

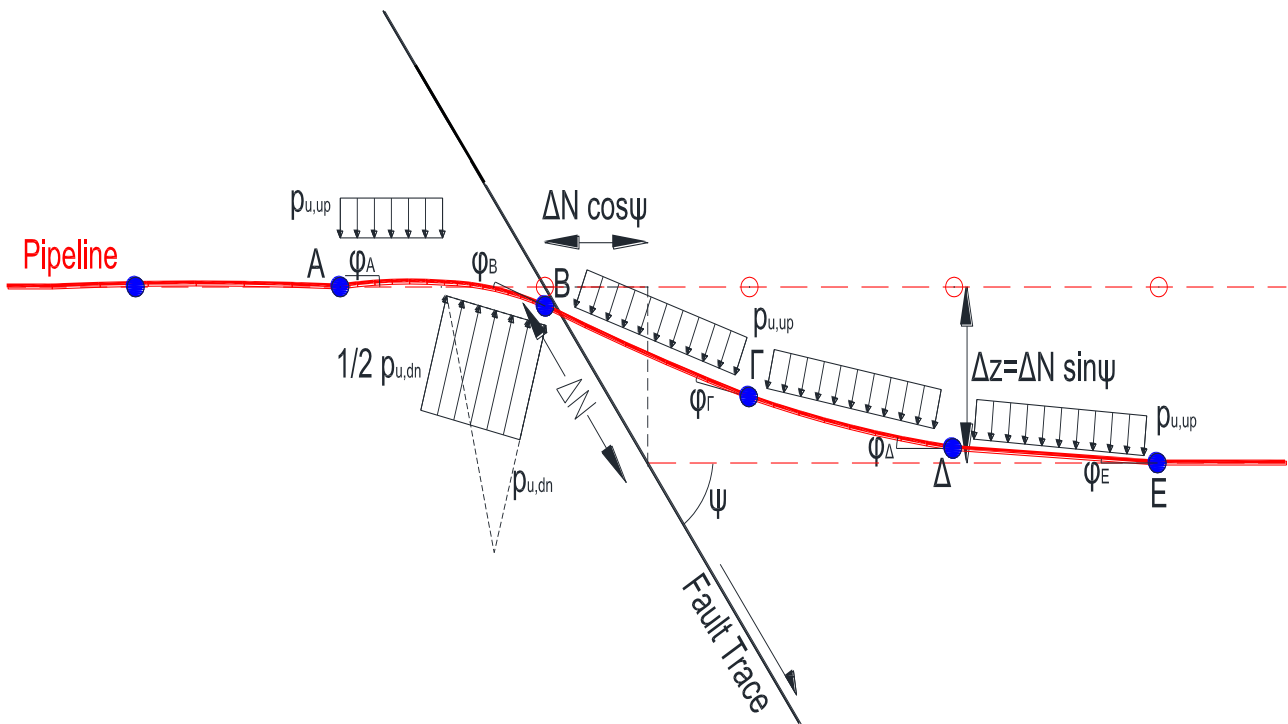


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ
ΣΕ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΕΙΣ ΜΕ ΡΗΓΜΑΤΑ ΟΡΘΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ**



ΔΑΓΓΑΛΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

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

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2015

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επιθυμώ να εκφράσω θερμές ευχαριστίες σε όλους εκείνους που συνέβαλαν, ο καθένας με το δικό του ιδιαίτερο τρόπο, στην υλοποίησή της.

Πρωταρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Γ. Μπουκοβάλα, επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, τις εύστοχες υποδείξεις του καθώς και για τη γενικότερη καθοδήγηση που μου προσέφερε.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αλέξανδρο Βαλσαμή, Διδάκτορα Πολιτικό Μηχανικό ΕΜΠ, για τις συμβουλές του και τη συνεχή στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Λεωνίδα Ζάμπα, Διευθυντή Διεύθυνσης έργων της εταιρίας ΑΣΠΡΟΦΟΣ ΑΕ., για τα πολύτιμα τεχνικο-οικονομικά στοιχεία που μου παρείχε, τα οποία ήταν απαραίτητα για την ολοκλήρωση της εν λόγω εργασίας.

Επιπρόσθετα, δε θα μπορούσα να ξεχάσω τη φίλη και συνάδελφο Μαριάννα Ιωάννου, την οποία ευχαριστώ πολύ για τη συμπαράσταση, τη βοήθεια και την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε.

Φυσικά το μεγαλύτερο ευχαριστώ το χρωστάω στους φίλους μου, αλλά κυρίως στην οικογένειά μου, στους γονείς μου και την αδερφή μου, για τη συνεχή υποστήριξη τους και την εμπιστοσύνη που μου δείχνουν όλα αυτά τα χρόνια. Γι' αυτό και η παρούσα εργασία είναι αφιερωμένη σε αυτούς.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	5
2. Μηχανισμοί και Λειτουργία Εύκαμπτων Κόμβων	9
2.1 Γενικά.....	9
2.2 Ιστορικό	10
2.3 Είδη εμπορικά διαθέσιμων εύκαμπτων κόμβων	14
2.3.1 Απλοί κόμβοι ολίσθησης (Slip expansion joints)	14
2.3.2 Κόμβοι τύπου «σφαίρας» με ή χωρίς ικανότητα επιμήκυνσης (Expansion/ Ball joints)	15
2.3.3 Εύκαμπτοι κόμβοι τύπου «Bellows»	16
2.3.4 Σύνθετοι κόμβοι.....	18
3. Αναλυτικές μεθοδολογίες σχεδιασμού αγωγών σε ρήγματα	19
3.1 Γενικά.....	19
3.2 Αναλυτικές μέθοδοι για συνεχείς ευθύγραμμους αγωγούς	20
3.2.1 Μεθοδολογία Newmark and Hall (1975)	20
3.2.2 Μεθοδολογία Kenedy et al (1977).....	22
3.2.3 Μεθοδολογία Wang and Yeh (1985).....	24
3.2.4 Μεθοδολογία Takada et al. (2001)	26
3.2.5 Μεθοδολογία Karamitros et al. (2007)	27
3.2.6 Μεθοδολογία Trifonov & Cherniy (2010).....	29
3.2.7 Μεθοδολογία Karamitros et al. (2011)	30
3.3 Αναλυτικές μέθοδοι για σπονδυλωτούς αγωγούς.....	31
3.3.1 Μεθοδολογία O'Rourke & Trautmann (1981)	32
3.3.2 Μεθοδολογία Takada (1984)	34
3.3.3 Μεθοδολογία Tan & Yang (1988).....	36
3.3.4 Μεθοδολογία ALA Guidelines (ASCE 2005).	37
3.3.5 Μεθοδολογία O'Rourke (2009)	38
3.3.6 Μεθοδολογία O'Rourke & Liu (2012)	39
3.4 Συμπεράσματα	40
4. Προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία για κανονικά ρήγματα	41
4.1 Γενικά.....	41
4.2 Παραδοχές αναλυτικής μεθοδολογίας	42

4.3 Διαφορές σχετικά με τους συνεχείς αγωγούς	46
4.4 Περιγραφή της αναλυτικής μεθοδολογίας	50
5. Παρουσίαση αριθμητικής μεθοδολογίας για κανονικά ρήγματα	61
5.1 Γενικά.....	61
5.2 Προσομοίωμα Πεπερασμένων Στοιχείων αγωγού.....	61
5.3 Προσομοίωση εδάφους.....	64
5.4 Προσομοίωση εύκαμπτων κόμβων.....	70
5.5 Τυπικά αποτελέσματα.....	72
5.5.1 Αριθμητική ανάλυση συνεχούς αγωγού	72
5.5.2 Αριθμητική ανάλυση αγωγού με εύκαμπτους κόμβους	76
6. Σύγκριση αναλυτικών λύσεων με αριθμητικές αναλύσεις	83
6.1 Παρουσίαση αριθμητικών αναλύσεων	83
6.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών και αριθμητικών αναλύσεων.....	86
6.3 Διαγράμματα σχετικού λάθους αναλυτικής μεθοδολογίας.....	98
6.4 Συμπεράσματα	106
7. Σύγκριση της νέας μεθόδου σχεδιασμού με τις συμβατικές	109
7.1 Εισαγωγή	109
7.2 Μέθοδοι σχεδιασμού αγωγών έναντι μεγάλων εδαφικών μετατοπίσεων λόγω διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων.....	109
7.3 Σύγκριση μεθοδολογιών ως προς την αποδοτικότητα και το κόστος.....	115
8. Συμπεράσματα	119
9. Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	123
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Παραμετρική διερεύνηση επιρροής τάσης διαρροής για συνδυασμό αξονικής δύναμης και ροπής	127
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Αναλυτικές και αριθμητικές επιλύσεις.....	137

1

Εισαγωγή

Οι σεισμικά επιβαλλόμενες μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις, όπως αυτές που προκαλούνται από τη διάρρηξη ενεργών ρηγμάτων, την οριζόντια εξάπλωση ρευστοποιημένων εδαφών ή τις κατολισθήσεις (κυκλικές ή επίπεδες εδαφικές αστοχίες), αποτελούν έναν από τους πλέον σοβαρούς κινδύνους που αντιμετωπίζουν οι υπόγειοι αγωγοί μεταφοράς πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι (α) οι αγωγοί είναι γραμμικές κατασκευές πολύ μεγάλου μήκους και κατά συνέπεια, είναι σχεδόν αδύνατο η χάραξη τους να μη διασχίζει ρηξιγενείς ζώνες ενεργών ρηγμάτων ή περιοχές με πιθανές εδαφικές αστοχίες (κατολισθήσεις, οριζόντια εξάπλωση), και (β) οι μετακινήσεις αυτές είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που προκαλούνται από τη σεισμική δόνηση και επιπλέον είναι μόνιμες.

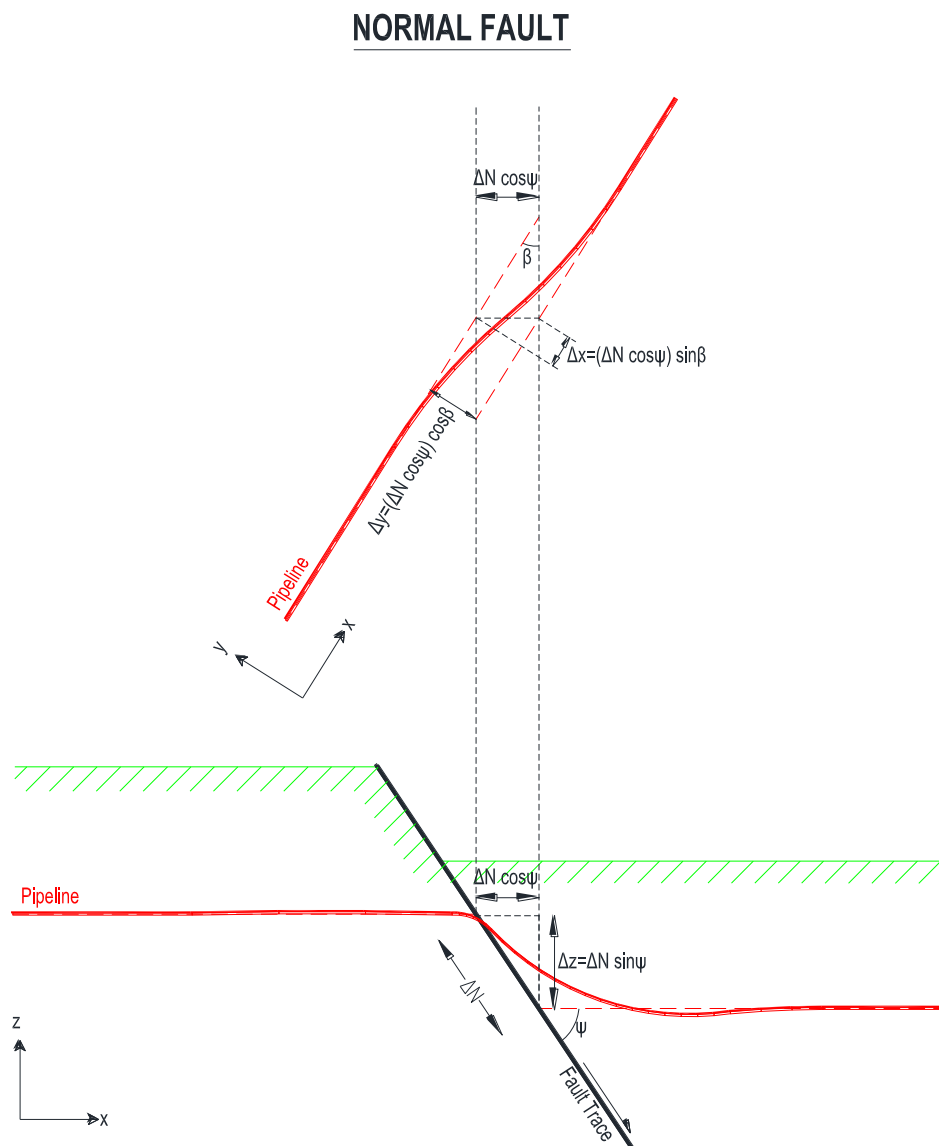
Από τις διάφορες αιτίες μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εστιάζει στο σχεδιασμό υπόγειων αγωγών έναντι μετατοπίσεων που οφείλονται σε διάρρηξη ενεργών ρηγμάτων. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτών των μετατοπίσεων είναι ότι είναι οι μοναδικές που δεν μπορούν να αποφευχθούν αντιμετωπίζοντας τις ίδιες τις αιτίες της αστοχίας (π.χ. με τοπική βελτίωση ή ενίσχυση των εδαφών, εφαρμογή δικτύου αποστράγγισης, εφαρμογή μεθόδου αντιστήριξης, κτλ), αλλά πρέπει να αναληφθούν από τον σχεδιασμό του ίδιου του αγωγού. Ο παραμορφωμένος φορέας μετά τη διάρρηξη ενός αγωγού που διασταυρώνεται με τυχαία κλίση με ένα κανονικό ρήγμα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1.

Οι συνήθεις «συμβατικές» μεθοδολογίες για την αντιμετώπιση μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων λόγω διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τον κύριο μηχανισμό με τον οποίο προσπαθούν να αποτρέψουν την επιβαλλόμενη παραμόρφωση στον αγωγό:

(α) μείωση της πλευρικής τριβής μεταξύ του αγωγού και του εδάφους (π.χ. χρήση επιστρώσεων-γεωφασμάτων, επίχωση με ελαφρόπετρα)

(β) ενίσχυση της ικανότητας του ίδιου του αγωγού να αναλάβει τις επιβαλλόμενες μετατοπίσεις (π.χ. αύξηση πάχους τοιχώματος αγωγού ή αλλαγή του είδους του χάλυβα) και

(γ) μείωση της αντίδρασης του εδάφους επί των εγκάρσιων μετατοπίσεων του αγωγού στην περιοχή της διάρρηξης (π.χ. διεύρυνση τάφρου, κατασκευή εξωτερικά υπόγειου κιβωτίου από Οπλισμένο Σκυρόδεμα).



Σχήμα 1.1: Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού που διασταυρώνεται με το ίχνος κανονικού ρήγματος

Όλες όμως οι ανωτέρω μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν για μικρές έως μεσαίες μετατοπίσεις του ρήγματος, δηλαδή έως 1.5-2.0 διαμέτρους του αγωγού. Εξάιρεση αποτελεί η κατασκευή εξωτερικού περιβλήματος από σκυρόδεμα (culvert), η οποία όμως είναι μία ακριβή μέθοδος, της οποίας το κόστος εκτοξεύεται καθώς μεγαλώνει η αναμενόμενη μετακίνηση του ρήγματος. Έχοντας υπόψη τα ανωτέρω, μελετάται στον Τομέα Γεωτεχνικής του ΕΜΠ ο εναλλακτικός σχεδιασμός αγωγών σε περιοχές μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων, με χρήση εύκαμπτων κόμβων, μέσω αριθμητικών αναλύσεων και πειραμάτων μικρής κλίμακας. Στα πλαίσια αυτής της ευρύτερης ερευνητικής προσπάθειας αναπτύχθηκε και μία νέα αναλυτική μεθοδολογία για την εκτίμηση της επιρροής των εύκαμπτων κόμβων στα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στον αγωγό.

Έτσι, το κύριο αντικείμενο της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας είναι η παραμετρική διερεύνηση και αξιολόγηση της ακρίβειας της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας για αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους που διασχίζουν ρήγματα ορθής διάρρηξης. Παράλληλα όμως γίνεται και μία οικονομοτεχνική αξιολόγηση της εν λόγω μεθόδου σχεδιασμού έναντι των συμβατικών μεθόδων.

Πιο συγκεκριμένα:

- Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται βιβλιογραφική επισκόπηση για τη διαθεσιμότητα και τη χρήση εύκαμπτων κόμβων σε περιοχές που αναμένονται μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις.
- Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται βιβλιογραφική αναδρομή για τις υπάρχουσες αναλυτικές μεθοδολογίες σχεδιασμού συνεχών ευθύγραμμων υπόγειων και σπονδυλωτών αγωγών.
- Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται εκτενής περιγραφή της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας για κανονικά ρήγματα.
- Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται η αριθμητική μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για κανονικά ρήγματα καθώς και ενδεικτικά τα αποτελέσματα δύο τυπικών αναλύσεων.
- Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται σύγκριση των προβλέψεων της αναλυτικής μεθοδολογίας με τα αποτελέσματα από τις αριθμητικές αναλύσεις για την περίπτωση των κανονικών ρηγμάτων.

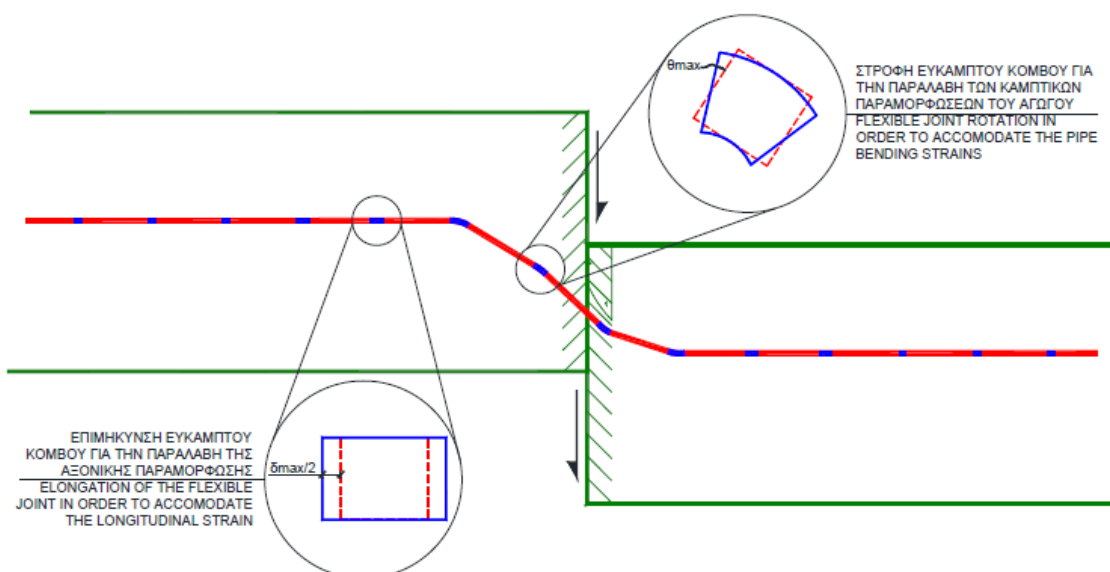
- Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται μία οικονομοτεχνική σύγκριση μεταξύ της νέας μεθόδου σχεδιασμού αγωγών έναντι μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων λόγω διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων με χρήση εύκαμπτων κόμβων και των «κλασικών» μεθόδων σχεδιασμού.
- Τέλος, στο **Κεφάλαιο 8** συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

2

Μηχανισμοί και Λειτουργία Εύκαμπτων Κόμβων

2.1 Γενικά

Η χρήση εύκαμπτων κόμβων αποτελεί ένα εναλλακτικό τρόπο σχεδιασμού αγωγών έναντι των μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων που προκαλούνται κατά τη διάρρηξη τεκτονικών ρηγμάτων, ο οποίος αποσκοπεί στην απομείωση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό και την αποφυγή τυχόν αστοχίας του. Πιο συγκεκριμένα, οι εύκαμπτοι κόμβοι αποτελούν ειδικές διατάξεις οι οποίες τοποθετούνται ανά κάποια συγκεκριμένη απόσταση κατά μήκος του αγωγού, στην περιοχή γύρω από το ρήγμα και έχουν τη δυνατότητα (ανάλογα με τον τύπο τους) να συγκεντρώνουν τις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις από τη διάρρηξη (αξονικές ή καμπτικές), μειώνοντας έτσι τις πρόσθετες τάσεις στα υπόλοιπα τμήματα του αγωγού με τα οποία συνδέονται. Συνεπώς, ο αγωγός τελικά καλείται να αναλάβει παραμορφώσεις κάτω από τα επιτρεπτά όρια, με αποτέλεσμα την αποφυγή του κινδύνου αστοχίας του.

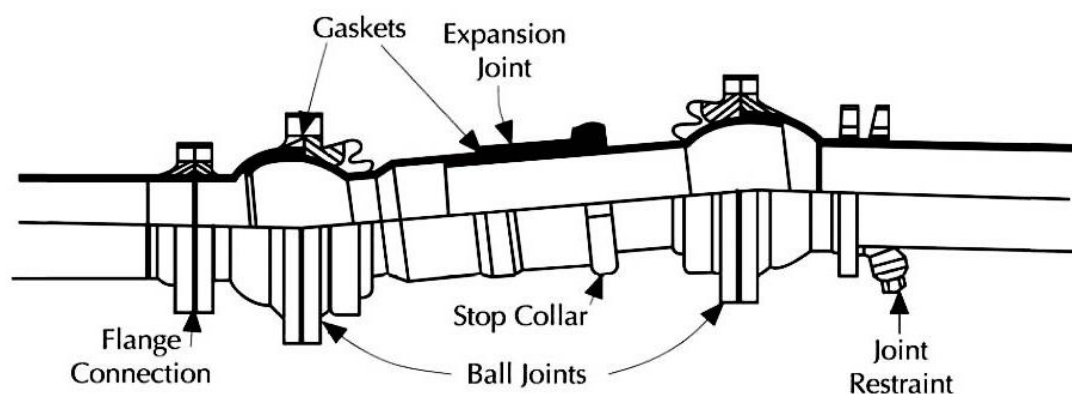


Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας των εύκαμπτων κόμβων

2.2 Ιστορικό

Οι περισσότερες δημοσιεύσεις που εντοπίστηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία αφορούν τη χρήση εύκαμπτων κόμβων σε χαμηλής πίεσης αγωγούς ύδρευσης ή αποχέτευσης, ενώ αντίθετα αρκετά περιορισμένος είναι ο αριθμός των δημοσιεύσεων σχετικά με τη χρήση τέτοιων κόμβων σε υπόγειους αγωγούς που υπόκεινται σε μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις.

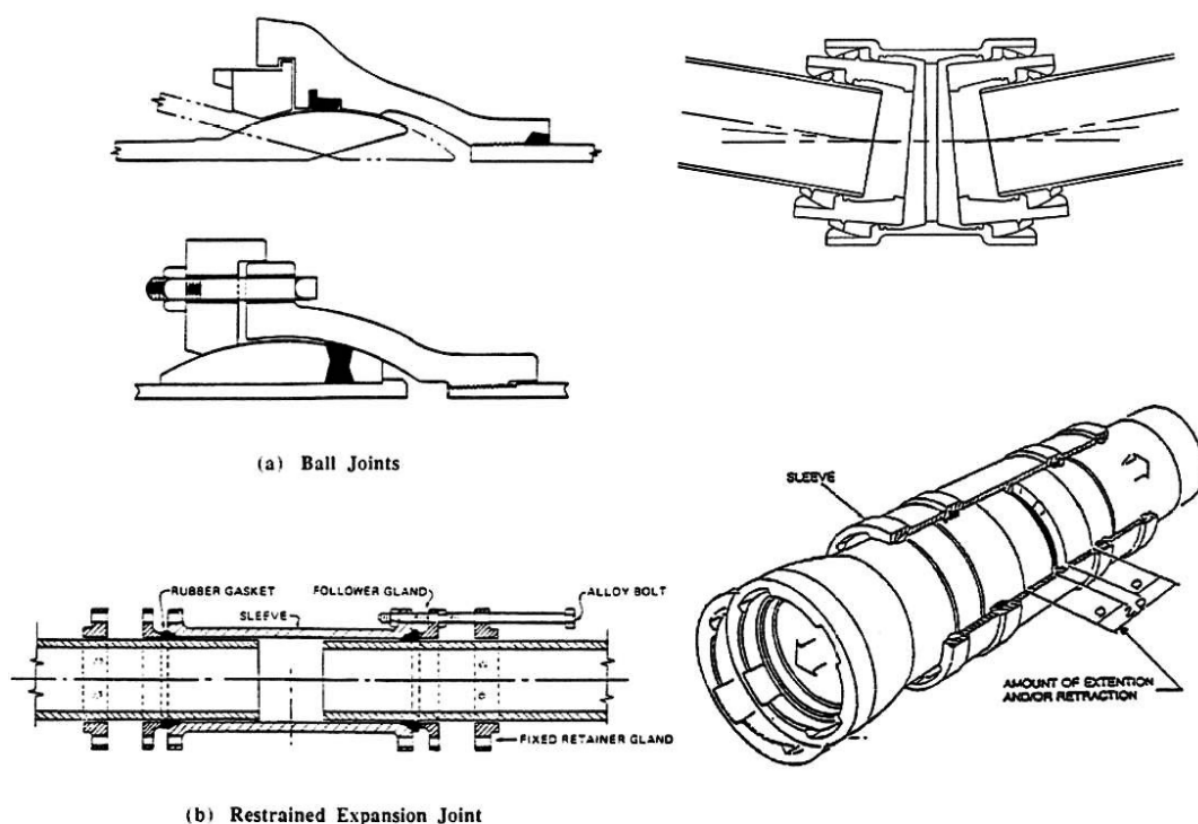
Η χρήση σύνθετων εύκαμπτων κόμβων με στόχο την αντιμετώπιση τοπικών μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων, όπως στην περίπτωση της διάρρηξης τεκτονικών ρηγμάτων, προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Ford (1983). Η προτεινόμενη διάταξη (Σχήμα 2.2) αποτελείται από δύο αλληπάληλους στροφικούς κόμβους τύπου «σφαίρας» που συνδέονται μεταξύ τους με ένα κόμβο διαστολής. Η διάταξη αυτή, σύμφωνα με τον Ford (1983), μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε περιοχές στις οποίες αναμένονται μεγάλες διαφορικές καθιζήσεις (π.χ. σε αγωγούς που διέρχονται κάτω από κτίρια, κτλ.).



Σχήμα 2.2: Προτεινόμενη διάταξη εύκαμπτου κόμβου από τον Ford (1983).

Οι Isenberg & Richardson (1989) διερεύνησαν τους διαθέσιμους εύκαμπτους κόμβους και εξέτασαν μελέτες αγωγών αποχέτευσης και ύδρευσης στις οποίες αυτοί είχαν χρησιμοποιηθεί. Έτσι, κατέληξαν ότι η επιτυχία της μελέτης ήταν άμεσα συνυφασμένη με την ακριβή εκτίμηση της θέσης καθώς και του μεγέθους των αναμενόμενων μετατοπίσεων που καλούνταν να παραλάβουν οι διατάξεις αυτές. Συνεπώς, παρόλο που κάποιες διατάξεις ήταν εμπορικά διαθέσιμες, έκριναν

απαραίτητη την περαιτέρω ανάπτυξη της γεωτεχνικής μηχανικής, έτσι ώστε η χρήση των διατάξεων αυτών να καταστεί αποτελεσματική.

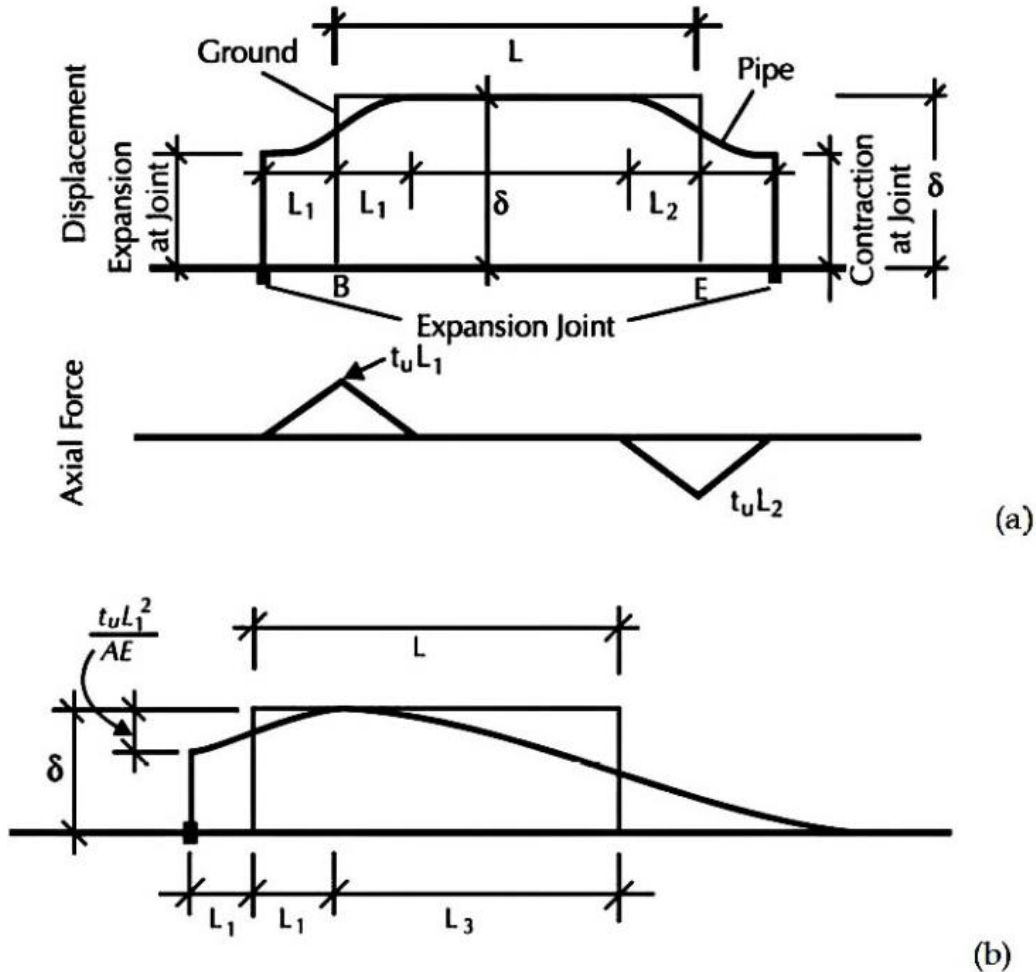


Σχήμα 2.3: Εύκαμπτοι κόμβοι που ανέφεραν οι Isenberg & Richardson (1989)

Ο Ballantyne (1992) πρότεινε τη χρήση εύκαμπτων κόμβων παράλληλα με την εφαρμογή «κλασικών» μεθοδολογιών για το σχεδιασμό αγωγών ύδρευσης και αποχέτευσης έναντι μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων, τις οποίες όρισε μεταξύ 2.5cm και 100cm. Οι κόμβοι αυτοί επέτρεπαν μεγαλύτερη κάμψη (deflection), επιμήκυνση (extension) ή συμπίεση (compression) από ό,τι οι συνηθισμένοι κόμβοι σύνδεσης αγωγών (segmented pipes joints) και γι' αυτό το λόγο έπρεπε να είναι ειδικής σχεδίασης. Επιπρόσθετα, έθεσε τα απαραίτητα κριτήρια που έπρεπε να ικανοποιούν οι εύκαμπτοι κόμβοι για τη σωστή λειτουργία τους και διαπίστωσε ότι οι διαθέσιμοι εμπορικά κόμβοι εκείνης της περιόδου δεν μπορούσαν να τα ικανοποιήσουν.

Οι O'Rourke & Liu (1994, 2012) διερεύνησαν αναλυτικά τη χρήση κόμβων επιμήκυνσης (expansion joints) τύπου Dresser (απλός κόμβος ολίσθησης) για την αντιμετώπιση εδαφικών μετακινήσεων και διαπίστωσαν ότι μπορούν να επηρεάσουν και θετικά αλλά και αρνητικά τη συμπεριφορά του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα η

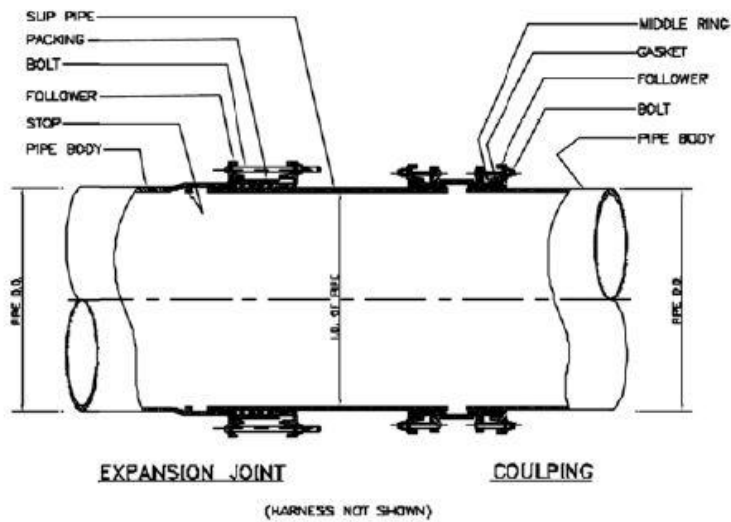
επιρροή τους είναι θετική στην περίπτωση του Σχήματος 2.4a, όπου οι τιμές των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων στον αγωγό μειώνονται σε $t_u L_1$ και $t_u L_2$ αντίστοιχα έναντι των αρχικών $t_u L/2$. Αντίθετα, η χρήση των κόμβων έχει αρνητικό αντίκτυπο στην περίπτωση του Σχήματος 2.4b, όπου η μείωση των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών τάσεων σε $t_u L_1$ συνοδεύεται από την αύξηση των θλιπτικών τάσεων σε $t_u L_3$.



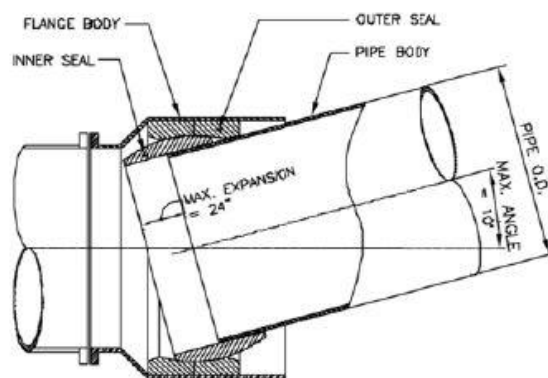
Σχήμα 2.4: Πιθανή (α) ευνοϊκή και (β) αρνητική επιρροή κόμβων επιμήκυνσης (Ο' Rourke & Liu, 2012)

Ο Wang (1996) ασχολήθηκε με την ενίσχυση υφιστάμενων δικτύων αγωγών και πρότεινε την αντικατάσταση των σταθερών-άκαμπτων κόμβων (rigid joints) μεταξύ των τμημάτων των αγωγών με πιο εύκαμπτους και/ή ενισχυμένους περισφιγμένους κόμβους (flexible and/or restrained joints). Ωστόσο δεν αναφέρθηκε περαιτέρω στις ιδιότητες που απαιτείται να έχουν οι κόμβοι αυτοί και στο αν είναι εμπορικά διαθέσιμοι, γι' αυτό και οι προτάσεις του είχαν καθαρά ποιοτικό χαρακτήρα.

Αργότερα ο Cheng (2001) διερεύνησε εναλλακτικούς τρόπους για την παραλαβή μεγάλων μετακινήσεων από αγωγό ύδρευσης λόγω διάρρηξης ρήγματος, μεταξύ των οποίων και οι δύο τύποι κόμβων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5. Παρόλο που και οι δύο τύποι κόμβων έχουν τη δυνατότητα να παραλάβουν τόσο μετακίνηση όσο και στροφή, ο δεύτερος τύπος μπορεί να στραφεί περισσότερο και έτσι να παραλάβει απότομες μετακινήσεις, όπως αυτές που προκαλούνται από τη διάρρηξη του ρήγματος. Παρόλα αυτά, επειδή θεωρήθηκε ότι ο συμβατικός σχεδιασμός δεν επαρκούσε, δεν έγινε χρήση κανενός από τους παραπάνω κόμβους στον τελικό σχεδιασμό του αγωγού.



(a)



(b)

Σχήμα 2.5: Είδη κόμβων που ελέγχθηκαν από τον Cheng (2001)

2.3 Είδη εμπορικά διαθέσιμων εύκαμπτων κόμβων

Ανάλογα με τη μέθοδο παραλαβής των επιβαλλόμενων μετακινήσεων οι εμπορικά διαθέσιμοι εύκαμπτοι κόμβοι διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες: τους απλούς κόμβους ολίσθησης, τους κόμβους τύπου «σφαίρας», τους κόμβους τύπου «φυσαρμόνικας» και τους σύνθετους κόμβους.

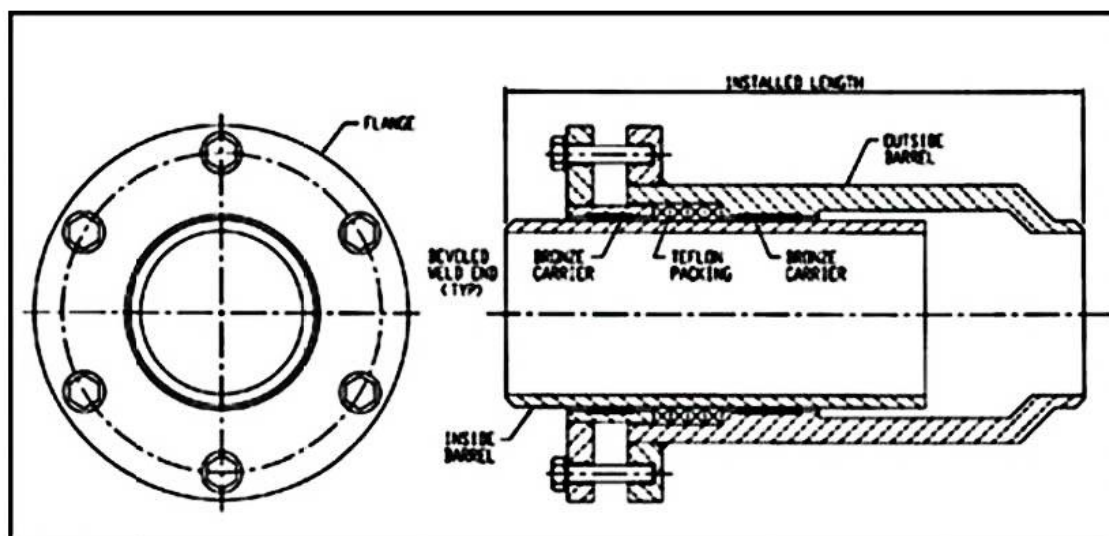
2.3.1 Απλοί κόμβοι ολίσθησης (Slip expansion joints)

Οι απλοί κόμβοι ολίσθησης (slip expansion joints) αποτελούνται από δύο τμήματα αγωγού τα οποία δεν είναι συγκολλημένα μεταξύ τους και το ένα εισέρχεται εντός του άλλου. Έτσι, επιτρέπεται η σχετική κατά μήκος μετατόπισή τους, ενώ αντίθετα η ικανότητα στροφής είναι μηδενική ή πολύ περιορισμένη. Καθοριστικό ρόλο στους κόμβους αυτούς έχουν η μέγιστη επιτρεπόμενη σχετική μετακίνηση, η αντοχή σε περαιτέρω επιμήκυνση (πέρα από την επιτρεπόμενη) και η μέθοδος στεγάνωσης του κόμβου.

Στο εμπόριο διατίθενται τέτοιου είδους κόμβοι ολίσθησης από αρκετές εταιρίες, με κάποιους από αυτούς να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε δίκτυα μεταφοράς καυσίμων υψηλής πίεσης, αφού έχουν μέγιστη επιτρεπόμενη εσωτερική πίεση άνω των 1000psi (~6.9MPa). Επίσης δεν υπάρχουν κατασκευαστικοί περιορισμοί όσον αφορά τη διάμετρο του αγωγού.

Για τους απλούς κόμβους ολίσθησης ισχύουν οι περιορισμοί που αναλύθηκαν θεωρητικά από τους O'Rourke & Liu (1994, 2012). Πιο συγκεκριμένα για να εξασφαλιστεί η ευνοϊκή τους δράση στις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις του αγωγού, απαιτείται η εγκατάσταση τουλάχιστον δύο κόμβων, με τον ένα να βρίσκεται κοντά στην κεφαλή της μετακίνησης και τον άλλο κοντά στον πόδα. Επιπρόσθετα απαιτείται οι κόμβοι να μπορούν να παραμορφωθούν ανάλογα με την αναμενόμενη μετακίνηση του ρήγματος.

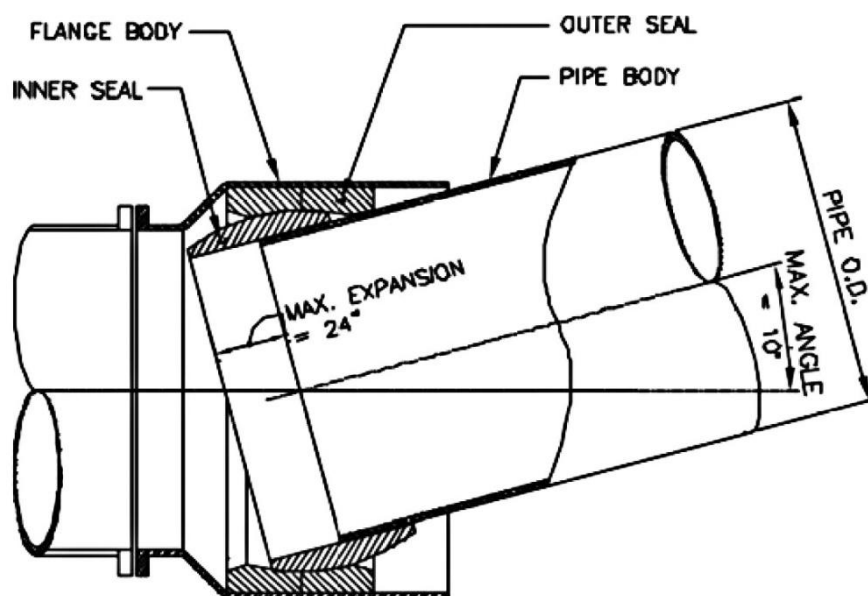
Ωστόσο, τόσο η πολυπλοκότητα αυτών των διατάξεων όσο και η μεγάλη αβεβαιότητα για την ακριβή θέση και έκταση της περιοχής του ρήγματος καθιστούν τη λύση αυτή ιδιαίτερα δαπανηρή, χωρίς ταυτόχρονα να είναι επαρκώς αποτελεσματική, αφού δε μειώνει καθόλου τις καμπτικές παραμορφώσεις του αγωγού.



Σχήμα 2.6: Τυπική διάταξη απλού κόμβου επιμήκυνσης (από U.S. Bellows Inc.)

2.3.2 Κόμβοι τύπου «σφαίρας» με ή χωρίς ικανότητα επιμήκυνσης (Expansion/ Ball joints)

Οι κόμβοι αυτοί αποτελούνται από ένα τμήμα με απόληξη σφαιρικού σχήματος, το οποίο εισέρχεται σε ένα άλλο τμήμα μέσα σε κατάλληλου σχήματος υποδοχή, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7. Από τη διάταξη αυτή μπορούν να αναληφθούν καμπτικές παραμορφώσεις, καθώς επιτρέπεται η σχετική στροφή των δύο τμημάτων του αγωγού. Αξονικές παραμορφώσεις μπορούν να παραληφθούν μόνο στο βαθμό στον οποίο επιτρέπεται η σχετική μετακίνηση μεταξύ του ευθυγράμμου τμήματος και της σφαιρικής απόληξης. Κύρια κατασκευαστική δυσκολία των κόμβων αυτών είναι η διαμόρφωση ανθεκτικού ορίου (stop) που θα εμποδίζει τη σχετική μετακίνηση να ξεπεράσει την επιτρεπόμενη τιμή σε ολίσθηση.



Σχήμα 2.7: Τυπική διάταξη κόμβου τύπου "σφαίρας" με ικανότητα επιμήκυνσης (από EBBA Iron Inc. σύμφωνα με Koike et all 2001)

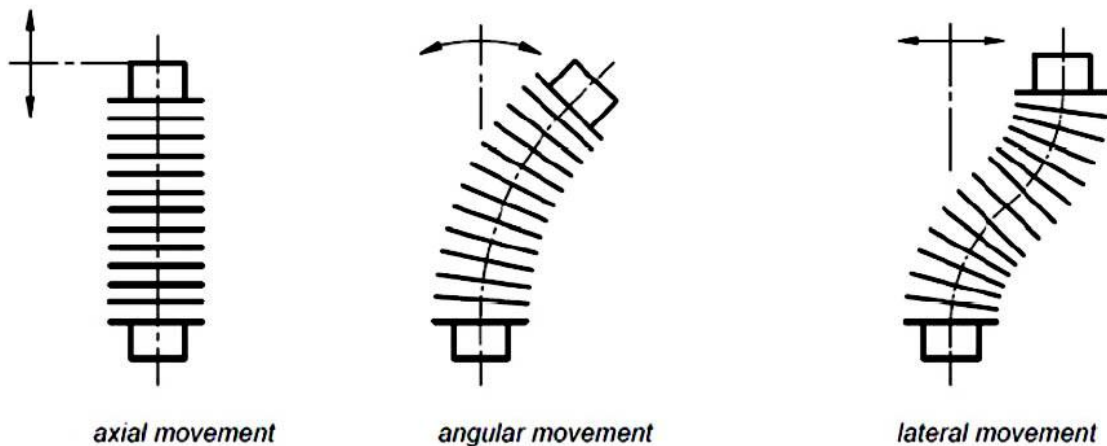
Οι επί του παρόντος εμπορικά διαθέσιμοι κόμβοι τύπου «σφαίρας» είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα χαμηλής αντοχής ή συνθετικά υλικά και η επιτρεπόμενη εσωτερική πίεση τους δεν είναι μεγαλύτερη από τα 350psi (~2,4MPa). Έτσι, δεν κρίνονται κατάλληλοι για δίκτυα πετρελαίου ή φυσικού αερίου μέσης και υψηλής πίεσης.

2.3.3 Εύκαμπτοι κόμβοι τύπου «Bellows»

Οι εύκαμπτοι κόμβοι τύπου «Bellows» (φυσαρμόνικας) αποτελούνται από λεπτότοιχο πτυχωμένο χάλυβα και είναι έτσι σχεδιασμένοι, ώστε να έχουν μεγάλη ευκαμψία όταν υποβάλλονται σε αξονικά φορτία, εσωτερική πίεση και καμπτικές ροπές. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζονται τα διάφορα είδη μετακίνησης που μπορούν να παραληφθούν μέσω των κόμβων τέτοιου τύπου.

Το πάχος και το είδος της διατομής της κάθε πτύχωσης καθορίζουν την αντίσταση σε παραμόρφωση καθώς επίσης και την ικανότητα μέγιστης παραμόρφωσης. Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζονται οι δέκα διαφορετικοί τύποι διατομών πτύχωσης σύμφωνα με τον

Wilson (1984), καθένας από τους οποίους παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά ευκαμψίας και αντοχής σε αξονικά φορτία. Ο συνηθέστερος τύπος διατομής είναι αυτός της «Λύρας» ή του «σχήματος S» (εικόνα f).

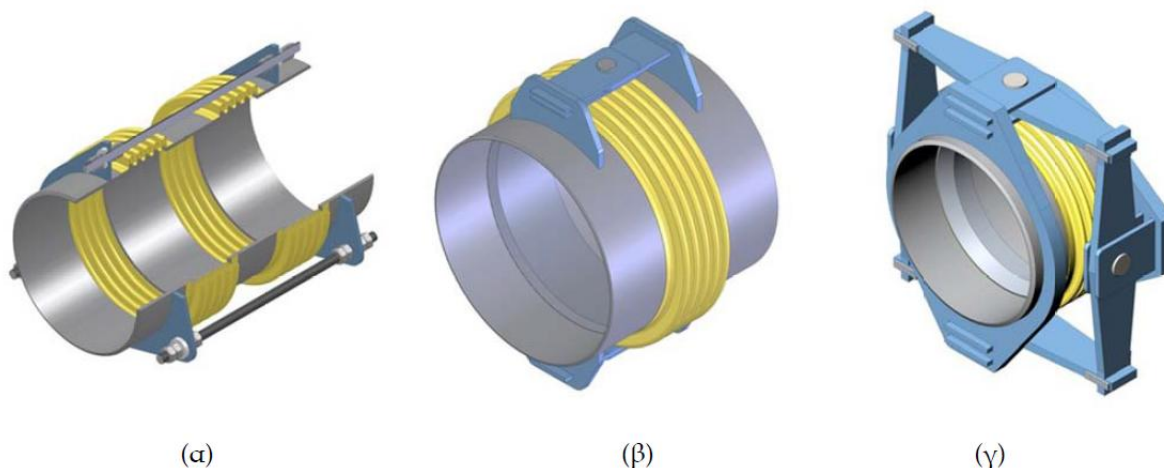


Σχήμα 2.8: Είδη μετακίνησης που μπορεί να παραληφθεί μέσω των κόμβων τύπου "Bellows" (από BOA Group)

Ο επιθυμητός συνδυασμός αντοχής σε εσωτερική πίεση, αντοχής σε αξονικά φορτία και ικανότητας παραμόρφωσης επιτυγχάνεται με τις κατάλληλες τροποποιήσεις στο σχεδιασμό των διατομών, όπως αλλαγές του ύψους των πτυχώσεων, της ακτίνας των καμπυλών τους, του αριθμού των αλληπάλληλων μεταλλικών στρώσεων και του συνολικού πάχους του τοιχώματος.

Σήμερα, εύκαμπτοι κόμβοι τύπου «Bellows» χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις για την παραλαβή των μετακινήσεων σωλήνων λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών. Παράγονται από αρκετές εταιρίες με διαμέτρους μεγαλύτερες από 100mm και αντοχή σε εσωτερική πίεση έως και 1500psi (~10,4MPa). Λόγω του ευέλικτου σχεδιασμού των πτυχώσεων τους, του σχετικά μικρού κόστους τους και της ευκολίας στην τοποθέτησή τους στο πεδίο, οι κόμβοι αυτοί αποτελούν μια καλή λύση για την απομείωση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων σε αγωγούς λόγω διάρρηξης τεκτονικών ρηγμάτων. Επιπρόσθετα, με σκοπό τον περιορισμό κάποιων από τους διαθέσιμους βαθμούς ελευθερίας τους, μπορούν να εξοπλιστούν με ράβδους ή αρθρώσεις. Έτσι για παράδειγμα στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζονται κόμβοι που επιτρέπουν μόνο την πλευρική μετακίνηση ή την στροφή γύρω από έναν ή δύο άξονες.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην κάλυψη των κόμβων αυτών με γεω-ύφασμα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ελεύθερη παραμόρφωσή τους, χωρίς να παρεμποδίζονται από τις αυξανόμενες τριβές με το περιβάλλον έδαφος της επίχωσης λόγω της ύπαρξης των πτυχώσεων στον κόμβο. Επίσης αρκετά σημαντικός είναι ο περιορισμός ή ακόμη και ο μηδενισμός των μόνιμων παραμορφώσεων του κόμβου υπό την επιβολή της εσωτερικής πίεσης του πετρελαίου ή του φυσικού αερίου που θα μεταφέρει.



Σχήμα 2.9: Σύνθετα είδη κόμβων τύπου "Bellows" με επιτρεπόμενη μόνο την (α) πλευρική μετακίνηση, (β) τη στροφή σε ένα άξονα και (γ) τη στροφή σε δύο άξονες (σχήματα από Eagleburgmann group)

2.3.4 Σύνθετοι κόμβοι

Οι προαναφερθείσες κατηγορίες κόμβων συνδυάζονται κατάλληλα δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο διατάξεις σύνθετων κόμβων (π.χ. συνδυασμός κόμβου τύπου «σφαίρας» και κόμβου ολίσθησης, ή συνδυασμός δύο κόμβων τύπου «Bellows»), οι οποίες παρουσιάζονται τόσο στη διεθνή βιβλιογραφία (πχ. Ford 1983, Isenberg & Richardson 1989) όσο και στους καταλόγους εταιριών παραγωγής εύκαμπτων κόμβων. Οι διατάξεις αυτές δεν αναλύονται περαιτέρω καθώς ουσιαστικά αποτελούν συνδυασμό των ανωτέρω λύσεων.

3

Αναλυτικές μεθοδολογίες σχεδιασμού αγωγών σε ρήγματα

3.1 Γενικά

Ίσως η δυσμενέστερη μορφή φόρτισης που μπορεί να ασκηθεί σε έναν υπόγειο αγωγό (π.χ. μεταφοράς πετρελαίου ή φυσικού αερίου) είναι η επιβολή μεγάλων εδαφικών μετατοπίσεων, όπως αυτών που προκαλούνται από την διάρρηξη ενεργών ρηγμάτων, από κατολισθήσεις, οριζόντια εξάπλωση ρευστοποιημένων εδαφών κτλ. Στα πλαίσια αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας εστιάζουμε σε μετατοπίσεις που προέρχονται από την διάρρηξη ενεργών ρηγμάτων, πρόβλημα που έχει απασχολήσει από νωρίς τους ερευνητές, οι οποίοι έχουν προτείνει κατά καιρούς μια σειρά από μεθοδολογίες σχεδιασμού αγωγών που διασταυρώνονται με ενεργά ρήγματα.

Αν και το ενδιαφέρον της εργασίας εστιάζει στο σχεδιασμό αγωγών με εύκαμπτους κόμβους, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι υπάρχουσες αναλυτικές μεθοδολογίες σχεδιασμού που αφορούν είτε συνεχείς ευθύγραμμους υπόγειους αγωγούς είτε σπονδυλωτούς, οι οποίοι, αν και είναι αντίστοιχοι με το εξεταζόμενο πρόβλημα, οι συνδέσεις τους αποτελούν τρωτό σημείο σχεδιασμού και κατά συνέπεια και πιθανό σημείο αστοχίας. Επισημαίνεται ότι δεν έχει εντοπιστεί στη βιβλιογραφία κάποια αναλυτική μεθοδολογία που να αφορά τον σχεδιασμό αγωγών με εύκαμπτους κόμβους, όπως οι εξεταζόμενοι στην παρούσα εργασία.

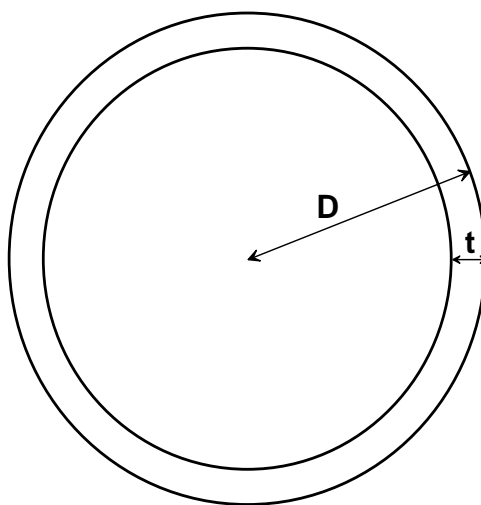
3.2 Αναλυτικές μέθοδοι για συνεχείς ευθύγραμμους αγωγούς

3.2.1 Μεθοδολογία Newmark and Hall (1975)

Η εν λόγω μέθοδος αποτελεί την πρώτη γνωστή προσπάθεια διαμόρφωσης αναλυτικής μεθοδολογίας σχεδιασμού αγωγών, οι οποίοι τέμνονται με ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και κανονικά που προκαλούν επιμήκυνση στον αγωγό.

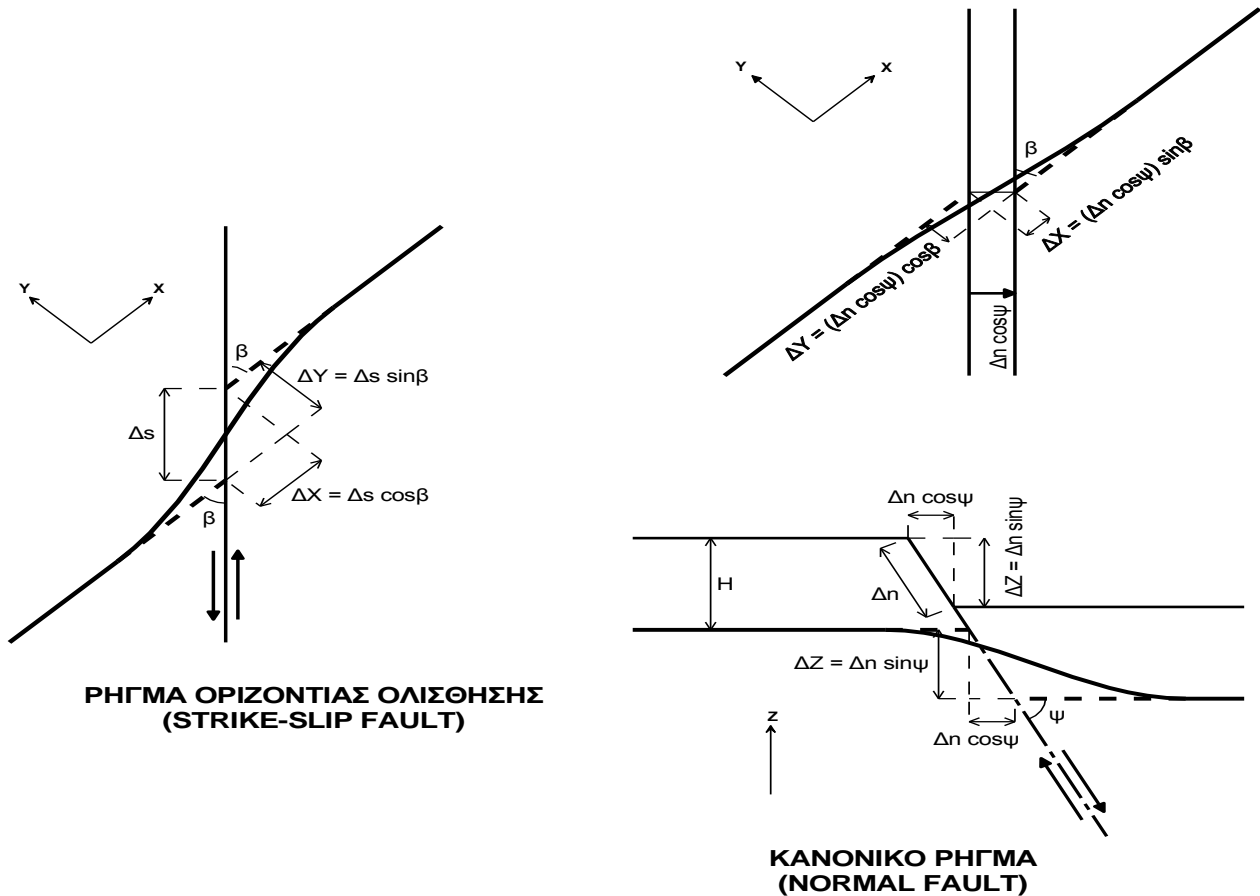
Παραδοχές:

- Ο εξεταζόμενος αγωγός είναι λεπτότοιχος και έχει εξωτερική διάμετρο D και πάχος t (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Η διατομή του αγωγού

- Η συμπεριφορά του χάλυβα του αγωγού περιγράφεται από ένα διγραμμικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων, με μέτρο ελαστικότητας E_1 στην ελαστική περιοχή και E_2 στην πλαστική περιοχή αντίστοιχα.
- Το ρήγμα τέμνει σημειακά τον αγωγό και έχει μηδενικό πάχος ζώνης διάρρηξης. Κατά συνέπεια οι μετατοπίσεις του ρήγματος μπορούν να αναλυθούν σε συνιστώσες στους άξονες X, Y και Z , όπου X είναι ο άξονας παράλληλα στο μήκος του αγωγού, ο Y είναι κάθετος στον X , ενώ ο Z είναι κατακόρυφος άξονας (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Οι συνιστώσες Δx , Δy και Δz της μετατόπισης του ρήγματος για ρήγμα οριζώντιας ολίσθησης και για κανονικό ρήγμα

- Η αλληλεπίδραση εδάφους - αγωγού εισάγεται μέσω των δυνάμεων τριβής (t_u -kN/m) που αναπτύσσονται λόγω της σχετικής ολίσθησης στην διεπιφάνεια εδάφους-αγωγού, με τις δυνάμεις αυτές να παραμένουν σταθερές κατά μήκος του αγωγού.
- Λόγω των διαφορετικών μετατοπίσεων σε κάθε κατεύθυνση οι εντάσεις προκύπτουν από επαλληλία.
- Η επίλυση ακολουθεί μια επαναληπτική πορεία, έως ότου η γεωμετρική επιμήκυνση του αγωγού, που προκαλείται λόγω της διάρρηξης του ρήγματος, εξισωθεί με την επιμήκυνση, η οποία προκαλείται από την αξονική τάση που αναπτύσσεται στον αγωγό.

Η αδυναμία που παρουσιάζει η μεθοδολογία είναι ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η αντίσταση του εδάφους στις εγκάρσιες μετακινήσεις, οι οποίες δημιουργούν σημαντικές καμπτικές τάσεις και παραμορφώσεις στον αγωγό. Κατά συνέπεια, μετά

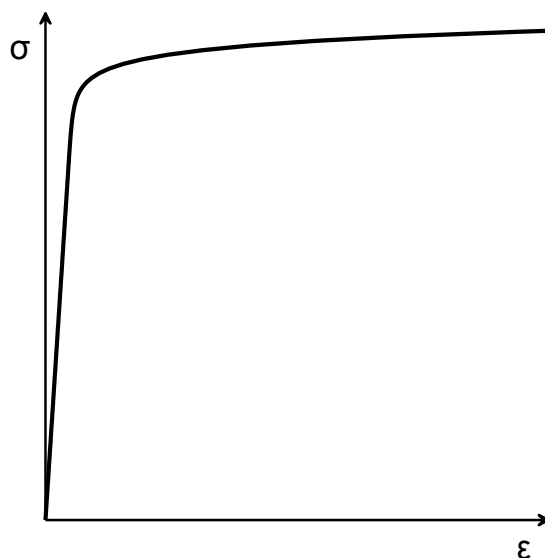
τη διάρρηξη του ρήγματος τα τμήματα του αγωγού παραμένουν ευθύγραμμα και συμμετρικά εκατέρωθεν του ρήγματος, κάτι που ισχύει μόνο για την περίπτωση των ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης, ενώ δεν είναι αληθές για κανονικά ρήγματα λόγω της διαφορετικής αντίστασης του εδάφους στην προς τα άνω και κάτω κίνηση.

3.2.2 Μεθοδολογία Kenedy et al (1977)

Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί βελτίωση αυτής των Newmark and Hall (1975), δεδομένου ότι λαμβάνει υπόψη την αντίσταση του εδάφους στις εγκάρσιες μετακινήσεις (οριζόντιες και κατακόρυφες).

Παραδοχές:

- Ο εξεταζόμενος αγωγός είναι λεπτότοιχος και έχει εξωτερική διάμετρο D και πάχος t .
- Το ρήγμα τέμνει σημειακά τον αγωγό, έχει μηδενικό πάχος ζώνης διάρρηξης.
- Εφαρμόζεται σε οριζόντια ολίσθησης και σε κανονικά ρήγματα.
- Η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων που περιγράφει τη συμπεριφορά του υλικού του αγωγού προσεγγίζεται από την σχέση των Ramberg και Osgood (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3: Η καμπύλη Ramberg – Osgood

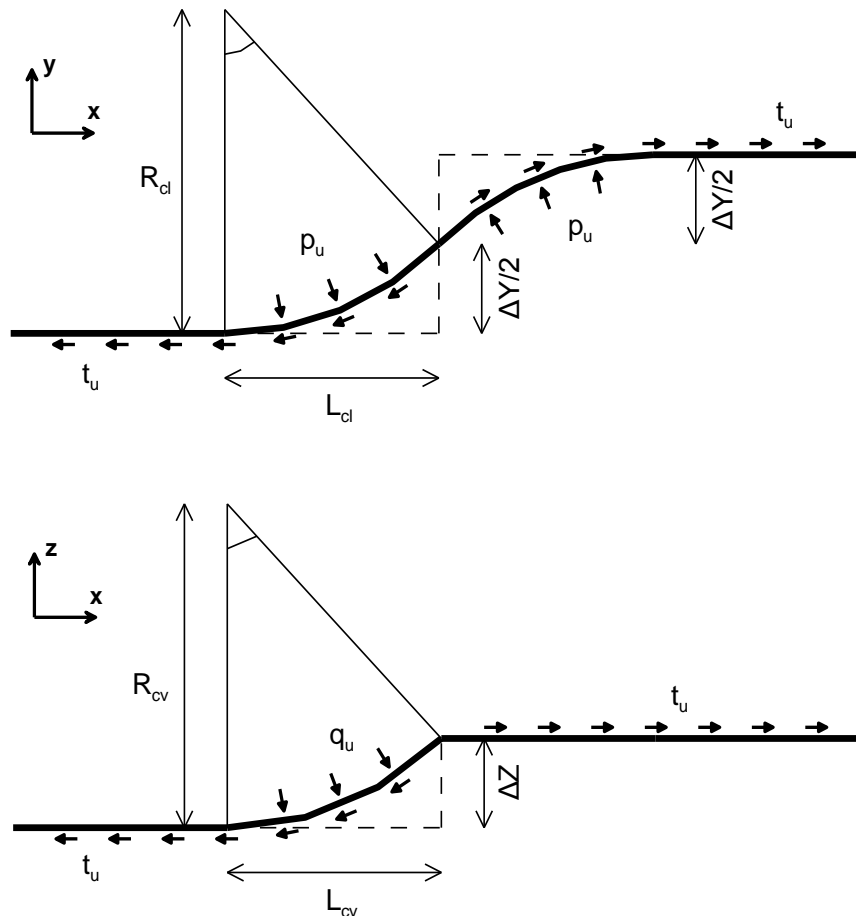
- Λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της εσωτερικής πίεσης στον αγωγό, η οποία είναι σημαντική, όταν είναι κρίσιμες για την αστοχία οι ανηγμένες παραμορφώσεις λόγω κάμψης και όχι λόγω αξονικής έντασης.

- Η αλληλεπίδραση εδάφους - αγωγού λόγω της σχετικής τους μετατόπισης περιγράφεται με την εφαρμογή των κατανεμημένων φορτίων p_u , q_u , t_u , όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.4 όπου:

p_u : Είναι η πλευρική παθητική αντίσταση του εδάφους σε οριζόντια εγκάρσια μετατόπιση του αγωγού και η οποία λαμβάνεται υπόψη μόνο στο καμπυλωμένο τμήμα.

q_u : Είναι η οριακή αντίσταση του αγωγού στην προς τα άνω κίνησή του η οποία επίσης λαμβάνεται υπόψη στο καμπυλωμένο τμήμα. (Η αντίσταση του εδάφους στην προς τα κάτω κίνηση του αγωγού είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την προς τα άνω και συνεπώς θεωρείται άπειρη).

t_u : Είναι η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του αγωγού και του εδάφους. Στο καμπυλωμένο τμήμα όπου αναπτύσσονται παθητικές ωθήσεις, η τριβή παρουσιάζεται επαυξημένη ($1+4t_u$) και συμβολίζεται με t_{uc} .



Σχήμα 3.4: Η γεωμετρία του παραμορφωμένου αγωγού στα επίπεδα xy και xz

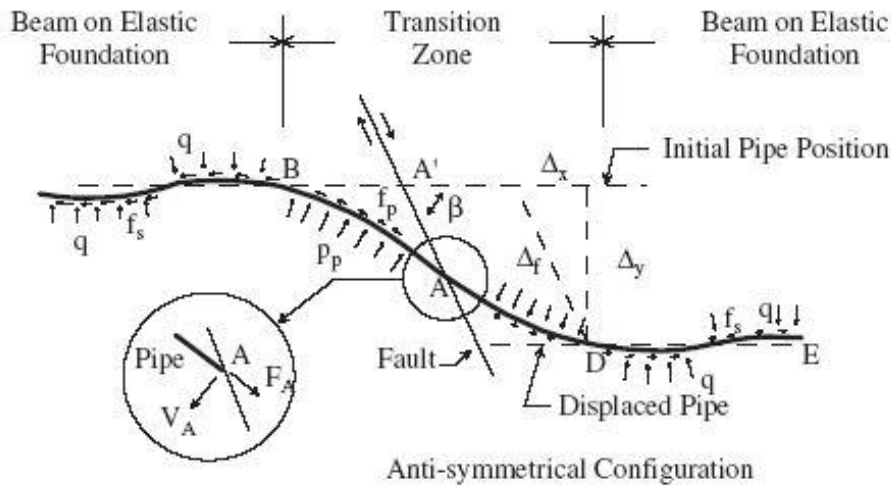
- Η επίλυση ακολουθεί μια επαναληπτική πορεία, έως ότου η επιμήκυνση του αγωγού -λόγω διάρρηξης του ρήγματος και της καμπυλότητας του αγωγού- εξισωθεί με τη διαθέσιμη επιμήκυνση, η οποία προκύπτει από ολοκλήρωση της ανηγμένης παραμόρφωσης κατά μήκος του αγωγού, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές οριακής τριβής σε ευθύ και καμπυλωμένο τμήμα.
- Παραβλέπεται η καμπτική δυσκαμψία, κάτι το οποίο ανταποκρίνεται και στην πραγματικότητα, εφόσον οι καμπτικές παραμορφώσεις δεν ξεπερνούν το 80% των αντίστοιχων αξονικών ή όταν όλη η διατομή του αγωγού βρίσκεται υπό διαρροή (περίπτωση μεγάλων επιβαλλόμενων μετατοπίσεων ρήγματος), οπότε και ο αγωγός συμπεριφέρεται ουσιαστικά ως καλώδιο.

3.2.3 Μεθοδολογία Wang and Yeh (1985)

Η μεθοδολογία των Wang & Yeh (1985) αποτελεί συνέχεια αυτής των Kenedy et al. (1977). Αφορά περιπτώσεις για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, τα οποία προκαλούν είτε εφελκυσμό είτε θλίψη σε αγωγούς και στηρίζεται στη θεωρία μεγάλων στατικά επιβαλλόμενων μετατοπίσεων.

Παραδοχές:

- Ο αγωγός θεωρείται λεπτότοιχος και η διασταύρωση του αγωγού με το ρήγμα είναι σημειακή.
- Η συμπεριφορά του χάλυβα του αγωγού περιγράφεται από ένα διγραμμικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων, με μέτρο ελαστικότητας E_1 στην ελαστική περιοχή και E_2 στην πλαστική περιοχή αντίστοιχα.
- Λαμβάνεται υπόψη η καμπτική δυσκαμψία, την οποία είχαν παραβλέψει οι Kennedy et al (1977).
- Ο αγωγός χωρίζεται συμμετρικά σε τέσσερα τμήματα εκ των οποίων τα δύο κάμπτονται υπό σταθερή καμπυλότητα, ενώ τα άλλα δύο θεωρούνται ημιάπειρες ελαστικές δοκοί επί συνεχών ελατηριωτών στηρίξεων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Μοντέλο ανάλυσης του αγωγού που προτάθηκε από τους Wang και Yeh

- Η αλληλεπίδραση εδάφους - αγωγού διαφοροποιείται στο καμπυλωμένο τμήμα και στο τμήμα που προσομοιάζεται με ελαστική δοκό. Στο καμπυλωμένο τμήμα υπάρχει πλήρης ανάπτυξη εγκάρσιων εδαφικών ωθήσεων (μέγιστων παθητικών) q_u . Η δύναμη τριβής λαμβάνεται επίσης σταθερή και ίση με την οριακή f_p , η οποία είναι επαυξημένη (σε σχέση με την τιμή στην ελαστική δοκό) λόγω της ανάπτυξης παθητικών ωθήσεων. Στις δοκούς επί ελαστικής θεμελίωσης αναπτύσσονται σταθερές εγκάρσιες εδαφικές ωθήσεις ίσες με τις ουδέτερες ωθήσεις, ενώ η δύναμη τριβής f_s είναι επίσης σταθερή, χωρίς επαύξηση.
- Η επίλυση γίνεται επαναληπτικά για την τιμή της επίκεντρης γωνίας των καμπύλων τμημάτων μέχρι να εξισωθούν η απαιτούμενη επιμήκυνση με τη διαθέσιμη. Στη συνέχεια προσδιορίζονται τα εντατικά μεγέθη επαναληπτικά, ενώ σε κάθε βήμα υπολογίζεται το τέμνον μέτρο ελαστικότητας.

Στη μεθοδολογία αυτή θεωρείται πως τα τμήματα υψηλά καμπυλωμένης περιοχής παραμορφώνονται με σταθερή καμπυλότητα, η οποία είναι ανεξάρτητη από την εφελκυστική δύναμη που αναπτύσσεται σε κάθε σημείο του κυκλικού τόξου. Με αυτόν τον τρόπο παραβλέπεται η αρνητική συμβολή της εφελκυστικής δύναμης στην καμπτική δυσκαμψία του αγωγού, ενώ λαμβάνεται υπόψη μόνο η συνεισφορά της στη μείωση της μέγιστης καμπτικής ικανότητας. Μια από τις παραδοχές επίσης είναι ότι ο δυσμενέστερος συνδυασμός αξονικής δύναμης και καμπτικής ροπής είναι

εκείνος που αναπτύσσεται στο σημείο που τελειώνει η περιοχή της υψηλής καμπυλότητας και ξεκινά η ελαστική δοκός (σημεία B ή D στο Σχήμα 3.5), παραδοχή που δεν ισχύει στην πραγματικότητα. Επιπλέον θεωρούν πως η μέγιστη αξονική παραμόρφωση αναπτύσσεται στο σημείο διασταύρωσης αγωγού και ρήγματος, εφόσον εκεί κάνουν τον έλεγχο αντοχής σε εφελκυσμό, κάτι το οποίο αν και δεν ανταποκρίνεται απόλυτα στην πραγματικότητα -διότι η μέγιστη αξονική παραμόρφωση αναπτύσσεται στην γειτονιά του εν λόγω σημείου- είναι μια αποδεκτή παραδοχή.

3.2.4 Μεθοδολογία Takada et al. (2001)

Οι Takada, Hassani και Fukuda (2001) προτείνουν μια μέθοδο που συνδυάζει απλές αναλυτικές επιλύσεις με αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να υπολογίσουν την καταπόνηση του αγωγού σε πολύ μεγαλύτερες παραμορφώσεις πέραν του ορίου διαρροής του χάλυβα.

Παραδοχές:

- Η μεθοδολογία βρίσκει εφαρμογή σε όλες τις περιπτώσεις ρηγμάτων, τόσο οριζόντιας ολίσθησης όσο και κανονικών, τα οποία προκαλούν είτε θλίψη είτε εφελκυσμό στον αγωγό με τον οποίο τέμνονται.
- Ο αγωγός θεωρείται λεπτότοιχος και η διασταύρωση του αγωγού με το ρήγμα είναι σημειακή.
- Η συμπεριφορά του χάλυβα του αγωγού περιγράφεται από ένα διγραμμικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων, με μέτρο ελαστικότητας E_1 στην ελαστική περιοχή και E_2 στην πλαστική περιοχή αντίστοιχα.
- Οι επιβαλλόμενες τάσεις στον αγωγό υπολογίζονται σύμφωνα με τις προτάσεις των Kennedy et al. (1977).
- Λαμβάνεται υπόψη η παραμόρφωση-στρέβλωση της διατομής του αγωγού, η οποία όταν αναπτύσσεται σε περιπτώσεις μεγάλων μετατοπίσεων του ρήγματος, οδηγεί σε δυσανάλογα μεγάλες αυξήσεις των παραμορφώσεων του αγωγού.

- Το καμπυλωμένο τμήμα υπολογίζεται σύμφωνα με τους Kenedy et al. (1977), και ακολουθεί ανάλυση κελυφών για εύρεση της μέγιστης παραμόρφωσης του αγωγού.

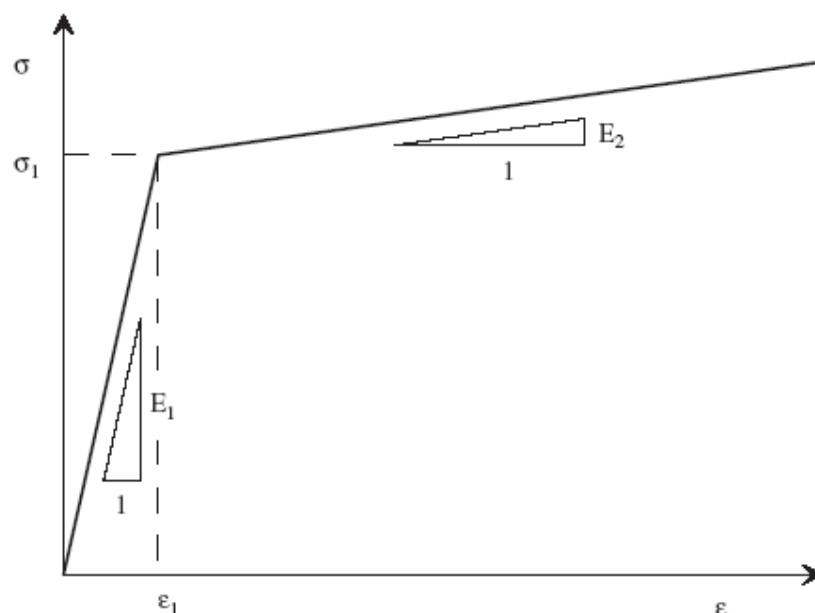
Διευκρινίζεται ότι οι προηγούμενες μεθοδολογίες αφορούσαν μέγιστες παραμορφώσεις του αγωγού που να μην ξεπερνούν το όριο διαρροής του χάλυβα (περί το 5%), ενώ οι αναλύσεις των Takada et al. αναφέρονται σε πολύ μεγαλύτερες επιβαλλόμενες παραμορφώσεις, μέχρι και το 40%. Οι παραμορφώσεις αυτές είναι εκτός του εύρους των προηγούμενων μεθοδολογιών και των ισχύοντων κανονισμών και επομένως δεν είναι δυνατό να υπάρξει σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθοδολογίες.

3.2.5 Μεθοδολογία Karamitros et al. (2007)

Η εν λόγω μεθοδολογία βρίσκει εφαρμογή μόνο σε περιπτώσεις ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης, όπου οι στατικά επιβαλλόμενες μετατοπίσεις προκαλούν εφελκυσμό στους αγωγούς.

Παραδοχές:

- Ο αγωγός θεωρείται λεπτότοιχος και η διασταύρωση του αγωγού με το ρήγμα είναι σημειακή.
- Η εφαρμογή της περιορίζεται στα όρια παραμορφώσεων των αγωγών, τα οποία καθορίζονται από τους ισχύοντες κανονισμούς.
- Η συμπεριφορά του χάλυβα του αγωγού περιγράφεται από ένα διγραμμικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων, με μέτρο ελαστικότητας E_1 στην ελαστική περιοχή και E_2 στην πλαστική περιοχή αντίστοιχα (Σχήμα 3.6).
- Ο αγωγός χωρίζεται συμμετρικά σε τέσσερα τμήματα, εκ των οποίων τα δύο βρίσκονται στην περιοχή υψηλών καμπυλοτήτων και σύμφωνα με την θεωρία ελαστικής δοκού σε αυτά ασκείται σταθερή εδαφική αντίσταση, ενώ τα άλλα δύο θεωρούνται ημιάπειρες ελαστικές δοκοί επί συνεχών ελατηριωτών στηρίξεων, με την εδαφική αντίσταση σε κάθε σημείο να είναι ανάλογη της εγκάρσιας μετατόπισης του αγωγού.
- Η τριβή μεταξύ του εδάφους και του αγωγού θεωρείται ότι παραμένει ίδια και σταθερή σε όλο το μήκος, χωρίς να υπάρχει προσαύξηση λόγω ανάπτυξης εδαφικών πιέσεων.



Σχήμα 3.6: Διγραμμική καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων

- Ο αγωγός χωρίζεται συμμετρικά σε τέσσερα τμήματα, εκ των οποίων τα δύο βρίσκονται στην περιοχή υψηλών καμπυλοτήτων, σύμφωνα με τη θεωρία ελαστικής δοκού στα οποία ασκείται σταθερή εδαφική αντίσταση, ενώ τα άλλα δύο θεωρούνται ημιάπειρες ελαστικές δοκοί επί συνεχών ελατηριωτών στηρίξεων, με την εδαφική αντίσταση σε κάθε σημείο να είναι ανάλογη της εγκάρσιας μετατόπισης του αγωγού.
- Η τριβή μεταξύ του εδάφους και του αγωγού θεωρείται ότι παραμένει ίδια και σταθερή σε όλο το μήκος, χωρίς να υπάρχει προσαύξηση λόγω ανάπτυξης εδαφικών πιέσεων.
- Η επίδραση της καμπυλότητας στις αξονικές παραμορφώσεις γίνεται μέσω της ακριβούς κατανομής των τάσεων στη διατομή του αγωγού.
- Η επίλυση γίνεται επαναληπτικά, υπολογίζοντας σε κάθε βήμα ένα τέμνον μέτρο ελαστικότητας, μέχρι να υπάρξει σύγκλιση.

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία υπερτερεί αυτής των Wang & Yeh (1985), γιατί εκτιμά την επίδραση της καμπυλότητας στις αξονικές παραμορφώσεις μέσω της θεώρησης της ακριβούς κατανομής των τάσεων στη διατομή του αγωγού. Αντίθετα η μεθοδολογία των Wang & Yeh (1985) θεωρούσε παραμόρφωση των τμημάτων της

υψηλά καμπυλωμένης περιοχής με σταθερή καμπυλότητα ανεξάρτητη από την εφελκυστική δύναμη κάθε σημείου του κυκλικού τόξου, μη λαμβάνοντας έτσι υπόψη την αρνητική συμβολή της εφελκυστικής δύναμης στην καμπτική δυσκαμψία του αγωγού.

Από τη σύγκριση της μεθοδολογίας αυτής με αριθμητικές αναλύσεις φαίνεται ότι έχει ικανοποιητικό βαθμό ακρίβειας.

3.2.6 Μεθοδολογία Trifonov & Cherniy (2010)

Πρόκειται για μια ημιαναλυτική μεθοδολογία για αγωγούς που διασταυρώνονται τόσο με οριζόντιας ολίσθησης όσο και με κανονικά ρήγματα. Ουσιαστικά αποτελεί βελτίωση της μεθοδολογίας των Karamitros et al. (2007).

Παραδοχές:

- Η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί και σε περιπτώσεις κανονικών ρηγμάτων, γιατί ο αγωγός δε θεωρείται συμμετρικός ως προς το ρήγμα, παρόλο που χωρίζεται σε τέσσερα τμήματα, όπως ακριβώς και στην μεθοδολογία των Karamitros et al. (2007).
- Λαμβάνεται υπόψη και η επιμήκυνση του αγωγού λόγω των εγκάρσιων μετατοπίσεων.
- Μέσα στις εξισώσεις ισορροπίας, που αφορούν το καμπύλο τμήμα, εισάγεται η επιρροή της αξονικής δύναμης, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η ανάγκη εκτίμησης της αλληλεπίδρασης μεταξύ των αξονικών και των καμπτικών παραμορφώσεων.
- Ο αγωγός χωρίζεται σε δύο τμήματα, το ένα εξ αυτών προσομοιώνεται και λειτουργεί ως «δοκός» και το άλλο ως «καλώδιο».

Μετά από σύγκριση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας με αριθμητικές αναλύσεις συμπεραίνεται ότι υπάρχει ικανοποιητική ακρίβεια. Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί το γεγονός ότι η εφαρμογή της απαιτεί χρήση ειδικού λογισμικού για επίλυση του συστήματος μη γραμμικών εξισώσεων ισορροπίας και συμβιβαστού των μετατοπίσεων.

3.2.7 Μεθοδολογία Karamitros et al. (2011)

Η αναλυτική αυτή μεθοδολογία αποτελεί επέκταση αυτής των Karamitros et al. (2007) στον υπολογισμό των παραμορφώσεων που αναπτύσσουν αγωγοί, όταν διασταυρωθούν με κανονικά ρήγματα. Οι διαφορές σε σχέση με την εν λόγω προγενέστερη μεθοδολογία είναι οι ακόλουθες:

- Δεν υπάρχει συμμετρία όσον αφορά την φόρτιση του αγωγού ως προς το ρήγμα, κατά συνέπεια η ανάλυση πρέπει να γίνει σε όλο το μήκος του αγωγού.
- Οι ροπές και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον αγωγό διαφέρουν στα τμήματα πριν και μετά το ρήγμα. Αυτό συμβαίνει γιατί οι εγκάρσιες δυνάμεις που ασκούνται στον αγωγό είναι διαφορετικές στο σταθερό και στο ολισθαίνον τμήμα του ρήματος.
- Το σημείο μηδενισμού των ροπών βρίσκεται στο σταθερό τμήμα του ρήματος και όχι πάνω στη διασταύρωση του αγωγού με το ρήγμα.
- Σε συνδυασμό με την προηγούμενη μεθοδολογία των Karamitros et al. (2007) πλέον είναι ικανός ο προσδιορισμός των παραμορφώσεων σε αγωγούς που τέμνονται με ρήγματα είτε αυτά είναι κανονικά είτε οριζόντιας ολίσθησης. Η εκτίμηση των παραμορφώσεων είναι επίσης εφικτή για όλες τις γωνίες τομής, αρκεί αυτές να οδηγούν σε αξονικό εφελκυσμό και όχι σε θλίψη.

Τα αποτελέσματα της ανωτέρω αναλυτικής μεθόδου συγκρίθηκαν με αυτά των αριθμητικών αναλύσεων δίνοντας ικανοποιητική σύγκλιση. Πλεονέκτημα της μεθοδολογίας αυτής αποτελεί το γεγονός ότι η επίλυση επιτυγχάνεται χωρίς τη χρήση ειδικού λογισμικού για επίλυση των αντίστοιχων εξισώσεων (όπως η αντίστοιχη μεθοδολογία των Trifonov & Cherniy).

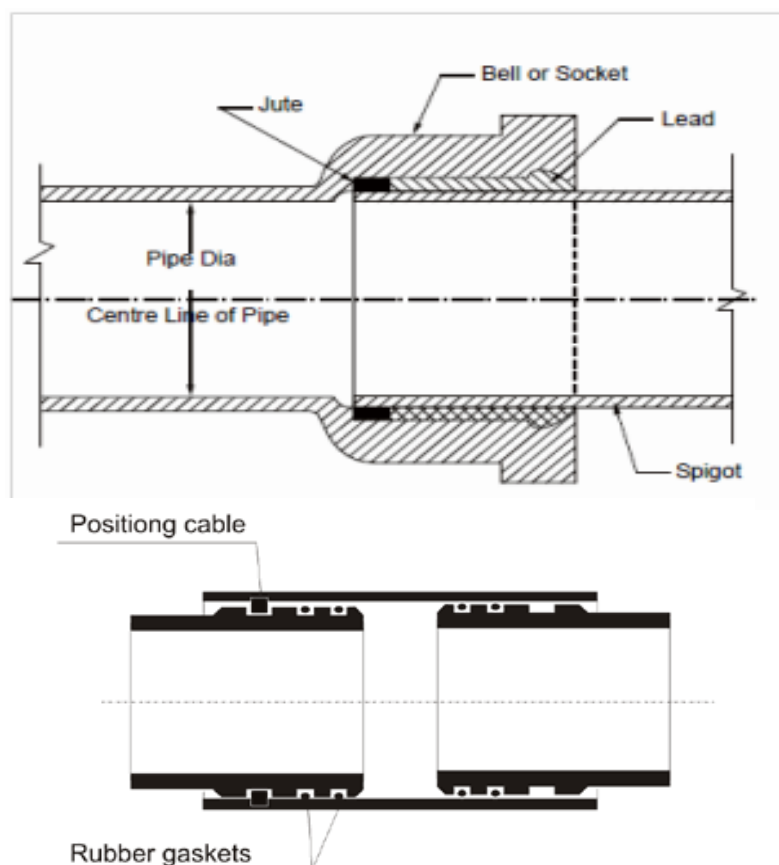
3.3 Αναλυτικές μέθοδοι για σπονδυλωτούς αγωγούς

Σπονδυλωτοί αγωγοί (segmented pipes) ονομάζονται οι αγωγοί που αποτελούνται από όμοια τμήματα τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται η συνέχεια μεταξύ των δύο τμημάτων. Συνήθεις μορφές ένωσης σπονδυλωτών αγωγών παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.7.

Οι σπονδυλωτοί αγωγοί έχουν αρκετές ομοιότητες με τους αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους που εξετάζονται σε αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία. Έχουν όμως και δύο ουσιαστικές διαφορές:

- τα τμήματα των σπονδυλωτών αγωγών είναι σχετικά άκαμπτα, ενώ οι συνδέσεις έχουν δυνατότητα ταυτόχρονης σχετικής στροφής αλλά και αξονικής μετακίνησης,
- οι ενώσεις μεταξύ τους αποτελούν «αδύνατα» σημεία της διάταξης και σχετίζονται με λειτουργικές ή και δομικές αστοχίες. Κατά συνέπεια οι συνδέσεις περιορίζουν τις μέγιστες επιβαλλόμενες μετακινήσεις που μπορεί να ανεχτεί ο αγωγός από μια πιθανή διάρρηξη ρήγματος, αντί να ενεργούν βοηθητικά στην αντοχή του αγωγού, όπως στην περίπτωση των εύκαμπτων κόμβων, απορροφώντας τις καμπτικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε αυτόν.

Για την αναλυτική προσομοίωση των σπονδυλωτών αγωγών γίνονται αντίστοιχες παραδοχές για το έδαφος, με αυτές που έχουν γίνει για την προσομοίωση των συνεχών αγωγών (προσομοίωση με ελαστοπλαστικά ελατήρια). Στη συνέχεια ακολουθούν οι αναλυτικές μεθοδολογίες για σπονδυλωτούς αγωγούς που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία.



Σχήμα 3.7: Συνήθεις ενώσεις αγωγών: α) τηλεσκοπικής μορφής και β) με εξωτερικό χιτώνιο

3.3.1 Μεθοδολογία O'Rourke & Trautmann (1981)

Η μεθοδολογία αυτή θεωρεί ότι ο αγωγός είναι απόλυτα απαραμόρφωτος ($EA = \infty$, $EI = \infty$), σε σχέση με της μικρότερης αντοχής συνδέσεις των τμημάτων του αγωγού. Συνεπώς οι επιβαλλόμενες μετατοπίσεις του ρήγματος εντοπίζονται αποκλειστικά και μόνο στις συνδέσεις. Από γεωμετρικές σχέσεις προέκυψε ότι η επιτρεπόμενη μετακίνηση του ρήγματος δ_f δίνεται από την σχέση 3.1 :

$$\delta_f = \min \begin{cases} \delta_a \frac{1}{\cos\beta} \\ \delta_l \frac{1}{\sin\beta} \end{cases} \quad (3.1)$$

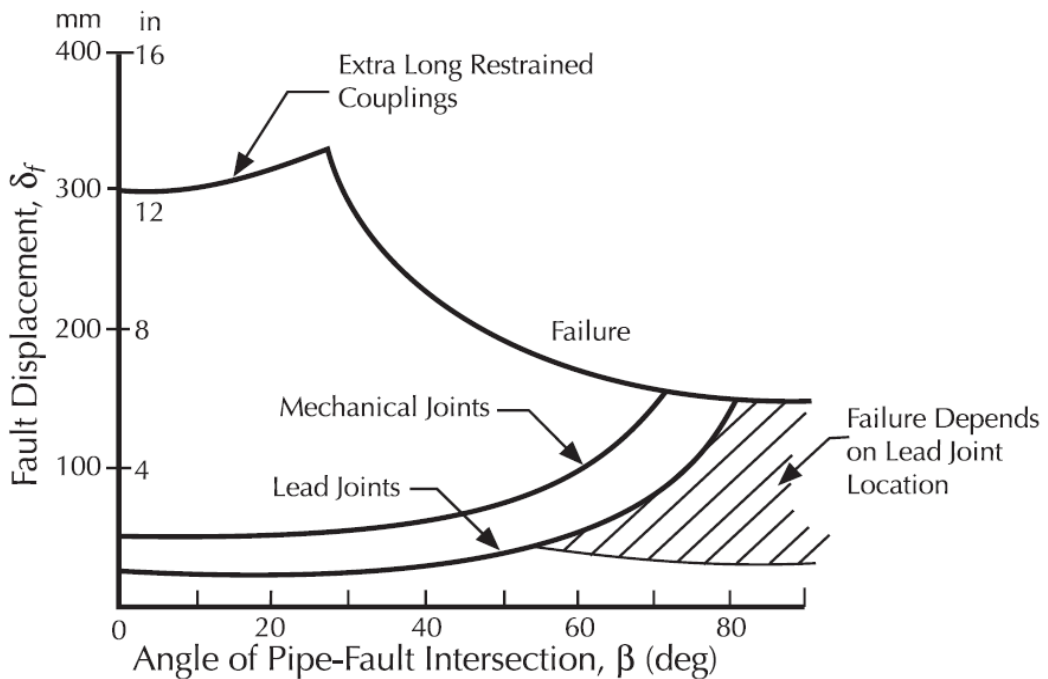
όπου β η γωνία διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό,
 δ_a η ικανότητα διαμήκουσ σχετικής μετακίνησης της κάθε σύνδεσης και

δ_l η ικανότητα εγκάρσιας σχετικής μετακίνησης δύο διαδοχικών συνδέσεων, η οποία εξαρτάται από την ικανότητα στροφής της σύνδεσης και της απόστασης μεταξύ των συνδέσεων. Μπορεί να υπολογιστεί από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για τυπικούς αγωγούς.

Η αστοχία του αγωγού εξαρτάται από τη γωνία β (γωνία διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό). Πιο συγκεκριμένα για μικρές γωνίες β επικρατούν οι αξονικές μετακινήσεις και για μεγάλες οι εγκάρσιες. Για το λόγο αυτό οι ερευνητές πρότειναν μια εξίσωση για τον υπολογισμό της βέλτιστης γωνίας διασταύρωσης, που επιτρέπει τη μέγιστη μετατόπιση ρήγματος, χωρίς να αστοχούν οι συνδέσεις είτε σε εφελκυσμό είτε σε στροφή.

$$\beta_{optimal} = \arctan\left(\frac{\delta_l}{\delta_a}\right) \quad (3.2)$$

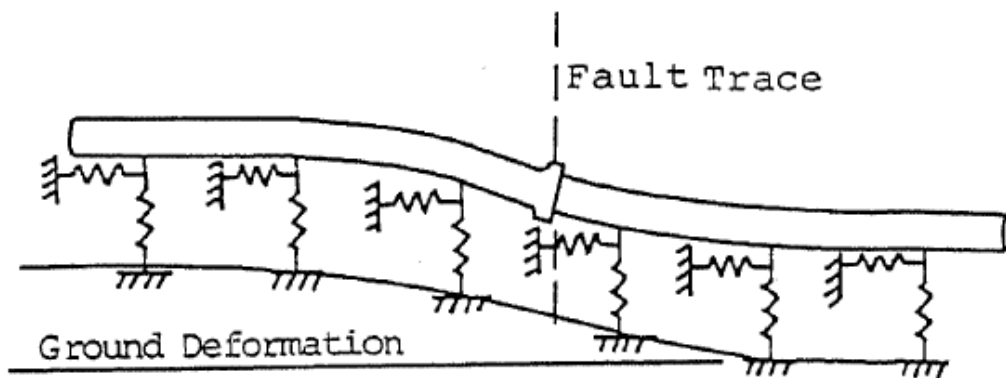
Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τα υλικά κατασκευής και το είδος της σύνδεσης, εκπόνησαν το ακόλουθο διάγραμμα εκτίμησης της βέλτιστης γωνίας διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό .



Σχήμα 3.8: Εκτίμηση μέγιστης επιτρεπόμενης μετακίνησης ρήγματος ως προς τη γωνία διασταύρωσης με τον αγωγό ανάλογα με το είδος των συνδέσεων του σπονδυλωτού αγωγού (O'Rourke & Trautmann, 1981)

3.3.2 Μεθοδολογία Takada (1984)

Η εν λόγω μεθοδολογία βασίζεται σε ένα απλοποιημένο προσομοίωμα για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός σπονδυλωτού αγωγού που δέχεται μετακινήσεις λόγω διάρρηξης ενεργού ρήγματος. Ο αγωγός θεωρήθηκε ότι αποτελείται από τμήματα ελαστικής δοκού, τα οποία συνδέονται με εύκαμπτους κόμβους που ακολουθούν μη γραμμικές σχέσεις για τη σχετική μετακίνηση και στροφή. Το έδαφος προσομοιώνεται με ελατήρια τύπου “Winkler” κατά μήκος και κάθετα προς τον αγωγό, τα οποία ακολουθούν ελαστοπλαστικές σχέσεις φορτίου-μετατόπισης.



Σχήμα 3.9: Αναλυτικό προσομοίωμα σπονδυλωτού αγωγού σύμφωνα με τον Takada (1984)

Υιοθετούνται οι σχέσεις ελαστικής δοκού για τις κατά μήκος και για τις εγκάρσιες μετακινήσεις

$$-EA \frac{d^2 u}{dx^2} = k_u (U - u) \quad (3.3)$$

$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} = k_v (V - v) \quad (3.4)$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του αγωγού

A η επιφάνεια διατομής του αγωγού

I γεωμετρική ροπή ακαμψίας της διατομής του αγωγού

k_u και k_v οι αντιστάσεις των ελατηρίων του εδάφους κατά μήκος και εγκάρσια αντίστοιχα προς τον άξονα του αγωγού.

u και v παραμορφώσεις του αγωγού

U και V εδαφικές μετακινήσεις κατά μήκος και εγκάρσια προς τον άξονα του αγωγού.

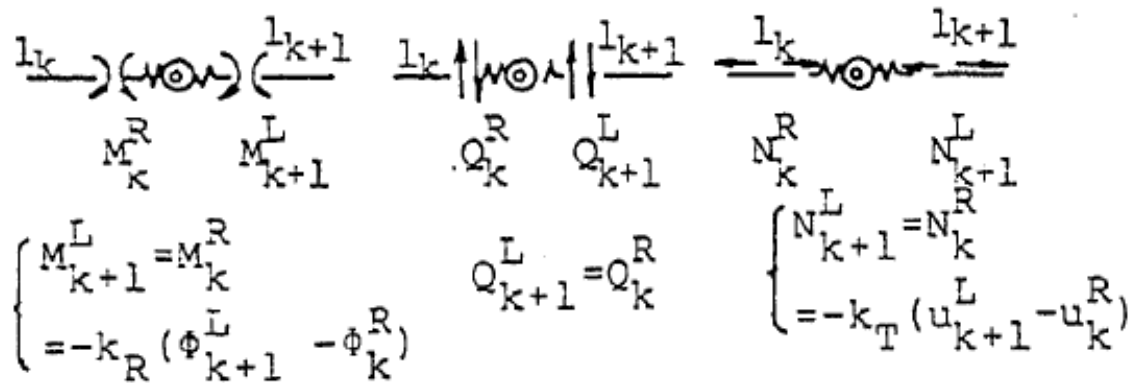
Οι ακόλουθες σχέσεις περιγράφουν τη μετατόπιση και τη δύναμη στο δεξί άκρο της δοκού k σε σχέση με αυτές στο αριστερό άκρο της δοκού k+1.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ \varphi \end{pmatrix}_{k+1}^L = \begin{pmatrix} u \\ v \\ \varphi \end{pmatrix}_k^R + \begin{pmatrix} -N/k_T \\ -M/k_R \\ 0 \end{pmatrix}_k^R \quad (3.5)$$

$$\begin{pmatrix} N \\ M \\ Q \end{pmatrix}_{k+1}^L = \begin{pmatrix} N \\ M \\ Q \end{pmatrix}_k^R \quad (3.6)$$

όπου k_T και k_R οι δυσκαμψίες των ελατηρίων μετακίνησης (κατά μήκος) και στροφής που αντιπροσωπεύουν τις μηχανικές ιδιότητες του τυπικού εύκαμπτου κόμβου.

Επειδή η σχέση φορτίου μετατόπισης (ή στροφής) των κόμβων είναι μη-γραμμικές, οι υπολογισμοί γίνονται βάσει της τέμνουσας δυσκαμψίας. Αναλυτικά οι σχέσεις ισορροπίας σε κάθε κόμβο παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.10.



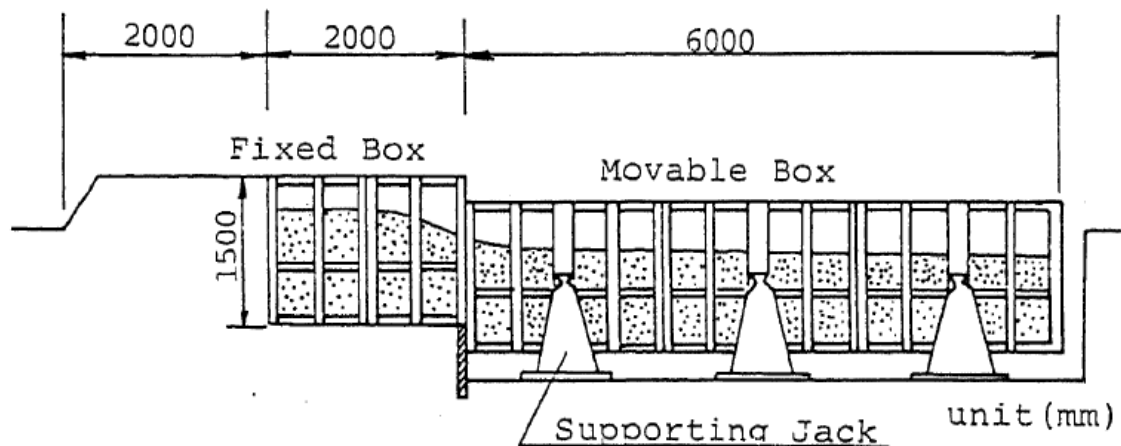
Σχήμα 3.10: Σχέσεις ισορροπίας στους κόμβους σύμφωνα με τον Takada (1984)

Για σκοπούς αξιολόγησης της αναλυτικής λύσης, πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα (με την πειραματική διάταξη του Σχήματος 3.11), εξετάζοντας δύο περιπτώσεις σπονδυλωτών αγωγών με τρεις και πέντε συνδέσεις αντίστοιχα, στο ίδιο περίπου μήκος αγωγού. Για τη σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα, οι τάσεις στη μέση μεταξύ των δύο συνδέσεων του αγωγού υπολογίστηκαν ως:

$$\sigma_1 = E(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2)/(1 - \nu^2),$$

$$\sigma_2 = E(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1)/(1 - \nu^2)$$

Οι αναλυτικές εξισώσεις που μορφώθηκαν με βάση τους πίνακες που προαναφέρθηκαν, επιλύθηκαν αριθμητικά για τα δύο πειράματα και διαπιστώθηκε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

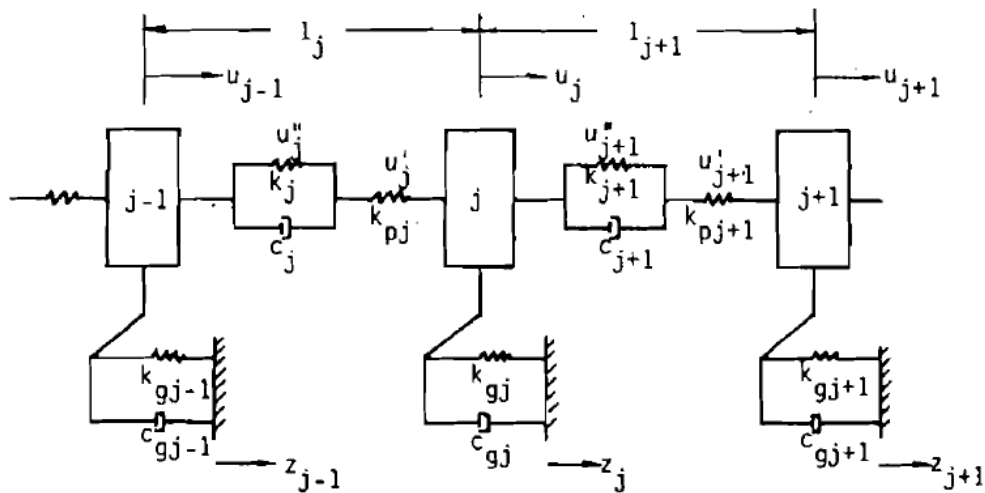


Σχήμα 3.11: Πειραματική διάταξη του Takada (1984).

3.3.3 Μεθοδολογία Tan & Yang (1988)

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των υπόγειων σπονδυλωτών αγωγών, όταν υπόκεινται σε παραμορφώσεις λόγω διάδοσης σεισμικών κυμάτων, προτάθηκε από τους Tan & Yang (1988) το αναλυτικό προσομοίωμα του Σχήματος 3.12 για προσδιορισμό των αναμενόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό, καθώς και των σχετικών μετατοπίσεων στις συνδέσεις. Το υλικό του αγωγού θεωρήθηκε ελαστικό, ενώ κάθε σύνδεση προσομοιώθηκε με ένα ελατήριο και έναν αποσβεστήρα.

Με αυτή τη μεθοδολογία μελετήθηκε αγωγός, ο οποίος βρίσκεται σε μη ομοιόμορφο εδαφικό προφίλ, ενώ κατέληξαν ότι για τα περισσότερα προβλήματα η ψευδοστατική ανάλυση για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του αγωγού επαρκεί, αν και μπορεί να υποεκτιμηθούν οι παραμορφώσεις στον αγωγό, οδηγώντας σε συντηρητική εκτίμηση των απαιτούμενων ιδιοτήτων των συνδέσεων. Διαπιστώθηκε επίσης ότι οι παραμορφώσεις του αγωγού και οι σχετικές μετακινήσεις στις συνδέσεις είναι συναρτήσει του λόγου k/k_p , δηλαδή του λόγου δυσκαμψίας των συνδέσεων ως προς τη δυσκαμψία του αγωγού. Όσο αυξάνεται ο λόγος αυτός, τόσο μεγαλύτερες είναι οι παραμορφώσεις που αναμένονται στον αγωγό και τόσο μικρότερες οι σχετικές μετακινήσεις που παραλαμβάνουν οι συνδέσεις.



Σχήμα 3.12: Αναλυτικό προσομοίωμα σπονδυλωτού αγωγού σύμφωνα με τους Tan & Yang (1988).

3.3.4 Μεθοδολογία ALA Guidelines (ASCE 2005).

Ο κανονισμός αυτός προτείνει τον αναλυτικό υπολογισμό των παραμορφώσεων στις συνδέσεις αγωγών νερού (ύδρευση, άρδευση, αποχέτευση) μέσω μιας αναλυτικής μεθοδολογίας για την περίπτωση όπου οριζόντια διάρρηξης ενεργό ρήγμα διασταυρώνεται με σπονδυλωτό αγωγό. Η ανάλυση αυτή βασίζεται στην παραδοχή ότι το ρήγμα τέμνει τον αγωγό στη μέση ενός από τα τμήματά του, ενώ οι συνδέσεις θεωρούνται ότι λειτουργούν ως αρθρώσεις, μπορούν δηλαδή να στρίψουν ελεύθερα και να μεταφέρουν μόνο τέμνουσες δυνάμεις.

Σε αυτή την περίπτωση, οι επιβαλλόμενες μετατοπίσεις από το ρήγμα θεωρούνται ότι παραλαμβάνονται από τις γειτονικές συνδέσεις και είναι ίσες με:

$$\delta_{joint} = \frac{\delta}{2} \cos\beta \quad (3.7)$$

$$\gamma_{joint} = \text{Arcsin}\left(\frac{\delta}{L_p} \sin\beta\right) \quad (3.8)$$

όπου δ η μετακίνηση του ρήγματος
 β η γωνία διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό και
 L_p το μήκος του κάθε τμήματος του αγωγού μεταξύ των συνδέσεων.

Θεωρώντας επιπλέον ότι οι επιβαλλόμενες από το έδαφος δυνάμεις έχουν φτάσει στη μέγιστή τους τιμή (ίση με p_u η οποία είναι η οριακή αντίσταση των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων), η αναπτυσσόμενη ροπή και διατμητική τάση στη θέση διασταύρωσης με το ρήγμα υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

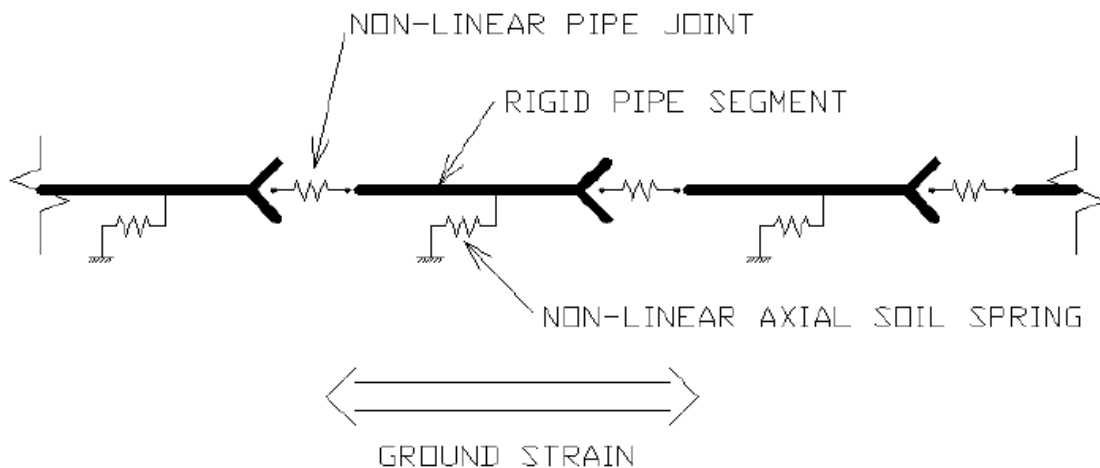
$$V = \frac{p_u L_p}{4} \quad (3.9)$$

$$M_{max} = \frac{p_u L_p^2}{32} \quad (3.10)$$

3.3.5 Μεθοδολογία Ο'Rourke (2009)

Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο προσομοίωμα, που σκοπό έχει να διατυπώσει μια νέα αναλυτική σχέση εκτίμησης των αναμενόμενων σεισμικών ζημιών σε σπονδυλωτούς αγωγούς (analytical fragility relation).

Το προσομοίωμα αφορά αποκλειστικά εδαφικές παραμορφώσεις που εφαρμόζονται κατά μήκος του αγωγού και είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί τόσο για την περίπτωση επιβαλλόμενων παραμορφώσεων λόγω σεισμικών κυμάτων, όσο και για μετακινήσεις λόγω διάρρηξης ρήματος.



Σχήμα 3.13: Αναλυτικό προσομοίωμα σπονδυλωτού αγωγού σύμφωνα με τον Ο'Rourke (2009).

Τα ενδιάμεσα τμήματα του αγωγού, μεταξύ των συνδέσεων, θεωρήθηκαν άκαμπτα και απαραμόρφωτα, ενώ όλες οι εδαφικές μετακινήσεις εντοπίζονται στις συνδέσεις. Τα εδαφικά ελατήρια ακολουθούν τις προτάσεις της ASCE (1984), ενώ για το αξονικό ελατήριο της σύνδεσης θεωρήθηκε η διγραμμική σχέση φορτίου-μετατόπισης των El Hmadi & O'Rourke (1989).

Το προσομοίωμα αυτό αφορά παραμορφώσεις κατά μήκος του αγωγού και δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σχεδιασμό αγωγών, οι οποίοι διασταυρώνονται με ρήγματα υπό τυχαία γωνία.

3.3.6 Μεθοδολογία O'Rourke & Liu (2012)

Βελτιώνεται η μεθοδολογία που προτείνεται από τις ALA Guidelines (ASCE 2005), λαμβάνοντας υπόψη και την επιβαλλόμενη αξονική παραμόρφωση στη σύνδεση λόγω της στροφής του τμήματος του αγωγού ανάμεσα στις συνδέσεις που παραβλέπει ο κανονισμός των ALA Guidelines (ASCE 2005). Η παραμόρφωση αυτή προστίθεται ή αφαιρείται από την τιμή της Σχέσης (3.7), αναλόγως αν λόγω της στροφής δημιουργείται έκταση ή συμπίεση του αγωγού και αντιστοιχεί σε μεταβολή μήκους του αγωγού ίση προς:

$$\delta_{rotational} = \frac{L_p}{2} - \sqrt{\left(\frac{L_p}{2}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{2} \sin\beta\right)^2} \quad (3.11)$$

Θεωρώντας ότι η μετακίνηση δ είναι μικρή συγκριτικά με το μήκος των τμημάτων L_p , η αντίστοιχη σχετική στροφή γ_{joint} , υπολογίζεται ακολούθως από την Εξίσωση 3.8.

Επιπροσθέτως, ενώ στην αρχική μεθοδολογία θεωρήθηκε ότι το ρήγμα διέρχεται από τη μέση ενός από τα ευθύγραμμα τμήματα του αγωγού, διαπιστώνεται ότι η δυσμενέστερη θέση τομής για τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη είναι να διέρχεται ακριβώς δίπλα από τη σύνδεση, οπότε η επιβαλλόμενη ροπή αυξάνεται σε:

$$M_{max} = \frac{p_u L_p^2}{8} \quad (3.12)$$

παράλληλα με την αξονική παραμόρφωση του κόμβου λόγω μετατόπισης (αγνοώντας τις στροφές) η οποία αυξάνεται σε:

$$\delta_{joint} = \delta \cos\beta \quad (3.13)$$

και τη σχετική στροφή των συνδέσεων, αμέσως πριν και αμέσως μετά τη σύνδεση από την οποία διέρχεται το ρήγμα, η οποία αυξάνεται σε:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\delta}{2L_p} \sin\beta\right) \quad (3.14)$$

Οι O'Rourke & Liu (2012) διαπίστωσαν ότι αυτές οι σχέσεις είναι μάλλον συντηρητικές συγκρινόμενες με τα πειράματα των Kim et al. (2009) και θεωρούν ότι αποτελούν άνω όριο των αναμενόμενων παραμορφώσεων και στροφών, ανάλογα με τη θέση του ρήγματος.

3.4 Συμπεράσματα

Με την σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση, διαπιστώνεται ότι οι μεθοδολογίες των Karamitros et al (2007, 2011) και των Trifonov & Cherniy (2010) προσεγγίζουν ικανοποιητικά τη συμπεριφορά συνεχών αγωγών και αποτελούν βάση αναφοράς για την αναλυτική επίλυση αγωγών με εύκαμπτους κόμβους.

Αντίθετα, τα διαθέσιμα αναλυτικά προσομοιώματα για σπονδυλωτούς αγωγούς είναι λιγότερο αναπτυγμένα. Ο κύριος περιορισμός τους οφείλεται στο ότι εστιάζουν στην καταπόνηση και την αστοχία των συνδέσεων και όχι των τμημάτων του αγωγού που παρεμβάλλονται μεταξύ αυτών, θεωρώντας τις συνδέσεις εξαρχής ως τα τρωτά σημεία της κατασκευής. Επιπλέον, τα τμήματα του αγωγού μεταξύ των κόμβων θεωρούνται συνήθως ως "άκαμπτα" και "απαραμόρφωτα". Αυτό σημαίνει ότι οι εν λόγω μεθοδολογίες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα, χωρίς εκτενή διόρθωση και προσαρμογή για το πρόβλημα που εξετάζεται εδώ, όπου οι κόμβοι είναι σε μεγάλη σχετικά απόσταση μεταξύ τους και επομένως η παραμόρφωση των ενδιάμεσων τμημάτων του αγωγού δε μπορεί να αγνοηθεί.

Πάρα ταύτα, η προτεινόμενη μεθοδολογία από τους O'Rourke & Liu (2012) για τους σπονδυλωτούς αγωγούς αποτελεί την πλέον κοντινή μεθοδολογία που υπάρχει στη βιβλιογραφία που σχετίζεται με τους αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους.

4

Προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία για κανονικά ρήγματα

4.1 Γενικά

Το σύνολο των αναλυτικών μεθοδολογιών που εντοπίστηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία αφορούν συνεχείς και σπονδυλωτούς αγωγούς, ενώ αντίθετα δεν έχει αναπτυχθεί καμία αναλυτική μεθοδολογία που να αφορά αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους και να αποσκοπεί στην εκτίμηση των παραμορφώσεων τους κατά τη διάρρηξη ενός ρήγματος. Ωστόσο ακόμη και οι υπάρχουσες μεθοδολογίες για σπονδυλωτούς αγωγούς δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην περίπτωση των εύκαμπτων αγωγών με κόμβους λόγω μίας πολύ σημαντικής διαφοράς μεταξύ των δύο περιπτώσεων: Οι εύκαμπτοι κόμβοι έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να συγκεντρώνουν τις επιβαλλόμενες αξονικές και καμπτικές παραμορφώσεις κατά τη διάρρηξη, απαλλάσσοντας τον υπόλοιπο αγωγό από πρόσθετες τάσεις. Αντίθετα οι συνδέσεις στους σπονδυλωτούς αγωγούς θεωρούνται αδύνατοι κρίκοι και ο σχεδιασμός γίνεται έτσι ώστε να περιοριστούν οι μετακινήσεις και οι στροφές στον κόμβο εντός των ανοχών μετακίνησης και στροφής του.

Συνεπώς κρίνεται αναγκαία η διαμόρφωση μίας αναλυτικής μεθοδολογίας για την εκτίμηση των παραμορφώσεων σε εύκαμπτους αγωγούς με κόμβους κατά τη διάρρηξη ρήγματος. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναπτυχθεί μία τέτοια μεθοδολογία για τα κανονικά ρήγματα, χρησιμοποιώντας ως βάση τις προτεινόμενες μεθοδολογίες των Karamitros et al.(2007, 2011) και των Trifonov & Cherniy (2010).

4.2 Παραδοχές αναλυτικής μεθοδολογίας

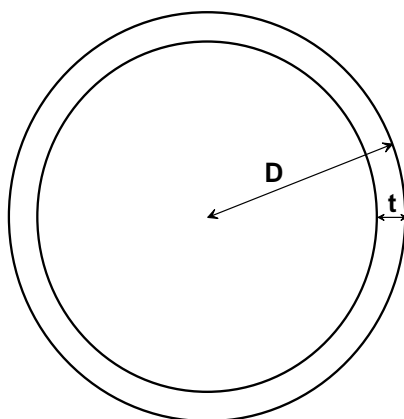
Οι βασικές παραδοχές της αναλυτικής μεθοδολογίας είναι αντίστοιχες με αυτές των μεθοδολογιών Newmark & Hall (1975), Kennedy et al.(1977), Karamitros et al. (2007, 2011) και Trifonov & Cherniy (2010) και πιο συγκεκριμένα:

- Η μέθοδος αφορά λεπτότοιχο χαλύβδινο αγωγό με εξωτερική διάμετρο D και πάχος τοιχώματος t (Σχήμα 4.1). Το εμβαδό της διατομής του αγωγού είναι ίσο με

$$A_s = \pi \cdot (D - t) \cdot t \quad (4.1)$$

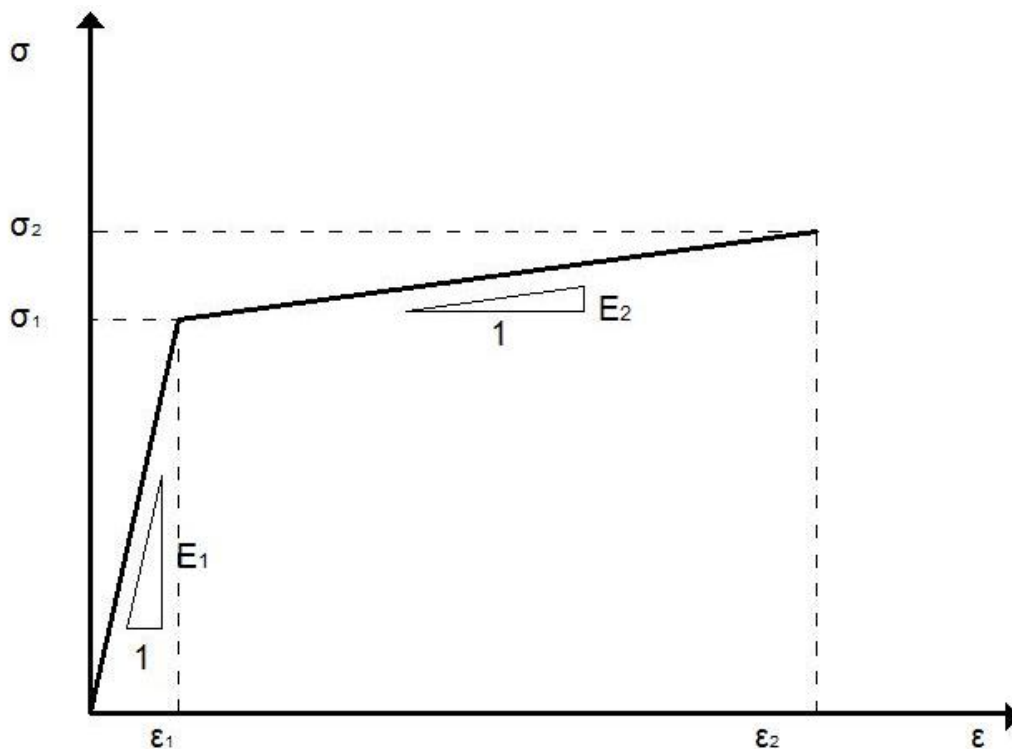
και η ροπή αδράνειάς της προκύπτει ως εξής

$$I = \pi \cdot \left(\frac{D - t}{2}\right)^2 \cdot t \quad (4.2)$$



Σχήμα 4.1: Γεωμετρία διατομής αγωγού

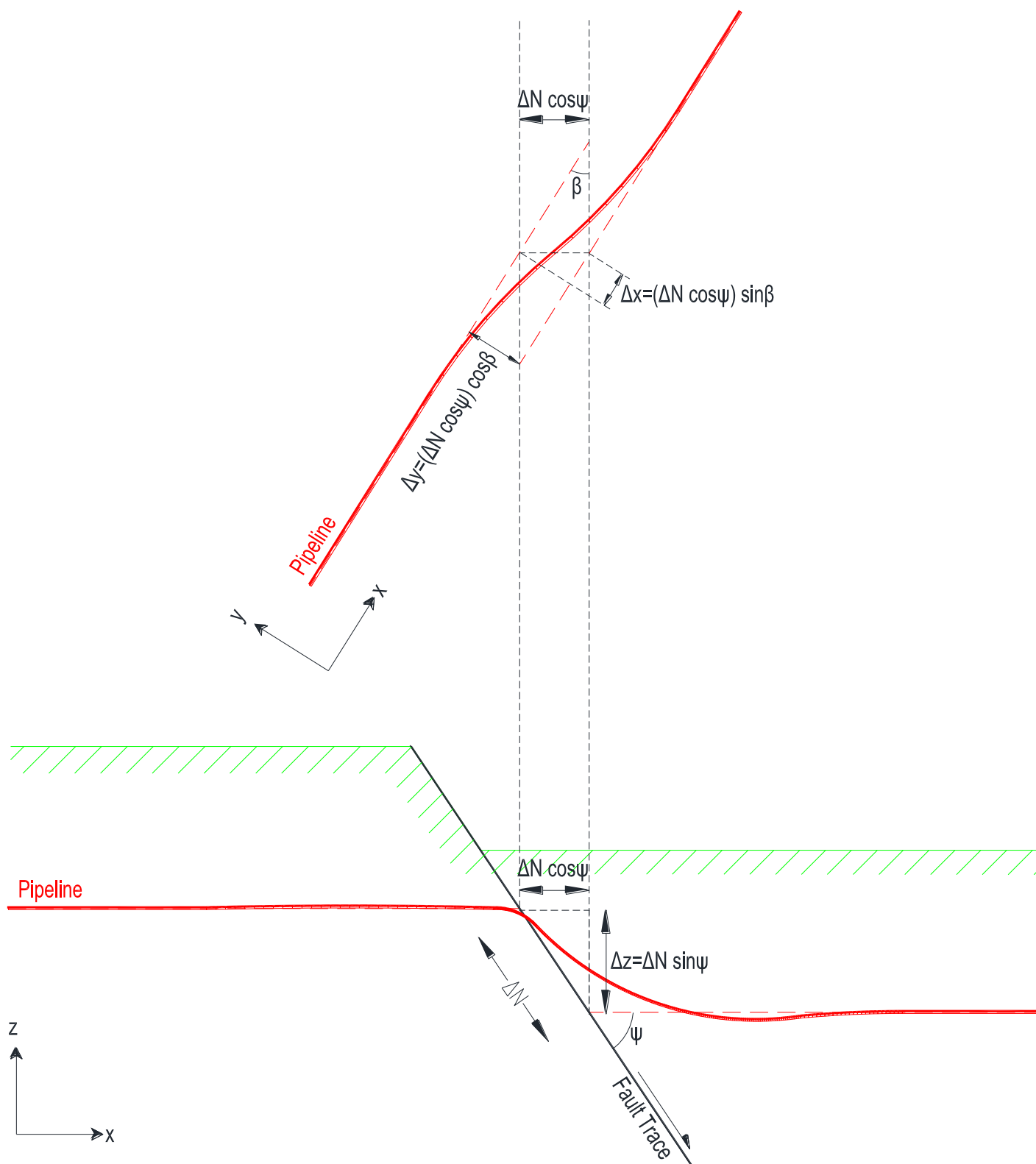
- Ο καταστατικός νόμος του χάλυβα του αγωγού που χρησιμοποιείται περιγράφεται από το διγραμμικό προσομοίωμα του Σχήματος 4.2, όπου E_1 και E_2 είναι το ελαστικό και το πλαστικό μέτρο ελαστικότητας αντίστοιχα, σ_1 είναι η τάση διαρροής του χάλυβα και ε_1 η αντίστοιχη παραμόρφωση. Επίσης ορίζεται σ_2 η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση, δηλαδή η τάση στην οποία αστοχεί ο χάλυβας και ε_2 η αντίστοιχη παραμόρφωση.



Σχήμα 4.2: Διγραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του χάλυβα του αγωγού

- Η αλληλεπίδραση του αγωγού με το περιβάλλον έδαφος γίνεται μέσω ελαστοπλαστικών ελατηρίων Winkler τόσο για τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις τριβής (όταν υπάρχει σχετική ολίσθηση μεταξύ εδάφους και αγωγού) όσο και για την εγκάρσια (κατακόρυφη) αντίσταση του εδάφους στη μετατόπιση του αγωγού.
- Θεωρείται ότι ισχύει η παραδοχή της επιπεδότητας της διατομής, παρόλο που συχνά αναπτύσσονται αρκετά μεγάλες παραμορφώσεις στην περιοχή του ρήγματος.
- Οι εύκαμπτοι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να παραμορφωθούν στροφικά εντός του κατακόρυφου επιπέδου, με σταθερή στροφική δυσκαμψία ίση με C_T , ενώ στους υπόλοιπους άξονες έχουν (διαμήκη και στροφική) δυσκαμψία αντίστοιχη με αυτή των ενδιάμεσων τμημάτων του αγωγού. Επίσης η στροφική δυσκαμψία C_T των κόμβων είναι πολύ μικρή σε σχέση με την καμπτική αντίσταση του αγωγού, με αποτέλεσμα να συμπεριφέρονται ουσιαστικά σαν αρθρώσεις και να αναπτύσσονται σ' αυτούς ιδιαίτερα μικρές ροπές.

- Το ρήγμα θεωρείται επίπεδο με μηδενικό πάχος ζώνης διάρρηξης, έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί σημειακή ή τομή του με τον αγωγό και να μπορεί να αναλυθεί η μετατόπισή του σε δύο συνεπίπεδες συνιστώσες Δx και Δz (Σχήμα 4.3). Η ύπαρξη και ταυτόχρονης εγκάρσιας οριζόντιας συνιστώσας Δy του ρήγματος (περίπτωση oblique normal fault) δεν εξετάζεται στα πλαίσια αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας.
- Λόγω της αβεβαιότητας στον προσδιορισμό της ακριβούς θέσης της διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό, κατά το σχεδιασμό τοποθετούνται εύκαμπτοι κόμβοι ανά μία σταθερή απόσταση στην περιοχή του αγωγού περί το ίχνος του ρήγματος. Έτσι στο αναλυτικό προσομοίωμα θεωρείται ότι υπάρχει τουλάχιστον ένας κόμβος στο υπερκείμενο τέμαχος του ρήγματος (hanging wall) και τουλάχιστον τρεις κόμβοι στο ολισθαίνον τέμαχος. Επιπρόσθετα θεωρείται ότι το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό σε δύο πιθανές θέσεις α) στη μέση του τμήματος μεταξύ δύο κόμβων ή β) δίπλα σε κάποιον από αυτούς.
- Τέλος γίνεται η παραδοχή ότι ισχύει η αρχή της επαλληλίας για τις επιβαλλόμενες φορτίσεις (αξονικές και εγκάρσιες), αν και το πρόβλημα είναι έντονα μη γραμμικό.



Σχήμα 4.3: Ανάλυση της μετατόπισης κανονικού ρήγματος στις συνιστώσες Δx , Δy και Δz (γενική περίπτωση όπου $\beta \neq 0$).

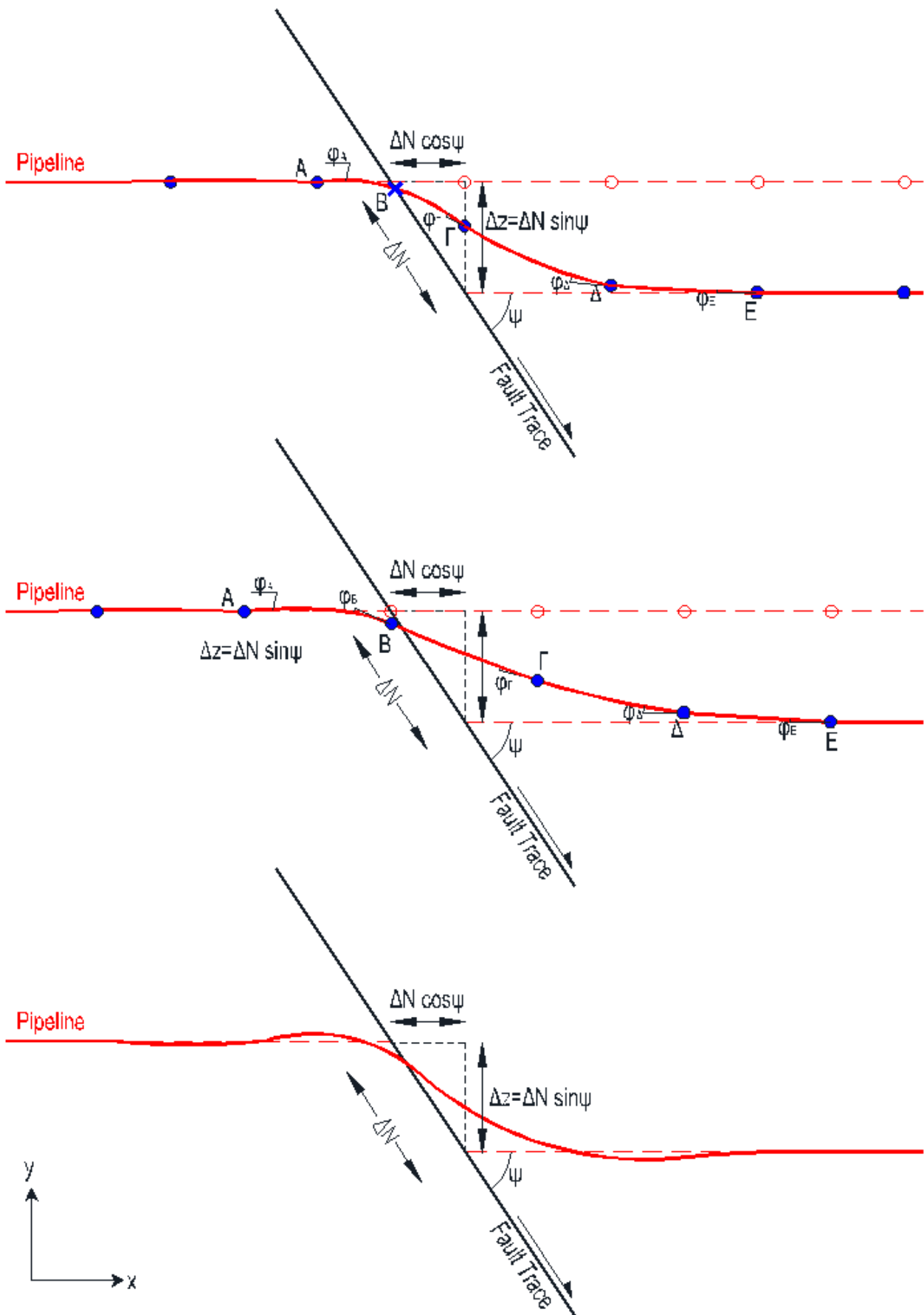
4.3 Διαφορές σχετικά με τους συνεχείς αγωγούς

Στα Σχήματα 4.4α και 4.4β παρουσιάζεται η παραμορφωμένη κατάσταση του αγωγού για τις δύο ακραίες περιπτώσεις: (α) όταν το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό στη μέση του τμήματος μεταξύ δύο κόμβων και (β) όταν το ρήγμα τέμνει τον αγωγό ακριβώς δίπλα από ένα κόμβο. Τέλος στο Σχήμα 4.4γ απεικονίζεται η παραμορφωμένη κατάσταση του συνεχούς αγωγού. Όπως γίνεται αντιληπτό στα Σχήματα 4.4α και 4.4β, η ύπαρξη εύκαμπτων κόμβων στην ευρύτερη περιοχή της διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά του αγωγού σε σχέση με αυτή των συνεχών αγωγών (Σχήμα 4.4γ).

Όπως φαίνεται, σε αντιστοιχία με το «καμπυλωμένο τμήμα» των ενιαίων αγωγών, οι εγκάρσιες μετατοπίσεις συγκεντρώνονται τώρα μεταξύ των σημείων Α και Ε εκατέρωθεν του ρήματος, ενώ στον υπόλοιπο αγωγό και για μήκος ίσο με το «μήκος αγκύρωσης», αναπτύσσονται πρακτικά μόνο αξονικές δυνάμεις τριβής.

Πέρα όμως από αυτή την ποιοτική ομοιότητα, είναι εμφανές ότι η συμπεριφορά του αγωγού με εύκαμπτους κόμβους παρουσιάζει αρκετές διαφορές σε σχέση με αυτή του συνεχούς, οι βασικότερες από τις οποίες εισήχθησαν στο στατικό προσομοίωμα του φορέα και είναι οι παρακάτω:

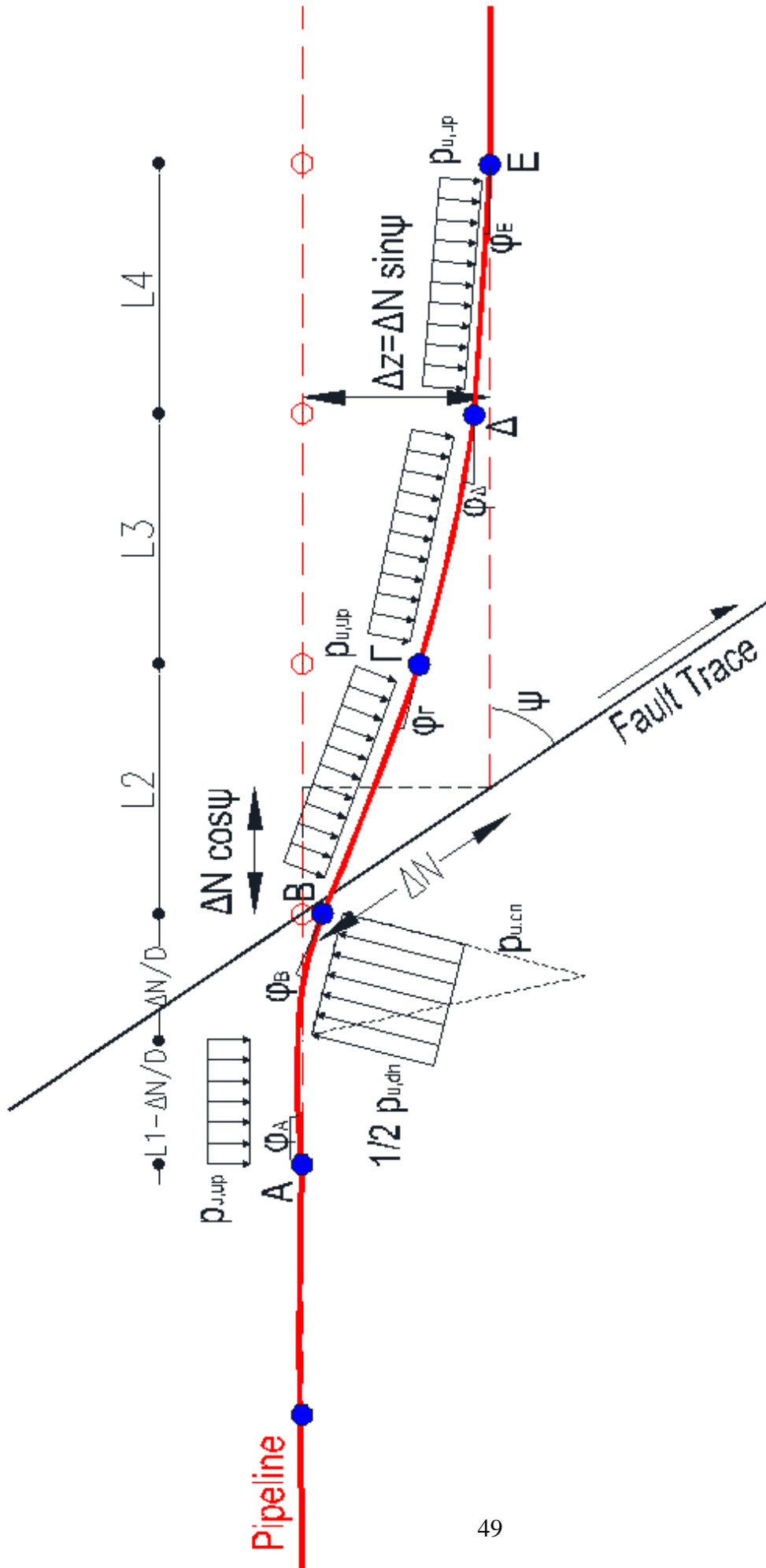
- Λόγω της πολύ μικρότερης στρωφικής δυσκαμψίας των εύκαμπτων κόμβων σε σχέση με τα συνεχή τμήματα του αγωγού, το μεγαλύτερο μέρος της στρώφης ως προς τον άξονα y παραλαμβάνεται από τους κόμβους, ενώ τα ενδιάμεσα τμήματα του αγωγού παραμένουν σχεδόν ευθύγραμμα και δεν παρουσιάζουν σημαντικές καμπτικές παραμορφώσεις.
- Το μήκος του «καμπυλωμένου τμήματος», δηλαδή της περιοχής όπου υπάρχουν έντονες εγκάρσιες μετατοπίσεις, είναι εξαρχής καθορισμένο και, στις περισσότερες περιπτώσεις, περιορίζεται μεταξύ της περιοχής ΑΒΓΔΕ που ορίζεται από τον πλησιέστερο κόμβο πριν το ρήγμα και τους τρεις κόμβους μετά από αυτό. Συνεπώς σε αντίθεση με την περίπτωση των συνεχών αγωγών, το μήκος αυτό δεν εξαρτάται από το συνδυασμό της αντοχής των εδαφικών ελατηρίων (κατακόρυφη αντοχή του εδάφους), την ακαμψία του αγωγού και το μέγεθος της επιβαλλόμενης μετακίνησης από το ρήγμα. Ωστόσο αυτό που δεν είναι εξαρχής καθορισμένο είναι το ποσοστό



Σχήμα 4.4: Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού που διασταυρώνεται κάθετα με το ίχνος κανονικού ρήγματος (α) ανάμεσα σε δύο εύκαμπτους κόμβους, (β) ακριβώς δίπλα από έναν απ' αυτούς και (γ) σε θέση χωρίς εύκαμπτους κόμβους

- της συνολικής κατακόρυφης μετατόπισης που θα παραληφθεί λόγω της στροφής κάθε κόμβου, δηλαδή το μέγεθος των γωνιών φ_A , φ_B , φ_G , φ_D και φ_E .
- Στις μεθοδολογίες των Karamitros et al. (2007) και Trifonov & Cherniy (2010) ο αγωγός πριν το σημείο A και μετά το σημείο E θεωρούνταν ημιαπειρομήκης δοκός επί ελαστικών στηρίξεων. Ωστόσο στο προτεινόμενο προσομοίωμα, αφού ο αγωγός στα τμήματα αυτά υφίσταται αμελητέες εγκάρσιες μετατοπίσεις, επιλέγεται να αντικατασταθούν τα τμήματα αυτά με μια κύλιση (ελεύθερη κατά X). Η οριζόντια δύναμη που υπολογίζεται σε αυτή λόγω της ισορροπίας του τμήματος ABΓΔΕ, είναι πρακτικά ίση προς την αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στο τμήμα του αγωγού πριν το σημείο A και μετά το σημείο E. Οι δυνάμεις αυτές παραλαμβάνονται μέσω της τριβής που αναπτύσσεται κατά μήκος των τμημάτων αυτών.
 - Στο τμήμα AB ο αγωγός συναντά πολύ μεγάλη αντίσταση από το έδαφος στην προς τα κάτω μετακίνησή του με αποτέλεσμα να καμπυλώνεται έντονα στο τμήμα αυτό. Έτσι στην αρχή του τμήματος AB ο αγωγός μετακινείται προς τα πάνω, αναπτύσσονται αρνητικές πιέσεις από το έδαφος (προς τα κάτω) και ο εύκαμπτος κόμβος στο σημείο A παίρνει θετικές (προς τα άνω) μετατοπίσεις. Το υπόλοιπο τμήμα του αγωγού AB μετακινείται προς τα κάτω και σε αυτό αναπτύσσονται θετικές πιέσεις από το έδαφος. Επειδή το σημείο στο οποίο αλλάζουν οι τάσεις εξαρτάται από τη γεωμετρία του προβλήματος, το μήκος του τμήματος του αγωγού AB που μετακινείται προς τα κάτω θεωρείται συντηρητικά ίσο με $\Delta N/D$, δηλαδή ίσο με το λόγο της επιβαλλόμενης μετατόπισης από το ρήγμα ως προς τη διάμετρο του αγωγού. Επίσης στο τμήμα αυτό θα πρέπει να ληφθεί τριγωνική κατανομή για τις τάσεις, ή απλοποιητικά ομοιόμορφη κατανομή με τιμή ίση με το μισό της μέγιστης, δεδομένου του ότι απαιτούνται αρκετά μεγάλες μετατοπίσεις για την ενεργοποίηση του συνόλου της αντίστασης του εδάφους προς τα κάτω.

Το προσομοίωμα που περιγράφηκε ανωτέρω και απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις δύο ακραίες περιπτώσεις γεωμετρίας, δηλαδή όταν: (α) το ρήγμα διέρχεται στο μέσο μεταξύ δύο διαδοχικών κόμβων (μηδενική γωνία φ_B), ή (β) το ρήγμα διέρχεται ακριβώς στην παρειά ενός από τους κόμβους. Στην πρώτη περίπτωση τα μήκη L1 και L2 είναι ίσα με L/2 και τα L3 και L4 ίσα με L, ενώ στη



Σχήμα 4.5: Στατικό προσομοίωμα του συνόλου του φορέα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της αναλυτικής μεθοδολογίας.

δεύτερη όλες οι αποστάσεις είναι ίσες με L , όπου L είναι η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κόμβων (Σχήμα 4.4).

Τέλος αξίζει να σημειωθεί, ότι ο φορέας των αγωγών που διασχίζουν κανονικά ρήγματα δεν παραμορφώνεται συμμετρικά ως προς το σημείο διασταύρωσής του με το ρήγμα όπως συμβαίνει σε αγωγούς που διασχίζουν ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, λόγω της μεγάλης διαφοράς στην αντίσταση του εδάφους, όταν ο αγωγός κινείται προς τα κάτω και προς τα πάνω.

4.4 Περιγραφή της αναλυτικής μεθοδολογίας

Για το προτεινόμενο αναλυτικό προσομοίωμα ακολουθείται η επαναληπτική διαδικασία επίλυσης με τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1: Αρχική «ελαστική» επίλυση φορέα

Βήμα 2: Υπολογισμός μέγιστων τάσεων, παραμορφώσεων και τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας

Βήμα 3: Διόρθωση του μέτρου ελαστικότητας και επανάληψη της διαδικασίας

ΒΗΜΑ 1^ο: Αρχική «ελαστική» επίλυση του φορέα

Στο βήμα αυτό γίνεται στατική επίλυση του φορέα χρησιμοποιώντας για όλες τις ράβδους του αγωγού ανεξάρτητα από τη φόρτισή τους τις αρχικές τιμές δυσκαμψίας του αγωγού και χρησιμοποιείται μια απλή επαναληπτική διαδικασία επίλυσης εξαιτίας της πεπλεγμένης φύσης των εξισώσεων.

Το στατικό προσομοίωμα του παραμορφωμένου φορέα του τμήματος ΑΒΓΔΕ του αγωγού μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα τμήματα, τα ΑΒ, ΒΓ, ΓΔ και ΔΕ (Σχήμα 5.6). Καθένα από τα τμήματα αυτά συμπεριφέρεται ως ελαστική δοκός υπό την ταυτόχρονη δράση αξονικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών και η βασική σχέση που περιγράφει την παραμόρφωση κάθε τμήματος είναι:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} - N \frac{d^2 w}{dx^2} = q \quad (4.1)$$

όπου

w η εγκάρσια μετατόπιση του αγωγού

E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του αγωγού

- I η ροπή αδρανείας της διατομής
 N η αξονική δύναμη στον αγωγό και
 q το εγκάρσιο φορτίο που ασκείται στον αγωγό.

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση αυτή για τον παραμορφωμένο φορέα, υπολογίζεται η εγκάρσια μετατόπιση του τμήματος σε κάθε θέση (βύθιση):

$$w(x) = w(0) + \varphi(0) \frac{\sinh ax}{a} + \frac{M(0)}{EIa^2} [\cosh ax - 1] + \frac{V(0)}{EIa^3} [\sinh ax - ax] + \frac{q}{N} \left[\frac{\cosh ax - 1}{a^2} - \frac{x^2}{2} \right] \quad (4.4)$$

όπου

$$a^2 = N/EI$$

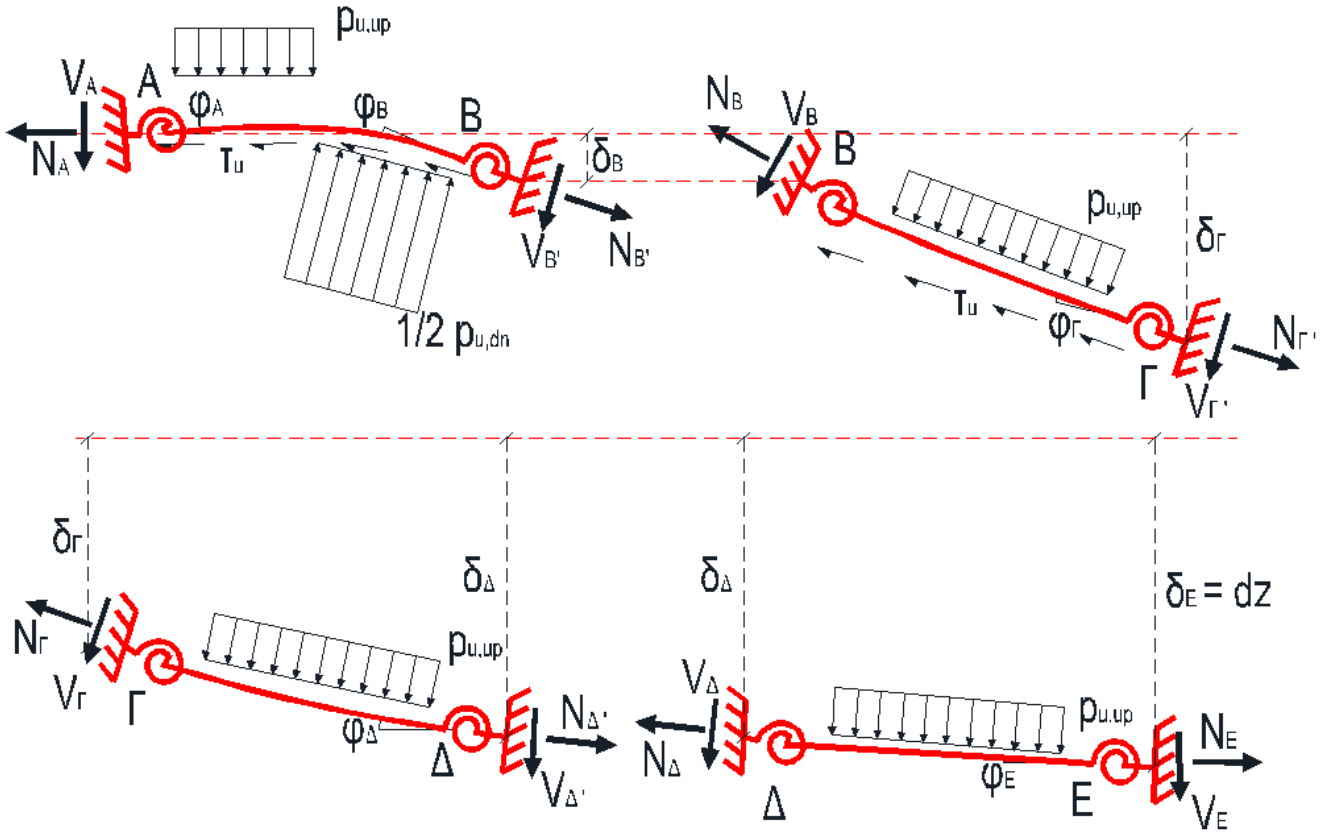
- w(0) η εγκάρσια μετατόπιση της δοκού στην αρχή του εξεταζόμενου τμήματος ($x = 0$),
 φ(0) η στροφή λόγω κάμψης του αγωγού στο ίδιο σημείο,
 M(0) η ροπή και
 V(0) η τέμνουσα δύναμη που ασκούνται στο ίδιο σημείο.

Επίσης η απόσταση x σε κάθε τμήμα μετράται από την άκρη του κάθε τμήματος προς το ίχνος του ρήγματος.

Για τα τέσσερα τμήματα του αγωγού AB, ΒΓ, ΓΔ και ΔΕ (δείκτες 1, 2, 3 και 4 αντίστοιχα) ισχύουν οι παρακάτω αρχικές συνοριακές συνθήκες:

$$\begin{aligned} w_1(0) &= 0 & w_2(0) &= \delta_3(L_3) \\ \varphi_1(0) &= 0 & \varphi_2(0) &= 0 \\ M_1(0) &= -M_A = C_r \cdot \varphi_A & M_2(0) &= -M_\Gamma = C_r \cdot \varphi_\Gamma \\ V_1(0) &= V_A & V_2(0) &= N_3(L_3) \cdot \sin\varphi_\Gamma - V_3(L_3) \cdot \cos\varphi_\Gamma \\ w_3(0) &= \delta_4(L_4) & w_4(0) &= 0 \\ \varphi_3(0) &= 0 & \varphi_4(0) &= 0 \\ M_3(0) &= -M_\Delta = C_r \cdot \varphi_\Delta & M_4(0) &= -M_E = C_r \cdot \varphi_E \\ V_3(0) &= N_4(L_4) \cdot \sin\varphi_\Delta - V_4(L_4) \cdot \cos\varphi_\Delta & V_4(0) &= V_E \end{aligned}$$

όπου C_r είναι η στρωφική δυσκαμψία των εύκαμπτων κόμβων.



Σχήμα 4.6: Ανάλυση των τμημάτων του αγωγού στην παραμορφωμένη κατάσταση

Έτσι για τις τέσσερις δοκούς οι συνολικές μετακινήσεις λόγω των εσωτερικών εντατικών μεγεθών (w) και των στροφών των εύκαμπτων κόμβων δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

Τμήμα AB:

$$\delta_1(x) = w_1(x) + x \cdot \sin \varphi_A \rightarrow$$

$$\delta_1(x)$$

$$= \begin{cases} \frac{M(0)}{E_1 I_1 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{V(0)}{E_1 I_1 a^2} [\cosh ax - 1] + x \cdot \sin \varphi_A & 0 \leq x \leq L^* \\ \frac{M(0)}{E_1 I_1 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{V(0)}{E_1 I_1 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{q_u^{dn}}{2N(x)} \left[\frac{\cosh(a(x-L^*)) - 1}{a^2} - \frac{(x-L^*)^2}{2} \right] + (L^* + x) \cdot \sin \varphi_A & L^* \leq x \leq L_1 \end{cases} \quad (4.5)$$

Τμήμα ΒΓ:

$$\begin{aligned} \delta_2(x) &= w_2(x) + x \cdot \sin(\varphi_\Gamma + \varphi_\Delta + \varphi_E + w'_3(L_3) + w'_4(L_4)) = \\ &= \delta_3(L_3) + \frac{M(0)}{E_2 I_2 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{V(0)}{E_2 I_2 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{q_u^{up}}{N(x)} \left[\frac{\cosh ax - 1}{a^2} - \frac{x^2}{2} \right] \\ &\quad + x \cdot \sin(\varphi_\Gamma + \varphi_\Delta + \varphi_E + w'_3(L_3) + w'_4(L_4)) \end{aligned} \quad (4.6)$$

με $0 \leq x \leq L_2$.

Τμήμα ΓΔ:

$$\begin{aligned} \delta_3(x) &= w_3(x) + x \cdot \sin(\varphi_\Delta + \varphi_E + w'_4(L_4)) = \\ &= \delta_4(L_4) + \frac{M(0)}{E_3 I_3 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{V(0)}{E_3 I_3 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{q_u^{up}}{N(x)} \left[\frac{\cosh ax - 1}{a^2} - \frac{x^2}{2} \right] \\ &\quad + x \cdot \sin(\varphi_\Delta + \varphi_E + w'_4(L_4)) \end{aligned} \quad (4.7)$$

με $0 \leq x \leq L_3$.

Τμήμα ΔΕ:

$$\begin{aligned} \delta_4(x) &= w_4(x) + x \cdot \sin(\varphi_E) = \\ &= \frac{M(0)}{E_4 I_4 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{V(0)}{E_4 I_4 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{q_u^{up}}{N(x)} \left[\frac{\cosh ax - 1}{a^2} - \frac{x^2}{2} \right] + x \\ &\quad \cdot \sin(\varphi_E) \end{aligned} \quad (4.8)$$

με $0 \leq x \leq L_4$.

Στις παραπάνω εξισώσεις οι άγνωστοι είναι έξι: οι γωνίες φ_A , φ_Γ , φ_Δ και φ_E των εύκαμπτων κόμβων και οι τέμνουσες δυνάμεις $V_1(0)=V_A$ και $V_4(0)=V_E$ που οφείλονται στον υπόλοιπο αγωγό πριν το σημείο Α και μετά το σημείο Ε, τα οποία και δεν αναλύονται, ενώ σε κάθε θέση απαιτείται η γνώση της αξονικής δύναμης $N(x)$. Επίσης στην περίπτωση που το ρήγμα διέρχεται ακριβώς δίπλα από ένα εύκαμπτο κόμβο (σημείο Β), η γωνία φ_B εξαρτάται από την εξίσωση ισορροπίας του κόμβου αυτού και γι' αυτό δεν είναι κατ' ανάγκη ίση με το μηδέν.

❖ **Περίπτωση 1: Διασταύρωση αγωγού με ρήγμα ακριβώς δίπλα σε εύκαμπτο κόμβο.**

Για την επίλυση χρησιμοποιούνται οι παρακάτω οχτώ εξισώσεις ισορροπίας και συνέχειας:

- (1) Η ροπή από τα αριστερά στον εύκαμπτο κόμβο Β πρέπει να είναι ίση με την εσωτερική ροπή του κόμβου:

$$M_1(L_1) = -M_B = C_r \cdot \varphi_B \quad (4.9)$$

(2) Η ροπή από τα δεξιά στον εύκαμπτο κόμβο B πρέπει να είναι ίση με την εσωτερική ροπή του κόμβου:

$$M_2(L_2) = -M_B = C_r \cdot \varphi_B \quad (4.10)$$

(3) Η ροπή στον εύκαμπτο κόμβο Γ πρέπει να είναι ίση με την εσωτερική ροπή του κόμβου:

$$M_3(L_3) = -M_\Gamma = C_r \cdot \varphi_\Gamma \quad (4.11)$$

(4) Η ροπή στον εύκαμπτο κόμβο Δ πρέπει να είναι ίση με την εσωτερική ροπή του κόμβου:

$$M_4(L_4) = -M_\Delta = C_r \cdot \varphi_\Delta \quad (4.12)$$

(5) Το άθροισμα των εγκάρσιων μετατοπίσεων πρέπει να ισούται με τη συνολική εγκάρσια μετακίνηση που επιβάλλει το ρήγμα:

$$\delta_1(L_1) + \delta_2(L_2) = dz \quad (4.13)$$

(6) Η στροφή του αγωγού πριν και μετά το σημείο B πρέπει να είναι συμβατή:

$$\varphi_A + \varphi_B + w'_1(L_1) = \varphi_\Gamma + \varphi_\Delta + \varphi_E + w'_2(L_2) + w'_3(L_3) + w'_4(L_4) \quad (4.14)$$

(7) Η γωνία φ_B υπολογίζεται από την ισορροπία εγκάρσιων δυνάμεων του κόμβου B:

$$V_1(L_1) = V_2(L_2) \cdot \cos\varphi_B + N_B \cdot \sin\varphi_B \quad (4.15)$$

(8) Η αξονική δύναμη μπορεί να προκύψει από το συμβιβαστό των παραμορφώσεων για το σύνολο του αγωγού, δηλαδή από την ισότητα μεταξύ της επιμήκυνσης που επιβάλλεται στον αγωγό λόγω της μετακίνησης του ρήγματος (απαιτούμενη επιμήκυνση ΔL_{req}) και αυτής που προκύπτει από τις αναπτυσσόμενες τάσεις στον αγωγό (διαθέσιμη επιμήκυνση ΔL_{av}):

$$\Delta L_{req} = \Delta L_{av} \quad (4.16)$$

Η διαθέσιμη επιμήκυνση ΔL_{av} ορίζεται από την ολοκλήρωση των αξονικών παραμορφώσεων κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης, δηλαδή του τμήματος του αγωγού που υπάρχει σχετική ολίσθηση με το περιβάλλον έδαφος, και υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta L_{av} = 2 \int_0^{L_{anch}} \varepsilon(L) dL \quad (4.17)$$

όπου L η απόσταση από το ρήγμα και ο παράγοντας 2 εκφράζει το γεγονός ότι η επιμήκυνση γίνεται και από τις δύο πλευρές του ρήγματος.

Το μήκος αγκύρωσης του αγωγού L_{anch} είναι ίσο με:

$$L_{anch} = \frac{F_a}{\tau_u} = \frac{\sigma_a A_s}{\tau_u} \quad (4.18)$$

όπου F_a και σ_a είναι η αξονική δύναμη και τάση αντίστοιχα που αναπτύσσεται στη θέση διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό και τ_u είναι η τριβή που ασκεί το περιβάλλον έδαφος κατά μήκος του αγωγού.

Επίσης η αξονική τάση του αγωγού σε απόσταση L από το ρήγμα είναι ίση με:

$$\sigma(L) = \sigma_a - \frac{\tau_u}{A_s} L \quad (4.19)$$

Χρησιμοποιώντας το διγραμμικό μοντέλο του Σχήματος 4.2 για το υλικό του χάλυβα, αν αναπτύσσονται μόνο ελαστικές παραμορφώσεις στον αγωγό λόγω της αξονικής δύναμης, τότε η Σχέση (4.14) μετασχηματίζεται σε:

$$\Delta L_{av} = 2 \int_0^{L_{anch}} \frac{\sigma(L)}{E_1} dL = \frac{\sigma_a^2 A_s}{E_1 \tau_u} \quad (4.20)$$

Θεωρώντας ότι ισχύει το συμβιβαστό των παραμορφώσεων (Σχέση 4.16), η αξονική τάση στη θέση διασταύρωσης με το ρήγμα για την περίπτωση που αναπτύσσονται μόνο ελαστικές τάσεις ισούται με:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{E_1 \tau_u \Delta L_{req}}{A_s}} \quad (4.21)$$

Στην περίπτωση που αναπτύσσονται και πλαστικές παραμορφώσεις στον αγωγό λόγω της αξονικής τάσης, η Σχέση (4.17) γίνεται:

$$\Delta L_{av} = 2 \left[\int_0^{L_1} \left(\varepsilon_1 + \frac{\sigma(L) - \sigma_1}{E_2} \right) dL + \int_{L_1}^{L_{anch}} \frac{\sigma(L)}{E_1} dL \right] \quad (4.22)$$

όπου L_1 το μήκος στο οποίο αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις, το οποίο είναι ίσο με:

$$L_1 = \frac{(\sigma_\alpha - \sigma_1)A_s}{\tau_u} \quad (4.23)$$

Συνεπώς από τις Σχέσεις (4.17), (4.18), (4.22) και (4.23) προκύπτει ότι η αξονική τάση σ_α στη θέση της διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα, για την περίπτωση που αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις, είναι ίση με:

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1(E_1 - E_2) \pm \sqrt{\sigma_1^2(E_2^2 - E_1E_2) + E_1^2E_2\Delta L_{req}\frac{\tau_u}{A_s}}}{E_1} \quad (4.24)$$

Για τον υπολογισμό της οριζόντιας δύναμης N_B ισχύουν οι Σχέσεις 4.20, 4.23 και 4.24, με απαιτούμενη επιμήκυνση ΔL_{req} πλέον ίση με:

$$\Delta L_{req} = \Delta x + 1.5 \left[\left(\frac{L_1}{\cos\varphi_A} - L_1 \right) + \left(\frac{L_2}{\cos(\varphi_\Gamma + \varphi_\Delta + \varphi_E)} - L_2 \right) + \left(\frac{L_3}{\cos(\varphi_\Delta + \varphi_E)} - L_3 \right) + \left(\frac{L_4}{\cos(\varphi_E)} - L_4 \right) \right] \quad (4.25)$$

δηλαδή ίση με το άθροισμα της επιβαλλόμενης από το ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης Δx και της απαιτούμενης επιμήκυνσης λόγω της στροφής των τμημάτων του αγωγού, με τη δεύτερη λόγω του πολύ μικρού μεγέθους της συγκριτικά με την πρώτη να αμελείται σε όλες τις άλλες περιπτώσεις εκτός από τα ρήγματα με $\psi=90^\circ$.

Για την τελική επίλυση του συστήματος των εξισώσεων εφαρμόστηκε μία απλή αριθμητική μεθοδολογία εξαιτίας της πεπλεγμένης μορφής των αναλυτικών σχέσεων, σε κάθε βήμα της οποίας γίνεται μικρή διόρθωση των έξι βασικών μεγεθών φ_A , φ_Γ , φ_Δ , φ_E , V_A και V_E . Πιο συγκεκριμένα για το πρώτο βήμα λαμβάνονται ως αρχικές τιμές των παραπάνω μεγεθών οι εξής: $\varphi_A = -0.1^\circ$, $\varphi_\Gamma = 1.5^\circ$, $\varphi_\Delta = 0.5^\circ$, $\varphi_E = 0.5^\circ$, $V_A = -1000\text{kN}$ και $V_E = 100\text{kN}$. Στη συνέχεια σε κάθε βήμα τα μεγέθη αυτά αυξάνονται ή μειώνονται κατά ένα μικρό μέγεθος ανάλογο με το σφάλμα που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα για τα μεγέθη: $w_1'(L_1)-w_2'(L_2)$, $M_2(L_2)$, $M_3(L_3)$, $w_1(L_1)+w_2(L_2)=dz$, $M_1(L_1)$ και $M_4(L_4)$.

❖ **Περίπτωση 2: Διασταύρωση αγωγού με ρήγμα ακριβώς μεταξύ δύο κόμβων**

Στην περίπτωση αυτή για την επίλυση χρησιμοποιούνται οι παρακάτω εφτά εξισώσεις ισορροπίας και συνέχειας:

- (1) Η ροπή από τα αριστερά στη θέση διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα B πρέπει να είναι ίση με την ροπή από τα δεξιά στην ίδια θέση:

$$M_1(L_1) = M_2(L_2) \quad (4.26)$$

- (2) Η τέμνουσα από τα αριστερά στη θέση διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα B πρέπει να είναι ίση με την τέμνουσα από τα δεξιά στην ίδια θέση:

$$V_1(L_1) = V_2(L_2) \quad (4.27)$$

- (3) Η ροπή στον εύκαμπτο κόμβο Γ πρέπει να είναι ίση με την εσωτερική ροπή του κόμβου:

$$M_3(L_3) = -M_\Gamma = C_r \cdot \varphi_\Gamma \quad (4.28)$$

- (4) Η ροπή στον εύκαμπτο κόμβο Δ πρέπει να είναι ίση με την εσωτερική ροπή του κόμβου:

$$M_4(L_4) = -M_\Delta = C_r \cdot \varphi_\Delta \quad (4.29)$$

- (5) Το άθροισμα των εγκάρσιων μετατοπίσεων πρέπει να ισούται με τη συνολική εγκάρσια μετακίνηση που επιβάλλει το ρήγμα:

$$\delta_1(L_1) + \delta_2(L_2) = dz \quad (4.30)$$

- (6) Η στροφή του αγωγού πριν και μετά το σημείο B πρέπει να είναι συμβατή:

$$\varphi_A + w'_1(L_1) = \varphi_\Gamma + \varphi_\Delta + \varphi_E + w'_2(L_2) + w'_3(L_3) + w'_4(L_4) \quad (4.31)$$

- (7) Η αξονική δύναμη μπορεί να προκύψει από το συμβιβαστό των παραμορφώσεων όπως και για την περίπτωση που το ρήγμα πέφτει ακριβώς πάνω στον κόμβο (Σχέσεις 4.16 και 4.25).

Και σε αυτή την περίπτωση λόγω της πεπλεγμένης μορφής των αναλυτικών σχέσεων εφαρμόστηκε μία απλή αριθμητική μεθοδολογία για την τελική επίλυση του

συστήματος εξισώσεων, κατά την οποία σε κάθε βήμα γίνεται μικρή διόρθωση των έξι βασικών μεγεθών, $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \varphi_D, V_A$ και V_E . Πιο συγκεκριμένα για τα έξι αυτά μεγέθη λαμβάνονται ως αρχικές τιμές για το πρώτο βήμα οι εξής: $\varphi_A = -0.1^\circ, \varphi_B = 1.5^\circ, \varphi_C = 1.0^\circ, \varphi_D = 0.1^\circ, V_A = -200\text{kN}$ και $V_E = 100\text{kN}$. Στη συνέχεια σε κάθε βήμα τα μεγέθη αυτά αυξάνονται ή μειώνονται κατά ένα μικρό μέγεθος ανάλογο με το σφάλμα που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα για τα μεγέθη: $w_1'(L_1)-w_2'(L_2), V_1(L_1)-V_2(L_2), M_3(L_3), w_1(L_1)+w_2(L_2)=dz, M_1(L_1)-M_2(L_2)$ και $M_4(L_4)$.

ΒΗΜΑ 2^ο: Υπολογισμός μέγιστων τάσεων, παραμορφώσεων και τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας

Στο βήμα αυτό επιλέγεται η διατομή με το δυσμενέστερο συνδυασμό επιβαλλόμενης ροπής και αξονικής δύναμης για κάθε μία από τις τέσσερις ράβδους και υπολογίζεται η κατανομή των τάσεων που πρέπει να υπάρχει, έτσι ώστε να ισχύει η παραδοχή της επιπεδότητας της διατομής. Πιο συγκεκριμένα επιλύεται το σύστημα των εξισώσεων

$$N = \int_{-R}^{+R} \sigma(z) dz \quad (4.32)$$

$$M = \int_{-R}^{+R} z \cdot \sigma(z) dz \quad (4.33)$$

με την τάση $\sigma(z)$ σύμφωνα με το διγραμμικό νόμο του υλικού (Σχήμα 4.2), ο οποίος μπορεί να εκφραστεί από τη Σχέση 4.34:

$$\sigma(z) = \frac{(E_1 - E_2)\varepsilon(z)}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_2)\varepsilon(z)}{\sigma_1}\right)^r\right]^{1/r}} + E_2\varepsilon(z) \quad (4.34)$$

Επιπρόσθετα, θεωρείται ότι η παραμόρφωση έχει μέση τιμή ε_a και μεταβάλλεται γραμμικά με την απόσταση z από το κέντρο της διατομής σύμφωνα με την σχέση:

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_a + kz \quad (4.35)$$

Η επίλυση λόγω της πολυπλοκότητας των εξισώσεων γίνεται και στην περίπτωση αυτή επαναληπτικά μέσω μίας αριθμητικής μεθόδου, διορθώνοντας σε κάθε βήμα τις τιμές των ε_a και k μέχρι να επαληθευτούν οι σχέσεις 4.32 και 4.33. Το βήμα αυτό περιγράφεται πιο αναλυτικά στο Παράρτημα Α.

ΒΗΜΑ 3^ο: Διόρθωση του μέτρου ελαστικότητας και επανάληψη της διαδικασίας

Για την κάθε ράβδο υπολογίζεται το τέμνον μέτρο ελαστικότητας E_{cur} ως η μέση τιμή του προηγούμενου μέτρου ελαστικότητας (του αρχικού ελαστικού μέτρου στο πρώτο βήμα) και αυτού που προκύπτει ως ο λόγος τάσεων/παραμορφώσεων στον άξονα της διατομής, δηλαδή:

$$E_{cur}^{i+1} = \frac{E_{cur}^i + \frac{\sigma_\alpha}{\varepsilon_\alpha}}{2} \quad (4.36)$$

Με το νέο τέμνον μέτρο ελαστικότητας κάθε ράβδου επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί των βημάτων 1 και 2 μέχρι το σύστημα να ισορροπήσει και να υπάρχει σύγκλιση.

Συνεπώς με τη λήξη της επαναληπτικής διαδικασίας που περιγράφηκε ανωτέρω, έχουμε στη διάθεσή μας όλα τα μεγέθη που χρειάζονται για τον σχεδιασμό τόσο των κόμβων όσο και του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα από το **Βήμα 1** υπολογίζονται:

- οι τιμές των γωνιών $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_\Gamma, \varphi_\Delta$ και φ_E ,
- οι τέμνουσες δυνάμεις $V_A, V_B, V_\Gamma, V_\Delta$ και V_E ,
- οι αξονικές δυνάμεις $N_A, N_B, N_\Gamma, N_\Delta$ και N_E .

και οι εύκαμπτοι κόμβοι πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε να έχουν:

- ικανότητα σε στροφή: $\varphi_K = SF \cdot \max(\varphi_A, \varphi_B, \varphi_\Gamma, \varphi_\Delta, \varphi_E)$
- αντοχή του κόμβου σε διάτμηση: $V_K = SF \cdot \max(V_A, V_B, V_\Gamma, V_\Delta, V_E)$
- αντοχή σε αξονική δύναμη: $N_K = SF \cdot \max(N_A, N_B, N_\Gamma, N_\Delta, N_E)$

όπου SF οι συντελεστές ασφαλείας σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς.

Το **Βήμα 2** αφορά το σχεδιασμό του ίδιου του αγωγού, αφού εκεί υπολογίζονται οι αναμενόμενες ροπές, τάσεις και παραμορφώσεις των ενδιάμεσων τμημάτων του αγωγού.

5

Παρουσίαση αριθμητικής μεθοδολογίας για κανονικά ρήγματα

5.1 Γενικά

Λόγω έλλειψης επαρκώς τεκμηριωμένων πειραματικών αποτελεσμάτων ή ιστορικών περιστατικών στα οποία να είχε γίνει χρήση εύκαμπτων κόμβων με σκοπό την απομείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό, η ακρίβεια της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας θα ελεγχθεί με την πραγματοποίηση αριθμητικών αναλύσεων. Αυτές οι αριθμητικές αναλύσεις θα πρέπει να μπορούν να προσομοιώσουν την επιβολή μεγάλων μετατοπίσεων στη διασταύρωση του αγωγού με το ενεργό ρήγμα και παράλληλα θα πρέπει να προσομοιώνεται και η ελαστοπλαστική συμπεριφορά του χάλυβα του αγωγού και των εδαφικών ελατηρίων. Έτσι επιλέχθηκε να εφαρμοστεί η μη-γραμμική μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων μέσω του κώδικα ANSYS.

5.2 Προσομοίωμα Πεπερασμένων Στοιχείων αγωγού

Ο αγωγός διακριτοποιήθηκε σε 2-κομβικά, ισοπαραμετρικά, τρισδιάστατα, ελαστοπλαστικά, ευθύγραμμα στοιχεία «αγωγού» (pipe elements), τα οποία έχουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά ενός κυλινδρικού αγωγού, με την επιθυμητή εξωτερική διάμετρο D και πάχος τοιχώματος t .

Στην περίμετρο της κάθε διατομής ορίζονται οχτώ (8) σημεία ολοκλήρωσης, στα οποία υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις του αγωγού λαμβάνοντας

υπόψη τη συνεισφορά των αξονικών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών. Αξίζει να σημειωθεί ότι εσωτερική πίεση του αγωγού δε λαμβάνεται υπόψη στο προσομοίωμα.

Όσον αφορά το **προσομοίωμα του χάλυβα του αγωγού**, η καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων του χάλυβα εισήχθη ως μια πολυγραμμική καμπύλη με βάση τη μαθηματική σχέση Ramberg-Osgood για το χάλυβα L450 (API X65). Έτσι χρησιμοποιήθηκαν 48 γραμμικά τμήματα για την καμπύλη του νόμου του υλικού και ο λόγος του Poisson ελήφθη ίσος με 0,20.

Οι μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις λόγω διάρρηξης του ρήγματος επιβάλλονται στη βάση των ισοδύναμων εδαφικών ελατηρίων, κατά μήκος του τμήματος του αγωγού που βρίσκεται στο κινούμενο τέμαχος του ρήγματος. Επίσης γίνεται η παραδοχή να αγνοηθεί τόσο στο αριθμητικό όσο και στο αναλυτικό προσομοίωμα η πιθανή ευνοϊκή επίδραση μαλακού εδάφους μεταξύ του αγωγού και του βραχώδους υποβάθρου, η οποία οδηγεί στην κατανομή της μετατόπισης υπό μορφή καμπύλης S στο μεγαλύτερο μήκος αγωγού και όχι σημειακά.

Όμοια με την αναλυτική μεθοδολογία η συνολική μετατόπιση του ρήγματος δ αναλύεται σε τρεις ορθογωνικές συνιστώσες (δx , δy και δz).

Αλγόριθμος μη Γραμμικής Επίλυσης.

Το σύστημα εξισώσεων με το οποίο γίνεται η επίλυση προβλημάτων με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων έχει την εξής μητρική μορφή:

$$[K] \cdot \{u\} = \{F^a\} \quad (5.1)$$

όπου

$[K]$ μητρώο δυσκαμψίας

$\{u\}$ διάνυσμα των άγνωστων τιμών των βαθμών ελευθερίας

$\{F^a\}$ διάνυσμα των επιβαλλόμενων φορτίων

Επειδή το μητρώο δυσκαμψίας $[K]$ είναι συνάρτηση των αγνώστων βαθμών ελευθερίας ή των παραγώγων τους, η Σχέση (5.1) δεν είναι γραμμική και έτσι για την επίλυσή της χρησιμοποιείται η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson (Σχήμα 5.1), η οποία περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$[K_i^T] \cdot \{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F^{nr}\} \quad (5.2)$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} - \{\Delta u_i\} \quad (5.3)$$

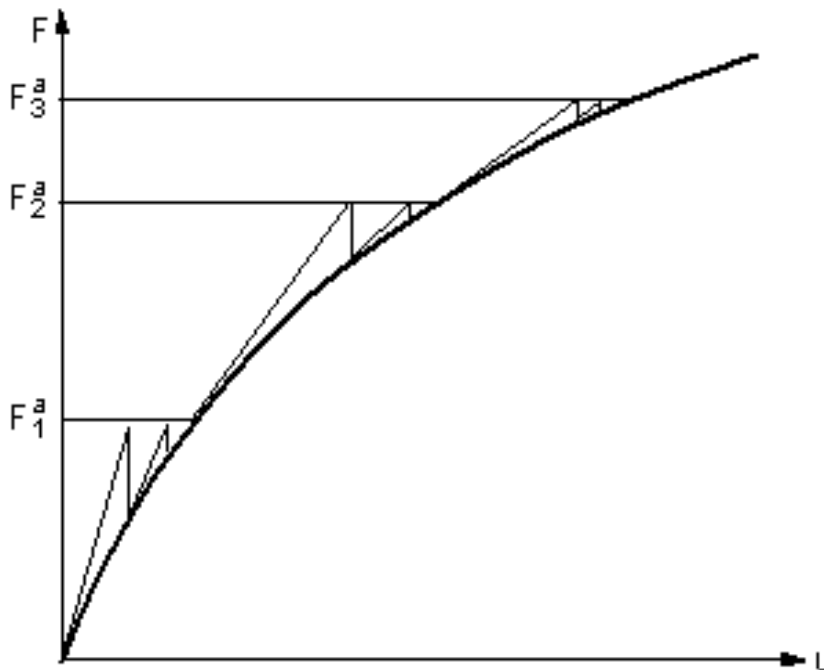
όπου

$[K_i^T]$ εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας

i δείκτης που υποδηλώνει την τρέχουσα επανάληψη

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

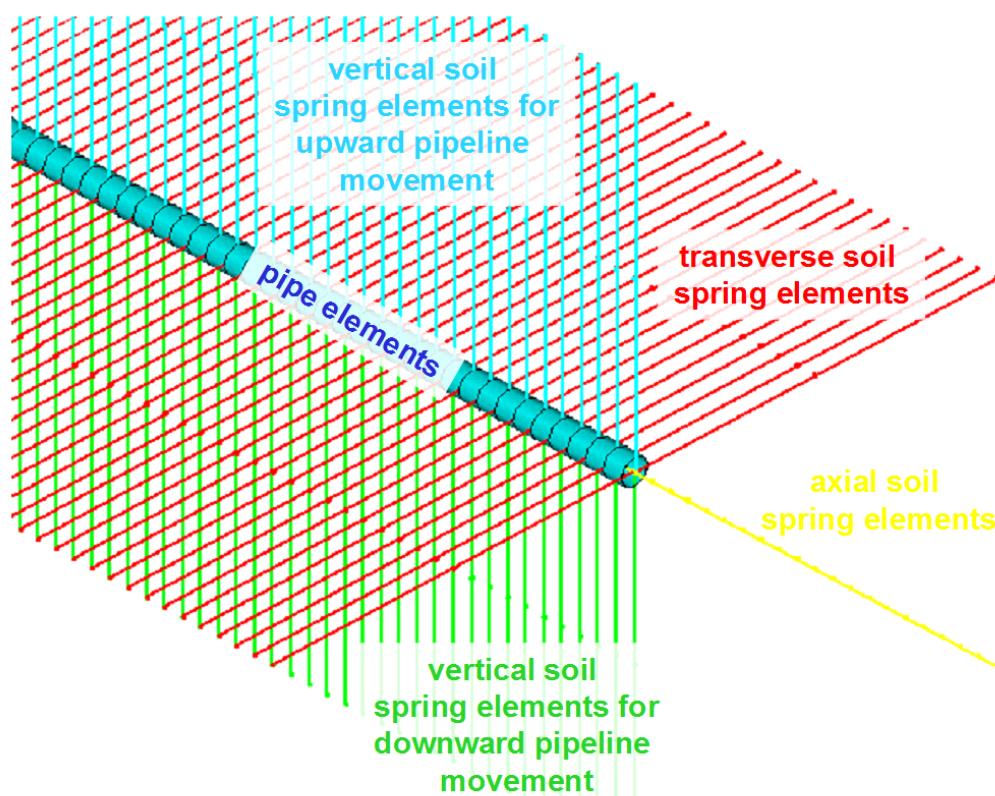
Σε κάθε επανάληψη τα $[K_i^T]$ και $\{F^{nr}\}$ υπολογίζονται συναρτήσει των τιμών του $\{u_i\}$. Συνεπώς το δεξί τμήμα της Σχέσης (5.2) αποτελεί το μέτρο της «απόκλισης» από την τελική λύση, αφού είναι ουσιαστικά το διάνυσμα των απομενόντων (εκτός-ισορροπίας) φορτίων.



Σχήμα 5.1: Επαυξητική μέθοδος Newton-Raphson

5.3 Προσομοίωση εδάφους

Η αλληλεπίδραση του εδάφους με τον αγωγό προσομοιώνεται μέσω πέντε ελαστοπλαστικών ελατηρίων ανά διατομή, τα τέσσερα εκ των οποίων βρίσκονται στις δύο εγκάρσιες διευθύνσεις, y και z και το ένα στην αξονική διεύθυνση του αγωγού x (Σχήμα 5.2), με το ελεύθερο άκρο του κάθε ελατηρίου να είναι πακτωμένο. Επιπρόσθετα χρησιμοποιούνται οι ίδιες παράμετροι για τα εδαφικά ελατήρια στην αναλυτική αλλά και στην αριθμητική επίλυση, έτσι ώστε να είναι συμβατές μεταξύ τους.



Σχήμα 5.2: Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης του εδάφους-αγωγού με ελαστοπλαστικά ελατήρια

Επίσης θεωρείται ότι ο αγωγός είναι τοποθετημένος εντός τάφρου επίχωσης τέτοιου μεγέθους, ώστε να καθίσταται δυνατή η εξ ολοκλήρου ανάπτυξη της αστοχίας του εδάφους εντός αυτής. Συνεπώς τα ελατήρια δεν αντιστοιχούν στις ιδιότητες του φυσικού εδάφους, αλλά του υλικού επίχωσης (χαλαρή έως μέσης πυκνότητας άμμος).

Στις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν θεωρήθηκε ότι ο αγωγός τοποθετείται σε βάθος 1.20m (από τη στέψη του αγωγού έως την επιφάνεια του εδάφους), εντός λεπτόκοκκης χαλαζιακής άμμου με τις ακόλουθες ιδιότητες:

Φαινόμενο βάρος:	$\gamma = 18\text{kN/m}^3$
Εσωτερική γωνία τριβής:	$\varphi = 36^\circ$
Γωνία τριβής μεταξύ αγωγού και εδάφους:	$\delta = 24^\circ$
Συντελεστής ουδέτερης ώθησης γαιών:	$K_0 = 0,50$

❖ 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 με αυτές για την προσομοίωση της μεταφοράς φορτίων στις αξονικά φορτιζόμενες διεπιφάνειες πασσάλου-εδάφους. Για τις άμμους και άλλα μη συνεκτικά εδάφη (π.χ. αμμοχάλικο) οι εν λόγω δυνάμεις λαμβάνονται από την ολοκλήρωση των διατμητικών τάσεων κατά μήκος της διεπιφάνειας αγωγού - εδάφους. Έτσι για έναν πλήρως θαμμένο αγωγό η μέγιστη αξονική αντίσταση t_u ανά μονάδα μήκους είναι ίση με:

$$t_u = \frac{\pi \cdot D}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot (1 + K_0) \cdot \tan \delta \quad (5.4)$$

όπου

K_0	συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών
H	απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους ως το κέντρο του αγωγού
D	εξωτερική διάμετρος αγωγού
γ	υπό άνωση ειδικό βάρος επίχωσης
δ	γωνία τριβής μεταξύ αγωγού και επίχωσης

Η γωνία τριβής δ είναι ίση με το 50÷100% της γωνίας τριβής φ της επίχωσης, ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας του αγωγού. Στην αριθμητική επίλυση επιλέχθηκε για τα οριζόντια ελατήρια μία μέση τιμή γωνίας $\delta=2/3\varphi$.

Η μέγιστη αξονική αντίσταση επιτυγχάνεται αρχικά σε μία σχετική μετατόπιση x_u της τάξης των 2.5 έως 5.0 mm (0.1 έως 0.2 in), για πυκνή έως χαλαρή άμμο αντίστοιχα (Singhal, 1980), ενώ για τα ελατήρια που χρησιμοποιήθηκαν θεωρήθηκε ότι επιτυγχάνεται σε σχετική μετατόπιση ίση με 3.0mm (0.12in).

❖ Εγκάρσια Οριζόντια Ελατήρια

Τα εγκάρσια οριζόντια ελατήρια προσομοιώνουν την αντίσταση του περιβάλλοντος εδάφους σε οποιαδήποτε οριζόντια μετατόπιση του αγωγού. Έτσι οι μηχανισμοί της αλληλεπίδρασης του εδάφους με τον αγωγό είναι παρόμοιοι με εκείνους των κατακόρυφων πλακών αγκύρωσης ή των θεμελίων που κινούνται οριζόντια σχετικά με το περιβάλλον έδαφος, ενεργοποιώντας έτσι ένα 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 & O'Rourke, 1983):

$$p = \frac{y}{A + B \cdot y} \quad (5.5)$$

όπου

$$A = 0,15 \cdot y_u / p_u$$

$$B = 0,85 / p_u$$

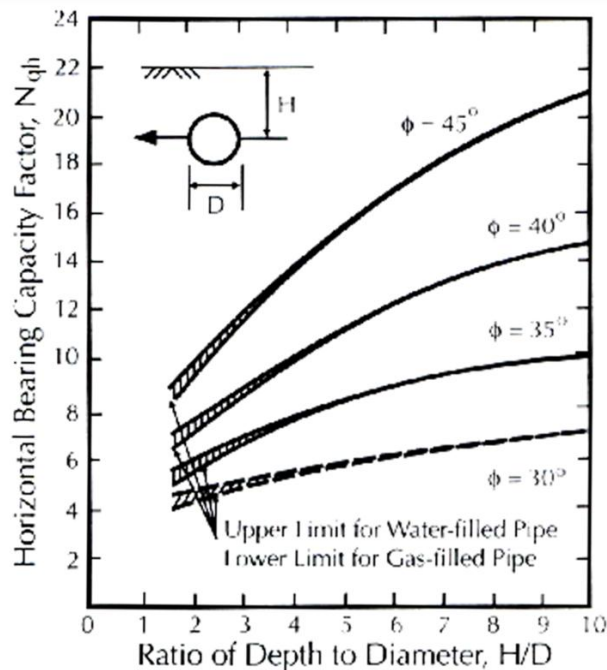
$$p_u = \gamma \cdot H \cdot N_{qn} \cdot D$$

$$N_{qn} = \text{συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας που υπολογίζεται συντηρητικά από το Σχήμα 5.3 (Trautmann & O'Rourke, 1983).}$$

$$y_u = (0,07 \div 0,10) \cdot (H + D/2) \quad \text{για χαλαρή άμμο ή}$$

$$y_u = (0,02 \div 0,03) \cdot (H + D/2) \quad \text{για πυκνή άμμο}$$

Για την προσάρτηση της διγραμμικής ελαστοπλαστικής σχέσης στην Σχέση (5.5) για $p=0.5p_u$, οι προηγούμενες τιμές του y_u θα πρέπει να πολλαπλασιασθούν επί 0.26.



Σχήμα 5.3: Συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας σύμφωνα με τους Trautmann & O'Rourke (1983)

❖ Εγκάρσια Κατακόρυφα Ελατήρια

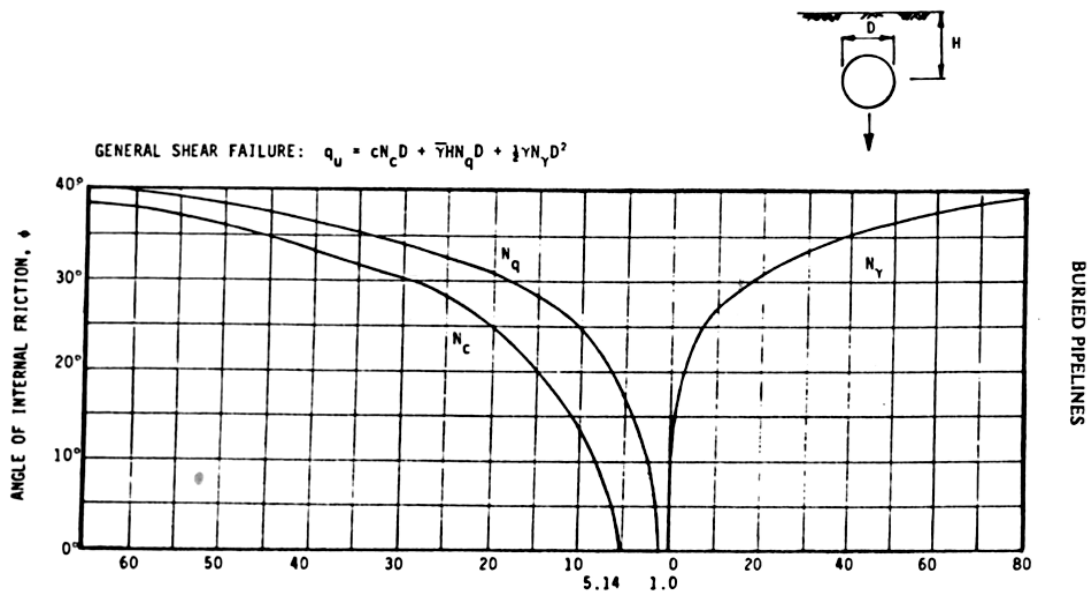
Για τα εγκάρσια κατακόρυφα ελατήρια οι δυνάμεις αντίστασης του εδάφους είναι μη συμμετρικές, αφού η απόκριση για τις «προς τα κάτω» και για τις «προς τα πάνω» μετακινήσεις είναι διαφορετική λόγω της σημαντικά μικρότερης αντίστασης του σχετικά λεπτού στρώματος της επίχωσης που βρίσκεται πάνω από τον αγωγό.

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

$$q_u = \gamma \cdot H \cdot N_q \cdot D + 0,5 \cdot \gamma \cdot D^2 \cdot N_\gamma \quad (5.6)$$

όπου

- N_q, N_γ συντελεστές φέρουσας ικανότητας για λωριδωτά θεμέλια που φορτίζονται κατακόρυφα προς τα κάτω. Υπολογίζονται από το Σχήμα 5.4 συναρτήσει της γωνίας τριβής ϕ (Meyerhof, 1955)
- γ υπό άνωση ειδικό βάρος επίχωσης
- H βάθος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι τον άξονα του αγωγού
- D εξωτερική διάμετρος του αγωγού



Σχήμα 5.4: Συντελεστές κατακόρυφης (προς τα κάτω) φέρουσας ικανότητας, σύμφωνα με τον Meyerhof (1955)

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.

Για την προς τα πάνω κατεύθυνση της κίνησης, 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 & O'Rourke 1983):

$$q = \frac{z}{A + B \cdot z} \quad (5.7)$$

όπου

$$A = 0,07 \cdot z_u / q_u$$

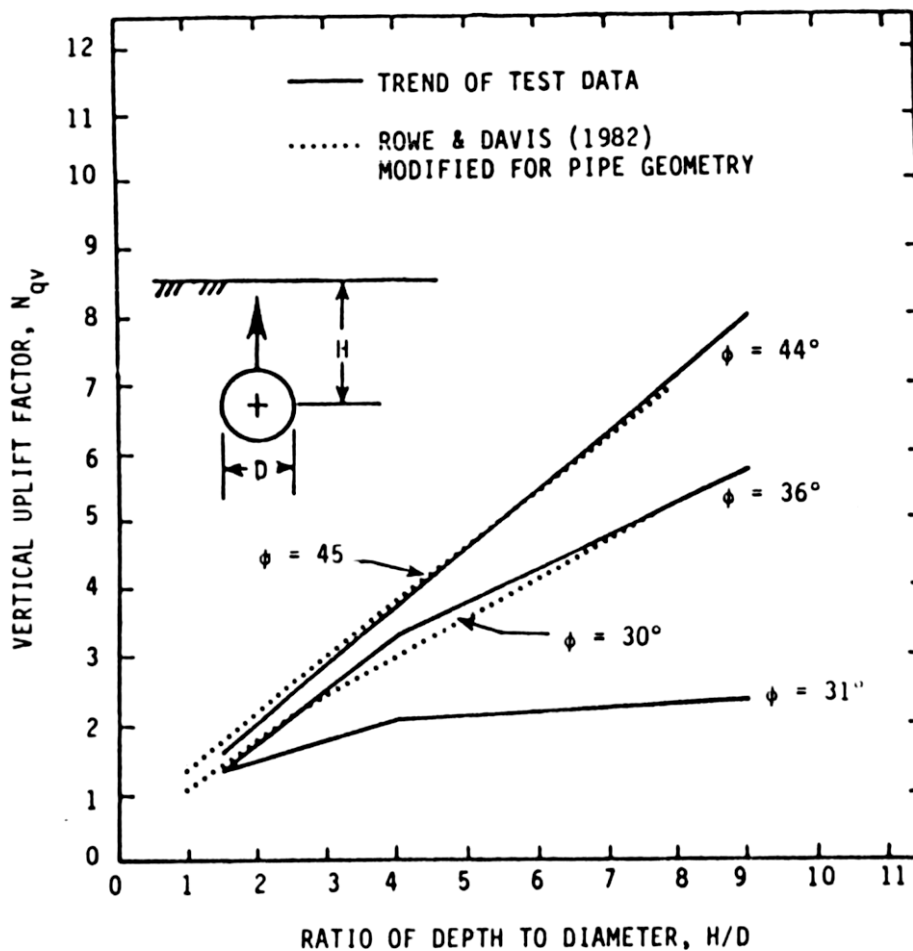
$$B = 0,93 / q_u$$

Για μη συνεκτικά εδάφη η μέγιστη αντίσταση σε κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση εκφράζεται ως (Trautmann & O'Rourke, 1983):

$$q_u = \gamma \cdot H \cdot N_{qv} \cdot D \quad (5.8)$$

όπου ο συντελεστής κατακόρυφης ανύψωσης N_{qv} δίνεται στο Σχήμα (5.5) ως συνάρτηση του λόγου του βάθους H του άξονα του αγωγού προς τη διάμετρο D και της γωνίας τριβής της επίχωσης ϕ .

Από τις δύο ομάδες καμπυλών του Σχήματος (5.5) για τον υπολογισμό των ελατηρίων χρησιμοποιούνται συντηρητικά οι διακεκομμένες, αυξάνοντας έτσι την αντίσταση που επιβάλλεται στην πλευρική μετατόπιση του αγωγού και κατ' επέκταση τις αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις.



Σχήμα 5.5: Συντελεστής κατακόρυφης (προς τα άνω) φέρουσας ικανότητας σύμφωνα με τους Trautmann & O'Rourke (1983)

Με βάση δοκιμές πεδίου (Esquivel-Diaz, 1967, Trautman and O'Rourke 1983) η τιμή της προς τα άνω μετατόπισης που απαιτείται για έναρξη της διαρροής είναι $z_{u,up} = (0.010 \div 0.015)H$ για πυκνές έως χαλαρές άμμους αντίστοιχα. Αν στη Σχέση (5.5)

προσαρμοστεί μια διγραμμική ελαστοπλαστική έκφραση για $q=0.50q_u$, το $z_{u,up}$ θα πρέπει να πολλαπλασιασθεί επί 0.13 περίπου.

Τα οριακά φορτία και οι μετατόψεις διαρροής των ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά των εδαφικών ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές αναλύσεις

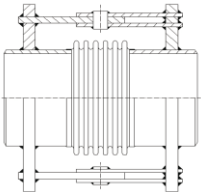
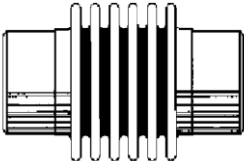
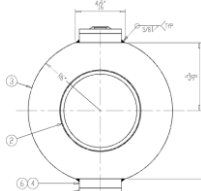
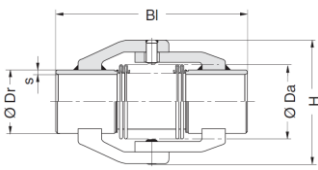
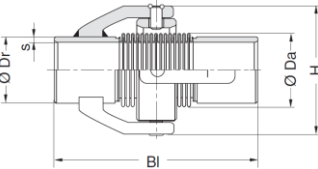
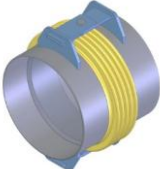
	Εξωτ. διάμετρος σωλήνα, D (mm)	762.0
ΑΞΟΝΙΚΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ	Οριακό φορτίο t_u (kN/m)	22.75
	Μετατόπιση διαρροής x_u (mm)	3.0
ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ	Οριακό φορτίο p_u (kN/m)	134.45 ($N_{qh}=6.2$)
	Μετατόπιση διαρροής y_u (mm)	35.7
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ (-ΠΡΟΣ ΤΑ ΑΝΩ)	Οριακό φορτίο q_u (kN/m)	41.20 ($N_{qv}=1.9$)
	Μετατόπιση διαρροής $z_{u,up}$ (mm)	2.57
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ (-ΠΡΟΣ ΤΑ ΚΑΤΩ)	Οριακό φορτίο q_u (kN/m)	1021.83 ($N_q=37$, $N_\gamma=42$)
	Μετατόπιση διαρροής $z_{u,dn}$ (mm)	95.3

5.4 Προσομοίωση εύκαμπτων κόμβων

Οι εμπορικά διαθέσιμοι εύκαμπτοι κόμβοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις σαν αυτή που μελετάται είναι τύπου «Bellows», των οποίων τα μηχανικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.2. Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων οι εύκαμπτοι κόμβοι προσομοιώθηκαν ως ειδικά στοιχεία τύπου «περιστροφικής άρθρωσης» (Revolute Joints - combination 7). Τα στοιχεία αυτά δεν έχουν μήκος και έχουν τη δυνατότητα να περιστραφούν γύρω από έναν άξονα, με στροφική δυσκαμψία που μπορεί να οριστεί. Ταυτόχρονα είναι δυνατό να οριστεί μία τιμή για τη μέγιστη στροφή, ύστερα από την οποία ο κόμβος είτε «καταστρέφεται» και σταματάει να μεταφέρει ροπές, είτε «κλειδώνει» και η στροφή περιορίζεται στη μέγιστη. Για τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του κόμβου, λόγω της έλλειψης ακριβέστερων δεδομένων από τους κατασκευαστές, επιλέχθηκαν τιμές σε αντιστοιχία με τα ευθύγραμμα τμήματα του αγωγού, οι οποίες είναι οι παρακάτω:

Αξονική δυσκαμψία στους άξονες x, y και z: 674310 kN/m
 Στροφική δυσκαμψία ως προς τον άξονα z: 2 kNm/deg
 Στροφική δυσκαμψία ως προς τους άξονες x και y: 78000 kNm/deg

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά εμπορικά διαθέσιμων εύκαμπτων κόμβων

A/A	ΠΡΟΣΦΟΡΑ	ΣΧΕΔΙΟ ΚΟΜΒΟΥ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΙΕΣ								
			P _{INT} Σχεδιασμού	Εσωτερική διάμετρος	Δυνατότητα ελατήριου	Στροφικό ελατήριο	Δυνατότητα αξον. μετακ.	Αξονικό ελατήριο	Δυνατότητα εγκ.μετακ.	Εγκάρσιο ελατήριο	Περιορισμός Μετακινήσεων
1	HKS-angular-expansion joint		1102.3 psi 76.0 bar 7.60 MPa	4.50 in (114.3 mm)	5°	146Nm/° 1292.2 lbin/°	N/A	N/A	N/A	N/A	Περιορισμός αξονικής και εγκάρσιας μετακίνησης
2	US-BELLOWS Single Expansion joint		150 psi 10.3 bar 1.03 MPa	4.50 in (114.3 mm)	10°	4.7 Nm/° 42 lb in/°	1.05 in	92 kN/m 816 lb/in	0.30 in	161 kN/m 1429 lb/in	Κανένας
3	US-BELLOWS Hinged Expansion joint		150 psi 10.3bar 1.03MPa	4.50 in (114.3 mm)	20°	8.8 Nm/° 79 lb in/°	N/A	104 kN/m 920 lb/in	N/A	303 kN/m 2685 lb/in	Περιορισμός αξονικής και εγκάρσιας μετακίνησης
4	BOA Group BKT-7510 joints		232 psi 16.0bar 1.60MPa	4.50 in (114.3 mm)	13.5°	8.0 Nm/° 71 lb in/°	N/A	N/A	N/A	N/A	Περιορισμός αξονικής και εγκάρσιας μετακίνησης
5	BOA Group BKT-7610 joints		232 psi 16.0bar 1.60MPa	4.50 in (114.3 mm)	13.5°	8.0 Nm/° 71 lb in/°	N/A	N/A	N/A	N/A	Περιορισμός αξονικής και εγκάρσιας μετακίνησης
6	EAGLE-BURGMANN Hinged Expansion joint		145 psi 10.0 bar 1.00 Mpa	4.50 in (114.3 mm)	20°	4.0 Nm/° 35 lb in/°	N/A	118 kN/m 673.8 lb/in	N/A	584 kN/m 3335 lb/in	Περιορισμός αξονικής και εγκάρσιας μετακίνησης

5.5 Τυπικά αποτελέσματα

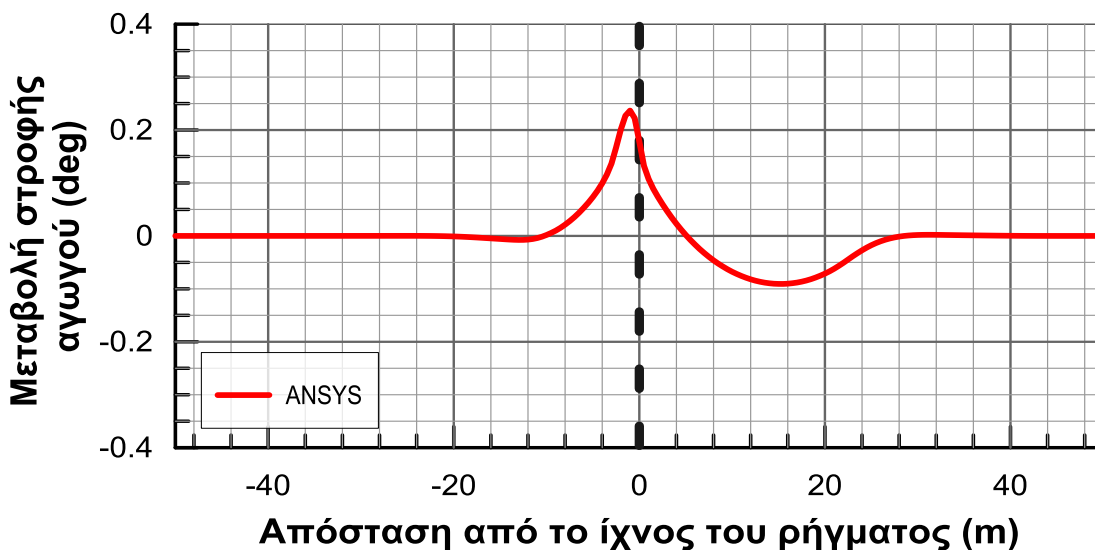
Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα αποτελέσματα δύο τυπικών ενδεικτικών αναλύσεων:

Η πρώτη ανάλυση αφορά ένα συνεχή αγωγό χωρίς εύκαμπτους κόμβους, ο οποίος διασταυρώνεται στο μέσο του με το ρήγμα. Η γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια είναι $\psi=75^\circ$ και ο λόγος μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού είναι $D_f/D=1$, δηλαδή η συνολική μετακίνηση του ρήγματος είναι ίση με 0.75m.

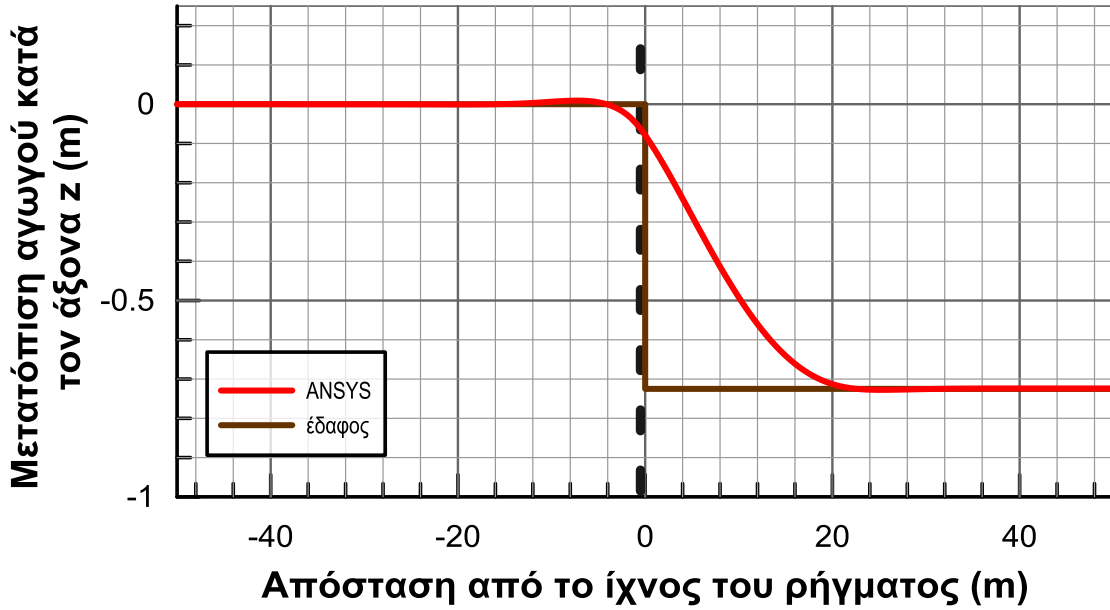
Η δεύτερη ανάλυση αφορά έναν αγωγό με 6 εύκαμπτους κόμβους τοποθετημένους ανά 8m στην περιοχή γύρω από το ρήγμα. Το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό στη μέση μεταξύ του 3^{ου} και 4^{ου} κόμβου και η γωνία του επιπέδου του με την οριζόντια είναι $\psi=75^\circ$. Και σε αυτήν την περίπτωση ο λόγος μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού είναι $D_f/D=1$, δηλαδή η συνολική μετακίνηση του ρήγματος είναι ίση με 0.75m.

5.5.1 Αριθμητική ανάλυση συνεχούς αγωγού

Στα Σχήματα 5.6 και 5.7 παρουσιάζεται συνολικά η παραμορφωμένη εικόνα του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 5.6 απεικονίζεται η μεταβολή της στροφής του συνεχούς αγωγού, ενώ στο Σχήμα 5.7 οι μετατοπίσεις του αγωγού κατά την εγκάρσια κατακόρυφη διεύθυνση. Σε όλα τα σχήματα παριστάνεται με διακεκομμένη κατακόρυφη γραμμή η θέση του ρήγματος.



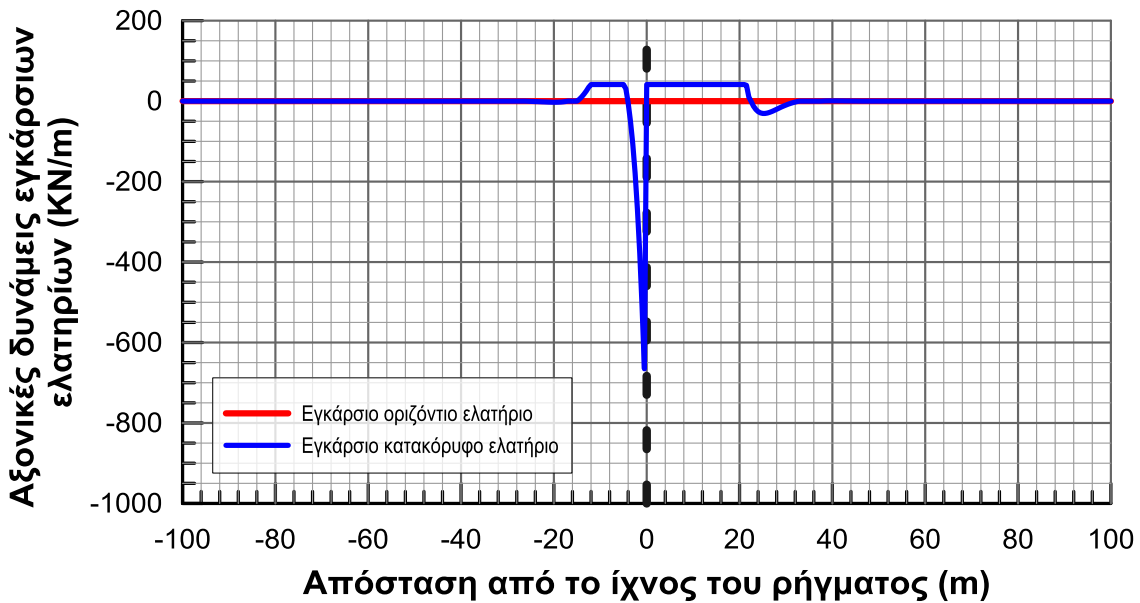
Σχήμα 5.6: Μεταβολή της στροφής του αγωγού κατά μήκος του



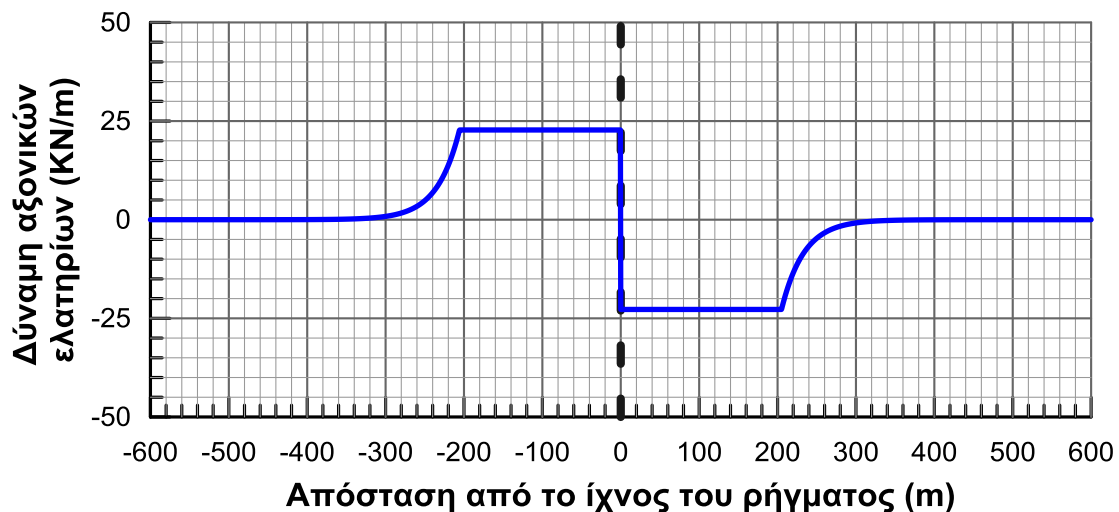
Σχήμα 5.7: Μετατοπίσεις του αγωγού κατά την εγκάρσια κατακόρυφη διεύθυνση

Με βάση το Σχήμα 5.7 το μήκος καμπύλωσης του αγωγού, δηλαδή το μήκος στο οποίο ο αγωγός υφίσταται μεγάλες εγκάρσιες μετατοπίσεις και κατά συνέπεια καμπυλώνεται είναι περίπου 14m και 22m πριν και μετά το ρήγμα αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, στα Σχήματα 5.8 και 5.9 παρουσιάζεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων των εγκάρσιων ελατηρίων (εγκάρσιων οριζόντιων και εγκάρσιων κατακόρυφων) καθώς και των αξονικών ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού αντίστοιχα.



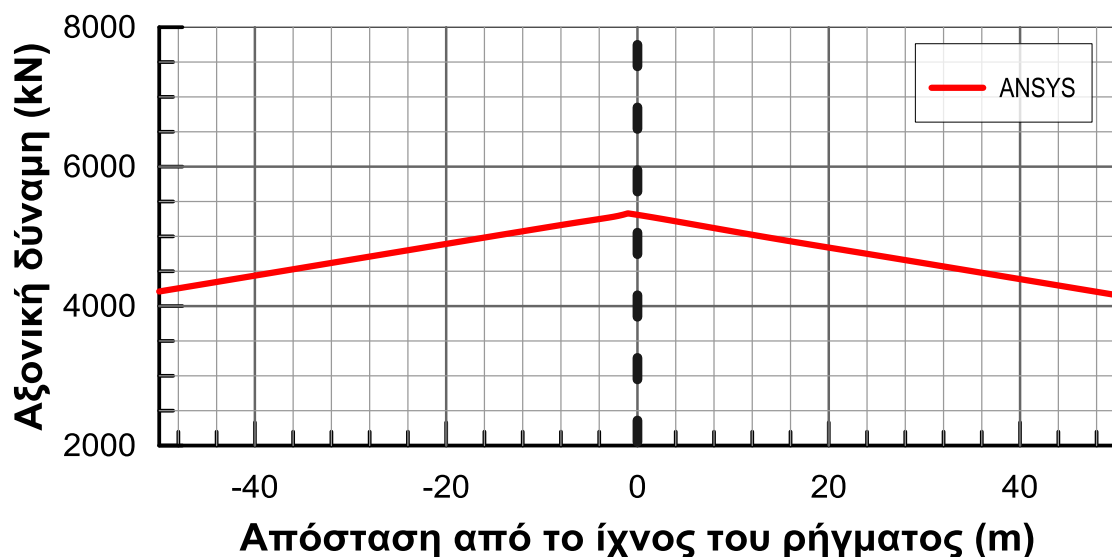
Σχήμα 5.8: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων των εγκάρσιων ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού



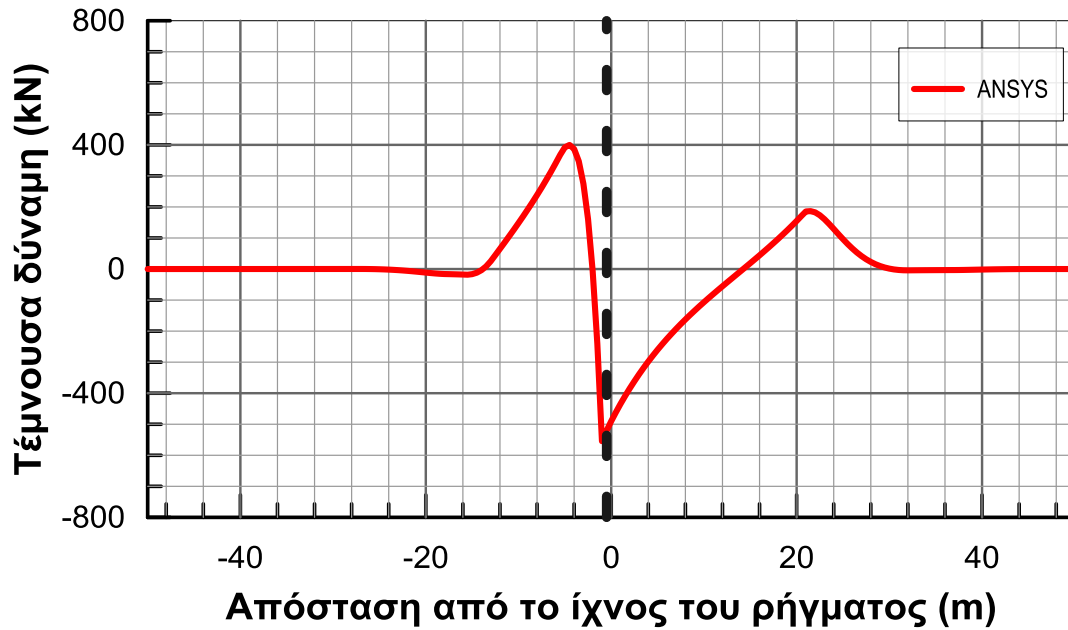
Σχήμα 5.9: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού

Από το Σχήμα 5.9 παρατηρείται ότι το μήκος αγκύρωσης του αγωγού, δηλαδή το μήκος μέσα στο οποίο αναπτύσσονται αξονικές τάσεις λόγω της διάρρηξης του ρήγματος οι οποίες παραλαμβάνονται από την τριβή είναι περίπου 320m εκατέρωθεν του ρήγματος.

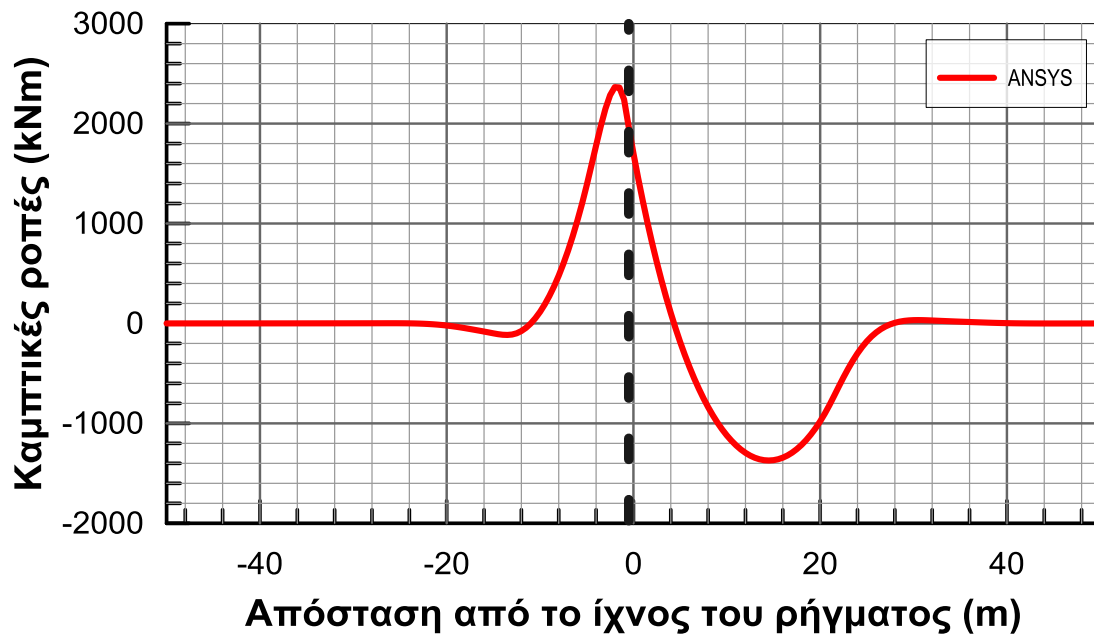
Στα Σχήματα 5.10, 5.11 και 5.12 ακολουθούν τα διαγράμματα των κατανομών των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στον αγωγό. Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 5.10 απεικονίζονται οι αξονικές δυνάμεις κατά μήκος του αγωγού, στο Σχήμα 5.11 οι τέμνουσες δυνάμεις κατά μήκος του αγωγού και τέλος στο Σχήμα 5.12 οι καμπτικές ροπές κατά μήκος του αγωγού. Παρατηρείται ότι η διακύμανση των ροπών στην περιοχή του ίχνους του ρήγματος είναι μεταξύ -1400kNm έως 2400kNm.



Σχήμα 5.10: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

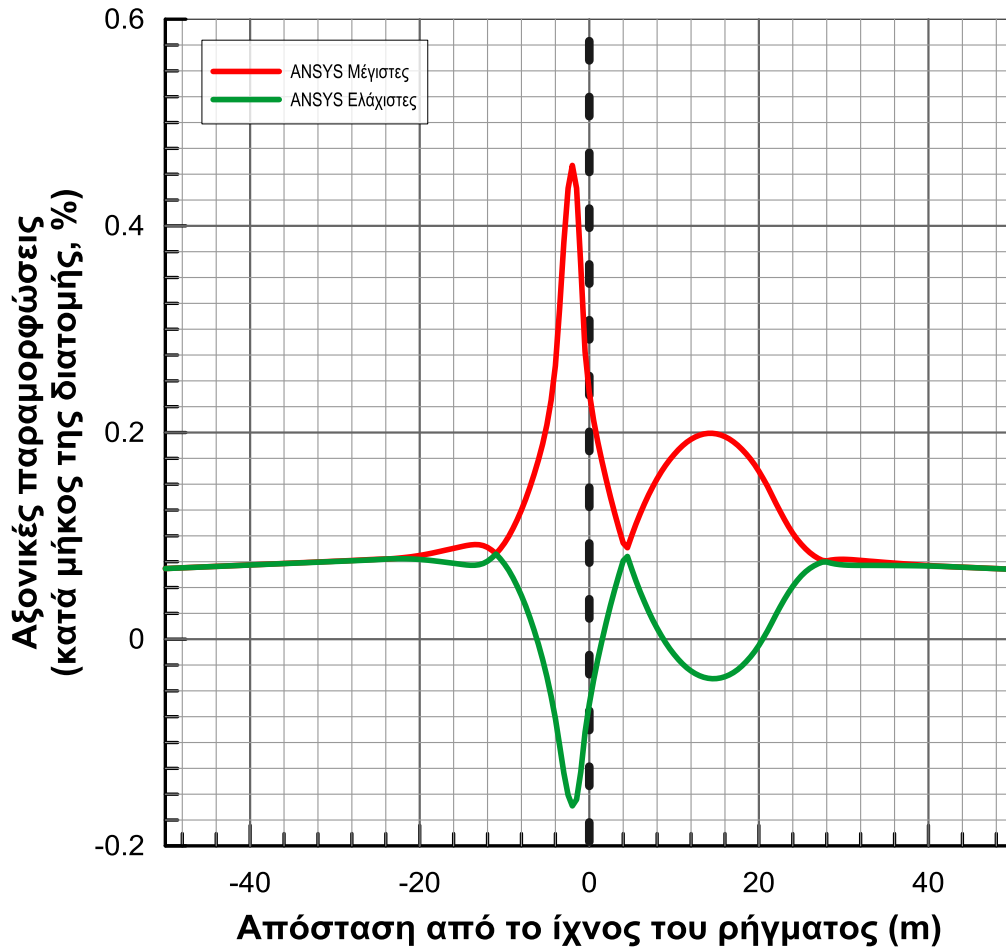


Σχήμα 5.11: Κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

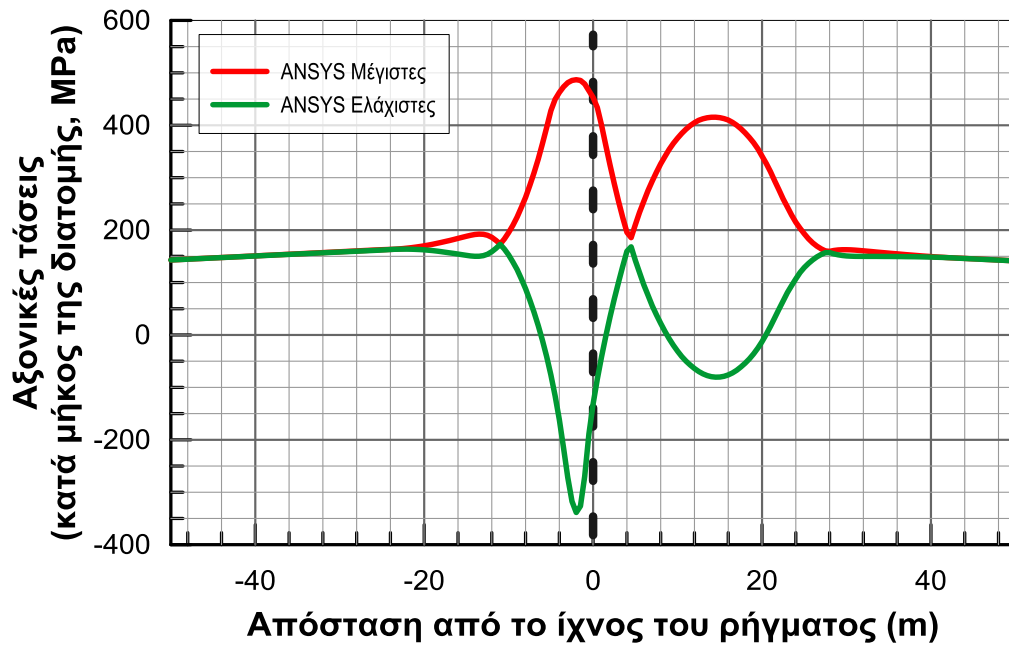


Σχήμα 5.12: Κατανομή των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

Τέλος στα Σχήματα 5.13 και 5.14 απεικονίζεται η κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών παραμορφώσεων και τάσεων αντίστοιχα, που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού. Παρατηρείται ότι οι αξονικές παραμορφώσεις, το πλέον σύνηθες κριτήριο ελέγχου του αγωγού, κυμαίνονται από -0,16% (θλίψη) έως 0,46% (εφελκυσμός).



Σχήμα 5.13: Κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

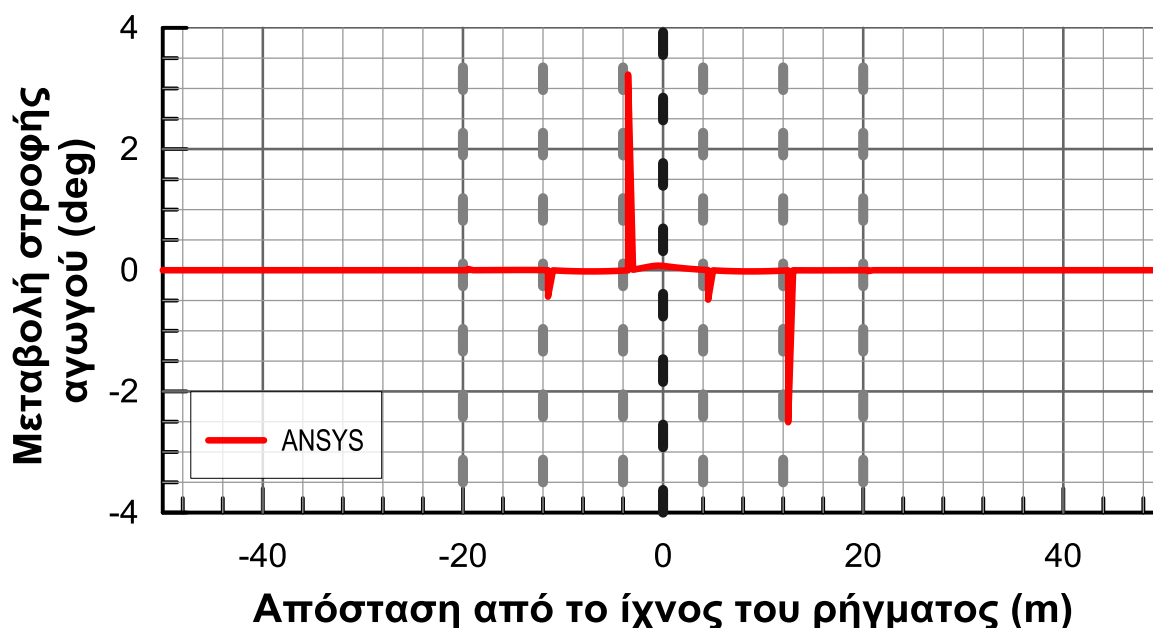


Σχήμα 5.14: Κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

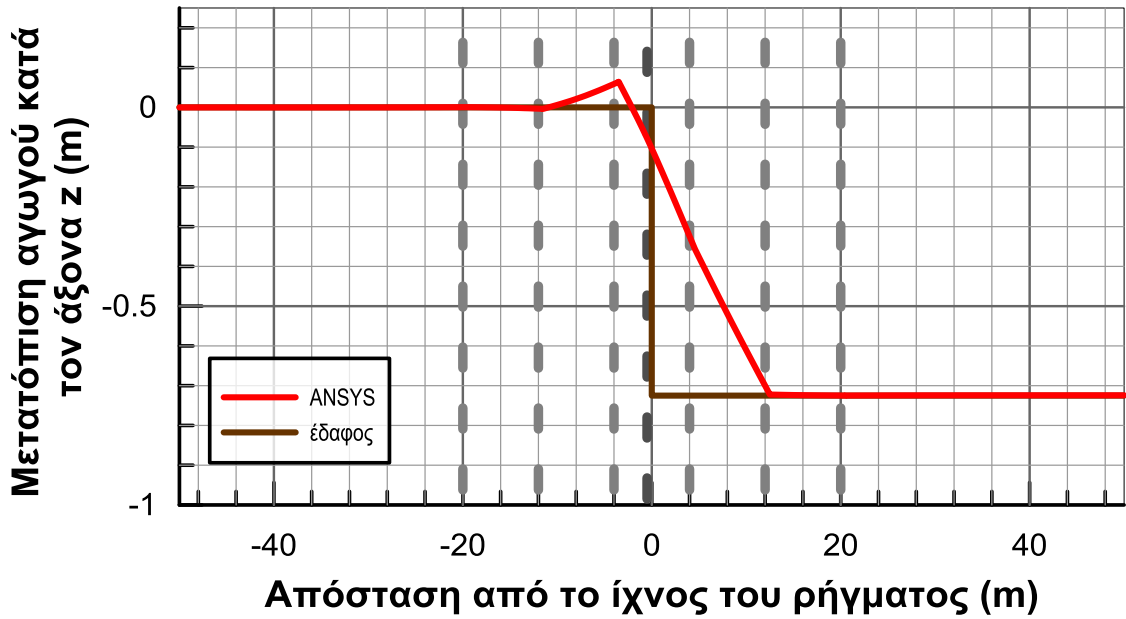
5.5.2 Αριθμητική ανάλυση αγωγού με εύκαμπτους κόμβους

Όπως προαναφέρθηκε, η ανάλυση αυτή αφορά αγωγό με 6 εύκαμπτους κόμβους τοποθετημένους ανά 8m στην περιοχή γύρω από το ρήγμα, το οποίο διασταυρώνεται με τον αγωγό μεταξύ του 3^{ου} και 4^{ου} κόμβου. Η γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια είναι $\psi=75^\circ$ και η συνολική μετακίνηση του ρήγματος ισούται με 0.75m.

Όσον αφορά την παραμορφωμένη εικόνα του αγωγού, στα Σχήματα 5.15 και 5.16 απεικονίζεται η μεταβολή της στροφής του αγωγού και οι μετατοπίσεις του κατά την εγκάρσια κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα. Σε όλα τα σχήματα, με την μαύρη διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται η θέση στην οποία το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό, ενώ οι θέσεις των εύκαμπτων κόμβων σημειώνονται με τις γκρι διακεκομμένες γραμμές.



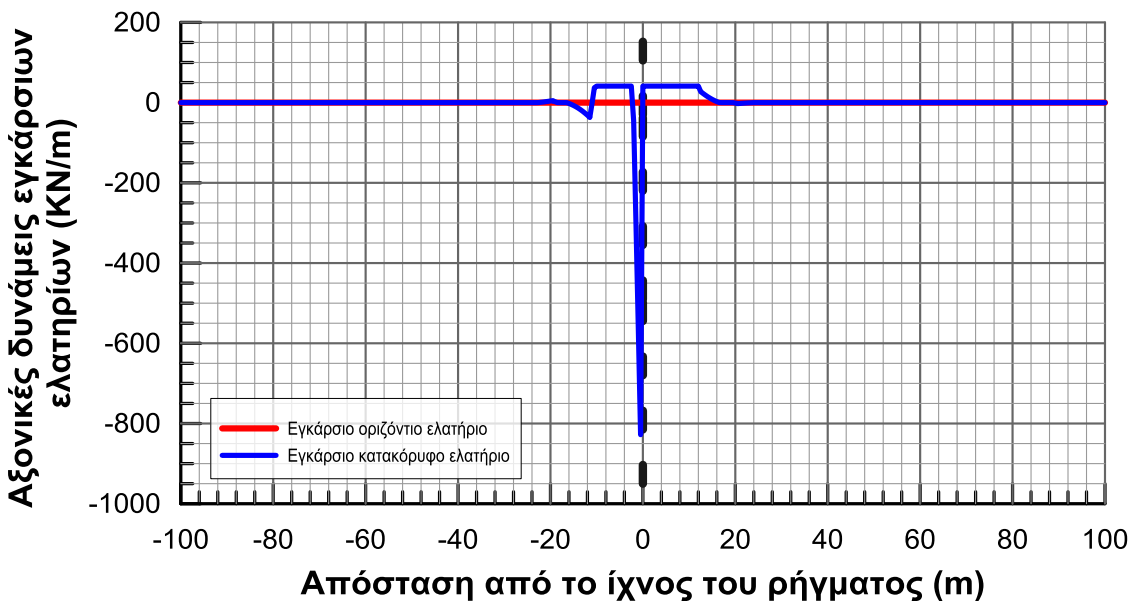
Σχήμα 5.15: Μεταβολή της στροφής του αγωγού κατά μήκος του



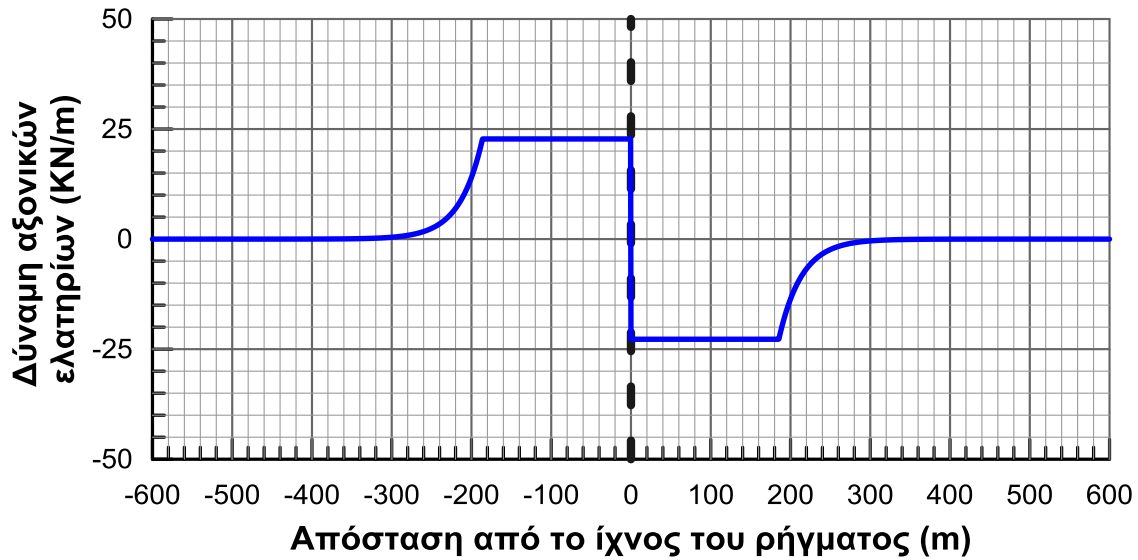
Σχήμα 5.16: Μετατοπίσεις του αγωγού κατά την εγκάρσια κατακόρυφη διεύθυνση

Με βάση το Σχήμα 5.16 το μήκος καμπύλωσης του αγωγού, δηλαδή το μήκος στο οποίο ο αγωγός υφίσταται μεγάλες εγκάρσιες μετατοπίσεις και κατά συνέπεια καμπυλώνεται, είναι περίπου 12m τόσο πριν όσο και μετά το ρήγμα.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων των εγκάρσιων ελατηρίων (εγκάρσιων οριζόντιων και εγκάρσιων κατακόρυφων) καθώς και των αξονικών ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού στα Σχήματα 5.17 και 5.18 αντίστοιχα.



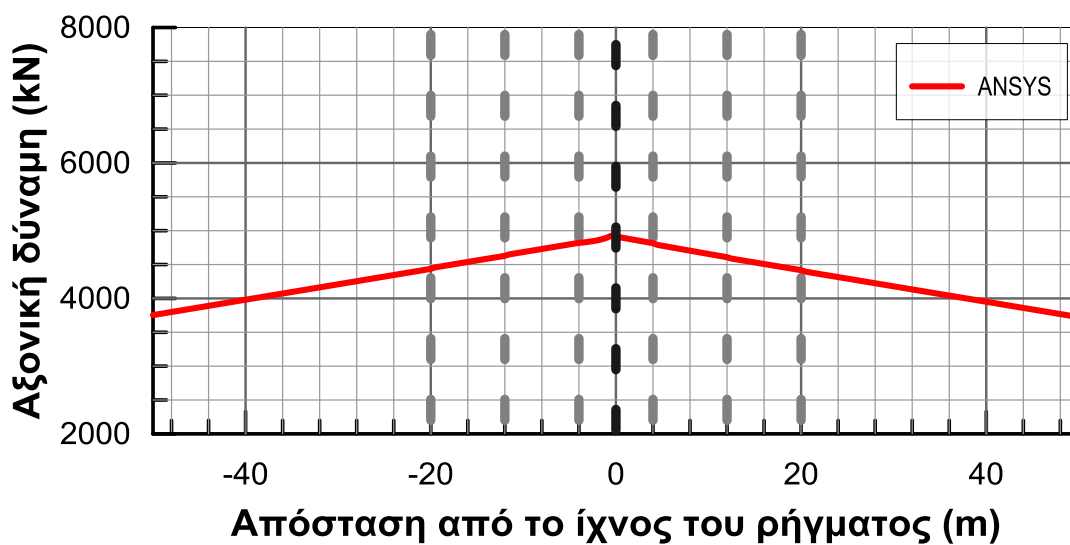
Σχήμα 5.17: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων των εγκάρσιων ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού



Σχήμα 5.18: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού

Από το Σχήμα 5.18 παρατηρείται ότι το μήκος αγκύρωσης του αγωγού, δηλαδή το μήκος μέσα στο οποίο αναπτύσσονται αξονικές τάσεις λόγω της διάρρηξης του ρήγματος οι οποίες παραλαμβάνονται από την τριβή είναι περίπου 320m εκατέρωθεν του ρήγματος.

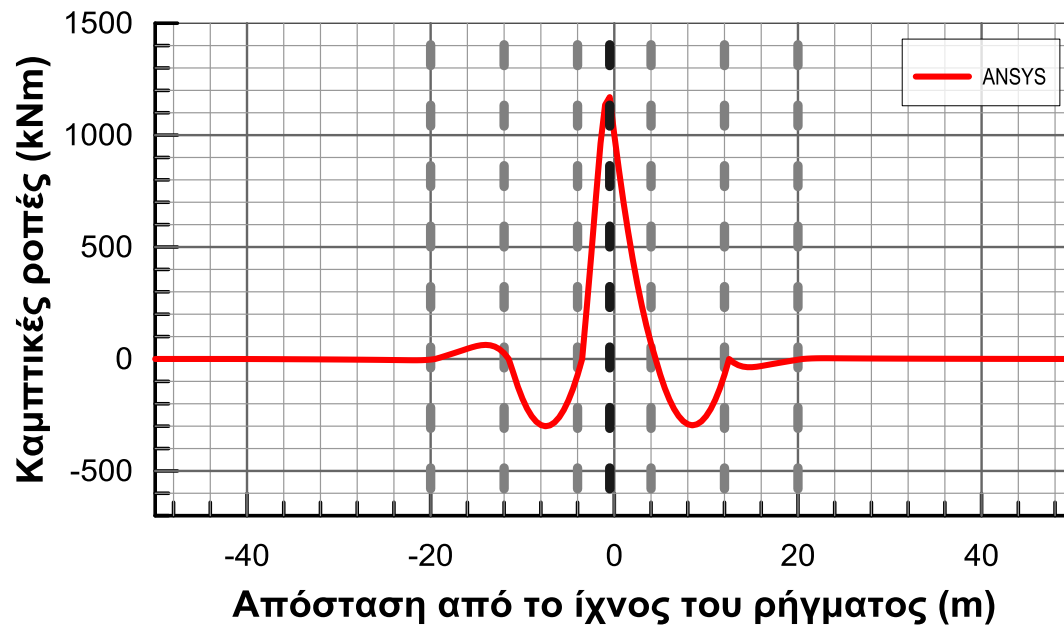
Στα Σχήματα 5.19, 5.20 και 5.21 ακολουθούν τα διαγράμματα των κατανομών των αξονικών δυνάμεων, των τεμνουσών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι το εύρος διακύμανσης των ροπών έχει τώρα μειωθεί σημαντικά σε -300kNm έως 1150kNm (από -1400kNm έως 2400kNm για συνεχή αγωγό).



Σχήμα 5.19: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

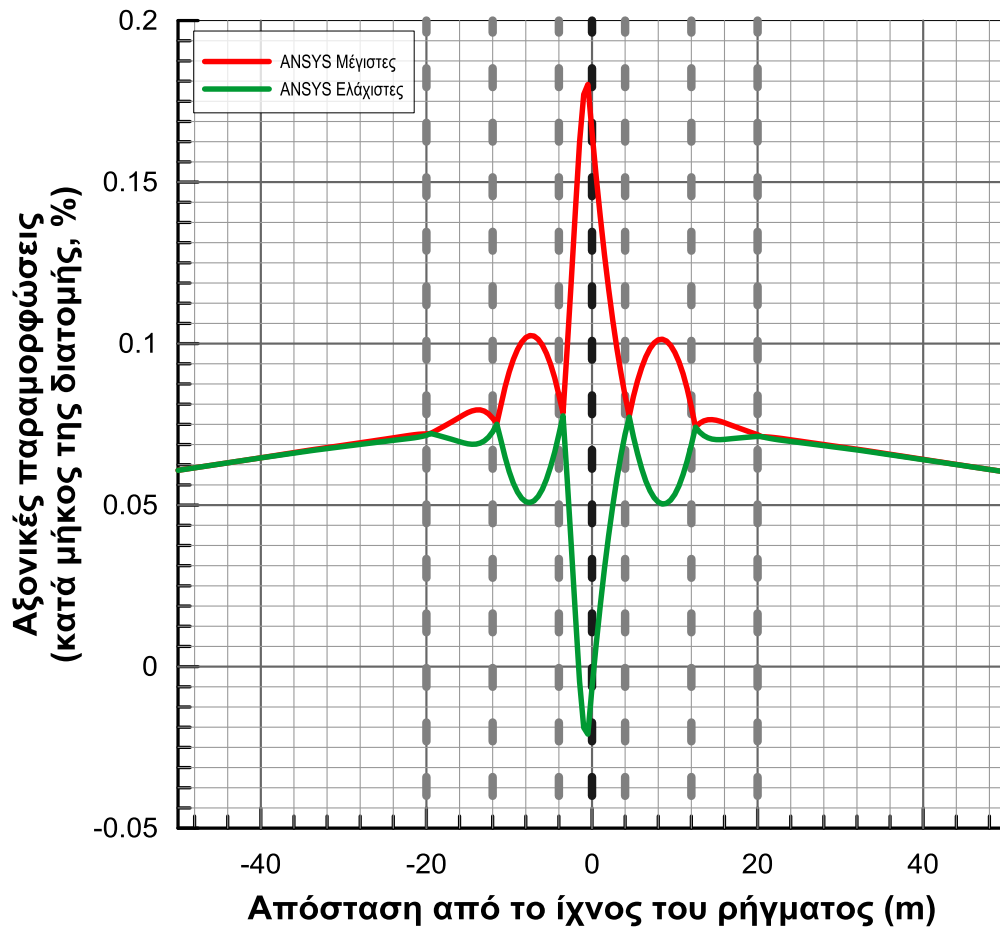


Σχήμα 5.20: Κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

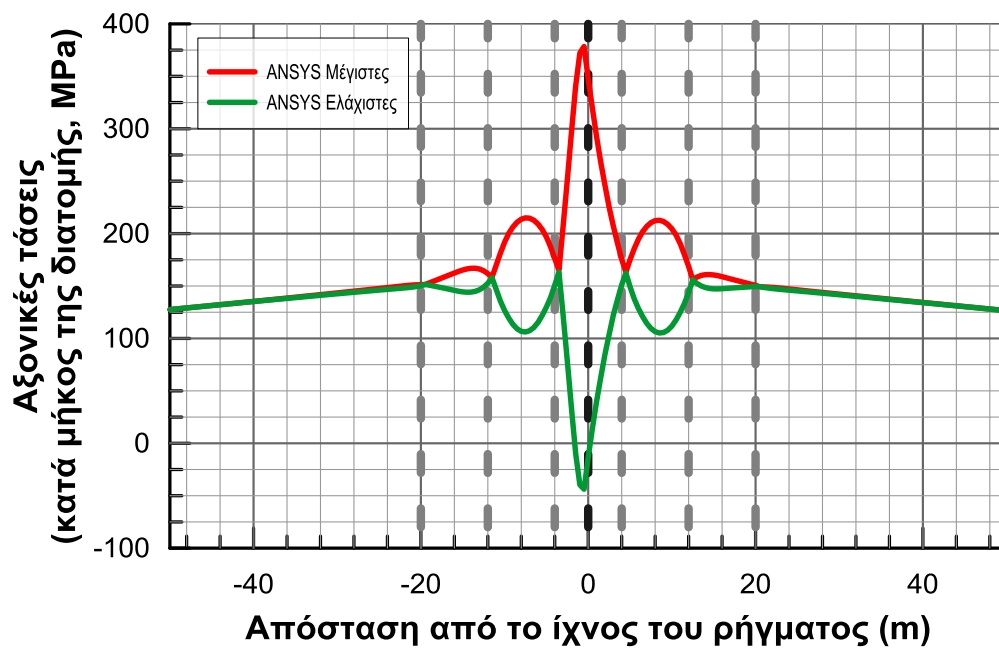


Σχήμα 5.21: Κατανομή των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

Επιπρόσθετα στα Σχήματα 5.22 και 5.23 απεικονίζεται η κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών παραμορφώσεων και τάσεων αντίστοιχα, που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού. Παρατηρείται ότι οι αξονικές παραμορφώσεις έχουν μειωθεί δραστικά σε $-0,02\%$ (θλίψη) έως $0,18\%$ (εφελκυσμός) (από $-0,16\%$ έως $0,46\%$ για συνεχείς αγωγούς).



Σχήμα 5.22: Κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού



Σχήμα 5.23: Κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

6

Σύγκριση αναλυτικών λύσεων με αριθμητικές αναλύσεις

6.1 Παρουσίαση αριθμητικών αναλύσεων

Για την επαλήθευση της ακρίβειας της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας για κανονικά ρήγματα που παρουσιάστηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 4 και για την εκτίμηση του εύρους εφαρμογής της, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της με αποτελέσματα από τριάντα εννιά (39) αριθμητικές αναλύσεις. Το σύνολο των αναλύσεων αφορούν αγωγό διαμέτρου 0.762m (30") και πάχους τοιχώματος 12.5mm, με έξι εύκαμπτους κόμβους και πραγματοποιήθηκαν με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Οι αναλύσεις χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες ανάλογα με την απόσταση των εύκαμπτων κόμβων μεταξύ τους (6m, 8m και 12m). Στην πρώτη ομάδα αναλύσεων (6m) πραγματοποιήθηκαν τρεις αναλύσεις για όλους τους συνδυασμούς των τιμών της γωνίας του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi=60^\circ$, 75° και 90° και του λόγου μετακίνησης του ρήγματος προς διάμετρο του αγωγού $D_f/D=2$ (συνολική μετακίνηση ρήγματος ίση με 1.5m) και δύο αναλύσεις για $\psi=75^\circ$ και $D_f/D=1$ και 0.5 (συνολική μετακίνηση ρήγματος ίση με 0.75m και 0.375m). Στη δεύτερη ομάδα αναλύσεων (8m) πραγματοποιήθηκαν εννιά αναλύσεις για όλους τους συνδυασμούς των τιμών της γωνίας $\psi=60^\circ$, 75° και 90° και του λόγου $D_f/D=0.5$, 1 και 2 (συνολική μετακίνηση ρήγματος ίση με 0.375m, 0.75m και 1.5m). Τέλος στην τρίτη ομάδα αναλύσεων (12m) πραγματοποιήθηκαν έξι αναλύσεις, εκ των οποίων οι τρεις είναι αντίστοιχες των τριών πρώτων αναλύσεων της πρώτης ομάδας, η τέταρτη έγινε για το συνδυασμό της γωνίας $\psi=75^\circ$ και του λόγου $D_f/D=1$ και η πέμπτη και έκτη για γωνίες $\psi=90^\circ$ και $\psi=75^\circ$ αντίστοιχα και $D_f/D=0.5$.

Για όλους τους συνδυασμούς θεωρήθηκαν δύο ακραίες περιπτώσεις: το ρήγμα να διασταυρώνεται με τον αγωγό στη μέση μεταξύ του 3^{ου} και του 4^{ου} εύκαμπτου κόμβου («μέση») ή ακριβώς μετά τον 3^ο κόμβο («άκρη»).

Τα χαρακτηριστικά και οι τιμές των παραμέτρων της κάθε ανάλυσης συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 6.1). Να σημειωθεί ότι δεν ήταν εφικτή η αναλυτική επίλυση για την ανάλυση 29 λόγω της πολύ μεγάλης απόστασης μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων.

Πίνακας 6.1: Βασικά χαρακτηριστικά των εκτελεσθέντων παραμετρικών.

Αριθμός Ανάλυσης	Απόσταση κόμβων (m)	Γωνία ψ ($^{\circ}$)	Θέση διασταύρωσης	Μετακίνηση ρήγματος (m)
1	6	60	άκρη	1,5
2			μέση	
3		75	άκρη	
4			μέση	
5		90	άκρη	
6			μέση	
7		75	άκρη	0,75
8			μέση	
9		75	άκρη	0,375
10			μέση	
11	8	60	άκρη	1,5
12			μέση	
13		75	άκρη	
14			μέση	
15		90	άκρη	
16			μέση	
17		60	άκρη	0,75
18			μέση	
19		75	άκρη	
20			μέση	
21		90	άκρη	
22			μέση	
23		60	άκρη	0,375
24			μέση	
25	75	άκρη		
26		μέση		
27	90	άκρη		
28		μέση		
29	12	60	άκρη	1,5
30			μέση	
31		75	άκρη	
32			μέση	
33		90	άκρη	
34			μέση	
35		75	άκρη	0,75
36			μέση	
37		90	άκρη	0,375
38			μέση	
39		75	μέση	0,375

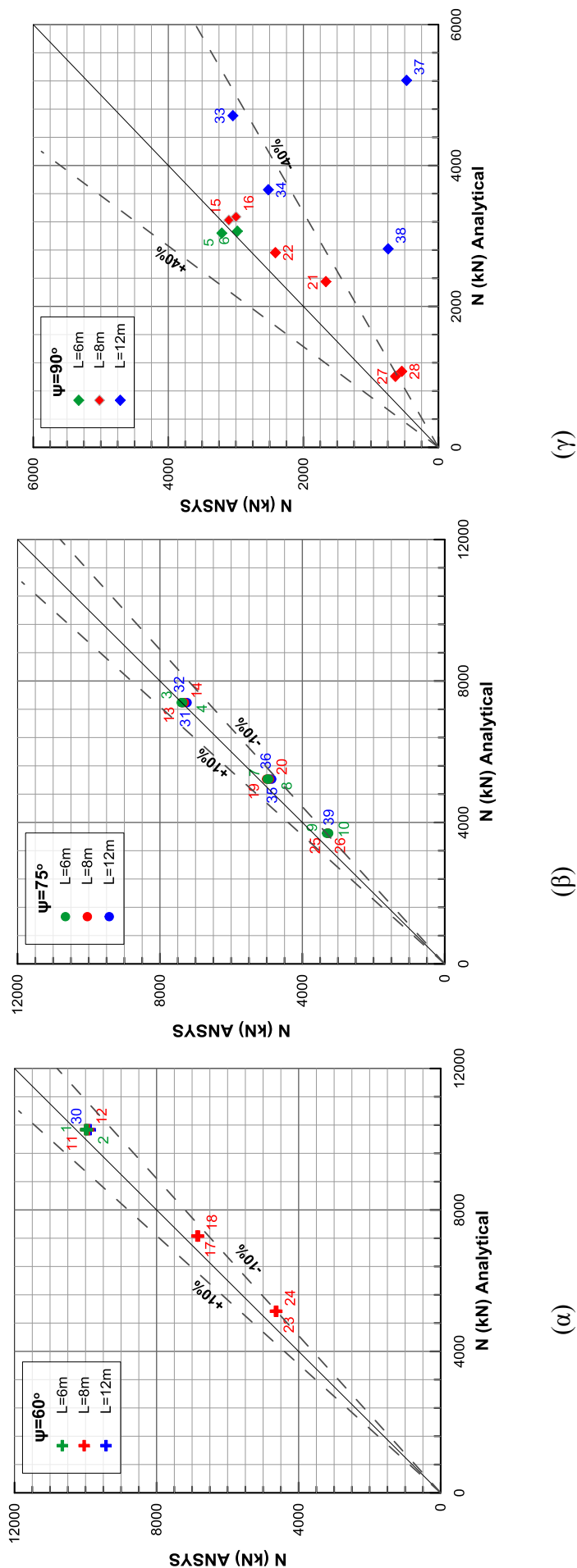
6.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών και αριθμητικών αναλύσεων

Τα λεπτομερή αποτελέσματα αριθμητικών και αναλυτικών λύσεων παρουσιάζονται εκτενώς στο Παράρτημα Β. Για κάθε μία ανάλυση του Πίνακα 6.1 παρουσιάζεται η μεταβολή κατά μήκος του αγωγού των ακόλουθων μεγεθών:

- της αναπτυσσόμενης αξονικής, τέμνουσας δύναμης και καμπτικής ροπής
- της μετακίνησης και στροφής του αγωγού
- των αναπτυσσόμενων μέγιστων και ελάχιστων αξονικών παραμορφώσεων
- των αναπτυσσόμενων μέγιστων και ελάχιστων αξονικών τάσεων.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας με τα αποτελέσματα των παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» για τα βασικά μεγέθη που ενδιαφέρουν τον σχεδιασμό ενός αγωγού, δηλαδή για τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη, τις αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις καθώς και τη μέγιστη στροφή στους εύκαμπτους κόμβους. Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει ο λόγος των μέγιστων τιμών των μεγεθών αυτών όπως αυτές προέκυψαν από τις αριθμητικές και αναλυτικές επιλύσεις. Κάθε σημείο των διαγραμμάτων συνοδεύεται από έναν αριθμό, ο οποίος αντιστοιχεί στον αριθμό της ανάλυσης (Πίνακας 6.1).

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» των μέγιστων τιμών της αξονικής δύναμης, όπως αυτή προέκυψε από τις αριθμητικές και αναλυτικές επιλύσεις για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια ψ ίση με (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° . Γενικά παρατηρείται ότι ο μηχανισμός του φαινομένου προσεγγίζεται αρκετά ικανοποιητικά από την προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία, καθώς για την πλειοψηφία των παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων οι μέγιστες τιμές της αξονικής δύναμης που προέκυψαν συγκλίνουν σε ικανοποιητικό βαθμό στις αντίστοιχες τιμές της αναλυτικής μεθοδολογίας, ενώ το όποιο λάθος υπολογίζεται, οφείλεται στην εκτίμηση της αξονικής παραμόρφωσης λόγω της στροφής του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα για όλες τις γωνίες διασταύρωσης το απόλυτο σφάλμα στην εκτίμηση των αξονικών δυνάμεων είναι περίπου ίδιο (μέγιστο σφάλμα $\pm 690\text{kN}$), με αποτέλεσμα, για τις γωνίες $\psi=60^\circ$ και 75° (Σχήματα 6.1α, 6.1β) το σχετικό σφάλμα

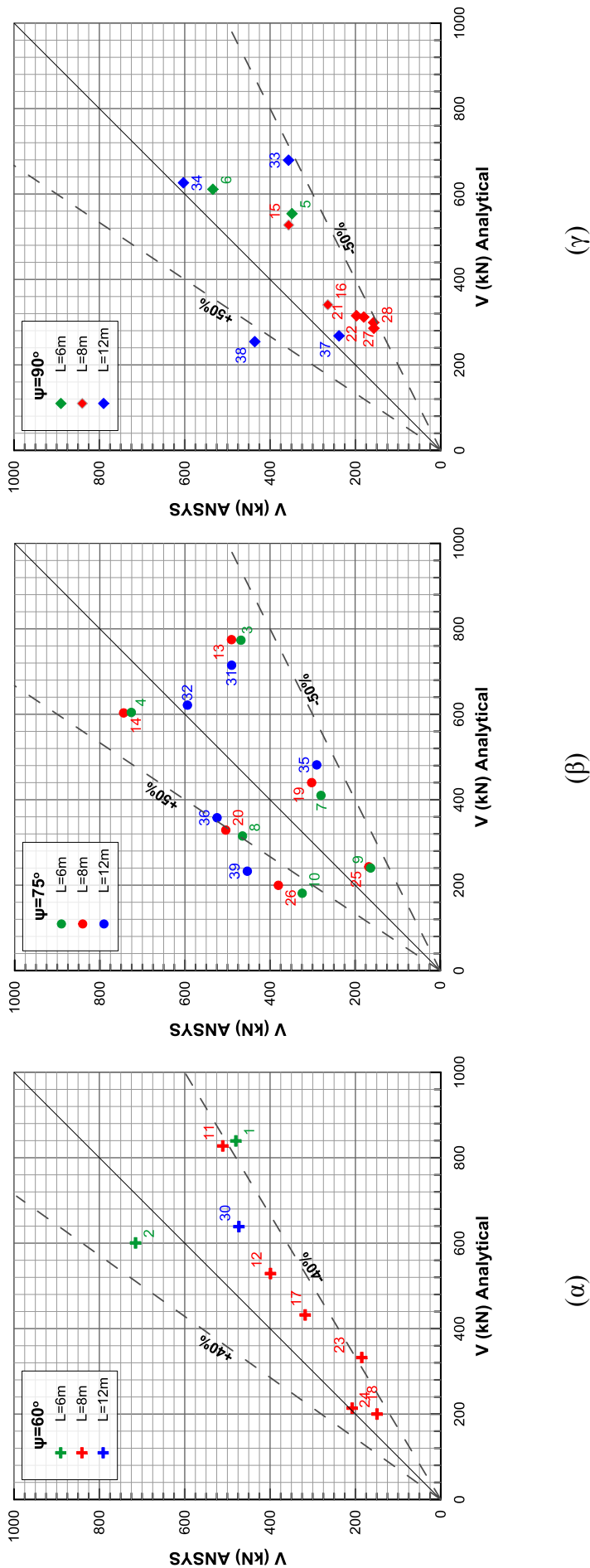


Σχήμα 6.1: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της αξονικής δύναμης για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi=$ (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° .

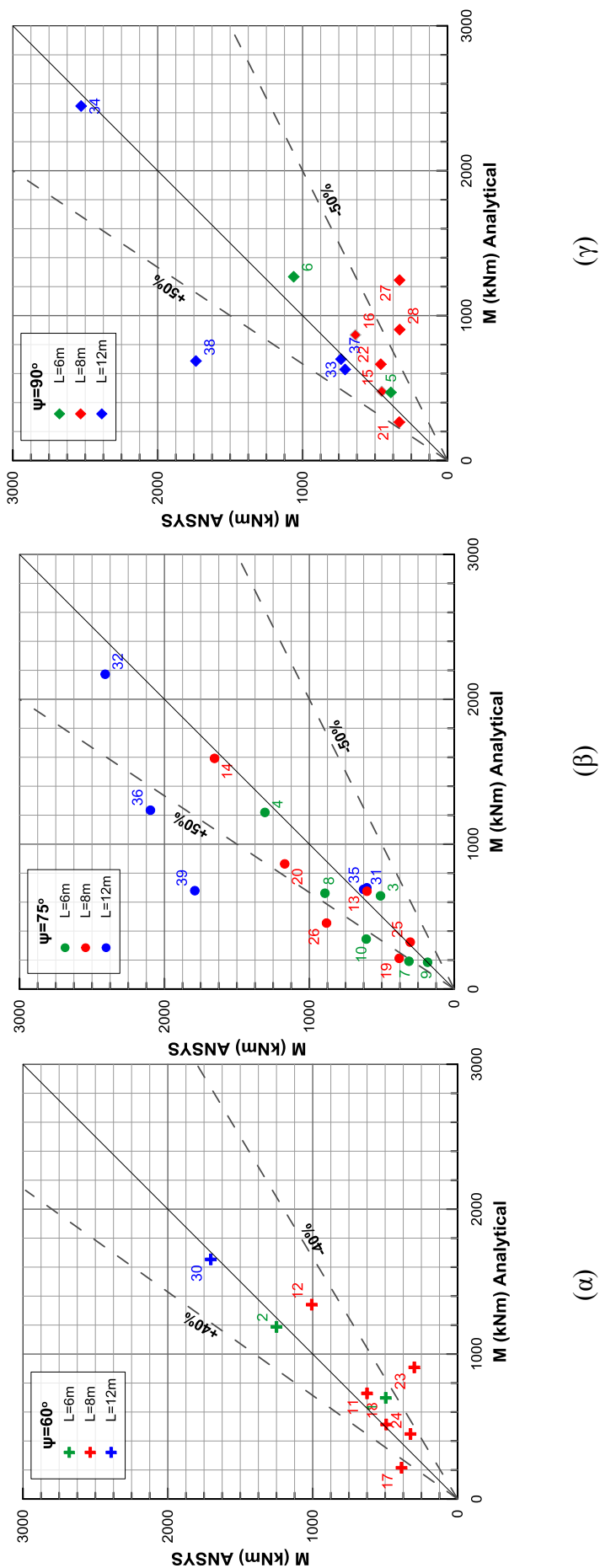
κυμαίνεται σε ποσοστό $\pm 10\%$, και $\pm 40\%$ στην περίπτωση των μικρότερων αξονικών δυνάμεων της γωνίας $\psi=90^\circ$ (Σχήμα 6.1γ), λόγω της μηδενικής κατά μήκος συνιστώσας Δx της μετακίνησης του ρήγματος. Τέλος όσον αφορά τις αναλύσεις 37 και 38, η μικρή επιβαλλόμενη μετακίνηση από το ρήγμα (0.375m) σε συνδυασμό με τη μεγάλη απόσταση μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων (12m) συντελούν στη διαμόρφωση ενός παραμορφωμένου φορέα, πολύ πιο απλού από αυτόν που υπολογίζει η αναλυτική μεθοδολογία (έχουμε στροφή μόνο των δύο πλησιέστερων στο ίχνος κόμβων, και όχι τεσσάρων κόμβων όπως δέχεται το αναλυτικό προσομοίωμα), με αποτέλεσμα η αναλυτική μεθοδολογία να μην εκτιμά ικανοποιητικά την τιμή της μέγιστης αξονικής δύναμης (βλ. και την αναλυτική παράθεση αποτελεσμάτων στο Παράρτημα Β).

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι η ακριβής εκτίμηση της αξονικής δύναμης είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αξιοπιστία της μεθοδολογίας, καθώς επηρεάζει άμεσα τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό και κατά συνέπεια μία μη ακριβής εκτίμησή της μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή υπερέτιμηση ή υποτίμηση των παραμορφωσιακών μεγεθών.

Στα Σχήματα 6.2 και 6.3 ακολουθούν τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» της τέμνουσας δύναμης και της καμπτικής ροπής αντίστοιχα για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια ψ ίση με (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° . Όσον αφορά τόσο την τέμνουσα δύναμη όσο και την καμπτική ροπή, η αναλυτική μεθοδολογία προσεγγίζει τις αριθμητικές επιλύσεις κατά έως $\pm 40\%$ για $\psi=60^\circ$ και έως $\pm 50\%$ για $\psi=75^\circ$ και 90° , αποκλίσεις οι οποίες φαίνεται να ισχύουν για την πλειοψηφία των περιπτώσεων που διερευνήθηκαν. Κάποιες αναλύσεις φαίνεται να παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση (αναλύσεις 36 – κόμβοι ανά 12m, $\psi=75^\circ$, ρήγμα στη μέση, $d_f=0.75m$ –, 38 – κόμβοι ανά 12m, $\psi=90^\circ$, ρήγμα στη μέση, $d_f=0.375m$ –, 39 – κόμβοι ανά 12m, $\psi=75^\circ$, ρήγμα στη μέση, $d_f=0.375m$ –, 26 – κόμβοι ανά 8m, $\psi=75^\circ$, ρήγμα στη μέση, $d_f=0.375m$ – και 10 – κόμβοι ανά 6m, $\psi=75^\circ$, ρήγμα στη μέση, $d_f=0.375m$ –), γεγονός που οφείλεται στην αιτία που προαναφέρθηκε πρωτίτερα για την ανάλυση 37, δηλαδή ότι η μετακίνηση του ρήγματος που επιβάλλεται στον αγωγό είναι αρκετά μικρή, με αποτέλεσμα ο πραγματικός παραμορφωμένος φορέας να απέχει από αυτόν που εκτιμήθηκε αναλυτικά. Η συγκεκριμένη αδυναμία της αναλυτικής μεθοδολογίας δεν



Σχήμα 6.2: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της τέμνουσας δύναμης για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια ψ= (α) 60°, (β) 75° και (γ) 90°.



Σχήμα 6.3: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της καμπτικής ροπής για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi=$ (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° .

είναι σημαντική, εφόσον η χρήση εύκαμπτων κόμβων προβλέπεται μόνο για μεγάλες μετακινήσεις του ρήγματος.

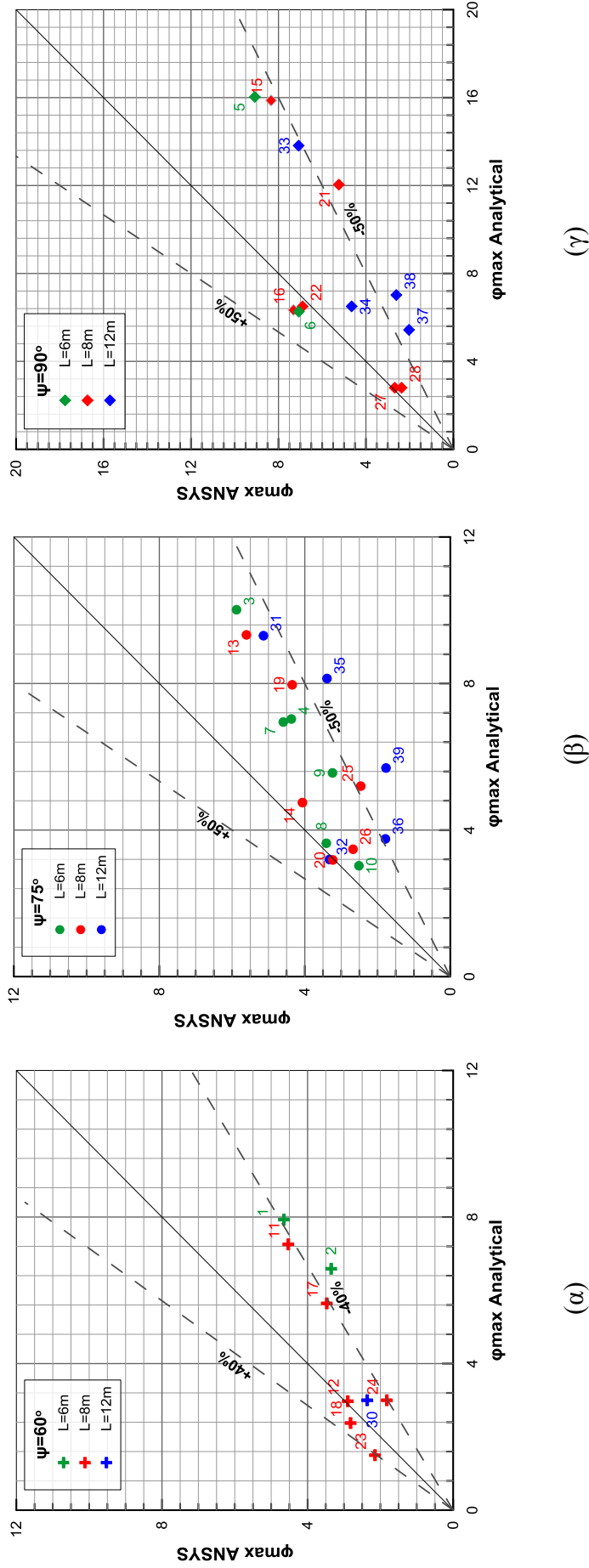
Στη συνέχεια στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» της σχετικής στροφής, όπως αυτή προέκυψε από τις αριθμητικές και αναλυτικές επιλύσεις για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια ψ ίση με (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° . Έτσι για $\psi=60^\circ$ η αναλυτική μεθοδολογία προσεγγίζει τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων κατά έως $\pm 40\%$, ενώ για τις γωνίες $\psi=75^\circ$ και $\psi=90^\circ$ και μεν η απόκλιση γίνεται μεγαλύτερη ($\pm 50\%$), ωστόσο για την πλειοψηφία των περιπτώσεων δίδονται ελαφρώς συντηρητικές εκτιμήσεις.

Ακολουθούν τα Σχήματα 6.5 και 6.6 στα οποία παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» των μέγιστων τιμών των αξονικών παραμορφώσεων και τάσεων αντίστοιχα, που αναπτύσσονται στον αγωγό για γωνία ψ ίση με (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° .

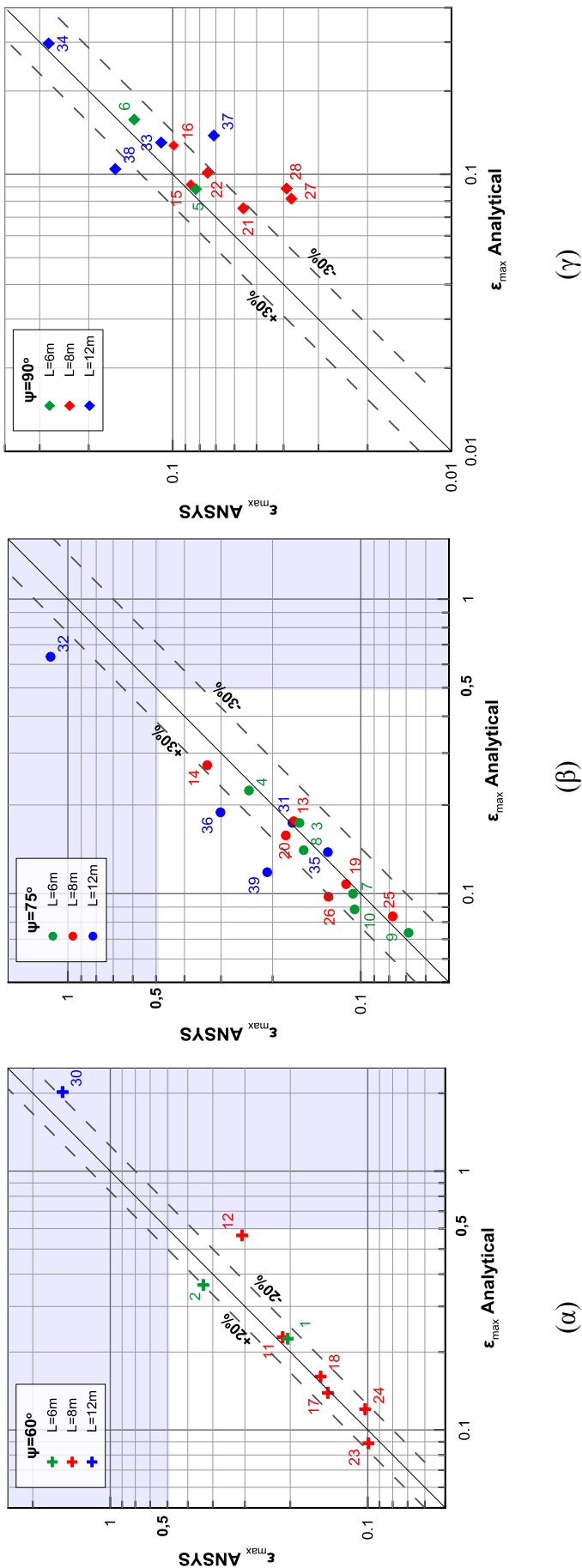
Όσον αφορά τις μέγιστες αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις (Σχήμα 6.5) η αναλυτική μεθοδολογία παρέχει αποτελέσματα για την πλειοψηφία των αναλύσεων με απόκλιση έως $\pm 20\%$ για γωνία $\psi = 60^\circ$, ενώ έως $\pm 30\%$ για $\psi=75^\circ$ και 90° . Ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις, με χαρακτηριστικότερη την περίπτωση της ανάλυσης 32 (κόμβοι ανά 12m, $\psi=75^\circ$, ρήγμα στη μέση, $d_f=1.50\text{m}$), ενώ η αναλυτική μεθοδολογία προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια την τιμή της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης ($+2\%$), υποτιμά κατά 44% την τιμή της μέγιστης αναπτυσσόμενης αξονικής παραμόρφωσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι, λόγω της σχετικά μεγάλης απόστασης μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων και κατά συνέπεια της σημαντικά μειωμένης ευεργετικής επιρροής τους στα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη, ο αγωγός βρίσκεται στην πλαστική περιοχή (Σχήμα 6.6β) και κατά συνέπεια μικρές διαφοροποιήσεις στην εκτίμηση των εντατικών μεγεθών μεταξύ των δύο μεθοδολογιών (αριθμητική - αναλυτική) να έχουν ως επακόλουθο μεγάλες διαφοροποιήσεις στις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις (βλ. και τα σχετικά διαγράμματα της περίπτωσης 32 που παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β). Πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω του πεπλεγμένου χαρακτήρα των αναλυτικών σχέσεων (με τη χρήση του τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας E_{cur}), στις περιπτώσεις που βρισκόμαστε εντός της πλαστικής περιοχής μία μικρή υποτίμηση στις αξονικές δυνάμεις οδηγεί σε ελαφριά υποτίμηση του υπολογισμού των τάσεων, αλλά σημαντική υποτίμηση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων και υπερέτιμηση των εντατικών μεγεθών ροπής και τέμνουσας.

Αντίστοιχα μικρές υπερτιμήσεις στις αξονικές οδηγούν σε υπερτίμηση των τάσεων-παραμορφώσεων και υποτίμηση των ροπών-τεμνουσών. Τέλος για $\psi=90^\circ$ παρατηρείται στο Σχήμα 6.5γ ότι οι μέγιστες αξονικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού δεν υπερβαίνουν το όριο αστοχίας του και για την πλειοψηφία των περιπτώσεων η αναλυτική μεθοδολογία τις εκτιμά συντηρητικά. Ωστόσο για την ανάλυση 38 (κόμβοι ανά 12m, $\psi=90^\circ$, ρήγμα στη μέση, $d_f=0.375m$) η αναλυτική μεθοδολογία υποτιμά σημαντικά κατά ποσοστό μεγαλύτερο από 55% την τιμή της μέγιστης αναπτυσσόμενης αξονικής παραμόρφωσης, γεγονός το οποίο οφείλεται, όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, στη μη ακριβή προσέγγιση του παραμορφωμένου φορέα λόγω της πολύ μικρής επιβαλλόμενης μετακίνησης.

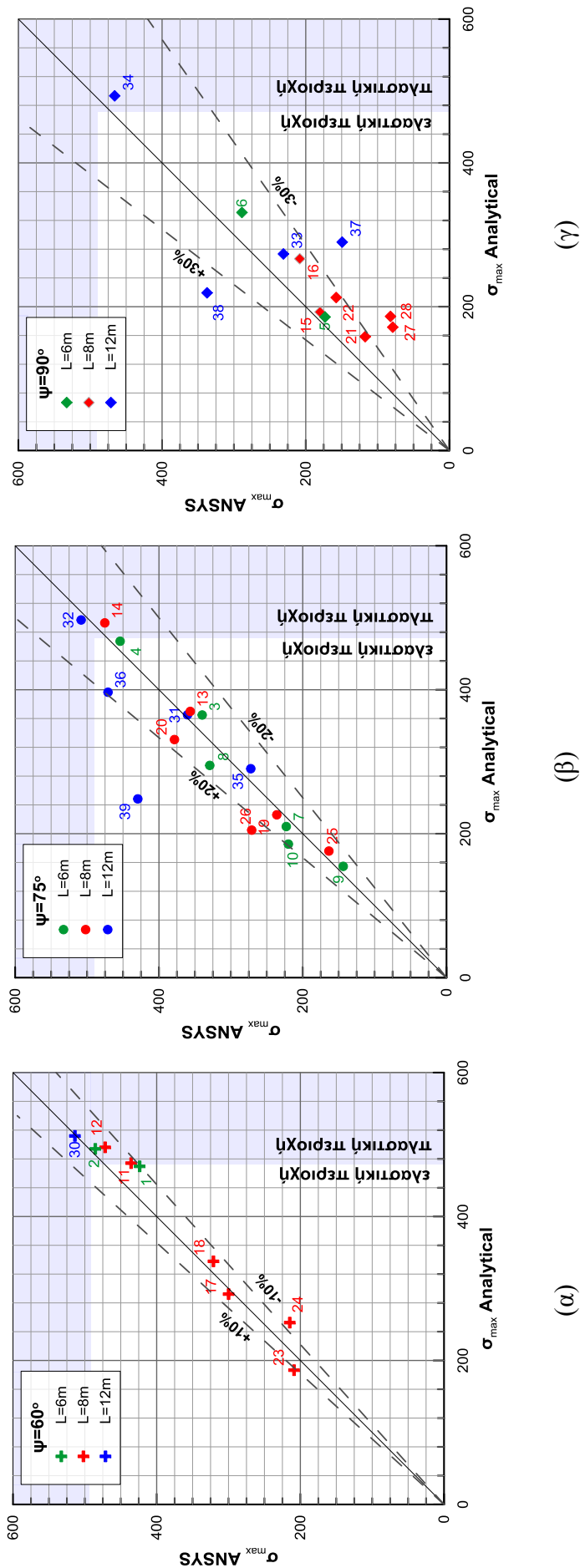
Επίσης όσον αφορά τις μέγιστες αναπτυσσόμενες αξονικές τάσεις (Σχήμα 6.6) οι τιμές τους προσεγγίζονται αρκετά ικανοποιητικά από την προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία με απόκλιση έως $\pm 10\%$ για $\psi=60^\circ$ και έως $\pm 20\%$ για $\psi=75^\circ$ για την πλειοψηφία των αναλύσεων. Στην περίπτωση που η γωνία ψ είναι ίση με 90° (Σχήμα 6.6γ), η απόκλιση των αποτελεσμάτων γίνεται μεγαλύτερη ($\pm 30\%$), γεγονός το οποίο οφείλεται στην μεγαλύτερη απόκλιση που υπάρχει στον υπολογισμό της αξονικής δύναμης στην αντίστοιχη περίπτωση (Σχήμα.6.1γ). Επίσης παρατηρείται ότι για $\psi=90^\circ$, όμοια με τις μέγιστες τιμές των αξονικών παραμορφώσεων (Σχήμα 6.5γ), η πλειοψηφία των αποτελεσμάτων για τις μέγιστες αξονικές τάσεις εκτιμάται συντηρητικά.



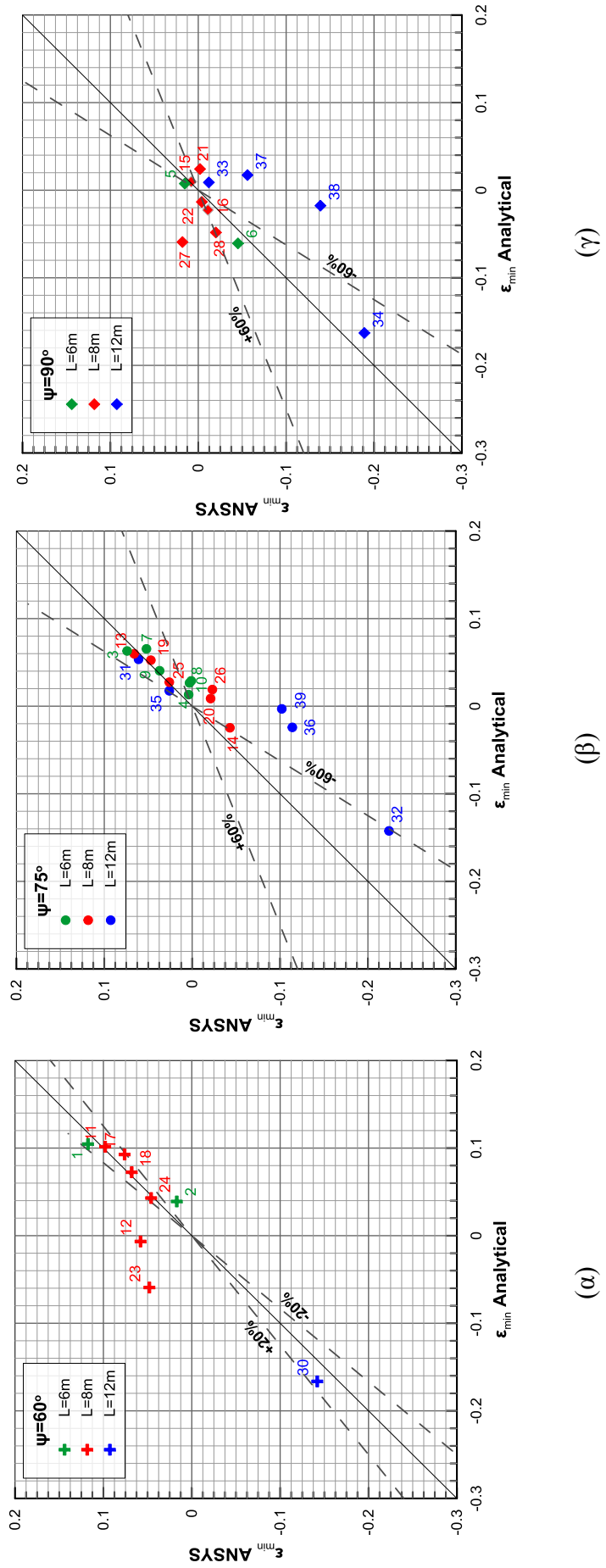
Σχήμα 6.4: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της σχετικής στροφής στον αγωγό για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi=$ (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° .



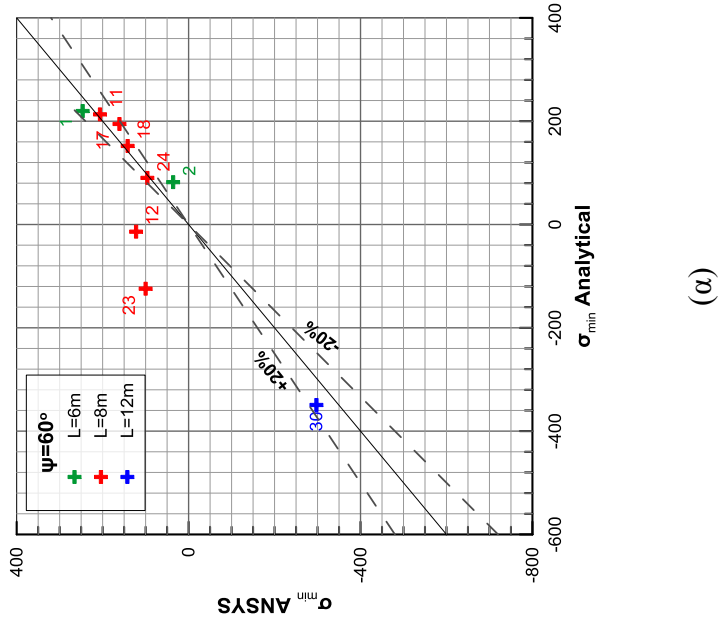
Σχήμα 6.5: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές των αξονικών παραμορφώσεων του αγωγού για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi=$ (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° .



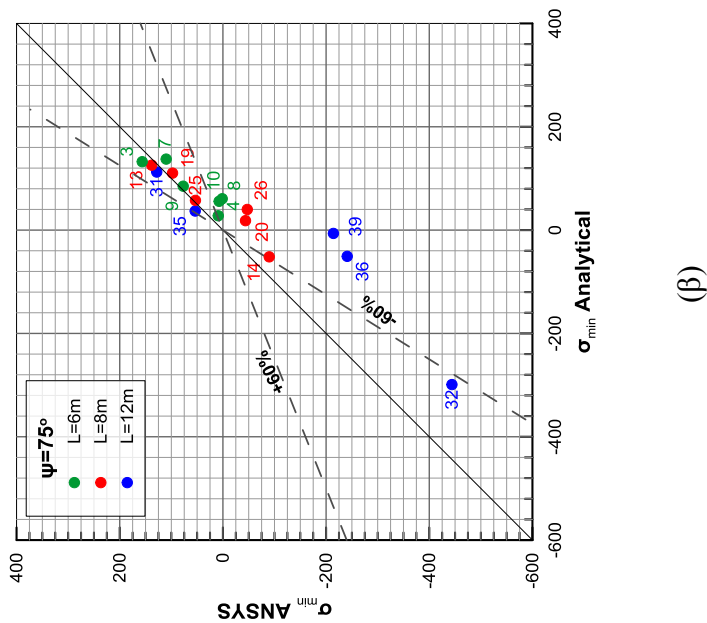
Σχήμα 6.6: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές των αξονικών τάσεων του εσωγού για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για γωνία του επιπέδου του ρηγμάτος με την οριζόντια $\psi = (\alpha) 60^\circ$, $(\beta) 75^\circ$ και $(\gamma) 90^\circ$.



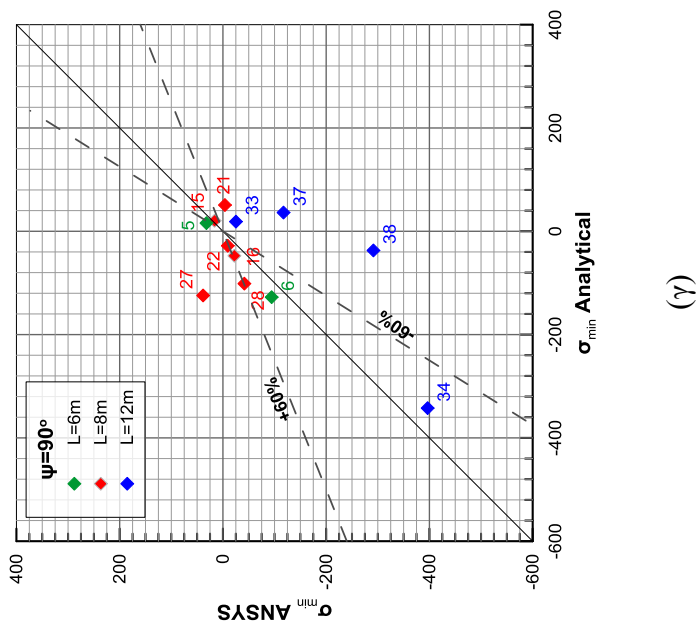
Σχήμα 6.7: Σύγκριση 1-1 για τις ελάχιστες τιμές των αξονικών παραμορφώσεων του αγωγού για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi=$ (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° .



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 6.8: Σύγκριση 1-1 για τις ελάχιστες τιμές των αξονικών τάσεων του αγωγού για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi=$ (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° .

Τέλος όσον αφορά τις ελάχιστες αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις (Σχήμα 6.7) και τις ελάχιστες αναπτυσσόμενες τάσεις (Σχήματα 6.8), η αναλυτική μεθοδολογία παρέχει αποτελέσματα με απόκλιση $\pm 20\%$ για γωνία $\psi=60^\circ$. Ωστόσο για $\psi=75^\circ$ και 90° η απόκλιση είναι μεγαλύτερη της τάξεως του $\pm 60\%$ για τις ελάχιστες αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις και τάσεις. Παρόλα αυτά και για τις τρεις τιμές της γωνίας ψ οι περισσότερες αναλύσεις με απόσταση μεταξύ των κόμβων $L=12\text{m}$ (αναλύσεις 34,36,37,38,39) φαίνεται να μην προσεγγίζονται ικανοποιητικά από τη μεθοδολογία, καθώς τόσο οι ελάχιστες αξονικές παραμορφώσεις όσο και οι αντίστοιχες τάσεις υποεκτιμούνται. Αυτό αποδίδεται στη μεγάλη απόσταση μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων, η οποία οδηγεί στο μην προσεγγίζεται επαρκώς η ανοδική πορεία του αγωγού πριν το ρήγμα και κατά συνέπεια γενικά το παραμορφωμένο σχήμα του αγωγού.

6.3 Διαγράμματα σχετικού λάθους αναλυτικής μεθοδολογίας

Προκειμένου να οριστεί το πεδίο εφαρμογής της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας καθώς και να διαπιστωθούν οι περιπτώσεις στις οποίες η χρήση εύκαμπτων κόμβων δεν ενδείκνυται στο σχεδιασμό αγωγών, υπολογίστηκαν τα σχετικά σφάλματα για καθένα από τα βασικά μεγέθη που ενδιαφέρουν τον σχεδιασμό ενός αγωγού, ήτοι: για τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη, τις αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις καθώς και τη στροφή στον αγωγό.

Για κάθε ένα μέγεθος το σχετικό σφάλμα υπολογίστηκε ως ο λόγος της διαφοράς κάθε αριθμητικής τιμής του από την αντίστοιχη αναλυτική προς την απόλυτη τιμή της αριθμητικής, επί τις εκατό. Στην πρώτη ομάδα διαγραμμάτων (Σχήματα 6.9 και 6.10) το σχετικό σφάλμα συσχετίστηκε με τη μετακίνηση του ρήγματος d_f και την απόσταση μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων L για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi=75^\circ$, ενώ στη δεύτερη ομάδα διαγραμμάτων (Σχήματα 6.11 και 6.12) το σχετικό σφάλμα παρουσιάζεται συναρτήσει του λόγου της απόστασης μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων προς τη μετακίνηση του ρήγματος, L/d_f , και της γωνίας του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια ψ . Και στις δύο περιπτώσεις αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα σχετικού σφάλματος κάθε μεγέθους που αφορούν

τις αναλύσεις στις οποίες το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό στη μέση μεταξύ του 3^{ου} και του 4^{ου} εύκαμπτου κόμβου («μέση») και στη συνέχεια τα διαγράμματα για εκείνες τις αναλύσεις στις οποίες το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό ακριβώς μετά τον 3^ο κόμβο («άκρη»).

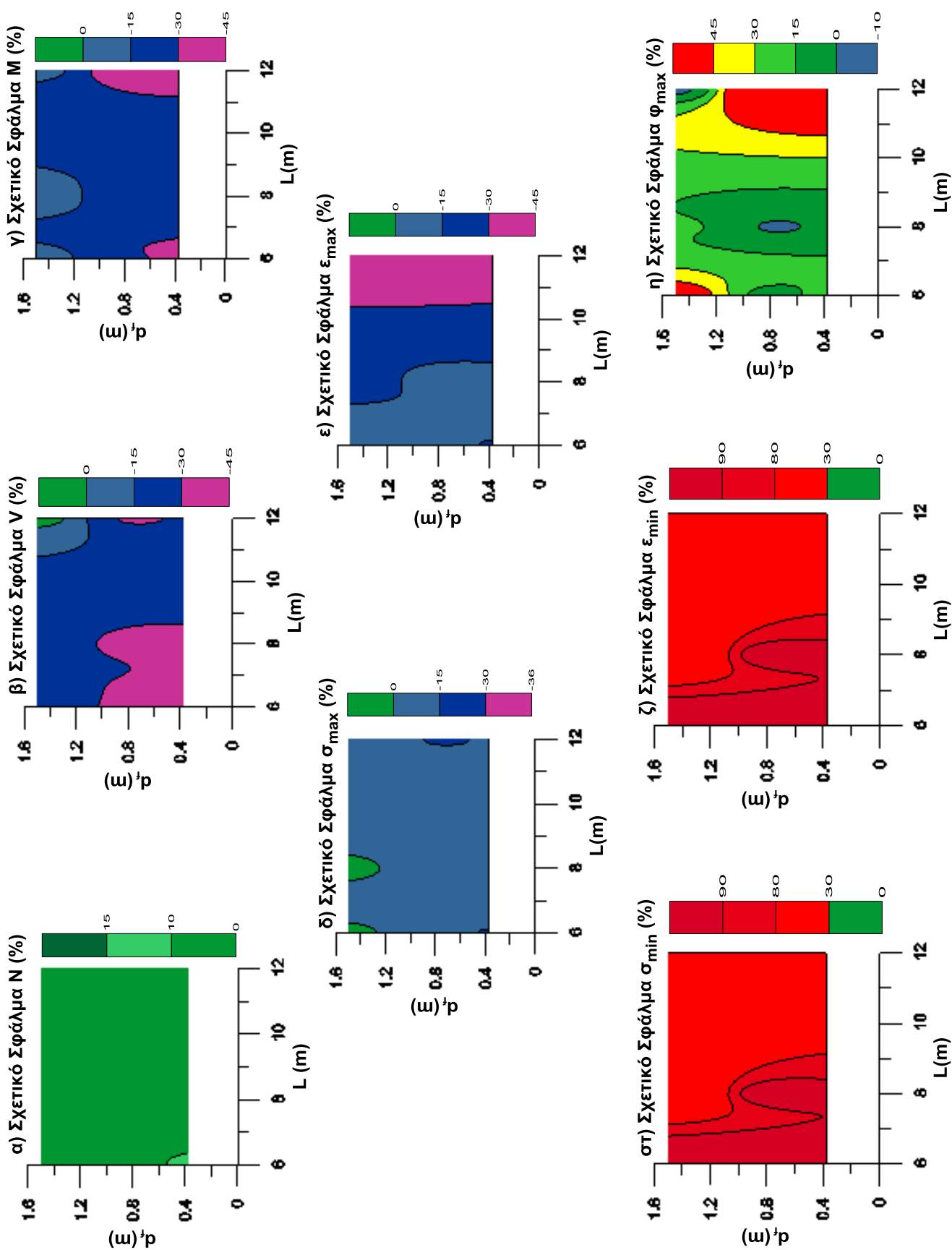
Πιο συγκεκριμένα, το Σχήμα 6.9 συσχετίζει το σχετικό σφάλμα με τη μετακίνηση του ρήγματος d_f και την απόσταση μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων L , στην περίπτωση που το ρήγμα τέμνει τον αγωγό στη μέση του τμήματος μεταξύ 3^{ου} και 4^{ου} εύκαμπτου κόμβου και η γωνία του επιπέδου του ρήγματος με τον αγωγό είναι $\psi=75^\circ$. Παρατηρείται ότι για απόσταση μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων $L=12\text{m}$, και ανεξάρτητα από τη μετακίνηση του ρήγματος d_f , παρουσιάζονται μεγαλύτερα σφάλματα από το αποδεκτό όριο του $\pm 30\%$ για τις καμπτικές ροπές, τις μέγιστες και ελάχιστες αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις, τις ελάχιστες αναπτυσσόμενες τάσεις και για τη σχετική στροφή του αγωγού (Σχήματα 6.9γ, ε, στ, ζ, η). Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, το γεγονός αυτό οφείλεται στη μικρή συνολικά επίδραση των εύκαμπτων κόμβων λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ τους. Κατά συνέπεια, όταν αναπτύσσονται μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις στον αγωγό, πολύ μικρές αποκλίσεις στα εντατικά μεγέθη οδηγούν σε δυσανάλογα μεγάλες αποκλίσεις στις εκτιμώμενες παραμορφώσεις. Να σημειωθεί επίσης ότι, όπως προκύπτει από τα 1-1 διαγράμματα που προηγήθηκαν, όταν τοποθετούνται οι κόμβοι σε τόσο μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, η επιρροή τους δεν κρίνεται ιδιαίτερα αποτελεσματική και επομένως δεν ενδείκνυται η επιλογή κόμβων με τόσο μεγάλη απόσταση.

Επίσης, μεγάλα σφάλματα παρατηρούνται και για μικρές επιβαλλόμενες μετατοπίσεις του ρήγματος $d_f \leq D_{\alpha\gamma\omega\gamma\acute{o}\upsilon}$ (Σχήματα 6.9β, γ) και οφείλονται στο γεγονός ότι η παραμόρφωση περιορίζεται μεταξύ δύο εύκαμπτων κόμβων (έναν πριν και έναν μετά το ίχνος του ρήγματος), ενώ, όπως έχει ξαναειπωθεί, η αναλυτική μεθοδολογία προβλέπει την ενεργοποίηση τεσσάρων κόμβων: ενός στο υπερκείμενο τμήμα του ρήγματος και τριών στο ολισθαίνον τμήμα.

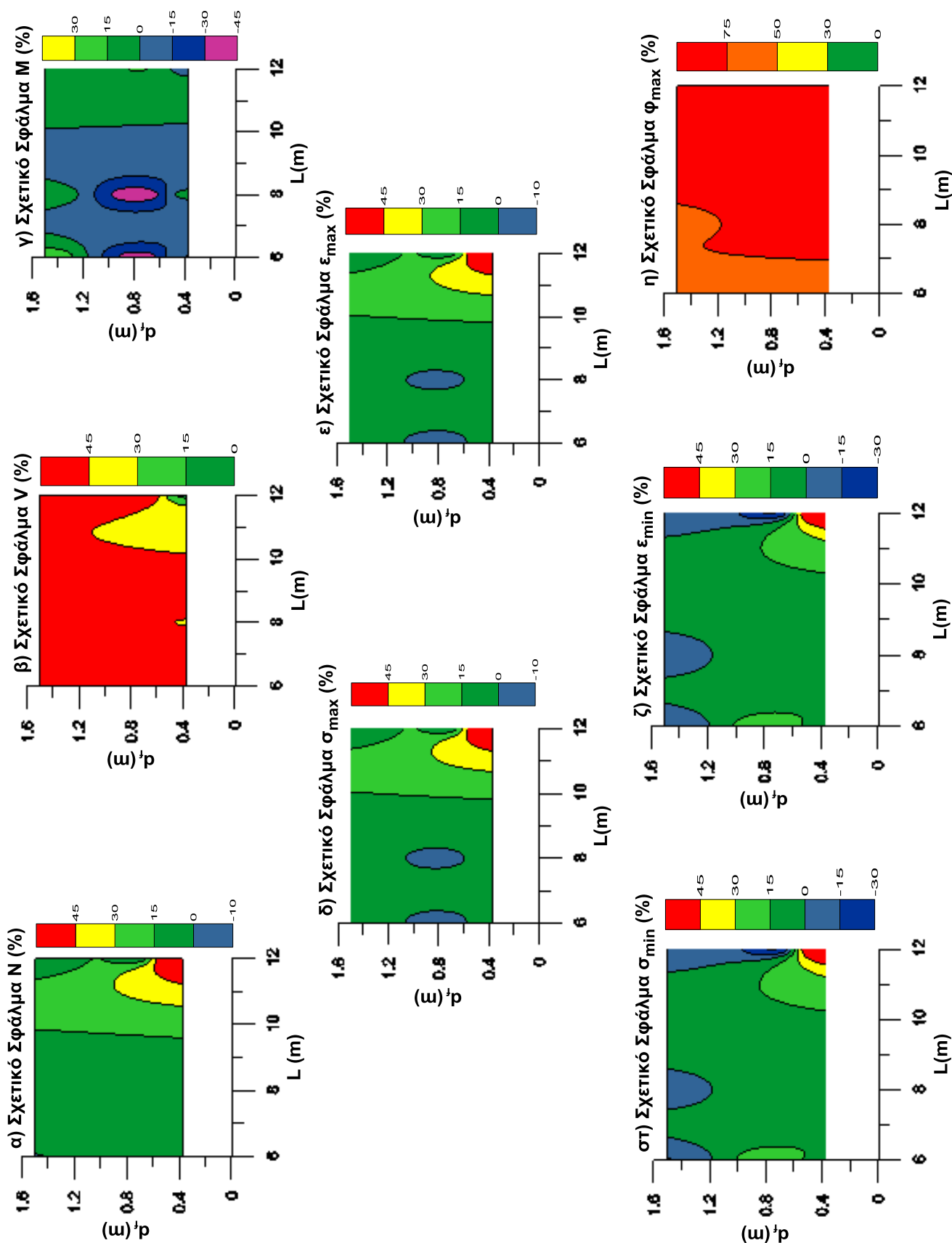
Επιπρόσθετα, παρατηρούνται μεγάλα σχετικά σφάλματα για όλες τις περιπτώσεις υπολογισμού της ελάχιστης αναπτυσσόμενης παραμόρφωσης και τάσης (Σχήματα 6.9στ, ζ). Ωστόσο τα σφάλματα αυτά δεν είναι πραγματικά και οφείλονται στις πολύ μικρές τιμές των συγκρινόμενων μεγεθών, οι οποίες είναι πολύ κοντά στο μηδέν. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί μελετώντας για παράδειγμα την περίπτωση της

ανάλυσης 4 -κόμβοι ανά 6m, $\psi=75^\circ$, ρήγμα στη μέση, $d_f=1.5m$ - (βλ. και τα σχετικά διαγράμματα της περίπτωσης B.4 που παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β), η οποία φαίνεται να εμφανίζει σφάλμα της τάξεως του 225% στον υπολογισμό της ελάχιστης αναπτυσσόμενης παραμόρφωσης. Στο μέσο της διατομής ο αγωγός αναπτύσσει παραμόρφωση $\varepsilon_a=0.12\%$, ενώ λόγω της καμπτικής παραμόρφωσης της διατομής υπολογίζεται $\varepsilon_b=0.013\%$ από την αναλυτική μεθοδολογία και $\varepsilon_b=0.004\%$ από την αριθμητική ανάλυση. Επομένως, η ελάχιστη αναπτυσσόμενη παραμόρφωση υπολογίζεται $\varepsilon_{\min}=\varepsilon_a-\varepsilon_b=0.107\%$ από την αναλυτική μεθοδολογία, ενώ $\varepsilon_{\min}=0.116\%$ από την αριθμητική ανάλυση, με το αντίστοιχο σχετικό σφάλμα να ανέρχεται στο 7.7% (και όχι 225%), μικρή τιμή η οποία επιβεβαιώνεται και από το αντίστοιχο διάγραμμα 1-1 (Σχήμα 6.7). Για τον ίδιο λόγο, τα σχετικά σφάλματα που αφορούν τις ελάχιστες αναπτυσσόμενες τάσεις (Σχήμα 6.9στ) δεν είναι τόσο μεγάλα στην πραγματικότητα.

Τέλος, στο Σχήμα 6.10 παρουσιάζεται η μεταβολή του σχετικού σφάλματος συναρτήσει της μετακίνησης του ρήγματος d_f και της απόστασης μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων L στην περίπτωση που το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό ακριβώς μετά τον 3° εύκαμπτο κόμβο. Παρομοίως, παρατηρούνται μεγαλύτερα σχετικά σφάλματα για όλα σχεδόν τα μεγέθη, όταν η απόσταση μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων είναι μεγάλη ($L=12m$) και η επιβαλλόμενη μετακίνηση του ρήγματος αρκετά μικρή. Επιπρόσθετα, παρατηρούνται σχετικά μεγάλα σφάλματα για όλες τις περιπτώσεις υπολογισμού της τέμνουσας δύναμης και της στροφής του αγωγού (Σχήματα 6.10β, η), καθώς η αναλυτική μεθοδολογία φαίνεται να δίνει για τα συγκεκριμένα μεγέθη ελαφρώς συντηρητικές τιμές.



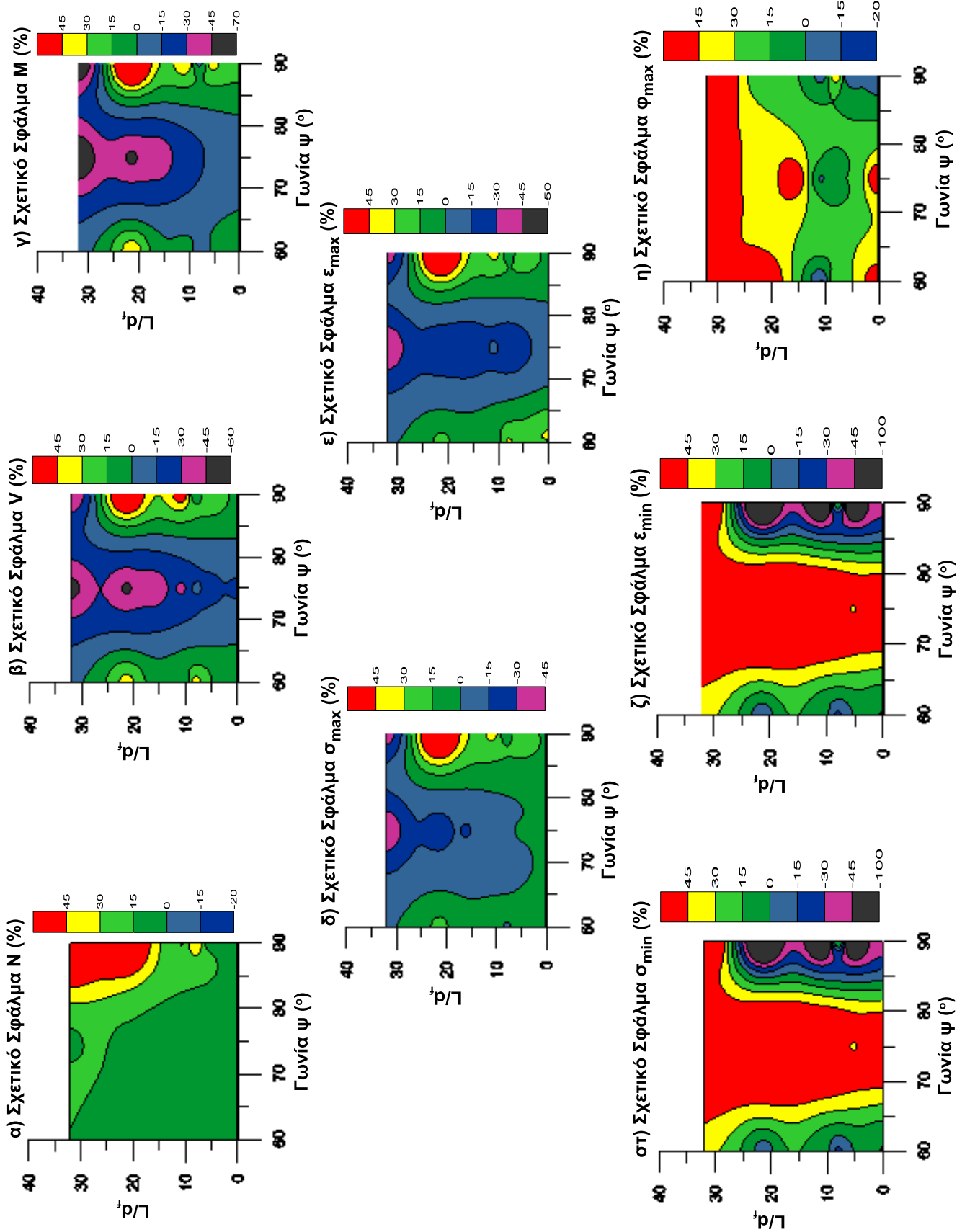
Σχήμα 6.9: Διαγράμματα σχετικού λάθους συναρτήσει της μετακίνησης του ρήγματος d_f και της απόστασης μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων L για τα εξεταζόμενα μεγέθη, στην περίπτωση που το ρήγμα τέμνει τον αγωγό στη μέση μεταξύ $3^{ου}$ και $4^{ου}$ κόμβου.



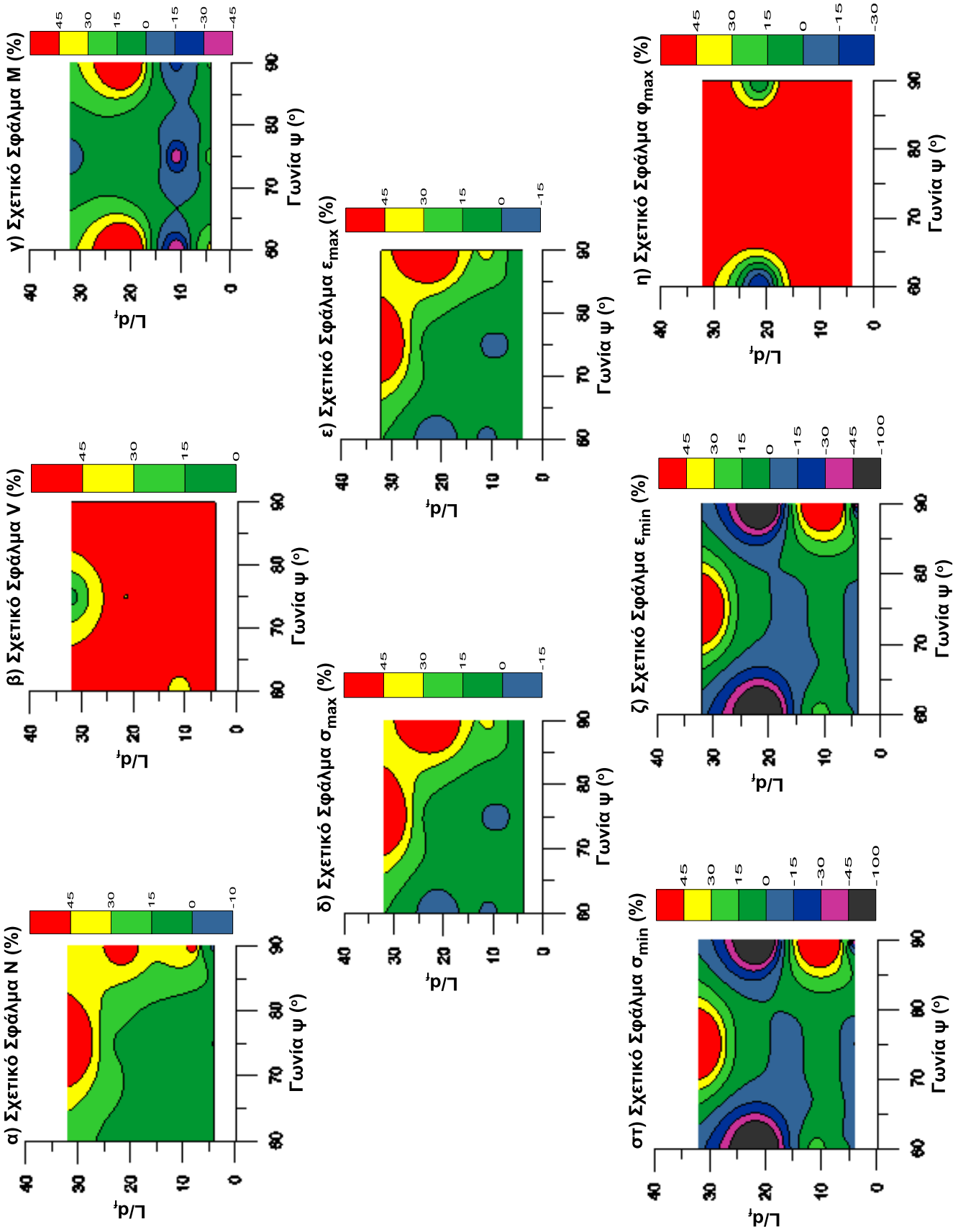
Σχήμα 6.10: Διαγράμματα σχετικού λάθους συναρτήσει της μετακίνησης του ρήγματος d_f και της απόστασης μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων L για τα εξεταζόμενα μεγέθη, στην περίπτωση που το ρήγμα τέμνει τον αγωγό ακριβώς μετά τον 3^ο κόμβο.

Στη δεύτερη ομάδα διαγραμμάτων (Σχήματα 6.11 και 6.12) το σχετικό σφάλμα παρουσιάζεται συναρτήσει του λόγου της απόστασης μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων προς τη μετακίνηση του ρήγματος, L/d_f , και της γωνίας του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια ψ . Συγκεκριμένα το Σχήμα 6.11 αφορά το σύνολο των αναλύσεων στις οποίες το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό στη μέση μεταξύ 3^{ου} και 4^{ου} εύκαμπτου κόμβου. Παρατηρούνται μεγαλύτερα σφάλματα για γωνία $\psi=90^\circ$ και για μεγάλες τιμές του λόγου L/d_f για την αξονική, την τέμνουσα δύναμη, την καμπτική ροπή καθώς και για τις μέγιστες και ελάχιστες αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις και τάσεις (Σχήματα 6.11α, β, γ, δ, ε, στ, ζ). Ωστόσο, για μεγάλες τιμές του λόγου L/d_f τα σφάλματα αυτά είναι αναμενόμενα, καθώς είτε η μετακίνηση που επιβάλλεται στον αγωγό από το ρήγμα είναι αρκετά μικρή είτε η απόσταση μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων είναι αρκετά μεγάλη είτε συνδυασμός και των δύο αυτών. Επίσης όταν το επίπεδο του ρήγματος διασταυρώνεται κάθετα με τον αγωγό, το σχετικό σφάλμα του υπολογισμού της επιμήκυνσης του αγωγού υπεισέρχεται και επηρεάζει σημαντικά τον υπολογισμό της αξονικής δύναμης, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τα εν λόγω μεγαλύτερα σχετικά σφάλματα όταν η γωνία ψ είναι ίση με 90° . Επιπρόσθετα η σχετική στροφή του αγωγού παρουσιάζει μεγαλύτερα σφάλματα από τα αποδεκτά για μεγάλες τιμές του λόγου L/d_f ανεξάρτητα από την τιμή της γωνίας ψ (Σχήμα 6.11η).

Τέλος, όσον αφορά το Σχήμα 6.12 παρουσιάζονται τα σχετικά σφάλματα των εξεταζόμενων μεγεθών συναρτήσει του λόγου L/d_f και της γωνίας ψ για τις αναλύσεις στις οποίες το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό ακριβώς μετά τον 3^ο εύκαμπτο κόμβο. Παρατηρούνται, λοιπόν, μεγαλύτερα σφάλματα στην εκτίμηση της αξονικής δύναμης και κατά συνέπεια της μέγιστης αξονικής τάσης και παραμόρφωσης για γωνία $\psi=90^\circ$ ανεξαρτήτως της τιμής του λόγου L/d_f (Σχήματα 6.12α, δ, ε). Δεδομένου ότι για $\psi=90^\circ$ η αξονική δύναμη υπολογίζεται μόνο βάσει της επιμήκυνσης του αγωγού (αφού η οριζόντια μετακίνηση του ρήγματος Δx είναι μηδενική), το σχετικό σφάλμα του υπολογισμού της επιμήκυνσης του αγωγού υπεισέρχεται και επηρεάζει σημαντικά τον υπολογισμό της αξονικής, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τα εν λόγω μεγαλύτερα σχετικά σφάλματα. Επίσης και από αυτό το σχήμα προκύπτει ότι η αναλυτική μεθοδολογία υπερτιμά συστηματικά τη τέμνουσα δύναμη και τη σχετική στροφή του αγωγού για το σύνολο των περιπτώσεων (Σχήματα 6.12β, γ).



Σχήμα 6.11: Διαγράμματα σχετικού λάθους συναρτήσει του λόγου της μετακίνησης του ρήγματος προς την απόσταση μεταξύ των εύκοιπτων κόμβων, d_r/L , και της γωνίας του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια ψ για τα εξεταζόμενα μεγέθη, στην περίπτωση που το ρήγμα τέμνει τον αγωγό στη μέση μεταξύ $3^{ου}$ και $4^{ου}$ κόμβου.



Σχήμα 6.12: Διαγράμματα σχετικού λάθους συναρτήσει του λόγου της μετακίνησης του ρήγματος προς την απόσταση μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων, d_f/L , και της γωνίας του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια ψ για τα εξεταζόμενα μεγέθη, στην περίπτωση που το ρήγμα τέμνει τον αγωγό ακριβώς μετά τον 3^ο κόμβο.

6.4 Συμπεράσματα

Όπως γίνεται φανερό από τις ανωτέρω συγκρίσεις και διαγράμματα, η προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία προσεγγίζει ικανοποιητικά το μηχανισμό του φαινομένου, καθώς δίνει αξιολογικά αποτελέσματα για σχεδόν το σύνολο των περιπτώσεων που εξετάστηκαν.

Ωστόσο μέσα από την παραπάνω εποπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών και αριθμητικών επιλύσεων, των σχετικών σφαλμάτων κάθε μεγέθους καθώς και από την αναλυτική εξέταση των διαγραμμάτων του Παραρτήματος Β, καθορίζονται τα όρια της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας.

Πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση των πολύ μικρών μετατοπίσεων του ρήγματος η παραμόρφωση περιορίζεται μεταξύ δύο εύκαμπτων κόμβων (έναν πριν και έναν μετά το ίχνος του ρήγματος), ενώ σύμφωνα με τη μεθοδολογία έχει θεωρηθεί ότι θα ενεργοποιηθούν συνολικά τέσσερις κόμβοι (ένας κόμβος στο υπερκείμενο τμήμαχος του ρήγματος και τρεις στο ολισθαίνον τμήμαχος). Παρόλα αυτά επειδή η χρήση εύκαμπτων κόμβων κρίνεται σκόπιμη μόνο στην περίπτωση μεγάλων μετατοπίσεων (ίσων 1 έως 2 φορές τη διάμετρο του αγωγού), αυτή η αδυναμία δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα για την εφαρμογή της αναλυτικής μεθοδολογίας.

Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις που οι εύκαμπτοι κόμβοι έχουν μεγάλη απόσταση μεταξύ τους (όπως στα 12m), η ευεργετική δράση τους είναι πολύ μικρή και κατά συνέπεια είναι πιθανό στον αγωγό να αναπτυχθούν μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις, σχεδόν αντίστοιχες με αυτές που αναπτύσσονται στον απλό αγωγό. Σε αυτές τις περιπτώσεις, αν και η αναλυτική μεθοδολογία προσεγγίζει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά που εκτιμάται από τις αριθμητικές αναλύσεις, όπως φαίνεται στα διαγράμματα του Παραρτήματος Β, λόγω του ότι ο αγωγός βρίσκεται πλέον στην πλαστική περιοχή, πολύ μικρές αποκλίσεις στα εντατικά μεγέθη μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στις εκτιμούμενες παραμορφώσεις και κατά συνέπεια αποτελεί όριο για την χρήση της. Παρά ταύτα θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν έχει νόημα η χρήση εύκαμπτων κόμβων σε περιπτώσεις που λόγω των γεωμετρικών δεδομένων του προβλήματος (κλίση ρήγματος $<60^\circ$) ή της διάταξης των κόμβων (πολύ αραιή), καθώς η χρήση των κόμβων δε θα είχε ουσιαστική μείωση στις

αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις και κατά συνέπεια αυτό το όριο εφαρμογής της μεθοδολογίας έχει σχετικά μικρή σημασία.

7

Σύγκριση της νέας μεθόδου σχεδιασμού με τις συμβατικές

7.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται μία οικονομοτεχνική σύγκριση μεταξύ της νέας μεθόδου σχεδιασμού αγωγών έναντι μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων λόγω διάρρηξης ενεργών τεκτονικών ρηγμάτων, με χρήση εύκαμπτων κόμβων και των «κλασσικών» μεθόδων σχεδιασμού. Σκοπός αυτής της σύγκρισης είναι να διαπιστωθούν τα όρια εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου, λαμβάνοντας υπόψη την αποδοτικότητα της κάθε μεθόδου, το εύρος αλλά και το κόστος εφαρμογής της.

7.2 Μέθοδοι σχεδιασμού αγωγών έναντι μεγάλων εδαφικών μετατοπίσεων λόγω διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων

Για την αντιμετώπιση των μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων λόγω της διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται διάφορες συμβατικές μέθοδοι, οι οποίες αποσκοπούν στον περιορισμό των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των παρακάτω μηχανισμών: (α) αύξηση της αντοχής του αγωγού, (β) απομείωση της τριβής μεταξύ εδάφους και αγωγού και κατά συνέπεια μείωση των επιβαλλόμενων αξονικών τάσεων στον αγωγό και (γ) αύξηση της δυνατότητας ελεύθερης μετακίνησης του αγωγού στην περιοχή της διάρρηξης.

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξεταστούν και θα συγκριθούν με τη μέθοδο κατασκευής αγωγού με χρήση εύκαμπτων κόμβων, ως προς την αποδοτικότητά τους και το κόστος τους, οι παρακάτω εναλλακτικές μέθοδοι:

- Αύξηση πάχους του τοιχώματος του αγωγού
- Αναβάθμιση της αντοχής του ανοξείδωτου χάλυβα
- Χρήση ελαφρόπετρας για την πλήρωση της τάφρου
- Κατασκευή ενός υπόγειου «θυσιαζόμενου» κιβωτίου (culvert) από οπλισμένο σκυρόδεμα κατάλληλων διαστάσεων, εντός του οποίου ο αγωγός είναι ελεύθερος να κινηθεί.

Αναλυτικότερα η αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού συντελεί στην αύξηση της ροπής αντίστασης της διατομής του και κατά συνέπεια στην αύξηση της αντοχής του, με αποτέλεσμα τον περιορισμό των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στο τοίχωμα του αγωγού για τις ίδιες επιβαλλόμενες μετακινήσεις. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν συνεχείς αγωγοί εξωτερικής διαμέτρου $D=0.762\text{m}$ (30") και πάχους $t=12.5\text{mm}$, $t=16\text{mm}$ και $t=20\text{mm}$, για την περίπτωση που η γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια είναι ίση με $\psi=75^\circ$. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η αναλυτική μεθοδολογία των Karamitros et al. (2011), μέσω της οποίας με σταδιακή αύξηση της επιβαλλόμενης μετατόπισης διαπιστώθηκε σε ποιο σημείο ο συνεχής αγωγός με αρχικό πάχος $t=12.5\text{mm}$ αναπτύσσει παραμορφώσεις ίσες με το όριο αστοχίας του, 0.5%. Στη συνέχεια ενισχύθηκε ο αγωγός με αύξηση του πάχους του τοιχώματός του ($t=16\text{mm}$) και μέσω της ίδιας αναλυτικής μεθοδολογίας προσδιορίστηκε η περαιτέρω επιβαλλόμενη μετακίνηση που πρέπει να ασκηθεί στον ενισχυμένο πλέον συνεχή αγωγό για να αναπτύξει κι αυτός αξονικές παραμορφώσεις ίσες με το όριο του 0.5%. Έπειτα το πάχος του αγωγού αυξήθηκε ξανά ($t=20\text{mm}$) και προσδιορίστηκε με τον ίδιο τρόπο η οριακή επιβαλλόμενη μετατόπιση που μπορεί να δεχτεί ο αγωγός από το ρήγμα.

Μια άλλη εναλλακτική μέθοδος αντιμετώπισης των μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων λόγω της διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων που εξετάστηκε είναι η αλλαγή της ποιότητας του ανοξείδωτου χάλυβα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του αγωγού. Το μέτρο αυτό αποσκοπεί στον περιορισμό των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στο τοίχωμα του αγωγού μέσω της αύξησης της αντοχής του. Έτσι εξετάστηκαν δύο ποιότητες χάλυβα, API 5L Grade X65 και Grade X70, και διαπιστώθηκε μέσω της αναλυτικής μεθοδολογίας των Karamitros et al. (2011) ποια είναι η μέγιστη επιβαλλόμενη μετατόπιση που μπορεί να ασκηθεί στους αγωγούς αυτούς, έτσι ώστε

για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi=75^\circ$ οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις να μην υπερβούν το όριο του 0.5%.

Όσον αφορά το κόστος προμήθειας του αγωγού, σύμφωνα με στοιχεία από εργοστάσιο παραγωγής, αυτό διαμορφώνεται ανάλογα με το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα και την ποιότητα του ανοξείδωτου χάλυβα ως εξής (Πίνακας 7.1):

Πίνακας 7.1:Κόστος προμήθειας αγωγών ανάλογα με το πάχος του τοιχώματός τους και της ποιότητας του ανοξείδωτου χάλυβα

	API 5L Grade X65 Unit price (€/t)	API 5L Grade X70 Unit price (€/t)
Αγωγός D=30", t=12,5mm	1120	1130
Αγωγός D=30", t=16mm	1200	1300
Αγωγός D=30", t=20mm	1305	1520

Έτσι για τον αγωγό που εξετάζεται κάθε φορά, διαμορφώνεται το κόστος του ανά μέτρο μήκους, ανάλογα με το πάχος του τοιχώματος του αγωγού και την χρησιμοποιούμενη ποιότητα χάλυβα.

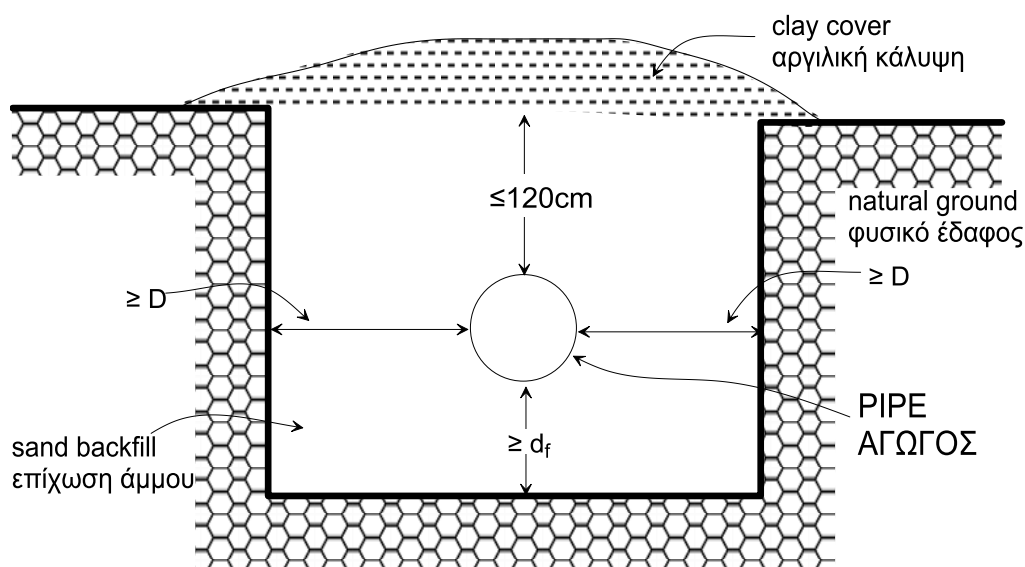
Ένας άλλος τρόπος περιορισμού των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό λόγω της διάρρηξης ρήγματος είναι η χρήση ελαφροβαρών υλικών για την πλήρωση της τάφρου όπως η ελαφρόπετρα. Με τον τρόπο αυτό μειώνονται οι επιβαλλόμενες γεωστατικές τάσεις στον αγωγό, με αποτέλεσμα την απομείωση των δυνάμεων τριβής στη διεπιφάνεια εδάφους και αγωγού. Έτσι επιτυγχάνεται η συμμετοχή μεγαλύτερου τμήματος του αγωγού στη σχετική ολίσθηση και κατά συνέπεια περιορίζεται η επιβαλλόμενη ανηγμένη παραμόρφωση ανά μέτρο μήκους του αγωγού. Παράλληλα μειώνεται η αντοχή του εδάφους που περιβάλλει τον αγωγό λόγω της μείωσης των γεωστατικών τάσεων και κατά συνέπεια μειώνονται και οι επιβαλλόμενες εγκάρσιες δυνάμεις κατά την αστοχία του ρήγματος. Και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η αναλυτική μεθοδολογία των Karamitros et al. (2011), μετά από κατάλληλη τροποποίηση των χαρακτηριστικών των ελατηρίων του εδάφους (Πίνακας 7.2), για συνεχή αγωγό εξωτερικής διαμέτρου $D=0.762m$, πάχους $t=12.5mm$ και

χάλυβα API 5L Grade X65, στην περίπτωση που η γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια είναι ίση με $\psi=75^\circ$.

Πίνακας 7.2: Χαρακτηριστικά ελατηρίων του εδάφους για την πλήρωση της τάφρου με ελαφρόπετρα ($\gamma=8 \text{ kN/m}^3$)

Χαρακτηριστικά ελατηρίων εδάφους		
Είδος ελατηρίων	Δύναμη (kN/m)	Μετακίνηση (mm)
Αξονικά (τριβής)	10,11	3,0
Εγκάρσια οριζόντια	59,75	35,7
Εγκάρσια κατακόρυφα προς τα πάνω	18,31	2,57
Εγκάρσια κατακόρυφα προς τα κάτω	454,15	95,3

Το κόστος της ελαφρόπετρας ελήφθη ίσο με 40€/m^3 , τιμή στην οποία περιλαμβάνεται η προμήθεια και μεταφορά της ελαφρόπετρας καθώς και η επίχωση του χάνδακα. Έτσι για να υπολογιστεί το συνολικό κόστος αυτής της μεθόδου ανά μέτρο μήκους του αγωγού, πολλαπλασιάστηκε το εν λόγω ποσό με το εμβαδόν της διατομής της τάφρου που θα καλυφθεί με ελαφρόπετρα, προσθέτοντας έπειτα σε αυτό το κόστος προμήθειας του απλού αγωγού (ποιότητα X65, πάχος τοιχώματος $t=12.5\text{mm}$). Για τον υπολογισμό του εμβαδού της τάφρου που θα καλυφθεί με ελαφρόπετρα χρησιμοποιήθηκαν οι διαστάσεις του Σχήματος 7.1. Πιο συγκεκριμένα, το πλάτος της τάφρου λήφθηκε συντηρητικά ίσο με τρεις φορές τη διάμετρο D του αγωγού και το ύψος της ίσο με το άθροισμα της επιβαλλόμενης μετακίνησης d_f και της διαμέτρου D του αγωγού, προσ αυξημένο κατά 1.2m (πάχος επικάλυψης).

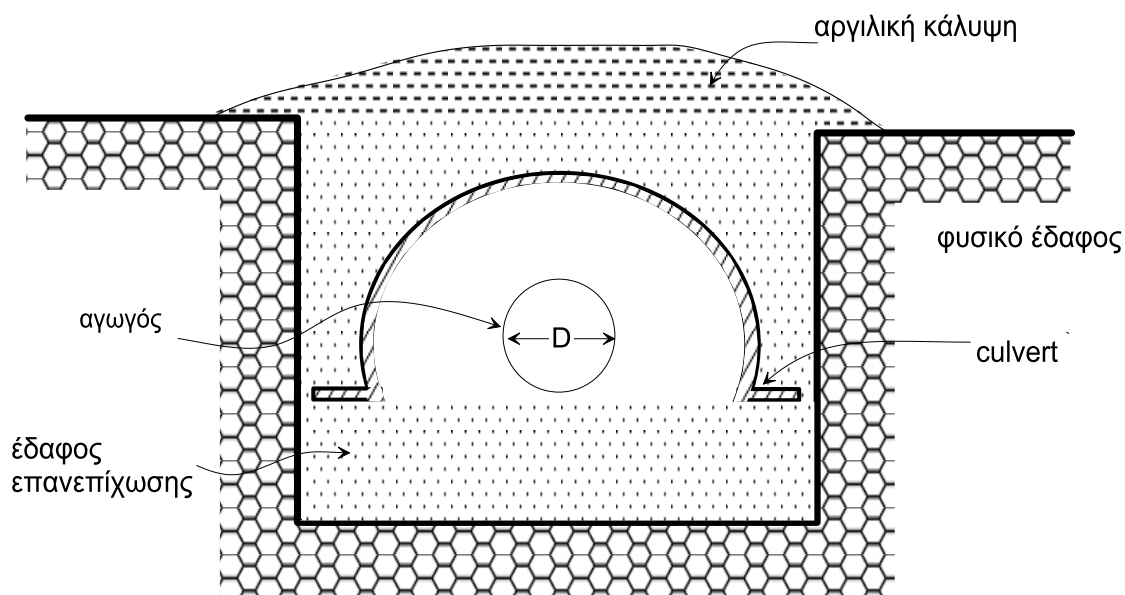


Σχήμα 7.1: Διατομή τάφρου τοποθέτησης αγωγού

Τέλος, θεωρήθηκε ότι ο αγωγός μπορεί να προστατευθεί από τις μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις λόγω της διάρρηξης ρήγματος με την κατασκευή υπόγειων «θυσιαζόμενων» κιβωτίων (culvert) από οπλισμένο σκυρόδεμα κατάλληλων διαστάσεων, τα οποία διατάσσονται το ένα δίπλα στο άλλο κατά μήκος του αγωγού επιτρέποντάς του να κινηθεί ελεύθερα εντός τους (Σχήμα 7.2). Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί στον περιορισμό της αλληλεπίδρασης του αγωγού με το περιβάλλον έδαφος, με αποτέλεσμα τον περιορισμό των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων. Έτσι κατά τη διάρρηξη του ρήγματος ο αγωγός παραμένει ανεπηρέαστος, καθώς το κιβώτιο παραλαμβάνει όλες τις μετακινήσεις. Ωστόσο λόγω της αξονικής συνιστώσας Δx του ρήγματος και της καμπύλωσης του αγωγού εντός των κιβωτίων culvert (το μήκος των οποίων θεωρήθηκε εδώ ότι συμπίπτει με το καμπυλωμένο μήκος του αγωγού), ο αγωγός επιμηκύνεται και κατά συνέπεια αναπτύσσονται αξονικές τάσεις και παραμορφώσεις. Έτσι λοιπόν έγινε χρήση της αναλυτικής μεθοδολογίας των Karamitros et al. (2011) για συνεχή αγωγό εξωτερικής διαμέτρου $D=0.762\text{m}$, πάχους $t=12.5\text{mm}$ και χάλυβα API 5L Grade X65 για την περίπτωση που $\psi=75^\circ$, επιβάλλοντας μόνο την οριζόντια συνιστώσα της ασκούμενης μετακίνησης d_f κατά τον άξονα x (κατά μήκος του αγωγού), για να διαπιστωθεί για ποια επιβαλλόμενη μετακίνηση η συγκεκριμένη συνιστώσα της προκαλεί παραμορφώσεις λόγω των αξονικών δυνάμεων ίσες με το όριο του 0,5%.

Το κόστος προκατασκευής, μεταφοράς και τοποθέτησης των κυκλικών κιβωτίων (culvert) από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 15cm και ακτίνας 130cm κυμαίνεται περίπου στα 200€/m. Ωστόσο εκτός από το κόστος αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη και το κόστος υπερεκσκαφής του χάνδακα, για να είναι δυνατή η τοποθέτηση των κιβωτίων. Αν και το κόστος αυτό εξαρτάται από το υλικό εκσκαφής, ένα μέσο κόστος υπερεκσκαφής για συνήθη συνδυασμό εδαφών (έδαφος, ημίβραχος, βράχος) ανέρχεται περίπου στα 50€/m και περιλαμβάνει και τη μεταφορά και απόρριψη του εδαφικού υλικού. Οι υπερεκσκαφές αυτές είναι επιπρόσθετες των συνήθων εκσκαφών που ούτως ή άλλως γίνονται στις θέσεις των ενεργών ρηγμάτων, των οποίων το κόστος δε θα ληφθεί υπόψη, αφού είναι κοινό για όλες τις μεθόδους. Επιπρόσθετα, στα παραπάνω πρέπει να προστεθεί και το κόστος για την επανεπίχωση με διαβαθμισμένο υλικό, το οποίο κυμαίνεται περίπου στα 30€/m. Συνεπώς το συνολικό κόστος της συγκεκριμένης μεθόδου ανέρχεται στα 280€/m και αφορά ημικυλινδρικά κελύφη ακτίνας 130cm, μέσα στα οποία ο αγωγός μπορεί να δεχτεί

μετακίνηση $\leq D$. Έτσι στην περίπτωση μεγαλύτερων επιβαλλόμενων μετακινήσεων, για να προκύψει το συνολικό κόστος της μεθόδου πολλαπλασιάστηκε το ποσό των 280€/m με το λόγο της επιβαλλόμενης μετακίνησης προς τη διάμετρο του αγωγού, d_f/D , ενώ στο ποσό αυτό προστέθηκε και το κόστος προμήθειας αγωγού εξωτερικής διαμέτρου $D=0.762\text{m}$, πάχους $t=12.5\text{mm}$ και χάλυβα API 5L Grade X65. Να σημειωθεί ότι το κόστος αυτό είναι ιδιαίτερα χαμηλό, γιατί αφορά προκατασκευασμένα κυκλικά κιβώτια και θεωρήθηκε ότι αυξάνεται γραμμικά (ευνοϊκή παραδοχή για το κόστος). Σε περιπτώσεις που δεν επαρκούν αυτά και πρέπει να κατασκευαστεί το κιβώτιο με συμβατικά μέσα (καλούπια) το κόστος εκτοξεύεται.



Σχήμα 7.2: Διατομή υπόγειου κιβωτίου (culvert) από οπλισμένο σκυρόδεμα

Οι παραπάνω συμβατικές μεθοδολογίες αντιμετώπισης των εδαφικών μετατοπίσεων λόγω διάρρηξης ρήγματος συγκρίθηκαν με την περίπτωση χρήσης εύκαμπτων κόμβων (ανά 6m ή 8m), σε ένα απλό αγωγό εξωτερικής διαμέτρου $D=0.762\text{m}$, πάχους $t=12.5\text{mm}$ και χάλυβα API 5L Grade X65. Για την περίπτωση που εξετάζεται θεωρήθηκε ότι επαρκούν επτά (7) εύκαμπτοι κόμβοι, έτσι να υπάρχουν τουλάχιστον 3 κόμβοι εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος σε κάθε περίπτωση. Για την εκτίμηση των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκε η προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία που περιγράφηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 4, για γωνία διασταύρωσης ίση με $\psi=75^\circ$ και το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό ακριβώς μετά τον 4^ο εύκαμπτο κόμβο. Με τον

τρόπο αυτό διαπιστώθηκε μέχρι ποια επιβαλλόμενη μετακίνηση οι αγωγοί με εύκαμπτους κόμβους ανά 8m και 6m αντίστοιχα αναπτύσσουν μέγιστες αξονικές παραμορφώσεις που δεν υπερβαίνουν το όριο του 0.5%.

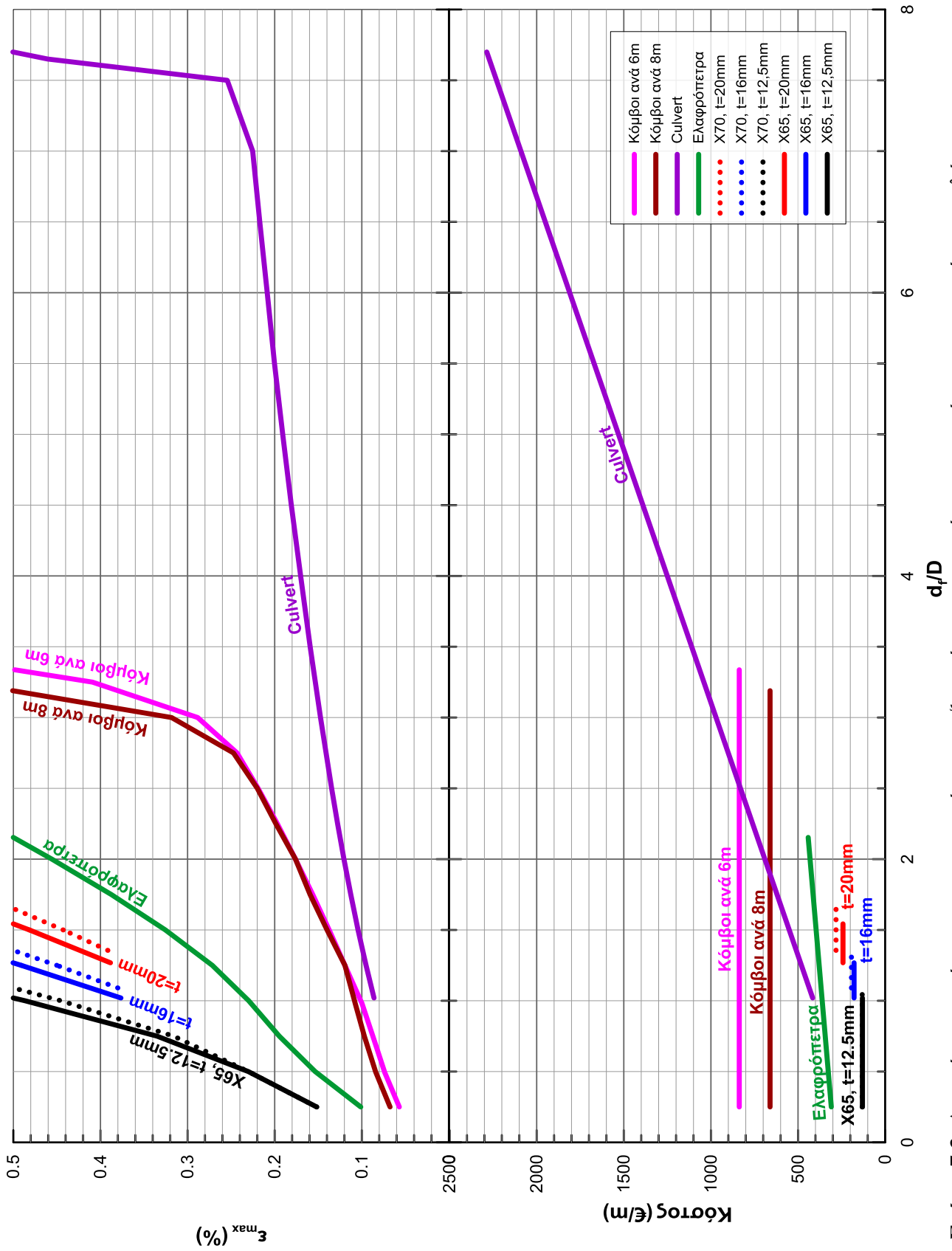
Όσον αφορά το κόστος της συγκεκριμένης μεθόδου, επιλέχθηκαν κόμβοι από τους καταλόγους της εταιρίας BOA Group, τύπου 7510 και ονομασίας DN800, με κόστος 3653€ έκαστος. Το συνολικό κόστος των επτά κόμβων έχει αναχθεί ανά μέτρο μήκους και σ' αυτό προστέθηκε και το κόστος προμήθειας του αγωγού. Η εν λόγω προσφορά αφορά τιμές λιανικής και κατά συνέπεια είναι δυσμενής όσον αφορά το κόστος.

Πρέπει να σημειωθεί, τέλος, ότι για την ανάλυση κόστους στο κεφάλαιο αυτό, θεωρήθηκε ότι γνωρίζουμε με ακρίβεια τη θέση του ρήγματος. Στην περίπτωση αβεβαιότητας στη θέση του ρήγματος, όλες οι μέθοδοι θα πρέπει να εφαρμοστούν σε μεγαλύτερο μήκος, αλλά οι προκύπτουσες σχέσεις κόστους ανά μέτρο μήκους θα παραμείνουν περίπου σταθερές.

7.3 Σύγκριση μεθοδολογιών ως προς την αποδοτικότητα και το κόστος

Στη συνέχεια πραγματοποιείται σύγκριση των συμβατικών μεθόδων αντιμετώπισης των μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων λόγω της διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων που περιγράφηκαν ανωτέρω με τη μέθοδο της χρήσης εύκαμπτων κόμβων, ως προς την αποδοτικότητά τους αλλά και το κόστος τους.

Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 7.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα των μέγιστων αναπτυσσόμενων αξονικών παραμορφώσεων του αγωγού συναρτήσει του λόγου της μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού, d_f/D , για κάθε μια εναλλακτική μέθοδο, έτσι ώστε να αποτιμηθεί η αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα της κάθε μεθόδου. Παράλληλα συσχετίζεται και το κόστος ανά μέτρο μήκους της κάθε μεθόδου με το λόγο d_f/D , για να διαπιστωθεί σε ποιο πεδίο εδαφικών μετακινήσεων είναι οικονομικά συμφέρουσα η κάθε εναλλακτική μεθοδολογία.



Σχήμα 7.3: Διαγράμματα μέγιστων αναπτυσσόμενων αξονικών παραμορφώσεων και κόστους συναρτήσει του λόγου της μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού για κάθε εναλλακτική μέθοδο ($\psi=75^\circ$).

Παρατηρείται ότι η αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού, παρόλο που πρακτικά αποτελεί τον επικρατέστερο τρόπο αντιμετώπισης των επαυξημένων παραμορφώσεων λόγω διάρρηξης ρηγμάτων, έχει περιορισμένο εύρος εφαρμογής και δε μπορεί να αξιοποιηθεί στις περιπτώσεις πολύ μεγάλων επιβαλλόμενων μετατοπίσεων (μεγαλύτερων από 1.6D). Το κόστος εφαρμογής της μεθόδου αυξάνεται έως και 85% με την αύξηση του πάχους της διατομής του αγωγού από $t=12,5\text{mm}$ σε $t=20\text{mm}$, αλλά γίνεται εμφανές από το σχήμα ότι για μικρές μετατοπίσεις ($\leq 1.6D$) η αύξηση του πάχους αποτελεί την πιο συμφέρουσα λύση, καθώς όλες οι άλλες μέθοδοι παρουσιάζουν ακόμη μεγαλύτερο κόστος.

Όσον αφορά τη χρήση χάλυβα μεγαλύτερης αντοχής (π.χ. API 5L X65 σε X70), παρατηρείται ότι πρόκειται για μέτρο με μικρή αποτελεσματικότητα, δεδομένου του ότι στον αγωγό επιβάλλονται μετατοπίσεις και όχι δυνάμεις. Επίσης το κόστος είναι δυσανάλογα αυξημένο σε σχέση με την αποδοτικότητα της μεθόδου.

Η χρήση ελαφρόπετρας για την επίχωση της τάφρου παρατηρείται να έχει μέτρια επιρροή στην απομείωση των παραμορφώσεων του αγωγού και μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα από τις δύο προηγούμενες μεθόδους, καθώς προστατεύει τον αγωγό από επιβαλλόμενες μετατοπίσεις έως και 2.15D. Ωστόσο παρατηρείται το κόστος της έως και να τριπλασιάζεται σε σχέση με το κόστος του αρχικού αγωγού. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι η ελαφρόπετρα είναι δυσεύρετη σε τόσο μεγάλες ποσότητες που απαιτούνται σε τέτοιες περιπτώσεις, περιορίζουν πολύ το εύρος εφαρμογής αυτής της μεθόδου.

Η προστασία του αγωγού από υπόγεια κιβώτια (culvert) οπλισμένου σκυροδέματος κατάλληλων διαστάσεων, αντίστοιχων με την αναμενόμενη μετακίνηση του ρήγματος, πρόκειται για μέθοδο μεγάλης αποδοτικότητας, αφού όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.3 μπορεί να εφαρμοστεί και για πολύ μεγάλες μετατοπίσεις (μέχρι και 7.7D). Ωστόσο το κόστος εκτοξεύεται κατακόρυφα, γεγονός το οποίο καθιστά τη μέθοδο ιδιαίτερως αντικοινωνική για μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες και για μεγάλες αναμενόμενες μετακινήσεις, όπου το μήκος του αγωγού που πρέπει να προστατευθεί ανέρχεται σε εκατοντάδες μέτρα. Επιπροσθέτως, πρέπει να σημειωθεί ότι το σχετικά χαμηλό κόστος ανά μέτρο μήκους που λήφθηκε υπόψη για τα διαγράμματα, αφορά προκατασκευασμένα κυκλικά κιβώτια και θεωρήθηκε απλή γραμμική αύξηση με το μέγεθος της μετατόπισης. Στην πραγματικότητα σε περιπτώσεις μεγάλων

μετατοπίσεων το εξωτερικό περιβλήμα (culvert) θα πρέπει να κατασκευαστεί με συμβατικές μεθόδους σκυροδέτησης (καλούπια) με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος. Επιπλέον, το κόστος για την απαιτούμενη υπερεκκαφή, ώστε να τοποθετηθεί το κιβώτιο, αυξάνεται δυσανάλογα με την αύξηση της διαμέτρου του περιβλήματος.

Όσον αφορά τη χρήση εύκαμπτων κόμβων, παρατηρείται ότι αποτελεί μέτρο μεγάλης αποδοτικότητας για μεγάλες επιβαλλόμενες μόνιμες μετακινήσεις. Πιο συγκεκριμένα η χρήση εύκαμπτων κόμβων ανά 8m προστατεύει τον αγωγό από επιβαλλόμενες μετακινήσεις έως και 3.2D και αντίστοιχα ανά 6m από μετακινήσεις έως και 3.3D, έχοντας έτσι τη μεγαλύτερη ευμενή επιρροή στη μείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό από όλες τις προαναφερθέντες μεθόδους, πλην του εξωτερικού περιβλήματος (culvert). Επίσης αναφορικά με το κόστος, η χρήση εύκαμπτων κόμβων είτε ανά 6m είτε ανά 8m αποτελεί να μεν ακριβότερη λύση από τη χρήση ελαφρόπετρας για μετατοπίσεις μέχρι 2.15D, αλλά για μεγαλύτερες μετατοπίσεις αποτελεί τη φθηνότερη και αποδοτικότερη μέθοδο, καθώς το κόστος της είναι μικρότερο της κατασκευής εξωτερικού περιβλήματος (culvert). Παράλληλα αξίζει να σημειωθεί ότι κατασκευαστικά δε χρειάζεται καμία πρόσθετη πρόβλεψη, εφόσον οι κόμβοι απλά συγκολλούνται στις προβλεπόμενες θέσεις, όπως τα υπόλοιπα τμήματα του αγωγού.

Συνοψίζοντας καταλήγουμε ότι η αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού ενδείκνυται για επιβαλλόμενες μετατοπίσεις $d_f \leq 1.5D$, όπου D είναι η διάμετρος του αγωγού, ενώ για $1.5D < d_f \leq 2.15D$ συνιστάται η χρήση ελαφρόπετρας, καθώς κρίνεται οικονομικά πιο συμφέρουσα λύση από τη χρήση των κόμβων και των κιβωτίων (culvert), ωστόσο είναι δυσεύρετη σε μεγάλες ποσότητες. Για μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις και μικρότερες από 3.3D η χρήση εύκαμπτων κόμβων αποτελεί την πιο αποτελεσματική και συμφέρουσα λύση. Τέλος, για ακόμη μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις ($>3.3D$) συστήνεται η προστασία του αγωγού από υπόγεια κιβώτια (culvert) οπλισμένου σκυροδέματος.

8

Συμπεράσματα

Οι σεισμικά επιβαλλόμενες μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις, όπως αυτές που προκαλούνται από τη διάρρηξη ενεργών ρηγμάτων, αποτελούν ίσως το πιο σοβαρό κίνδυνο που αντιμετωπίζουν οι υπόγειοι αγωγοί μεταφοράς πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Επιπλέον, οι συνήθεις «συμβατικές» μεθοδολογίες για την αντιμετώπιση τέτοιων μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων είναι εν γένει αποτελεσματικές για μικρές έως μεσαίες μετατοπίσεις του ρήγματος (μέχρι 1.5-2.0 διαμέτρους του αγωγού). Εξαιρετική αποτελεί η μέθοδος κατασκευής ενός «θυσιαζόμενου» εξωτερικού περιβλήματος από σκυρόδεμα (culvert), το κόστος όμως της οποίας αυξάνεται υπέρμετρα καθώς μεγαλώνει η αναμενόμενη μετακίνηση του ρήγματος.

Έχοντας υπόψη τα ανωτέρω, μελετάται στον Τομέα Γεωτεχνικής του ΕΜΠ ο εναλλακτικός σχεδιασμός αγωγών σε περιοχές μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων, με χρήση εύκαμπτων κόμβων, μέσω αριθμητικών αναλύσεων και πειραμάτων μικρής κλίμακας. Στα πλαίσια αυτής της ερευνητικής προσπάθειας αναπτύχθηκε και μία νέα αναλυτική μεθοδολογία για την εκτίμηση της επιρροής των εύκαμπτων κόμβων στα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στον αγωγό.

Στο πλαίσιο της ανωτέρω ευρύτερης ερευνητικής προσπάθειας, στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, έγινε παραμετρική διερεύνηση και αξιολόγηση της ακρίβειας της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας για αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους που διασχίζουν ρήγματα ορθής διάρρηξης. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε και οικονομοτεχνική αξιολόγηση της εν λόγω μεθόδου σχεδιασμού έναντι των «συμβατικών» μεθόδων, προκειμένου να ορισθούν οι συνθήκες εφαρμογής της στην πράξη.

Από την εκτενή σύγκριση με αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν γίνεται φανερό ότι η προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία προσεγγίζει ικανοποιητικά το μηχανισμό του φαινομένου και δίνει αξιόλογα αποτελέσματα για σχεδόν το σύνολο των περιπτώσεων που εξετάστηκαν. Επιπροσθέτως, μέσα από την εποπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών και αριθμητικών επιλύσεων και των σχετικών σφαλμάτων κάθε μεγέθους, καθορίστηκαν τα παρακάτω όρια εφαρμογής της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας:

- Επιβαλλόμενη μετατόπιση ρήγματος μεγαλύτερη από τη διάμετρο του αγωγού ($d_f > D$)
- Απόσταση μεταξύ διαδοχικών κόμβων μικρότερη των 12m.

Διευκρινίζεται ότι τα προαναφερθέντα όρια δεν αποτελούν πρακτικό περιορισμό στην χρήση της αναλυτικής μεθοδολογίας, δεδομένου ότι η χρήση εύκαμπτων κόμβων μας ενδιαφέρει για περιπτώσεις μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων ($>D$), ενώ η τοποθέτηση τους σε αραιή διάταξη ($L \geq 12m$) δεν απομειώνει ουσιαστικά τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό και κατά συνέπεια δεν έχει νόημα να εφαρμόζεται.

Από την οικονομοτεχνική σύγκριση μεταξύ της προτεινόμενης μεθόδου σχεδιασμού με εύκαμπτους κόμβους με τις «συμβατικές» μεθόδους, διαπιστώθηκε ότι η χρήση τους είναι ευνοϊκή για τον αγωγό και απομειώνει τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις κάτω από το θεμιτό όριο του 0.5% ακόμα και για μετατοπίσεις έως $3.3D$, έχοντας έτσι τη μεγαλύτερη ευμενή επιρροή από όλες τις «συμβατικές» μεθόδους, πλην του εξωτερικού περιβλήματος (culvert). Αναφορικά με το κόστος, η χρήση εύκαμπτων κόμβων είτε ανά 6m είτε ανά 8m αποτελεί να μεν ακριβότερη λύση για μεγάλες μετατοπίσεις από τη χρήση ελαφρόπετρας ή την αύξηση του πάχους του αγωγού, όμως αυτές οι μέθοδοι έχουν όριο εφαρμογής τα $2D$. Επιπροσθέτως, η χρήση εύκαμπτων κόμβων είναι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων φθηνότερη της κατασκευής εξωτερικού περιβλήματος (culvert), ενώ κατασκευαστικά δε χρειάζεται καμία πρόσθετη πρόβλεψη, εφόσον οι κόμβοι απλά συγκολλούνται στις προβλεπόμενες θέσεις, όπως τα υπόλοιπα τμήματα του αγωγού.

Συνοψίζοντας καταλήγουμε ότι η αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού ενδείκνυται για επιβαλλόμενες μετατοπίσεις $d_f \leq 1.5D$, όπου D είναι η διάμετρος του

αγωγού, ενώ για $1.5D < d_f \leq 2.0D$ συνιστάται η χρήση ελαφρόπετρας. Η χρήση εύκαμπτων κόμβων αποτελεί την πιο αποτελεσματική και συμφέρουσα λύση για μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις $2.0D < d_f \leq 3.5D$, ενώ, για ακόμη μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις $d_f > 3.5D$ συστήνεται η προστασία του αγωγού από υπόγεια κιβώτια (culvert) οπλισμένου σκυροδέματος.

9

Βιβλιογραφικές Αναφορές

1. American Lifeline Alliance -ALA- (2005), "Design Guidelines for Seismic Resistant Water Pipeline Installations", FEMA, 255p.
2. American Lifeline Alliance -ALA/ASCE- (2001), "Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe", ASCE, (with addenda through February 2005) 76p.
3. American Society of Civil Engineers -ASCE- (1984), "Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems", Committee on Gas and Liquid Fuel Pipelines, ASCE, 473p.
4. Ballantyne, D., (1992), "Thoughts on a Pipeline Design Standard Incorporating Countermeasure for Permanent Ground Deformation," Proceedings of the Fourth Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Honolulu, Hawaii, Technical Report NCEER-92-0019, MCEER, Buffalo, New York, pp. 875-887.
5. Cheng L. (2001), "Seismic Design of Water Pipelines at Fault Crossing", Proceeding of The 2 Japan and U.S. Workshop on Seismic Measures for Water Supply, AWWA, Tokyo, Japan, August 2001.
6. ElHmadi K. & O'Rourke M.J. (1990), "Seismic damage to segmented buried pipelines", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 19, pp. 529-539.
7. Ford, D.B., (1983), "Joint Design for Pipelines Subjected to Large Ground Deformations," Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment, PVP-77, ASME, New York, June, pp. 160-165.
8. Isenberg, J. and Richardson, E., (1989), "Countermeasures to Mitigate Damage to Pipelines," Proceedings of the Second U.S.-Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines, Buffalo, New York, Technical Report NCEER-89-0032, MCEER, Buffalo, New York, pp. 468-482.

9. Karamitros D. K., Bouckovalas G. D. & Kouretzis G. P., (2007), "Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27, pp. 200–211.
10. Karamitros D.K., Bouckovalas G.D., Kouretzis G.P. & Gkesouli V. (2011), "An analytical method for strength verification of buried steel pipelines at normal fault crossings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31, pp. 1452–1464.
11. Kenedy R.P., Chow A.W. & Williamson R.A. (1977), "Fault movement effects on buried oil pipeline", *Transport Engineering Journal, ASCE*, 103, pp. 617-633.
12. Newmark N.M. & Hall W.J. (1975), "Pipeline design to resist large fault displacement", *Proceedings of the US National Conference on Earthquake Engineering*. University of Michigan, pp. 416-425.
13. O'Rourke T.D. & Trautmann C.H. (1981), "Earthquake Ground Rupture Effects on Jointed Pipe", *Proceedings of the Second Specialty Conference of the Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE*, August, pp. 65-80.
14. O'Rourke, M.J. and Liu, X.J., (1994), "Failure Criterion for Buried Pipe Subjected to Longitudinal PGD: Benchmark Case History," *Proceedings of the Fifth U.S.- Japan Workshop on Earthquake Resistant Design for Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction*, Snowbird, Utah, Technical Report NCEER-94-0026, MCEER, Buffalo, New York, pp. 639-652.
15. O'Rourke M.J. & Liu J.X. (2012), "Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines", *Monograph MCEER-12-MN04*, November 2012.
16. O'Rourke T.D., Jezerski J.M., Olson N.A., Bonneau A.L., Palmer M.C., Stewart H.E., O'Rourke M.J. & Abdoun T. (2009), "Geotechnics of Pipeline System Response to Earthquakes", *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV Congress 2009*.
17. Takada S. (1984), "Model Analysis and Experimental Study on Mechanical Behavior of Buried Ductile Iron Pipelines Subjected to Large Ground Deformations", *Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, Vol. VII, pp. 255-262.
18. Takada S., Hassani N. & Fukuda K. (2001), "A new proposal for simplified design of buried steel pipes crossing active faults", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 30, p. 1243–57.

19. Tan R.Y. & Yang C.H. (1988), "Structural Responses of Underground Pipelines to Dynamic Loadings", *Mech. Struct. & Mach.*, 16 (1), pp.103-122.
20. Trifonov O.V. & Cherniy V.P. (2010), "A semi-analytical approach to a nonlinear stress-strain analysis of buried steel pipelines crossing active faults", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (11): pp. 1298-1308.
21. Wang L.R.L. & Yeh Y. (1985), "A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement", *Earthquake Eng Struct Dyn*, 13: pp.75-96.
22. Wang L.R.L. (1996), "Some aspects of prioritization for rehabilitation of buried lifelines", *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 1902, Elsevier Science Ltd.
23. Wilson J.F. (1984), "Mechanics of Bellows: A critical Survey", *Int.J.Mech.Sci.* Vol. 26, No. 11/12, pp. 593-605, 1984.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

**Παραμετρική Διερεύνηση Επιρροής Τάσης Διαρροής
για Συνδυασμό Αξονικής Δύναμης και Καμπτικής
Ροπής**

A.1. Εισαγωγή

Στο παράρτημα αυτό εξετάζεται η ελαστοπλαστική συμπεριφορά ενός κοίλου κυκλικού χαλύβδινου αγωγού, ο οποίος καταπονείται από έναν συνδυασμό αξονικής δύναμης και ροπής περί το διαμήκη άξονά του, και διερευνάται η επιρροή της τάσης διαρροής του υλικού στη συμπεριφορά αυτή.

Πιο συγκεκριμένα, η δεδομένη διατομή αγωγού διακριτοποιείται σε επιμέρους στοιχεία και υιοθετείται μια απλοποιημένη διγραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του υλικού βάσει της σχέσης Ramberg-Osgood. Εν συνεχεία πραγματοποιούνται αριθμητικές αναλύσεις επιβάλλοντας στη διατομή ένα συνδυασμό εντατικών μεγεθών με α) αρχικά μεγάλη αξονική δύναμη και μικρή ροπή β) μια αρκετά μικρότερου μεγέθους αξονική δύναμη και μεγαλύτερη ροπή. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται μια παραμετρική διερεύνηση της επιρροής της τάσης διαρροής του υλικού ως προς τη συμπεριφορά της διατομής. Αυτό γίνεται για να εξακριβωθεί αν μια από τις δύο περιπτώσεις είναι πιο δυσμενής από την άλλη.

A.2. Προσέγγιση του Προβλήματος

Στην παρούσα ανάλυση εξετάζεται διατομή χαλύβδινου αγωγού, στην οποία επιβάλλονται συνδυασμοί φορτίσεων αξονικής δύναμης και ροπής περί το διαμήκη άξονα του αγωγού, με σκοπό τη μόρφωση των διαγραμμάτων τάσεων και παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής.

Επιλέχθηκε κοίλος κυκλικός χαλύβδινος αγωγός εξωτερικής διαμέτρου 0,762m και πάχους 0,0125m, η διατομή του οποίου διακριτοποιήθηκε σε 48 επιμέρους όμοια τμήματα.

Ο καταστατικός νόμος του υλικού που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να περιγραφεί από μία διγραμμική καμπύλη βασισμένη στο μαθηματικό τύπο Ramberg-Osgood, η σχέση της οποίας είναι η εξής:

$$\sigma(z) = \frac{(E_1 - E_2) \cdot \varepsilon(z)}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_2) \cdot \varepsilon(z)}{\sigma_1}\right)^r\right]^{1/r}} + E_2 \cdot \varepsilon(z) \quad (1)$$

Όπου

E_1 : Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα, κλίση του πρώτου κλάδου στο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων των Ramberg-Osgood, ίσο με 210GPa

E_2 : Κλίση του δεύτερου κλάδου στο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων των Ramberg-Osgood, περίπου ίση με 1088486kPa

σ_1 : Τάση διαρροής υλικού

r : Παράμετρος που ορίζει το σχήμα της καμπύλης στη περιοχή μετάβασης του προσομοιώματος των Ramberg-Osgood, ίση με 32.

Γίνεται η παραδοχή ότι η διατομή παραμένει επίπεδη και κάθετη στον άξονα του αγωγού και στην παραμορφωμένη της κατάσταση, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι ισχύει η ακόλουθη γραμμική σχέση (2) των παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής τόσο πριν όσο και μετά το σημείο διαρροής.

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_a + k \cdot z \quad (2)$$

Όπου:

ε_a : η παραμόρφωση στο μέσο της διατομής

k : η κλίση του διαγράμματος παραμορφώσεων της διατομής λόγω των καμπτικών παραμορφώσεων

Έχοντας ως δεδομένα τη γεωμετρία της διατομής, τον καταστατικό νόμο του υλικού (Σχέση 1) καθώς και την επιβαλλόμενη αξονική δύναμη N και ροπή M αναζητούνται οι τιμές των ε_a και k , για τις οποίες ισχύει η ισορροπία δυνάμεων και ροπών στη διατομή (Σχέσεις 3-4).

$$N = \int_{-R}^R \sigma(z) \cdot A(z) dz \quad (3)$$

$$M = \int_{-R}^R \sigma(z) \cdot A(z) \cdot z dz \quad (4)$$

Έτσι δίνοντας κάποιες αρχικές τιμές στις παραμέτρους ε_a και k , υπολογίζεται η αναπτυσσόμενη παραμόρφωση και τάση στο κέντρο καθενός από τα επιμέρους τμήματα της διατομής καθώς και η αξονική δύναμη και ροπή που αναπτύσσεται στο τμήμα αυτό. Με τη χρήση κάποιας αριθμητικής μεθόδου επίλυσης μη γραμμικών εξισώσεων μεταβάλλονται ταυτόχρονα οι τιμές των ε_a και k , μέχρις ότου το άθροισμα των αναπτυσσόμενων αξονικών δυνάμεων και ροπών των τμημάτων της διατομής να ισούται με τη δρώσα αξονική δύναμη και ροπή αντίστοιχα, δηλαδή μέχρις ότου να εξασφαλίζεται η ισορροπία της διατομής. Για τις τελικές αυτές τιμές των ε_a και k προκύπτουν οι ζητούμενες κατανομές των τάσεων και παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής.

Όσον αφορά την αριθμητική μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε, αρχικά επιλέχτηκε να εφαρμοστεί η μέθοδος της τέμνουσας, η οποία αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου Newton-Raphson και μας απαλλάσσει από το δύσκολο υπολογισμό της παραγώγου. Ωστόσο, επειδή παρατηρήθηκε ότι στο συγκεκριμένο πρόβλημα η μέθοδος αυτή δε συγκλίνει πάντα, τελικά εφαρμόστηκε η μέθοδος της διχοτόμησης.

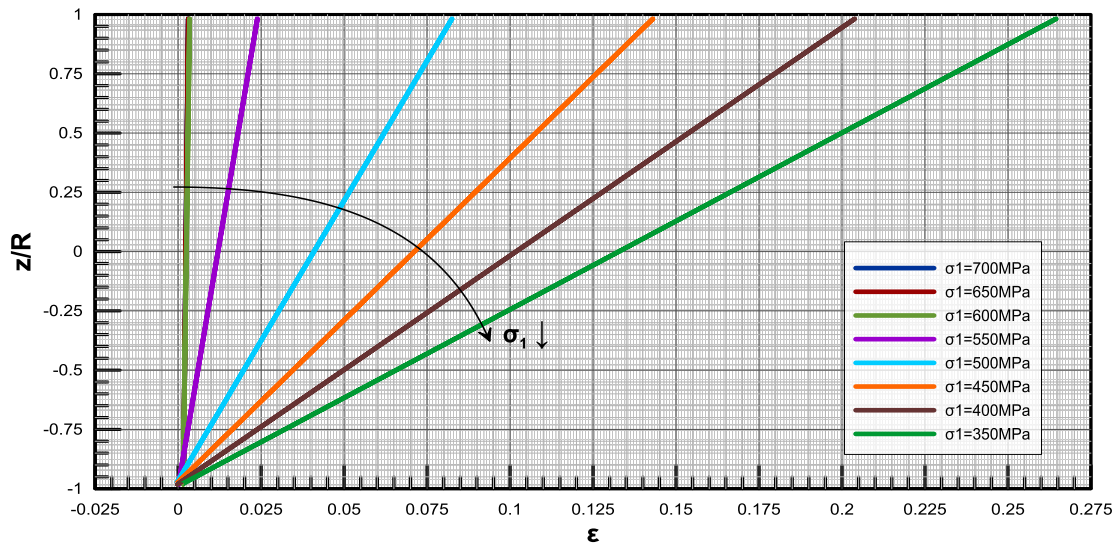
A.3. Παραμετρική διερεύνηση επιρροής της τάσης διαρροής

Πραγματοποιήθηκαν δύο ομάδες αναλύσεων με διαφορετικό συνδυασμό εξωτερικά επιβαλλόμενων μεγεθών N και M . Πιο συγκεκριμένα στην πρώτη ομάδα αναλύσεων επιβάλλεται στη διατομή ροπή $M=850\text{kNm}$ και μεγάλη αξονική δύναμη $N=14400\text{kN}$, ενώ στη δεύτερη ομάδα ροπή $M=2100\text{kNm}$ και αρκετά μικρότερη αξονική δύναμη $N=7500\text{kN}$. Για κάθε μια ομάδα αναλύσεων πραγματοποιήθηκαν αρκετές επιμέρους αναλύσεις για διαφορετικές τιμές της τάσης διαρροής του χάλυβα, έτσι ώστε να διερευνηθεί η επιρροή της τάσης διαρροής στις κατανομές τάσεων και παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής.

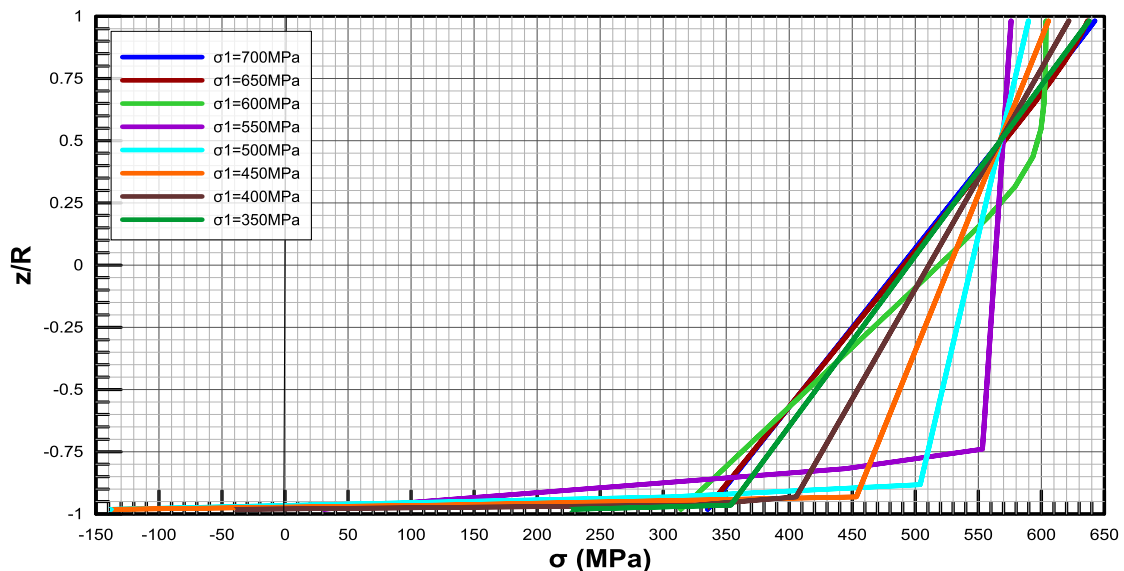
1^η Ομάδα αναλύσεων (Μεγάλη αξονική δύναμη & Μικρή Ροπή)

Στην πρώτη ομάδα αναλύσεων επιβλήθηκε στη διατομή αξονική δύναμη $N=14000\text{kN}$ και ροπή $M=850\text{kNm}$ περί το διαμήκη άξονα του αγωγού. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η κατανομή παραμορφώσεων και στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων καθ' ύψος της διατομής. Στο Σχήμα 3 απεικονίζεται η

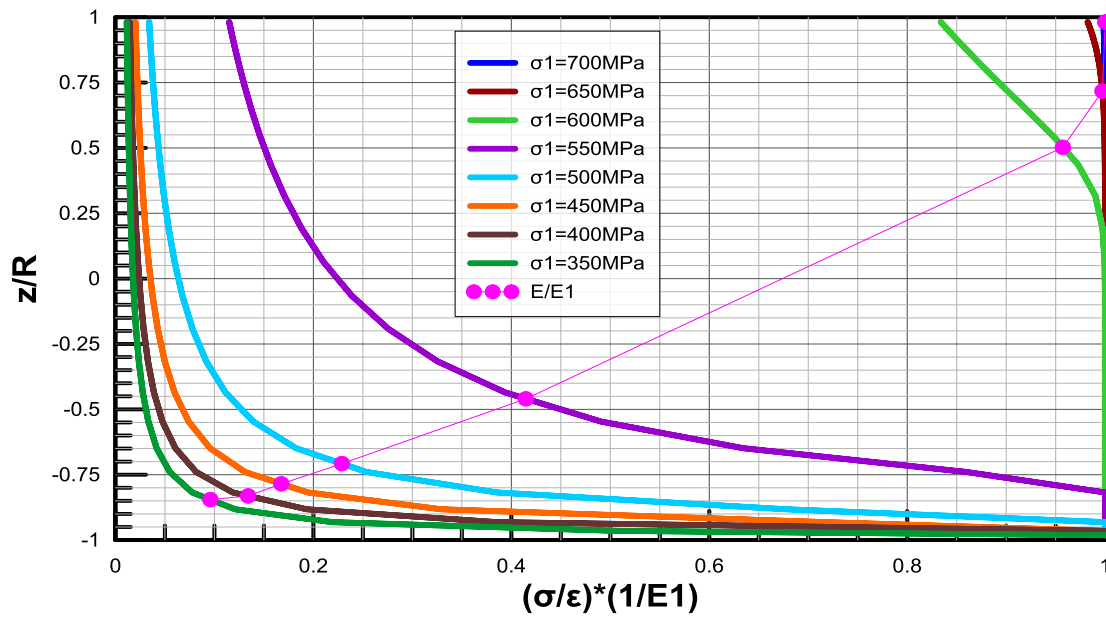
κατανομή του λόγου του μέτρου ελαστικότητας E προς το αρχικό μέτρο ελαστικότητας E_1 καθ' ύψος της διατομής του αγωγού. Η καμπύλη με το ροζ χρώμα που υπάρχει στο τελευταίο διάγραμμα ενώνει τις μέσες τιμές του λόγου αυτού για κάθε τιμή της τάσης διαρροής σ_1 . Τα διάφορα χρώματα σε όλα τα διαγράμματα αντιπροσωπεύουν τις διάφορες τάσεις διαρροής.



Σχήμα 1: Κατανομή παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής ($N=14000\text{kN}$ & $M=850\text{kNm}$).



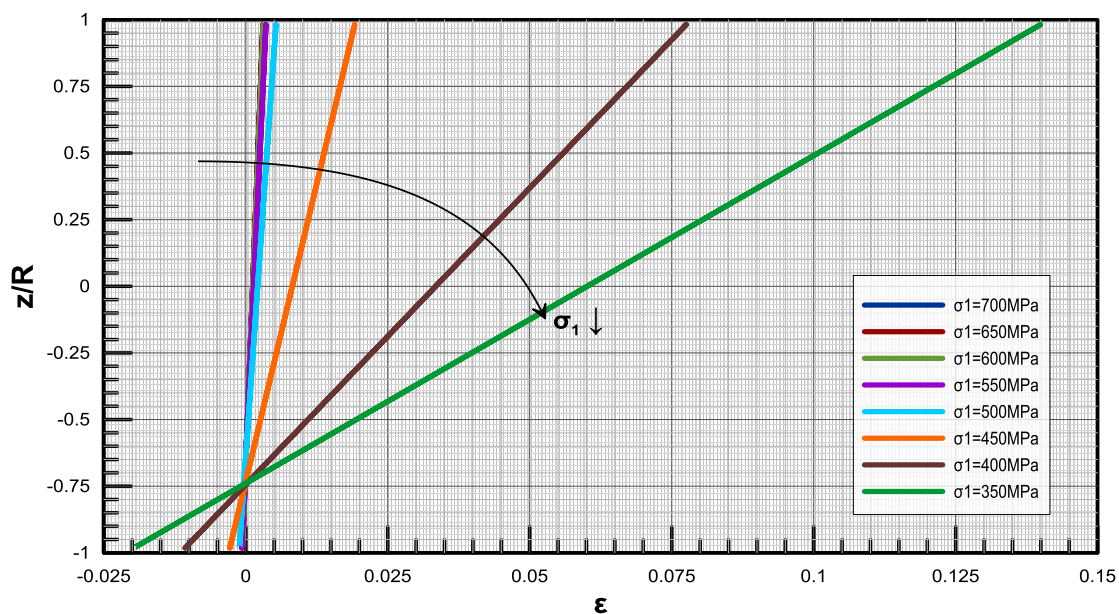
Σχήμα 2: Κατανομή τάσεων καθ' ύψος της διατομής ($N=14000\text{kN}$ & $M=850\text{kNm}$).



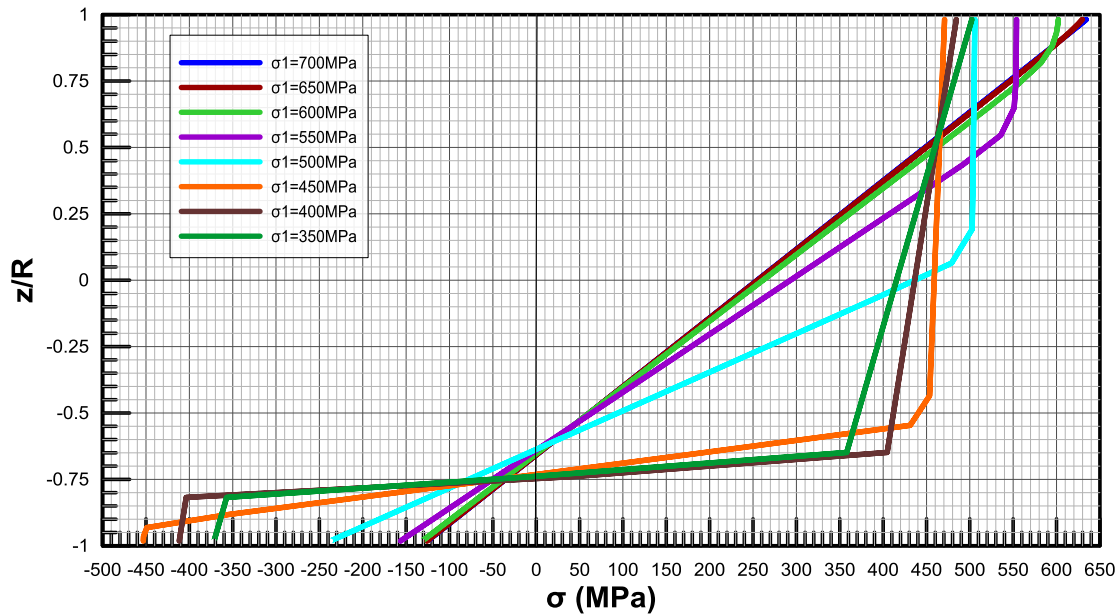
Σχήμα 3: Διάγραμμα E/E_1 καθ' ύψος της διατομής ($N=14000kN$ & $M=850kNm$).

2η Ομάδα αναλύσεων (Μικρή αξονική δύναμη & Μεγάλη Ροπή)

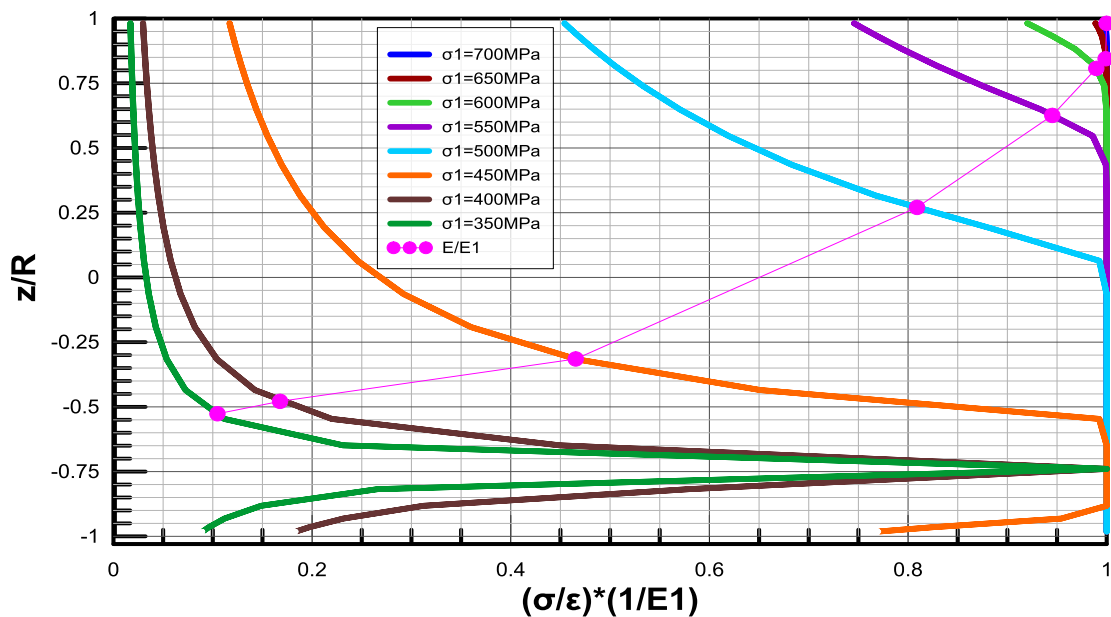
Στη δεύτερη ομάδα αναλύσεων επιβλήθηκε στη διατομή αρκετά μικρότερη αξονική δύναμη $N=7500kN$ και ροπή $M=2100kNm$ περί το διαμήκη άξονα του αγωγού. Στα Σχήματα 4 έως 6 απεικονίζονται αντίστοιχα διαγράμματα για την περίπτωση των παραμορφώσεων, της τάσης και του μέτρου ελαστικότητας.



Σχήμα 4: Κατανομή παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής ($N=7500kN$ & $M=2100kNm$).



Σχήμα 5: Κατανομή τάσεων καθ' ύψος της διατομής (N=7500kN & M=2100kNm).



Σχήμα 6: Διάγραμμα E/E₁ καθ' ύψος της διατομής (N=7500kN & M=2100kNm).

Σχολιασμός

Στα Σχήματα 1 και 4 παρατηρείται η κατανομή των παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής να αποτυπώνεται με ευθείες γραμμές που αντιστοιχούν στις διάφορες τάσεις διαρροής του χάλυβα, γεγονός που επιβεβαιώνει την παραδοχή που ήδη έχει γίνει για επιπεδότητα της διατομής. Επιπρόσθετα είναι φανερό ότι καθώς η τιμή της τάσης διαρροής σ_1 του χάλυβα μειώνεται, η κλίση του διαγράμματος κατανομής των

παραμορφώσεων επίσης μειώνεται, με τις ευθείες γραμμές να περιστρέφονται γύρω από ένα σταθερό σημείο. Όσον αφορά και τις δύο ομάδες αναλύσεων η διατομή παραμένει όλη στην ελαστική περιοχή μέχρι και για $\sigma_1=650\text{MPa}$. Από εκεί και πέρα μείωση στην τάση διαρροής προκαλεί πλαστικοποίηση μέρους της.

Όσον αφορά τις κατανομές των τάσεων καθ' ύψος της διατομής που απεικονίζονται στα Σχήματα 2 και 5, αυτές αρχικά για τις μεγαλύτερες τιμές της τάσης διαρροής σ_1 αποτελούνται από ευθείες γραμμές, αφού το σύνολο της διατομής βρίσκεται ακόμη στην ελαστική περιοχή. Ωστόσο, καθώς η τιμή της τάσης διαρροής μειώνεται, μέρος της διατομής πλαστικοποιείται με αποτέλεσμα η κλίση του διαγράμματος να αλλάζει στα σημεία όπου η αναπτυσσόμενη τάση εξισώνεται με την τάση διαρροής. Επιπρόσθετα, βλέποντας τα αποτελέσματα από την πρώτη ομάδα αναλύσεων παρατηρείται ότι για μικρή μείωση στην τάση διαρροής από 600MPa σε 550MPa , πλαστικοποιείται μεγάλο μέρος της διατομής, ενώ έπειτα μπορεί να συμπεράνει κανείς πως ο ρυθμός με τον οποίο πλαστικοποιείται η διατομή με περαιτέρω μείωση στην τάση διαρροής είναι σταθερός. Το ίδιο παρατηρείται και στη δεύτερη ομάδα αναλύσεων, όταν η τάση διαρροής μεταβάλλεται από 450MPa σε 400MPa . Επίσης στη δεύτερη ομάδα αναλύσεων παρατηρείται ότι για τις τιμές ορίου διαρροής $450, 400$ και 350MPa σχηματίζονται δύο γωνίες στο διάγραμμα τάσεων καθ' ύψος της διατομής, γεγονός το οποίο οφείλεται στο ότι η διατομή μπαίνει στον πλαστικό κλάδο τόσο στο πάνω όσο και στο κάτω μέρος της.

Τα Σχήματα 3 και 6 που απεικονίζουν την κατανομή του λόγου του μέτρου ελαστικότητας E προς το αρχικό μέτρο ελαστικότητας E_1 καθ' ύψος της διατομής του αγωγού παρατηρείται ότι οι μέσες τιμές του λόγου E/E_1 μειώνονται καθώς η τιμή της τάσης διαρροής μειώνεται, επειδή όλο και μεγαλύτερο τμήμα της διατομής πλαστικοποιείται. Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι καθώς κάποια μέρη της διατομής αρχίζουν να περνάνε από την ελαστική στην πλαστική περιοχή, για μικρή μείωση του σ_1 παρατηρείται πολύ μεγάλη απότομη μείωση του λόγου E/E_1 , γεγονός το οποίο παρατηρείται έντονα και στις δύο ομάδες αναλύσεων. Αυτό που αξίζει να αναφερθεί στο Σχήμα 3 που αφορά τη μεγάλη αξονική δύναμη, είναι η απότομη αλλαγή στην συμπεριφορά της διατομής για μείωση του ορίου διαρροής από 600MPa σε 550MPa , όπου πλέον σχεδόν όλη η διατομή έχει ξεπεράσει το όριο διαρροής.

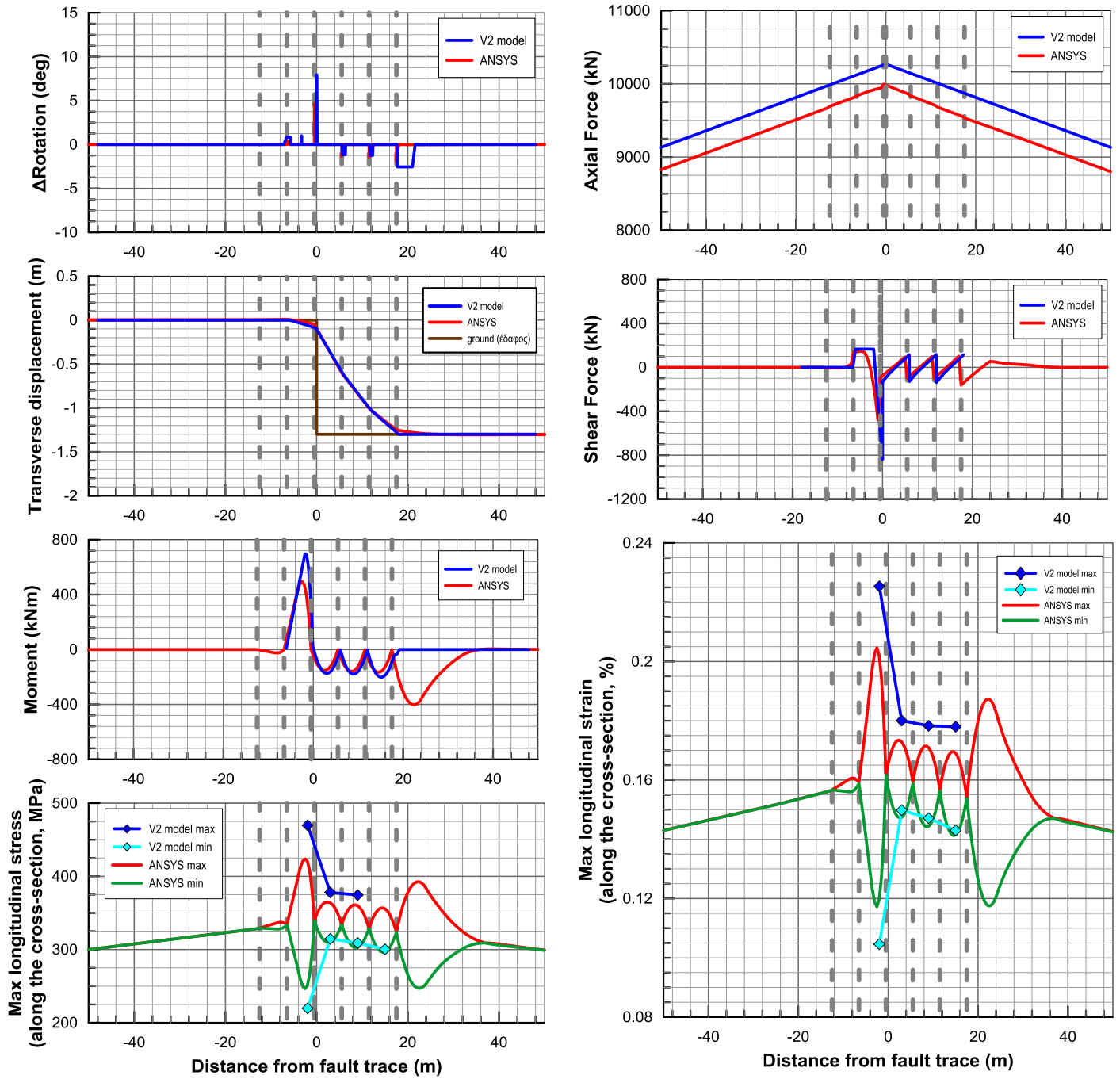
A.4. Συμπεράσματα

Και στις δύο ομάδες αναλύσεων επιβεβαιώνεται η αρχική παραδοχή, ότι δηλαδή ισχύει η επιπεδότητα της διατομής και διατηρείται γραμμική κατανομή των παραμορφώσεων. Επίσης παρατηρείται πως καθώς μειώνεται η τάση διαρροής υπάρχει αύξηση στις παραμορφώσεις που παραλαμβάνει κάθε διατομή. Επισημαίνεται ακόμη το γεγονός ότι ενώ ο ρυθμός με τον οποίο μειώνεται η τάση διαρροής είναι σταθερός, εντούτοις ο ρυθμός με τον οποίο κατανέμονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις δεν είναι ο ίδιος. Όσο μειώνεται όμως το όριο διαρροής είναι εμφανές ότι ο πλαστικός κλάδος καλύπτει ένα μεγαλύτερο εύρος παραμορφώσεων και τάσεων. Από τα διαγράμματα της τάσης και του E/E_1 καθ' ύψος της διατομής μπορεί κανείς να συμπεράνει ποιο κομμάτι έχει πλαστικοποιηθεί και ποιο βρίσκεται στην ελαστική περιοχή.

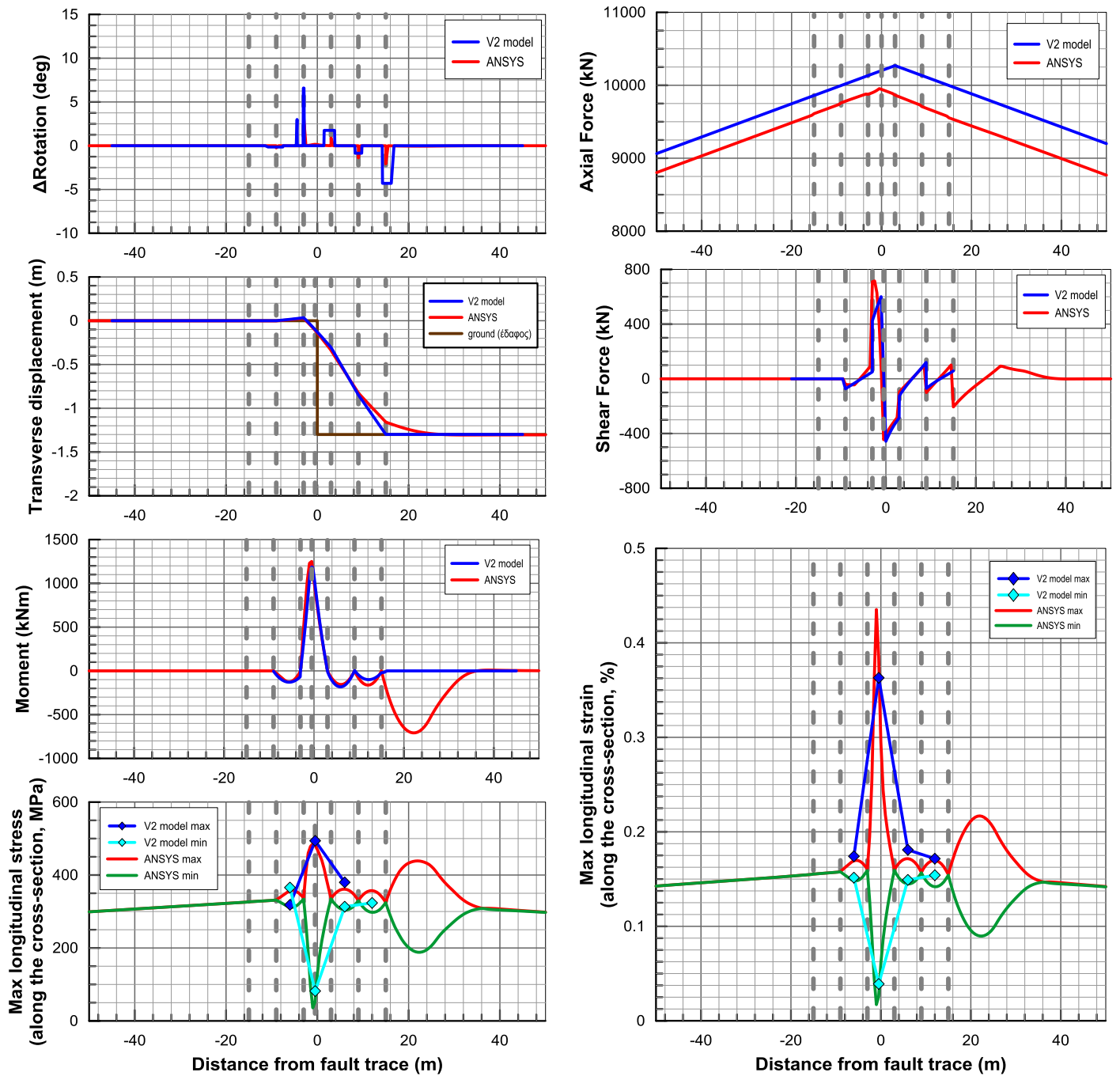
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Αναλυτικές και αριθμητικές επιλύσεις

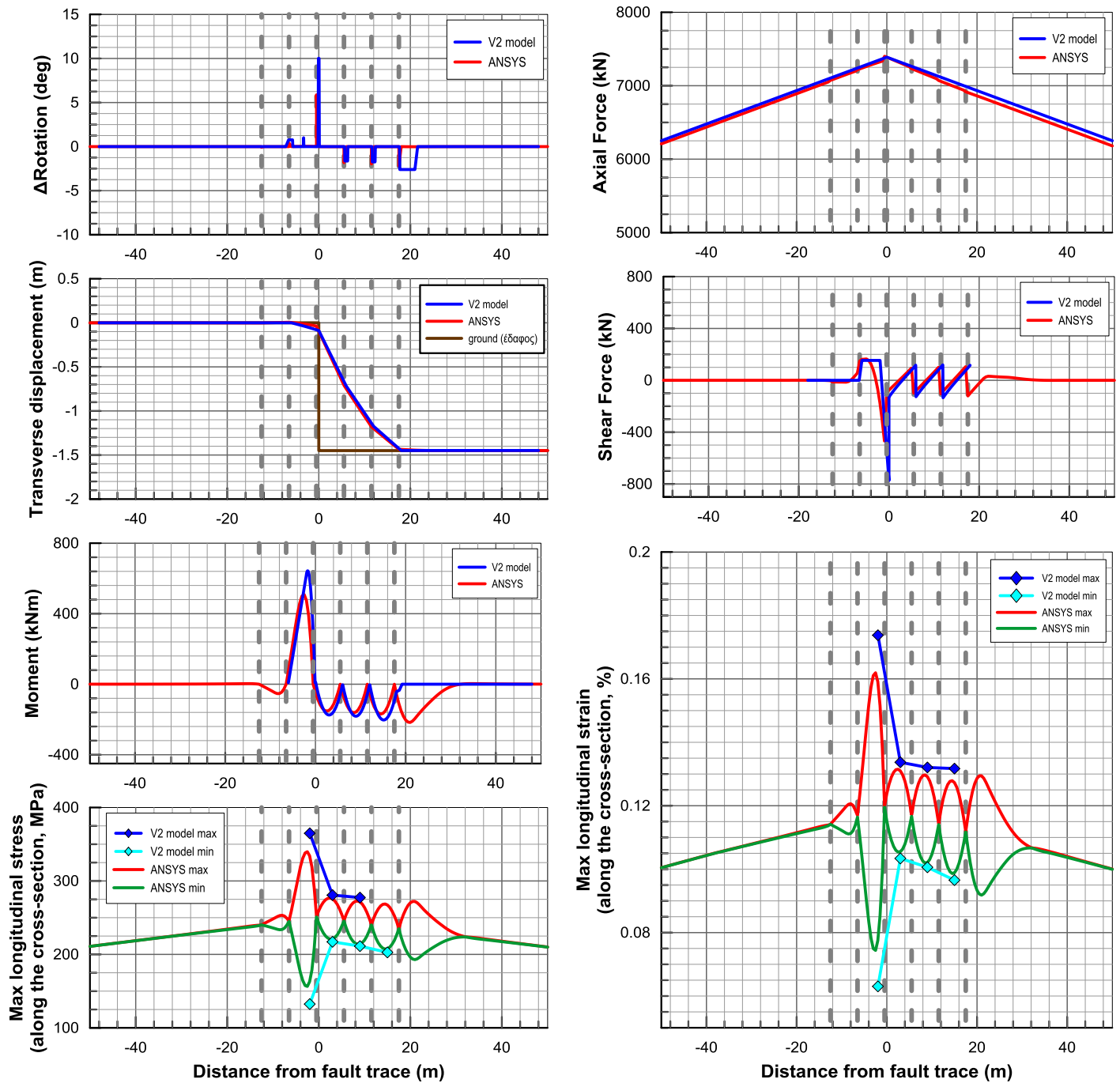
Β.1. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,50m$



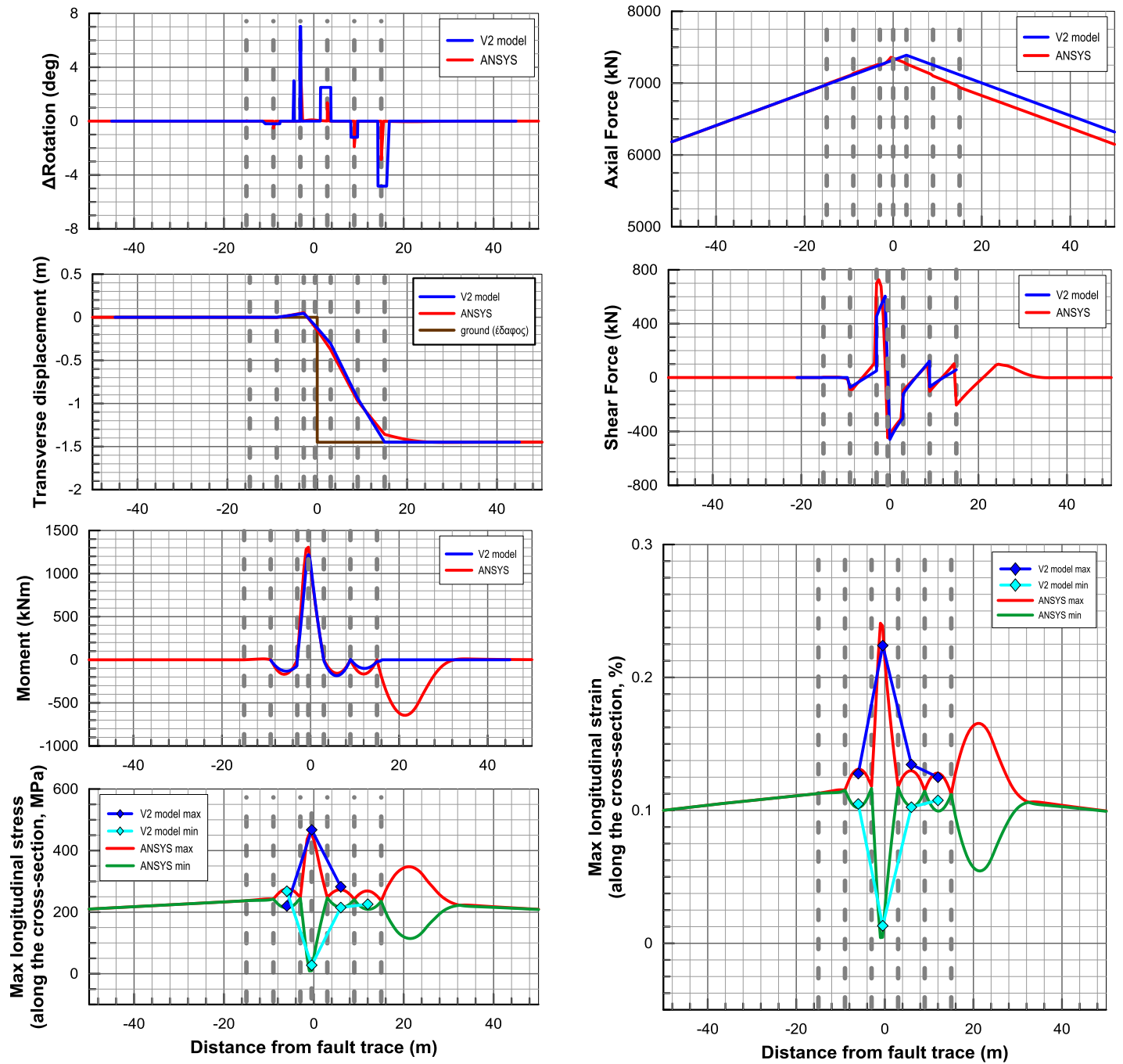
Β.2. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,50m$



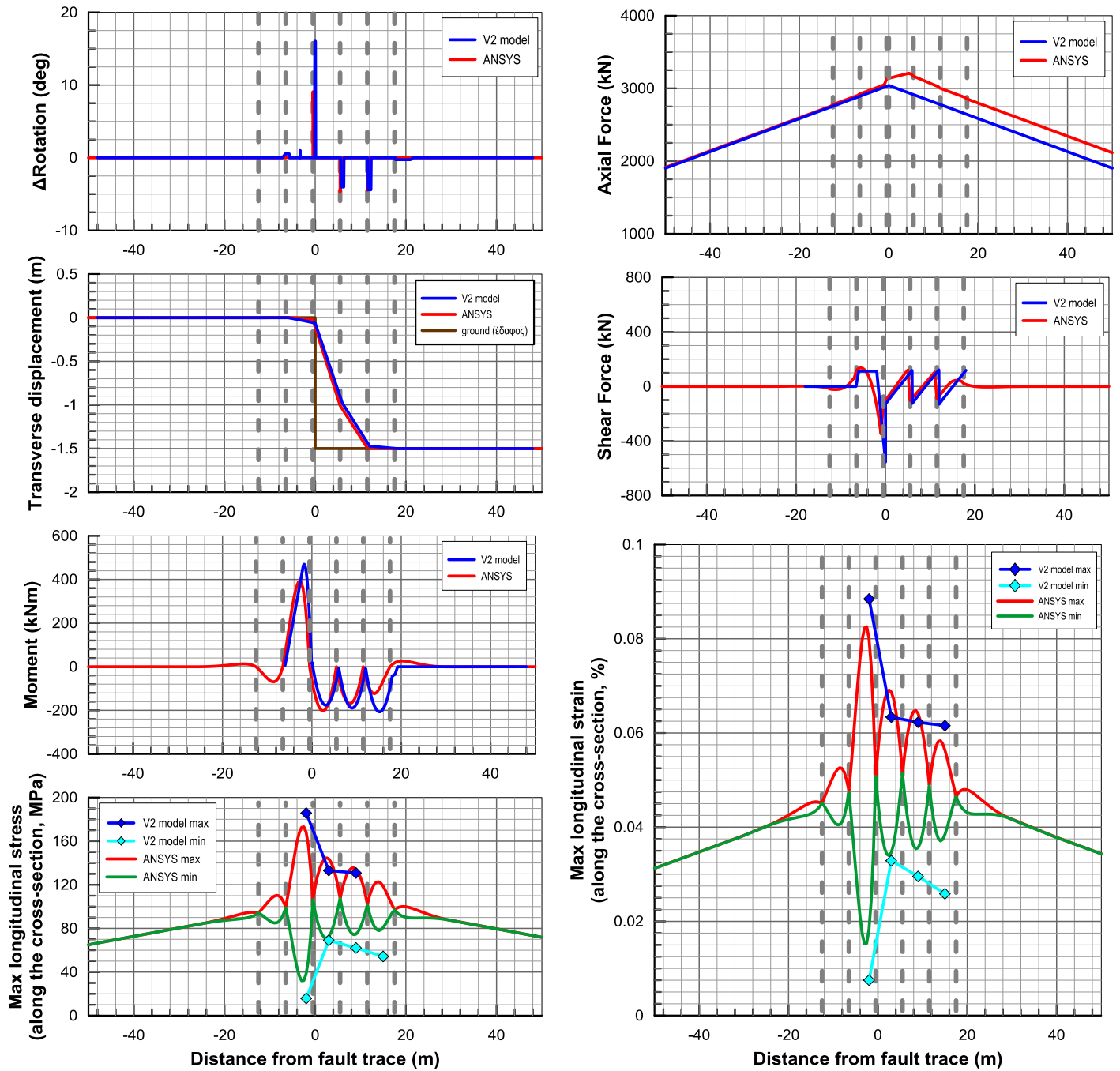
Β.3. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,50m$



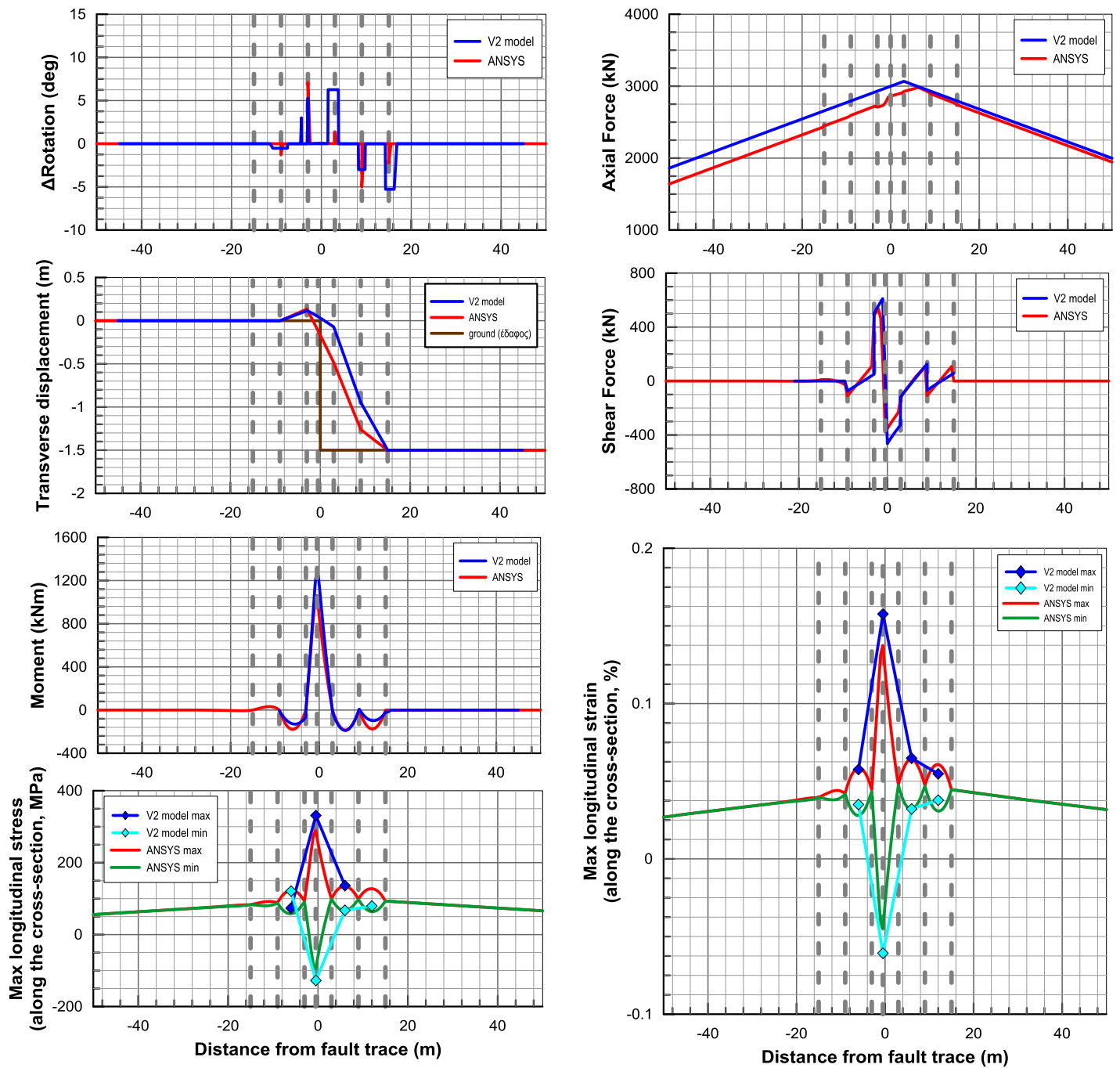
Β.4. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,50m$



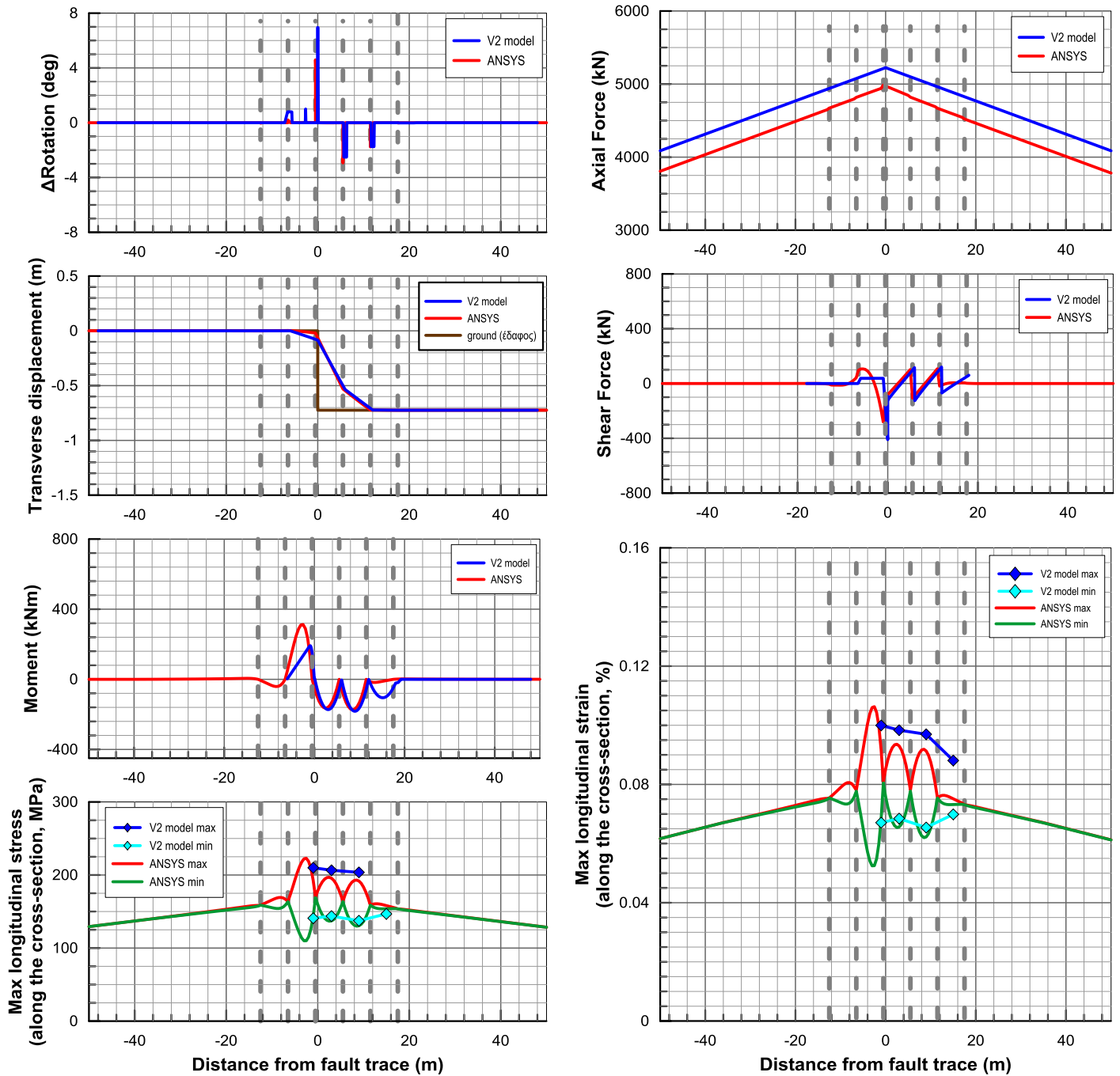
Β.5. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,50m$



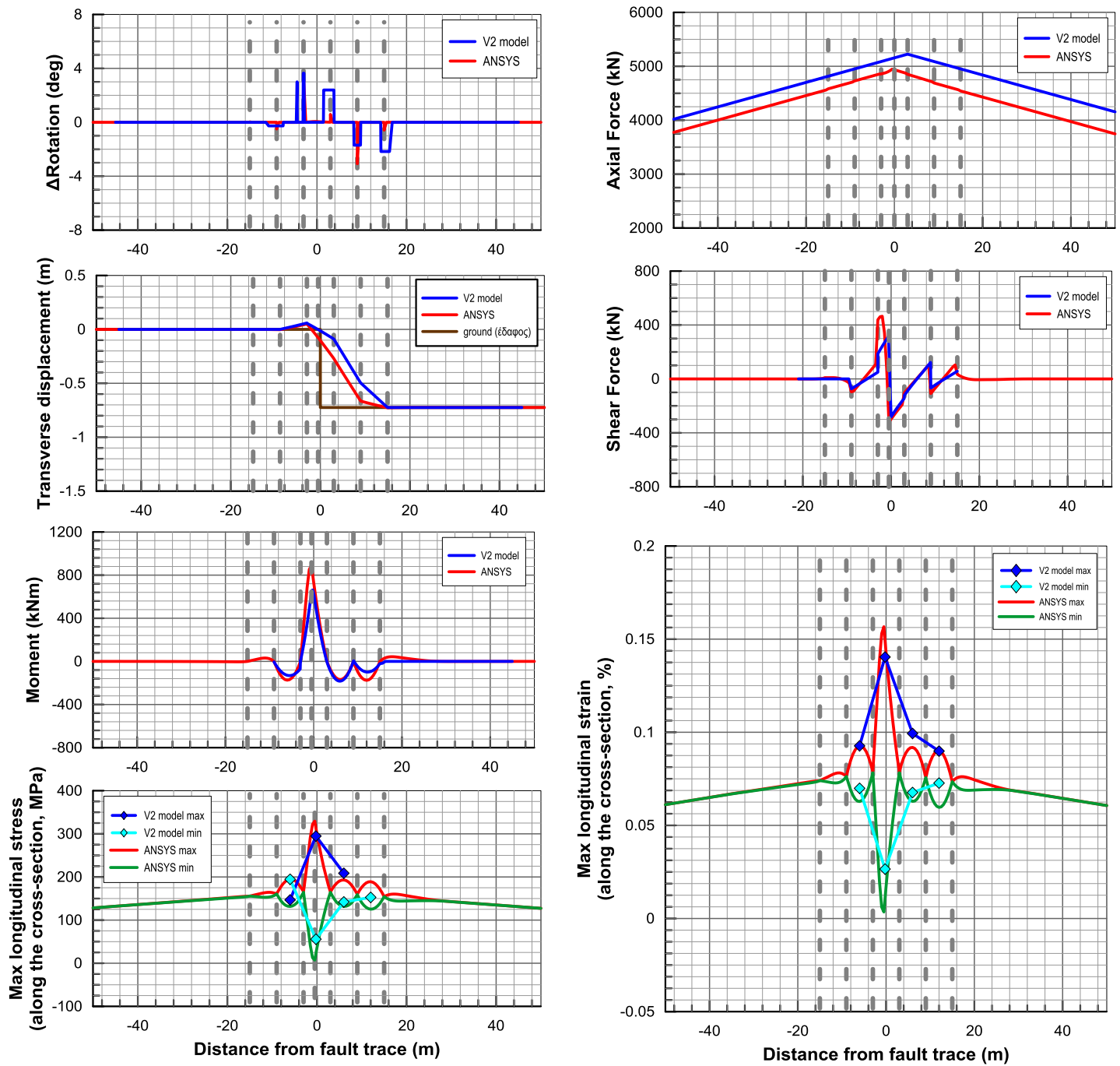
Β.6. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,50m$



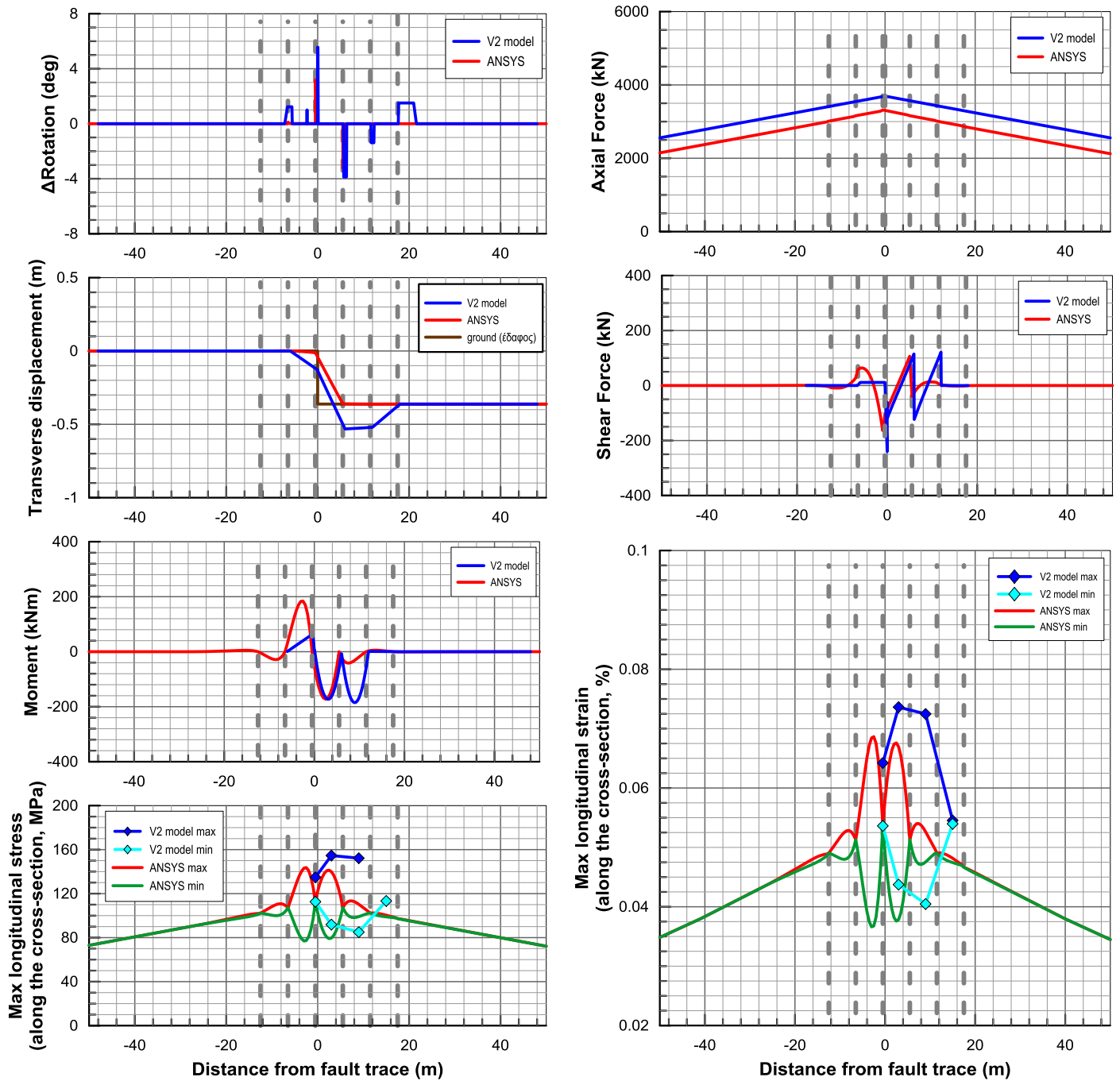
Β.7. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,75m$



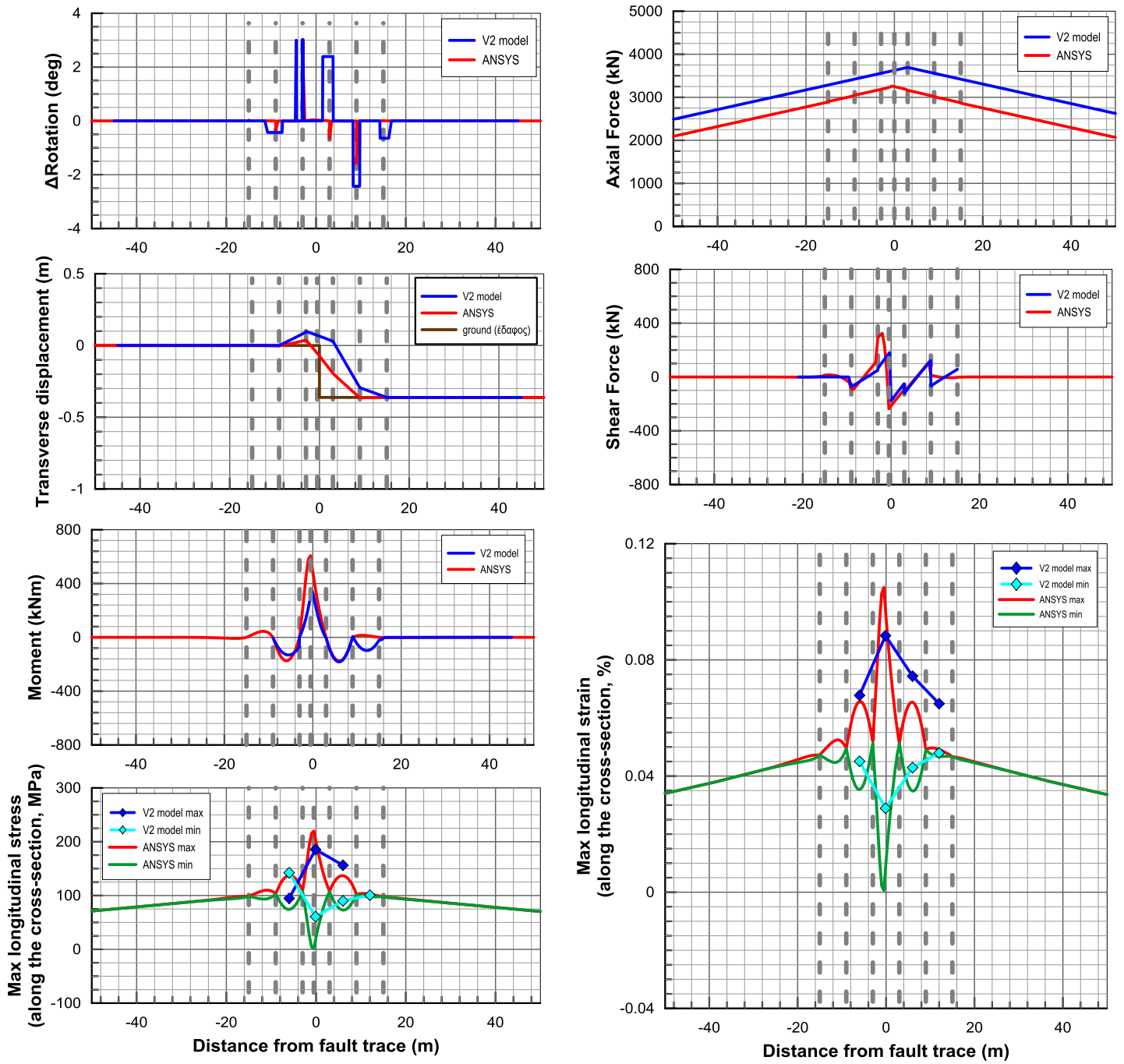
Β.8. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,75m$



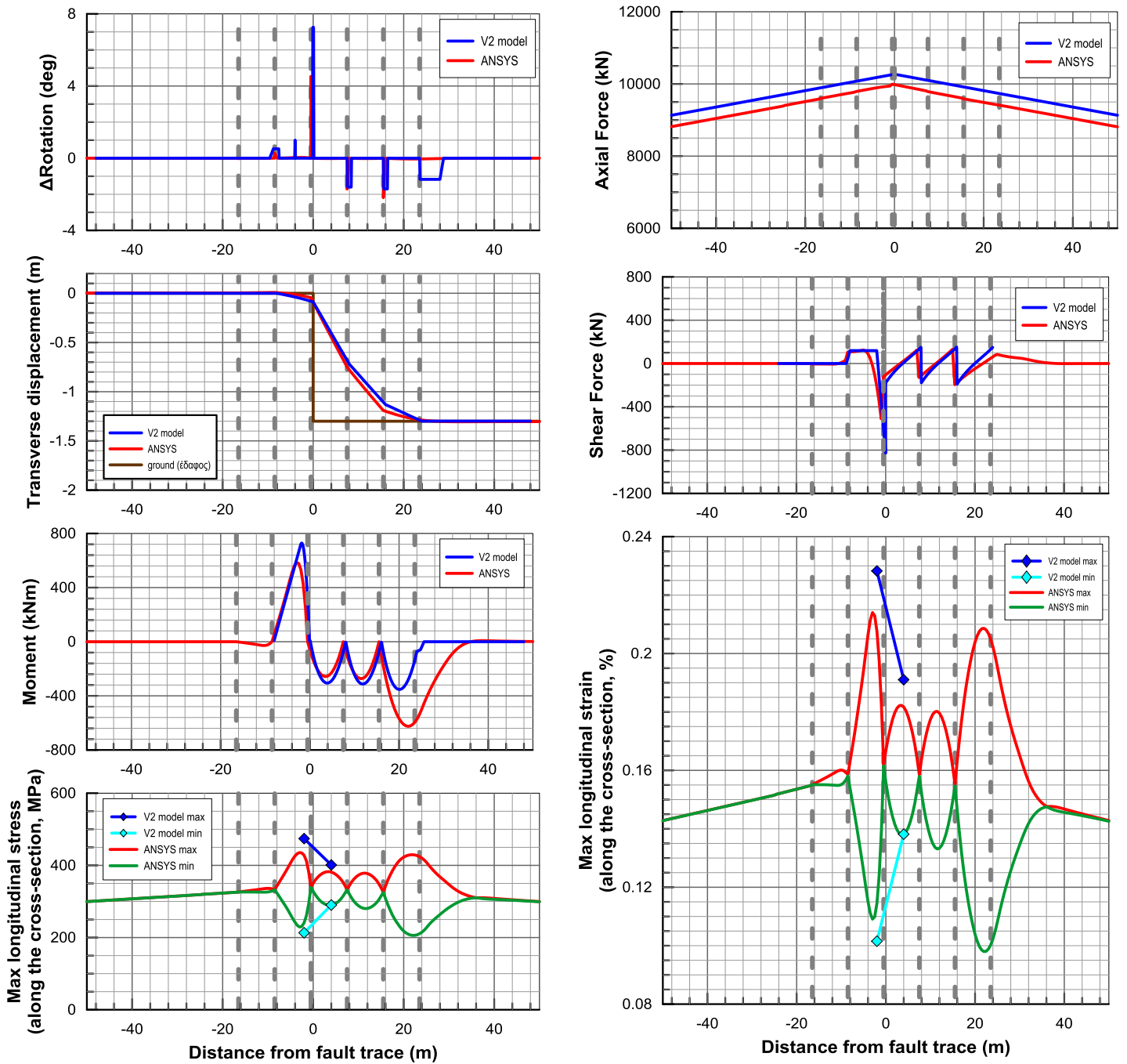
Β.9. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,375m$



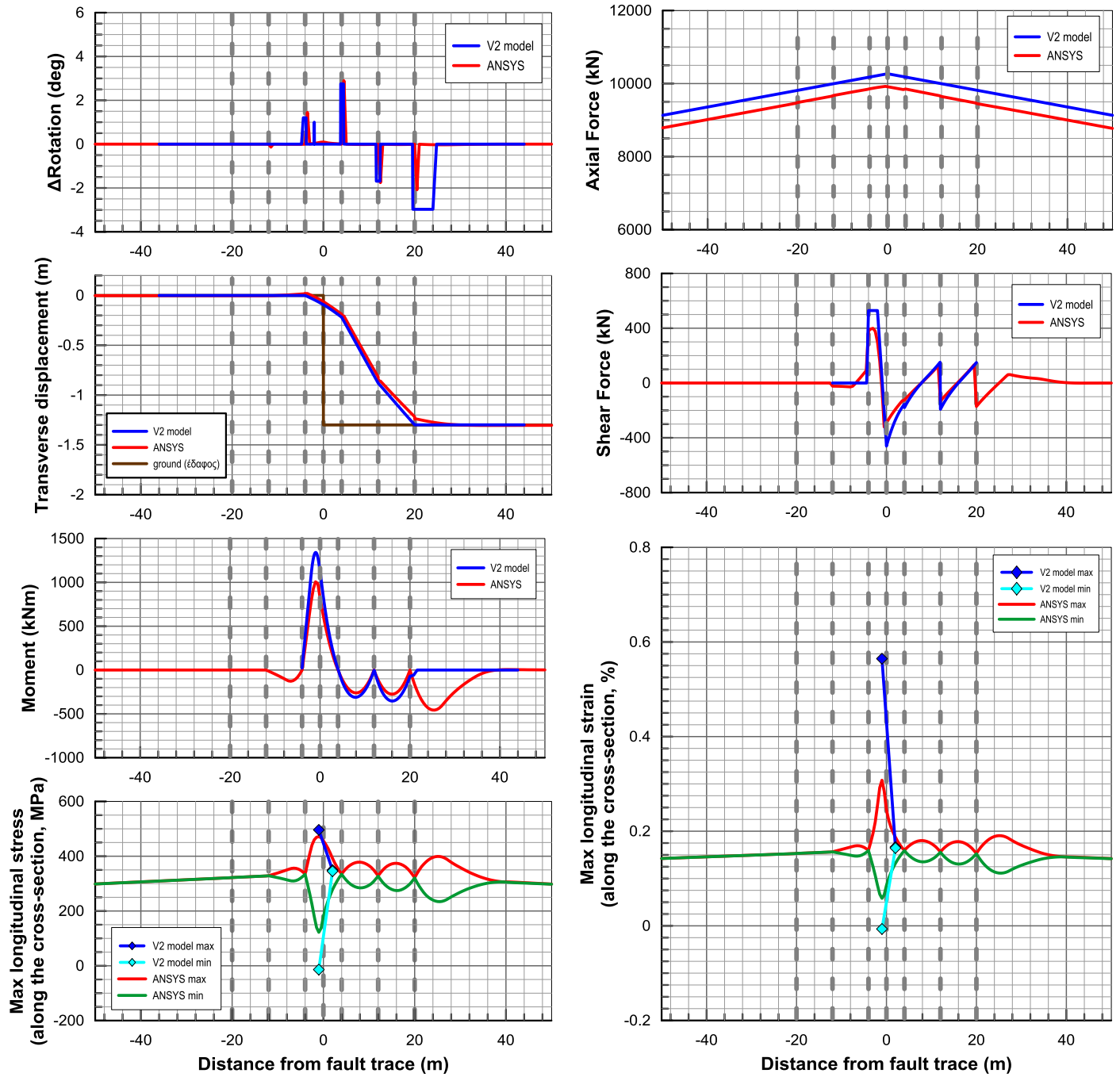
B.10. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,375m$



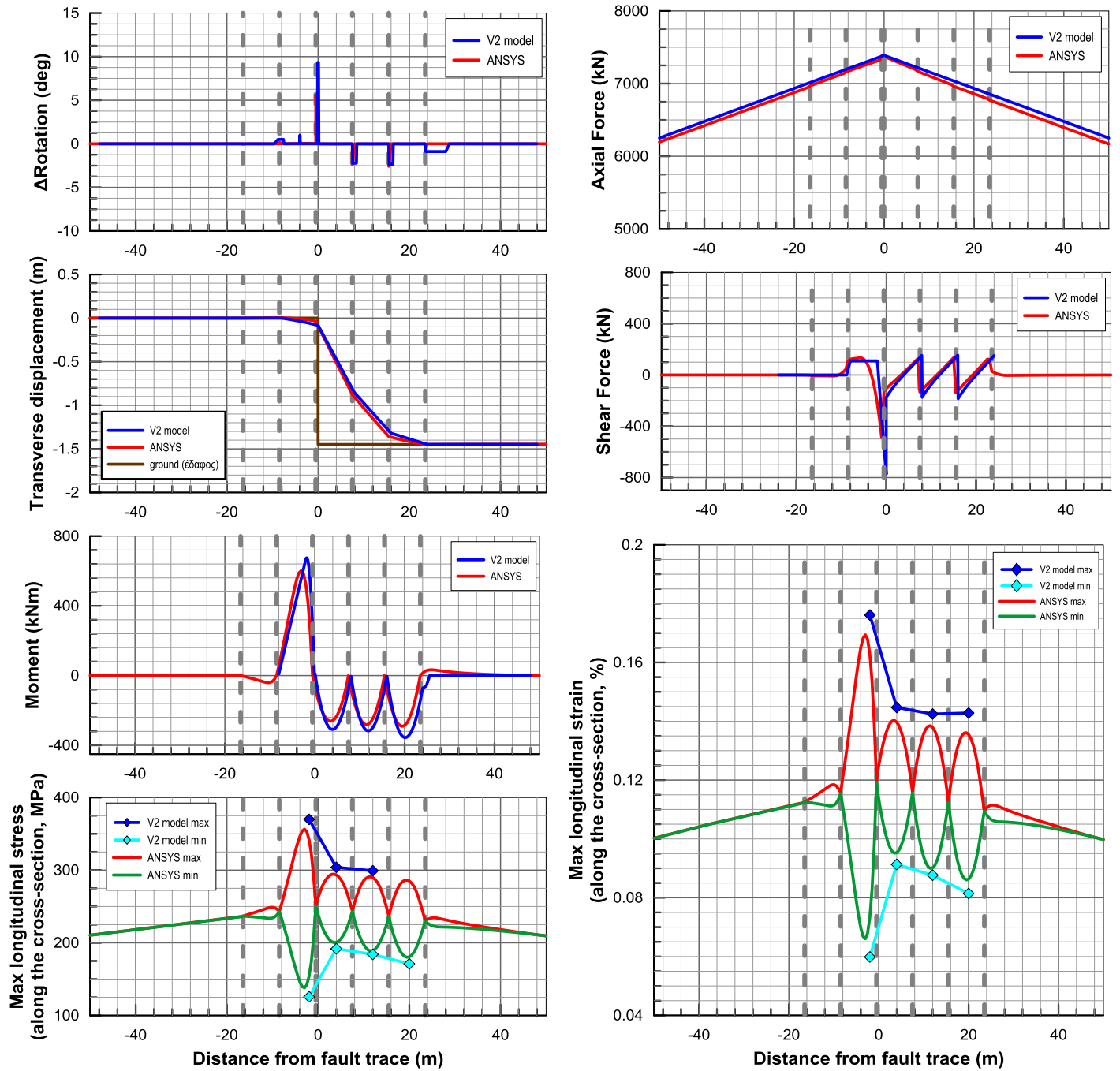
B.11. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,50m$



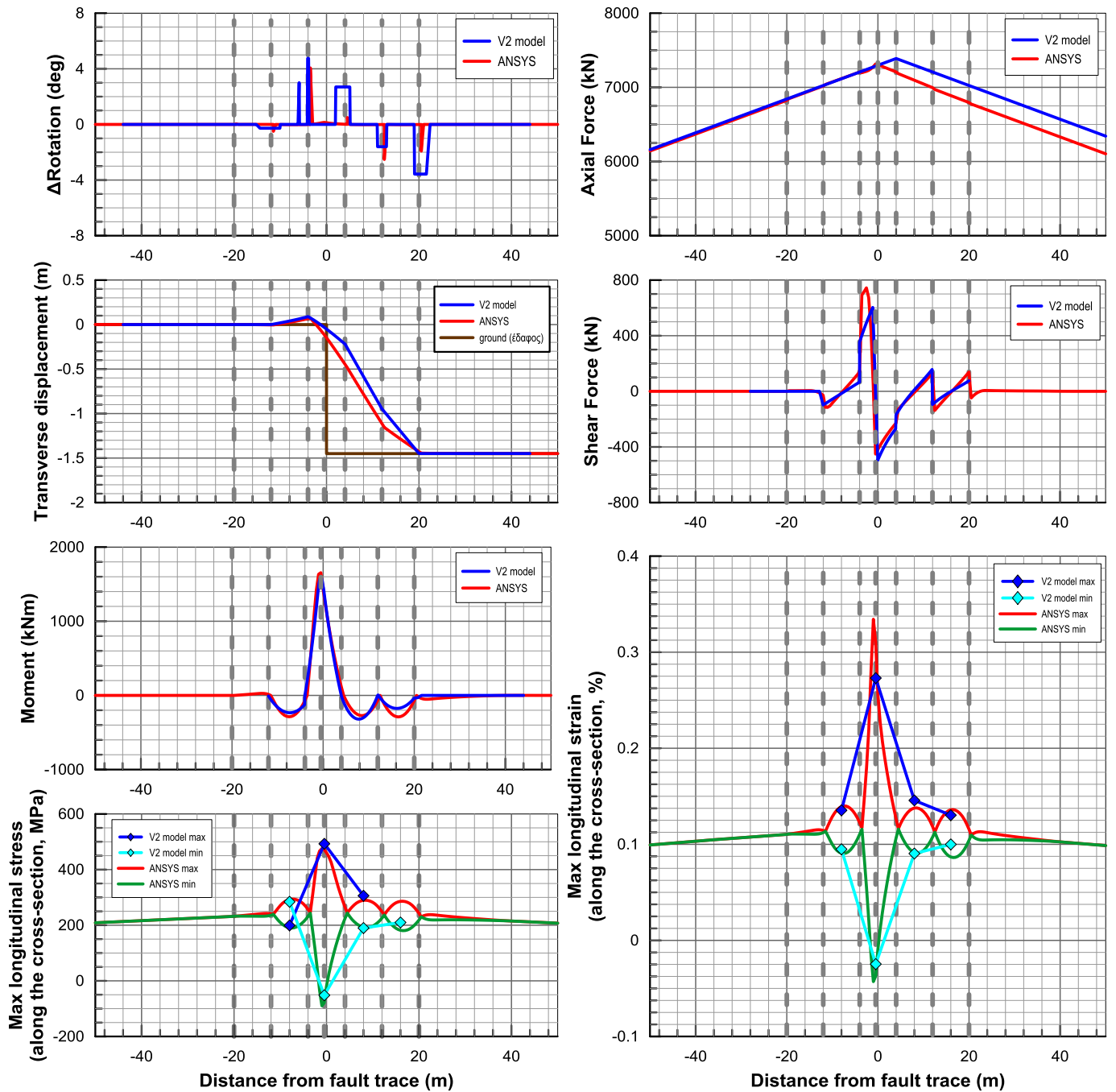
Β.12. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,50m$



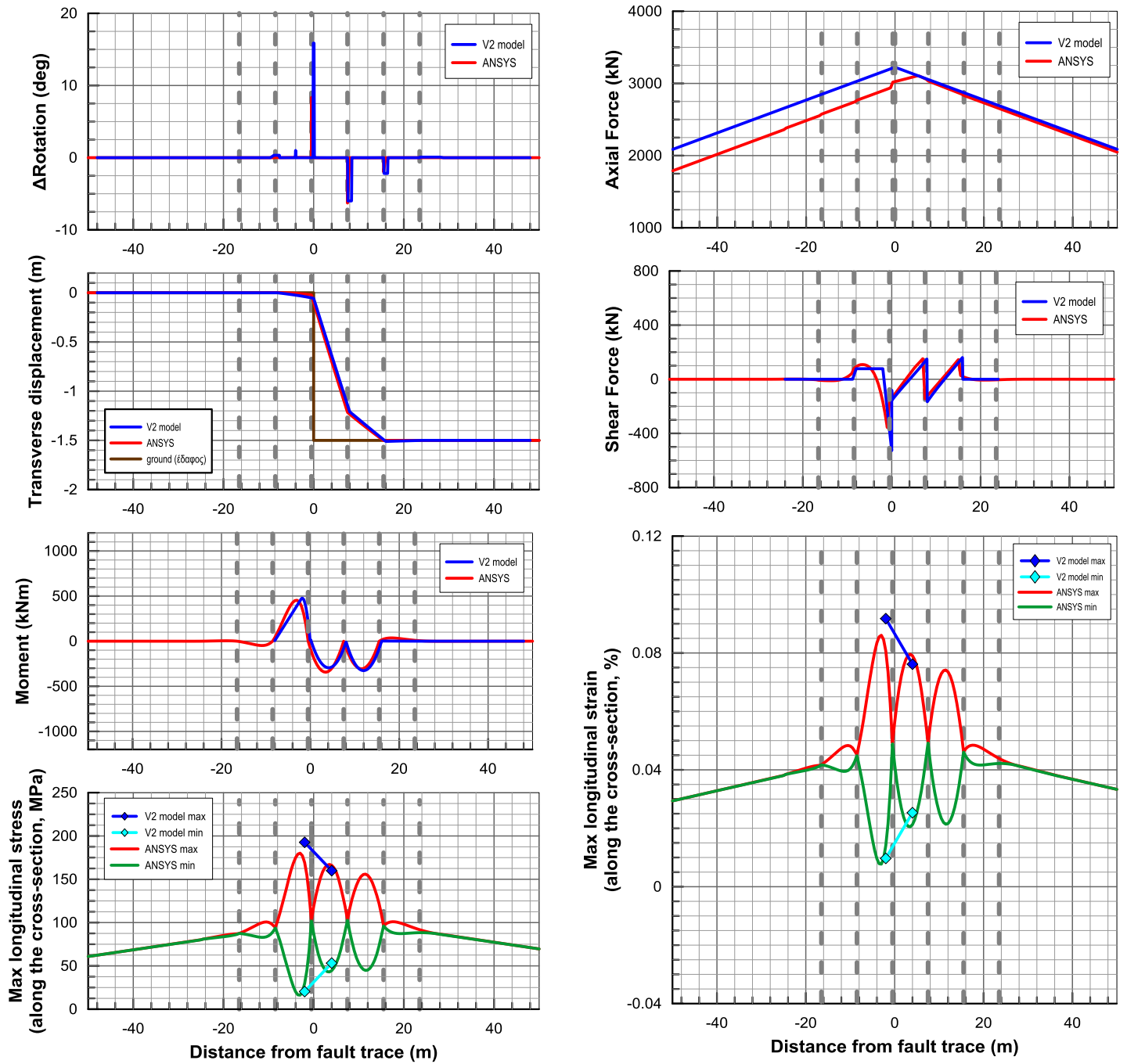
B.13. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,50m$



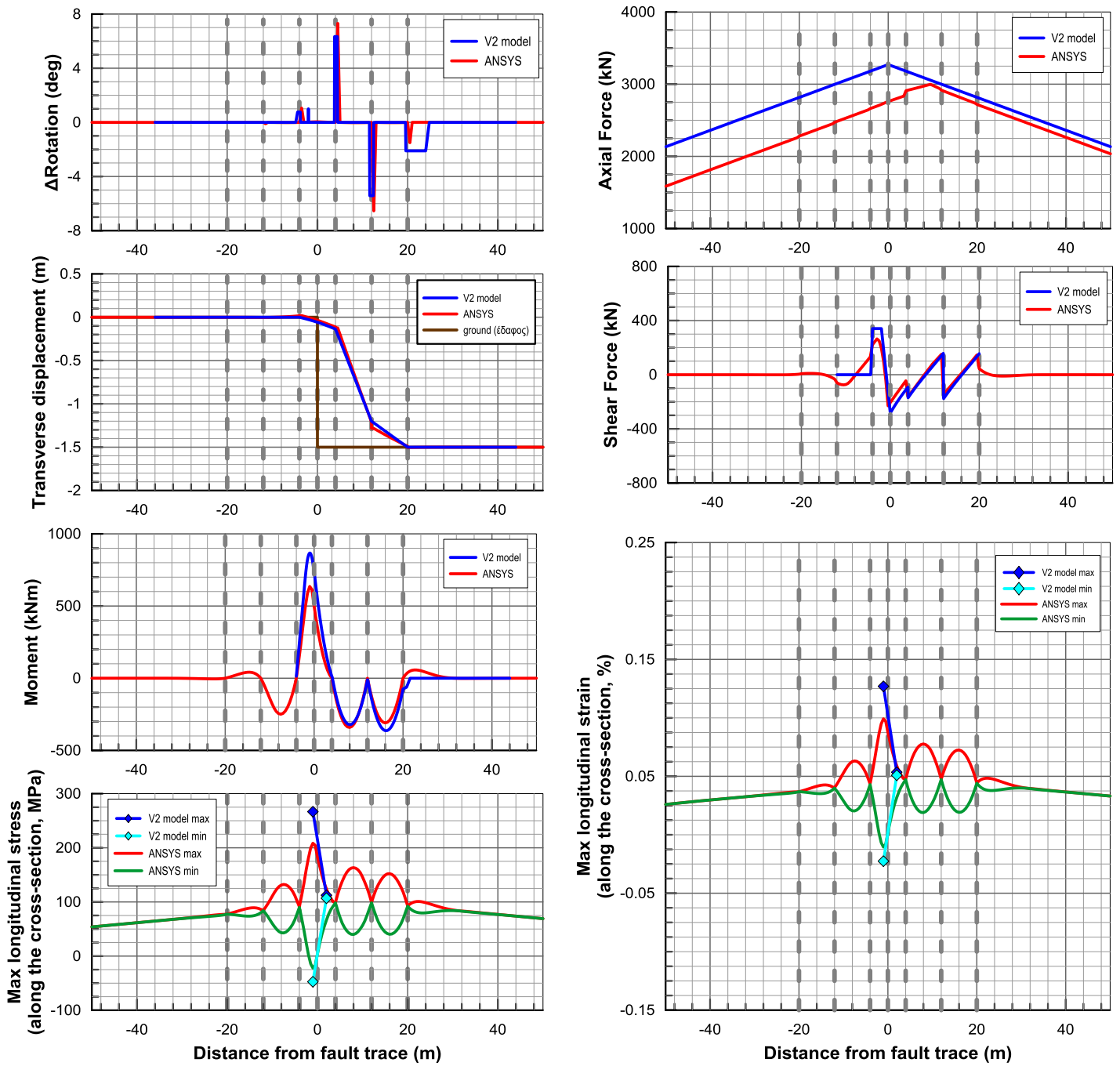
B.14. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,50m$



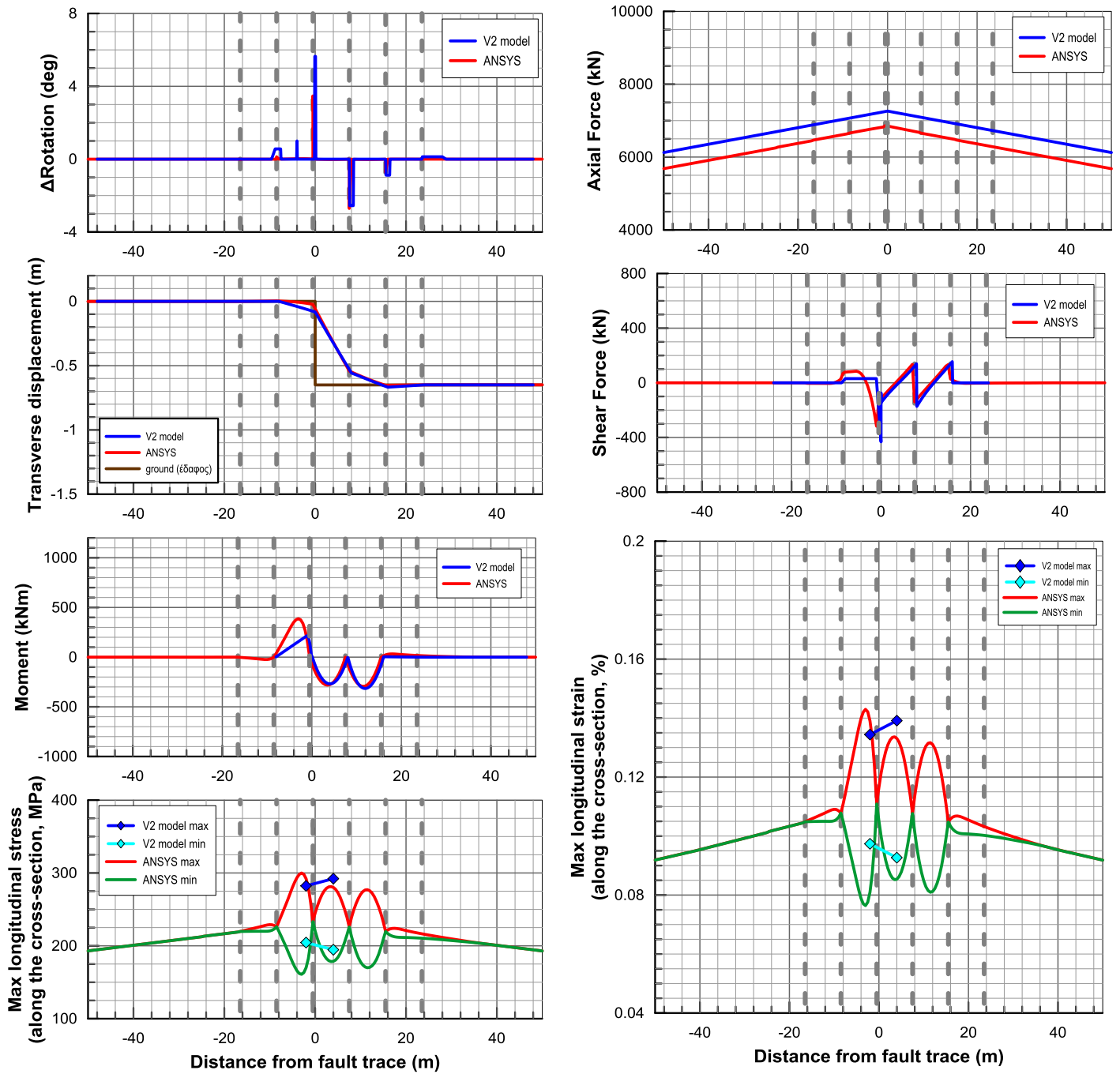
B.15. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,50m$



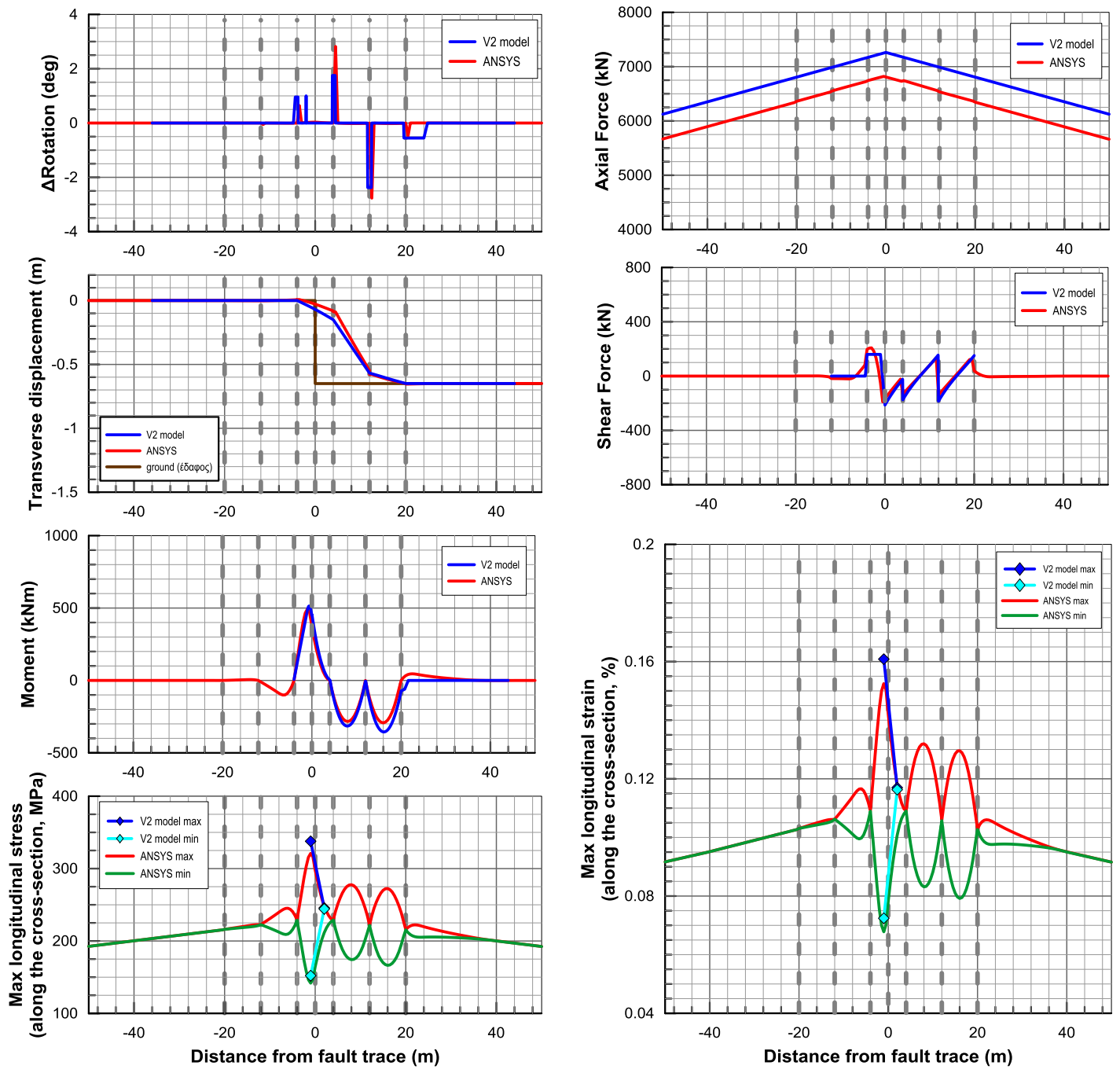
B.16. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,50m$



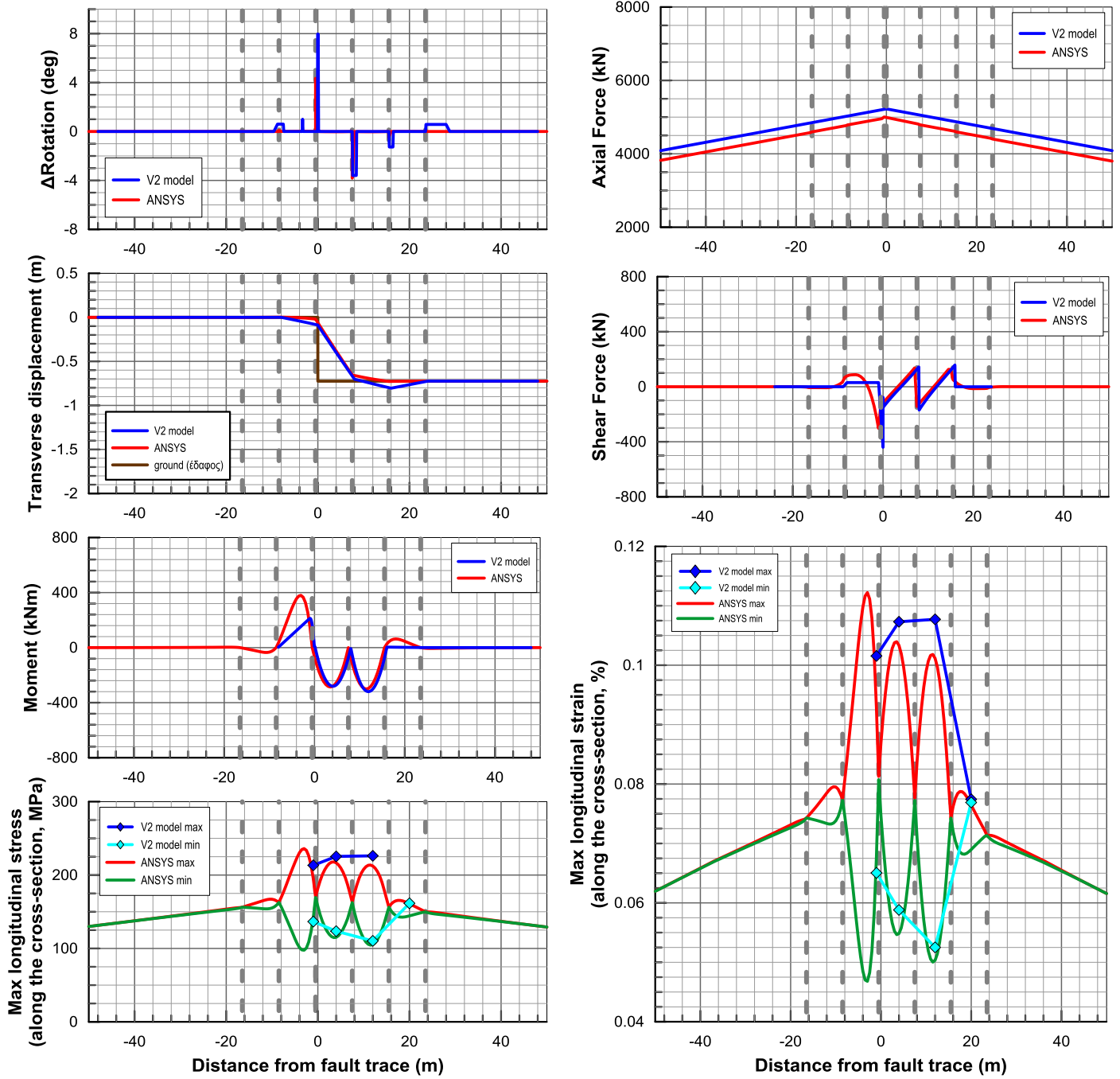
B.17. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,75m$



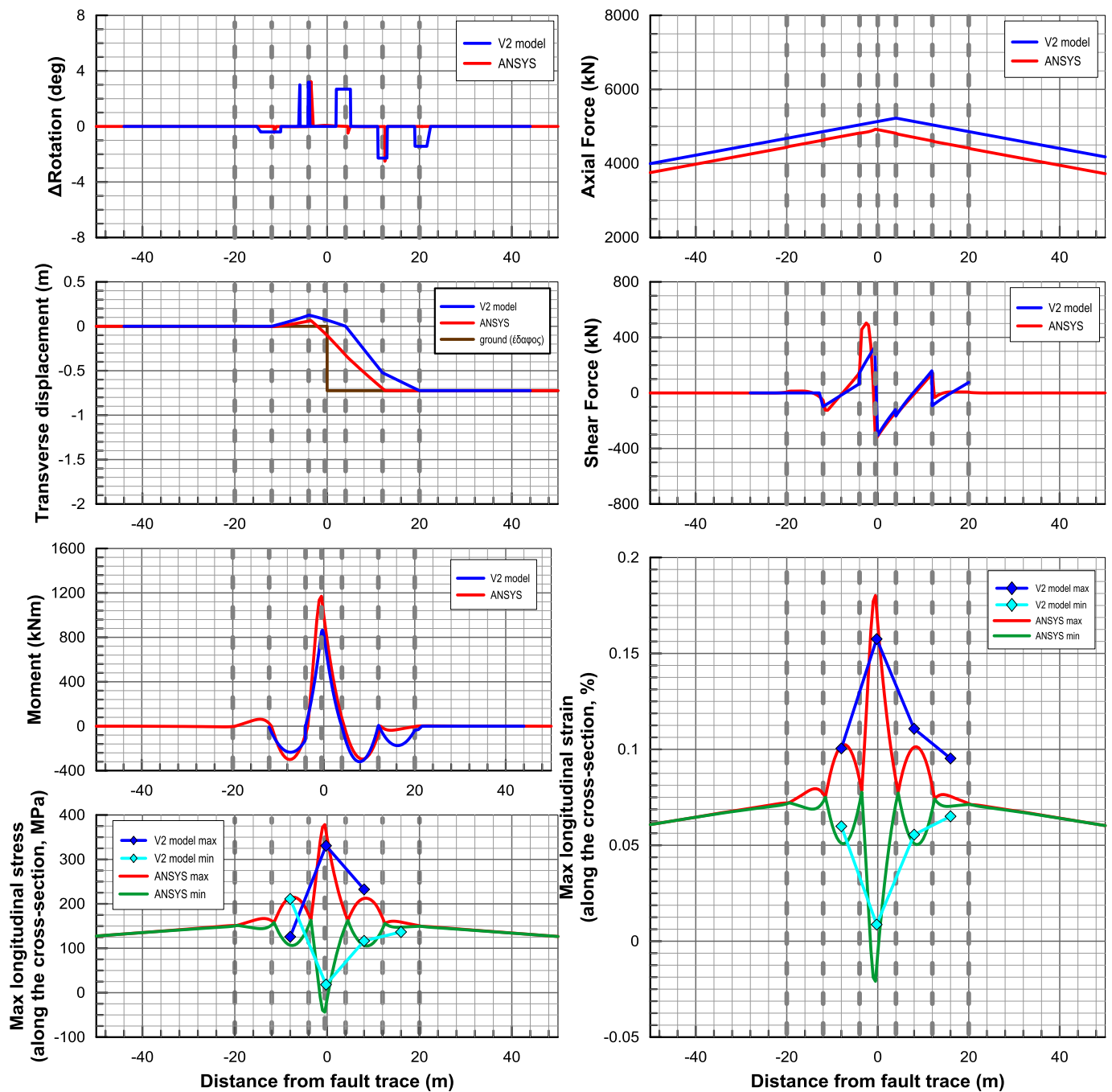
B.18. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,75m$



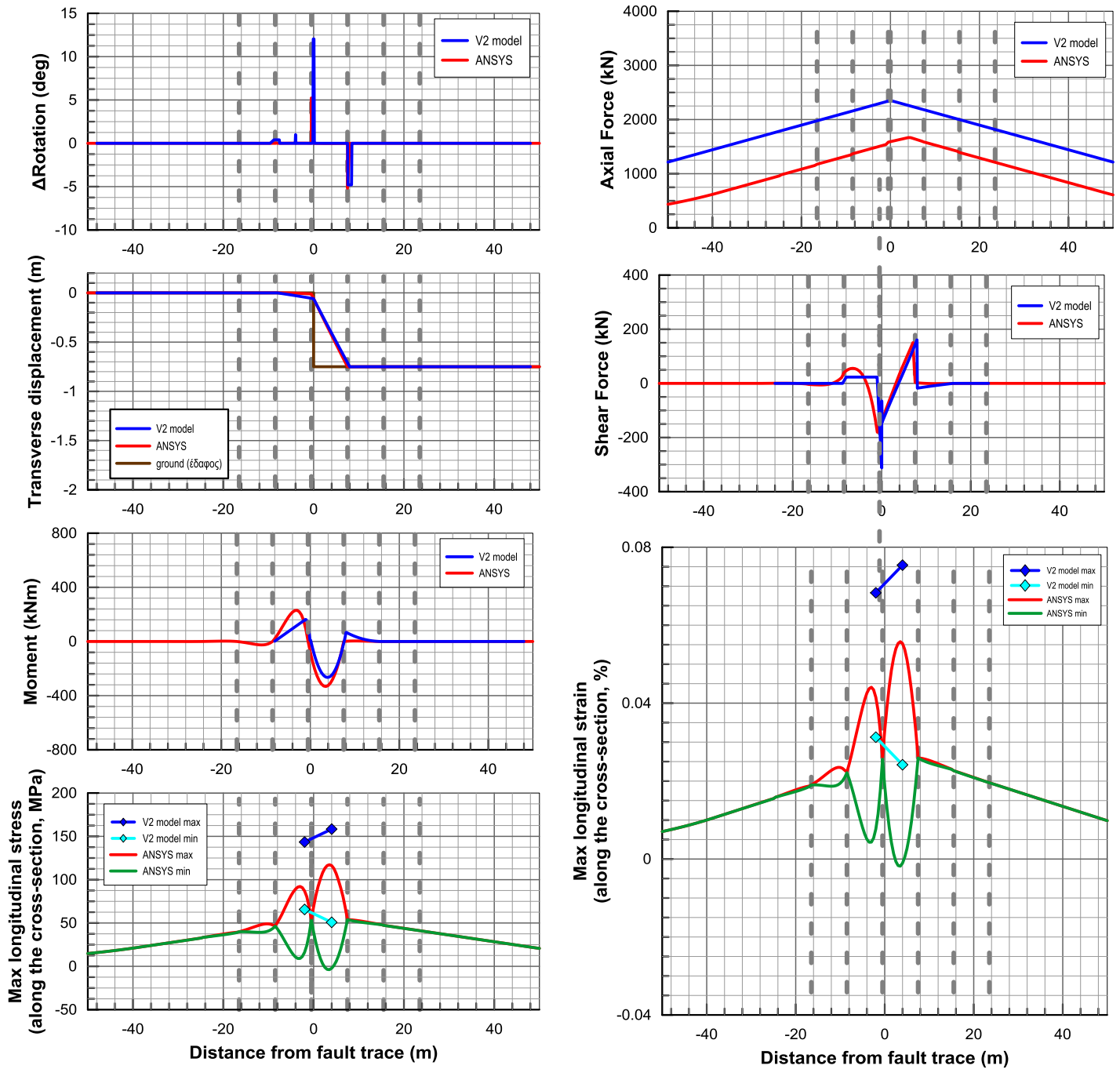
B.19. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,75m$



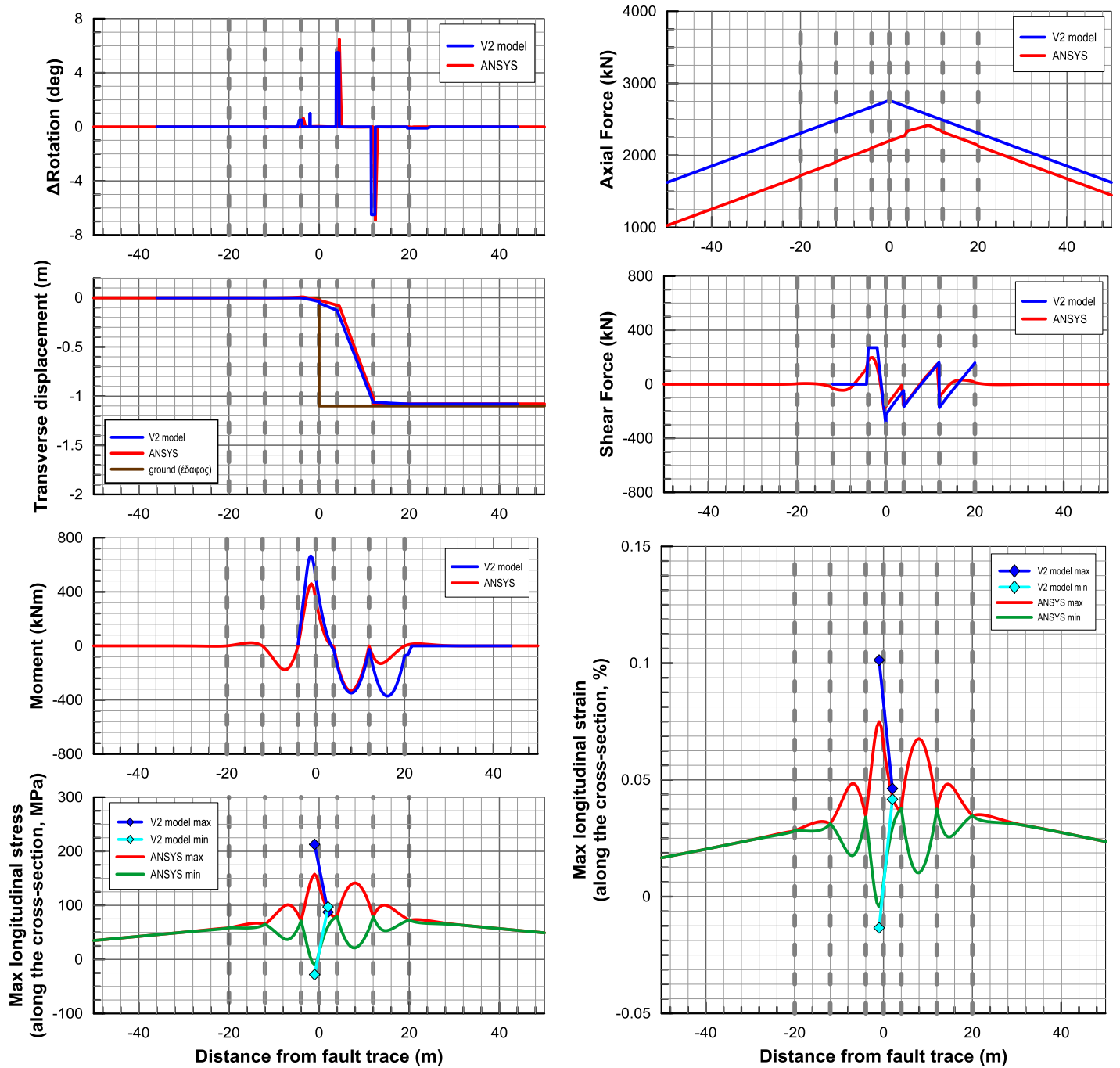
Β.20. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,75m$



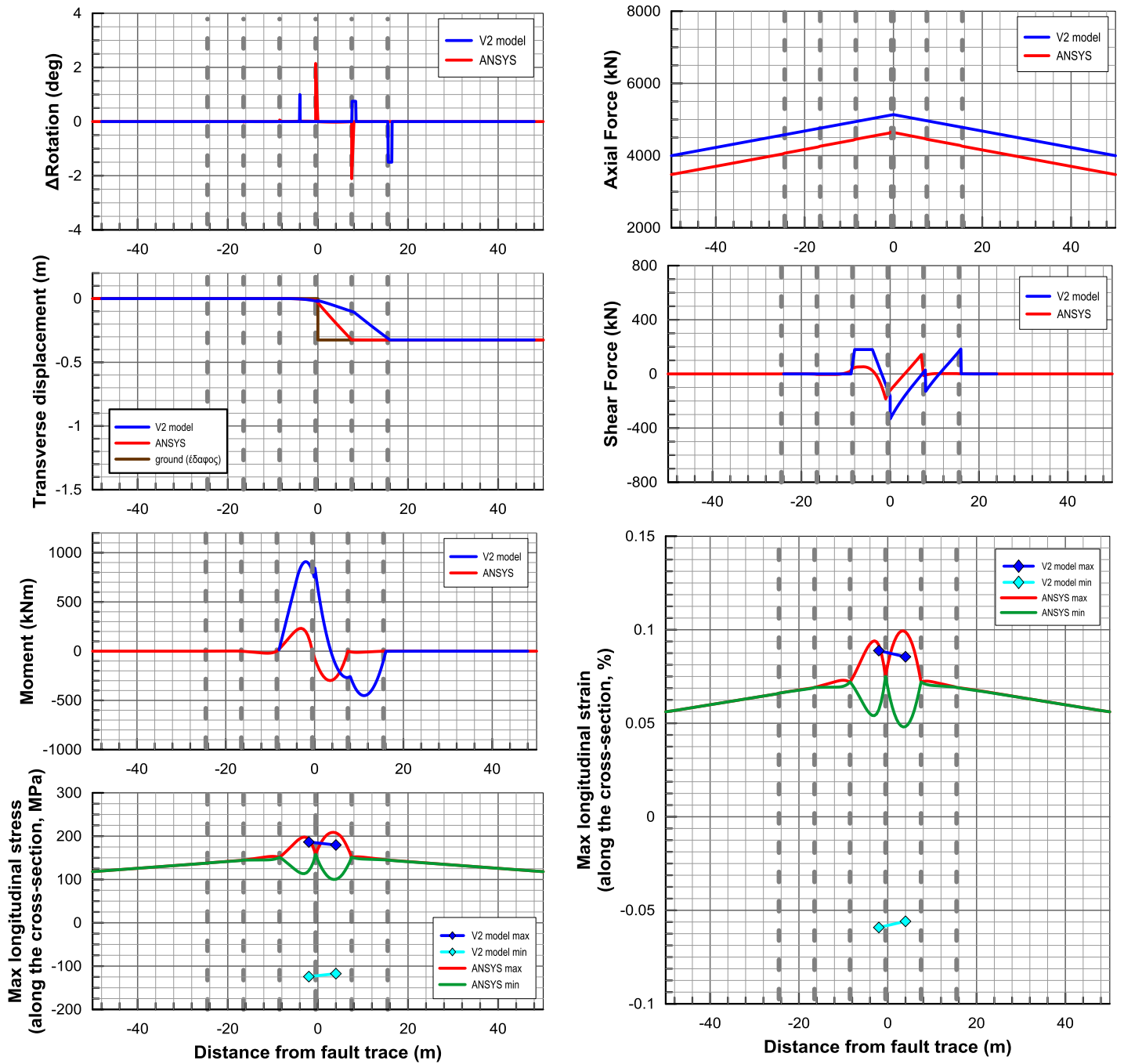
B.21. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,75m$



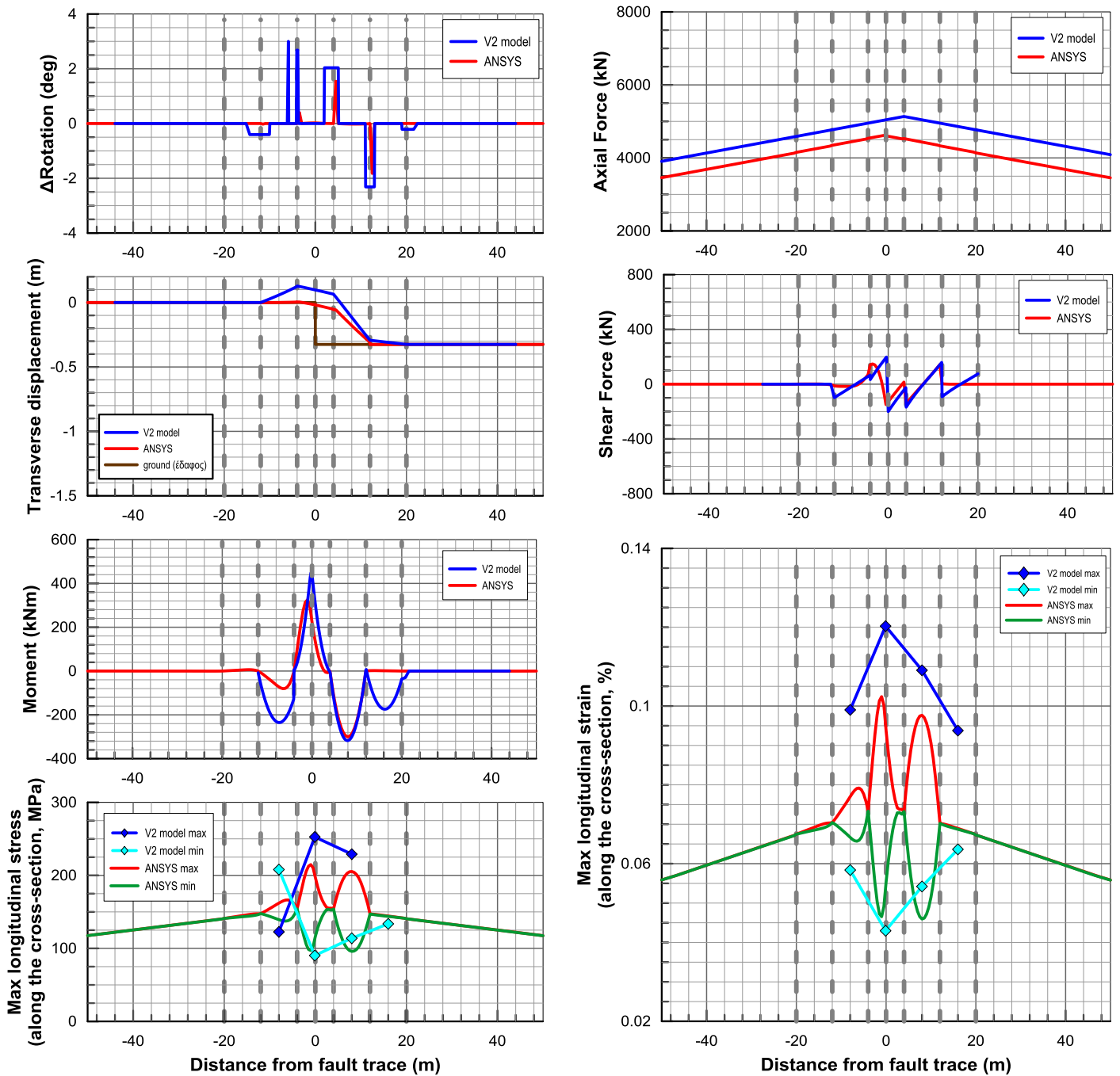
B.22. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,75m$



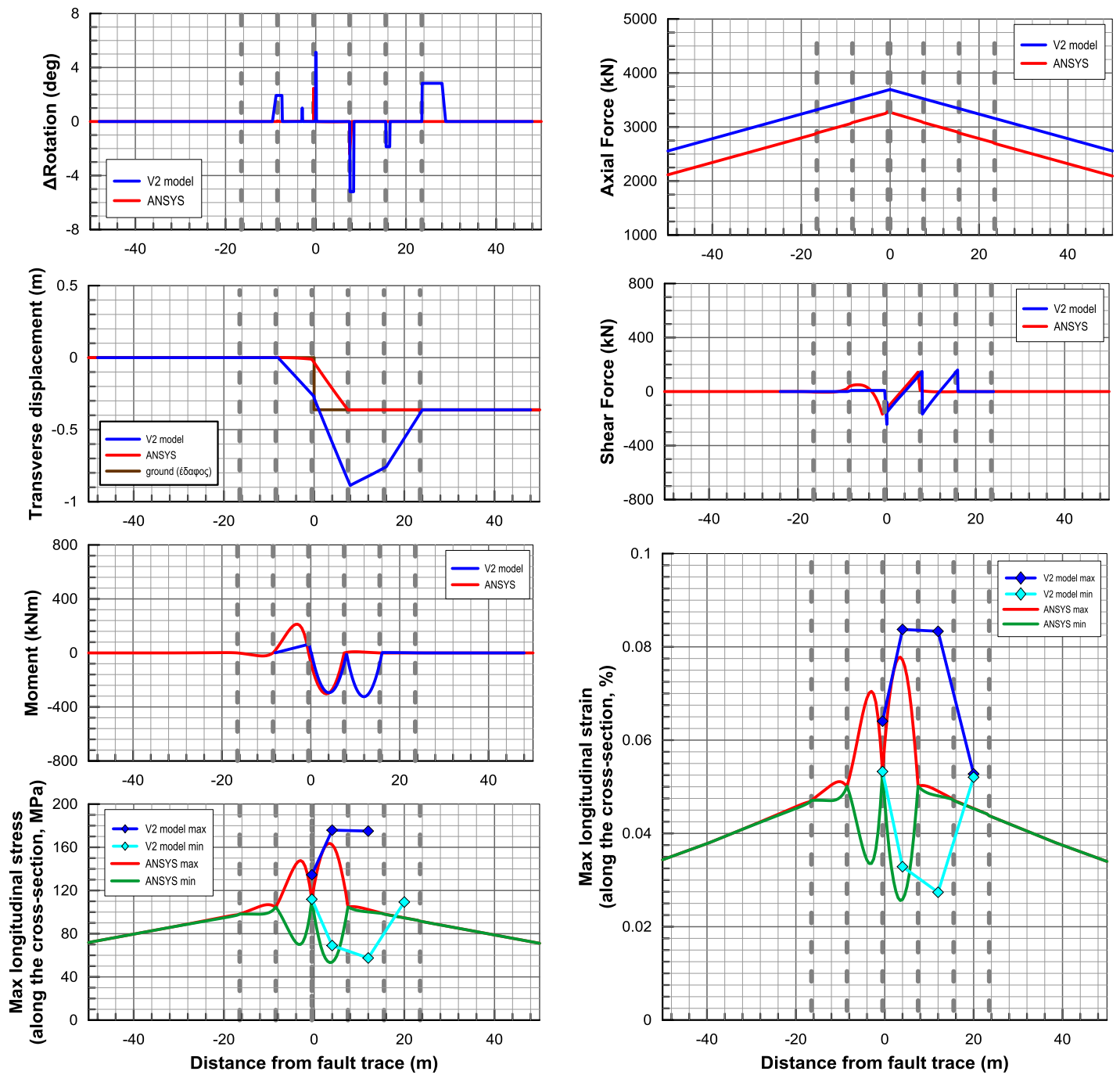
Β.23. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,375m$



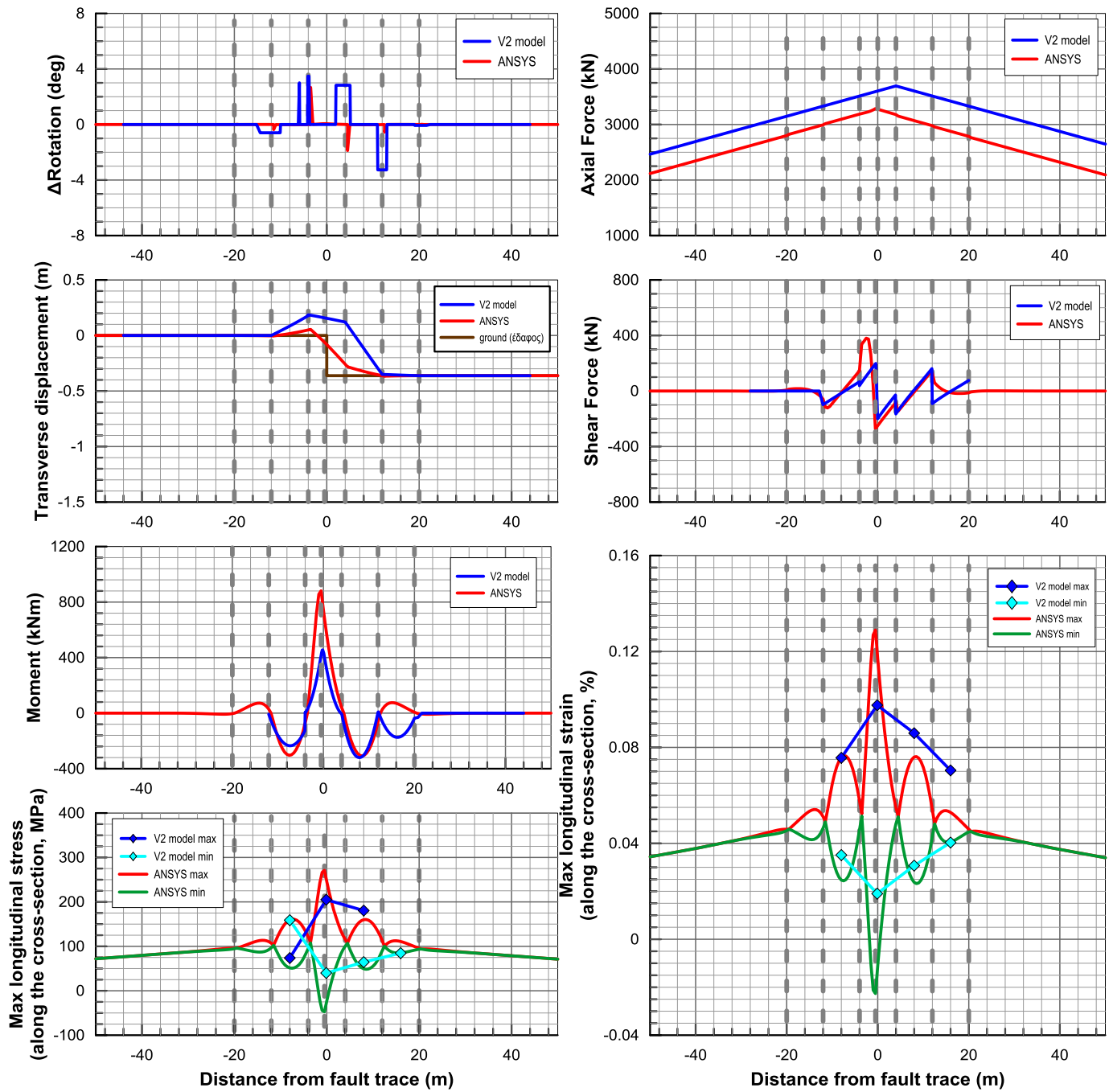
B.24. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,375m$



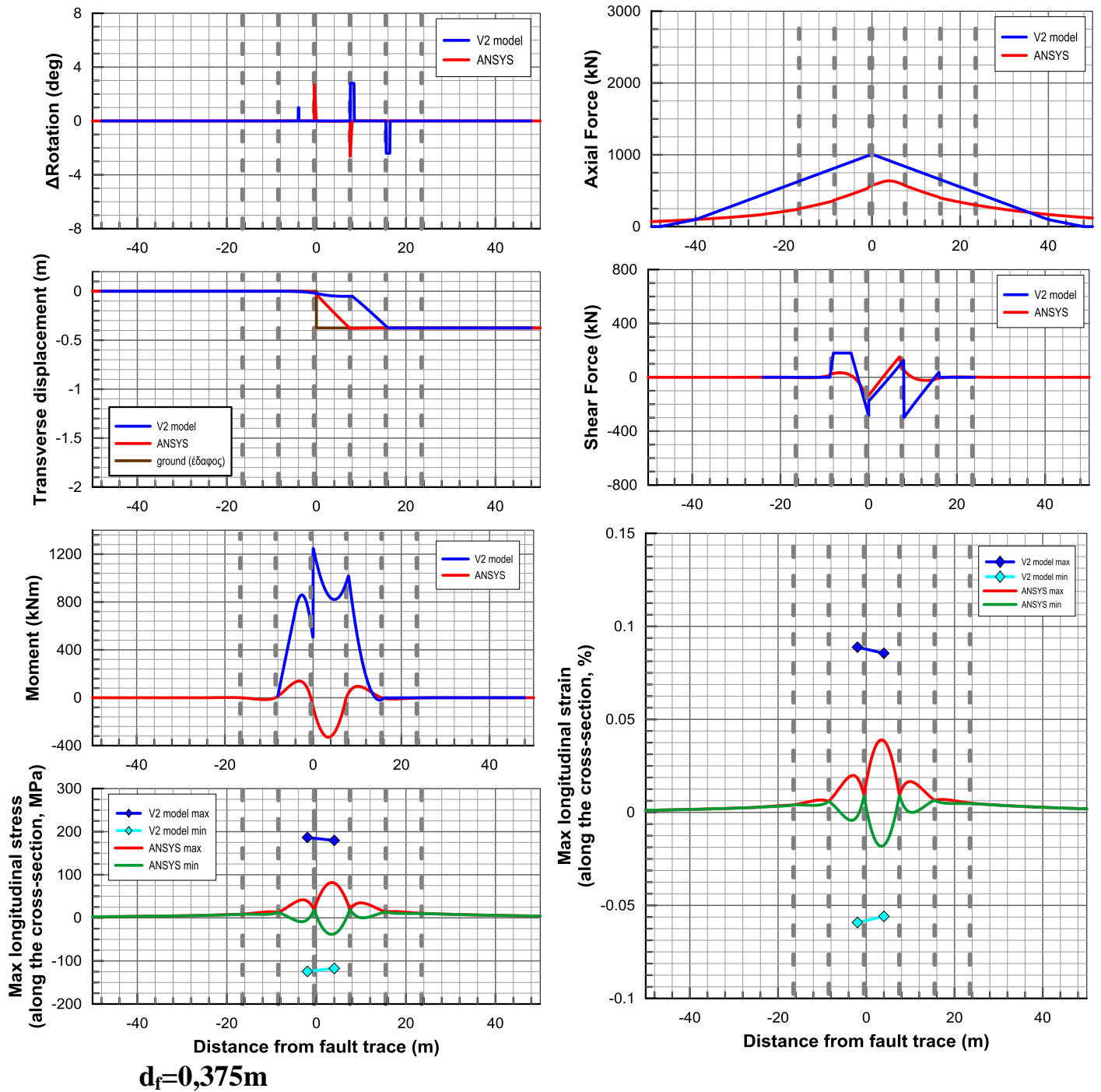
B.25. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,375m$



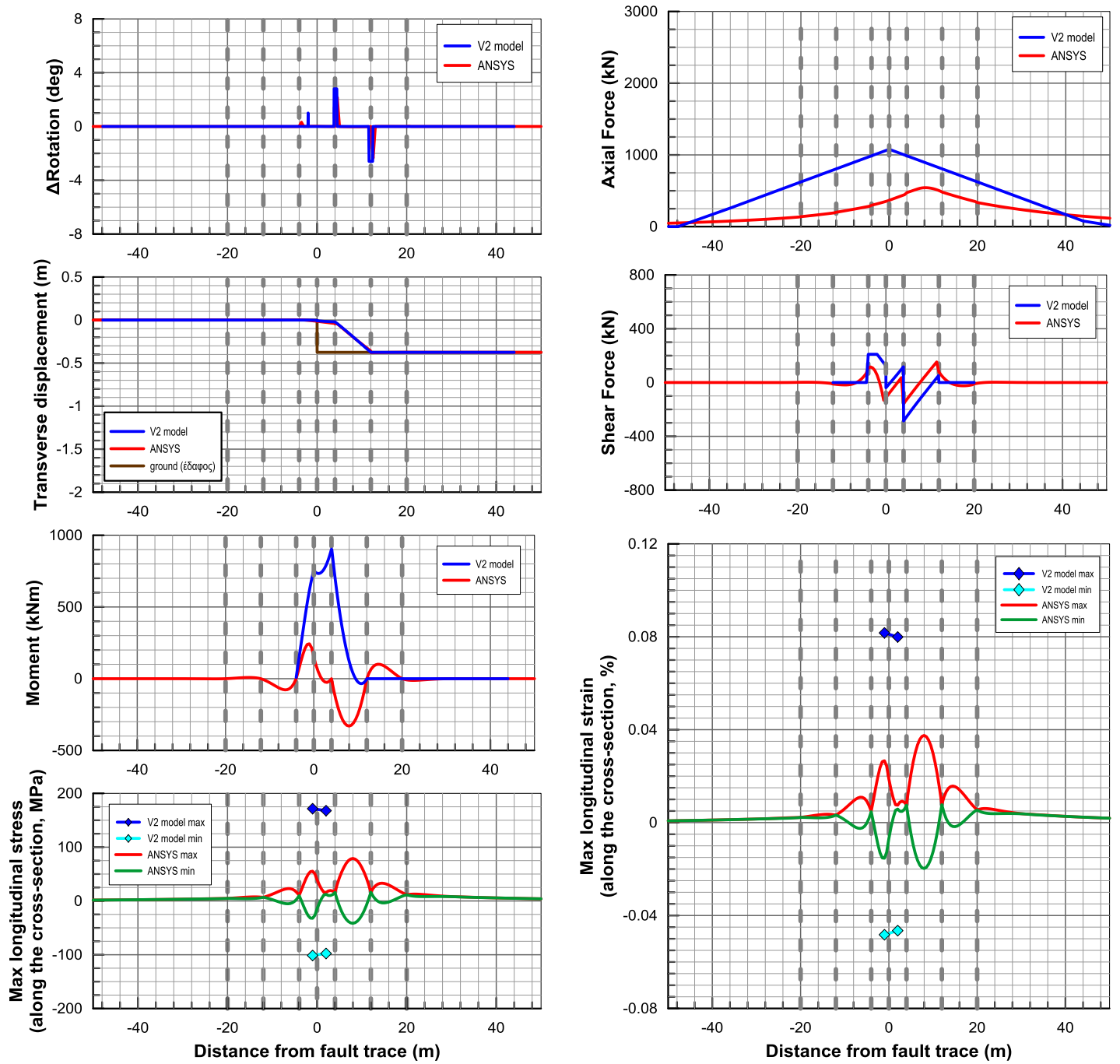
B.26. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,375m$



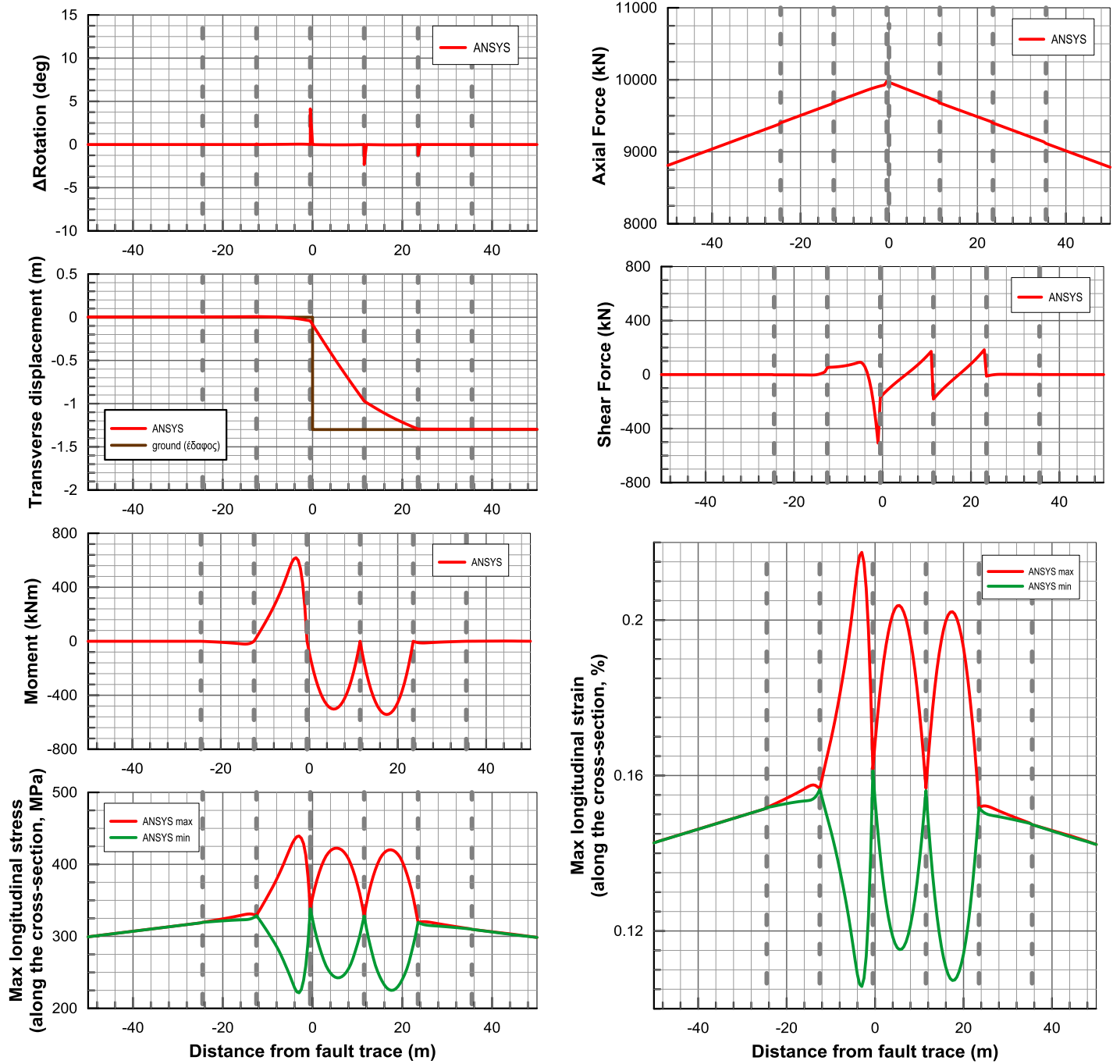
B.27. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στην άκρη,



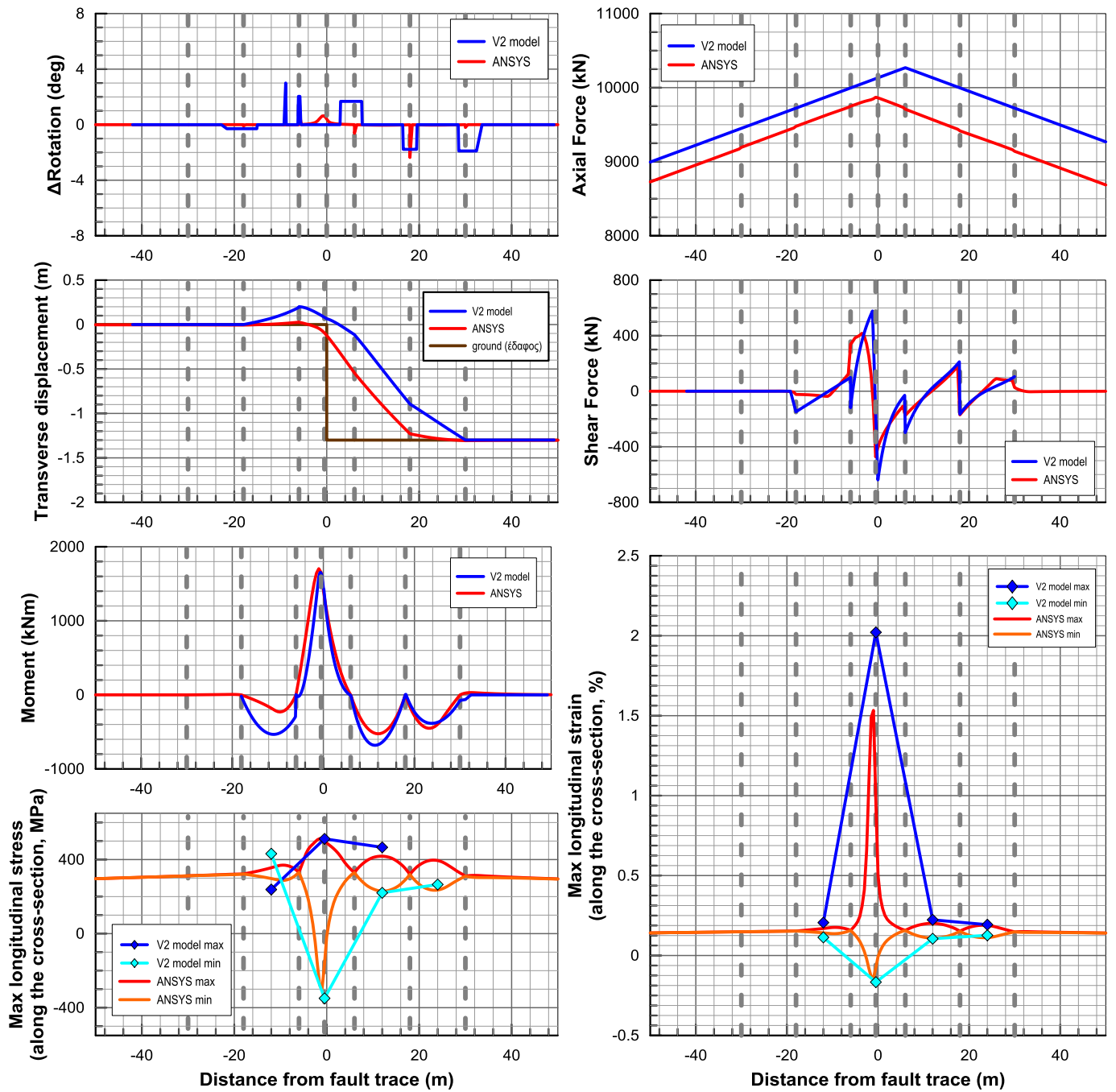
Β.28. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,375m$



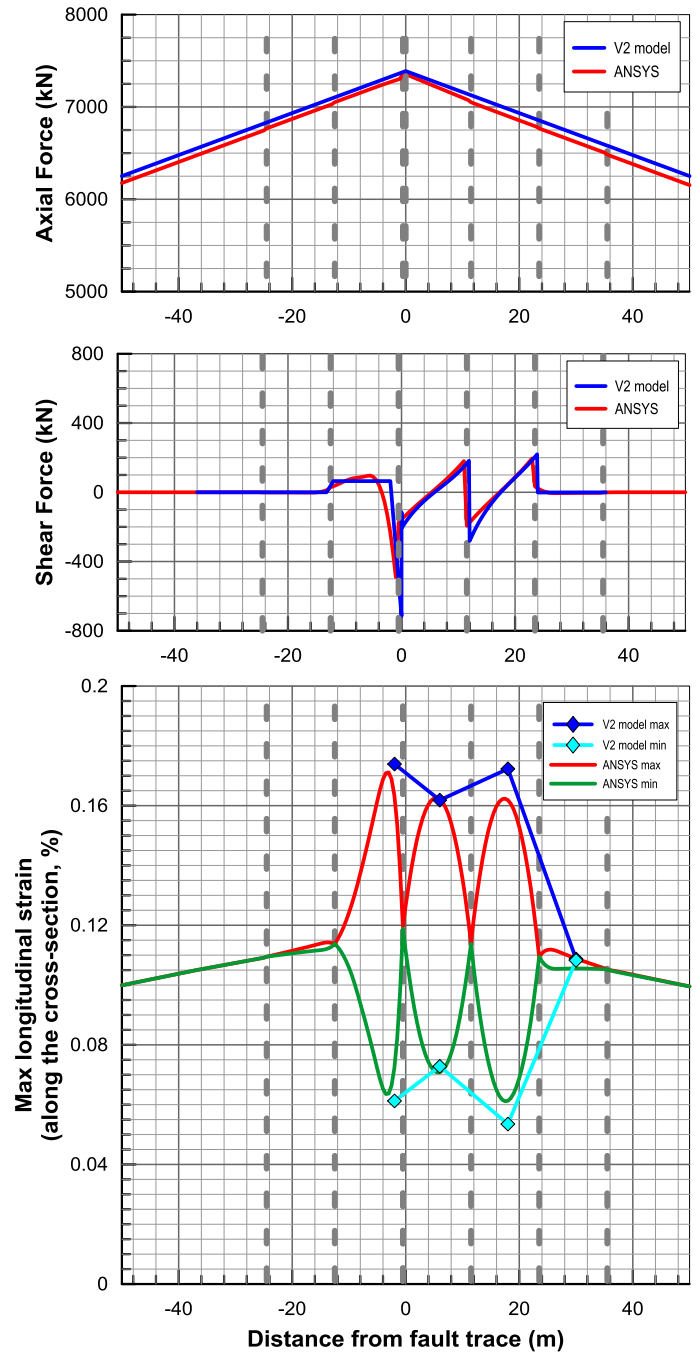
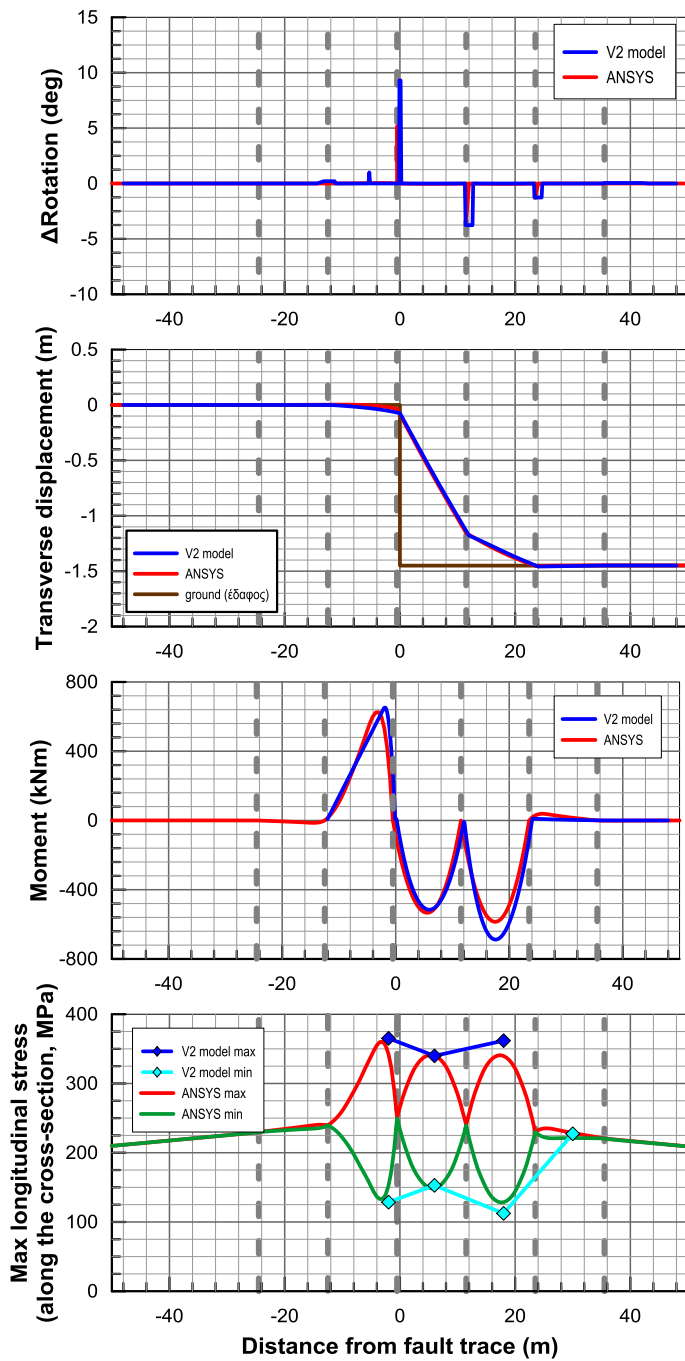
B.29. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,5m$



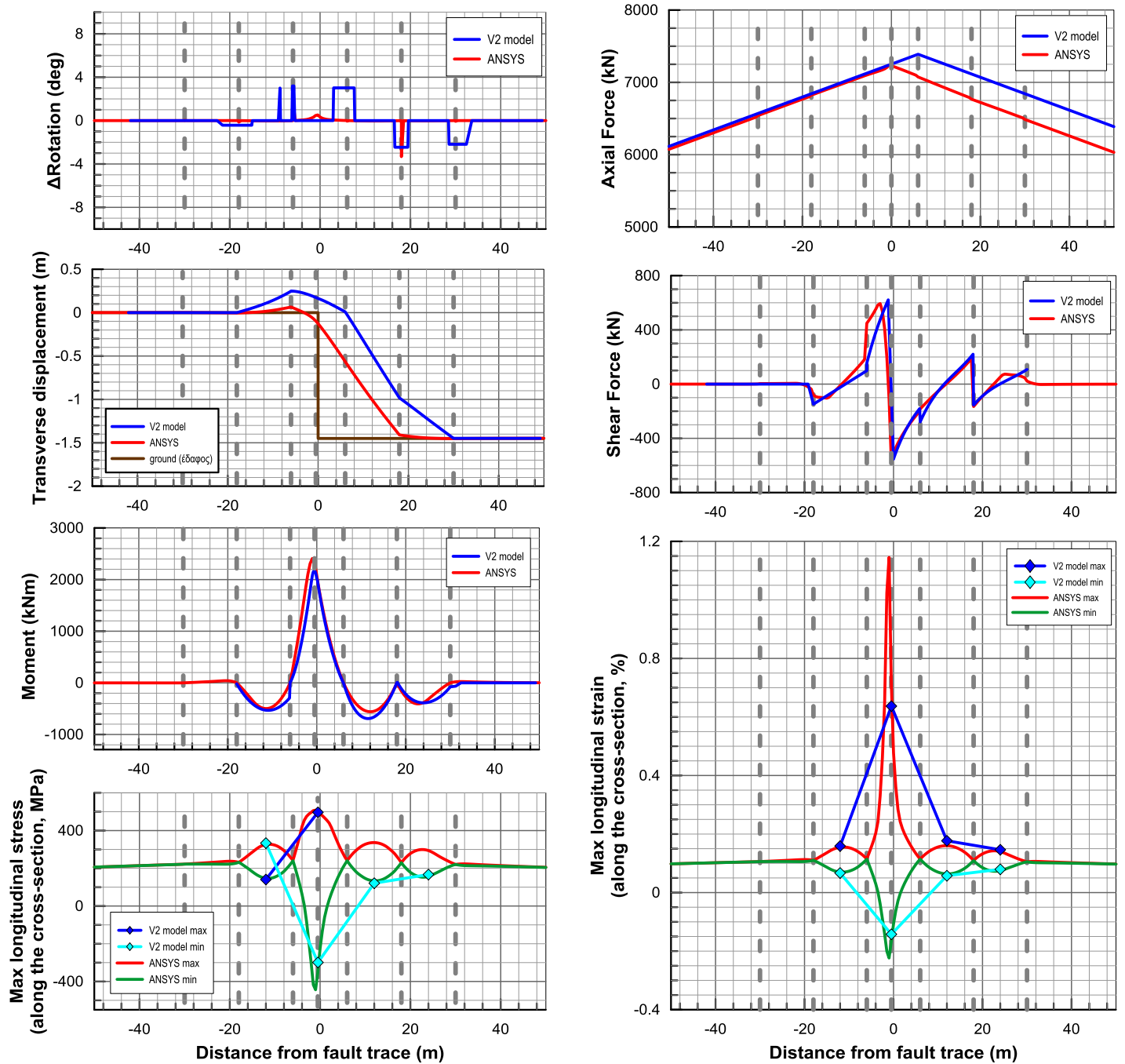
B.30. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,5m$



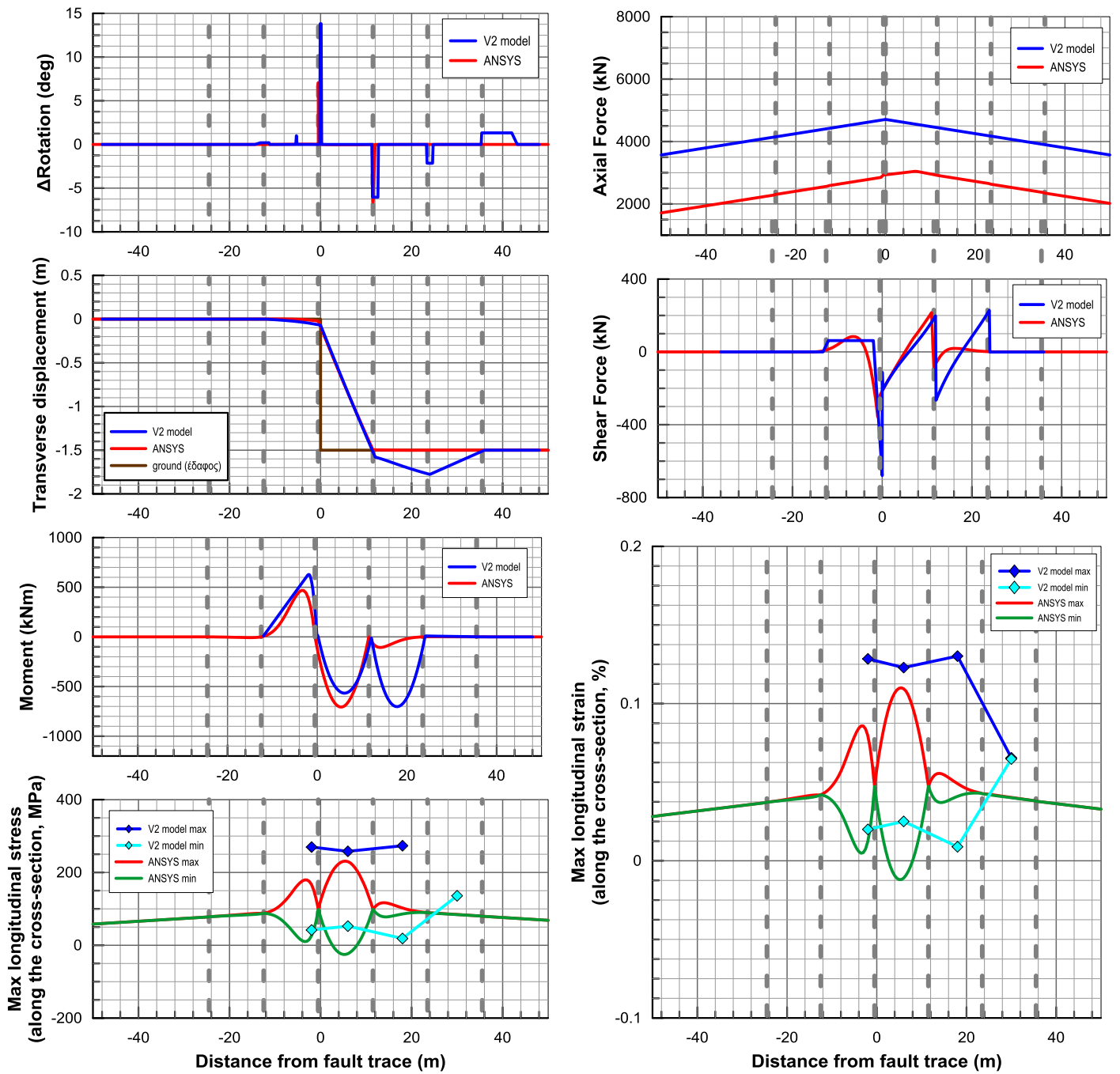
B.31. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,5m$



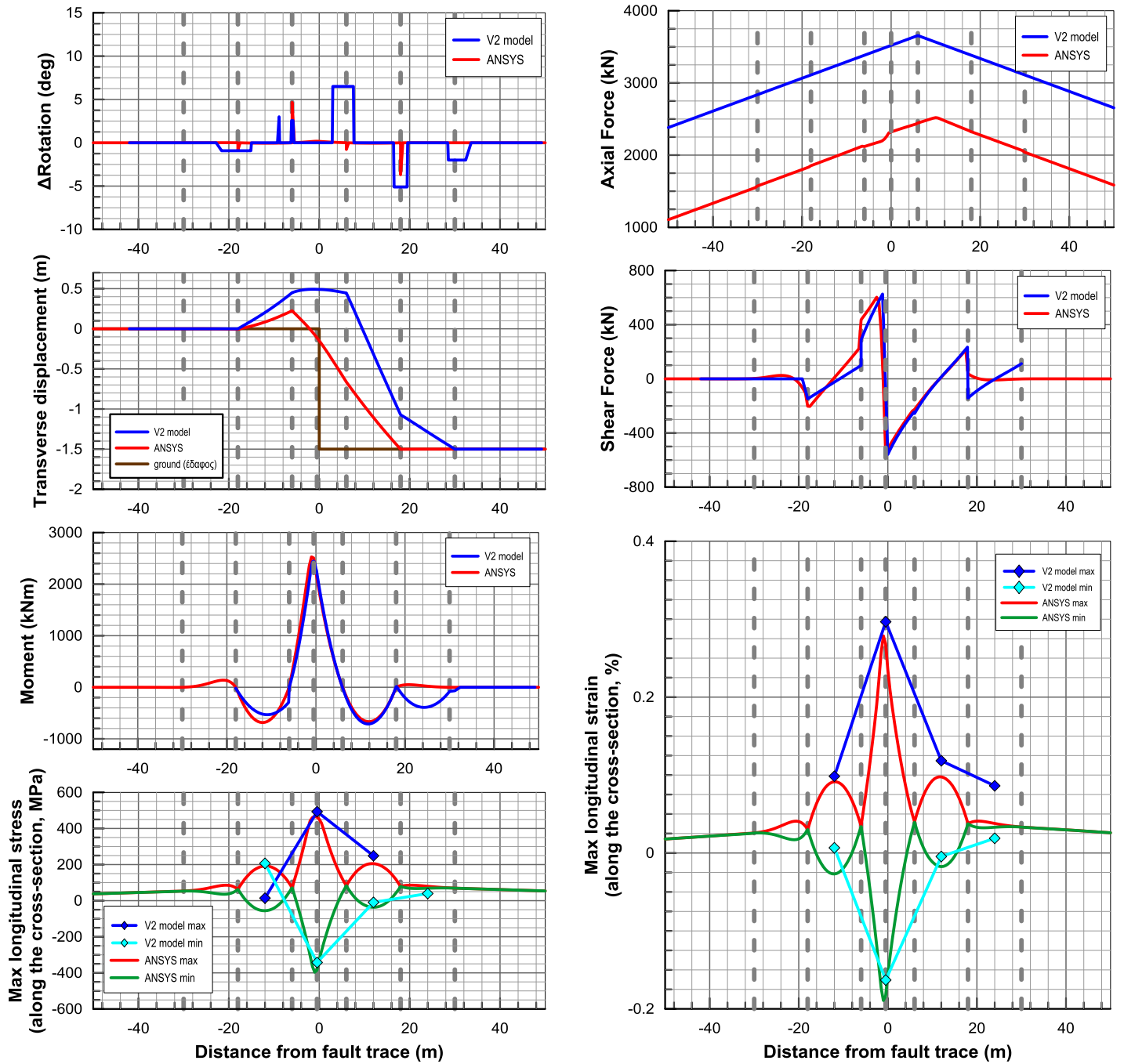
B.32. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,5m$



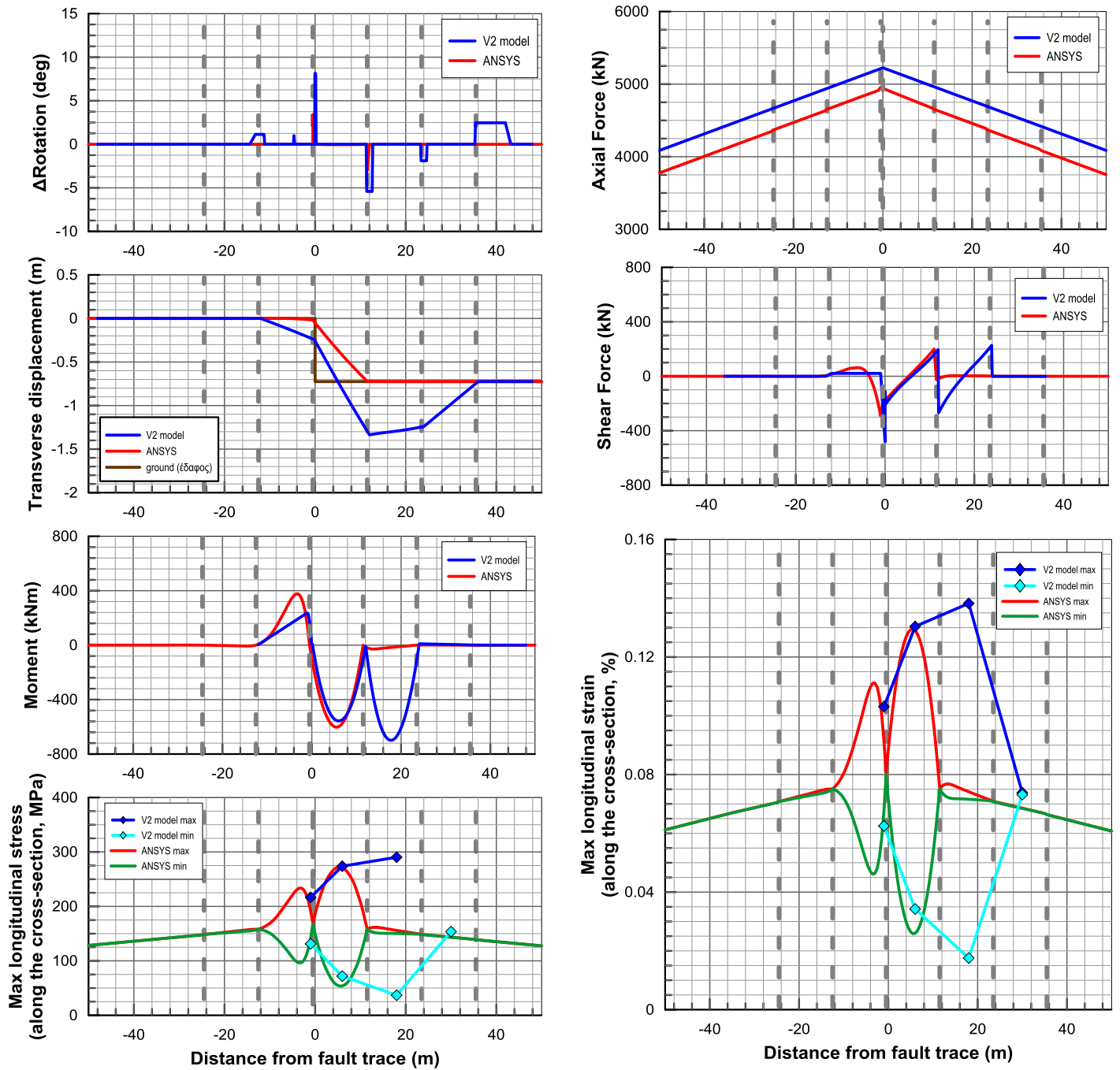
Β.33. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,5m$



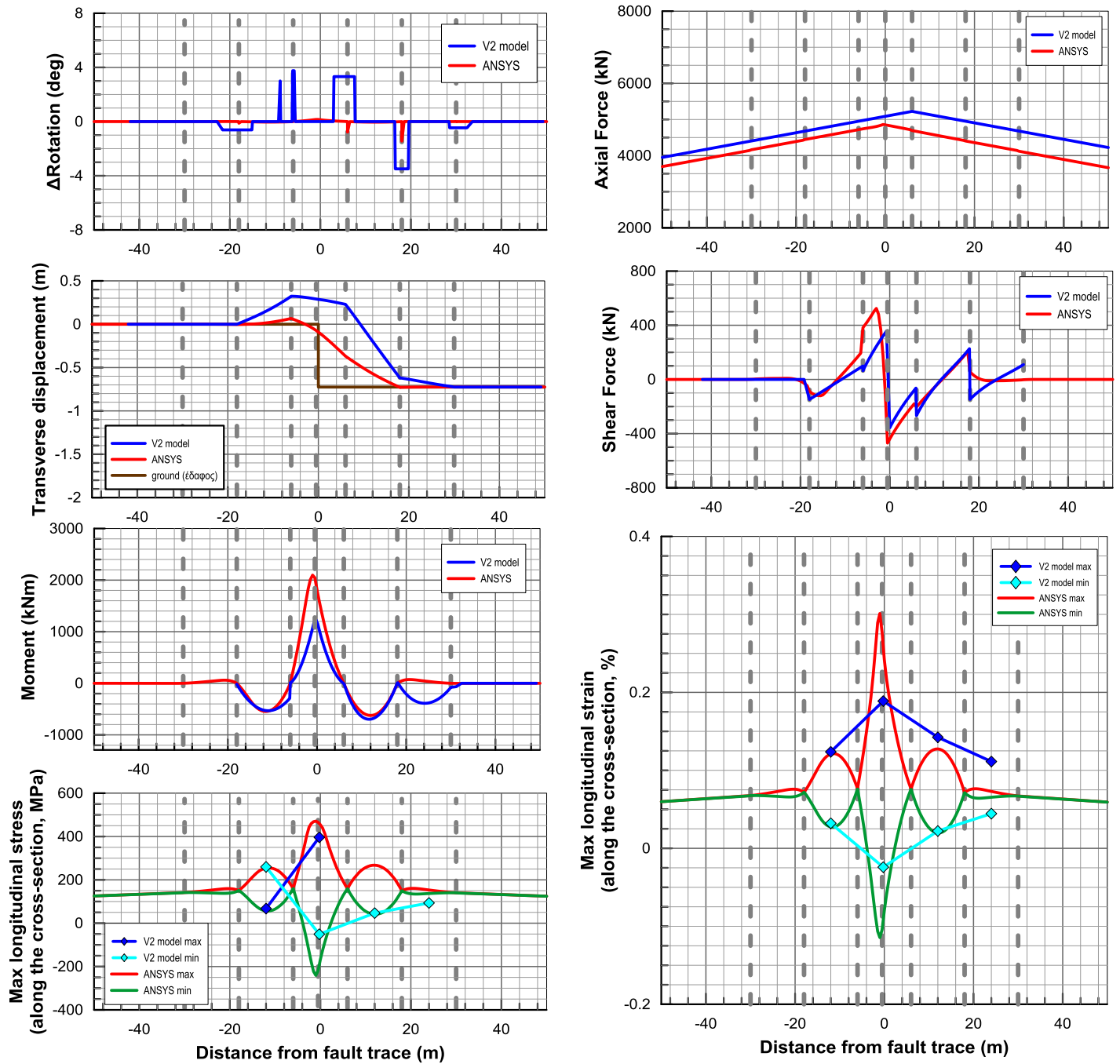
Β.34. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,5m$



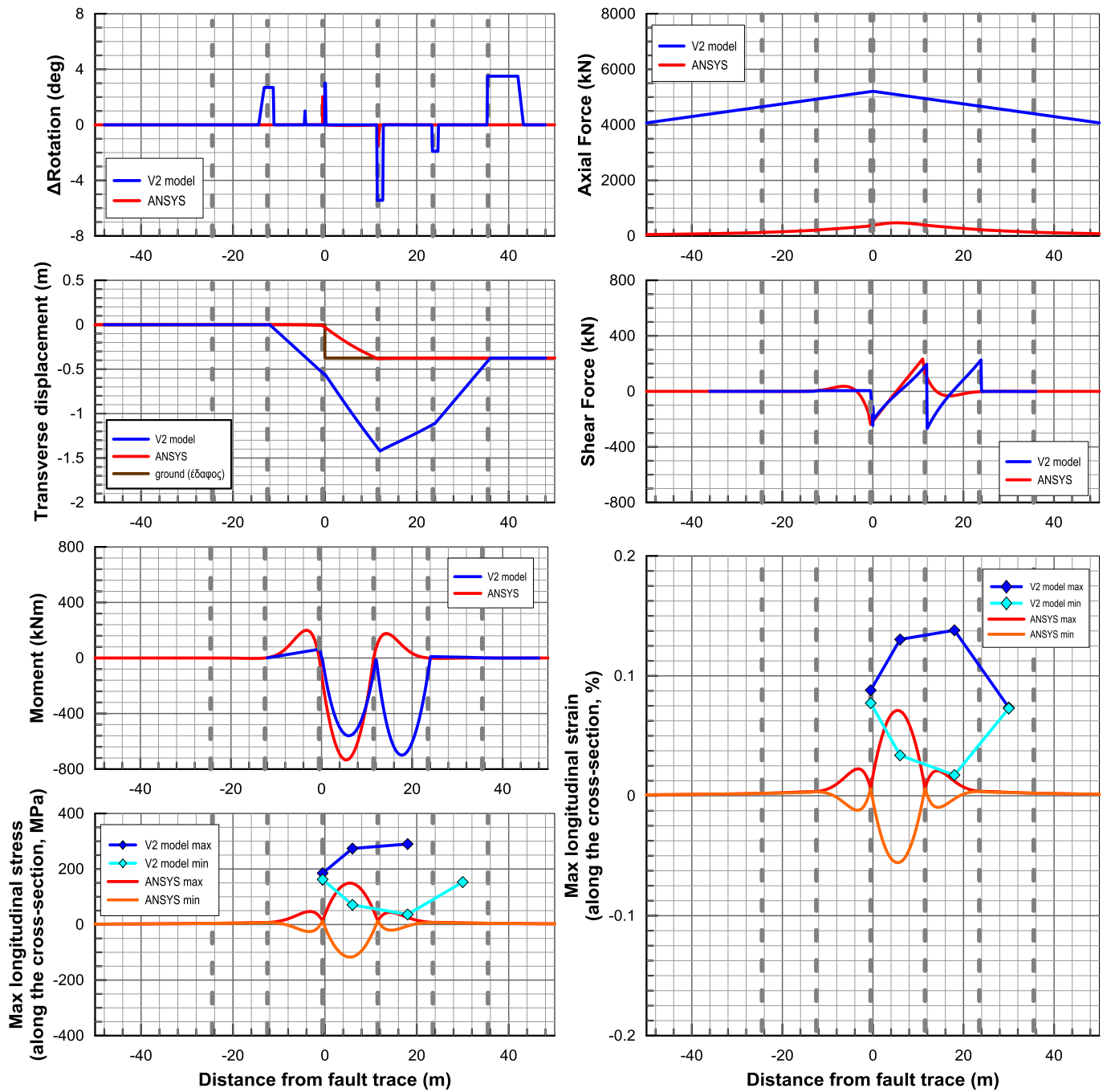
B.35. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,75m$



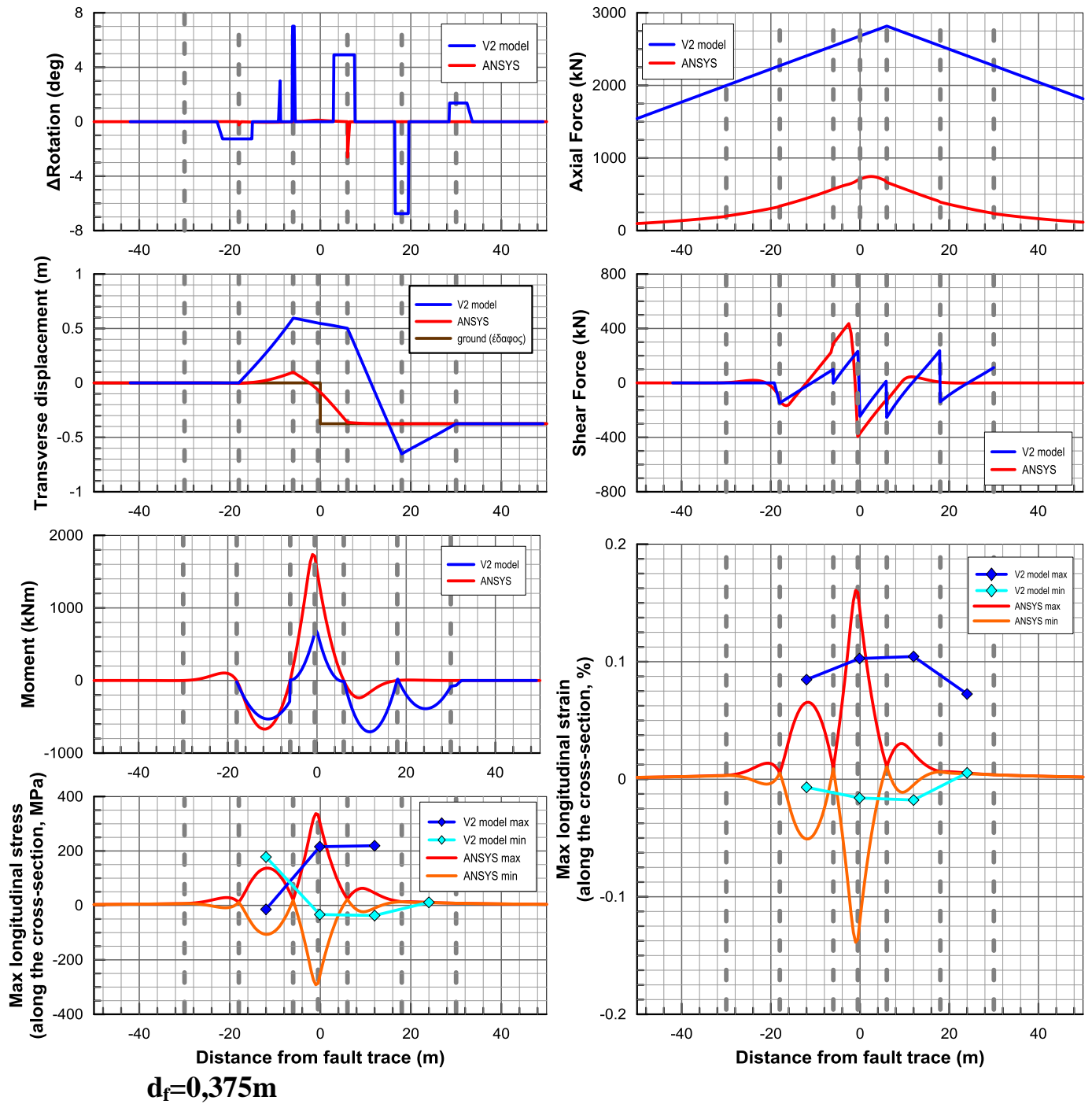
B.36. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,75m$



Β.37. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,375m$



B.38. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στη μέση,



Β.39. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,375m$

