α) όπως ειπώθηκε αρχικά αυξάνεται πολύ. Όταν οι επιπλέον επιβαλλόμενες μετακινήσεις αναλαμβάνονται ως εγκάρσια μετακίνηση του αγωγού στην περιοχή της γωνίας, τότε ο ρυθμός αύξησης μειώνεται.
- Η μέγιστη καμπτική ροπή στην περιοχή του ρήγματος (Σχήμα 4.22.β) αυξάνεται αρχικά και μετά μειώνεται λόγω της αλληλεπίδρασης της με την εφελκυστική δύναμη αλλά πολύ λιγότερο σε σχέση με τον ευθύγραμμο αγωγό διότι δεν αυξάνεται πολύ η εφελκυστική δύναμη, αλλά λίγο περισσότερο σε σχέση με τον αγωγό χωρίς τόξο συναρμογής διότι ο εφελκυσμός είναι κάπως περισσότερος.
- Τέλος, το καμπυλωμένο μήκος (Σχήμα 4.22.γ) στην περιοχή του ρήγματος έχει εύρος τιμών μεταξύ των 7 και 10m.

Για την περιοχή της γωνίας:

- Η αξονική δύναμη του αγωγού στη γωνία (Σχήμα 4.22.α) ισούται με τη δύναμη στο σημείο του ρήγματος μείον την αντίσταση των αξονικών ελατηρίων σε 100m που χωρίζουν τα δύο σημεία, οπότε έχει παρόμοια εξέλιξη με τη δύναμη του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος.
- Η μέγιστη καμπτική ροπή στην περιοχή της γωνίας (Σχήμα 4.22.β) αυξάνεται αρχικά και μετά μειώνεται λόγω της αλληλεπίδρασης της με την εφελκυστική δύναμη αλλά πολύ λιγότερο σε σχέση με τον ευθύγραμμο αγωγό διότι η εφελκυστική δύναμη στη γωνία είναι σαφώς μικρή.



**ΣΧΗΜΑ 4.22:** Αξονική δύναμη στο σημείο του ρήγματος, μέγιστη ροπή στην περιοχή του ρήγματος και έντονα καμπυλωμένο μήκος συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετακίνησης, στην περιοχή του ρήγματος.

- Αντίστοιχα το καμπυλωμένο μήκος (Σχήμα 4.22.γ) έχει εύρος τιμών μεταξύ των 5 και 10m εκατέρωθεν της γωνίας, τα δύο καμπυλωμένα μήκη έχουν αρκετά κοντινές τιμές, έτσι παρουσιάζεται μόνο το ένα. Ας επισημανθεί πως εδώ το καμπυλωμένο μήκος συμβολίζει το μήκος που καμπυλώνεται έντονα πέραν του τόξου συναρμογής, δηλαδή που αρχικά ήταν ευθύγραμμο.

Στο Σχήμα 4.23 παρουσιάζονται η εξέλιξη των παραμορφώσεων στα σημεία των μέγιστων ροπών στην περιοχή του ρήγματος συναρτήσει της ανηγμένης επιβαλλόμενης μετακινήσης του ρήγματος.

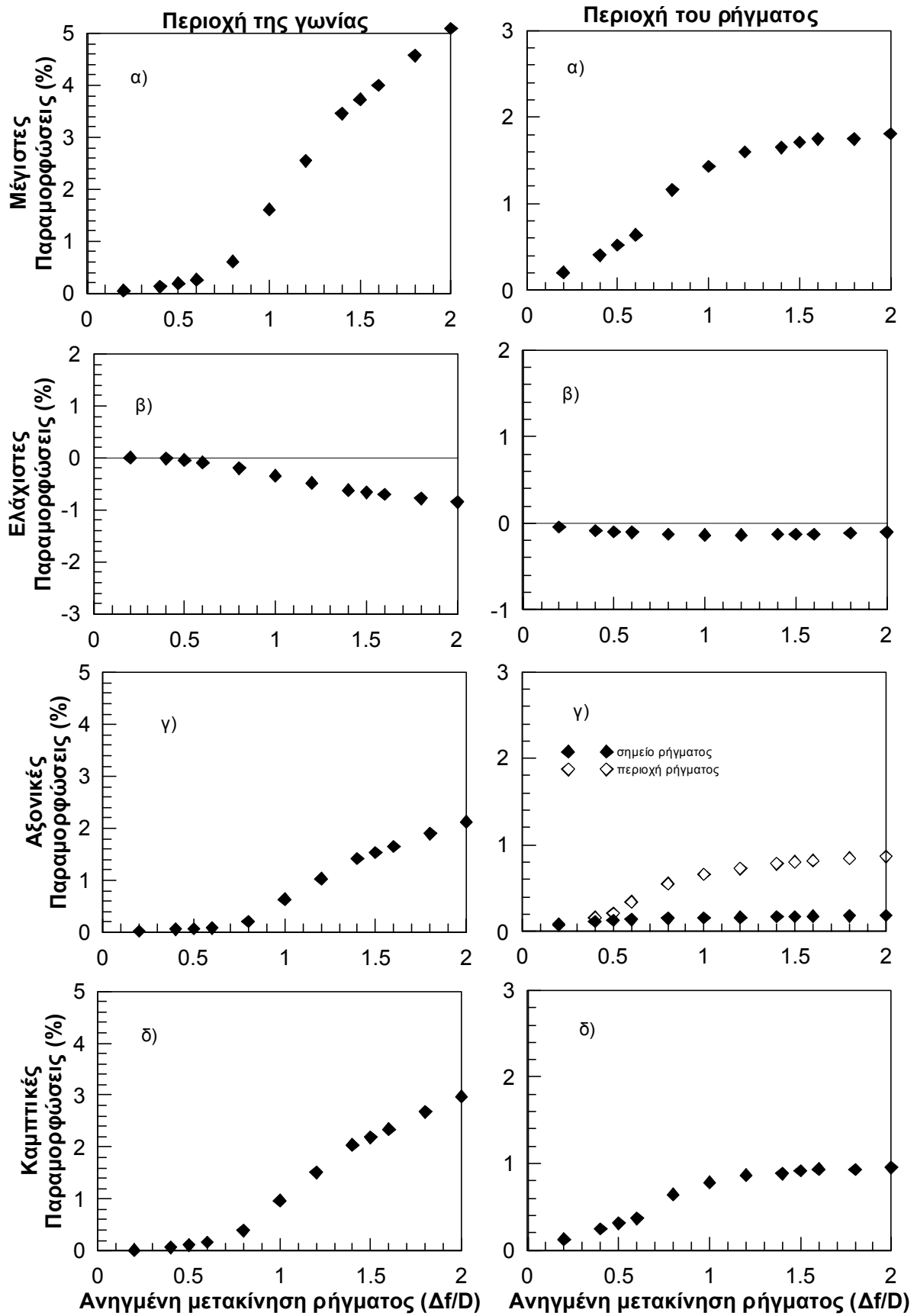
Για την περιοχή του ρήγματος:

- Για τις μέγιστες παραμορφώσεις (Σχήμα 4.23.α) ισχύουν τα ίδια με τον ευθύγραμμο αγωγό. Ως προς τις ελάχιστες (Σχήμα 4.23.β) παραμένουν συνέχεια θλιπτικές σε αντίθεση με τον ευθύγραμμο επειδή ο εφελκυσμός δεν είναι προέχων.
- Οι αξονικές παραμορφώσεις (Σχήμα 4.23.γ) αυξάνονται αντίστοιχα λόγω της ροπής, ενώ στο σημείο του ρήγματος παραμένουν ελαστικές αφού δεν αυξάνεται ιδιαίτερα ο εφελκυσμός.
- Οι καμπτικές αυξάνονται (Σχήμα 4.23.δ) αντίστοιχα λόγω της ροπής και τέλος σταθεροποιούνται όπως και στον ευθύγραμμο αγωγό.

Οι παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος είναι πολύ παρόμοιες με την περίπτωση του αγωγού χωρίς τόξο συναρμογής.

Για την περιοχή της γωνίας:

Ισχύει ο αντίστοιχος σχολιασμός για τις μέγιστες, ελάχιστες, αξονικές και καμπτικές παραμορφώσεις όπου μεγιστοποιείται η καμπτική ροπή. Εδώ φαίνεται ακόμη πιο έντονα η χρησιμότητα της χρήσης του τόξου συναρμογής διότι οι παραμορφώσεις δεν φθάνουν πλέον το 18% αλλά το 5%. Άρα η παραδοχή της μηδενικής ακτίνας καμπυλότητας δεν είναι ικανοποιητική και είναι υπερβολικά συντηρητική για την ανάλυση και το σχεδιασμό αγωγών.



**ΣΧΗΜΑ 4.23:** Μέγιστες, ελάχιστες, αξονικές και καμπτικές παραμορφώσεις συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta f$  ανηγμένης προς τη διάμετρο  $D$  του αγωγού, στην περιοχή του ρήγματος.

Στο Σχήμα 4.24 παρουσιάζονται με συνοπτικό τρόπο τα αποτελέσματα της παραμετρικής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκαν για την επίδραση της γωνίας που σχηματίζουν τα δύο τμήματα του αγωγού. Η παραπάνω ανάλυση (Σχήμα 4.17) ήταν για  $\phi=45^\circ$ , η πρώτη ανάλυση του ευθύγραμμου αγωγού ήταν για  $\phi=0^\circ$ . Οι υπόλοιπες αναλύσεις δεν παρουσιάζονται εδώ με την ίδια λεπτομέρεια για οικονομία χώρου και επειδή στην ουσία τους δεν παρουσιάζαν κάτι διαφορετικό.

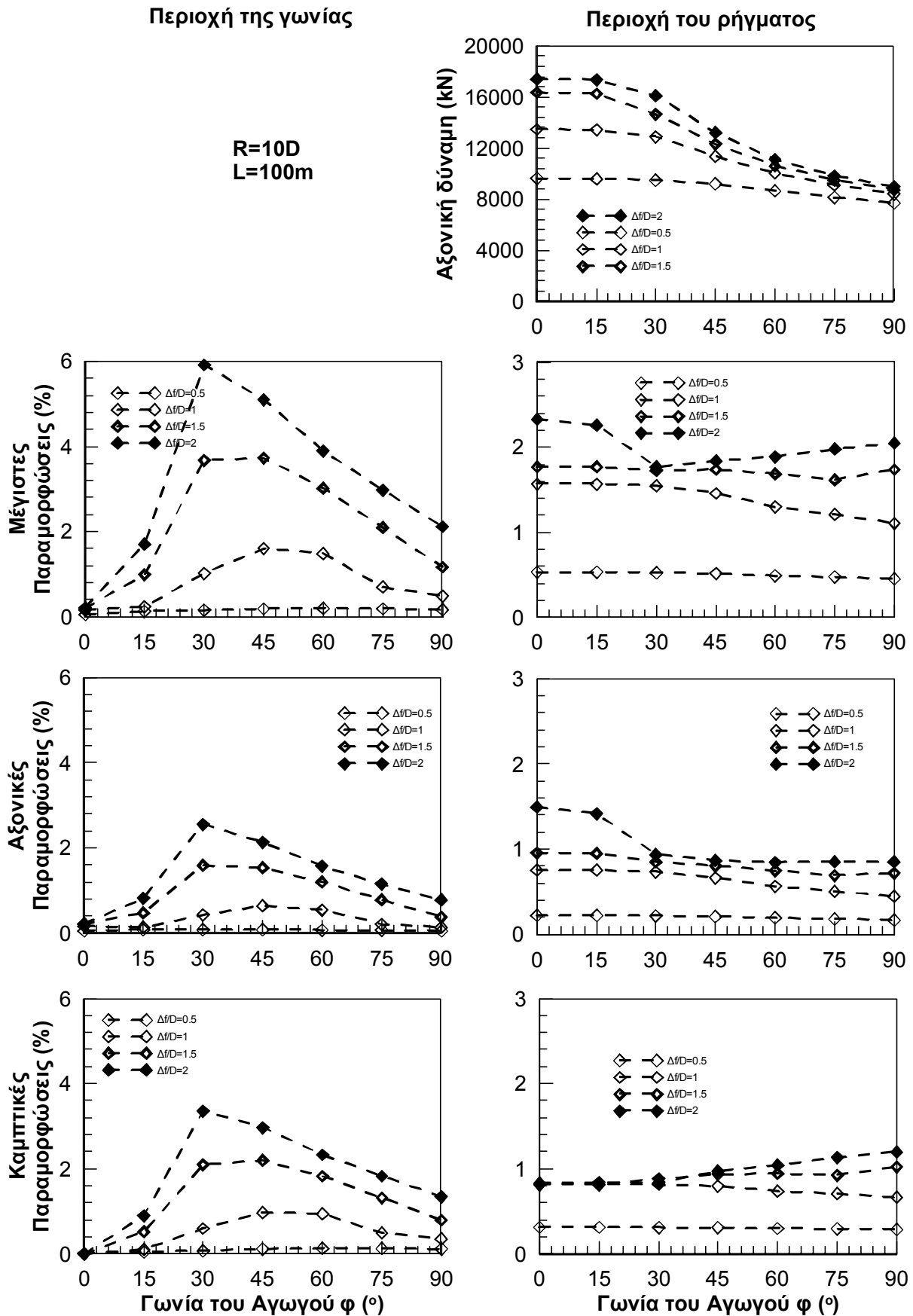
Σε ότι αφορά στην περιοχή του ρήγματος, παρουσιάζεται η μεταβολή της αξονικής δύναμης του αγωγού και οι παραμορφώσεις (μέγιστες, αξονικές και καμπτικές) στη θέση της μέγιστης ροπής. Για την περιοχή της γωνίας, παρουσιάζονται οι αντίστοιχες παραμορφώσεις στη θέση της μέγιστης ροπής.

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.24, η αξονική δύναμη μειώνεται με την αύξηση της γωνίας  $\phi$ . Όπως δείχθηκε παραπάνω, η αξονική για  $\phi=45^\circ$  είναι μικρότερη σε σχέση με αυτήν για τον ευθύγραμμο αγωγό, γιατί το τμήμα του αγωγού μετά τη γωνία αναλαμβάνει τη μετακίνηση εν μέρει με κάμψη (άρα με εγκάρσια ελατήρια) και εν μέρει με τριβή (άρα με αξονικά ελατήρια). Αντίστοιχα για  $\phi=90^\circ$  όπου αναλαμβάνεται η μετακίνηση μόνο με τα εγκάρσια ελατήρια, η αξονική δύναμη προκύπτει ακόμη μικρότερη.

Στην περιοχή του ρήγματος οι παραμορφώσεις για κοντινές γωνίες έχουν παρόμοιες τιμές, φαίνεται ομαλά η μετάβαση από τον ευθύγραμμο αγωγό στην ορθή γωνία. Ειδικότερα για  $\phi=0$  έως  $30^\circ$  τα αποτελέσματα σχεδόν ταυτίζονται, άρα μπορεί να ειπωθεί πως εάν ένας αγωγός παρουσιάζει στροφή μέχρι και  $30^\circ$  στην περιοχή του ρήγματος αρκεί να πραγματοποιηθεί ανάλυση για ευθύγραμμο αγωγό. Για  $\phi=45$  μέχρι  $90^\circ$  πάλι υπάρχει μια σύγκλιση των αποτελεσμάτων με μικρές διαφορές κυρίως στις μεσαίες μετακινήσεις. Οι αξονικές παραμορφώσεις μόνο για  $\phi=0$  και  $15^\circ$  παρουσιάζουν άλμα από τις μεσαίες στις πολύ υψηλές επιβαλλόμενες ανηγμένες μετακινήσεις, όπως σχολιάστηκε και στο Σχήμα 4.13.α. Επίσης, λόγω της μειωμένης αξονικής δύναμης για μεγάλα  $\phi$  άνω των  $30^\circ$  παρατηρείται ότι σε μεγάλη επιβαλλόμενη ανηγμένη μετακίνηση ότι αυξάνονται οι καμπτικές παραμορφώσεις. Για τους παραπάνω λόγους για μέσες γωνίες  $30$  με  $45^\circ$  για τη μέγιστη επιβαλλόμενη ανηγμένη μετακίνηση  $\Delta f/D=2$  παρουσιάζεται ελάχιστο στη μέγιστη μετακίνηση, για μεγαλύτερα  $\phi$  αυξάνεται η καμπτική παραμόρφωση, ενώ για μικρότερα  $\phi$  αυξάνεται η αξονική παραμόρφωση.

Στην περιοχή της γωνίας παρατηρούμε ότι η δυσμενέστερη περίπτωση (για όλων των ειδών τις παραμορφώσεις) είναι για  $\phi=45^\circ$ , δηλαδή όχι για ορθή γωνία. Αυτό συμβαίνει λόγω του δυσμενέστερου συνδυασμού κάμψης και αξονικού εφελκυσμού και στα δύο τμήματα του αγωγού εκατέρωθεν της γωνίας. Για  $\phi=90^\circ$ , στο τμήμα του αγωγού προς την πλευρά του ρήγματος επιβάλλεται κυρίως αξονικός εφελκυσμός, ενώ στην άλλη πλευρά της γωνίας επιβάλλεται κυρίως κάμψη, γεγονός που αποδεικνύεται ευμενέστερο.

Τα συμπεράσματα είναι παρόμοια με τον αγωγό χωρίς τόξο συναρμογής (Σχήμα 4.16), ειδικά για την περιοχή του ρήγματος. Στην περιοχή της γωνίας η κρίσιμη γωνία από τις  $45^\circ$  μετατοπίστηκε στις  $30^\circ$  με αντίστοιχες τάσεις αλλά αναλογικά μικρότερες παραμορφώσεις από την τάξη του 18% το οποίο είναι απαράδεκτα συντηρητικό στο ρεαλιστικό 6% για τη μέγιστη μετακίνηση ρήγματος.



**ΣΧΗΜΑ 4.24:** Αξονική δύναμη και παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος και της γωνίας συναρτήσει της γωνίας του αγωγού, για δεδομένο τόξο συναρμογής ακτίνας 10 διαμέτρων.

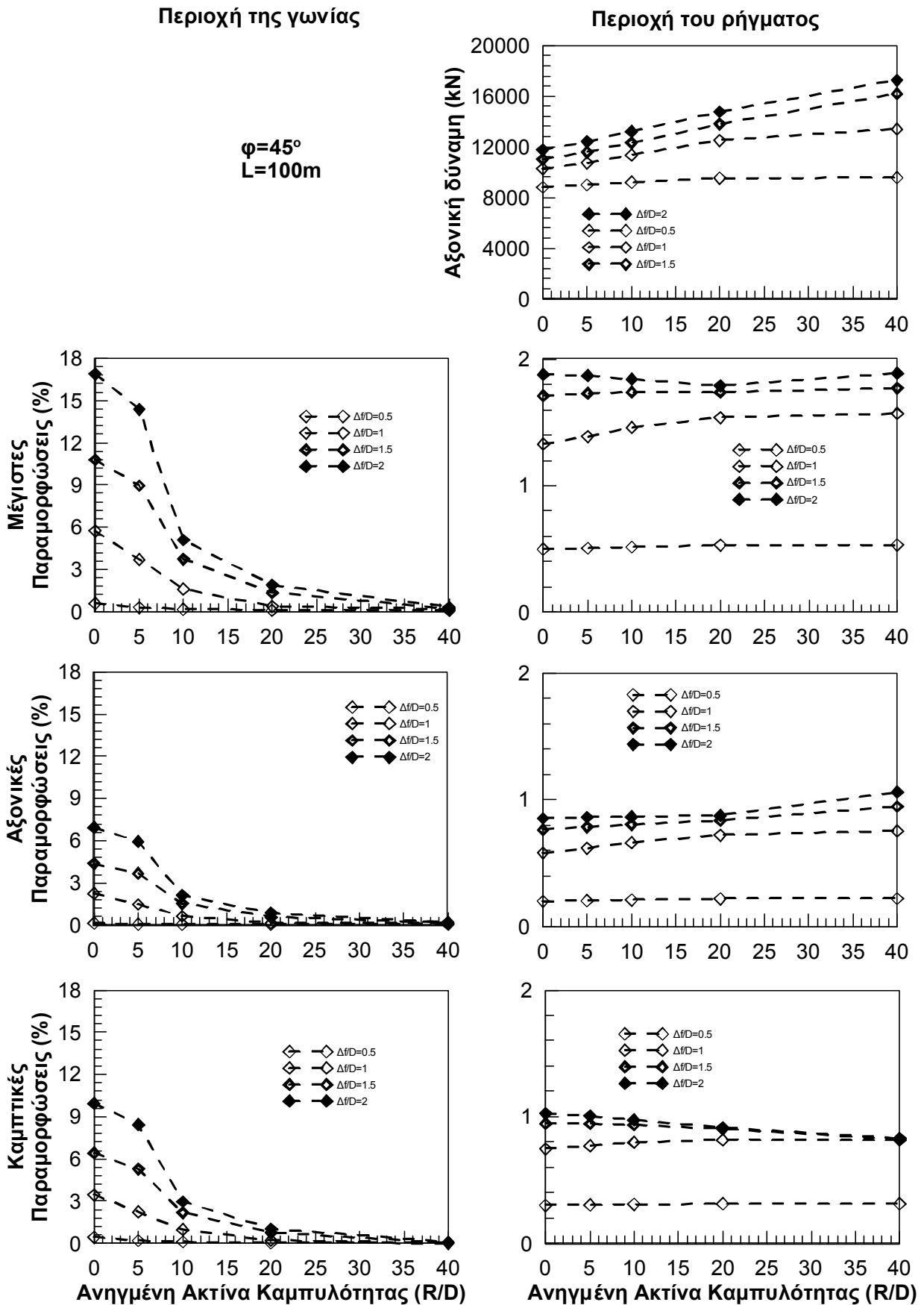


Στο Σχήμα 4.25 παρουσιάζεται η επίδραση της ακτίνας του τόξου καμπυλότητας αντίστοιχα στα μεγέθη του Σχήματος 4.24. Εξετάστηκε το πρόβλημα για σταθερή γωνία  $\phi=45^\circ$ . Οι ακτίνες που χρησιμοποιούνται στην πράξη κυμαίνονται μεταξύ 10 (όπου δεν υπάρχει αρκετός χώρος-δύσκολο κατασκευαστικά και δεν προτιμάτε) και 40 (το σύνηθες) διαμέτρων του αγωγού. Βέβαια εδώ εξετάστηκαν και οι ακτίνες 5 και 20 διαμέτρων του αγωγού ώστε να αποτυπωθεί με περισσότερη ακρίβεια η διαφοροποίηση στη συμπεριφορά του αγωγού.

Η μέγιστη αξονική δύναμη χωρίς τόξο καμπυλότητας είναι μειωμένη σε σχέση με τον ευθύγραμμο αγωγό διότι όπως ειπώθηκε ήδη η αξονική επιβαλλόμενη μετακίνηση αναλαμβάνεται από τα εγκάρσια ελατήρια, όσο αυξάνεται η ακτίνα του τόξου τόσο συμμετέχουν και τα αξονικά ελατήρια στην ανάλυση της μετακίνησης οπότε αυξάνεται η δύναμη στο σημείο του ρήγματος. Μάλιστα για ακτίνα 40 διαμέτρων τείνει η μέγιστη δύναμη για τη μέγιστη μετακίνηση σε αυτήν του ευθύγραμμου αγωγού (16000kN), με άλλα λόγια η ακτίνα των 40 διαμέτρων είναι τόσο μεγάλη όπου κατουσίαν ο αγωγός μπορεί να θεωρηθεί ευθύγραμμος πλέον.

Οι παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος δεν αλλάζουν σημαντικά, κυρίως αυξάνεται η αξονική παραμόρφωση σε αναλογία με την αξονική δύναμη όσο αυξάνεται η ακτίνα του τόξου συναρμογής. Επίσης η καμπτική παραμόρφωση τείνει να σταθεροποιηθεί από τις μεσαίες μετακινήσεις και πέρα για ακτίνα 40 διαμέτρων όπως και στον ευθύγραμμο αγωγό, παρόμοιο συμπέρασμα και με την προηγούμενη παράγραφο.

Χωρίς τόξο συναρμογής φαίνεται το υπερβολικό μέγεθος των παραμορφώσεων, ακόμη και για τις 5 διαμέτρους η πτώση στις παραμορφώσεις είναι σημαντική και πέραν των 10 διαμέτρων οι τιμές τους έχουν ήδη μειωθεί αισθητά και μειώνεται ομαλά μέχρι σχεδόν τον εκμηδενισμό τους στις 40 διαμέτρους, παρομοίως το συμπέρασμα ότι ο αγωγός με τόξο 40 διαμέτρων μπορεί να θεωρηθεί ευθύγραμμος.



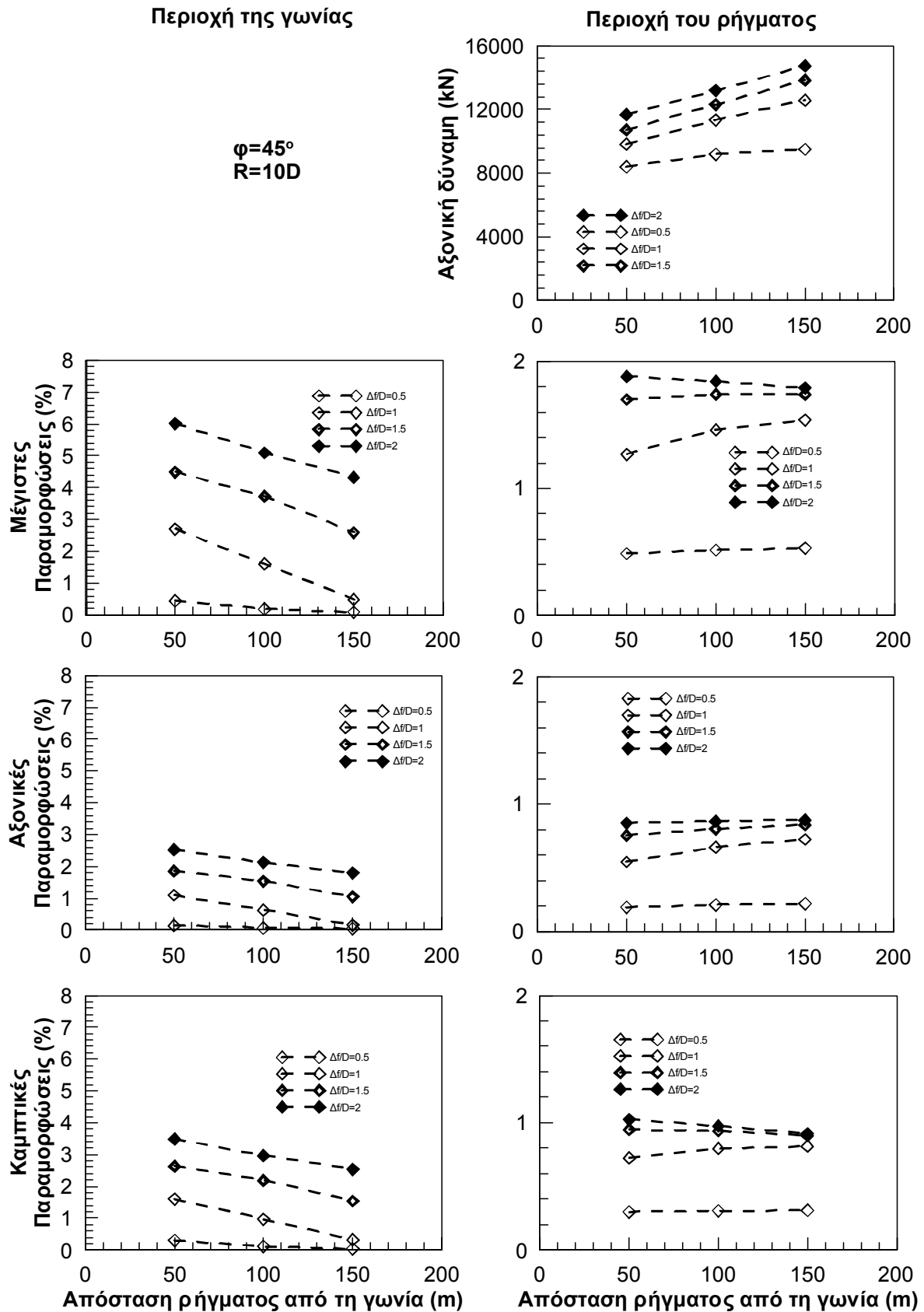
**ΣΧΗΜΑ 4.25:** Αξονική δύναμη και παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος και της γωνιάς συναρτήσει της ακτίνας του τόξου συναρμογής, για δεδομένη γωνία του αγωγού  $45^\circ$ .

Στο Σχήμα 4.26 επιλέγεται να παρασταθεί η επίδραση της απόστασης του ρήγματος από τη γωνία, για σταθερή γωνία  $\phi=45^\circ$  και ακτίνα συναρμογής 10 διαμέτρων του αγωγού. Οι μέχρι τώρα αναλύσεις αφορούσαν απόσταση 100m, οπότε τώρα εξετάστηκαν και οι περιπτώσεις των 50 και 150m. Όπως είναι λογικό όσο αυξάνεται η απόσταση τα αποτελέσματα προσεγγίζουν τα αποτελέσματα του ευθύγραμμου αγωγού.

Η αξονική δύναμη στο σημείο του ρήγματος αυξάνει όσο απομακρύνεται το ρήγμα διότι έτσι ενεργοποιούνται σχετικά περισσότερα αξονικά ελατήρια.

Οι παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος αυξάνονται όσο το ρήγμα πλησιάζει τη γωνία καθώς αλληλεπιδρούν τότε περισσότερο, βέβαια ανεπαίσθητα.

Τέλος, οι παραμορφώσεις στην περιοχή της γωνίας μειώνονται όσο το ρήγμα απομακρύνεται από τη γωνία καθώς έτσι την επηρεάζει λιγότερο, με άλλα λόγια επιβάλλει λιγότερη μετακίνηση στην περιοχή της γωνίας.



**ΣΧΗΜΑ 4.18:** Αξονική δύναμη και παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος και της γωνίας συναρτήσει της απόστασης του ρήγματος από τη γωνία, για δεδομένη γωνία του αγωγού  $45^\circ$  και ακτίνα τόξου συναρμογής 10 διαμέτρων.

#### 4.4.4. Παρατηρήσεις και συμπεράσματα

Κλείνοντας την αριθμητική διερεύνηση του προβλήματος προέκυψαν διάφορα χρήσιμα συμπεράσματα. Το τόξο καμπυλότητας είναι απαραίτητο στο πρόβλημα που εξετάζεται, διότι αλλιώς ο σχεδιασμός καταλήγει παράλογα αντικοινομικός. Ήδη για τα πιο μικρά τόξα καμπυλότητας ο αγωγός παρουσιάζει πολύ μικρότερες παραμορφώσεις στην περιοχή της γωνίας σε σχέση με την ανάλυση χωρίς τόξο συναρμογής, και μάλιστα για τα συνήθη μεγάλα τόξα συναρμογής η συμπεριφορά του αγωγού μπορεί να χαρακτηριστεί ταυτόσημη με αυτή του ευθύγραμμου αγωγού. Διερευνήθηκε η επίδραση της απόστασης του ρήγματος από τη γωνία και όπως ήταν αναμενόμενο, όσο μεγάλωνε αυτή τόσο λιγότερο επηρεαζόταν η γωνία και ο αγωγός έτεινε σε παραμορφώσεις και εντατικά μεγέθη αντίστοιχα με αυτά του ευθυγράμμου. Παρόλα αυτά πολλά συμπεράσματα που εξήχθησαν για τον αγωγό χωρίς τόξο συναρμογής διατηρούνται και σε αυτήν την περίπτωση μόνο που οι παραμορφώσεις στην περιοχή της γωνίας είναι σαφώς μειωμένες. Επίσης, η δυσμενέστερη περίπτωση ως προς τις παραμορφώσεις στην περιοχή της γωνίας προκύπτουν για γωνίες 30 με 45°.

Επομένως παλαιότερες μεθοδολογίες που έχουν προταθεί για την ανάλυση αγωγών με γωνία (O'Rourke&Liu, Gesouli) αποδεικνύεται ότι έχουν μειωμένη χρησιμότητα καθώς δεν λαμβάνουν υπόψη το τόξο συναρμογής (άρα είναι υπερβολικά συντηρητικές) και εξετάζουν μόνο ορθές γωνίες, οι οποίες δεν είναι η δυσμενέστερη περίπτωση. Αυτό το συμπέρασμα υπογραμμίζει την ανάγκη να επεκταθούν οι ανωτέρων μέθοδοι ή να προταθούν νέες όπου θα αντιμετωπίζουν τα προαναφερθέντα ζητήματα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ**

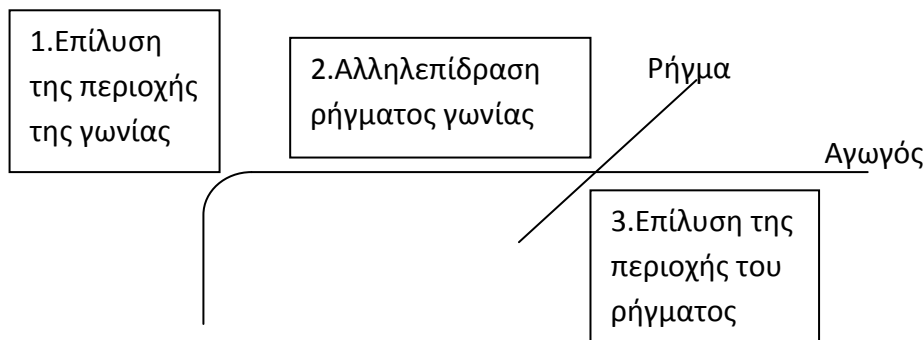
### **5.1. Βασικά βήματα της μεθόδου**

Η παρούσα αναλυτική μέθοδος έχει στόχο την εύρεση των μέγιστων παραμορφώσεων που θα αναπτυχθούν σε όλο το μήκος ενός αγωγού με γωνία ο οποίος διασταυρώνεται με ενεργό τεκτονικό ρήγμα.

Όπως αναπτύχθηκε και στο Κεφάλαιο 4, οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται στην περιοχή της γωνίας και στην περιοχή του ρήγματος, όπου ο αγωγός κάμπτεται και εφελκύεται λόγω της επιβαλλόμενης μετακίνησης του ρήγματος. Σε ένα ευρύτερο μήκος περί τα 100 με 300m εκατέρωθεν του ρήγματος αναπτύσσονται αξονικές παραμορφώσεις που όμως δεν είναι κρίσιμο μέγεθος σχεδιασμού. Οπότε, η προτεινόμενη μέθοδος εστιάζει στις καμπτικές και αξονικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στις δύο κρίσιμότερες περιοχές, της γωνίας και του ρήγματος.

Η βασική παραδοχή της μεθόδου είναι η ανάλυση του προβλήματος σε τρία (3) επιμέρους θεμελιώδη βήματα (Σχήμα 5.1):

1. Την ανάλυση της εντατικής κατάστασης και παραμόρφωσης του αγωγού στην περιοχή της γωνίας.
2. Την ανάλυση της αλληλεπίδρασης του αναλυόμενου τμήματος αγωγού στην περιοχή της γωνίας με το αντίστοιχο τμήμα αγωγού στην περιοχή του ρήγματος.
3. Την ανάλυση της εντατικής κατάστασης και παραμόρφωσης του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος.



**ΣΧΗΜΑ 5.1:** Κάτοψη του αγωγού και του ίχνους του ρήγματος με επισήμανση των βασικών βημάτων της προτεινόμενης μεθόδου.

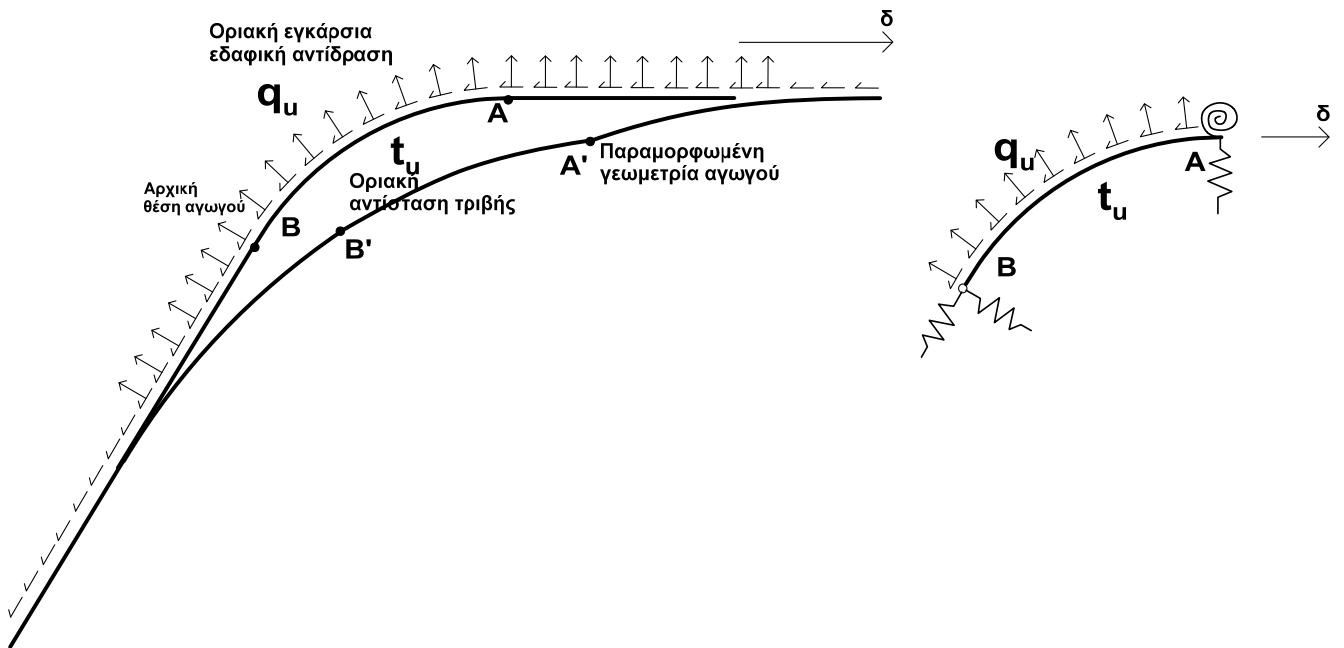
### 5.1.1. Ανάλυση της εντατικής κατάστασης του αγωγού στην περιοχή της γωνίας

**Γεωμετρία φορέα.**-Η περιοχή της γωνίας εισάγεται στη μέθοδο με την πραγματική της γεωμετρία, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη τόξου συναρμογής.

**Συνοριακές Συνθήκες.**-Όπως φάνηκε και στα Σχήματα 4.20 και 4.21 (τα άκρα του καμπύλου τμήματος και αρχές των ευθύγραμμων τμημάτων βρίσκονται στις θέσεις 96.5 και 103.5m) αντίστοιχα τα ευθύγραμμα τμήματα σε απόσταση μέχρι 10m εκατέρωθεν του τόξου συναρμογής μετακινούνται εγκάρσια και καμπυλώνονται έντονα, με αποτέλεσμα οι αντίστοιχες παραμορφώσεις να ξεπερνούν το όριο διαρροής του χάλυβα του αγωγού και να αναπτύσσεται η οριακή τιμή της εγκάρσιας οριζόντιας εδαφικής αντίστασης. Παρόλα αυτά, το μήκος των εν λόγω τμημάτων είναι άγνωστο και επομένως, εισάγονται απλοποιητικά ως συνοριακές συνθήκες στο τόξο μέσω στροφικών και εγκάρσιων ελατηρίων, αφού το μήκος τους πριν την επίλυση είναι άγνωστο. (Σχήμα 5.2.α) Επιπλέον, γίνεται η παραδοχή ότι αυτά τα ελατήρια είναι ελαστικά, δηλαδή ότι το υλικό του αγωγού που προσομοιώνουν παραμένει ελαστικό και γραμμικό, όπως και οι εγκάρσιες αντιδράσεις του εδάφους. Έτσι, οι σταθερές των ελατηρίων προκύπτουν από την ανάλυση του αγωγού με τη θεωρία απειρομήκους ελαστικής δοκού σε ελατηριωτό έδαφος. Το μήκος πέραν της γωνίας, το οποίο παραμορφώνεται αξονικά και δέχεται την οριακή τριβή του εδάφους (Σχήμα 4.19.α) εισάγεται ως ισοδύναμο αξονικό ελατήριο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.20.δ στο ένα άκρο του τόξου η ροπή έχει τιμή πολύ κοντά στο μηδέν, οπότε γίνεται η παραδοχή ότι στο αντίστοιχο άκρο του τόξου υπάρχει ελευθερία στροφών και οι ροπές είναι μηδενικές.

**Φορτίσεις.**-Η κύρια φόρτιση που δέχεται το υπό ανάλυση τόξο συναρμογής είναι αξονική μετακίνηση  $\delta$  στο άκρο A (Σχήμα 5.2.β). Η πρώτη εκτίμηση για αυτή τη μετακίνηση είναι η αξονική μετακίνηση που θα επιβαλλόταν στο ίδιο σημείο του αγωγού για την ίδια μετακίνηση ρήγματος εφόσον δεν υπήρχε γωνία. Ο υπολογισμός αυτής της μετακίνησης πραγματοποιείται με την ολοκλήρωση των παραμορφώσεων πέραν του σημείου της γωνίας. Οι υπόλοιπες φορτίσεις που επιβάλλονται είναι οι εγκάρσιες και αξονικές κατανεμημένες αντιδράσεις του εδάφους, οι οποίες εισάγονται με την οριακή πλαστική τιμή τους, αμελώντας την αρχικά ελαστική τους συμπεριφορά, αφού η μετακίνηση διαρροής τους είναι αρκετά μικρή.

**Μέθοδος επίλυσης και Μη-γραμμικότητες του προβλήματος.**-Το τόξο συναρμογής με τις προαναφερθείσες συνοριακές συνθήκες και φόρτιση επιλύεται με μεθόδους μητρικής στατικής. Η μη γραμμική συμπεριφορά του χάλυβα του αγωγού εισάγεται με ισοδύναμο τέμνον μέτρο ελαστικότητας. Φαινόμενα μη γραμμικότητας γεωμετρίας απλοποιητικά δεν λαμβάνονται υπόψη στις εξισώσεις, καθώς θα αύξαναν ιδιαίτερα την πολυπλοκότητα της επίλυσης. Επιβάλλοντας μετακίνηση στη γωνία προκύπτει η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στο σημείο A, καθώς και οι μέγιστες παραμορφώσεις στη θέση του δυσμενέστερου ζεύγους ροπής και αξονικής δύναμης.



**ΣΧΗΜΑ 5.2:** Γεωμετρία του καμπύλου τμήματος του αγωγού με τις κατανεμημένες φορτίσεις του εδάφους. α) Αριθμητικό προσομοίωμα και β) Προσομοίωμα της προτεινόμενης μεθόδου.

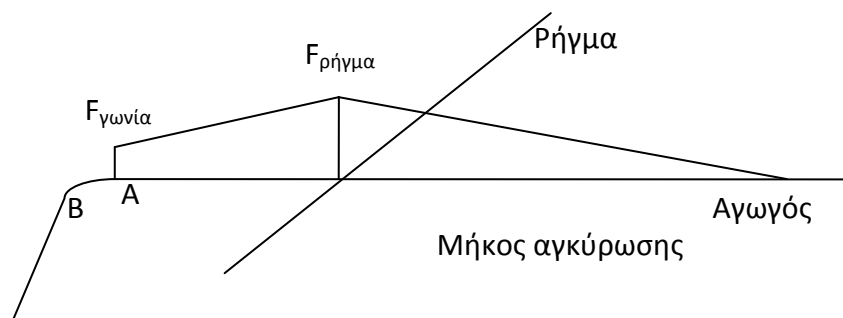
### 5.1.2. Ανάλυση της αλληλεπίδρασης του αναλυόμενου τμήματος αγωγού στην περιοχή της γωνίας με το αντίστοιχο τμήμα αγωγού στην περιοχή του ρήγματος

Η αλληλεπίδραση μεταξύ του αναλυόμενου τμήματος αγωγού στην περιοχή της γωνίας με το αντίστοιχο τμήμα αγωγού στην περιοχή του ρήγματος λαμβάνεται υπόψη στην αναλυτική μεθοδολογία μέσω εξισώσεων συμβιβαστού των αξονικών μετακινήσεων και των αντίστοιχων αξονικών παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα θεωρείται ότι η διαφορά της επιβαλλόμενης μετακίνησης του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος μείον τη μετακίνηση στην περιοχή της γωνίας ισούται με το ολοκλήρωμα των αξονικών παραμορφώσεων (που προκύπτουν από τις αξονικές δυνάμεις θεωρώντας ελαστική συμπεριφορά) του αγωγού εκατέρωθεν της περιοχής του ρήγματος μέχρι την περιοχή της γωνίας. Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού, Σχήμα 5.3. Η μέγιστη αξονική δύναμη του αγωγού αναπτύσσεται στην τομή του άξονα του αγωγού με το ίχνος του ρήγματος και μειώνεται γραμμικά με την απόσταση από εκείνο το σημείο λόγω της μέγιστης αξονικής αντίστασης του εδάφους που αναπτύσσεται (τριβή) μέχρι κάποιο μήκος που ονομάζεται μήκος αγκύρωσης. Στην περίπτωση όπου το μήκος αγκύρωσης είναι μικρότερο της απόστασης ρήγματος γωνίας, τότε η κατανομή των αξονικών δυνάμεων είναι συμμετρική και η γωνία δεν επηρεάζεται από την μετακίνηση στην περιοχή του ρήγματος.

Στην παραπάνω θεώρηση, όμως, η μετακίνηση του αγωγού στην περιοχή της γωνίας δεν είναι γνωστή. Έτσι επιβάλλεται σύμφωνα με την επόμενη παράγραφο μία αρχική τιμή της μετακίνησης στο σημείο της γωνίας και υπολογίζεται η αντίστοιχη δύναμη σύμφωνα με το Βήμα 1. Από τη δύναμη αυτή και μέσω του συμβιβαστού των παραμορφώσεων (Βήμα 2) προκύπτει μία νέα μετακίνηση όπου επιβάλλεται ξανά στη γωνία (Βήμα 1) μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση.



Ως αρχική τιμή στις επαναλήψεις εισάγεται η δύναμη στο σημείο που υπάρχει η γωνία, θεωρώντας ότι ο αγωγός είναι ευθύγραμμος. Αν η μετακίνηση αυτή είναι μηδενική ή αρνητική, τότε η γωνία βρίσκεται εκτός του μήκους αγκύρωσης του αγωγού και επομένως δεν επηρεάζει την εντατική του κατάσταση. Παράλληλα, αυτή η μετακίνηση είναι η ελάχιστη που μπορεί να αναπτυχθεί στο σημείο A. Λόγω της ύπαρξης της γωνίας η πραγματική μετακίνηση είναι μεγαλύτερη. Επομένως, δεν υπάρχει φυσικό νόημα εάν η μετακίνηση της γωνίας μειωθεί περαιτέρω της αρχικής που επιβάλλεται, αυτό ορίζεται επίσης ως κριτήριο για το αν υπάρχει αλληλεπίδραση ρήγματος γωνίας, τότε αρκεί η επίλυση με μία μέθοδο για ευθύγραμμο αγωγό.



**ΣΧΗΜΑ 5.3:** Κατανομή των αξονικών δυνάμεων του αγωγού κατά το μήκος του. Σημειώνονται οι θέσεις του ρήγματος και της γωνίας.

### 5.1.3. Ανάλυση της εντατικής κατάστασης και παραμόρφωσης του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος

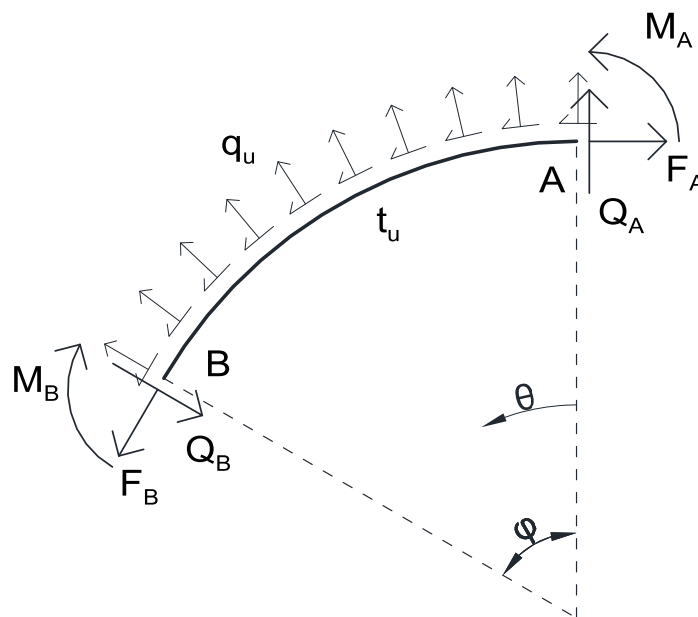
Οι υφιστάμενες μέθοδοι υπολογισμού της εντατικής κατάστασης ευθύγραμμου αγωγού σε διασταύρωση με ρήγματα (για παράδειγμα Karamitros et al.2007, Karamitros et al.2011, Trifonov et al. 2011) υπολογίζουν την αξονική δύναμη στην περιοχή του ρήγματος μέσω εξισώσεων συμβιβαστού των παραμορφώσεων αντίστοιχα με το Βήμα 2. Η δύναμη που υπολογίζεται παραμένει σταθερή για το υπόλοιπο των μεθόδων. Οπότε, αφού έχει επιτευχθεί σύγκλιση σε ένα ζεύγος δύναμης και μετακίνησης στα 2 πρώτα βήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας υπολογίζεται η αξονική δύναμη του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος και βάσει αυτής προκύπτουν οι αντίστοιχες παραμορφώσεις, χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε από τις ανωτέρω μεθοδολογίες.

## 5.2. Αποδείξεις των βασικών μητρώων της αναλυτικής μεθόδου

Στα παρακάτω παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η θεωρία με την οποία εξάγονται όλες οι εξισώσεις για τα μητρώα στιβαρότητας, ελατηρίων και δράσεων παγίωσης της προτεινόμενης αναλυτικής μεθόδου. Η εφαρμογή της μεθόδου και χρήση των εξισώσεων είναι αντικείμενο των παραγράφων 5.3 και 5.4.

### 5.2.1. Βασικός φορέας του προβλήματος και συμβολισμοί

Παρουσιάζονται οι γενικές εξισώσεις ισορροπίας του καμπύλου τμήματος αγωγού AB, με ακτίνα R, και γωνία  $\phi$ , το οποίο δέχεται εγκάρσια ακτινική κατανεμημένη αντίδραση  $q_u$  και τριβή  $t_u$  (Σχήμα 5.4):



**ΣΧΗΜΑ 5.4:** Γεωμετρία του καμπύλου τμήματος του αγωγού με τα εντατικά μεγέθη και τις κατανεμημένες φορτίσεις του εδάφους.

Οι εξισώσεις ισορροπίας του εξεταζόμενου τμήματος του αγωγού είναι:

Ισορροπία δυνάμεων κατά τη διεύθυνση της δύναμης  $F_A$ :

$$F_A - F_B \cos\phi + Q_B \sin\phi + R q_u (\cos\phi - 1) - R t_u \sin\phi = 0 \quad (5.1)$$

Ισορροπία δυνάμεων κατά τη διεύθυνση της δύναμης  $Q_A$ :

$$Q_A - Q_B \cos\phi - F_B \sin\phi + R t_u (\cos\phi - 1) + R q_u \sin\phi = 0 \quad (5.2)$$

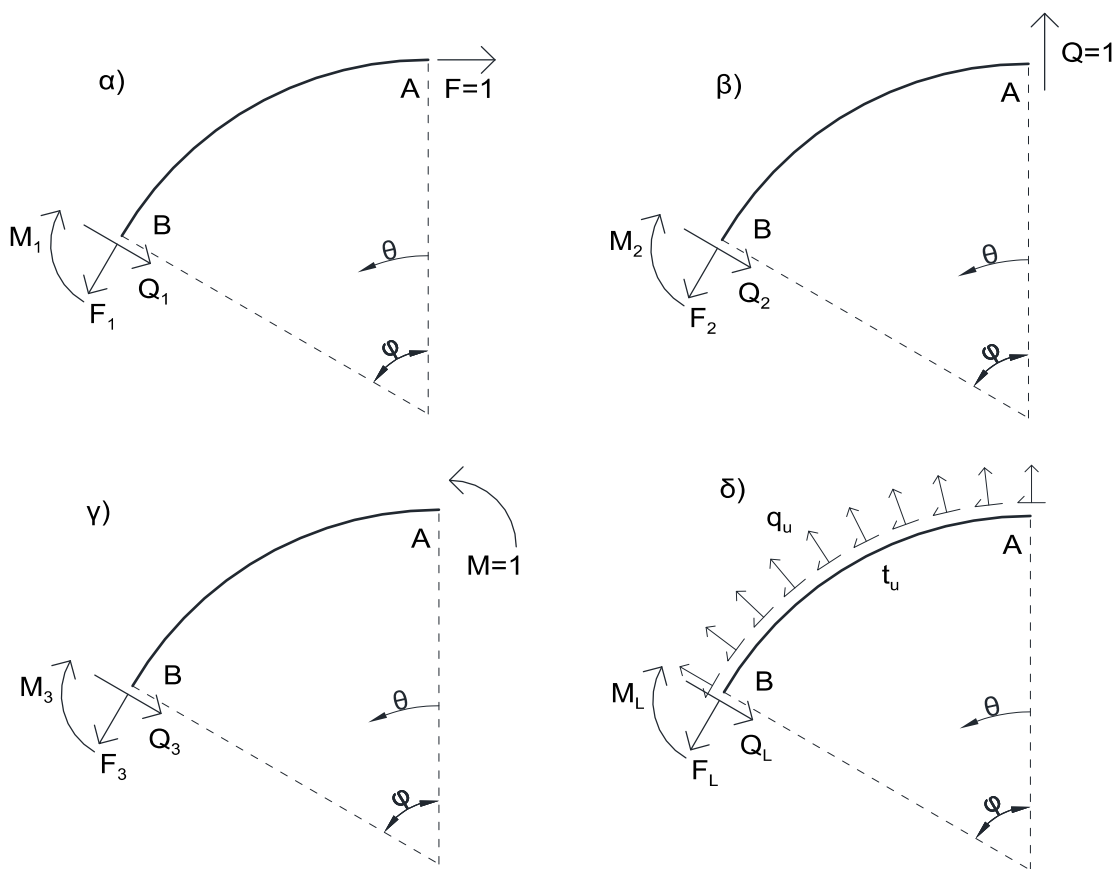
Ισορροπία ροπών στο σημείο B:

$$M_A - M_B + F_A R (\cos\phi - 1) + R^2 t_u (\phi - \sin\phi) - R^2 q_u (\cos\phi - 1) + Q_A R \sin\phi = 0 \quad (5.3)$$

### 5.2.2. Μητρώο Στιβαρότητας Καμπύλου Φορέα

Για την επίλυση του υπερστατικού προβλήματος θα εφαρμοστεί η μέθοδος άμεσης δυσκαμψίας. Επομένως, απαιτείται πρώτα ο υπολογισμός του μητρώου στιβαρότητας. Αυτό θα επιτευχθεί με τον υπολογισμό του μητρώου ευκαμψίας για τον αναλυόμενο φορέα με συνοριακές συνθήκες προβόλου (πάκτωση στο σημείο Β Σχήμα 5.4) και την αντιστροφή του. Τα υπόλοιπα στοιχεία του μητρώου δυσκαμψίας υπολογίζονται με βάση αυτό το υπομητρώο.

Ακολουθεί η διαδικασία του υπολογισμού του μητρώου στιβαρότητας ενός καμπύλου φορέα και ο υπολογισμός των δράσεων παγίωσης. Ο υπολογισμός του μητρώου ευκαμψίας γίνεται μέσω της επιβολής μοναδιαίων φορτίσεων (1,2,3) στον προαναφερθέντα πρόβολο και συγκεκριμένα στο ελεύθερο άκρο του (Α).



**ΣΧΗΜΑ 5.5:** α,β,γ) Μοναδιαίες φορτίσεις (1 αξονική, 2 τέμνουσα, 3 ροπή) με τις αντίστοιχες αντιδράσεις τους. δ) Ενδιάμεση φόρτιση  $q_u$  και  $t_u$  (L) με τις αντίστοιχες αντιδράσεις.

Παρακάτω δίδονται οι αντιδράσεις του φορέα για τις φορτίσεις του σχήματος 5.5. Αντικαθιστώντας την τιμή της γωνίας  $\varphi$  του αγωγού με τη γωνία  $\theta$ , προκύπτουν οι αντίστοιχες κατανομές ροπών, τεμνουσών και αξονικών δυνάμεων στο εξεταζόμενο τμήμα του αγωγού.

Φόρτιση 1:

$$F_1 = \cos\varphi \quad (5.4)$$

$$Q_1 = -\sin\varphi \quad (5.5)$$

$$M_1 = R(\cos\varphi - 1) \quad (5.6)$$

Φόρτιση 2:

$$F_2 = \sin\varphi \quad (5.7)$$

$$Q_2 = \cos\varphi \quad (5.8)$$

$$M_2 = R\sin\varphi \quad (5.9)$$

Φόρτιση 3:

$$F_3 = 0 \quad (5.10)$$

$$Q_3 = 0 \quad (5.11)$$

$$M_3 = 1 \quad (5.12)$$

Οι συντελεστές του μητρώου ευκαμψίας είναι οι μετακινήσεις που προκαλούν οι παραπάνω μοναδιαίες φορτίσεις (1,2,3). Οι μετακινήσεις που προκαλεί η κάθε μοναδιαία φόρτιση υπολογίζονται από την αρχή των δυνατών έργων. Ο πρώτος δείκτης κάθε συντελεστή αναφέρεται στο βαθμό ελευθερίας της μετακίνησης που υπολογίζεται (1 εφαπτομενική-αξονική, 2 ακτινική, 3 στροφική), και ο δεύτερος δείκτης αναφέρεται στο βαθμό ελευθερίας της μοναδιαίας φόρτισης, όπως υποδεικνύονται στο Σχήμα 5.5.

$$\begin{aligned} F_{11} &= \int_0^\varphi \frac{M_1^2 R d\theta}{EI} + \int_0^\varphi \frac{F_1^2 R d\theta}{EA} = \\ &= \frac{R}{EA} \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\sin 2\varphi}{4} \right) + \frac{R^3}{EI} \left( \frac{3\varphi}{2} + \frac{\sin 2\varphi}{4} - 2\sin\varphi \right) \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} F_{12} &= \int_0^\varphi \frac{M_1 M_2 R d\theta}{EI} + \int_0^\varphi \frac{F_1 F_2 R d\theta}{EA} = \\ &= \frac{R^3}{EI} \left( \cos\varphi - \frac{1}{2} - \frac{\cos^2\varphi}{2} \right) - \frac{R}{2EA} (\cos^2\varphi - 1) \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$F_{13} = \int_0^\varphi \frac{M_1 M_3 R d\theta}{EI} + \int_0^\varphi \frac{F_1 F_3 R d\theta}{EA} = -\frac{R^2}{EI} (\varphi - \sin\varphi) \quad (5.15)$$

$$F_{22} = \int_0^\varphi \frac{M_2^2 R d\theta}{EI} + \int_0^\varphi \frac{F_2^2 R d\theta}{EA} = \frac{R(2\varphi - \sin 2\varphi)}{4} \left( \frac{R^2}{EI} + \frac{1}{EA} \right) \quad (5.16)$$

$$F_{23} = \int_0^\varphi \frac{M_2 M_3 R d\theta}{EI} + \int_0^\varphi \frac{F_2 F_3 R d\theta}{EA} = -\frac{R^2}{EI} (\cos\varphi - 1) \quad (5.17)$$

$$F_{33} = \int_0^\varphi \frac{M_3^2 R d\theta}{EI} + \int_0^\varphi \frac{F_3^2 R d\theta}{EA} = \frac{R\varphi}{EI} \quad (5.18)$$

Οι δράσεις  $X_{ij}$  (όπου  $i$  ο βαθμός ελευθερίας της δράσης και  $j$  ο βαθμός ελευθερίας της μοναδιαίας δύναμης) στο ελεύθερο άκρο A του προβόλου υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις συμβιβαστού των παραμορφώσεων. Κατούσιαν πραγματοποιείται αντιστροφή του μητρώου ευκαμψίας ώστε να προκύψει το μητρώο δυσκαμψίας.

$$F_{11} X_{11} + F_{12} X_{21} + F_{13} X_{31} = u = 1$$

$$F_{21} X_{11} + F_{22} X_{21} + F_{23} X_{31} = 0 \quad (5.19)$$

$$F_{31} X_{11} + F_{32} X_{21} + F_{33} X_{31} = 0$$

$$F_{11} X_{12} + F_{12} X_{22} + F_{13} X_{32} = 0$$

$$F_{21} X_{12} + F_{22} X_{22} + F_{23} X_{32} = v = 1 \quad (5.20)$$

$$F_{31} X_{12} + F_{32} X_{22} + F_{33} X_{32} = 0$$

$$F_{11} X_{13} + F_{12} X_{23} + F_{13} X_{33} = 0$$

$$F_{21} X_{13} + F_{22} X_{23} + F_{23} X_{33} = 0 \quad (5.21)$$

$$F_{31} X_{13} + F_{32} X_{23} + F_{33} X_{33} = f = 1$$

Αφού βρέθηκαν τα υπερστατικά μεγέθη  $X_{ij}$ , οι αντιδράσεις στο πακτωμένο άκρο του προβόλου B υπολογίζονται μέσω των εξισώσεων ισορροπίας του προβόλου 5.1 έως και 5.3. Το μητρώο δυσκαμψίας τελικώς κατασκευάζεται ως εξής: Αρχικά κατασκευάζονται οι πρώτες τρεις στήλες του μητρώου δυσκαμψίας, που αντιστοιχούν στο άκρο A του φορέα. Για το άκρο B, οι συντελεστές στο άνω δεξιά 3X3 υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη τη συμμετρία του μητρώου από το κάτω αριστερά 3X3 και αντίστοιχα συμπληρώνονται τα υπόλοιπα στοιχεία που λείπουν.

$$[\mathbf{K}] = \begin{bmatrix}
 X_{11} & X_{12} & X_{13} \\
 X_{21} & X_{22} & X_{23} \\
 X_{31} & X_{32} & X_{33} \\
 X_{21} \sin \varphi + X_{11} \cos \varphi & X_{22} \sin \varphi + X_{12} \cos \varphi & X_{23} \sin \varphi + X_{13} \cos \varphi \\
 X_{21} \cos \varphi - X_{11} \sin \varphi & X_{22} \cos \varphi - X_{12} \sin \varphi & X_{23} \cos \varphi - X_{13} \sin \varphi \\
 X_{11} R(\cos \varphi - 1) + X_{21} R \sin \varphi + X_{31} & X_{12} R(\cos \varphi - 1) + X_{22} R \sin \varphi + X_{32} & X_{13} R(\cos \varphi - 1) + X_{23} R \sin \varphi + X_{33} \\
 \\
 X_{14} & X_{15} & X_{16} \\
 X_{24} & X_{25} & X_{26} \\
 X_{34} & X_{35} & X_{36} \\
 X_{24} \sin \varphi + X_{14} \cos \varphi & X_{25} \sin \varphi + X_{15} \cos \varphi & X_{26} \sin \varphi + X_{16} \cos \varphi \\
 X_{24} \cos \varphi - X_{14} \sin \varphi & X_{25} \cos \varphi - X_{15} \sin \varphi & X_{26} \cos \varphi - X_{16} \sin \varphi \\
 X_{14} R(\cos \varphi - 1) + X_{24} R \sin \varphi + X_{34} & X_{15} R(\cos \varphi - 1) + X_{25} R \sin \varphi + X_{35} & X_{16} R(\cos \varphi - 1) + X_{26} R \sin \varphi + X_{36}
 \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

Τελικώς κατασκευάζεται ένα μητρώο 6x6 με την ακόλουθη φυσική ερμηνεία: εάν επιβληθεί μοναδιαία μετακίνηση κατά οποιονδήποτε βαθμό ελευθερίας, τότε η αντίστοιχη στήλη του μητρώου είναι οι αντιδράσεις στα δύο άκρα του φορέα.

Συγκεκριμένα, κατασκευάζεται το μητρώο ως εξής:

$$[\mathbf{K}] = \begin{bmatrix}
 [\mathbf{F}]^{-1} & ([\mathbf{F}]^{-1})^T [\mathbf{\Lambda}]^T \\
 [\mathbf{\Lambda}][\mathbf{F}]^{-1} & [\mathbf{\Lambda}][\mathbf{F}]^{-1} ([\mathbf{F}]^{-1})^T [\mathbf{\Lambda}]^T
 \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

Όπου:

$$[\mathbf{\Lambda}] = \begin{bmatrix}
 \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\
 -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\
 R(\cos \varphi - 1) & R \sin \varphi & 1
 \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

$$[\mathbf{F}] = \begin{bmatrix}
 F_{11} & F_{12} & F_{13} \\
 F_{12} & F_{22} & F_{23} \\
 F_{13} & F_{23} & F_{33}
 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

### 5.2.3. Δράσεις Παγίωσης

Με μία διαδικασία αντίστοιχη με αυτήν της παραγράφου 5.2.2 υπολογίζονται στα παρακάτω οι δράσεις παγίωσης του φορέα, μέσω των οποίων εισάγονται στην επίλυση οι ενδιάμεσες φορτίσεις του φορέα, δηλαδή οι κατανεμημένες αντιδράσεις του εδάφους.

Για την εύρεση των δράσεων παγίωσης επιβάλλονται αντίστοιχα οι ενδιάμεσες φορτίσεις  $q_u$  και  $t_u$  (L) με τις ακόλουθες αντιδράσεις (Σχήμα 5.5.δ).

Φόρτιση L:

$$F_L(\theta) = -Rq_u(\cos\theta - 1) - Rt_u \sin\theta \quad (5.26)$$

$$Q_L(\theta) = Rq_u \sin\theta - Rt_u(\cos\theta - 1) \quad (5.27)$$

$$M_L(\theta) = R^2 t_u(\theta - \sin\theta) - R^2 q_u(\cos\theta - 1) \quad (5.28)$$

Οι μετακινήσεις που προκαλούνται στο ελεύθερο άκρο του προβόλου λόγω της ενδιάμεσης φόρτισης L υπολογίζονται σύμφωνα με την αρχή των δυνατών έργων. Οι δείκτες 1,2,3 στις μετακινήσεις  $\Delta_{iL}$  υποδηλώνουν το βαθμό ελευθερίας της μετακίνησης.

$$\begin{aligned} \Delta_{1L} &= \int_0^\varphi \frac{M_1 M_L R d\theta}{EI} + \int_0^\varphi \frac{F_1 F_L R d\theta}{EA} = \\ &= \frac{R^2}{EA} \left( q_u \sin\varphi - \frac{t_u \sin^2\varphi + \varphi q_u + q_u \cos\varphi \sin\varphi}{2} \right) \\ &+ \frac{R^4}{EI} \left( 2q_u \sin\varphi + \varphi t_u \sin\varphi - \frac{t_u \sin^2\varphi + 3\varphi q_u + \varphi^2 t_u + q_u \cos\varphi \sin\varphi}{2} \right) \end{aligned} \quad (5.29)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{2L} &= \int_0^\varphi \frac{M_2 M_L R d\theta}{EI} + \int_0^\varphi \frac{F_2 F_L R d\theta}{EA} = \\ &= \frac{R^2}{EA} \left[ -\frac{q_u \sin^2\varphi}{2} - t_u \left( \frac{\varphi}{2} - \frac{\sin 2\varphi}{4} \right) - q_u (\cos\varphi - 1) \right] \\ &+ \frac{R^4}{EI} \left[ t_u (\sin\varphi - \varphi \cos\varphi) - q_u (\cos\varphi - 1) - \frac{q_u \sin^2\varphi}{2} - t_u \left( \frac{\varphi}{2} - \frac{\sin 2\varphi}{4} \right) \right] \end{aligned} \quad (5.30)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{3L} &= \int_0^\varphi \frac{M_3 M_L R d\theta}{EI} + \int_0^\varphi \frac{F_3 F_L R d\theta}{EA} = \\ &= \frac{R^3}{EI} \left[ t_u (\cos\varphi - 1) - q_u \sin\varphi + \varphi q_u + \frac{\varphi^2 t_u}{2} \right] \end{aligned} \quad (5.31)$$

Οι δράσεις  $\chi_{iL}$  που πρέπει να επιβληθούν στο ελεύθερο άκρο του προβόλου ώστε να παραμένει παγιωμένος με την επιβολή των  $q_u$  και  $t_u$  υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις συμβιβαστού των παραμορφώσεων:

$$\begin{aligned}
 \Delta_{1L} + F_{11} X_{1L} + F_{12} X_{2L} + F_{13} X_{3L} &= 0 \\
 \Delta_{2L} + F_{21} X_{1L} + F_{22} X_{2L} + F_{23} X_{3L} &= 0 \\
 \Delta_{3L} + F_{31} X_{1L} + F_{32} X_{2L} + F_{33} X_{3L} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{5.32}$$

Τέλος, υπολογίζονται οι δράσεις παγίωσης, το αντίθετο των οποίων εφαρμόζεται στο φορέα ως φόρτιση:

$$[P] = -[P_L] = - \begin{bmatrix} X_{1L} \\ X_{2L} \\ X_{3L} \\ X_{2L} \sin\varphi + X_{1L} \cos\varphi + F_L \\ X_{2L} \cos\varphi - X_{1L} \sin\varphi + Q_L \\ X_{1L} R(\cos\varphi - 1) + X_{2L} R \sin\varphi + X_{3L} + M_L \end{bmatrix}
 \tag{5.33}$$

Συνοπτικότερα, κατασκευάζεται το μητρώο ως εξής:

$$[P_L] = \begin{bmatrix} [F]^{-1} [\Delta_L] \\ [\Lambda][F]^{-1} [\Delta_L] + \begin{bmatrix} F_L \\ Q_L \\ M_L \end{bmatrix} \end{bmatrix}
 \tag{5.34}$$

Όπου:

$$[\Delta_L] = \begin{bmatrix} -\Delta_{1L} \\ -\Delta_{2L} \\ -\Delta_{3L} \end{bmatrix}
 \tag{5.35}$$

$$F_L = -R q_u (\cos\varphi - 1) - R t_u \sin\varphi
 \tag{5.36}$$

$$Q_L = R q_u \sin\varphi - R t_u (\cos\varphi - 1)
 \tag{5.37}$$

$$M_L = R^2 t_u (\varphi - \sin\varphi) - R^2 q_u (\cos\varphi - 1)
 \tag{5.38}$$

#### 5.2.4. Συνοριακές συνθήκες δοκού

**Στροφικά και μετακινησιακά ελατήρια.**-Υπολογίζονται οι σταθερές των στροφικών και μετακινησιακών ελατηρίων οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στη μέθοδο, λαμβάνοντας υπόψη τις εγκάρσιες κατανεμημένες αντιδράσεις του εδάφους.

Οι εγκάρσιες μετακινήσεις  $w$  απειρομήκους ελαστικής δοκού που εδράζεται σε ελαστικό έδαφος Winkler περιγράφονται από τη διαφορική εξίσωση:

$$E_I I w'''' + k w = 0
 \tag{5.39}$$



Όπου:

$E_1$ : το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα του αγωγού

$I$ : η καμπτική ροπή αδρανείας της διατομής του αγωγού

$k$ : ο λόγος οριακής αντίδρασης του εδάφους προς τη μετακίνηση διαρροής του

Η γενική λύση της διαφορικής εξίσωσης για μηδενική μετακίνηση και στροφή στο άπειρο και για οποιαδήποτε μετακίνηση και στροφή στην αρχή της ελαστικής δοκού:

$$w = e^{-\lambda x} C_1 \sin \lambda x + e^{-\lambda x} C_2 \cos \lambda x \quad (5.40)$$

Παραγωγίζοντας ως προς την απόσταση από την αρχή της δοκού  $x$ , λαμβάνονται οι στροφές (πρώτη παράγωγος) και οι καμπυλότητες (δεύτερη παράγωγος).

$$\frac{dw}{dx} = e^{-\lambda x} C_1 \lambda \cos \lambda x - e^{-\lambda x} C_2 \lambda \cos \lambda x - e^{-\lambda x} C_1 \lambda \sin \lambda x - e^{-\lambda x} C_2 \lambda \sin \lambda x \quad (5.41)$$

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = e^{-\lambda x} 2C_2 \lambda^2 \sin \lambda x - e^{-\lambda x} 2C_1 \lambda^2 \cos \lambda x \quad (5.42)$$

$$\frac{d^3 w}{dx^3} = e^{-\lambda x} 2C_1 \lambda^3 \cos \lambda x + e^{-\lambda x} 2C_2 \lambda^3 \cos \lambda x + e^{-\lambda x} 2C_1 \lambda^3 \sin \lambda x - e^{-\lambda x} 2C_2 \lambda^3 \sin \lambda x \quad (5.43)$$

Όπου:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4E_1 I}} \quad (5.44)$$

Επιβάλλοντας τυχαίες συνοριακές συνθήκες στη θέση  $x=0$ , δηλαδή για οποιαδήποτε μετακίνηση και στροφή, υπολογίζονται οι τιμές των παραμέτρων  $C_1$  και  $C_2$ .

$$w(0) = C_2 \quad (5.45)$$

$$\frac{dw}{dx}(0) = \lambda C_1 - \lambda C_2 \rightarrow C_1 = \frac{\frac{dw}{dx}(0) + \lambda w(0)}{\lambda} \quad (5.46)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις θετικές φορές ροπών και τεμνουσών του Σχήματος 5.4 ισχύει ότι:

$$M = -EI \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (5.47)$$

$$Q = EI \frac{d^3 w}{dx^3} \quad (5.48)$$

Επομένως, για το άκρο A του φορέα προκύπτουν οι παρακάτω συνοριακές συνθήκες:

$$Q = 4EI\lambda^3 w(0) + 2EI\lambda^2 \frac{dw}{dx}(0) \quad (5.49)$$

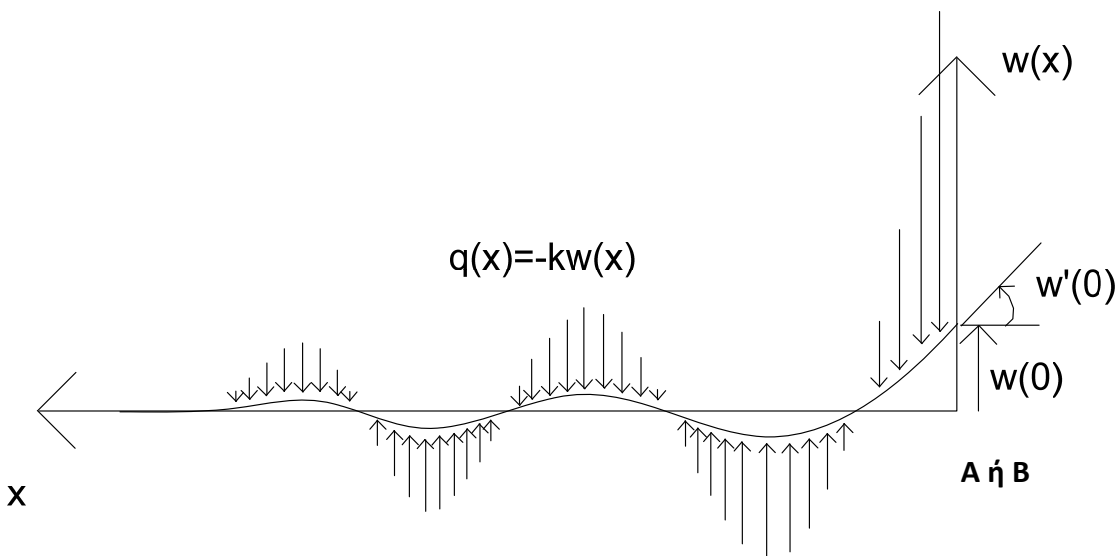
$$M = 2EI\lambda \frac{dw}{dx}(0) + 2EI\lambda^2 w(0) \quad (5.50)$$

Σημειώνεται πως οι εξισώσεις (5.49) και (5.50) είναι πεπλεγμένες. Αυτό σημαίνει πως το στροφικό ελατήριο που εισάγεται στη μέθοδο δεν εξαρτάται μόνο από τη στροφή αλλά και από τη μετακίνηση, ενώ το ελατήριο κατά τη διεύθυνση της τέμνουσας, εκτός της μετακίνησης, εξαρτάται και από τη στροφή.

Για το άκρο B του φορέα όπου υπάρχει ελευθέρωση στροφής και μηδενίζεται η ροπή (συνοριακές συνθήκες: οποιαδήποτε μετακίνηση και στροφή μηδέν) και προκύπτει το παρακάτω ελατήριο:

$$M = 0 \rightarrow \frac{dw}{dx}(0) = -\lambda w(0) \quad (5.51)$$

$$V = 2EI\lambda^3 w(0) = k_v w(0) \quad (5.52)$$



**ΣΧΗΜΑ 5.6:** Μετακινήσεις της δοκού και αντιδράσεις του εδάφους για τυχαίες συνοριακές συνθήκες.

**Αξονικό Ελατήριο.**-Υπολογίζεται η σταθερά του αξονικού ελατηρίου το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στη μέθοδο, λαμβάνοντας υπόψη την αξονικά μέγιστη κατανεμημένη αντίδραση του εδάφους.

Το αξονικό ελατήριο προσομοιώνει την αξονική επιμήκυνση του αγωγού, πέραν της περιοχής της γωνίας, λόγω της αξονικής δύναμης που αναπτύσσεται στο σημείο B. Επομένως, πρέπει να βρεθεί η μετακίνηση του αγωγού στο σημείο B για δεδομένη τάση  $\sigma_a = F_{ax} / A_s$ . Για το σκοπό αυτό υπολογίζεται η κατανομή των τάσεων (5.53) μέχρι το μήκος αγκύρωσης  $L_{anch}$  (5.54) όπου μηδενίζεται η αξονική τάση. Η τάση συνεχώς απομειώνεται με την απόσταση L από το σημείο B λόγω της τριβής  $t_u$  του αγωγού.

$$\sigma(L) = \sigma_a - \frac{t_u}{A_s} L \quad (5.53)$$

$$L_{anch} = \frac{F_{ax}}{t_u} \quad (5.54)$$

Το ολοκλήρωμα των αξονικών τάσεων κατά μήκος του αγκυρωμένου μήκους προς το μέτρο ελαστικότητας είναι η μετακίνηση του σημείου B της περιοχής της γωνίας (5.55).

$$X_{\text{axial}} = \int_0^{L_{\text{anch}}} \frac{\sigma(L)}{E_1} dL = \frac{\sigma_a^2 A_s}{2E_1 t_u} \quad (5.55)$$

Επιλύεται η εξίσωση ως προς την αξονική δύναμη στο αντίστοιχο σημείο (5.56) και έπειτα υπολογίζεται το εφαπτομενικό μέτρο δυσκαμψίας του αξονικού ελατηρίου  $K_{\text{axial}}$  (5.57).

$$F_{\text{ax}} = \sqrt{2E_1 A_s t_u} \sqrt{X_{\text{axial}}} \quad (5.56)$$

$$K_{\text{axial}} = \frac{dF_a}{dX_{\text{axial}}} = \frac{\sqrt{2E_1 A_s t_u}}{2\sqrt{X_{\text{axial}}}} = \frac{E_1 A_s t_u}{F_{\text{ax}}} \quad (5.57)$$

Λόγω του τετραγώνου στην τάση, το ελατήριο προκύπτει μη γραμμικό και εξαρτώμενο από την αξονική δύναμη, οπότε εισάγεται στους υπολογισμούς ως ισοδύναμο γραμμικό το εφαπτομενικό μέτρο δυσκαμψίας του ελατηρίου. Προκύπτει το ερώτημα για το ποια αξονική δύναμη πρέπει να τεθεί στον τύπο (5.57), εφόσον αναμένεται η τιμή της από την επίλυση μέσω του τύπου αυτού. Οπότε επιλέγεται η επαναληπτική επίλυση του προβλήματος. Αρχικά τίθεται μία εκτίμηση της αξονικής δύναμης στην επίλυση της γωνίας όση θα υπήρχε χωρίς τη γωνία σε εκείνη τη θέση (5.58). Μετά την επίλυση της γωνίας επανεκτιμάται το μέτρο δυσκαμψίας του ελατηρίου και επαναλαμβάνεται η επίλυση της γωνίας μέχρι να συγκλίνει η τιμή του ελατηρίου.

$$F_0 = \sqrt{EA t_u \Delta X} - L t_u \quad (5.58)$$

**Μητρώο ελατηρίων.**-Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω σταθερές ελατηρίων διαμορφώνεται το παρακάτω μητρώο. Το μητρώο των ελατηρίων δεν είναι διαγώνιο όπως στην πλειονότητα άλλων προβλημάτων, όπως εξηγήθηκε και στην αρχή της παρούσας παραγράφου για τα στροφικά και μετακινησιακά ελατήρια.

$$[K_{\text{springs}}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4EI\lambda^3 & 2EI\lambda^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2EI\lambda^2 & 2EI\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{EA t_u}{F_{\text{ax}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2EI\lambda^3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.59)$$

### 5.3. Η προτεινόμενη αναλυτική μέθοδος

Η μέθοδος συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

#### 5.3.1. ΒΗΜΑ 1: Ανάλυση της περιοχής της γωνίας

##### 1.1. Υπολογισμός αρχικής επιβαλλόμενης μετατόπισης στην περιοχή της γωνίας

Η αρχική δύναμη  $F_0$  υπολογίζεται από τη δύναμη που δέχεται ένας αντίστοιχος ευθύγραμμος αγωγός στην περιοχή του ρήγματος, αφαιρώντας τη συνισταμένη δύναμη που αναπτύσσεται λόγω τριβών μεταξύ της περιοχής του ρήγματος και της γωνίας. Η αξονική δύναμη στην περιοχή του ρήγματος προκύπτει από το συμβιβαστό των παραμορφώσεων αντίστοιχα με τη σχέση (5.55), με τη διαφορά ότι το μήκος αγκύρωσης είναι διπλάσιο εκατέρωθεν του ρήγματος. Αντίστοιχα και η σχέση για τη μετακίνηση προκύπτει από την ίδια σχέση (5.55).

$$F_0 = \sqrt{EA t_u \Delta X} - L t_u \quad (5.58)$$

$$\delta_0 = \frac{F_0^2}{2EA t_u} \quad (5.60)$$

##### 1.2. Επίλυση της δοκού με δεδομένα μητρώα στιβαρότητας και δράσεις παγίωσης

Ο φορέας του Σχήματος 5.2 επιλύεται με τη μέθοδο άμεσης δυσκαμψίας, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.2.1.

Συγκεκριμένα, κατασκευάζεται αρχικά το μητρώο ευκαμψίας  $[F]$ :

$$[F] = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{12} & F_{22} & F_{23} \\ F_{13} & F_{23} & F_{33} \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

Όπου:

$$F_{11} = \frac{R}{EA} \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\sin 2\varphi}{4} \right) + \frac{R^3}{EI} \left( \frac{3\varphi}{2} + \frac{\sin 2\varphi}{4} - 2\sin \varphi \right) \quad (5.13)$$

$$F_{12} = \frac{R^3}{EI} \left( \cos \varphi - \frac{1}{2} - \frac{\cos^2 \varphi}{2} \right) - \frac{R}{2EA} (\cos^2 \varphi - 1) \quad (5.14)$$

$$F_{13} = -\frac{R^2}{EI} (\varphi - \sin \varphi) \quad (5.15)$$

$$F_{22} = \frac{R(2\varphi - \sin 2\varphi)}{4} \left( \frac{R^2}{EI} + \frac{1}{EA} \right) \quad (5.16)$$

$$F_{23} = -\frac{R^2}{EI} (\cos \varphi - 1) \quad (5.17)$$

$$F_{33} = \frac{R\varphi}{EI} \quad (5.18)$$

Έπειτα, το μητρώο  $[F]$  αντιστρέφεται και μέσω αυτού κατασκευάζεται ολόκληρο το μητρώο δυσκαμψίας:

$$[K] = \begin{bmatrix} [F]^{-1} & ([F]^{-1})^T [\Lambda]^T \\ [\Lambda][F]^{-1} & [\Lambda]([F]^{-1})^T [\Lambda]^T \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

Όπου:

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ R(\cos \varphi - 1) & R \sin \varphi & 1 \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

Αντίστοιχα ξεκινώντας από το μητρώο ευκαμψίας των δράσεων, κατασκευάζεται το μητρώο των δράσεων παγίωσης:

$$[\Delta_L] = \begin{bmatrix} -\Delta_{1L} \\ -\Delta_{2L} \\ -\Delta_{3L} \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

Όπου:

$$\Delta_{1L} = \frac{R^2}{EA} \left( q_u \sin \varphi - \frac{t_u \sin^2 \varphi + \varphi q_u + q_u \cos \varphi \sin \varphi}{2} \right) + \frac{R^4}{EI} \left( 2q_u \sin \varphi + \varphi t_u \sin \varphi - \frac{t_u \sin^2 \varphi + 3\varphi q_u + \varphi^2 t_u + q_u \cos \varphi \sin \varphi}{2} \right) \quad (5.29)$$

$$\Delta_{2L} = \frac{R^2}{EA} \left[ -\frac{q_u \sin^2 \varphi}{2} - t_u \left( \frac{\varphi}{2} - \frac{\sin 2\varphi}{4} \right) - q_u (\cos \varphi - 1) \right] + \frac{R^4}{EI} \left[ t_u (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi) - q_u (\cos \varphi - 1) - \frac{q_u \sin^2 \varphi}{2} - t_u \left( \frac{\varphi}{2} - \frac{\sin 2\varphi}{4} \right) \right] \quad (5.30)$$

$$\Delta_{3L} = \frac{R^3}{EI} \left[ t_u (\cos \varphi - 1) - q_u \sin \varphi + \varphi q_u + \frac{\varphi^2 t_u}{2} \right] \quad (5.31)$$

Στη συνέχεια, αντιστρέφεται το μητρώο των δράσεων παγίωσης:

$$[P_L] = \begin{bmatrix} [F]^{-1} [\Delta_L] \\ [\Lambda][F]^{-1} [\Delta_L] + \begin{bmatrix} F_L \\ Q_L \\ M_L \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

Όπου:

$$F_L = -Rq_u(\cos\varphi - 1) - R t_u \sin\varphi \quad (5.36)$$

$$Q_L = Rq_u \sin\varphi - R t_u (\cos\varphi - 1) \quad (5.37)$$

$$M_L = R^2 t_u (\varphi - \sin\varphi) - R^2 q_u (\cos\varphi - 1) \quad (5.38)$$

Το μητρώο των ελατηρίων κατασκευάζεται ως εξής:

$$[K_{\text{springs}}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4EI\lambda^3 & 2EI\lambda^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2EI\lambda^2 & 2EI\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{EA t_u}{F_{ax}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2EI\lambda^3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.59)$$

Όπου:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4E_1 I}} \quad (5.44)$$

Το μητρώο των μετακινήσεων περιέχει ως γνωστή μετακίνηση (δεσμευμένος βαθμός ελευθερίας-s) μόνο την αξονική επιβαλλόμενη μετακίνηση δ. Η στροφή στο άλλο άκρο είναι ελεύθερη λόγω της παραδοχής μηδενισμού της ροπής, ενώ οι υπόλοιπες μετακινήσεις είναι άγνωστες διότι συνδέονται με ελατήρια (ελεύθεροι βαθμοί ελευθερίας-f).

$$[u] = \begin{bmatrix} [u_s]_{1 \times 1} = \delta \\ [u_f]_{5 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ u_{f1} \\ u_{f2} \\ u_{f3} \\ u_{f4} \\ u_{f5} \end{bmatrix} \quad (5.61)$$

Υπολογίζεται το συνολικό μητρώο δυσκαμψίας ως το άθροισμα του μητρώου δυσκαμψίας (5.22) και του μητρώου των ελατηρίων (5.59) που παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.2.2. Όσον αφορά στο μητρώο των ελατηρίων, η σταθερά του αξονικού ελατηρίου εξαρτάται από την αξονική δύναμη στο σημείο Β. Επειδή πριν την επίλυση η δύναμη αυτή δεν είναι γνωστή, προτείνεται να τεθεί ως αρχική εκτίμηση η δύναμη  $F_0$ .

$$[K_{\text{total}}] = K + K_{\text{springs}} \quad (5.62)$$

$$[K_{\text{total}}] = \begin{bmatrix} [K_{ss}]_{1 \times 1} & [K_{sf}]_{1 \times 5} \\ [K_{fs}]_{5 \times 1} & [K_{ff}]_{5 \times 5} \end{bmatrix} \quad (5.63)$$

$$[P] = -[P_L] = \begin{bmatrix} [P_s]_{1 \times 1} \\ [P_f]_{5 \times 1} \end{bmatrix}$$

Η μητρωική εξίσωση ισορροπίας για τους ελεύθερους βαθμούς ελευθερίας είναι:

$$\{P_f\} = [K_{ff}]\{u_f\} + [K_{fs}]\{u_s\} \quad (5.64)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, άγνωστο είναι το μητρώο των μη δεσμευμένων μετακινήσεων  $\{u_f\}$ .

Παρουσιάζονται οι εξισώσεις ισορροπίας για τους δεσμευμένους βαθμούς ελευθερίας.

$$\{P_s\} = [K_{sf}]\{u_f\} + [K_{ss}]\{u_s\} \quad (5.65)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, άγνωστη είναι η αξονική αντίδραση  $P_s$ .

Επιλύεται η εξίσωση (5.65) ως προς τις άγνωστες μετακινήσεις  $\{u_f\}$ :

$$\{u_f\} = [K_{ff}]^{-1}[\{P_f\} - [K_{fs}]\{u_s\}] \quad (5.66)$$

Έχοντας υπολογίσει τις μετακινήσεις και τους συντελεστές των ελατηρίων, υπολογίζονται και οι υπόλοιπες αντιδράσεις του φορέα:

$$[P_{final}] = [P_L] + [P_{solution}] - [K_{springs}][U_{solution}] \quad (5.67)$$

Επειδή για την αξονική δύναμη που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του αξονικού ελατηρίου τέθηκε ως αρχική εκτίμηση η  $F_o$ , απαιτείται η επανάληψη του βήματος αυτού με τη νέα εκτίμηση της αξονικής δύναμης για το ελατήριο (το 4<sup>ο</sup> στοιχείο του μητρώου των αντιδράσεων) έως ότου να συγκλίνει σε μία σταθερή αξονική δύναμη.

### 1.3. Υπολογισμός μέγιστης ροπής και αξονικής δύναμης

Εφόσον στο προηγούμενο βήμα προσδιορίστηκαν οι αντιδράσεις του φορέα για τη δεδομένη επιβαλλόμενη αξονική μετακίνηση, το δυσμενέστερο ζεύγος ροπής και αξονικής δύναμης.

$$M = M_1 + Q_1 R \sin \varphi - F_1 (R - R \cos \varphi) + R^2 t_u (\varphi - \sin \varphi) - R^2 q_u (\cos \varphi - 1) \quad (5.68)$$

$$F = F_1 \cos \varphi + Q_1 \sin \varphi - R q_u (\cos \varphi - 1) - R t_u \sin \varphi \quad (5.69)$$

### 1.4. Καμπτικές παραμορφώσεις

Υπολογίζονται οι καμπτικές παραμορφώσεις  $\varepsilon_b$  μέσω της σχέσης της ελαστικής θεωρίας (5.70) συναρτήσει της ροπής.

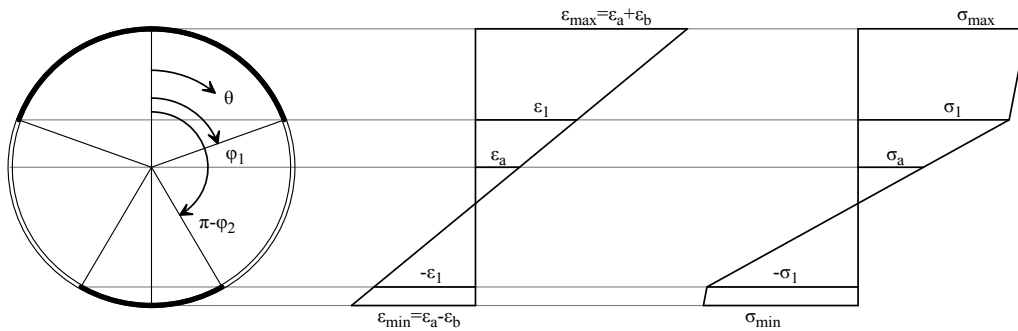
$$\varepsilon_b = \frac{M_{max} D}{2EI} \quad (5.70)$$

### 1.5. Αξονική παραμόρφωση

Για να ευρεθεί επαναληπτικά η αξονική παραμόρφωση του αγωγού  $\varepsilon_a$  στην κρίσιμη διατομή του αγωγού υποτίθεται μία αρχική τιμή 0 και υπολογίζονται ακολούθως οι συνολικές παραμορφώσεις (άθροισμα αξονικών και καμπτικών παραμορφώσεων), από τις οποίες προκύπτουν οι τάσεις. Το ολοκλήρωμα των τάσεων πάνω στη διατομή απαιτείται να είναι ίσο με την αξονική δύναμη του αγωγού  $F_a$  (Σχέση (5.71)(5.72)): (βλ. Σχήμα 2.7)

$$\varphi_{1,2} = \begin{cases} \pi & , \frac{\varepsilon_1 \mp \varepsilon_a}{\varepsilon_b} < -1 \\ \arccos\left(\frac{\varepsilon_1 \mp \varepsilon_a}{\varepsilon_b}\right) & , -1 \leq \frac{\varepsilon_1 \mp \varepsilon_a}{\varepsilon_b} \leq 1 \\ 0 & , \frac{\varepsilon_1 \mp \varepsilon_a}{\varepsilon_b} < 1 \end{cases} \quad (5.71)$$

$$F = t(t-D)[\varepsilon_a(\varphi_1 + \varphi_2)(E_1 - E_2) - \pi E_1 \varepsilon_a + \varepsilon_b(E_1 - E_2)(\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2) - \varepsilon_1(E_1 - E_2)(\varphi_1 - \varphi_2)] \quad (5.72)$$



**ΣΧΗΜΑ 2.7:** Μη γραμμική κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων σε μία διατομή του αγωγού.

Όπου:

$E_1$  το αρχικό μέτρο ελαστικότητας

$\varphi_1, \varphi_2$  τα μισά τόξα (λόγω συμμετρίας) στα οποία ο χάλυβας έχει ξεπεράσει το όριο διαρροής  $\sigma_1, \varepsilon_1$

$E_2$  το μέτρο κράτυνσης του υλικού του χάλυβα

$t$  το πάχος της διατομής του αγωγού

$D$  η διάμετρος της διατομής του αγωγού

Προτείνεται η μέθοδος Newton-Raphson ώστε να επιλυθεί η εξίσωση επαναληπτικά (Σχέσεις(5.73) (5.74)(5.75)):

$$\frac{d\varphi_{1,2}}{d\varepsilon_a} = \begin{cases} \pm \frac{1}{\varepsilon_b \sin\varphi_{1,2}} & , \varepsilon_b \sin\varphi_{1,2} \leq -0.01 \\ -100 & , -0.01 < \varepsilon_b \sin\varphi_{1,2} \leq 0 \\ \pm 100 & , 0 < \varepsilon_b \sin\varphi_{1,2} \leq 0.01 \\ \pm \frac{1}{\varepsilon_b \sin\varphi_{1,2}} & , 0.01 < \varepsilon_b \sin\varphi_{1,2} \end{cases} \quad (5.73)$$



$$\frac{dF}{d\varepsilon_a} = t(t-D) \left[ (\varphi_1 + \varphi_2)(E_1 - E_2) - \pi E_1 + \varepsilon_a \left( \frac{d\varphi_1}{d\varepsilon_a} + \frac{d\varphi_2}{d\varepsilon_a} \right) (E_1 - E_2) \right. \\ \left. - \varepsilon_1 (E_1 - E_2) \left( \frac{d\varphi_1}{d\varepsilon_a} - \frac{d\varphi_2}{d\varepsilon_a} \right) + \varepsilon_b (E_1 - E_2) \left( \frac{d\varphi_1}{d\varepsilon_a} \cos\varphi_1 - \frac{d\varphi_2}{d\varepsilon_a} \cos\varphi_2 \right) \right] \quad (5.74)$$

$$\varepsilon_a^{k+1} = \varepsilon_a^k - \frac{F(\varepsilon_a^k) - F_a}{dF / d\varepsilon_a} \quad (5.75)$$

### 1.6. Επίδραση μη γραμμικότητας του χάλυβα του αγωγού

Η ανάλυση του φορέα στα προηγούμενα βήματα πραγματοποιείται θεωρώντας ελαστική συμπεριφορά του χάλυβα του αγωγού. Για να ληφθεί υπόψη η μη γραμμικότητα του υλικού υπολογίζεται το νέο τέμνον μέτρο ελαστικότητας  $E_{sec}$ . Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η ροπή κάμψης της κρίσιμης διατομής μέσω ολοκλήρωσης των τάσεων του βήματος 5 (Σχέση (5.76)):

$$M = -\frac{t(t-D)^2}{2} \left[ \frac{\varepsilon_b (\varphi_1 + \varphi_2)(E_1 - E_2)}{2} - \varepsilon_1 (\sin\varphi_1 + \sin\varphi_2)(E_1 - E_2) \right. \\ \left. - \frac{\pi E_1 \varepsilon_b}{2} + \varepsilon_a (E_1 - E_2) (\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2) + \frac{\varepsilon_b (E_1 - E_2) (\sin 2\varphi_1 + \sin 2\varphi_2)}{4} \right] \quad (5.76)$$

Από τη σχέση που συνδέει την καμπτική ένταση με τις καμπτικές παραμορφώσεις υπολογίζεται το νέο μειωμένο μέτρο ελαστικότητας (Σχέση (5.77)):

$$E'_{sec} = \frac{M(\varepsilon_a, \varepsilon_b)D}{2I\varepsilon_b} \quad (5.77)$$

Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1.2 έως 1.6 μέχρι να υπάρξει σύγκλιση.

### 5.3.2. ΒΗΜΑ 2: Συμβιβαστό των παραμορφώσεων

Παρουσιάζεται η εξίσωση συμβιβαστού των μετακινήσεων για το βήμα 2. Η επιβαλλόμενη μετακίνηση  $\Delta X$  στο ρήγμα μοιράζεται στη μετακίνηση της γωνίας  $\delta$  και στην επιμήκυνση του τμήματος  $L$  και του  $L_1$ . Η επιμήκυνση υπολογίζεται από την ολοκλήρωση των παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού, οι οποίες παραμορφώσεις προκύπτουν από την κατανομή των αξονικών δυνάμεων (Σχήμα 5.6). Όπως εξηγείται στην παράγραφο 5.1.2. ισχύει η σχέση (5.78) και επομένως απαλείφεται από τις σχέσεις προς χάριν απλότητας η δύναμη στην περιοχή του ρήγματος, η οποία υπολογίζεται τελικώς για το επόμενο βήμα.

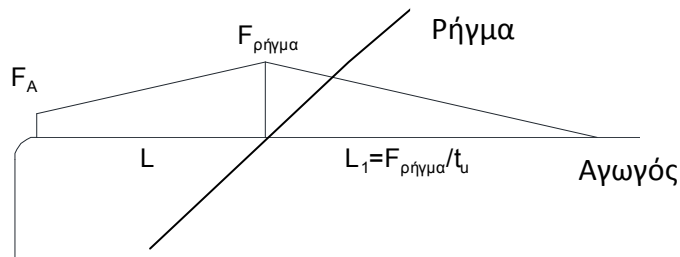
$$F_{fault} = F_c + L_0 t_u \quad (5.78)$$

$$\delta = \Delta X - \int_0^L \frac{\sigma}{E} dx - \int_0^{L_1} \frac{\sigma}{E} dx = \Delta X - \frac{(F_A + Lt_u)^2}{2 t_u EA} - \frac{L(2F_A + Lt_u)}{2EA} \quad (5.79)$$

Στην παραπάνω εξίσωση (5.79) οι άγνωστοι είναι η αξονική δύναμη  $F_A$  και η μετακίνηση της γωνίας  $\delta$ . Από το Βήμα 1 της μεθόδου προκύπτει η αξονική δύναμη και μέσω αυτής της εξίσωσης (Βήμα 2) υπολογίζεται η νέα εκτίμηση της μετακίνησης  $\delta$ . Για λόγους σύγκλισης ως αξονική δύναμη εισάγεται

το ημιάθροισμα της αξονικής δύναμης που προκύπτει από το Βήμα 1 και της αξονικής δύναμης από την προηγούμενη επανάληψη.

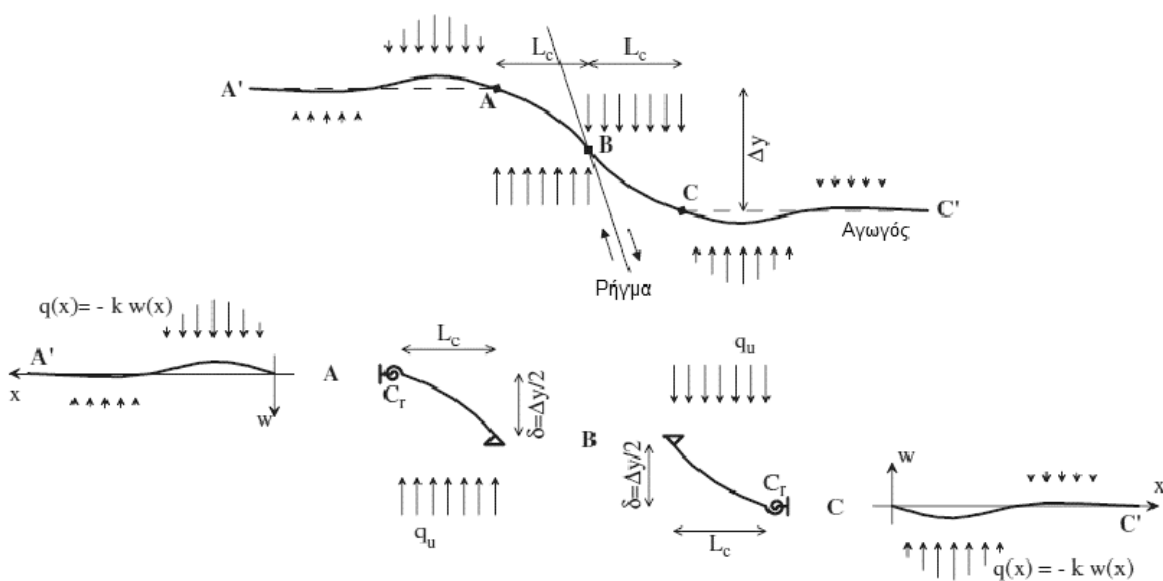
$$F_A = \frac{F + F_{\text{previous}}}{2} \quad (5.80)$$



**ΣΧΗΜΑ 5.6:** Κατανομή των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού μέχρι και την περιοχή της γωνίας.

### 5.3.3. ΒΗΜΑ 3: Ανάλυση της περιοχής του ρήγματος

Μετά τη σύγκλιση των Βημάτων 1 και 2, είναι γνωστή πλέον η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην περιοχή του ρήγματος. Έτσι μπορούν να υπολογιστούν οι μέγιστες παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος. Για το σκοπό αυτό, η προτεινόμενη αναλυτική μέθοδος χρησιμοποιεί τη μέθοδο των Karamitros et al.2007 με την τροποποίηση που θα αναπτυχθεί στη συνέχεια. Αυτή η μέθοδος αφορά ρήγματα οριζοντίας διατμήσεως. Παρόλα αυτά, δύναται να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε άλλη ισοδύναμη μέθοδος για οριζόντια ρήγματα, ή άλλη μέθοδος που να αντιμετωπίζει και κανονικά ρήγματα (για παράδειγμα Trifonov et al.2010 και Karamitros et al.2011).



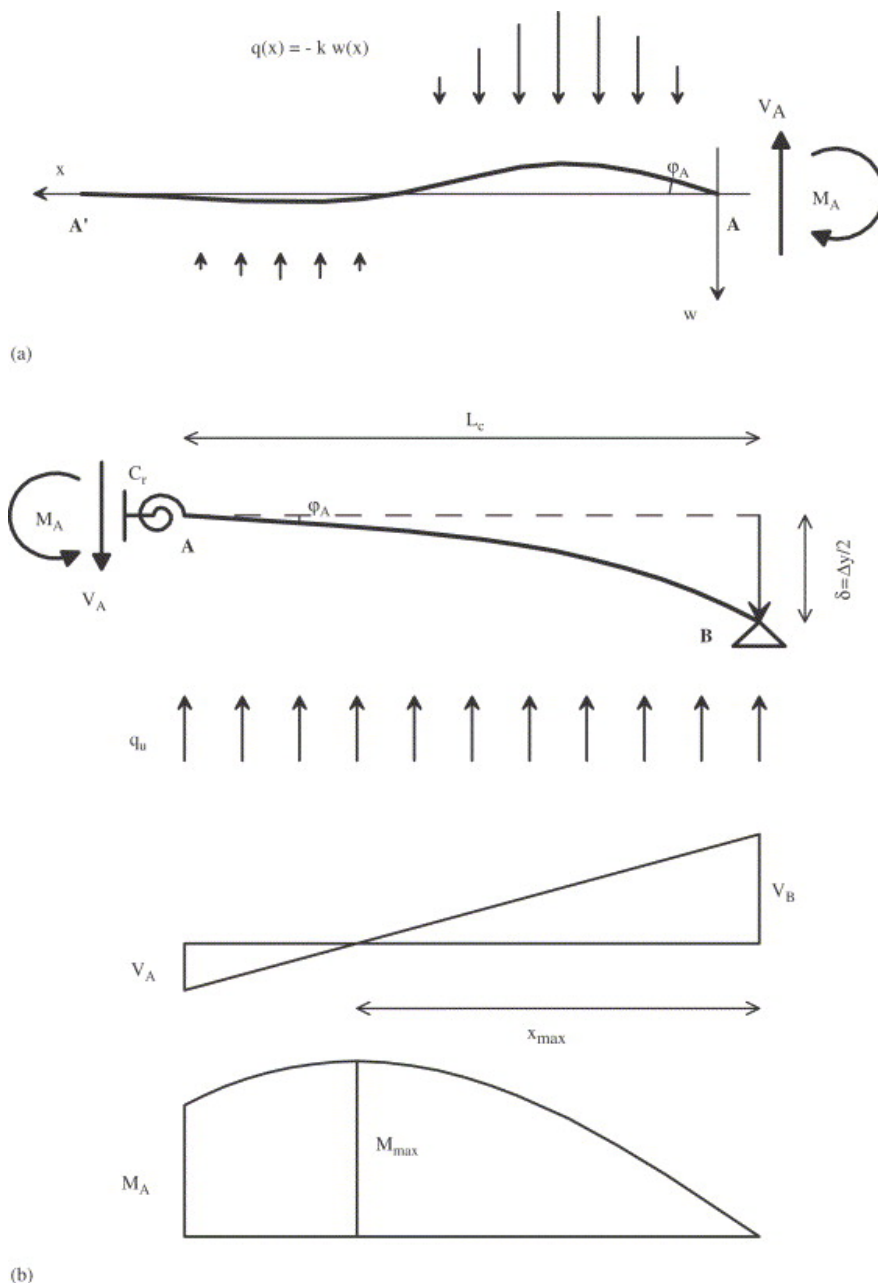
**ΣΧΗΜΑ 2.4:** Το προσομοίωμα ανάλυσης του αγωγού όπως προτάθηκε από τους Karamitros et al. (2007).

### 3.1. Ανάλυση απειρομήκου ελαστικής δοκού

Αναλύεται το τμήμα A'A όπως και τα ευθύγραμμα τμήματα στην περιοχή της γωνίας θέτοντας ως συνοριακή συνθήκη  $w(0)=0$ . Προκύπτει: (βλ. Σχήμα 2.4 και Σχήμα 2.5.a)

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4E_1I}} \quad (5.81)$$

$$C_r = 2\lambda E_1I \quad (5.82)$$



**ΣΧΗΜΑ 2.5:** Στατικό προσομοίωμα για (a) το ημιαπειρομήκου τμήμα και (b) το καμπύλο τμήμα.

### 3.2. Επίλυση ελαστικής δοκού

Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης επιβάλλονται ως συνοριακές συνθήκες στο καμπύλο τμήμα AB στο κοινό τους σημείο A ώστε να υπολογιστεί το μήκος του καμπύλου τμήματος  $L_c$  και έπειτα η μέγιστη καμπτική καταπόνηση  $M_{max}$  (Σχέσεις (5.87)(5.88)(5.89)). (βλ. Σχήμα 2.5.b) Η εξίσωση για την εύρεση του μήκους προκύπτει από τη μέθοδο μετακινήσεων της στατικής για ελαστικές δοκούς και από την επιπλέον εξίσωση  $V/M=-\lambda$  στο σημείο A. Το μήκος αυτό προτείνεται να ευρεθεί επαναληπτικά μέσω της μεθόδου Newton-Raphson (Σχέσεις (5.84)(5.85)(5.86)):

$$\delta = \frac{\Delta y}{2} \quad (5.83)$$

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 24EI\delta C_r \\ \alpha_1 &= 24EI\delta C_r \lambda \\ \alpha_3 &= 12EIq_u \\ \alpha_4 &= 5q_u C_r \\ \alpha_5 &= q_u C_r \lambda \end{aligned} \quad (5.84)$$

$$dL_c = -\frac{\alpha_5 L_c^5 + \alpha_4 L_c^4 + \alpha_3 L_c^3 - \alpha_1 L_c - \alpha_0}{5\alpha_5 L_c^4 + 4\alpha_4 L_c^3 + 3\alpha_3 L_c^2 - \alpha_1} \quad (5.85)$$

$$L_c = L_c + dL_c \quad (5.86)$$

$$V_B = \frac{3C_r q_u L_c^4 + 12q_u EIL_c^3 + 24C_r \delta EI}{8 C_r L_c^3 + 24EIL_c^2} \quad (5.87)$$

$$x_{max} = \frac{V_B}{q_u} \quad (5.88)$$

$$M_{max} = V_B x_{max} - \frac{q_u x_{max}^2}{2} \quad (5.89)$$

### 3.3. Αξονική δύναμη

Η αξονική δύναμη του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος προκύπτει από τη σύγκλιση των Βημάτων 1 και 2.

### 3.4. Καμπτικές παραμορφώσεις

Υπολογίζονται οι καμπτικές παραμορφώσεις  $\epsilon_b$ . Για μικρές μετακινήσεις ισχύει η σχέση της ελαστικής θεωρίας  $\epsilon_b^I$  συναρτήσει της ροπής, ενώ για μεγάλες παραμορφώσεις όπου μπορεί να αμεληθεί η καμπτική στιβαρότητα (οπότε έχουμε καλωδιακή λειτουργία-φαινόμενα δεύτερης τάξης) της δοκού υπολογίζονται γεωμετρικά  $\epsilon_b^{II}$  συναρτήσει της αξονικής δύναμης του αγωγού. Για να υπάρχει μία σχέση ενιαία για τις καμπτικές παραμορφώσεις αθροίζονται τα αντίστροφα των καμπτικών παραμορφώσεων με διορθωτικούς συντελεστές όπως δικαιολογούνται στην παράγραφο 6.2.3. Οι διορθωτικοί συντελεστές είναι η τροποποίηση που δέχεται η μέθοδος για να εισαχθεί στην προτεινόμενη μεθοδολογία.

$$a = \frac{E'_{sec}}{E_{elastic}} \quad \epsilon_b^I = \frac{M_{max} D}{2EI} \quad \epsilon_b^{II} = \frac{q_u D}{2F_a} \quad (5.90)$$

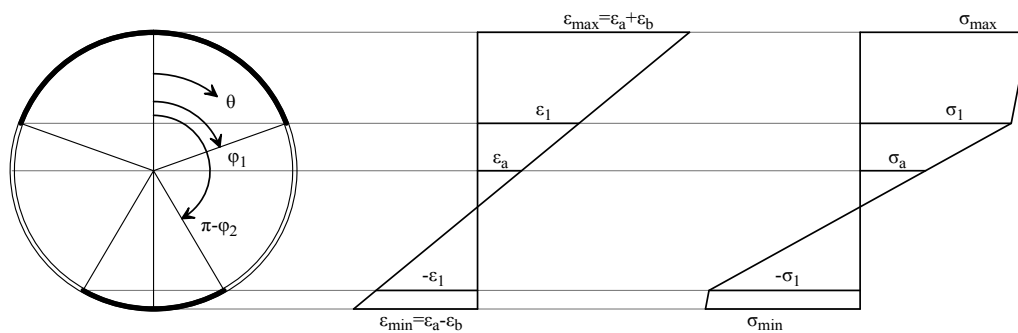
$$\frac{1}{\varepsilon_b} = \frac{a^{0.1}}{\varepsilon_b^I} + \frac{(1-a)^{3.5}}{\varepsilon_b^{II}} \quad (5.91)$$

### 3.5. Αξονικές παραμορφώσεις

Για να ευρεθεί επαναληπτικά η αξονική παραμόρφωση του αγωγού  $\varepsilon_a$  στην κρίσιμη διατομή του αγωγού υποτίθεται μία αρχική τιμή 0 και υπολογίζονται ακολούθως οι συνολικές παραμορφώσεις (άθροισμα αξονικών και καμπτικών παραμορφώσεων), από τις οποίες προκύπτουν οι τάσεις. Το ολοκλήρωμα των τάσεων πάνω στη διατομή απαιτείται να είναι ίσο με την αξονική δύναμη του αγωγού  $F_a$  (Σχέση (5.71)(5.72)): (βλ. Σχήμα 2.7)

$$\varphi_{1,2} = \begin{cases} \pi & , \frac{\varepsilon_1 \mp \varepsilon_a}{\varepsilon_b} < -1 \\ \arccos\left(\frac{\varepsilon_1 \mp \varepsilon_a}{\varepsilon_b}\right) & , -1 \leq \frac{\varepsilon_1 \mp \varepsilon_a}{\varepsilon_b} \leq 1 \\ 0 & , \frac{\varepsilon_1 \mp \varepsilon_a}{\varepsilon_b} < 1 \end{cases} \quad (5.71)$$

$$F = t(t-D)[\varepsilon_a(\varphi_1 + \varphi_2)(E_1 - E_2) - \pi E_1 \varepsilon_a + \varepsilon_b(E_1 - E_2)(\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2) - \varepsilon_1(E_1 - E_2)(\varphi_1 - \varphi_2)] \quad (5.72)$$



**ΣΧΗΜΑ 2.7:** Μη γραμμική κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων σε μία διατομή του αγωγού.

Όπου:

$E_1$  το αρχικό μέτρο ελαστικότητας

$\varphi_1, \varphi_2$  τα μισά τόξα (λόγω συμμετρίας) στα οποία ο χάλυβας έχει ξεπεράσει το όριο διαρροής  $\sigma_1, \varepsilon_1$

$E_2$  το μέτρο κράτυνσης του υλικού του χάλυβα

$t$  το πάχος της διατομής του αγωγού

$D$  η διάμετρος της διατομής του αγωγού

Προτείνεται η μέθοδος Newton-Raphson ώστε να επιλυθεί η εξίσωση επαναληπτικά (Σχέσεις (5.73) (5.74)(5.75)):

$$\frac{d\varphi_{1,2}}{d\varepsilon_a} = \begin{cases} \pm \frac{1}{\varepsilon_b \sin\varphi_{1,2}} & , \varepsilon_b \sin\varphi_{1,2} \leq -0.01 \\ -100 & , -0.01 < \varepsilon_b \sin\varphi_{1,2} \leq 0 \\ \pm 100 & , 0 < \varepsilon_b \sin\varphi_{1,2} \leq 0.01 \\ \pm \frac{1}{\varepsilon_b \sin\varphi_{1,2}} & , 0.01 < \varepsilon_b \sin\varphi_{1,2} \end{cases} \quad (5.73)$$

$$\begin{aligned} \frac{dF}{d\varepsilon_a} = t(t-D) & \left[ (\varphi_1 + \varphi_2)(E_1 - E_2) - \pi E_1 + \varepsilon_a \left( \frac{d\varphi_1}{d\varepsilon_a} + \frac{d\varphi_2}{d\varepsilon_a} \right) (E_1 - E_2) \right. \\ & \left. - \varepsilon_1 (E_1 - E_2) \left( \frac{d\varphi_1}{d\varepsilon_a} - \frac{d\varphi_2}{d\varepsilon_a} \right) + \varepsilon_b (E_1 - E_2) \left( \frac{d\varphi_1}{d\varepsilon_a} \cos\varphi_1 - \frac{d\varphi_2}{d\varepsilon_a} \cos\varphi_2 \right) \right] \end{aligned} \quad (5.74)$$

$$\varepsilon_a^{k+1} = \varepsilon_a^k - \frac{F(\varepsilon_a^k) - F_a}{dF/d\varepsilon_a} \quad (5.75)$$

### 3.6. Επίδραση μη γραμμικότητας του χάλυβα του αγωγού

Υπολογίζεται το νέο τέμνον μέτρο ελαστικότητας  $E_{sec}$  για να ληφθεί υπόψη η μη γραμμικότητα του υλικού καθώς η μέχρι τώρα μεθοδολογία χρησιμοποιούσε ελαστική θεωρία. Υπολογίζεται η κάμψη της διατομής μέσω ολοκλήρωσης των τάσεων του βήματος 5 (Σχέση (5.76)):

$$\begin{aligned} M = -\frac{t(t-D)^2}{2} & \left[ \frac{\varepsilon_b (\varphi_1 + \varphi_2)(E_1 - E_2)}{2} - \varepsilon_1 (\sin\varphi_1 + \sin\varphi_2)(E_1 - E_2) \right. \\ & \left. - \frac{\pi E_1 \varepsilon_b}{2} + \varepsilon_a (E_1 - E_2) (\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2) + \frac{\varepsilon_b (E_1 - E_2) (\sin 2\varphi_1 + \sin 2\varphi_2)}{4} \right] \end{aligned} \quad (5.76)$$

Από τη σχέση που συνδέει την καμπτική ένταση με τις καμπτικές παραμορφώσεις υπολογίζεται το νέο μειωμένο μέτρο ελαστικότητας (Σχέση (5.77)):

$$E'_{sec} = \frac{M(\varepsilon_a, \varepsilon_b)D}{2I\varepsilon_b^1} \quad (5.77)$$

Επαναλαμβάνονται τα βήματα 3.2 έως 3.6 μέχρι να υπάρξει σύγκλιση.

## 5.4. Διάγραμμα ροής της μεθόδου

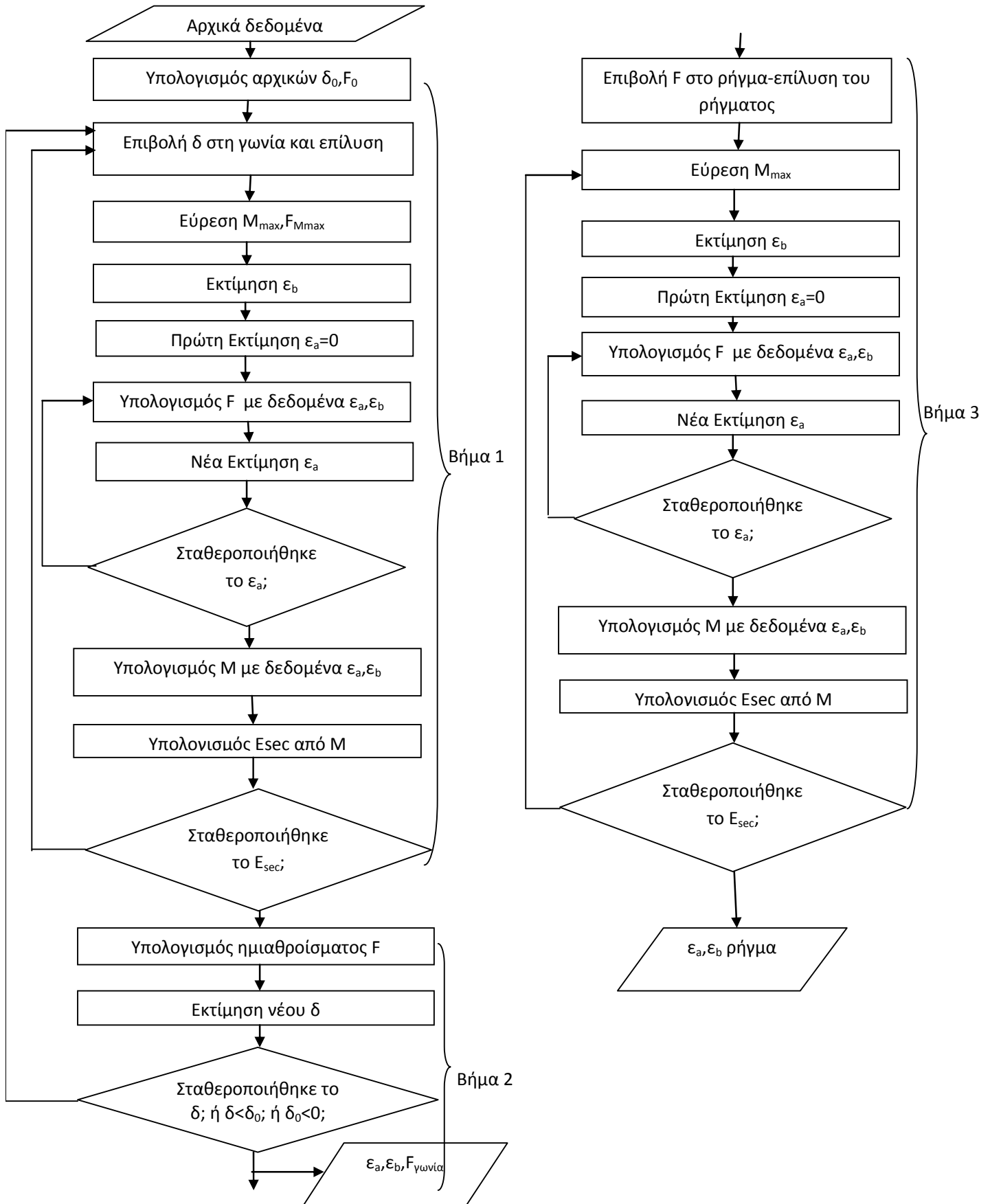
Με τα αρχικά δεδομένα της μεθόδου υπολογίζεται η πρώτη εκτίμηση για τη μετακίνηση της γωνίας  $\delta_0$ , ώστε μέσω του Βήματος 1 να υπολογιστεί η αντίστοιχη αξονική δύναμη, με την οποία μέσω του Βήματος 2 υπολογίζεται εκ νέου η επιβαλλόμενη μετακίνηση στην περιοχή της γωνίας και επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι να συγκλίνει.

Πιο συγκεκριμένα, στο Βήμα 1 επιλύεται η γωνία για το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του αγωγού και βρίσκεται το δυσμενέστερο ζεύγος ροπής και αξονικής δύναμης. Από την προκύπτουσα ροπή υπολογίζεται η καμπτική παραμόρφωση πρώτης τάξης, από την αξονική δύναμη μέσω επαναληπτικής διαδικασίας βρίσκεται και η αντίστοιχη αξονική παραμόρφωση. Με την εκτίμηση των παραμορφώσεων υπολογίζεται εκ νέου η ροπή και εκτιμάται το νέο τέμνον μέτρο ελαστικότητας. Επιλύεται ξανά η γωνία με το νέο τέμνον μέτρο ελαστικότητας μέχρι και να συγκλίνει.

Το ημίθροισμα της νέα και της προηγούμενης αξονικής δύναμης του αγωγού που υπολογίζεται στο σημείο A εισάγεται στο Βήμα 2 ώστε να εκτιμηθεί η νέα μετακίνηση στην περιοχή της γωνίας. Επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση.

Εάν η μετακίνηση της γωνίας μειωθεί πέραν της αρχικής εκτίμησης, ή η αρχική εκτίμηση είναι αρνητική μετακίνηση όπως εξηγήθηκε και στην παράγραφο 5.1 τότε θεωρείται ότι η γωνία δεν επηρεάζεται από τη μετακίνηση του ρήγματος. Αυτό σημαίνει ότι τίθεται η καμπτική παραμόρφωση στην περιοχή της γωνίας μηδενική και υπολογίζεται από την αξονική δύναμη η αξονική παραμόρφωση.

Αντίστοιχα με το Βήμα 1 και στο Βήμα 3 επιλύεται η περιοχή του ρήγματος με τις παρακάτω διαφορές. Ακολουθείται η μέθοδος Karamitros et al.2007 για ευθύγραμμο αγωγό και ρήγματα οριζοντίως διατμήσεως. Η αξονική δύναμη τίθεται δεδομένη όπως υπολογίστηκε στα Βήματα 1 και 2. Οι καμπτικές παραμορφώσεις εκτιμώνται για την πρώτη και τη δεύτερη τάξη σε αντίθεση με την περιοχή της γωνίας, μέσω της δεδομένης αξονικής δύναμης και τη μέγιστη υπολογισμένη καμπτική ροπή. Βέβαια, όπως εξηγείται και στην παράγραφο 6.2.3 προτείνεται ένας βελτιωμένος τύπος για τις καμπτικές παραμορφώσεις.





### 5.5. Βήμα προς βήμα η μέθοδος με όλους τους τύπους σε διάγραμμα

1.1. Υπολογισμός αρχικών  $\delta, F$

$$F_0 = \sqrt{EA t_u \Delta X} - L t_u$$

$$\delta_0 = \frac{F_0^2}{2EA t_u}$$

1.2. Επιβολή  $\delta$  στη γωνία

$$K_{axial} = \frac{E_1 A_s t_u}{F_0} \text{ (αρχική εκτίμηση)}$$

$$[K_m] = [K + K_{springs}]$$

$$\{P_f\} = [K_{ff}]\{u_f\} + [K_{fs}]\{u_s\}$$

$$\{P_s\} = [K_{sf}]\{u_f\} + [K_{ss}]\{u_s\}$$

$$\{u_f\} = [K_{ff}]^{-1}[\{P_f\} - [K_{fs}]\{u_s\}]$$

$$[P_{final}] = [P_L] + [P_{solution}] - [K_{springs}][U_{solution}]$$

Τα  $K, V, P, u$  υπολογίζονται όπως στις σχέσεις (5.22), (5.33), (5.61)  
Υπολογισμός εκ νέου  $K_{axial}$  και επανεπίλυση μέχρι να συγκλίνει

1.3. Εύρεση  $M_{max}, F$

$$M = M_1 + Q_1 R \sin \varphi - F_1 (R - R \cos \varphi) + R^2 t_u (\varphi - \sin \varphi) - R^2 q_u (\cos \varphi - 1)$$

$$F = F_1 \cos \varphi + Q_1 \sin \varphi - R q_u (\cos \varphi - 1) - R t_u \sin \varphi$$

Πρώτη εκτίμηση  $\varepsilon_a = 0$

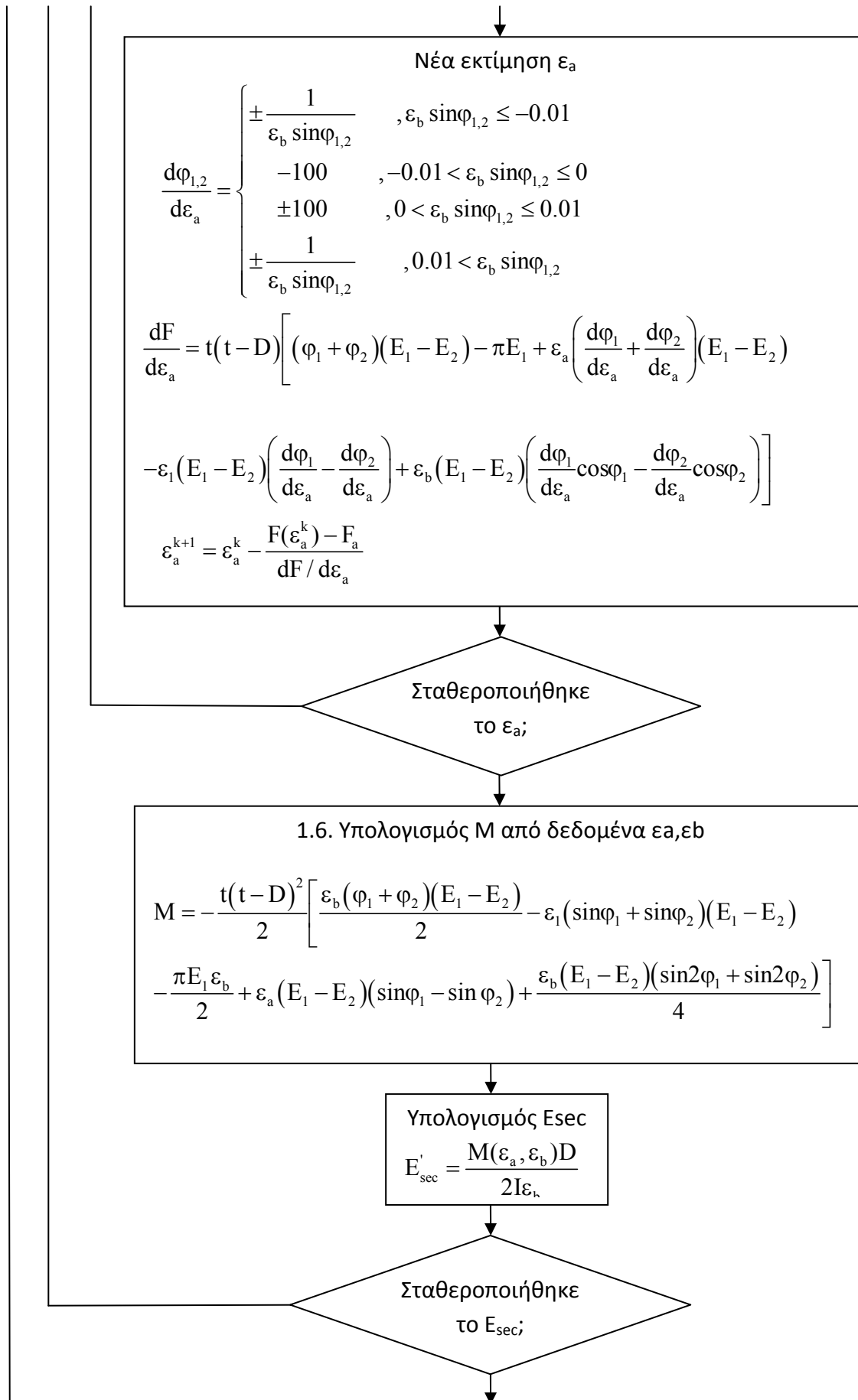
1.4. Εκτίμηση  $\varepsilon_b$

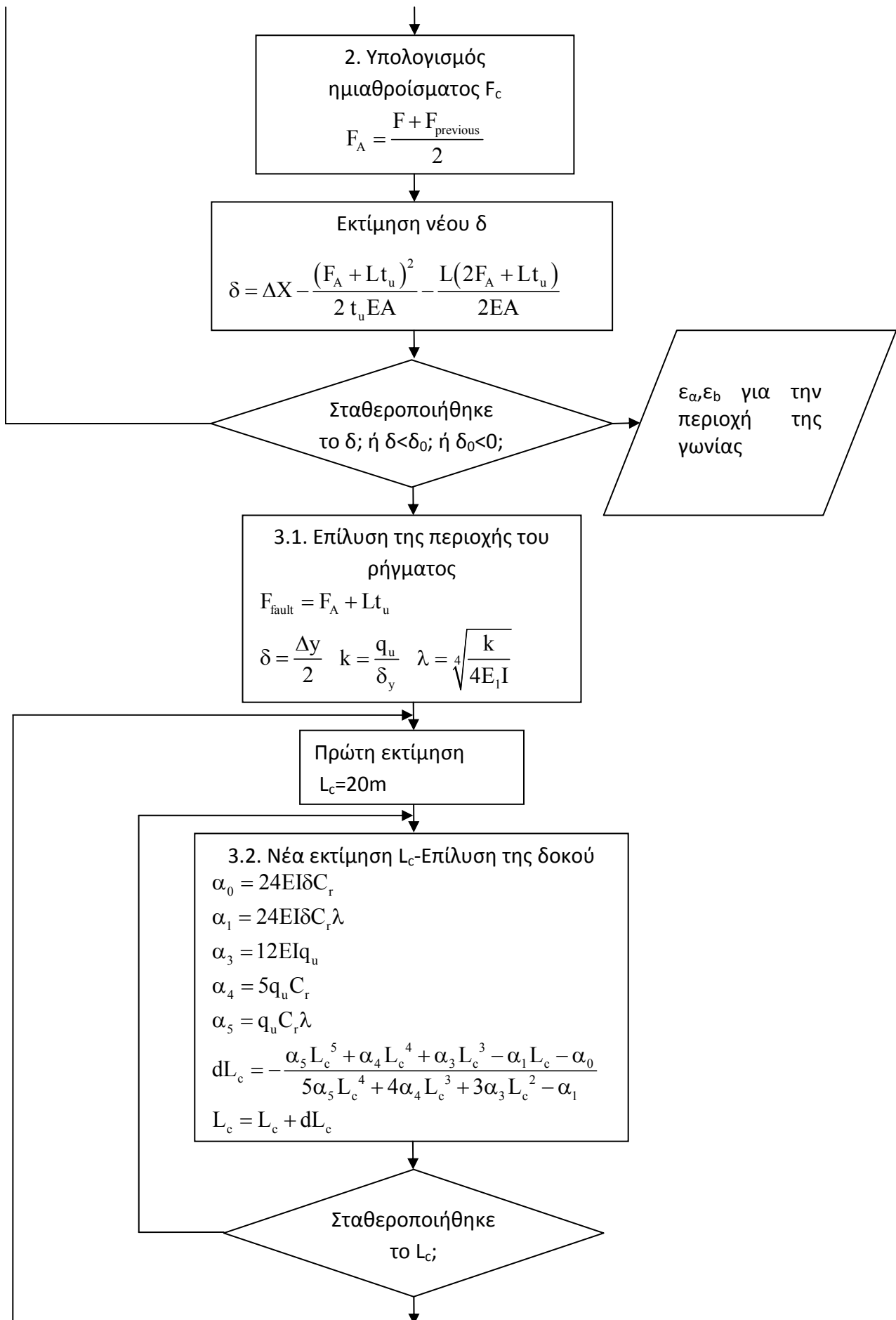
$$\varepsilon_b = \frac{M_{max} D}{2EI}$$

1.5. Υπολογισμός  $F$  με δεδομένα  $\varepsilon_a, \varepsilon_b$

$$\varphi_{1,2} = \begin{cases} \pi & , \frac{\varepsilon_1 \mp \varepsilon_a}{\varepsilon_b} < -1 \\ \arccos\left(\frac{\varepsilon_1 \mp \varepsilon_a}{\varepsilon_b}\right) & , -1 \leq \frac{\varepsilon_1 \mp \varepsilon_a}{\varepsilon_b} \leq 1 \\ 0 & , \frac{\varepsilon_1 \mp \varepsilon_a}{\varepsilon_b} < 1 \end{cases}$$

$$F = t(t-D)[\varepsilon_a(\varphi_1 + \varphi_2)(E_1 - E_2) - \pi E_1 \varepsilon_a + \varepsilon_b(E_1 - E_2)(\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2) - \varepsilon_1(E_1 - E_2)(\varphi_1 - \varphi_2)]$$





**Εύρεση  $M_{\max}$**

$$V_B = \frac{3C_r q_u L_c^4 + 12q_u E I L_c^3 + 24C_r \delta E I}{8 C_r L_c^3 + 24E I L_c^2}$$

$$x_{\max} = \frac{V_B}{q_u}$$

$$M_{\max} = V_B x_{\max} - \frac{q_u x_{\max}^2}{2}$$

Πρώτη εκτίμηση  $\varepsilon_a=0$

**3.4. Εκτίμηση  $\varepsilon_b$**

$$a = \frac{E'_{\text{sec}}}{E_{\text{elastic}}} \quad \varepsilon_b^I = \frac{M_{\max} D}{2EI} \quad \varepsilon_b^{II} = \frac{q_u D}{2F_a}$$

$$\frac{1}{\varepsilon_b} = \frac{a^{0.1}}{\varepsilon_b^I} + \frac{(1-a)^{3.5}}{\varepsilon_b^{II}}$$

**3.5. Υπολογισμός F με δεδομένα  $\varepsilon_a, \varepsilon_b$**

$$\varphi_{1,2} = \begin{cases} \pi & , \frac{\varepsilon_1 \mp \varepsilon_a}{\varepsilon_b} < -1 \\ \arccos\left(\frac{\varepsilon_1 \mp \varepsilon_a}{\varepsilon_b}\right) & , -1 \leq \frac{\varepsilon_1 \mp \varepsilon_a}{\varepsilon_b} \leq 1 \\ 0 & , \frac{\varepsilon_1 \mp \varepsilon_a}{\varepsilon_b} < 1 \end{cases}$$

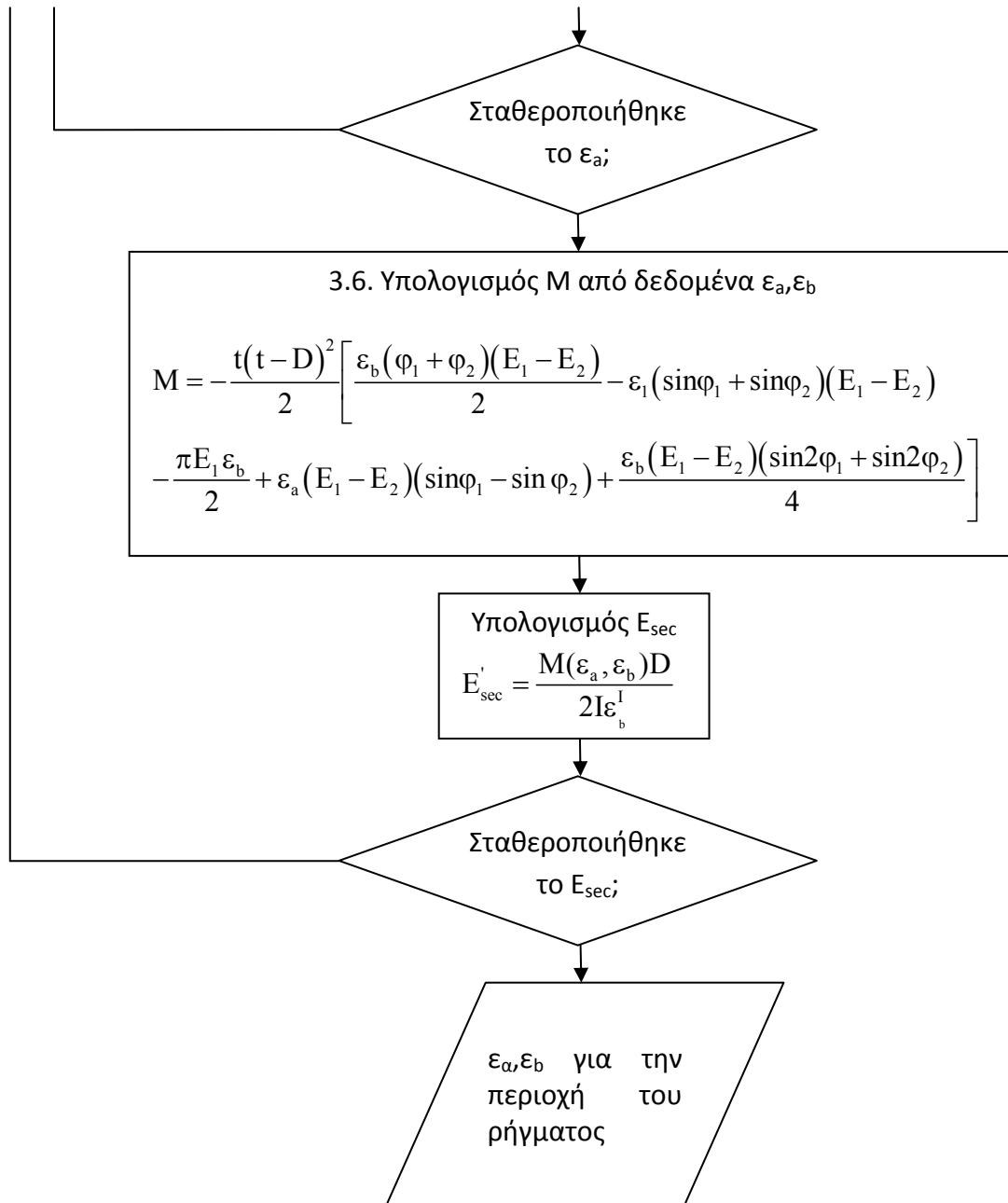
$$F = t(t-D)[\varepsilon_a(\varphi_1 + \varphi_2)(E_1 - E_2) - \pi E_1 \varepsilon_a]$$

**Νέα εκτίμηση  $\varepsilon_a$**

$$\frac{d\varphi_{1,2}}{d\varepsilon_a} = \begin{cases} \pm \frac{1}{\varepsilon_b \sin\varphi_{1,2}} & , \varepsilon_b \sin\varphi_{1,2} \leq -0.01 \\ -100 & , -0.01 < \varepsilon_b \sin\varphi_{1,2} \leq 0 \\ \pm 100 & , 0 < \varepsilon_b \sin\varphi_{1,2} \leq 0.01 \\ \pm \frac{1}{\varepsilon_b \sin\varphi_{1,2}} & , 0.01 < \varepsilon_b \sin\varphi_{1,2} \end{cases}$$

$$\frac{dF}{d\varepsilon_a} = t(t-D) \left[ (\varphi_1 + \varphi_2)(E_1 - E_2) - \pi E_1 + \varepsilon_a \left( \frac{d\varphi_1}{d\varepsilon_a} + \frac{d\varphi_2}{d\varepsilon_a} \right) (E_1 - E_2) - \varepsilon_1 (E_1 - E_2) \left( \frac{d\varphi_1}{d\varepsilon_a} - \frac{d\varphi_2}{d\varepsilon_a} \right) + \varepsilon_b (E_1 - E_2) \left( \frac{d\varphi_1}{d\varepsilon_a} \cos\varphi_1 - \frac{d\varphi_2}{d\varepsilon_a} \cos\varphi_2 \right) \right]$$

$$\varepsilon_a^{k+1} = \varepsilon_a^k - \frac{F(\varepsilon_a^k) - F_a}{dF/d\varepsilon_a}$$



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ**

### **6.1. Γενικά**

Στο παρόν Κεφάλαιο πραγματοποιείται αξιολόγηση της αναλυτικής λύσης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, μέσω της σύγκρισης των αναλυτικών προβλέψεων με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4.

Η σύγκριση πραγματοποιείται σε δύο στάδια:

α) Αξιολογούνται ξεχωριστά τα τρία επιμέρους βήματα της μεθοδολογίας προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την ορθότητα των παραδοχών της αναλυτικής λύσης.

β) Πραγματοποιούνται συγκρίσεις μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων και των προβλέψεων με την πλήρη αναλυτική λύση, με στόχο να αξιολογηθεί η ποιοτική και ποσοτική της ακρίβεια και να προσδιοριστούν τυχόν περιορισμοί στο πεδίο εφαρμογής της.

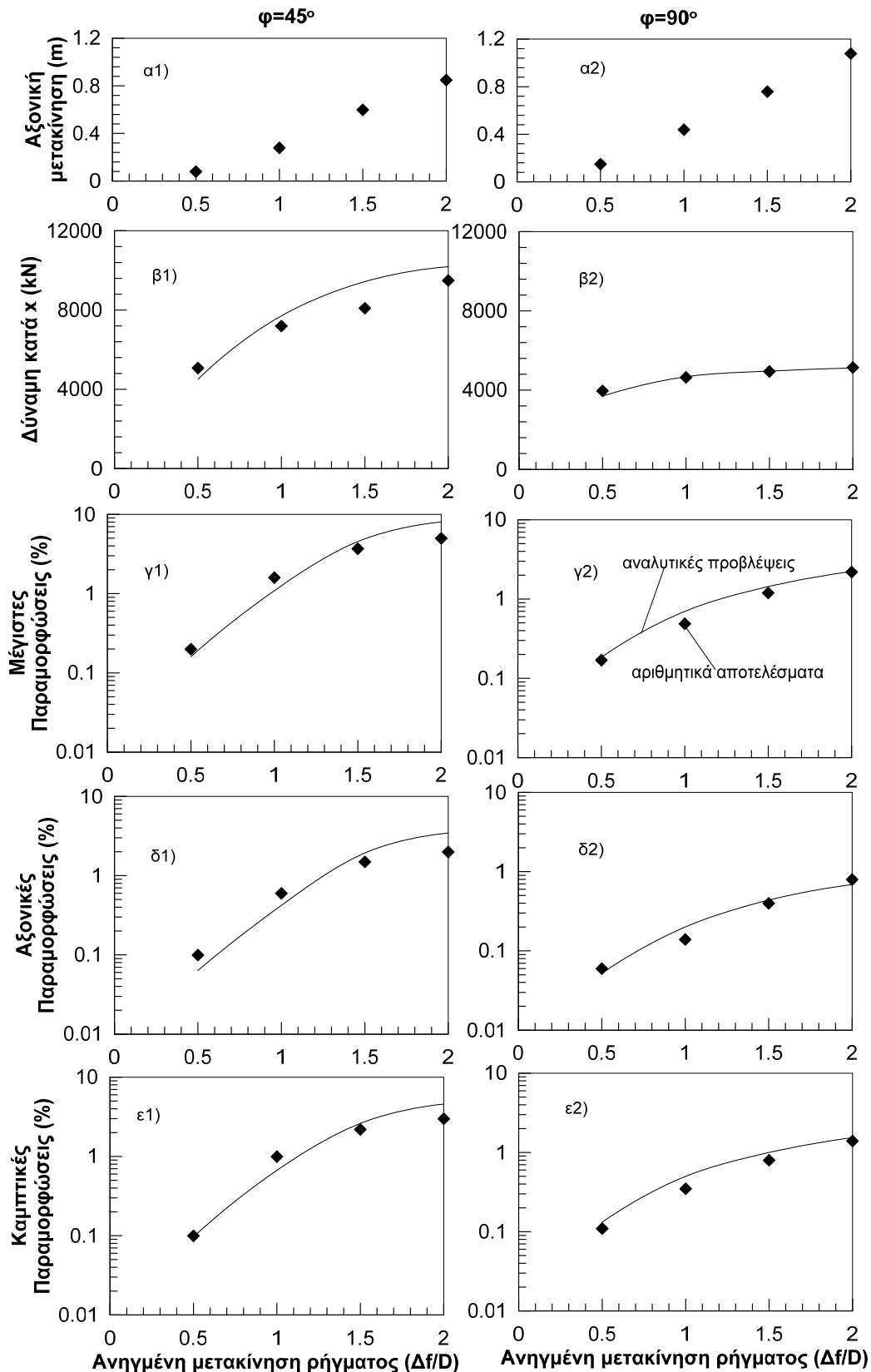
### **6.2. Ανεξάρτητη αξιολόγηση των επιμέρους βημάτων της μεθόδου**

#### **6.2.1. Επίλυση της γωνίας**

Για τη σύγκριση των αναλυτικών προβλέψεων του Βήματος 1 της μεθοδολογίας (επίλυση γωνίας) με τα αριθμητικά αποτελέσματα, επιλέχθηκαν δύο αντιπροσωπευτικές αναλύσεις για ακτίνα καμπυλότητας  $R=10D$  και για γωνία  $\phi=45$  και  $90^\circ$ . Από αυτές συγκρίθηκαν για 4 στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων ρήγματος ( $\Delta f/D=0.5,1,1.5,2$ ) οι αξονικές και καμπτικές παραμορφώσεις  $\epsilon_a$  και  $\epsilon_b$  αντίστοιχα καθώς και η αξονική δύναμη  $F$  που αναπτύσσονται στην περιοχή της γωνίας. Κατά την επίλυση της γωνίας επιβλήθηκε η μετακίνηση που επιβάλλεται και στα αριθμητικά αποτελέσματα με σκοπό την τη σύγκριση των αναλυτικών παραμορφώσεων που θα προκύψουν με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Κατ' αντιστοιχία με τη μέθοδο Karamitros et al.2007 υπολογίστηκε το δυσμενέστερο ζεύγος ροπής και αξονικής δύναμης, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.3, και εκτιμήθηκε η καμπτική παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην αναπτυσσόμενη ροπή. Στη συνέχεια βρέθηκε επαναληπτικά η αξονική παραμόρφωση, για την οποία το ολοκλήρωμα των τάσεων πάνω στη διατομή αντιστοιχεί στην υπολογισμένη αξονική δύναμη. Έπειτα, μέσω της διαδικασίας που περιγράφεται στην παράγραφο 5.3 ελήφθη το τέμνον μέτρο ελαστικότητας και η διαδικασία επαναλήφθηκε μέχρι και να επιτευχθεί σύγκλιση. Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η σύγκριση αναλυτικών προβλέψεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων για γωνία  $\phi=45^\circ$  και  $\phi=90^\circ$ . Στο Σχήμα 6.1.α παρουσιάζεται η αντίστοιχη αξονική μετακίνηση που επιβάλλεται στην περιοχή της γωνίας όπως προκύπτει από τα αριθμητικά αποτελέσματα, και είναι αυτή η μετακίνηση που επιβάλλεται ως φόρτιση κατά την επίλυση της περιοχής της γωνίας όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Παρατηρείται ότι για μεσαίες και μεγάλες ανηγμένες μετακινήσεις ρήγματος υποεκτιμώνται ελαφρώς οι παραμορφώσεις (Σχήμα 6.1.γ1). Αντίστοιχα, για  $\phi=90^\circ$ , οι παραμορφώσεις υπερεκτιμώνται όπως φαίνονται στο Σχήμα 6.1.γ2, παρόλα αυτά και στις δύο περιπτώσεις επιτυγχάνεται η τάξη μεγέθους του προβλήματος και η τάση που εξελίσσονται οι παραμορφώσεις. Οι πηγές των σφαλμάτων του Βήματος είναι οι εξής:

1. Πηγή σφάλματος είναι η παραδοχή ότι τα εγκάρσια και στροφικά ελατηρία παραμένουν ελαστικά, το οποίο δεν ισχύει όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 5.1.1 όταν τα ευθύγραμμα μήκη ξεφεύγουν από τη γραμμική συμπεριφορά, με αποτέλεσμα οι αντίστοιχες μετακινήσεις να προκύπτουν αναλυτικώς μικρές σε σχέση με τις αριθμητικές. Αυτό οδηγεί σε υπερεκτίμηση των εντατικών μεγεθών και των παραμορφώσεων.
2. Η παραδοχή του εφαπτομενικού μέτρου δυσκαμψίας του αξονικού ελατηρίου οδηγεί σε υπερεκτίμηση της αντίστοιχης μετακίνησης. Κατ'επέκταση υποεκτιμούνται τα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη. Αυτό φαίνεται στις μικρές προς μεσαίες επιβαλλόμενες μετακινήσεις ρήγματος ειδικά για  $\phi=45^\circ$  όπου το αξονικό ελατήριο λειτουργεί, ενώ για  $\phi=90^\circ$  όπου δεν είναι σημαντική η επίδραση του λόγω της διεύθυνσης του δεν υπάρχει υποεκτίμηση, αλλά υπερεκτίμηση λόγω της προηγούμενης παραδοχής 1.
3. Οι εξισώσεις ισορροπίας εκφράζονται στον απαραμόρφωτο φορέα, αμελώντας τη μη γραμμικότητα γεωμετρίας. Η αξονική δύναμη στα άκρα του φορέα τείνει γενικά να μειώσει τις καμπτικές ροπές στο κέντρο του. Για μεγάλες μετακινήσεις το κέντρο της γωνίας έχει τέτοιο βέλος ώστε να αυξάνεται ο μοχλοβραχίων της αξονικής δύναμης. Αμελώντας αυτό το βέλος, τελικώς υπερεκτιμώνται οι ροπές στο κέντρο για μεγάλες στάθμες μετακινήσεων, άρα και οι παραμορφώσεις όπως φαίνονται στο Σχήμα 6.1.
4. Ολοκληρώνοντας τις τάσεις-παραμορφώσεις πάνω σε μία διατομή των αριθμητικών αποτελεσμάτων μέσω των τύπων της μεθόδου Karamitros et al.2007 που παρουσιάζονται στην παράγραφο 5.2.4 και χρησιμοποιούνται στο Βήμα 1 παρατηρείται διαφορά στην προκύπτουσα καμπτική ροπή και αξονική δύναμη ιδιαίτερα για μεγάλες παραμορφώσεις. Αυτό έχει σχέση με τα σημεία ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική μέθοδο και με τη μέθοδο ολοκλήρωσης. Ειδικά για μέγιστες παραμορφώσεις πέραν του 4% υπάρχει επιπλέον σφάλμα, αφού αριθμητικά χρησιμοποιήθηκε τριγωνική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων που σταθεροποιείται μετά το 4%, ενώ αναλυτικά η σχέση είναι διγραμμική, οπότε υποεκτιμά τις παραμορφώσεις η μέθοδος πέραν του 4% μέσα στο Βήμα 1.

Συμπερασματικά, για τις παραδοχές που αφορούν την ολοκλήρωση των τάσεων και τη μη γραμμικότητα γεωμετρίας, οι αποκλίσεις δεν αφορούν τα πλαίσια του σχεδιασμού, διότι εμφανίζονται σε ήδη μεγάλες παραμορφώσεις. Οπότε δε διαφαίνεται άμεσα η ανάγκη για τη βελτίωση αυτών των παραδοχών. Οι παραδοχές των συνοριακών συνθηκών είναι χρήσιμο να βελτιωθούν διότι αφορά η επίδραση τους όλο το εύρος των περιπτώσεων.

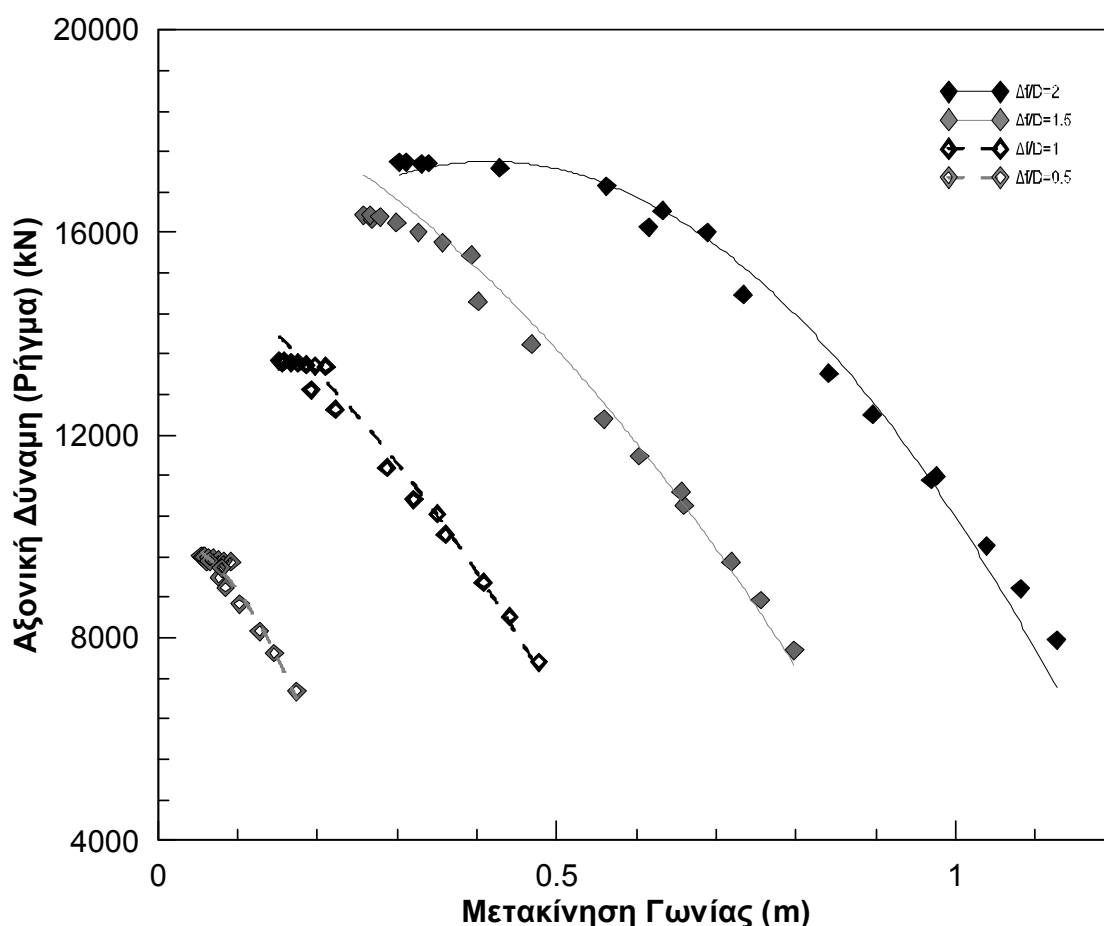


**ΣΧΗΜΑ 6.1:** Εξέλιξη των μέγιστων, τών, των καμπτικών παραμορφώσεων και της αξονικής δύναμης στη δυσμενέστερη διατομή της γωνίας για  $\phi=45^\circ$  (αριστερά) και  $90^\circ$  (δεξιά) αντίστοιχα σε σχέση με την ανηγμένη επιβαλλόμενη μετακίνηση  $\Delta f/D$ . Τα σημεία παριστάνουν τα αριθμητικά αποτελέσματα, ενώ η συνεχής γραμμή τις αναλυτικές προβλέψεις.



### 6.2.2. Αλληλεπίδραση γωνίας ρήγματος

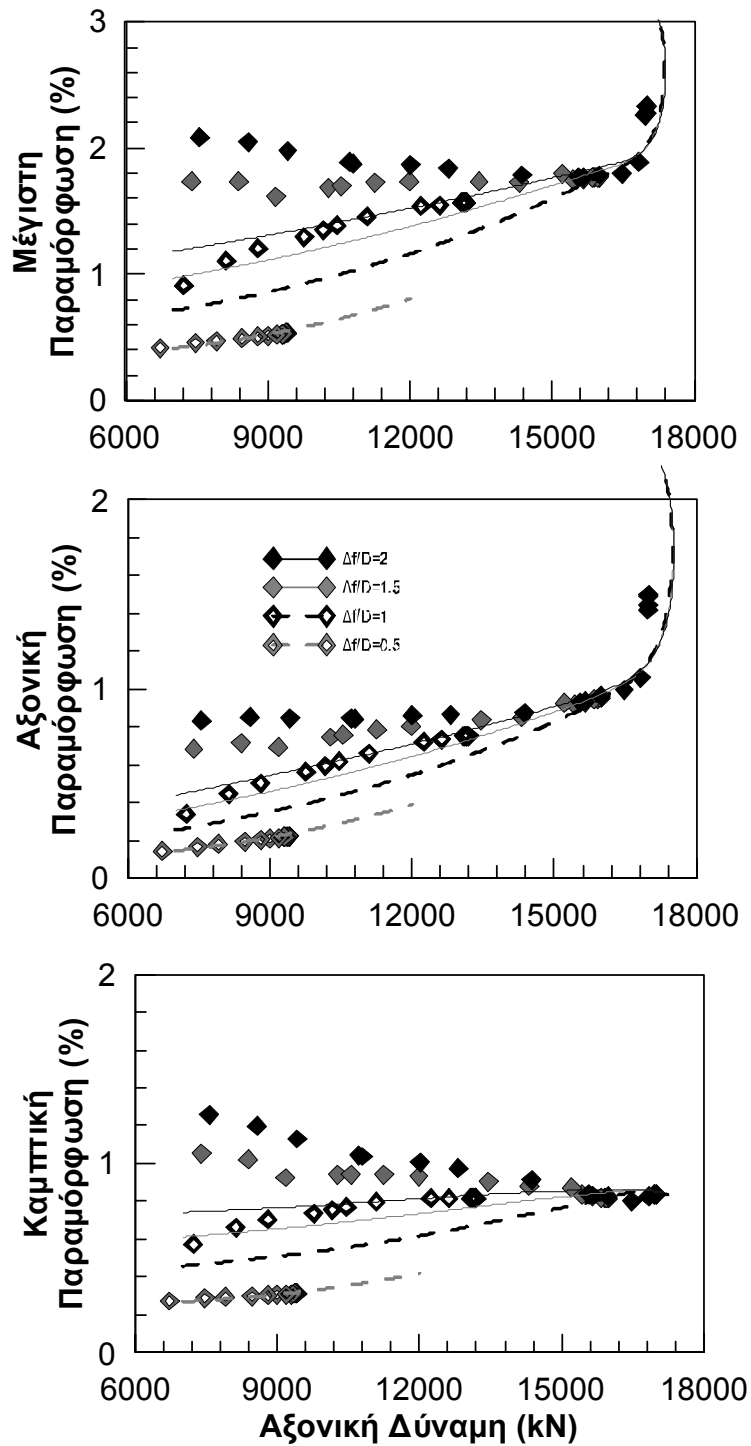
Στην παρούσα παράγραφο αξιολογείται το Βήμα 2 της προτεινόμενης μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5. Συγκεκριμένα, ελέγχεται η ορθότητα της σχέσης 5.54 της παραγράφου 5.2.3 η οποία εκφράζει την αλληλεπίδραση της γωνίας με την περιοχή του ρήγματος, συνδέοντας την αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στη γωνία ή στο ρήγμα με τη μετακίνηση στην περιοχή της γωνίας. Στο Σχήμα 6.2 παρατηρείται η σύγκριση των ζευγών αξονικής δύναμης στην περιοχή του ρήγματος και μετακίνησης της περιοχής γωνίας μέσω των αριθμητικών (παριστάνονται ως σημεία) και αναλυτικών προβλέψεων (παριστάνονται με συνεχείς γραμμές). Η αξονική δύναμη που προκύπτει στην περιοχή του ρήγματος από τα αριθμητικά αποτελέσματα επιβλήθηκε στην εξίσωση του συμβιβαστού των παραμορφώσεων της παραγράφου 5.2.3 ώστε να εκτιμηθεί αναλυτικά η μετακίνηση στην περιοχή της γωνίας. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν όλες τις αριθμητικές αναλύσεις που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4 για 4 στάθμες επιβαλλόμενης μετακίνησης ( $\Delta f/D=0.5, 1, 1.5, 2$ ). Η σύγκριση είναι ικανοποιητική αφού σε όλο το εύρος της αξονικής δύναμης της γωνίας προβλέπεται με ακρίβεια η μετακίνηση της γωνίας.



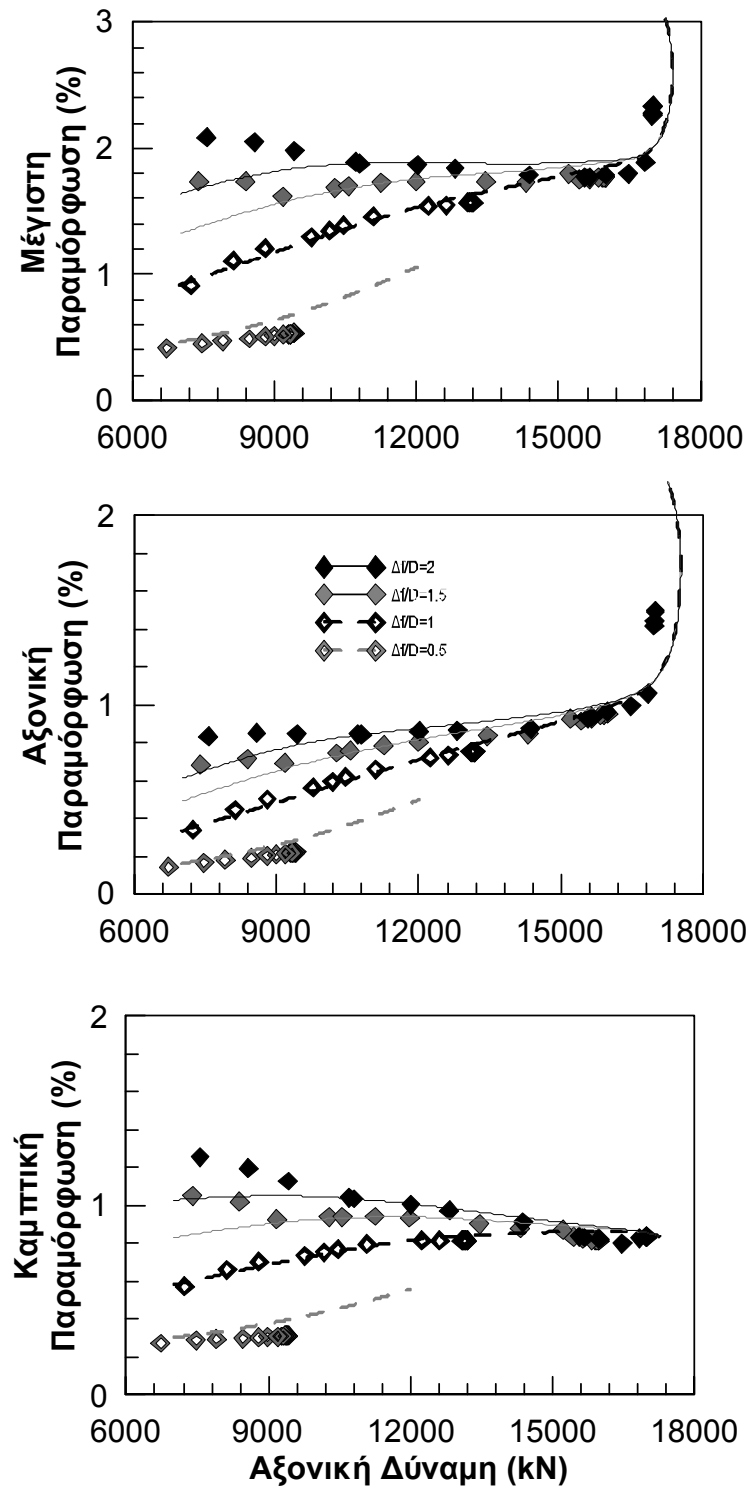
**ΣΧΗΜΑ 6.2:** Σχέση αξονικής δύναμης στο σημείο του ρήγματος με τη μετακίνηση της γωνίας για 4 στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων: τα σημεία αφορούν αριθμητικά αποτελέσματα, ενώ οι συνεχείς γραμμές τα αναλυτικά.

### 6.2.3. Περιοχή του ρήγματος

Στην παρούσα παράγραφο αξιολογείται το Βήμα 3 της προτεινόμενης μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5. Συγκεκριμένα, ελέγχεται η ορθότητα της παραδοχής ότι η αναλυτική μεθοδολογία των Karamitros et al.2007 μπορεί να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος, εφόσον εισαχθεί η ορθή τιμή της μέγιστης εφελκυστικής δύναμης στην εν λόγω περιοχή, η οποία υπολογίζεται συναρτήσει της παραμόρφωσης στη γωνία. Για να αξιολογηθεί χωριστά το 3<sup>ο</sup> Βήμα, στις ακόλουθες συγκρίσεις εφαρμόζεται η μεθοδολογία των Karamitros et al.2007, ενώ η τιμή της αξονικής δύναμης  $F$  λαμβάνεται απευθείας από τις αριθμητικές αναλύσεις. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα και οι αντίστοιχες αναλυτικές προβλέψεις για 4 στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων ρήγματος ( $\Delta f/D=0.5,1,1.5,2$ ) συναρτήσει της μεταβολής της μέγιστης αξονικής  $e_a$ , της μέγιστης καμπτικής  $e_b$ , και της μέγιστης αναπτυσσόμενης παραμόρφωσης  $e_{max}$ , με τη μέγιστη αξονική δύναμη  $F$  που αναπτύσσεται στην περιοχή του ρήγματος. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 6.3, η σύγκριση είναι ικανοποιητική μόνο για πολύ μικρές και για πολύ μεγάλες τιμές των  $F$  και  $\Delta f/D$ . Αυτό συμβαίνει διότι οι περιπτώσεις αυτές αντιστοιχούν σε αναλύσεις όπου η συμπεριφορά του καμπυλωμένου αγωγού προσεγγίζει τη συμπεριφορά ευθύγραμμου αγωγού: Συγκεκριμένα, μικρές τιμές των  $F$  και  $\Delta f/D$  αντιστοιχούν σε περιπτώσεις όπου η μετακίνηση του ρήγματος δεν επηρεάζει τη γωνία του αγωγού, ενώ μεγάλες τιμές των  $F$  και  $\Delta f/D$  αντιστοιχούν σε περιπτώσεις γωνιών με μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας  $R$ , όπου η ύπαρξη της γωνίας δεν οδηγεί σε σημαντική μείωση της αξονικής δύναμης  $F$ , σε σχέση με τον ευθύγραμμο αγωγό. Παρόλα αυτά, παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις για μικρές τιμές  $F$  και μεγάλες τιμές  $\Delta f/D$ , γεγονός που οφείλεται στον απλοποιητικό τρόπο με τον οποίο οι Karamitros et al.2007 λαμβάνουν υπόψιν την επίδραση φαινομένων 2<sup>ης</sup> τάξης. Για το λόγο αυτό, στην παράγραφο 5.2.4, προτείνεται μία βελτιωμένη σχέση υπολογισμού των καμπτικών παραμορφώσεων. Στο Σχήμα 6.4 επαναλαμβάνεται η σύγκριση του Σχήματος 6.3, με χρήση της βελτιωμένης αυτής σχέσης. Όπως παρατηρείται, μετά την εφαρμογή της ανωτέρω τροποποίησης, η αναλυτική μεθοδολογία προβλέπει τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις με ικανοποιητική ακρίβεια, για όλο το εξεταζόμενο εύρος  $F$  και  $\Delta f/D$ .



**ΣΧΗΜΑ 6.3:** Μέγιστες αξονικές και καμπτικές παραμορφώσεις συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης στο ρήγμα για 4 στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων  $\Delta f/D$ . Υπολογισμοί σύμφωνα με τη μέθοδο Karamitros et al.2007.



**ΣΧΗΜΑ 6.4:** Μέγιστες αξονικές και καμπτικές παραμορφώσεις συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης στο ρήγμα για 4 στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων  $\Delta f/D$ . Υπολογισμοί σύμφωνα με τη μέθοδο Karamitros et al.2007, αλλά με ανανεωμένο τύπο για τον υπολογισμό της καμπτικής παραμόρφωσης.

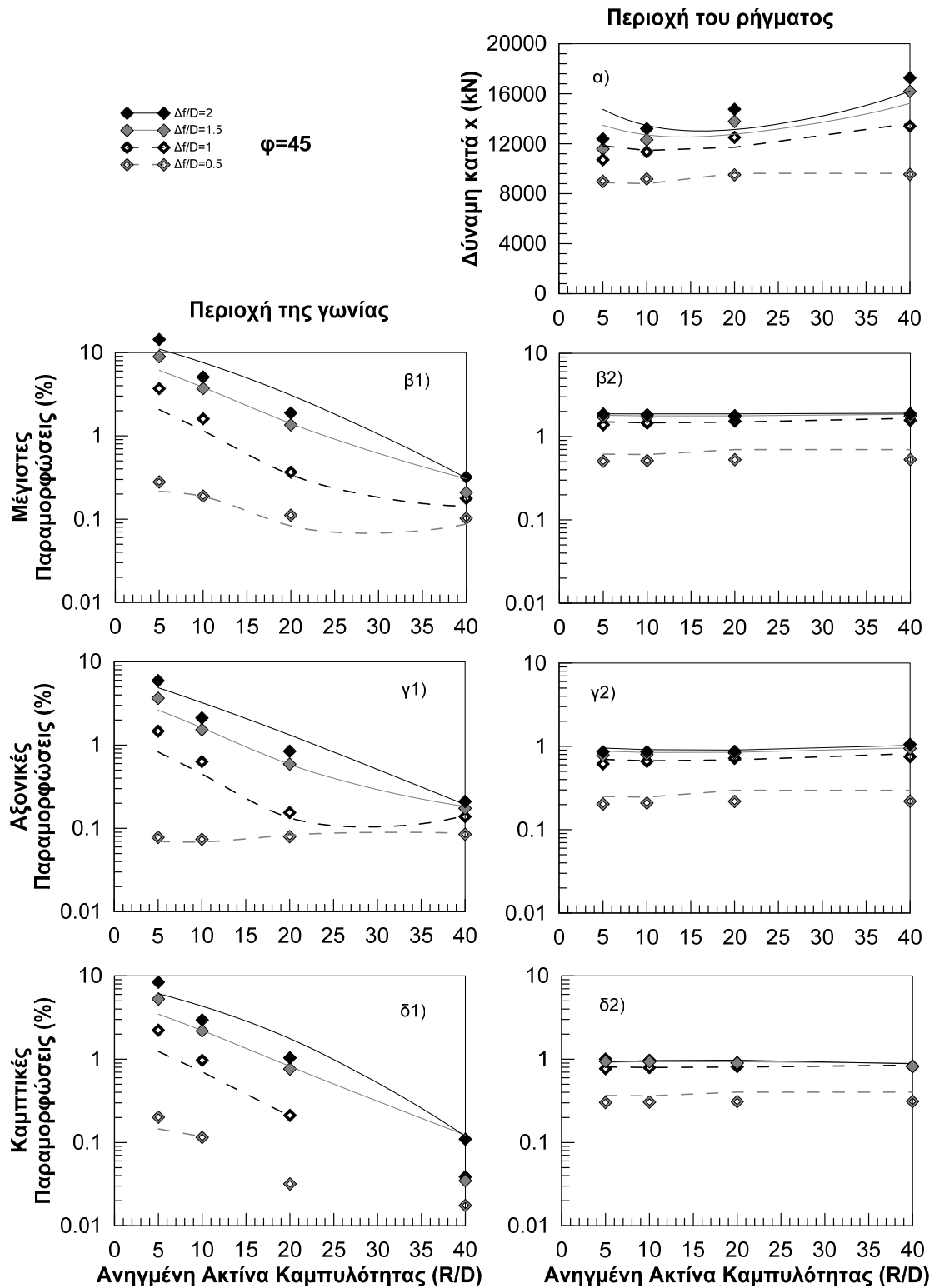
### 6.3. Επίδραση βασικών παραμέτρων στη συνολική μέθοδο

**Ακτίνα καμπυλότητας.**-Στα ακόλουθα σχήματα πραγματοποιείται αξιολόγηση της ακρίβειας της προτεινόμενης μεθοδολογίας έναντι των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Για λόγους απλότητας, η σύγκριση πραγματοποιείται σε σχήματα αντίστοιχα με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 4 για την παρουσίαση των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Έτσι, κατ' αντιστοιχία με το Σχήμα 4.25, στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται η εξέλιξη της αξονικής δύναμης  $F$  του αγωγού στο σημείο του ρήγματος, οι παραμορφώσεις του αγωγού ( $\epsilon_{\max}$ ,  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_b$ ) στην περιοχή του ρήγματος και της γωνίας συναρτήσεως της ανηγμένης ακτίνας καμπυλότητας του αγωγού ( $R/D=5,10,20,40$ ) για 4 στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων στην περιοχή του ρήγματος ( $\Delta f/D=0.5,1,1.5,2$ ). Σε όλες τις περιπτώσεις η απόσταση της γωνίας από το ρήγμα θεωρείται σταθερή και ίση με  $L=100m$ , ενώ η γωνία είναι ίση με  $\phi=45^\circ$ .

Σε ότι αφορά στην αξονική δύναμη στο σημείο του ρήγματος (Σχήμα 6.5.α), δεν παρατηρούνται διαφορές μεταξύ αριθμητικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για μικρές και μεσαίες επιβαλλόμενες μετακινήσεις ( $\Delta f/D=0.5$  έως 1). Επίσης παρατηρείται πως ακόμη και για μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετακινήσεις, όπου παρατηρούνται διαφορές της τάξης του 5 με 10%, η αναλυτική λύση προβλέπει σωστά την τάση εξέλιξης της αξονικής δύναμης με την ακτίνα καμπυλότητας. Τέλος, παρατηρείται ότι όποια απόκλιση αναφέρθηκε εδώ, συνοδεύεται και από αντίστοιχες αποκλίσεις στην περιοχή της γωνίας (Σχήμα 6.5.β1,γ1,δ1), οπότε οφείλονται οι αποκλίσεις στο Βήμα 1 της μεθόδου (επίλυση της γωνίας) και επαληθεύεται η ακρίβεια των Βημάτων 2 και 3 της μεθόδου (Σχήματα 6.2 και 6.4).

Σε ότι αφορά στις παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ αριθμητικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για όλες τις επιβαλλόμενες μετακινήσεις και ακτίνες καμπυλότητας. Η εγκάρσια μετακίνηση που επιβάλλεται στην περιοχή του ρήγματος και η οποία είναι καθοριστική για τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στην εν λόγω περιοχή είναι ανεξάρτητη της ύπαρξης γωνίας. Επομένως, οι διαφορές στην προβλεπόμενη αξονική δύναμη για μεγάλες μετακινήσεις δεν επηρεάζουν άμεσα τις αντίστοιχες παραμορφώσεις (Σχήμα 6.5.γ2).

Οι αναλυτικά προβλεπόμενες παραμορφώσεις στην περιοχή της γωνίας (Σχήμα 6.5.β1,γ1,δ1) είναι ακριβείς σε σχέση με τα αριθμητικά αποτελέσματα όσο αυξάνεται η γωνία καμπυλότητας και ακολουθούνται οι τάσεις της εξέλιξης των παραμορφώσεων των αριθμητικών αναλύσεων. Οι αποκλίσεις της μεθόδου (όσον αφορά τις αξονικές δυνάμεις που αναφέρθηκαν παραπάνω και τις μέγιστες παραμορφώσεις) στα αναλυτικά αποτελέσματα σε σχέση με τα αριθμητικά εμφανίζονται για πολύ μικρή ακτίνα καμπυλότητας ( $R/D=5$ ) και για μεγάλες επιβαλλόμενες μετακινήσεις. Τότε εντείνεται η αρνητική επιρροή της παραδοχής 2 (αξονικό ελατήριο) που αναφέρεται στην παράγραφο 6.2.1 και οι παραμορφώσεις υποεκτιμώνται μέσω της μεθόδου. Η παραδοχή 2 προκαλεί αποκλίσεις ειδικότερα σε μικρές ακτίνες καμπυλότητας διότι τότε η αξονική μετακίνηση στο άκρο της γωνίας του αγωγού παίρνει μεγάλες τιμές στα αριθμητικά αποτελέσματα και άρα είναι τότε καθοριστικός παράγοντας της συμπεριφοράς της περιοχής της γωνίας. Επίσης, για  $\Delta f/D=2$ , και για μεσαίες ακτίνες καμπυλότητας ( $R=10$  με  $20D$ ) όπου τα φαινόμενα δεύτερης τάξης (μη γραμμικότητα γεωμετρίας) είναι σημαντικά υπερεκτιμώνται οι παραμορφώσεις (παραδοχή 3 της παραγράφου



**ΣΧΗΜΑ 6.5:** Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων και αναλυτικών προβλέψεων σε όρους μεταβολής της αξονικής δύναμης και των αναπτυσσόμενων αξονικών, καμπτικών και συνολικών μέγιστων παραμορφώσεων στην περιοχή του ρήγματος και της γωνίας, με την ανηγμένη ακτίνα R/D του τόξου συναρμογής, για γωνία του αγωγού  $\phi=45^\circ$ .

6.2.1). Ακόμη, οι εγκάρσιες μετακινήσεις της περιοχής της γωνίας των αριθμητικών αποτελεσμάτων για  $\Delta f/D=2$  έχουν αρκετά μεγάλη τιμή για να είναι ικανοποιητική η παραδοχή των ελαστικών συνοριακών συνθηκών όπου υποεκτιμά το μέγεθος τους, οπότε στην υπερεκτίμηση των παραμορφώσεων μέσω της αναλυτικής μεθόδου συμβάλει και η παραδοχή 1 της παραγράφου 6.2.1.

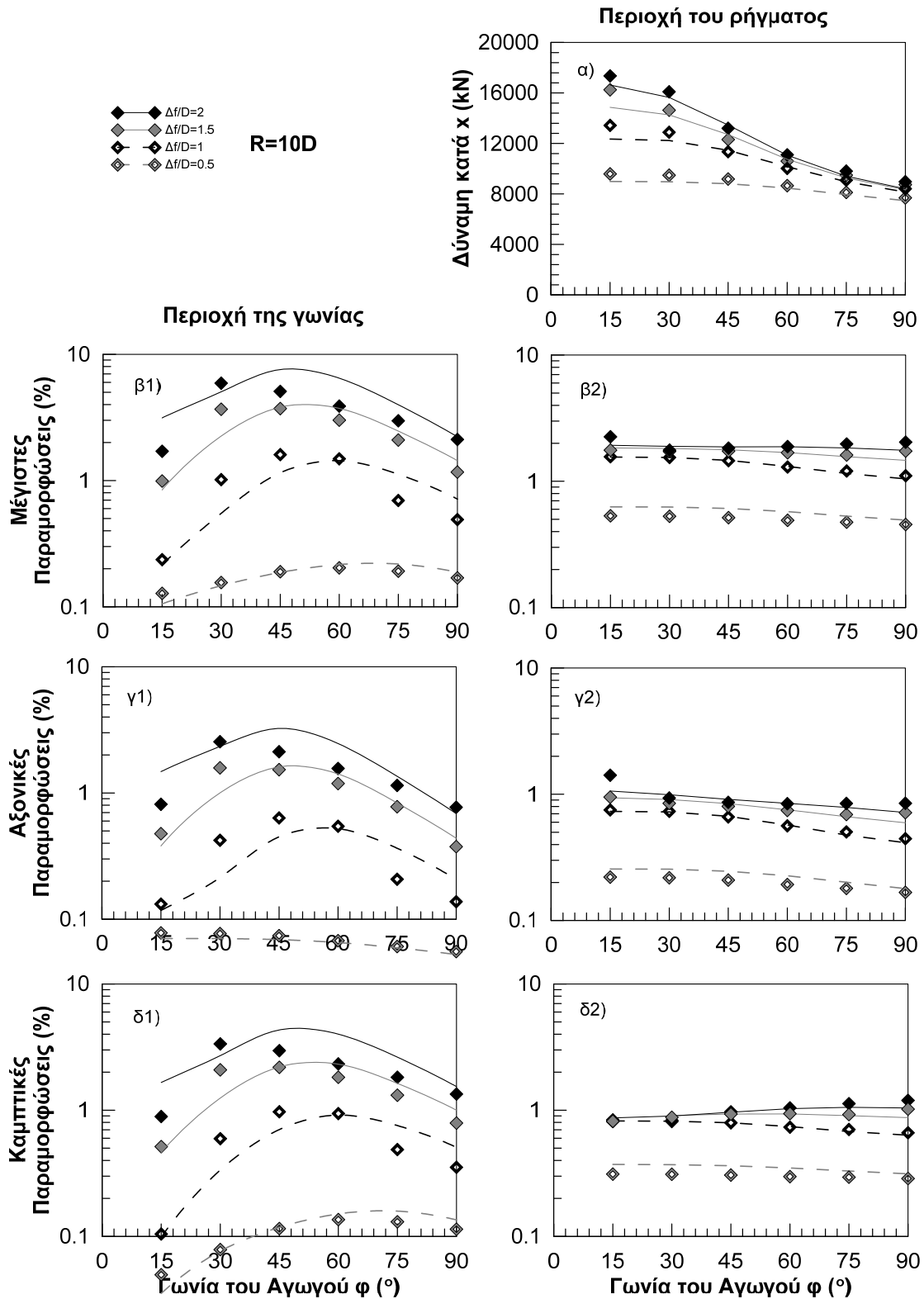
Η διακοπή των γραμμών των αναλυτικών προβλέψεων των καμπτικών παραμορφώσεων για μικρές τιμές  $\Delta f/D$  στο Σχήμα 6.5.δ2 οφείλεται στο ότι η μέθοδος θεωρεί ότι δεν υπάρχει αλληλεπίδραση ρήγματος γωνίας για αυτές τις περιπτώσεις (ευθύγραμμος αγωγός, το οποίο δικαιολογείται και από τα χαμηλά αριθμητικά αποτελέσματα για τις καμπτικές παραμορφώσεις) και θέτει την καμπτική παραμόρφωση ίση με 0, η οποία δεν παριστάτε σε λογαριθμική κλίμακα.

**Γωνία του αγωγού.**-Στα ακόλουθα σχήματα πραγματοποιείται αξιολόγηση της ακρίβειας της προτεινόμενης μεθοδολογίας έναντι των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4, με έμφαση στην επιρροή της γωνίας του αγωγού. Έτσι, κατ' αντιστοιχία με το Σχήμα 4.24, στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η εξέλιξη της αξονικής δύναμης  $F$  του αγωγού στο σημείο του ρήγματος, οι παραμορφώσεις του αγωγού ( $\epsilon_{\max}$ ,  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_b$ ) στην περιοχή του ρήγματος και της γωνίας συναρτήσει της γωνίας του αγωγού ( $\phi=15,30,45,60,75,90^\circ$ ) για 4 στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων στην περιοχή του ρήγματος ( $\Delta f/D=0.5,1,1.5,2$ ). Σε όλες τις περιπτώσεις η απόσταση της γωνίας από το ρήγμα θεωρείται σταθερή και ίση με  $L=100m$ , ενώ η ακτίνα καμπυλότητας ίση με  $R=10D$ .

Σε ότι αφορά στην αξονική δύναμη στο σημείο του ρήγματος (Σχήμα 6.6.α), δεν παρατηρούνται διαφορές μεταξύ αριθμητικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για μικρές και μεσαίες επιβαλλόμενες μετακινήσεις ( $\Delta f/D=0.5$  έως 1). Επίσης παρατηρείται πως ακόμη και για μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετακινήσεις, όπου παρατηρούνται διαφορές της τάξης του 5 με 10%, η αναλυτική λύση προβλέπει σωστά την τάση εξέλιξης της αξονικής δύναμης με την ακτίνα καμπυλότητας. Παρόλα αυτά, παρατηρείται ότι τα αναλυτικά αποτελέσματα υπερεκτιμούν τα αριθμητικά για γωνίες  $\phi=60$  με  $90^\circ$ , ενώ τα υποεκτιμούν για  $\phi=15$  με  $45^\circ$ , οι οποίες υπερεκτιμήσεις και υποεκτιμήσεις οφείλονται στο Βήμα 1 της μεθόδου, δηλαδή στην επίλυση της περιοχής της γωνίας.

Σε ότι αφορά στις παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ αριθμητικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για όλες τις επιβαλλόμενες μετακινήσεις και γωνίες του αγωγού. Η εγκάρσια μετακίνηση που επιβάλλεται στην περιοχή του ρήγματος και η οποία είναι καθοριστική για τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στην εν λόγω περιοχή είναι ανεξάρτητη της ύπαρξης γωνίας. Επομένως, οι διαφορές στην προβλεπόμενη αξονική δύναμη για μεγάλες μετακινήσεις δεν επηρεάζουν άμεσα τις αντίστοιχες παραμορφώσεις (Σχήμα 6.6.γ2).

Σε ότι αφορά στις παραμορφώσεις στην περιοχή της γωνίας παρατηρούνται για  $\Delta f/D=0.5$  ικανοποιητική σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων και αναλυτικών προβλέψεων. Για  $\Delta f/D=1$  με 1.5 φαίνεται η επίδραση της παραδοχής 2 (αξονικό ελατήριο) όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 6.2.1, οπότε η αναλυτική μέθοδος υπερεκτιμά τις παραμορφώσεις σε γωνίες κοντά στις  $90^\circ$  και υποεκτιμά τις παραμορφώσεις σε γωνίες κοντά στις  $45^\circ$ . Παράλληλα, παρατηρείται ότι σύμφωνα με τις αριθμητικές αναλύσεις, οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις γίνονται μέγιστες για τιμές γωνίας



**ΣΧΗΜΑ 6.6:** Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων και αναλυτικών προβλέψεων σε όρους μεταβολής της αξονικής δύναμης και των αναπτυσσόμενων αξονικών, καμπτικών και συνολικών μέγιστων παραμορφώσεων στην περιοχή του ρήγματος και της γωνίας, με τη γωνία  $\phi$  του τόξου συναρμογής, για ανηγμένη καμπυλότητα  $R/D=10$ .



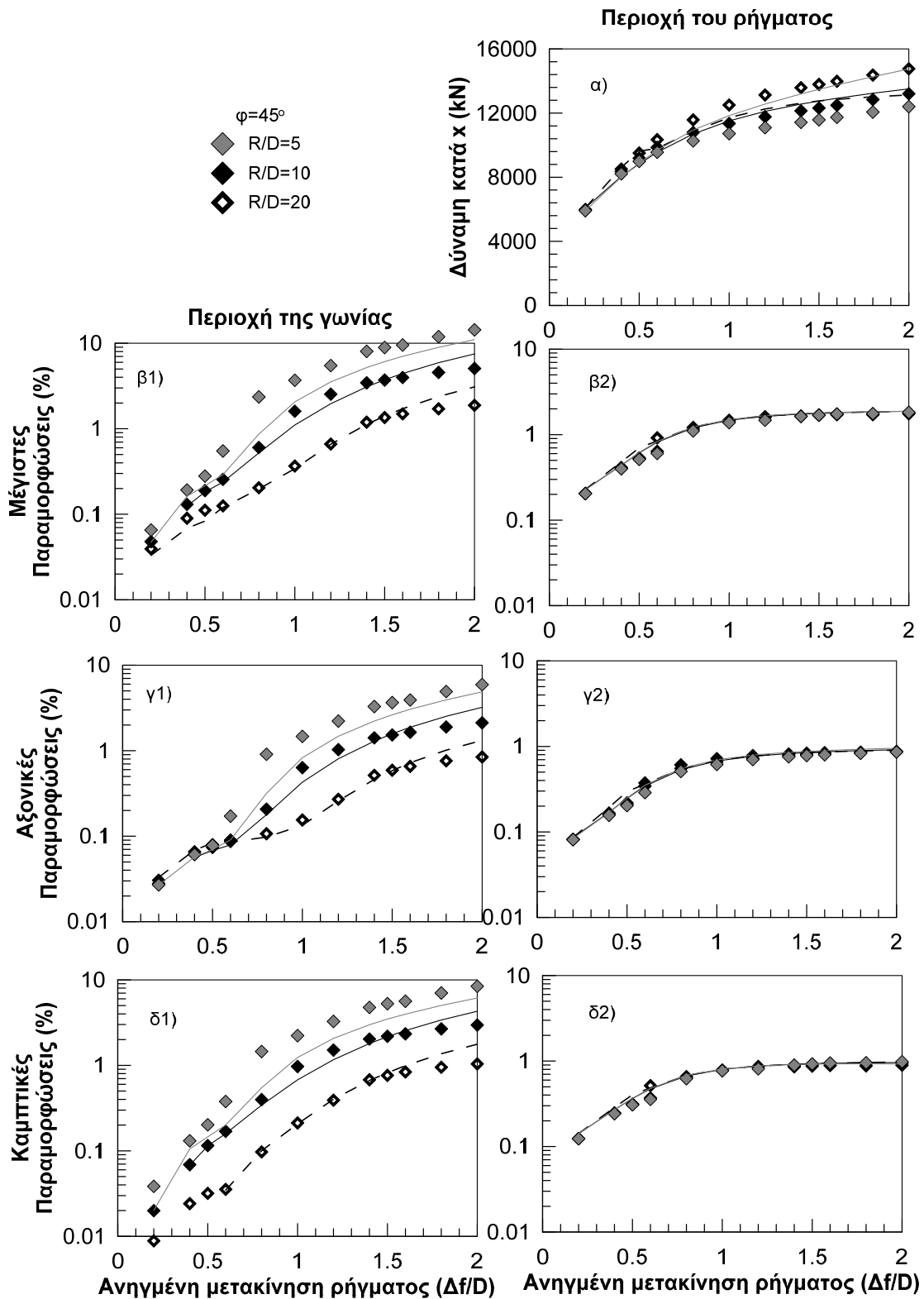
$\phi=30^\circ$ , ενώ σύμφωνα με την αριθμητική μέθοδο, η δυσμενέστερη περίπτωση είναι για  $\phi=45^\circ$  με  $60^\circ$  αφού για γωνίες  $\phi=30^\circ$  με  $45^\circ$  υποεκτιμώνται οι παραμορφώσεις αναλυτικά, όπως προαναφέρθηκε λόγω της παραδοχής 2. Για  $\Delta f/D=2$  λόγω μη γραμμικότητας γεωμετρίας (παραδοχή 3 παραγράφου 6.2.1) υπερεκτιμώνται οι παραμορφώσεις σε όλο το εύρος των γωνιών.

**Επιβαλλόμενη μετακίνηση.**-Στα ακόλουθα σχήματα πραγματοποιείται αξιολόγηση της ακρίβειας της προτεινόμενης μεθοδολογίας έναντι των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4, με έμφαση στην επιρροή της επιβαλλόμενης μετακίνησης του ρήγματος. Έτσι, κατ' αντιστοιχία με το Σχήμα 4.23, στο Σχήμα 6.7 παρουσιάζεται η εξέλιξη της αξονικής δύναμης  $F$  του αγωγού στο σημείο του ρήγματος, οι παραμορφώσεις του αγωγού ( $\epsilon_{\max}$ ,  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_b$ ) στην περιοχή του ρήγματος και της γωνίας συναρτήσει της ανηγμένης μετακίνησης του ρήγματος ( $\Delta f/D=0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.8, 2$ ) για ακτίνες καμπυλότητας  $R=5, 10, 20D$ . Σε όλες τις περιπτώσεις η απόσταση της γωνίας από το ρήγμα θεωρείται σταθερή και ίση με  $L=100m$ , ενώ η γωνία του αγωγού ίση με  $\phi=45^\circ$ .

Σε ότι αφορά στην αξονική δύναμη στο σημείο του ρήγματος (Σχήμα 6.7.α), δεν παρατηρούνται διαφορές μεταξύ αριθμητικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για μικρές και μεσαίες επιβαλλόμενες μετακινήσεις ( $\Delta f/D=0.5$  έως 1). Επίσης παρατηρείται πως ακόμη και για μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετακινήσεις, όπου παρατηρούνται διαφορές της τάξης του 5 με 10%, η αναλυτική λύση προβλέπει σωστά την τάση εξέλιξης της αξονικής δύναμης με την ανηγμένη επιβαλλόμενη μετακίνηση του ρήγματος. Παρόλα αυτά, για μεγάλες μετακινήσεις παρατηρείται ότι οι αναλυτικές προβλέψεις υπερεκτιμούν τα αριθμητικά αποτελέσματα για πολύ μικρή ακτίνα καμπυλότητας ( $R/D=5$ ) και την υποεκτιμούν για μεγάλη ( $R/D=20$ ), όπως σχολιάστηκε και στο Σχήμα 6.5.α.

Σε ότι αφορά στις παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ αριθμητικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για όλες τις επιβαλλόμενες μετακινήσεις και ακτίνες καμπυλότητας. Η εγκάρσια μετακίνηση που επιβάλλεται στην περιοχή του ρήγματος και η οποία είναι καθοριστική για τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στην εν λόγω περιοχή είναι ανεξάρτητη της ύπαρξης γωνίας. Επομένως, οι διαφορές στην προβλεπόμενη αξονική δύναμη για μεγάλες μετακινήσεις δεν επηρεάζουν άμεσα τις αντίστοιχες παραμορφώσεις (Σχήμα 6.7.γ2).

Σε ότι αφορά στις παραμορφώσεις στην περιοχή της γωνίας παρατηρείται πως για μεγάλη επιβαλλόμενη μετακίνηση  $\Delta f/D=1.5$  με 2 οι αναλυτικές προβλέψεις υπερεκτιμούν τα αναλυτικά αποτελέσματα, όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 6.2.1 στην παραδοχή 3 λόγω της μη γραμμικότητας της γεωμετρίας και στην παραδοχή 1 λόγω της μη γραμμικότητας των συνοριακών συνθηκών. Για ανηγμένες επιβαλλόμενες μετακινήσεις μικρότερες από  $\Delta f/D=0.8$  η σύγκριση αναλυτικών προβλέψεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων είναι ικανοποιητική, καθώς η μέγιστη παραμόρφωση δεν ξεπερνά το όριο διαρροής του χάλυβα του αγωγού, και αποδεικνύεται ότι η μέθοδος προσομοιώνει ικανοποιητικά την πραγματικότητα στην ελαστική περιοχή, αφού δεν αντιβαίνει στην παραδοχή 1 της γραμμικότητας των συνοριακών συνθηκών. Για μεγαλύτερες μετακινήσεις  $\Delta f/D=0.8$  με 1.5 η αναλυτική μέθοδος υποεκτιμά τα αριθμητικά αποτελέσματα. Το φαινόμενο αυτό, όπως εξηγήθηκε και στο Σχήμα 6.5 οφείλεται στην παραδοχή 2 και εντείνεται όσο μειώνεται η ανηγμένη ακτίνα καμπυλότητας στο  $R/D=5$ . Μάλιστα η σύγκριση είναι ικανοποιητική για  $R/D=20$ .



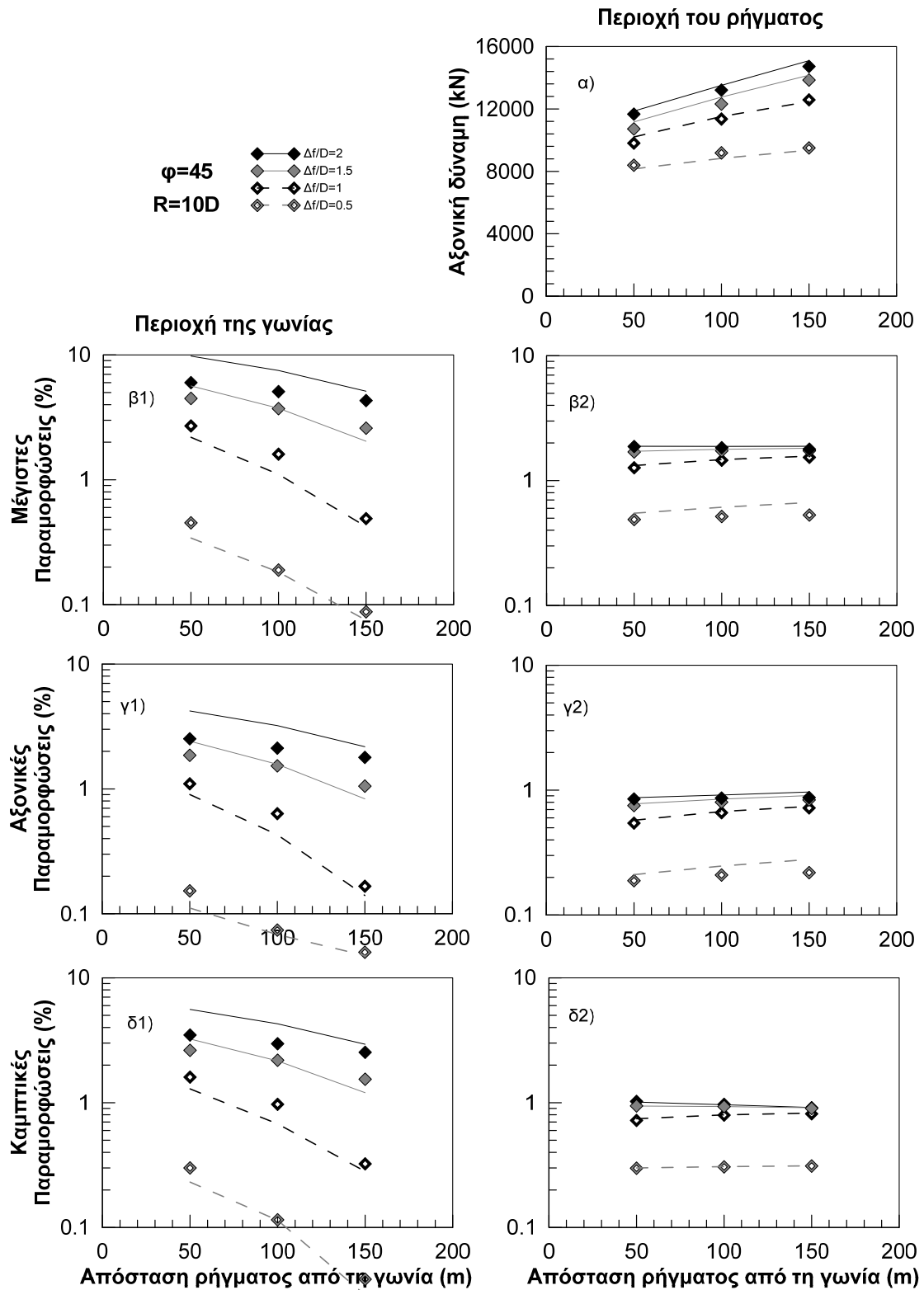
**ΣΧΗΜΑ 6.7:** Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων και αναλυτικών προβλέψεων σε όρους μεταβολής της αξονικής δύναμης και των αναπτυσσόμενων αξονικών, καμπτικών και συνολικών μέγιστων παραμορφώσεων στην περιοχή του ρήγματος και της γωνίας, με την ανηγμένη μετακίνηση ρήγματος  $\Delta f/D$ , για ανηγμένες καμπυλότητες  $R/D=5,10,20$  και για γωνία αγωγού  $\phi=45^\circ$ .

**Απόσταση γωνίας από το ρήγμα.**-Στα ακόλουθα σχήματα πραγματοποιείται αξιολόγηση της ακρίβειας της προτεινόμενης μεθοδολογίας έναντι των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4, με έμφαση στην επιρροή της απόστασης ρήγματος γωνίας  $L$ . Έτσι, κατ' αντιστοιχία με το Σχήμα 4.26, στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζεται η εξέλιξη της αξονικής δύναμης  $F$  του αγωγού στο σημείο του ρήγματος, οι παραμορφώσεις του αγωγού ( $\epsilon_{max}$ ,  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_b$ ) στην περιοχή του ρήγματος και της γωνίας συναρτήσει της απόστασης  $L=50,100,150m$ , για 4 στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων στην περιοχή του ρήγματος ( $\Delta f/D=0.5,1,1.5,2$ ). Σε όλες τις περιπτώσεις η ακτίνα καμπυλότητας θεωρείται σταθερή και ίση με  $R=10D$ , ενώ η γωνία του αγωγού ίση με  $\phi=45^\circ$ .

Σε ότι αφορά στην αξονική δύναμη στο σημείο του ρήγματος (Σχήμα 6.7.α), δεν παρατηρούνται διαφορές μεταξύ αριθμητικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για μικρές και μεσαίες επιβαλλόμενες μετακινήσεις ( $\Delta f/D=0.5$  έως 1). Επίσης παρατηρείται πως ακόμη και για μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετακινήσεις, όπου παρατηρούνται διαφορές της τάξης του 5 με 10%, η αναλυτική λύση προβλέπει σωστά την τάση εξέλιξης της αξονικής δύναμης με την ανηγμένη επιβαλλόμενη μετακίνηση του ρήγματος. Παρόλα αυτά, για μεγάλες μετακινήσεις παρατηρείται ότι οι αναλυτικές προβλέψεις υπερεκτιμούν τα αριθμητικά αποτελέσματα και ειδικότερα για μικρή απόσταση ρήγματος γωνίας  $L=50m$ , οι αποκλίσεις γενικά μειώνονται με την αύξηση της απόστασης.

Σε ότι αφορά στις παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ αριθμητικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για όλες τις επιβαλλόμενες μετακινήσεις και αποστάσεις ρήγματος γωνίας. Η εγκάρσια μετακίνηση που επιβάλλεται στην περιοχή του ρήγματος και η οποία είναι καθοριστική για τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στην εν λόγω περιοχή είναι ανεξάρτητη της ύπαρξης γωνίας. Επομένως, οι διαφορές στην προβλεπόμενη αξονική δύναμη για μεγάλες μετακινήσεις και μικρές αποστάσεις δεν επηρεάζουν άμεσα τις αντίστοιχες παραμορφώσεις (Σχήμα 6.8.γ2).

Σε ότι αφορά στις παραμορφώσεις στην περιοχή της γωνίας ισχύει ο ίδιος σχολιασμός των προηγούμενων σχημάτων 6.5 έως και 6.7 για  $\phi=45^\circ$  και  $R=10D$ , μόνο που σε μικρότερες αποστάσεις γωνίας ρήγματος οι αποκλίσεις εμφανίζονται σε μικρότερες επιβαλλόμενες μετακινήσεις  $\Delta f/D$  και είναι πιο έντονες (η αρνητική επιρροή των παραδοχών 1,2 και 3 είναι ακόμη πιο μεγάλη, διότι η περιοχή της γωνίας απομακρύνεται από την ελαστική συμπεριφορά από μικρότερα  $\Delta f/D$ ), το αντίθετο ισχύει για μεγαλύτερες αποστάσεις.



**ΣΧΗΜΑ 6.8:** Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων και αναλυτικών προβλέψεων σε όρους μεταβολής της αξονικής δύναμης και των αναπτυσσόμενων αξονικών, καμπτικών και συνολικών μέγιστων παραμορφώσεων στην περιοχή του ρήγματος και της γωνίας, με την απόσταση ρήγματος γωνίας  $L$ , για ανηγμένη καμπυλότητα  $R/D=10$  και για γωνία αγωγού  $\phi=45^\circ$ .

## 6.4. Επίδραση των βασικών παραμέτρων στην ακρίβεια της μεθοδολογίας

Πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ αριθμητικών αποτελεσμάτων και αναλυτικών προβλέψεων και υπολογίστηκε για κάθε περίπτωση το σχετικό σφάλμα και η μεταβολή του σε συνάρτηση με τη μέγιστη παραμόρφωση από τα αριθμητικά αποτελέσματα. Έτσι, διερευνήθηκαν η ακρίβεια και τα όρια εφαρμογής της μεθόδου. Συγκρίθηκαν τα αριθμητικά αποτελέσματα με τα αναλυτικά για 4 στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων στην περιοχή του ρήγματος ( $\Delta f/D=0.5,1,1.5,2$ ), σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 6.1.** Δεδομένα παραμετρικής διερεύνησης

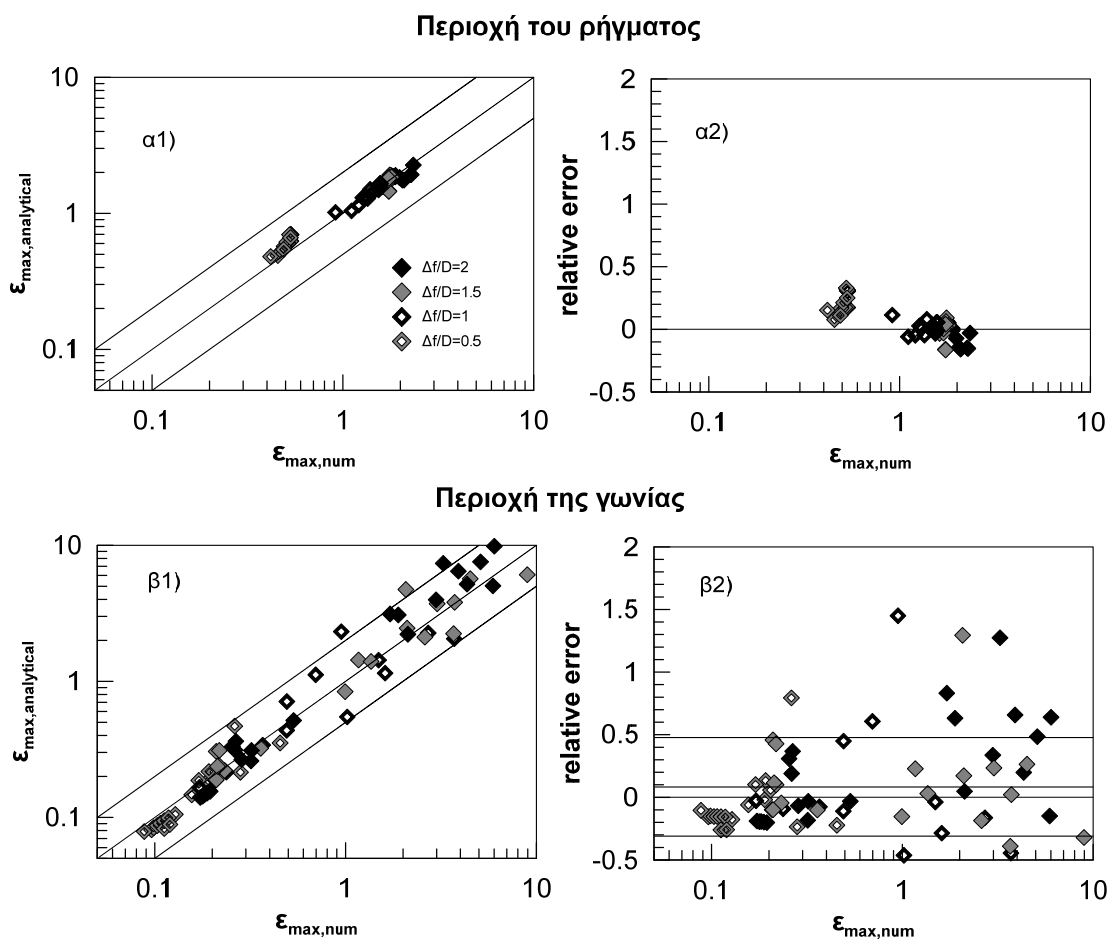
Απόσταση γωνίας ρήγματος L(m)	Γωνία του αγωγού φ(μοίρες)	Ανηγμένη Ακτίνα καμπυλότητας R/D(-)
100	15 30 45 60 75 90	10 40
100	45 90	5 20
150	45	10
50	45	10

Στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζεται η παραμετρική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε μέσω της απευθείας σύγκρισης των μέγιστων παραμορφώσεων των αριθμητικών αποτελεσμάτων και των αναλυτικών προβλέψεων κατά ζεύγη και κατά το σχετικό σφάλμα, στην περιοχή του ρήγματος (Σχήμα 6.9.α) και στην περιοχή της γωνίας (Σχήμα 6.9.β).

Στο Σχήμα 6.9.α2 παρατηρείται πως για επιβαλλόμενη μετακίνηση  $\Delta f/D=0.5$  οι αναλυτικές προβλέψεις στην περιοχή του ρήγματος υπερεκτιμούν τα αριθμητικά αποτελέσματα μέχρι και 25%. Όπως φαίνεται και στο βήμα 3 της μεθόδου (Σχήμα 6.4) υπερεκτιμώνται οι παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος για  $\Delta f/D=0.5$  με βάση τη βαθμονόμηση της εμπειρικής σχέσης που χρησιμοποιήθηκε, αυτή η απόκλιση είναι της τάξης του 0.05% η οποία ισχύει και για τις υπόλοιπες στάθμες μετακινήσεων. Ειδικά για τις μικρές μετακινήσεις όπου συνεπάγονται και μικρές παραμορφώσεις το σχετικό σφάλμα αυξάνεται αισθητά, το οποίο δεν είναι ανησυχητικό, διότι το απόλυτο σφάλμα είναι μικρό. Στις υπόλοιπες επιβαλλόμενες μετακινήσεις ρήγματος παρουσιάζεται μικρό σχετικό σφάλμα.

Στο Σχήμα 6.9.β2 για την περιοχή της γωνίας παρουσιάζονται σχετικά σφάλματα έως και 150%. Παρόλα αυτά αφορούν σε μικρές ανηγμένες ακτίνες καμπυλότητας  $R/D=5$ . Όπως σχολιάστηκε και στο Σχήμα 6.5 οφείλονται στις παραδοχές 1, 2 και 3 που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Αντίστοιχα και για τα σφάλματα της τάξης των 50 έως και 100% προκύπτουν για  $\Delta f/D=1.5$  και 2 τα οποία στις περισσότερες των περιπτώσεων αφορούν τη μη γραμμικότητα γεωμετρίας και

συνοριακών συνθηκών. Για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν εμφανίζονται φαινόμενα δευτέρας τάξεως, η συμπεριφορά της γωνίας και των συνοριακών της συνθηκών είναι κοντά στην ελαστική (παραδοχή 1) και δεν απαιτείται η γωνία να αναλάβει μεγάλη σχετικά μετακίνηση (δεν παραβιάζεται η παραδοχή 2) οι παραμορφώσεις παρουσιάζουν απόλυτο σχετικό σφάλμα έως και 50%. Συνολικά ο μέσος όρος των σφαλμάτων (όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 6.9.β2) είναι 8% με τυπική απόκλιση 39%.



**ΣΧΗΜΑ 6.9:** Σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών παραμορφώσεων στο φάσμα όλης της παραμετρικής ανάλυσης που διενεργήθηκε για 4 στάθμες μετακινήσεων. Στην περιοχή του ρήγματος (α), στην περιοχή της γωνίας (β).

Στο Σχήμα 6.10 επαναλαμβάνονται οι συγκρίσεις του Σχήματος 6.9, με τη διαφορά ότι το σχετικό σφάλμα παρουσιάζεται σε συνάρτηση με τις βασικές παραμέτρους του προβλήματος. Στο Σχήμα 6.10.α παρουσιάζεται το σχετικό σφάλμα όλων των αναλύσεων σε σχέση την ανηγμένη μετακίνηση  $\Delta f/D$  για τις 4 διαφορετικές ανηγμένες ακτίνες καμπυλότητας  $R/D$ . Στο Σχήμα 6.10.β σε σχέση με την ανηγμένη ακτίνα καμπυλότητας  $R/D$  για 4 διαφορετικές ανηγμένες επιβαλλόμενες μετακινήσεις  $\Delta f/D$ . Στο Σχήμα 6.10.γ σε σχέση με τη γωνία του αγωγού  $\phi$  για τις 4 ανηγμένες επιβαλλόμενες μετακινήσεις  $\Delta f/D$ . Τέλος στο Σχήμα 6.10.δ σε σχέση με την απόσταση ρήγματος και γωνίας  $L$ . Αριστερά οι συγκρίσεις αφορούν την περιοχή της γωνίας και δεξιά την περιοχή του ρήγματος.

Σε ότι αφορά στον υπολογισμό των μέγιστων παραμορφώσεων στην περιοχή του ρήγματος:

Σε όλες τις περιπτώσεις τα σχετικά σφάλματα έχουν μία διασπορά της τάξης του 20% γύρω από το μηδέν, με μία μικρή αύξηση για  $\Delta f/D=0.5$  όπως σχολιάστηκε και στο Σχήμα 6.7.α.

Σε ότι αφορά στον υπολογισμό των μέγιστων παραμορφώσεων στην περιοχή της γωνίας:

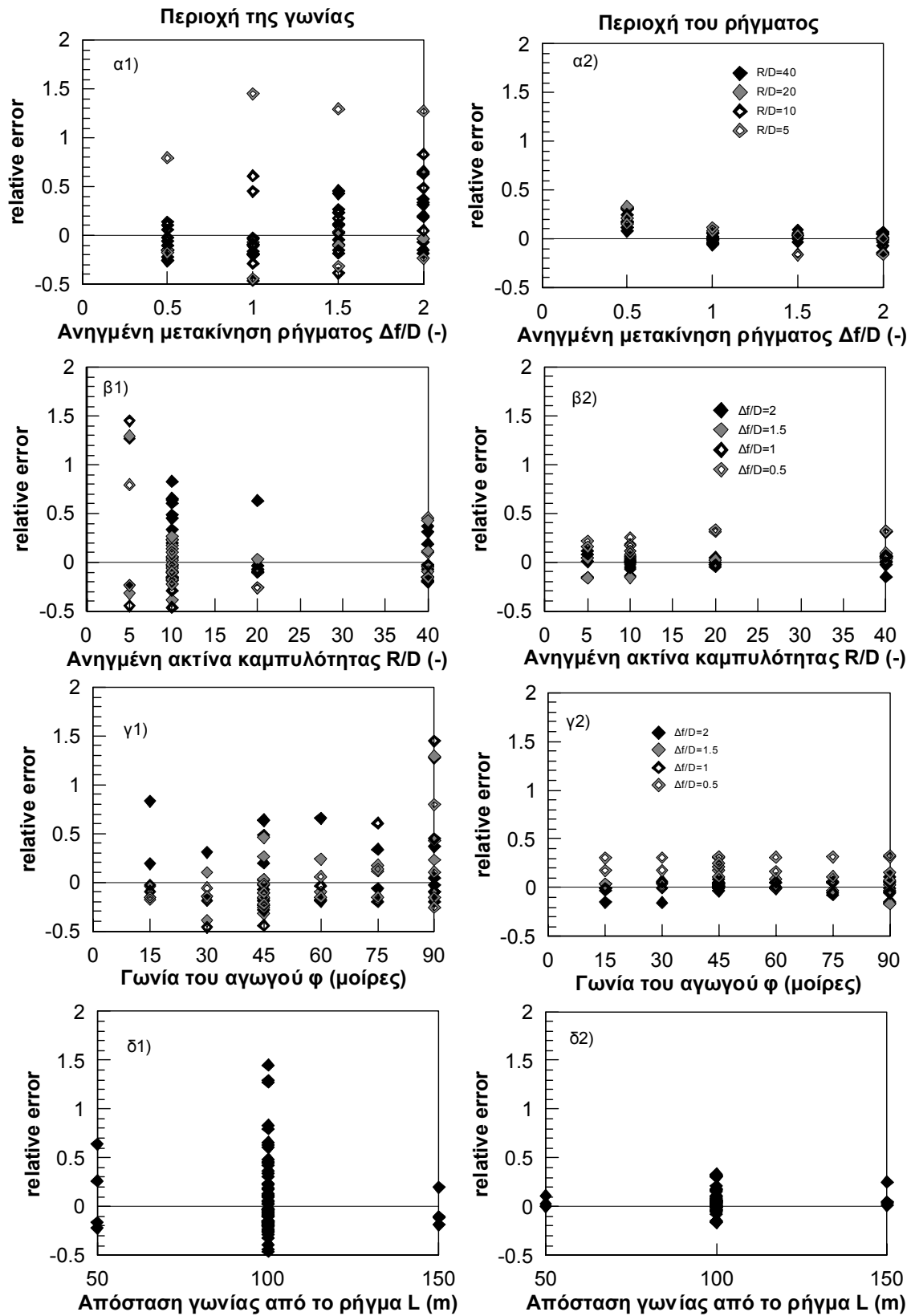
Στα Σχήματα 6.10.α και β παρατηρείται ότι όσο μειώνεται ο λόγος  $R/D$  και αυξάνεται ο λόγος  $\Delta f/D$ , αυξάνονται σημαντικά τα σχετικά σφάλματα, για τους λόγους που περιγράφηκαν στην αρχή της παραγράφου 6.3. Επίσης παρατηρείται ότι σχολιάστηκε στο Σχήμα 6.9.β2, δηλαδή ότι οι μεγάλες αποκλίσεις της τάξης του 150% αφορούν τις μικρές ακτίνες καμπυλότητας  $R/D=5$ .

Στο Σχήμα 6.10.γ παρατηρείται ότι τα σφάλματα για τις διάφορες γωνίες έχουν παρόμοια διασπορά, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η μέθοδος λαμβάνει ορθά υπόψιν την επίδραση της γωνίας  $\phi$  του αγωγού.

Στο Σχήμα 6.10.δ παρατηρείται ότι με την αύξηση της απόστασης ρήγματος γωνίας αυξάνεται και η ακρίβεια, διότι μειώνεται η επίδραση του ρήγματος πάνω στον αγωγό, έτσι ο αγωγός αποκρίνεται με συμπεριφορά πιο κοντά στην ελαστική όπου οι παραδοχές της μεθόδου (1,2,3 της παραγράφου 6.2.1) ευσταθούν περισσότερο, όπως εξηγήθηκε και στο Σχήμα 6.7.

Συμπερασματικά η μέθοδος παρουσιάζει τα εξής προβλήματα ως προς την πρόβλεψη των παραμορφώσεων στην περιοχή της γωνίας:

- Αποκλίνουν αναλυτικές προβλέψεις και αριθμητικά αποτελέσματα για μικρές ακτίνες καμπυλότητας όπως εξηγήθηκε στο Σχήμα 6.5, οπότε πρέπει να εφαρμοστεί ως όριο της μεθόδου το  $R/D=10$ . Αυτό το όριο δικαιολογείται και από το γεγονός ότι σε εφαρμογές της πράξης η ανηγμένη ακτίνα  $R/D=10$  της γωνίας είναι το ελάχιστο όριο, όπως εξηγήθηκε και στο Κεφάλαιο 2.3.
- Για μεγάλες επιβαλλόμενες μετακινήσεις ρήγματος  $\Delta f/D$  παρουσιάζονται φαινόμενα δευτέρας τάξης και υποεκτιμώνται οι εγκάρσιες μετακινήσεις της γωνίας του αγωγού σε σημείο που οδηγείται η μέθοδος σε υπερεκτιμήσεις των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Για γωνίες κοντά στην ορθή ( $\phi=90^\circ$ ) τείνουν οι αναλυτικές προβλέψεις να υπερεκτιμούν τα αριθμητικά αποτελέσματα, ενώ για γωνίες κοντά στις  $\phi=45^\circ$  τα υποεκτιμούν, λόγω των παραδοχών 1 και 2, όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 6.3. Σε ότι αφορά τις μικρές αποστάσεις ρήγματος γωνίας  $L$  (ως ελάχιστη απόσταση ορίζεται το καμπυλωμένο μήκος της περιοχής του ρήγματος διότι δεν έχει ληφθεί υπόψη αυτή η αλληλεπίδραση στη μέθοδο) οι παραπάνω αποκλίσεις εντείνονται και παρουσιάζονται και σε μικρότερες τιμές ανηγμένης



**ΣΧΗΜΑ 6.10:** Σχετικά σφάλματα στην περιοχή της γωνίας και του ρήγματος συναρτήσει των παραμέτρων ανηγμένη μετακίνηση ρήγματος  $\Delta f/D$ , ακτίνα καμπυλότητας  $R/D$ , γωνίας του αγωγού  $\phi$  και απόσταση γωνίας από το ρήγμα  $L$ .



επιβαλλόμενης μετακίνησης ρήγματος  $\Delta f/D$ , διότι απαιτείται από τη γωνία να αναλάβει περισσότερη σχετικά μετακίνηση η οποία την οδηγεί σε μη γραμμική συμπεριφορά (παραδοχές 1 και 3). Αντίστοιχο κριτήριο με την ακτίνα καμπυλότητας δεν είναι πρακτικό να εφαρμοστεί για  $\Delta f/D, \phi$  και  $L$  διότι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Για αυτό και είναι σκόπιμο παρακάτω να αναζητηθεί ένας συντελεστής ο οποίος να λαμβάνει υπόψιν του τους παράγοντες  $\Delta f/D, \phi$  και  $L$  όπου εμμέσως προΐδεάζουν για τη μετακίνηση που απαιτείται να αναλάβει η γωνία ώστε να τεθεί κάποια τιμή του ως όριο εφαρμογής της μεθόδου, διότι πέραν αυτού λαμβάνονται προβλέψεις με μεγάλη απόκλιση από τα αριθμητικά αποτελέσματα.

**Όρια εφαρμογής της μεθόδου.**-Τίθεται ο συντελεστής  $\alpha = \delta_0/F_{11}$ . Ο όρος  $F_{11}$  είναι ο όρος αξονικής ευκαμψίας όπως ορίστηκε στο κεφάλαιο 5. Δηλαδή είναι η αξονική μετακίνηση που θα δεχθεί ένα καμπύλο τμήμα πακτωμένο στο ένα άκρο για μοναδιαία αξονική δύναμη στο ελεύθερο άκρο του. Επιλέχθηκε αυτή η ποσότητα διότι εμπεριέχει την ακτίνα  $R$ , τη γωνία  $\phi$  και τη διατομή του καμπύλου τμήματος  $D, I, A$  και εμμέσως πληροφορεί για τη δυσκαμψία του αγωγού. Έπειτα ο όρος  $\delta_0$  είναι η αρχική μετακίνηση που επιβάλλεται στο πρόβλημα όπως ορίστηκε στο κεφάλαιο 5, δηλαδή είναι η μετακίνηση του αγωγού στην περιοχή της γωνίας εάν δεν υπήρχε η γωνία. Ο συντελεστής αφορά το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα όπου υπεισέρχεται. Επιλέχθηκε αυτή η ποσότητα διότι εμπεριέχει την επιβαλλόμενη μετακίνηση  $\Delta f$  και την απόσταση γωνίας ρήγματος  $L$ , ακόμη και την τριβή του αγωγού  $t_u$ .

Ο συντελεστής στηρίζεται στην εξής λογική. Όσο μειώνεται ο συντελεστής τόσο αυξάνεται η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου. Όσο πιο μικρή μετακίνηση επιβάλλεται και όσο πιο μακριά βρίσκεται το ρήγμα από τη γωνία τόσο λιγότερο επηρεάζεται η γωνία όπως σχολιάστηκε και παραπάνω, τότε η απαιτούμενη  $\delta_0$  που καλείται αρχικά να αναλάβει η γωνία είναι μικρή και σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχει περισσότερη ακρίβεια όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.8.δ1 και 6.8.α1. Για αυτό και το  $\delta_0$  είναι στον αριθμητή. Όσο πιο εύκαμπτος είναι ο αγωγός, δηλαδή έχει μεγάλη ακτίνα τότε αυξάνεται το  $F_{11}$  όπως και η ακρίβεια όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.8.β. Για αυτό και το  $F_{11}$  είναι στον παρονομαστή.

Εξαρχής περιορίζεται η μέθοδος για λόγους  $R/D$  μεγαλύτερους ίσους του 10 διότι αυτό είναι σύμφωνο με την πράξη και επειδή όπως εξηγήθηκε και στις παραγράφους 6.2.1 και 6.2.3 η μέθοδος αποτυγχάνει να προβλέψει με ακρίβεια τις παραμορφώσεις για  $R=5D$ . Οπότε με βάση και το Σχήμα 6.11 τίθεται το όριο του συντελεστή  $\alpha$  στο 30000 διότι πέραν αυτού υπάρχουν περιπτώσεις που υποεκτιμώνται αρκετά οι παραμορφώσεις μέχρι και 60%. Οι περιπτώσεις όπου υπερεκτιμώνται μέχρι και 150% αφορούν  $R=5D$ , οπότε δεν επηρεάζουν την επιλογή του ορίου.

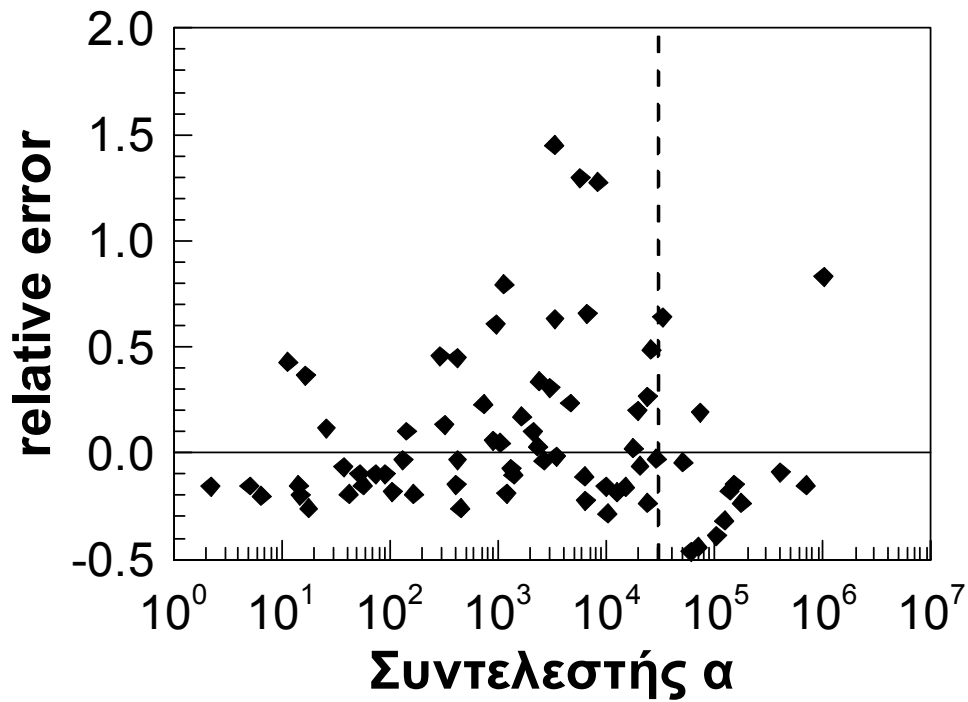
$$\alpha = \frac{\delta_0}{F_{11}}$$

Όπου:

$$F_{11} = \frac{R}{EA} \left( \frac{\varphi_0}{2} + \frac{\sin 2\varphi_0}{4} \right) + \frac{R^3}{EI} \left( \frac{3\varphi_0}{2} + \frac{\sin 2\varphi_0}{4} - 2\sin \varphi_0 \right)$$

$$\delta_0 = \frac{F_0^2}{2EA t_u}$$

$$F_0 = \sqrt{EA t_u \Delta X} - L_0 t_u$$



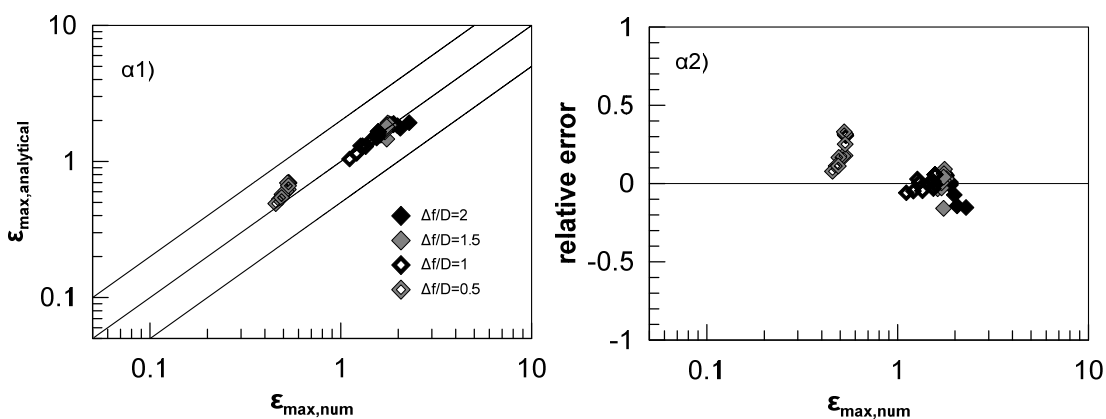
**ΣΧΗΜΑ 6.11:** Σχετικό σφάλμα συναρτήσεως του συντελεστή α.

Τα σχήματα 6.12 και 13 είναι αντίστοιχα των 6.9 και 10 καθώς είναι τα ίδια διαγράμματα μόνο με τα σημεία που πληρούν τα όρια που έχουν τεθεί για τη μέθοδο. Παρατηρείται ότι το εύρος της ακρίβειας της μεθόδου με αυτά τα όρια είναι μέχρι και 25% υποεκτίμηση και μέχρι 60% υπερεκτίμηση των παραμορφώσεων. Συνολικά ο μέσος όρος των σφαλμάτων (όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 6.12.β2) είναι 4% με τυπική απόκλιση 25%.

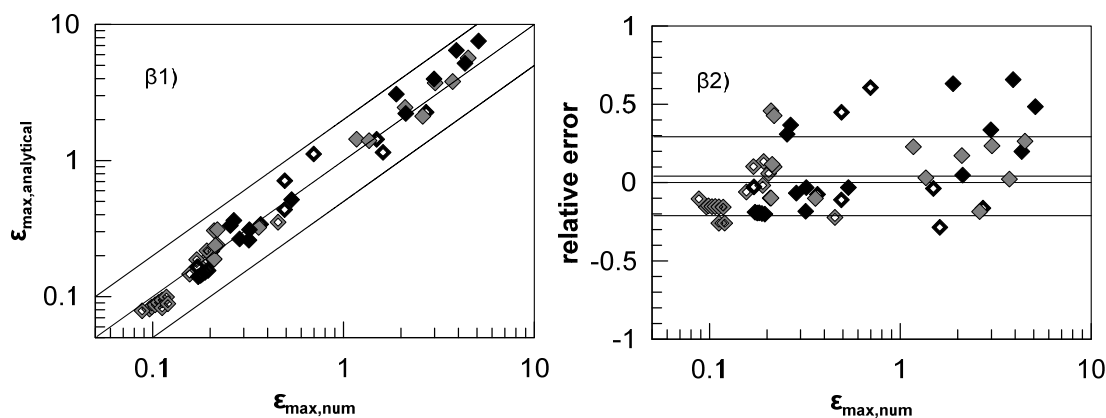
$$\alpha < 30000$$

$$\frac{R}{D} \geq 10$$

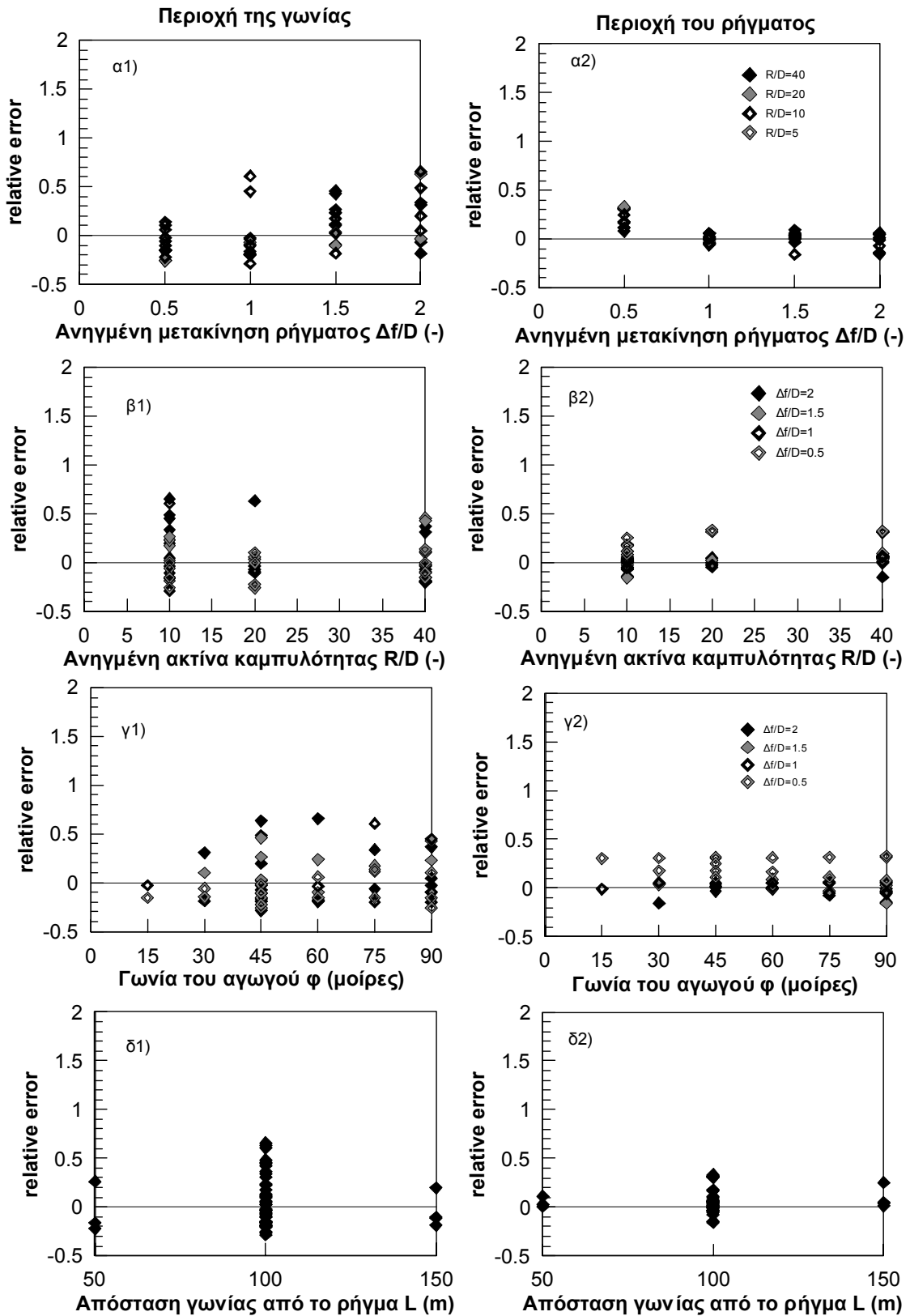
Περιοχή του ρήγματος



Περιοχή της γωνίας



**ΣΧΗΜΑ 6.12:** Σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών παραμορφώσεων στο φάσμα όλης της παραμετρικής ανάλυσης που διενεργήθηκε για 4 επιβαλλόμενες μετακινήσεις ρήγματος  $\Delta f/D$ , στην περιοχή του ρήγματος (α) και στην περιοχή της γωνίας (β). Τα στοιχεία αυτά αφορούν μόνο τα όρια της μεθόδου όπως ορίστηκαν παραπάνω.



**ΣΧΗΜΑ 6.13:** Σχετικά σφάλματα στην περιοχή της γωνίας και του ρήγματος συναρτήσει των παραμέτρων ανηγμένη μετακίνηση ρήγματος  $\Delta f/D$ , ακτίνα καμπυλότητας  $R/D$ , γωνίας του αγωγού  $\phi$  και απόσταση γωνίας από το ρήγμα  $L$ . Τα στοιχεία αυτά αφορούν μόνο τα όρια της μεθόδου όπως ορίστηκαν παραπάνω.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**

### **7.1. Περίληψη-Συμπεράσματα**

Στις επόμενες παραγράφους συνοψίζονται αρχικά τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από κάθε ενότητα εργασίας, δηλαδή από την *Βιβλιογραφική Αναδρομή* έως και την διατύπωση της *Νέας Αναλυτικής Μεθοδολογίας*. Τέλος, συνοψίζονται τα συμπεράσματα που αφορούν στο πεδίο εφαρμογής της νέας μεθοδολογίας, ήτοι στο εύρος των δεδομένων για τις οποίες οι αναλυτικές προβλέψεις είναι ικανοποιητικά ακριβείς.

#### **(α) Βιβλιογραφική αναδρομή**

- Οι παλαιότερες μέθοδοι των Newmark & Hall(1975), Kennedy et al. (1977) και Wang & Yeh(1985), οι οποίες ήταν πρωτοποριακές για την εποχή τους, θεωρούνται σήμερα πλέον ξεπερασμένες δεδομένου ότι αφορούν μεγάλες μετακινήσεις ρήγματος και οδηγούν σε υπερ-συντηρητικά προβλεπόμενες μεγάλες παραμορφώσεις για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές.
- Πρόσφατα σχετικά, έχουν αναπτυχθεί περισσότερο ακριβείς αναλυτικές μέθοδοι για ευθύγραμμο αγωγό, οι οποίες επιλύουν το πρόβλημα ικανοποιητικά για συνήθεις συνθήκες αγωγού και ρήγματος, τόσο για κανονικά όσο και για οριζοντίως διατεταγμένα ρήγματα (Karamitros et al., 2007, Trifonov et al., 2010, Trifonov et al., 2011, Karamitros et al., 2011).
- Οι μέχρι τώρα διαθέσιμες μέθοδοι οποίες αφορούν μόνο ορθές γωνίες [O'Rourke & Liu(1999), η Διπλωματική Εργασία της Β. Γκεσούλη (ΕΜΠ,2008)], και δεν ισχύουν για την πραγματική, και πολύ πιο ευνοϊκή, κατάσταση όπου η «γωνία» της χάραξης του αγωγού επιτυγχάνεται στο πεδίο με τόξο συναρμογής αρκετά μεγάλης ακτίνας καμπυλότητας.

#### **(β) Αριθμητικές αναλύσεις**

- Οι γωνίες 30 και 45° αποδείχθηκαν πιο κρίσιμες από άποψη παραμορφώσεων σε σχέση με την γωνία 90°, όπερ σημαίνει ότι μία πλήρης αναλυτική μέθοδος για τεθλασμένο αγωγό θα πρέπει να επεκτείνεται και σε γωνίες πέραν της ορθής.
- Οι παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή της καμπύλωσης μειώνονται αυξανόμενης της ακτίνας καμπυλότητας της συναρμογής, και για αυτό η παραδοχή της μηδενικής ακτίνας συναρμογής είναι υπερβολικά συντηρητική και ασύμφορη για το σχεδιασμό.
- Οι παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος μειώνονται εν γένει λόγω της ύπαρξης γωνίας, δεδομένου ότι η αξονική μετακίνηση αναλαμβάνεται, εκτός από την τριβή αγωγού - επίχωσης, και από την εγκάρσια μετακίνηση της γωνίας.
- Οι εν λόγω παραμορφώσεις επηρεάζονται κυρίως από την απόσταση της γωνίας από την περιοχή του ρήγματος και δευτερευόντως από την ακτίνα και τη γωνία του τόξου συναρμογής.
- Για μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας (όπως στη συνήθη περίπτωση των 40 διαμέτρων του αγωγού), μεγάλη απόσταση ρήγματος γωνίας (100 με 150m) και για επιβαλλόμενη

μετακίνηση ρήγματος έως και μία διάμετρο του αγωγού η συμπεριφορά του τεθλασμένου αγωγού τείνει ασυμπτωτικά στην συμπεριφορά του ευθύγραμμου αγωγού.

### **(γ) Νέα αναλυτική μεθοδολογία.**

- Βαθμονομήθηκε η σχέση για την καμπτική παραμόρφωση πρώτης και δεύτερης τάξης των Karamitros et al. 2007 ώστε να προβλέπει με ακρίβεια τις παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος και για περιπτώσεις καμπύλωσης του αγωγού πλησίον του ίχνους του ρήγματος. (παράγραφος 6.2.3)
- Η επίδραση της ακτίνας του τόξου είναι ακριβής για ακτίνες που αφορούν το σχεδιασμό (10 έως και 40 διαμέτρων. Οι αποκλίσεις αυξάνουν όσο μικραίνει η ακτίνα του τόξου συναρμογής.
- Η επίδραση της απόστασης ρήγματος από τη γωνία προσομοιώνεται με ακρίβεια μέχρι και μεσαίες επιβαλλόμενες μετακινήσεις όσο και 1 διάμετρος του αγωγού (για ρήγμα οριζοντίας διατμήσεως κλίσης  $45^\circ$ ).
- Η επίδραση της επιβαλλόμενης μετακίνησης ρήγματος προσομοιώνεται με ακρίβεια για μεγάλο εύρος μετακινήσεων, έως και 1.5 διάμετρο του αγωγού (για ρήγμα οριζοντίας διατμήσεως κλίσης  $45^\circ$ ). Για μεγαλύτερες μετακινήσεις, υπεισέρχονται φαινόμενα δευτέρας τάξεως τα οποία δεν έχουν ληφθεί υπόψη στις εξισώσεις της προτεινόμενης μεθόδου, όποτε και οδηγούμαστε σε υπερεκτίμηση των παραμορφώσεων.
- Επίσης, σημαντική υπερ-εκτίμηση των παραμορφώσεων του αγωγού προκαλούνται, λόγω της παραδοχής των ελαστικών συντοριακών συνθηκών, για γωνίες καμπύλωσης του αγωγού που πλησιάζουν στην ορθή και για μικρή ακτίνα του τόξου. Επίσης σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει η πιθανότητα η μέγιστη παραμόρφωση να εντοπιστεί εκτός του τόξου συναρμογής. (επισημαίνεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος ισχύει μόνο για παραμορφώσεις που προκύπτουν εντός του τόξου συναρμογής).

### **(δ) Πεδίο εφαρμογής της Νέας Μεθοδολογίας.**

- Η νέα προτεινόμενη μεθοδολογία προβλέπει ικανοποιητικά την εντατική κατάσταση του αγωγού για γωνίες από  $15^\circ$  μέχρι και  $90^\circ$ , απόσταση από το ρήγμα από 50m μέχρι και 150m, για τις συνήθεις ακτίνες τόξου συναρμογής 10 έως και 40 διαμέτρων του αγωγού και για επιβαλλόμενη μετακίνηση ρήγματος όσο και 1.5 διάμετρο του αγωγού για ρήγμα οριζοντίας διατμήσεως κλίσης  $45^\circ$ .
- Στις ανωτέρω περιπτώσεις, το σχετικό σφάλμα είναι της τάξης του 25% υποεκτίμηση και 60% υπερεκτίμηση. Με την εισαγωγή των περιορισμών της ελάχιστης ακτίνας τόξου (στα όρια της πράξης) και ενός συντελεστή που λαμβάνει υπόψη την απαιτούμενη μετακίνηση και την ευκαμψία της γωνίας, περιορίζεται η εφαρμογή της μεθόδου στις κυρίως ανωτέρω περιπτώσεις.
- Οι παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή της γωνίας υπερεκτιμώνται για γωνίες του τόξου συναρμογής 75 και  $90^\circ$ , και για επιβαλλόμενες μετακινήσεις ρήγματος οριζοντίας διατμήσεως κλίσης  $45^\circ$  πέραν 1.5 φορές της διαμέτρου του αγωγού.

- Οι παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή της γωνίας υποεκτιμώνται για γωνίες του τόξου συναρμογής 30 και 45° και για ακτίνες καμπυλότητας 5 και 10 διαμέτρων του αγωγού.

## 7.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Οι αιτίες των ανωτέρω αποκλίσεων της μεθόδου οφείλονται κυρίως (όπως αναφέρεται και στις παραδοχές στην παράγραφο 6.2.1) στις συνοριακές συνθήκες του προσομοιώματος όσον αφορά την γωνία του αγωγού, καθώς επίσης και στο ότι αμελούνται φαινόμενα δευτέρας τάξεως. Πέραν των ανωτέρω, επισημαίνεται ότι οι αριθμητικές αναλύσεις ήταν σχετικά περιορισμένες σε αριθμό και αφορούσαν μόνο σε ρήγμα οριζοντίας διατμήσεως γωνίας 45°.

Κατ' επέκταση των ανωτέρω προτείνονται οι εξής βελτιώσεις και διερευνήσεις για μελλοντική έρευνα:

- Περισσότερες αριθμητικές αναλύσεις, για μεγαλύτερο εύρος των βασικών παραμέτρων του προβλήματος, και σύγκριση με την αναλυτική μεθοδολογία, προκειμένου να εξακριβωθεί με μεγαλύτερη το εύρος εφαρμογής της και το αναμενόμενο σφάλμα των αναλυτικών υπολογισμών
- Βελτίωση των συνοριακών συνθηκών, προκειμένου να ληφθεί υπόψη ο μη γραμμικός χαρακτήρας τους, ιδιαίτερα για μικρές ακτίνες καμπυλότητας και γωνίες αγωγού κοντά στην ορθή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω προσθήκης καμπτόμενου ευθύγραμμου μήκους στο προσομοίωμα της περιοχής της γωνίας, με μήκος το οποίο θα υπολογίζεται αντίστοιχα με τη μέθοδο των Karamitros et al.2007, ή με τη χρήση μειωμένου μέτρου ελαστικότητας για τα ήδη υπάρχοντα ελατήρια με βάση το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας που χρησιμοποιείται και για τον ίδιο το φορέα της γωνίας.
- Αναθεώρηση του αξονικού ελατηρίου και παραμετρική διερεύνηση κατά πόσο είναι προτιμότερη η χρήση του εφαπτομενικού ή του τέμνοντος μέτρου δυστένιας του. Από την έως τώρα εμπειρία, προκύπτει ότι χρήση του εφαπτομενικού μέτρου δυστένιας υπερεκτιμά τις μετακινήσεις του αγωγού και αντίστοιχα υπο-εκτιμά τις παραμορφώσεις.
- Διερεύνηση και προσομοίωση των φαινομένων δευτέρας τάξης για μεγάλες επιβαλλόμενες μετακινήσεις του ρήγματος και για μικρές αποστάσεις ρήγματος - γωνίας. Αυτό θα οδηγήσει στον βελτιωμένο υπολογισμό των αναπτυσσόμενων ροπών, ώστε να μην υπερεκτιμώνται οι παραμορφώσεις.
- Διερεύνηση της επίδρασης της εσωτερικής πίεσης του αγωγού, και συγκεκριμένα κατά πόσο η εσωτερική πίεση επηρεάζει σημαντικά τις παραμορφώσεις στη γωνία. Εάν αποδειχθεί ότι η εν λόγω επίδραση είναι σημαντική, η εσωτερική πίεση μπορεί να εισαχθεί στη μέθοδο ως αρχική εντατική κατάσταση.
- Επέκταση της μεθοδολογίας στην περίπτωση που το έντονα καμπυλωμένο μήκος του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος επικαλύπτεται με το έντονα καμπυλωμένο μήκος στην περιοχή της γωνίας του αγωγού.





## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική αναδρομή**

Γκεσούλη Β.

Απλοποιημένη εντατική ανάλυση αγωγών με γωνία σε διασταυρώσεις με ορθά τεκτονικά ρήγματα  
Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, ΕΜΠ Οκτώβρης 2008

Joshi, S., Prashant, A., Deb, A., Jain, S.K.

Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion  
(2011) Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31 (7), pp. 930-940.

Karamitros, D.K., Bouckovalas, G.D., Kouretzis, G.P.

Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings  
(2007) Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27 (3), pp. 200-211.

Karamitros, D.K., Bouckovalas, G.D., Kouretzis, G.P., Gkesouli, V.

An analytical method for strength verification of buried steel pipelines at normal fault crossings  
(2011) Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31 (11), pp. 1452-1464.

Kennedy, Robert P., Chow, Andrew M., Williamson, Robert A.

FAULT MOVEMENT EFFECTS ON BURIED OIL PIPELINE  
(1977) ASCE Transp Eng J, 103 (5), pp. 617-633.

Michael J. O'Rourke, Xuejie Liu

Influence of an elbow or bend  
RESPONSE OF BURIED PIPELINES SUBJECT T O EARTHQUAKE EFFECTS, Chapter 6.4, Pages 106-111

Newmark, N.M., Hall, W.J.

PIPELINE DESIGN TO RESIST LARGE FAULT DISPLACEMENT.  
(1975) , pp. 416-425.

Takada, S., Hassani, N., Fukuda, K.

A new proposal for simplified design of buried steel pipes crossing active faults  
(2001) Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30 (8), pp. 1243-1257.

Trifonov, O.V., Cherniy, V.P.

A semi-analytical approach to a nonlinear stress-strain analysis of buried steel pipelines crossing active faults  
(2010) Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30 (11), pp. 1298-1308.

Trifonov, O.V., Cherniy, V.P.

Elastoplastic stress-strain analysis of buried steel pipelines subjected to fault displacements with account for service loads  
(2012) Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 33 (1), pp. 54-62.

Vazouras, P., Karamanos, S.A., Dakoulas, P.

Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults  
Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 41, October 2012, Pages 164-180

Wang, Leon Ru-Liang, Yeh, Yaw-Huei  
REFINED SEISMIC ANALYSIS AND DESIGN OF BURIED PIPELINE FOR FAULT MOVEMENT.  
(1985) Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 13 (1), pp. 75-96.

WANG Bin, LI Xin, ZHOU Jing  
Strain analysis of buried steel pipelines across strike-slip faults  
J. Cent. South Univ. Technol. (2011) 18: 1654–1661

Xie, X., Symans, M.D. , O'Rourke, M.J., Abdoun, T.H., O'Rourke, T.D., Palmer, M.C., Stewart, H.E.  
Numerical modeling of buried HDPE pipelines subjected to strike-slip faulting  
Journal of Earthquake Engineering, Volume 15, Issue 8, 1 December 2011, Pages 1273-1296

Yoshizaki, K., O'Rourke, T.D., Hamada, M.  
Study Probes Pipelines with Elbows Subjected to Permanent Ground Deformation  
(2004) Pipeline and Gas Journal, 231 (1), pp. 32-39.

### **Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία αριθμητικής ανάλυσης**

American Lifelines Alliance -ASCE  
RESPONSE OF BURIED PIPELINES SUBJECT TO EARTHQUAKE EFFECTS, Chapter 8 and Appendices A&B

ANSYS Inc. ANSYS release 12.0 documentation

### **Κεφάλαιο 5: Προτεινόμενη αναλυτική μέθοδος**

Γκεσούλη Β.  
Απλοποιημένη εντατική ανάλυση αγωγών με γωνία σε διασταυρώσεις με ορθά τεκτονικά ρήγματα  
Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, ΕΜΠ Οκτώβρης 2008

Μέθοδος Άμεσης Δυσκαμψίας  
Βιβλίο Σημειώσεων από το μάθημα ΣΤΑΤΙΚΗ 3: Μητρικές μέθοδοι της Σχολής Πολιτικών  
Μηχανικών ΕΜΠ  
Σύγχρονες Μέθοδοι Αναλύσεως Φορέων (Παπαδρακάκης Μ., Κατσικαδέλης Ι.Θ., Σαπουντζάκης Ε.Ι.,  
Νεραντζάκη Μ.Ν.), ΑΘΗΝΑ 2008

Karamitros, D.K., Bouckovalas, G.D., Kouretzis, G.P.  
Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings  
(2007) Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27 (3), pp. 200-211.

Michael J. O'Rourke, Xuejie Liu  
Influence of an elbow or bend  
RESPONSE OF BURIED PIPELINES SUBJECT T O EARTHQUAKE EFFECTS, Chapter 6.4, Pages 106-111