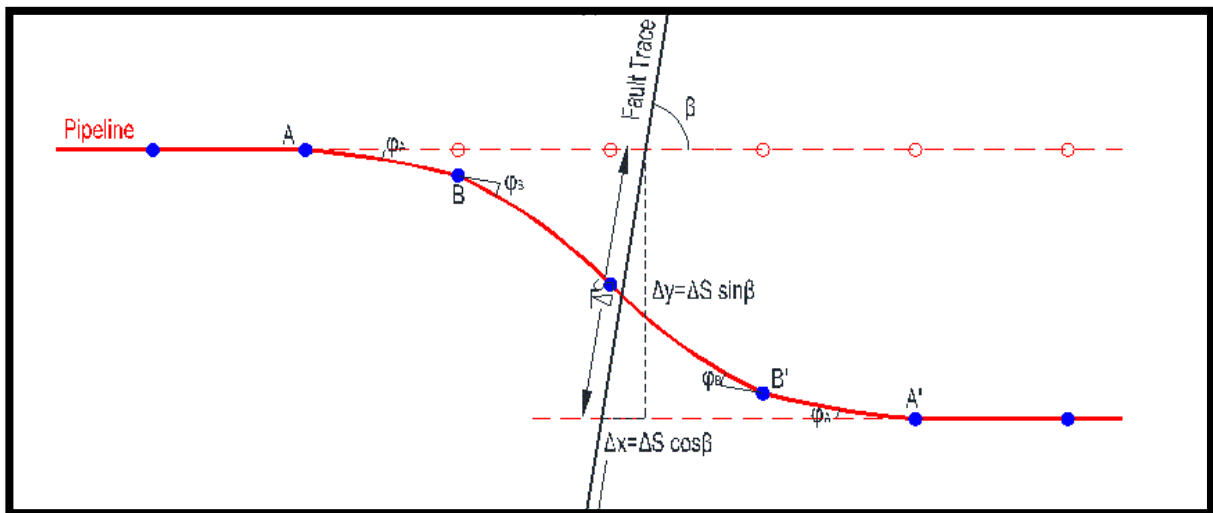




ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΓΩΓΩΝ  
ΜΕ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ:  
ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΕΙΣ ΜΕ ΡΗΓΜΑΤΑ  
ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ



**Μαριάνα Ιωάννου**

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

Αθήνα, Ιούνιος 2015



# Ευχαριστίες

---

Εκ προοιμίου, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Γεώργιο Μπουκοβάλα, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την ανάθεση της μεταπτυχιακής εργασίας και τις εύστοχες υποδείξεις, δίνοντάς μου έτσι την δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα θέμα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος και να αναβαθμίσω τις ικανότητές μου. Οι γνώσεις του και το οργανωτικό πνεύμα αποτέλεσαν σημαντικά στοιχεία για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστώ τον Αλέξανδρο Βαλσαμή, Μεταδιδακτορικό Ερευνητή Πολιτικό Μηχανικό του Ε.Μ.Π.. Η άριστη επιστημονική του κατάρτιση, σε συνδυασμό με την αδιάλειπτη προθυμία να με βοηθήσει με κάθε τρόπο, ήταν πρωταρχικής σημασίας για την ολοκλήρωση της παρούσας 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.

Θα ήταν παράλειψή μου, να μην ευχαριστήσω τη φίλη και συνάδερφο Μαρία Δαγαλάκη για την συνεχή στήριξη, την κατανόηση, τη βοήθεια καθώς και για την άψογη συνεργασία που είχαμε.

Με την εργασία αυτή ολοκληρώνεται η παρουσία μου στο συγκεκριμένο μεταπτυχιακό πρόγραμμα. Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Δημήτριο Λουκίδη και στον κ. Δήμο Χαρμπή, Καθηγητές της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου για την ενθάρρυνση που μου προσέφεραν στο να παρακολουθήσω το συγκεκριμένο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα.

Στο χρόνο αυτό απέκτησα φίλους και γνώρισα άξιους συναδέλφους. Ευχαριστώ όλους τους συμφοιτητές μου, για το ευχάριστο κλίμα στις αίθουσες, και όχι μόνο, την υποστήριξή τους και τη συνεργασία που είχαμε.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου, που με το δικό τους τρόπο ο καθένας, με ενθάρρυναν και με στήριζαν καθ' όλη την διάρκεια της μελέτης.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ όμως το οφείλω στην οικογένειά μου, στους γονείς μου Γιαννάκη και Αίγλη, στην αδερφή μου Κάτια και στον Χάρη, για τη συνεχή υποστήριξη, συμπαράσταση και εμπιστοσύνη που μου δείχνουν όλα αυτά τα χρόνια, γι' αυτό και η παρούσα εργασία είναι αφιερωμένη σε αυτούς.



# Περιεχόμενα

---

<b>1. Εισαγωγή .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Μηχανισμοί και Λειτουργία Εύκαμπτων Κόμβων .....</b>	<b>11</b>
2.1 Γενικά.....	11
2.2 Ιστορικό .....	12
2.3 Είδη εμπορικά διαθέσιμων εύκαμπτων κόμβων .....	16
2.3.1 Απλοί κόμβοι ολίσθησης (Slip expansion joints) .....	16
2.3.2 Κόμβοι τύπου «σφαίρας» με ή χωρίς ικανότητα επιμήκυνσης (Expansion/ Ball joints).....	17
2.3.3 Εύκαμπτοι κόμβοι τύπου «Bellows» .....	18
2.3.4 Σύνθετοι κόμβοι.....	21
<b>3. Αναλυτικές μεθοδολογίες σχεδιασμού αγωγών σε ρήγματα .....</b>	<b>23</b>
3.1 Γενικά.....	23
3.2 Αναλυτικές μέθοδοι για συνεχείς ευθύγραμμους αγωγούς .....	24
3.2.1 Μεθοδολογία Newmark and Hall (1975) .....	24
3.2.2 Μεθοδολογία Kenedy et al (1977).....	26
3.2.3 Μεθοδολογία Wang and Yeh (1985) .....	28
3.2.4 Μεθοδολογία Takada et al. (2001) .....	30
3.2.5 Μεθοδολογία Karamitros et al. (2007) .....	31
3.2.6 Μεθοδολογία Trifonov & Cherniy (2010).....	32
3.2.7 Μεθοδολογία Karamitros et al. (2011) .....	33
3.3 Αναλυτικές μέθοδοι για σπονδυλωτούς αγωγούς.....	34
3.3.1 Μεθοδολογία O'Rourke & Trautmann (1981) .....	35
3.3.2 Μεθοδολογία Takada (1984) .....	37
3.3.3 Μεθοδολογία Tan & Yang (1988) .....	40
3.3.4 Μεθοδολογία ALA Guidelines (ASCE 2005). .....	41
3.3.5 Μεθοδολογία O'Rourke (2009) .....	42
3.3.6 Μεθοδολογία O'Rourke & Liu (2012) .....	43
3.4 Συμπεράσματα .....	44
<b>4. Προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης ....</b>	<b>45</b>
4.1 Γενικά.....	45
4.2 Παραδοχές αναλυτικής μεθοδολογίας .....	45
4.3 Ομοιότητες & Διαφορές σχετικά με τους συνεχείς αγωγούς .....	48
4.4 Περιγραφή της μεθοδολογίας .....	51
<b>5. Παρουσίαση αριθμητικής μεθοδολογίας για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης.....</b>	<b>61</b>
5.1 Γενικά.....	61

5.2 Προσομοίωμα Πεπερασμένων Στοιχείων αγωγού.....	61
5.3 Προσομοίωση εδάφους.....	63
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 .....	77
<b>6. Σύγκριση προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας με αριθμητικά αποτελέσματα .....</b>	<b>83</b>
6.1 Παρουσίαση εκτελεσθέντων αναλύσεων.....	83
6.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών και αριθμητικών αναλύσεων.....	85
6.3 Διαγράμματα σχετικού σφάλματος προτεινόμενης μεθοδολογίας .....	98
6.4 Συμπεράσματα .....	105
<b>7. Σύγκριση της νέας μεθόδου σχεδιασμού εύκαμπτων κόμβων με τις συμβατικές .....</b>	<b>107</b>
7.1 Εισαγωγή .....	107
7.2 Μεθοδολογίες αντιμετώπισης εδαφικών μετατοπίσεων λόγω διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων .....	107
7.3 Σύγκριση μεθοδολογιών ως προς την αποδοτικότητα και το κόστος.....	113
<b>8. Συμπεράσματα.....</b>	<b>119</b>
<b>9. Βιβλιογραφικές Αναφορές.....</b>	<b>123</b>
<b>Παράρτημα Α΄ Παραμετρική Διερεύνησης Τάσης Διαρροής για Συνδυασμό Αξονικής Δύναμης και Καμπτικής Ροπής .....</b>	<b>127</b>
<b>Παράρτημα Β΄ Λεπτομερή Αποτελέσματα Παραμετρικών Αναλύσεων.....</b>	<b>137</b>

# 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.

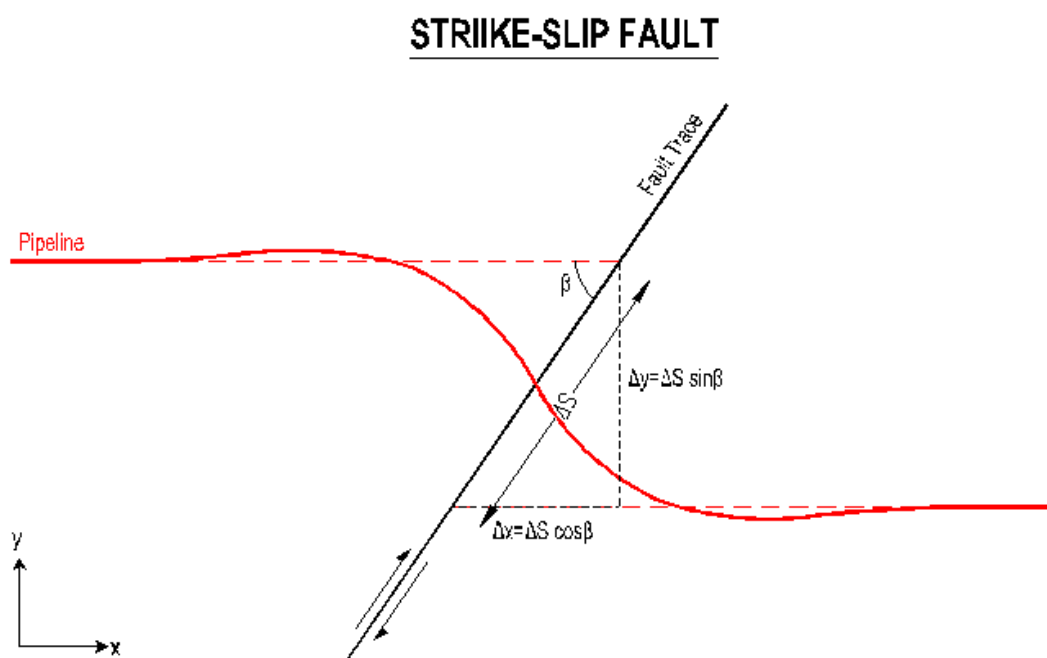
Από τις διάφορες αιτίες μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων, η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εστιάζει στο σχεδιασμό υπόγειων αγωγών έναντι μετατοπίσεων που οφείλονται σε διάρρηξη ενεργών ρηγμάτων. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτών των μετατοπίσεων είναι ότι είναι οι μοναδικές που δεν μπορούν να αποφευχθούν 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 ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης, 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 ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης

Όλες όμως οι ανωτέρω μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν για μικρές έως μεσαίες μετατοπίσεις του ρήγματος, δηλαδή έως 2.5-3 διαμέτρους του αγωγού. Εξαίρεση 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 οριζόντιας ολίσθησης. 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 υπάρχουσες αναλυτικές μεθοδολογίες σχεδιασμού συνεχών ευθύγραμμων υπόγειων και σπονδυλωτών αγωγών.
- Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται εκτενής περιγραφή της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης.
- Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται η αριθμητική μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης 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 ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης.
- 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 «κλασσικών» μεθόδων σχεδιασμού.
- Τέλος, στο **Κεφάλαιο 8** συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

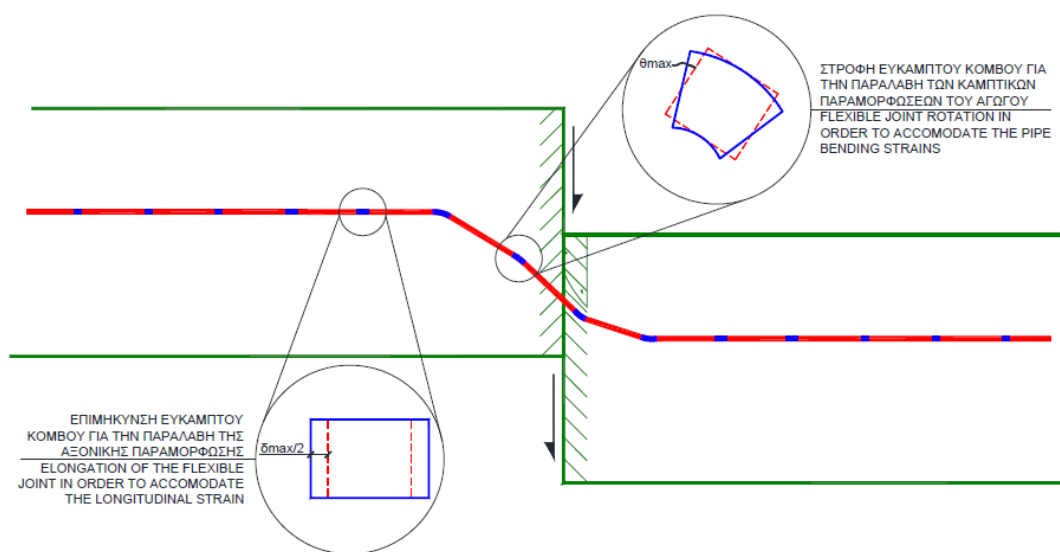


# 2

## 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.

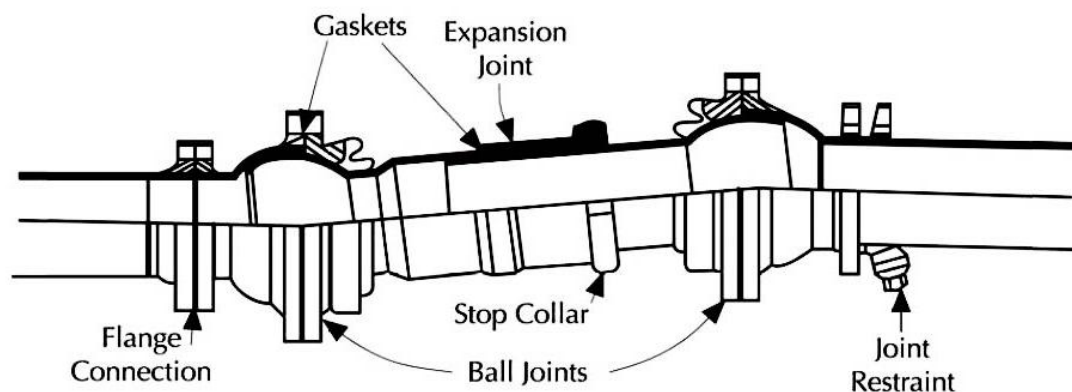


Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας των εύκαμπτων κόμβων

## 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.

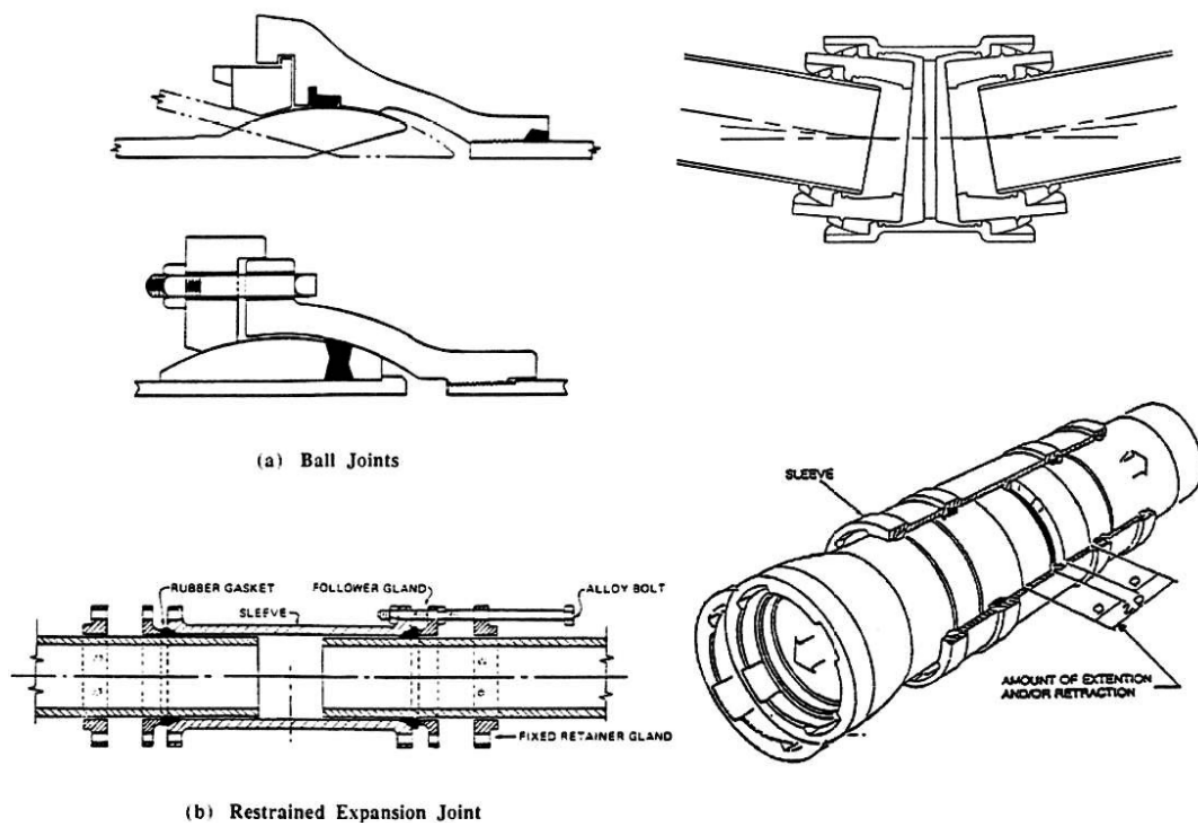
Η χρήση σύνθετων εύκαμπτων κόμβων με στόχο την αντιμετώπιση τοπικών μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων, όπως στην περίπτωση της διάρρηξης τεκτονικών ρηγμάτων, προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Ford (1983). Η προτεινόμενη διάταξη (Σχήμα 2.2) αποτελείται από δύο αλληπάληλους στροφικούς κόμβους τύπου «σφαίρας» 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.



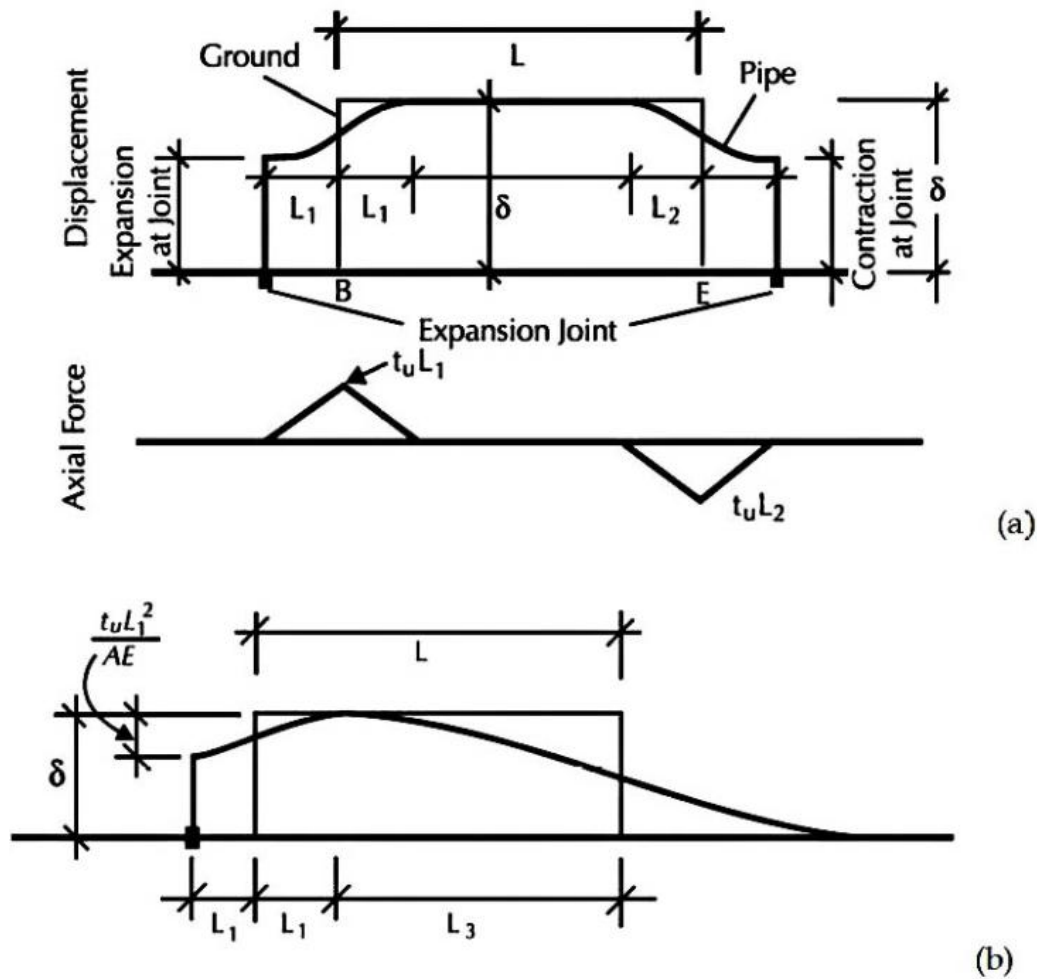


Σχήμα 2.3: Εύκαμπτοι κόμβοι που ανέφεραν οι Isenberg & Richardson (1989)

Ο Ballantyne (1992) πρότεινε τη χρήση εύκαμπτων κόμβων παράλληλα με την εφαρμογή «κλαστικών» 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 ότι 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

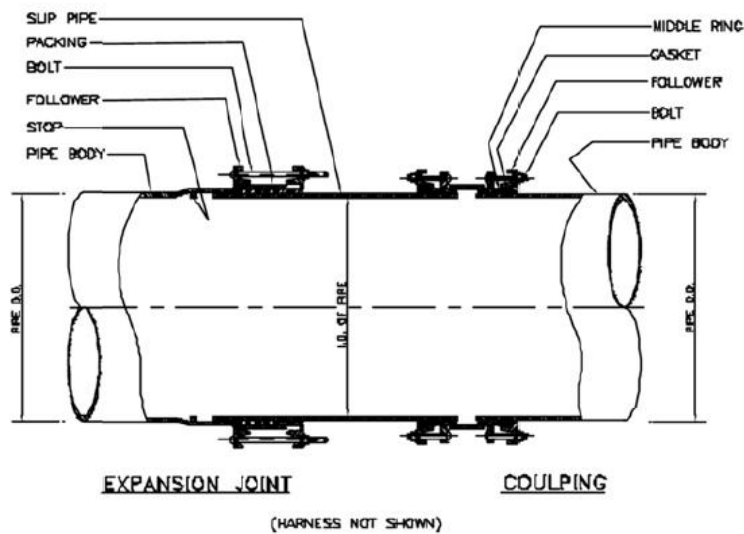
αναπτυσσόμενων εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων στον αγωγό μειώνονται σε  $t_u L_1$  και  $t_u L_2$  αντίστοιχα έναντι των αρχικών  $t_u L/2$ . Αντίθετα η χρήση των κόμβων έχει αρνητικό αντίκτυπο στην περίπτωση του Σχήματος 2.4b, όπου η μείωση των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών τάσεων σε  $t_u L_1$  συνοδεύεται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



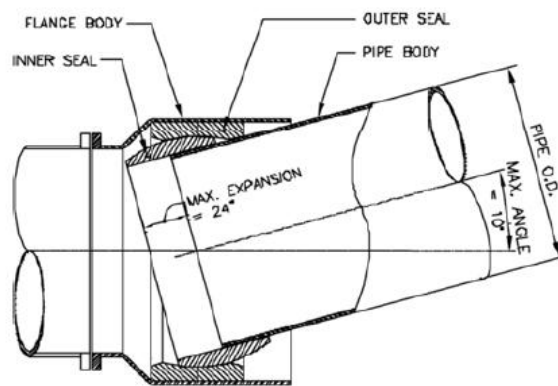
Σχήμα 2.4: Πιθανή (α) ευνοϊκή και (β) αρνητική επιρροή κόμβων επιμήκυνσης (Ο' Rourke & Liu, 2012)

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 «φουσαρμόνικας» και τους σύνθετους κόμβους.

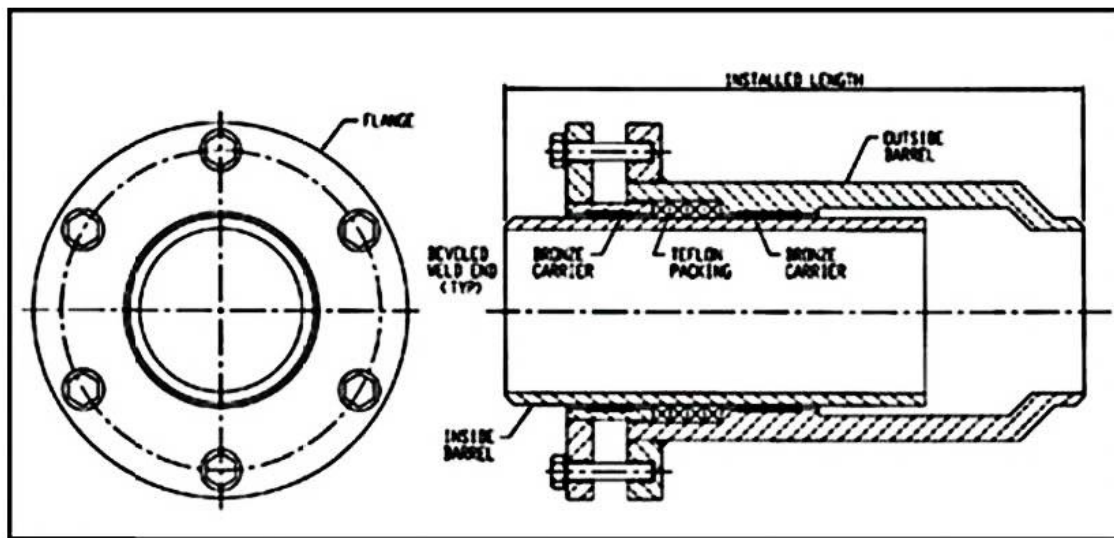
### 2.3.1 Απλοί κόμβοι ολίσθησης (Slip expansion joints)

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 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.

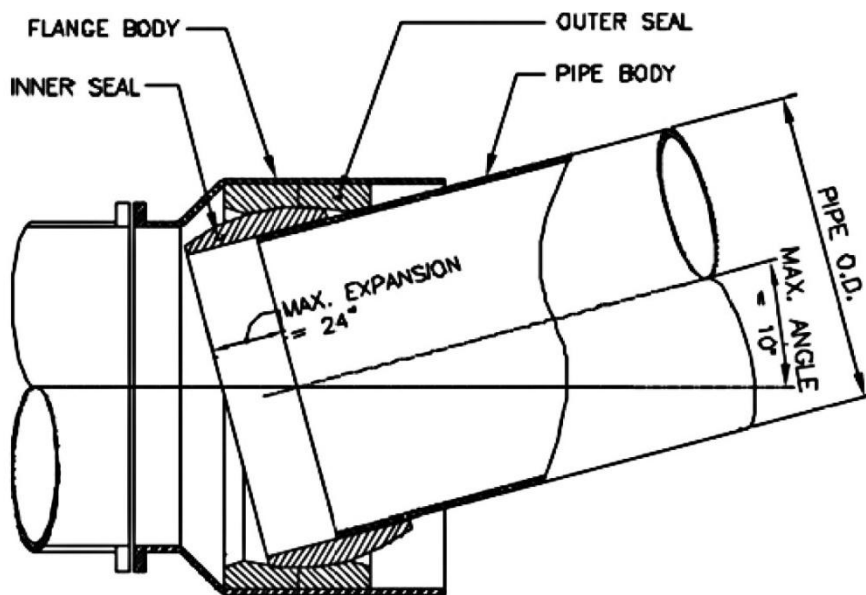
Ωστόσο, τόσο η πολυπλοκότητα αυτών των διατάξεων όσο και η μεγάλη αβεβαιότητα για την ακριβή θέση και έκταση της περιοχής του ρήγματος καθιστούν τη λύση αυτή ιδιαίτερα δαπανηρή, χωρίς ταυτόχρονα να είναι επαρκώς αποτελεσματική, αφού δε μειώνει καθόλου τις καμπτικές παραμορφώσεις του αγωγού.



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.



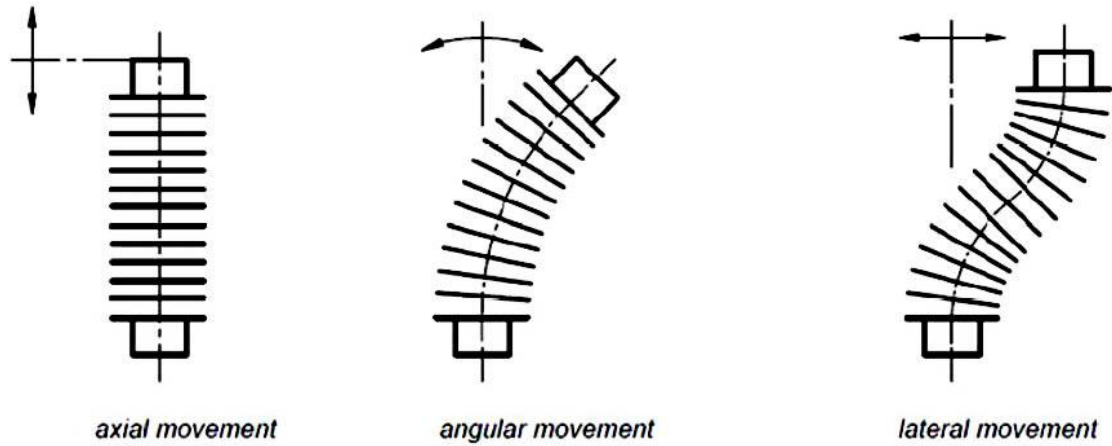
**Σχήμα 2.7:** Τυπική διάταξη κόμβου τύπου "σφαίρας" με ικανότητα επιμήκυνσης (από EBBA Iron Inc. σύμφωνα με Koike et all 2001)

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»

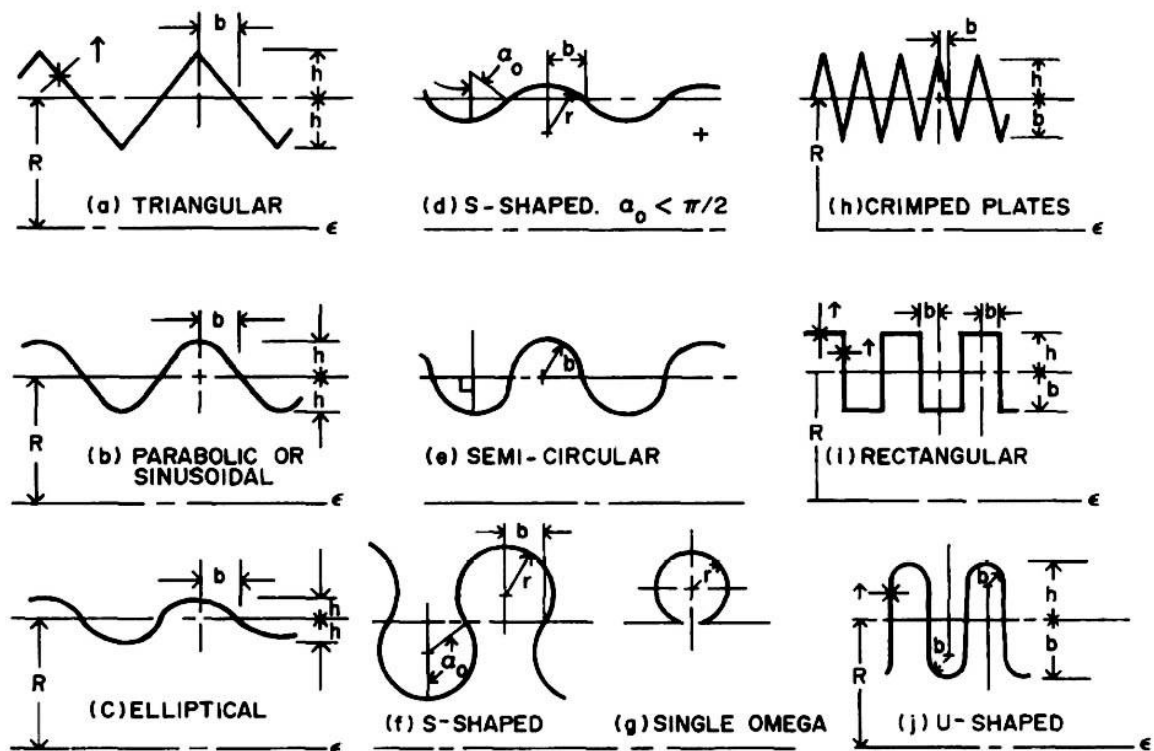
Οι εύκαμπτοι κόμβοι τύπου «Bellows» (φυσαρμόνικας) αποτελούνται από λεπτότοιχο πτυχωμένο χάλυβα και είναι έτσι σχεδιασμένοι ώστε να έχουν μεγάλη ευκαμψία όταν υποβάλλονται σε αξονικά φορτία, εσωτερική πίεση και καμπτικές ροπές. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζονται τα διάφορα είδη μετακίνησης που μπορούν να παραληφθούν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

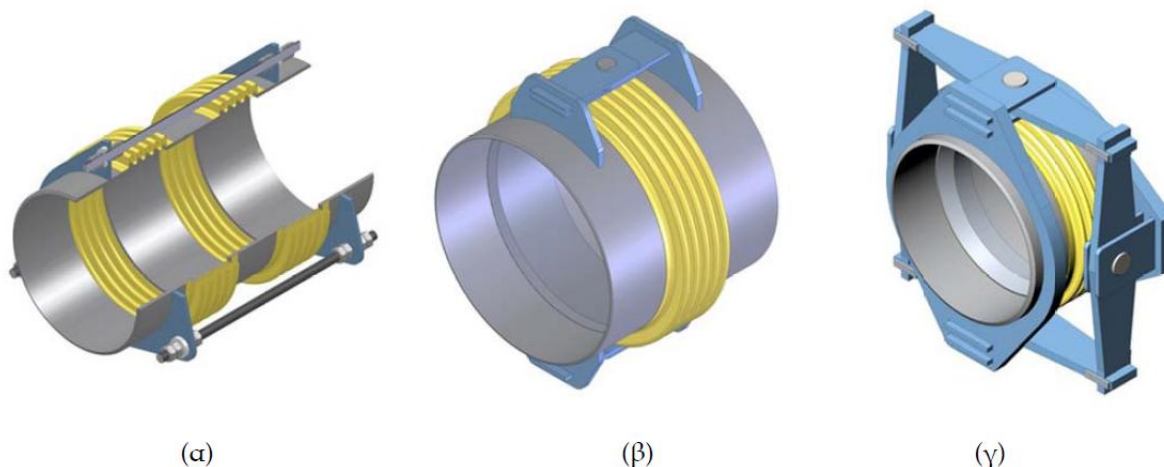


Σχήμα 2.9: Είδη προφίλ της πτύχωσης κόμβων τύπου "Bellows" (σύμφωνα με Wilson 1984)



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 των 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 2.10:** 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 αυτό 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 ένα 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.

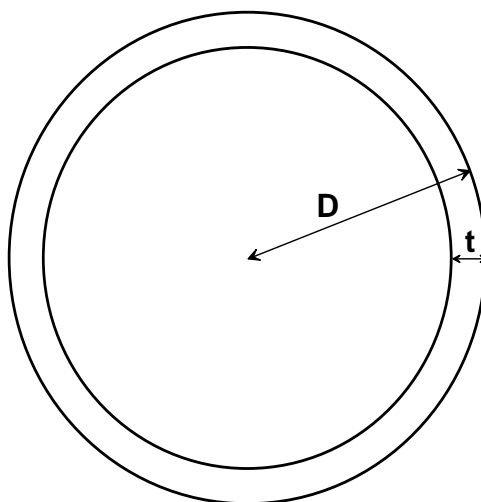
## 3.2 Αναλυτικές μέθοδοι για συνεχείς ευθύγραμμους αγωγούς

### 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.

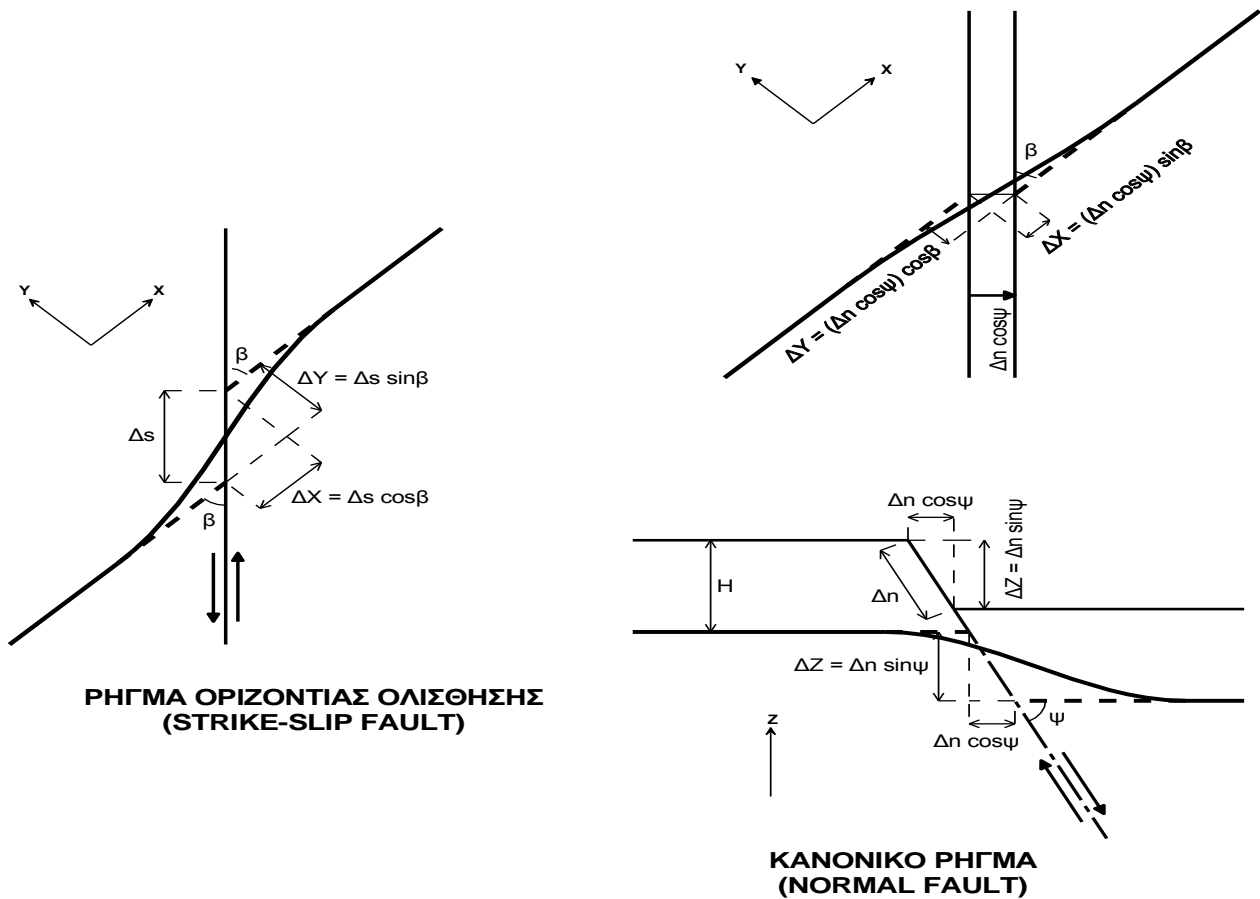
#### Παραδοχές:

- 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  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  και  $\Delta z$  της μετατόπισης του ρήγματος για ρήγμα οριζόντιας 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

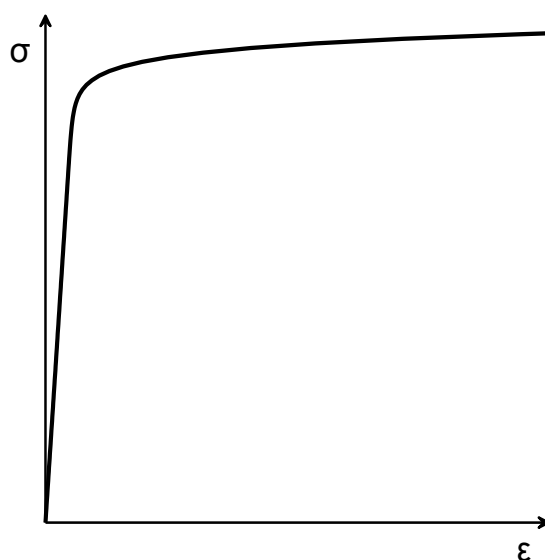
τη διάρρηξη του ρήγματος τα τμήματα του αγωγού παραμένουν ευθύγραμμα και συμμετρικά εκατέρωθεν του ρήγματος, κάτι που ισχύει μόνο για την περίπτωση των ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης ενώ δεν είναι αληθές για κανονικά ρήγματα λόγω της διαφορετικής αντίστασης του εδάφους στην προς τα άνω και κάτω κίνηση.

### 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 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 την συμπεριφορά του υλικού του αγωγού προσεγγίζεται από την σχέση των Ramberg και Osgood (Σχήμα 3.3).



**Σχήμα 3.3:** Η καμπύλη Ramberg – Osgood

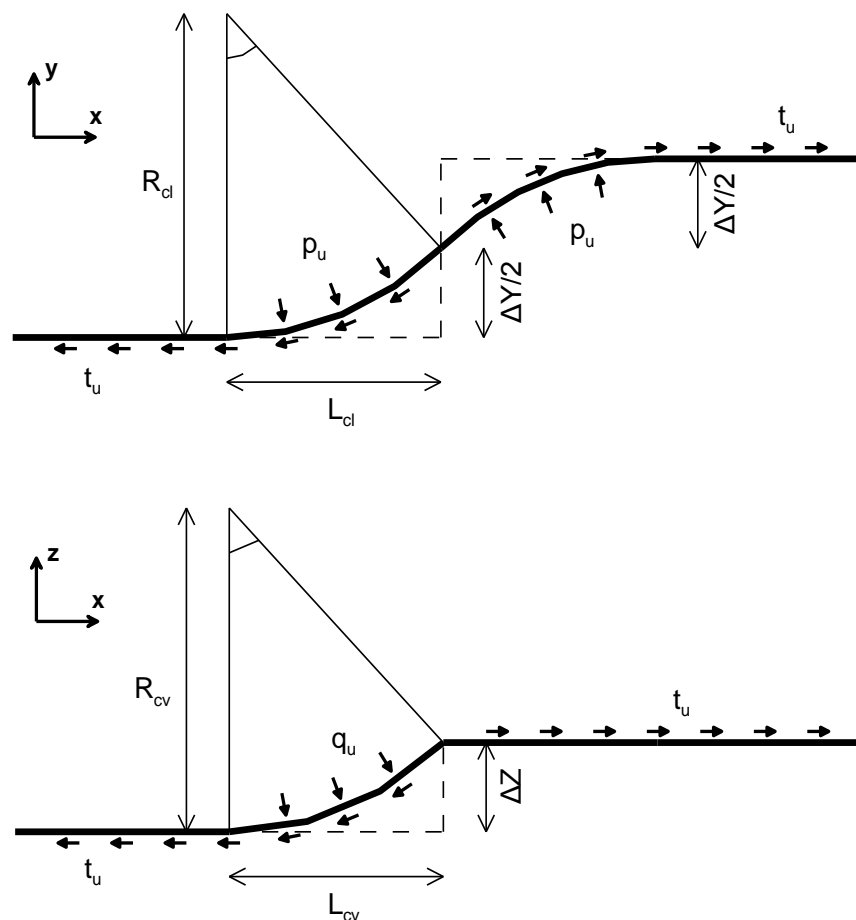
- Λαμβάνεται υπ' όψιν η επίδραση της εσωτερικής πίεσης στον αγωγό, η οποία είναι σημαντική, όταν είναι κρίσιμες για την αστοχία οι ανηγμένες παραμορφώσεις λόγω κάμψης και όχι λόγω αξονικής έντασης.

- 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 υπ' όψιν 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 ρήματος και της καμπυλότητας του αγωγού- εξισωθεί με την 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 ρήματος), οπότε και ο αγωγός συμπεριφέρεται ουσιαστικά ως καλώδιο.

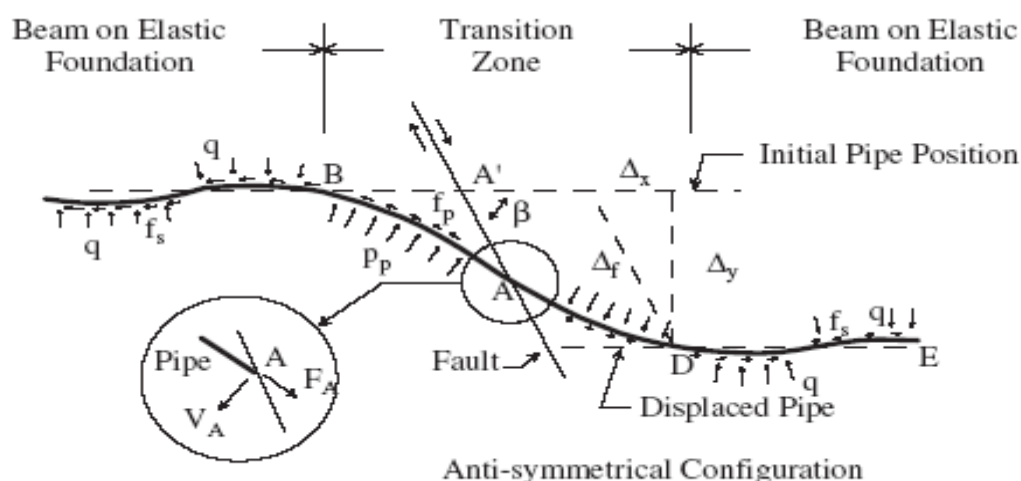
### 3.2.3 Μεθοδολογία Wang and Yeh (1985)

Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί συνέχεια αυτής των Kennedy et al. (1977), αφορά περιπτώσεις για ρήματα οριζόντιας ολίσθησης, τα οποία προκαλούν είτε εφελκυσμό είτε θλίψη σε αγωγούς και στηρίζεται στην 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 υπ' όψιν 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 ημίαιπρες 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 την 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 αυτό 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 Kennedy et al. (1977), και ακολουθεί ανάλυση κελυφών για εύρεση της μέγιστης παραμόρφωσης του αγωγού.

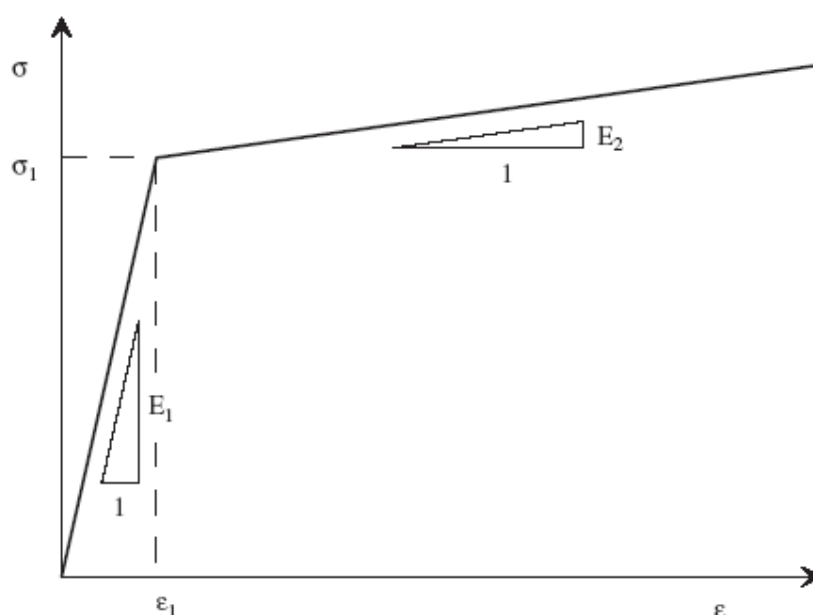
Διευκρινίζεται ότι οι προηγούμενες μεθοδολογίες αφορούσαν μέγιστες παραμορφώσεις του αγωγού που να μην ξεπερνούν το όριο διαρροής του χάλυβα (περί το 5%), ενώ οι αναλύσεις των Takada et al. αναφέρονται σε πολύ μεγαλύτερες επιβαλλόμενες παραμορφώσεις, μέχρι και το 40%. Οι παραμορφώσεις αυτές είναι εκτός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



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 την 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 στην 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 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 οριζόντια 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 δεν 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 προσομοιώνεται και λειτουργεί ως «δοκός» και το άλλο ως «καλώδιο».

Μετά από σύγκριση της μεθοδολογίας με αριθμητικές αναλύσεις συμπεραίνεται ότι υπάρχει ικανοποιητική ακρίβεια. Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου 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 αναλυτικής μεθόδου συγκρίθηκαν με αυτά των αριθμητικών αναλύσεων δίνοντας ικανοποιητική σύγκλιση. Πλεονέκτημα της μεθοδολογίας αποτελεί το γεγονός ότι η επίλυση επιτυγχάνεται χωρίς τη χρήση ειδικού λογισμικού για επίλυση των αντίστοιχων εξισώσεων (όπως η αντίστοιχη μεθοδολογία των Trifonov & Cherniy).

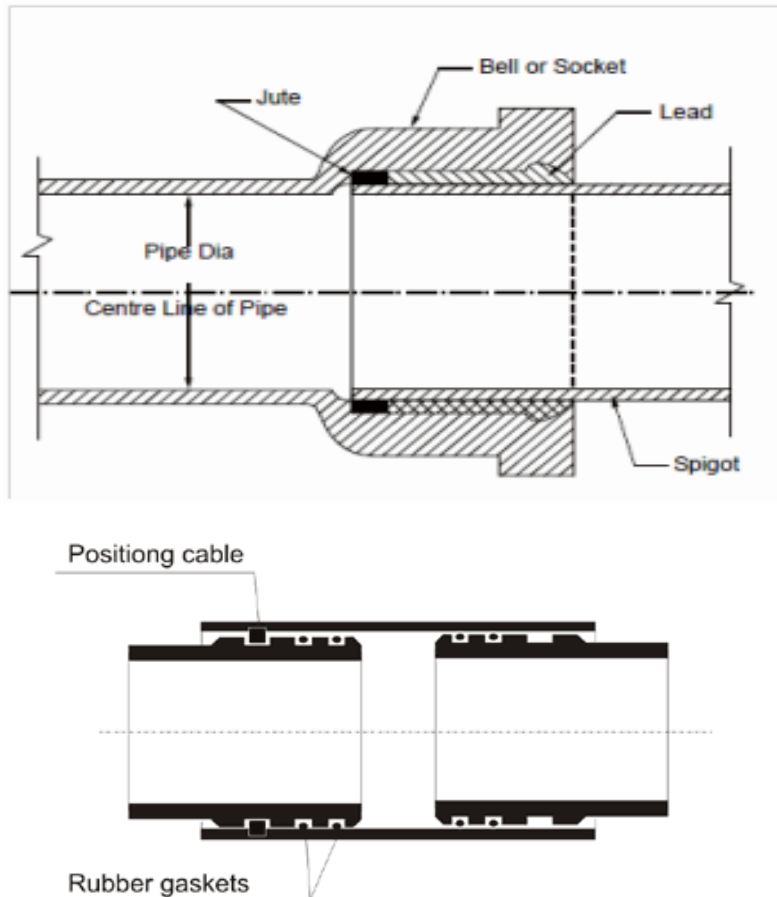
### 3.3 Αναλυτικές μέθοδοι για σπονδυλωτούς αγωγούς

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 είναι που 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 στην 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 τις 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  $\delta_f$  δίνεται από την σχέση 3.1 :

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

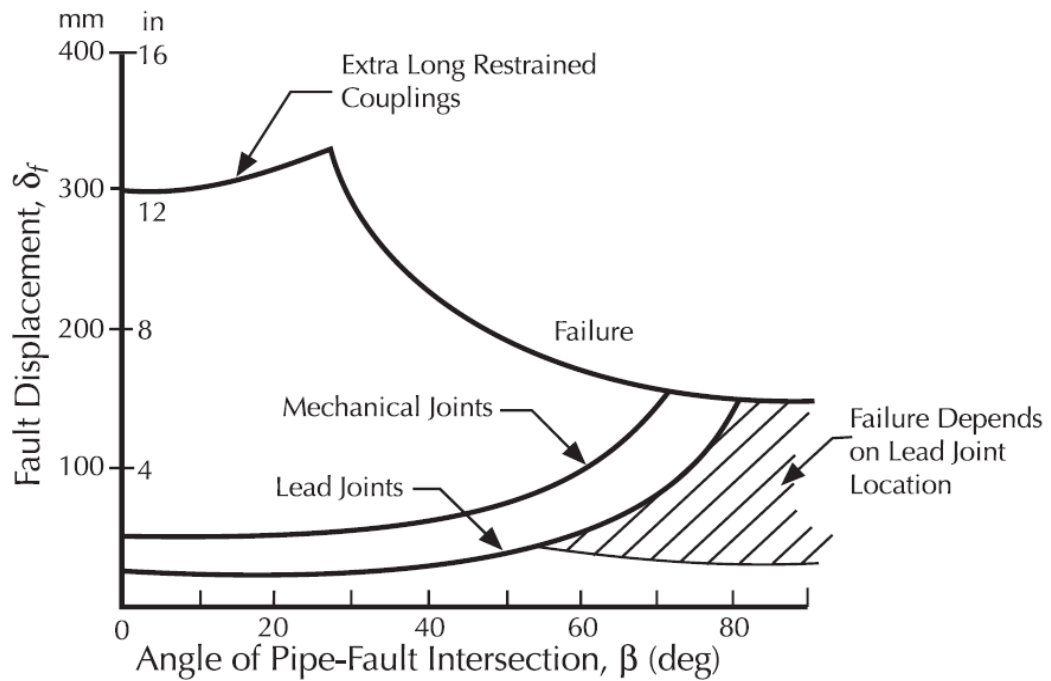
όπου  $\beta$  η γωνία διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό,  
 $\delta_a$  η ικανότητα διαμήκους σχετικής μετακίνησης της κάθε σύνδεσης και  
 $\delta_l$  η ικανότητα εγκάρσιας σχετικής μετακίνησης δύο διαδοχικών συνδέσεων, η οποία εξαρτάται από την ικανότητα στροφής της σύνδεσης και της απόστασης μεταξύ των συνδέσεων. Μπορεί να υπολογιστεί από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για τυπικούς αγωγούς.

Η αστοχία του αγωγού εξαρτάται από τη γωνία  $\beta$  (γωνία διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό). Πιο συγκεκριμένα για μικρές γωνίες  $\beta$  επικρατούν οι αξονικές μετακινήσεις και για μεγάλες οι εγκάρσιες. Για τον λόγο αυτό οι ερευνητές πρότειναν μια εξίσωση για τον υπολογισμό της βέλτιστης γωνίας διασταύρωσης, που επιτρέπει την 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 πιο κάτω διάγραμμα εκτίμησης της βέλτιστης γωνίας διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό .

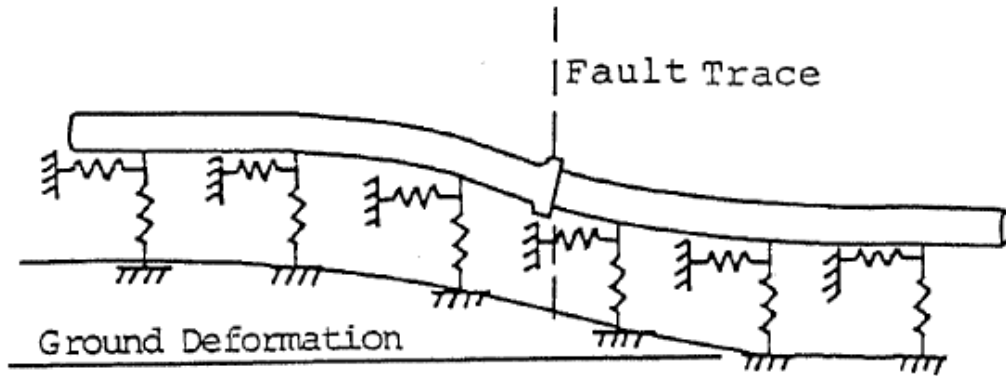




**Σχήμα 3.8:** Εκτίμηση μέγιστης επιτρεπόμενης μετακίνησης ρήγματος ως προς τη γωνία διασταύρωσης με τον αγωγό ανάλογα με το είδος των συνδέσεων του σπονδυλωτού αγωγού (O'Rourke & Trautmann, 1981)

### 3.3.2 Μεθοδολογία Takada (1984)

Η μεθοδολογία αυτή 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 την 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 την 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.

$$\begin{cases}
 M_{k+1}^L = M_k^R \\
 = -k_R (\phi_{k+1}^L - \phi_k^R)
 \end{cases}
 \quad
 \begin{cases}
 Q_{k+1}^L = Q_k^R
 \end{cases}
 \quad
 \begin{cases}
 N_{k+1}^L = N_k^R \\
 = -k_T (u_{k+1}^L - u_k^R)
 \end{cases}$$

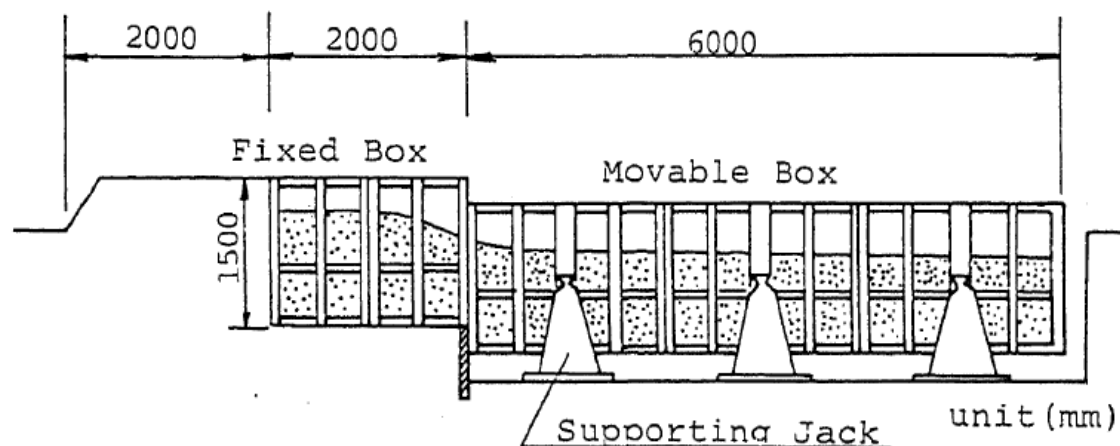
**Σχήμα 3.10:** Σχέσεις ισορροπίας στους κόμβους σύμφωνα με τον Takada (1984)

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.

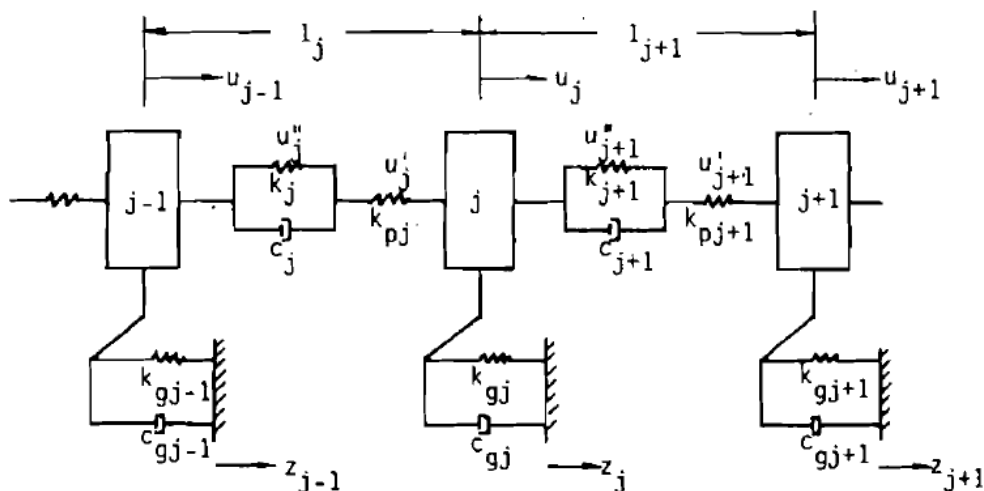


Σχήμα 3.11: Πειραματική διάταξη του Takada (1984).

### 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 στο αγωγό, καθώς και των σχετικών μετατοπίσεων στις συνδέσεις. Το υλικό του αγωγού θεωρήθηκε ελαστικό, ενώ κάθε σύνδεση προσομοιώθηκε με ένα ελατήριο και ένα 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 συναρτήσεως του λόγου  $k/k_p$ , δηλαδή του λόγου δυσκαμψίας των συνδέσεων ως προς την 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 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  $\delta$  η μετακίνηση του ρήγματος  
 $\beta$  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:

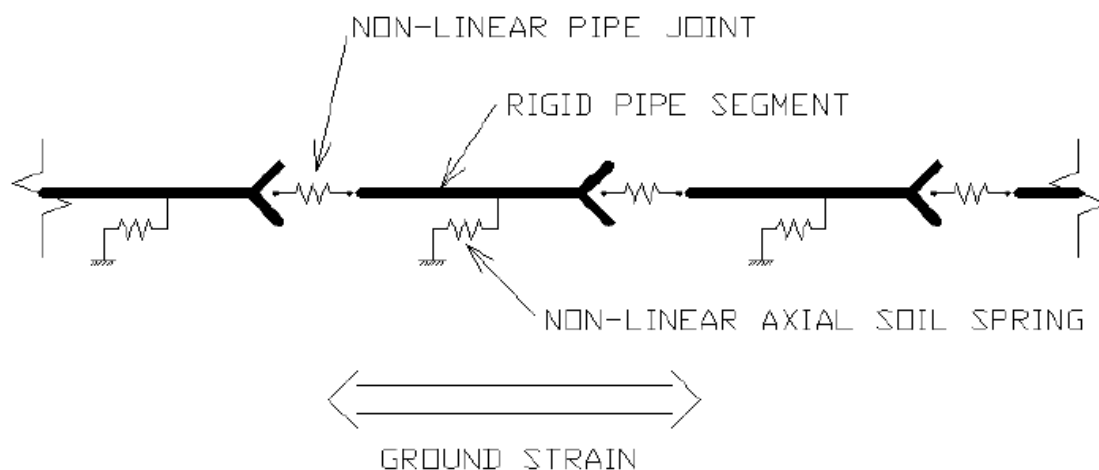
$$V = \frac{p_u L_p}{4} \quad (3.9)$$

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

### 3.3.5 Μεθοδολογία O'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 ρήγματος.



**Σχήμα 3.13:** Αναλυτικό προσομοίωμα σπονδυλωτού αγωγού σύμφωνα με τον O'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 δι-γραμμική 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  $\delta$  είναι μικρή συγκριτικά με το μήκος των τμημάτων  $L_p$ , η αντίστοιχη σχετική στροφή  $\gamma_{joint}$ , 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 ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης

---

### 4.1 Γενικά

Από την βιβλιογραφική επισκόπηση που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι σαφές ότι δεν έχει αναπτυχθεί κάποια αναλυτική μεθοδολογία για την εκτίμηση παραμορφώσεων σε εύκαμπτους αγωγούς με κόμβους. Οι μεθοδολογίες που υπάρχουν σχετίζονται με σπονδυλωτούς αγωγούς και μοιάζουν με το πρόβλημα που μελετάμε, αλλά οι συνδέσεις στους σπονδυλωτούς αγωγούς θεωρούνται αδύναμοι κρίκοι, που παραλαμβάνουν κάποια μετακίνηση και στροφή, και ο σχεδιασμός γίνεται με σκοπό να περιοριστούν οι μετακινήσεις και οι στροφές στον κόμβο εντός των ανεκτών ορίων. Οι εύκαμπτοι κόμβοι σκοπό έχουν τον περιορισμό των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό και την ασφαλή παραλαβή των επιβαλλόμενων αξονικών και διατμητικών τάσεων και σε καμία περίπτωση δεν αποτελούν τρωτό σημείο του αγωγού.

Για την διατύπωση της προτεινόμενης μεθοδολογίας χρησιμοποιήθηκαν οι μεθοδολογίες των Karamitros et al. (2007,2011) και των Trifonov & Cherniy (2010).

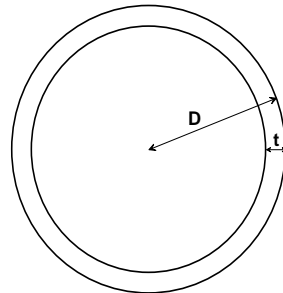
### 4.2 Παραδοχές αναλυτικής μεθοδολογίας

Ακολούθως παρουσιάζονται οι παραδοχές πάνω στις οποίες βασίζεται η εν λόγω μεθοδολογία, με έμφαση στα βήματα με τις σχέσεις και τους επαναληπτικούς βρόγχους της μεθόδου, έτσι ώστε να γίνει πλήρως κατανοητή η λογική και η θεωρία στην οποία στηρίχθηκε η κατάστρωσή της. Συγκεκριμένα:

- Ο εξεταζόμενος χαλύβδινος αγωγός είναι λεπτότοιχος και έχει εξωτερική διάμετρο  $D$  και πάχος  $t$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Το εμβαδόν και η ροπή αδράνειας της διατομής προκύπτουν από τις ακόλουθες σχέσεις:

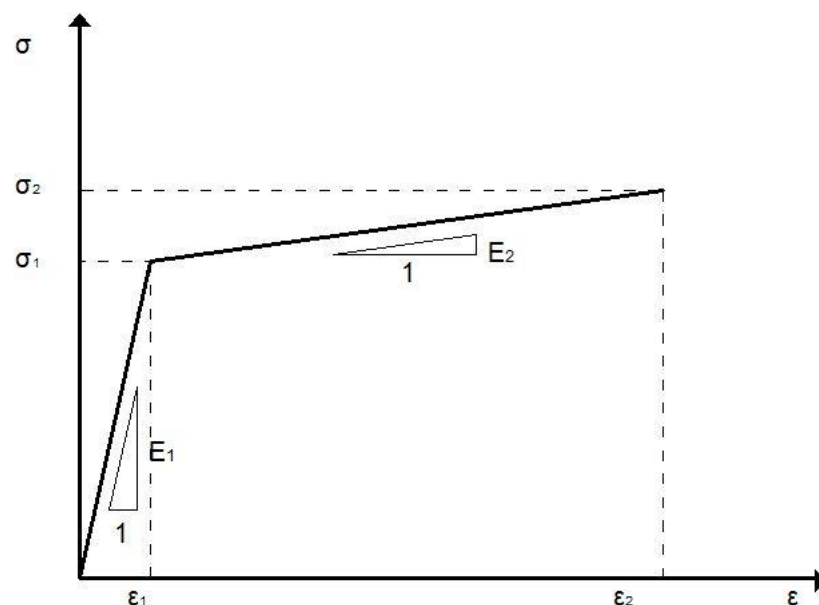
$$A_s = \pi(D - t)t \quad (4.1)$$

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



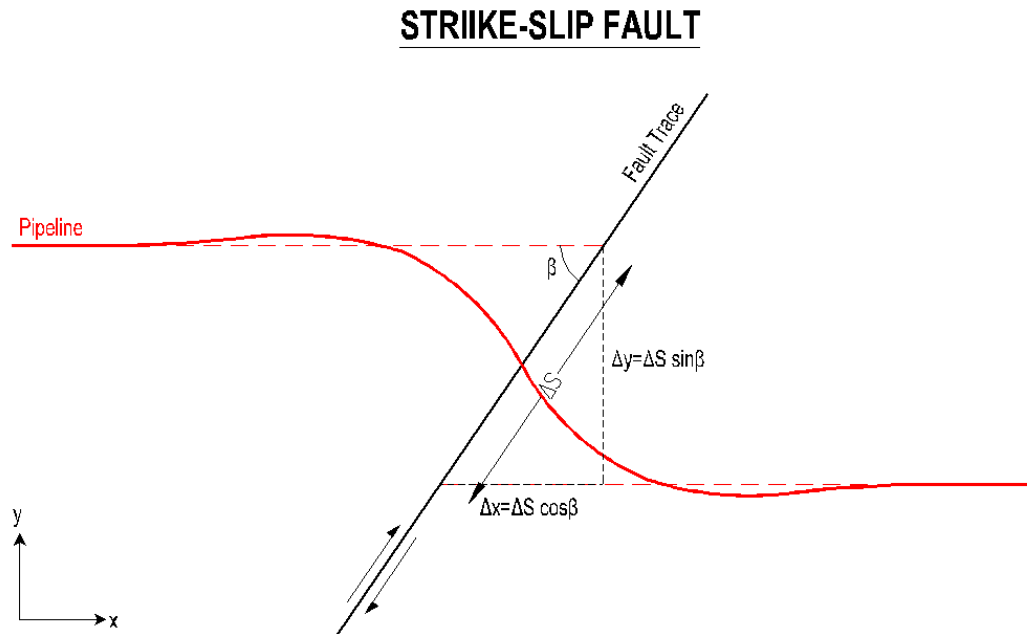
Σχήμα 4.1: Γεωμετρία Διατομής αγωγού.

- Η σχέση τάσεων παραμορφώσεων του χάλυβα περιγράφεται από το διγραμμικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων, που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2, με μέτρο ελαστικότητας  $E_1$  στην ελαστική περιοχή και  $E_2$  στην πλαστική περιοχή αντίστοιχα. Επίσης στο σχήμα αυτό  $\sigma_1$  είναι η τάση διαρροής του χάλυβα και  $\varepsilon_1$  η παραμόρφωση διαρροής. Σαν μέγιστη επιτρεπόμενη τάση ορίζεται η  $\sigma_2$  και σαν επιτρεπόμενη παραμόρφωση η  $\varepsilon_2$ , τιμή που ξεπερνάει την τελευταία τιμή και θεωρητικά οδηγεί σε αστοχία του υλικού.



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

- Το ρήγμα τέμνει σημειακά τον αγωγό και έχει μηδενικό πάχος ζώνης διάρρηξης. Κατά συνέπεια οι μετατοπίσεις του ρήματος μπορούν να αναλυθούν σε συνιστώσες στους άξονες X και Y, όπου X είναι ο άξονας παράλληλα στον άξονα του αγωγού και ο Y είναι κάθετος στον X, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3.



**Σχήμα 4.3:** Η μετατόπιση του ρήματος οριζόντιας ολίσθησης αναλύεται στη συνιστώσα  $\Delta x$  παράλληλα και  $\Delta y$  εγκάρσια ως προς τον αγωγό.

- Η αλληλεπίδραση του αγωγού με το περιβάλλον έδαφος της επίχωσης εξασφαλίζεται μέσω ελαστοπλαστικών ελατηρίων winkler, τόσο για τις δυνάμεις τριβής που ασκούνται στην αξονική διεύθυνση του αγωγού, όσο και για την εγκάρσια αντίσταση του εδάφους στην μετατόπιση του αγωγού.
- Ισχύει η αρχή της επαλληλίας για τις επιβαλλόμενες φορτίσεις (αξονικές και εγκάρσιες), παρά τον έντονο μη-γραμμικό χαρακτήρα του προβλήματος.
- Παρά τις σημαντικές παραμορφώσεις που αναμένεται να αναπτύξει η διατομή στην περιοχή του ρήματος εντούτοις γίνεται η παραδοχή επιπεδότητας της διατομής.
- Οι εύκαμπτοι κόμβοι μπορούν να στραφούν γύρω από τον κατακόρυφο άξονα Z με σταθερή στρωφική δυσκαμψία  $C_r$ . Η δυσκαμψία των κόμβων στους υπόλοιπους άξονες είναι αντίστοιχη με την δυσκαμψία που έχουν τα ενδιάμεσα τμήματα του αγωγού. Γενικά η στρωφική δυσκαμψία  $C_r$  είναι πολύ

μικρή, με αποτέλεσμα οι κόμβοι να συμπεριφέρονται ουσιαστικά ως αρθρώσεις και να αναπτύσσονται μικρές ροπές σε αυτούς.

- Λαμβάνοντας υπόψη ότι υπάρχει αβεβαιότητα στην ακριβή θέση της διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό, κατά τον σχεδιασμό θα πρέπει να καλύπτεται η περιοχή περί το ίχνος με εύκαμπτους κόμβους με σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Γι' αυτό τον λόγο στο αναλυτικό προσομοίωμα υπάρχουν δύο κόμβοι εκατέρωθεν του ίχνους ρήγματος. Εκτός αυτού θεωρήθηκε ότι το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό στη μέση μεταξύ των δύο αυτών κόμβων ή δίπλα σε κάποιον από αυτούς.

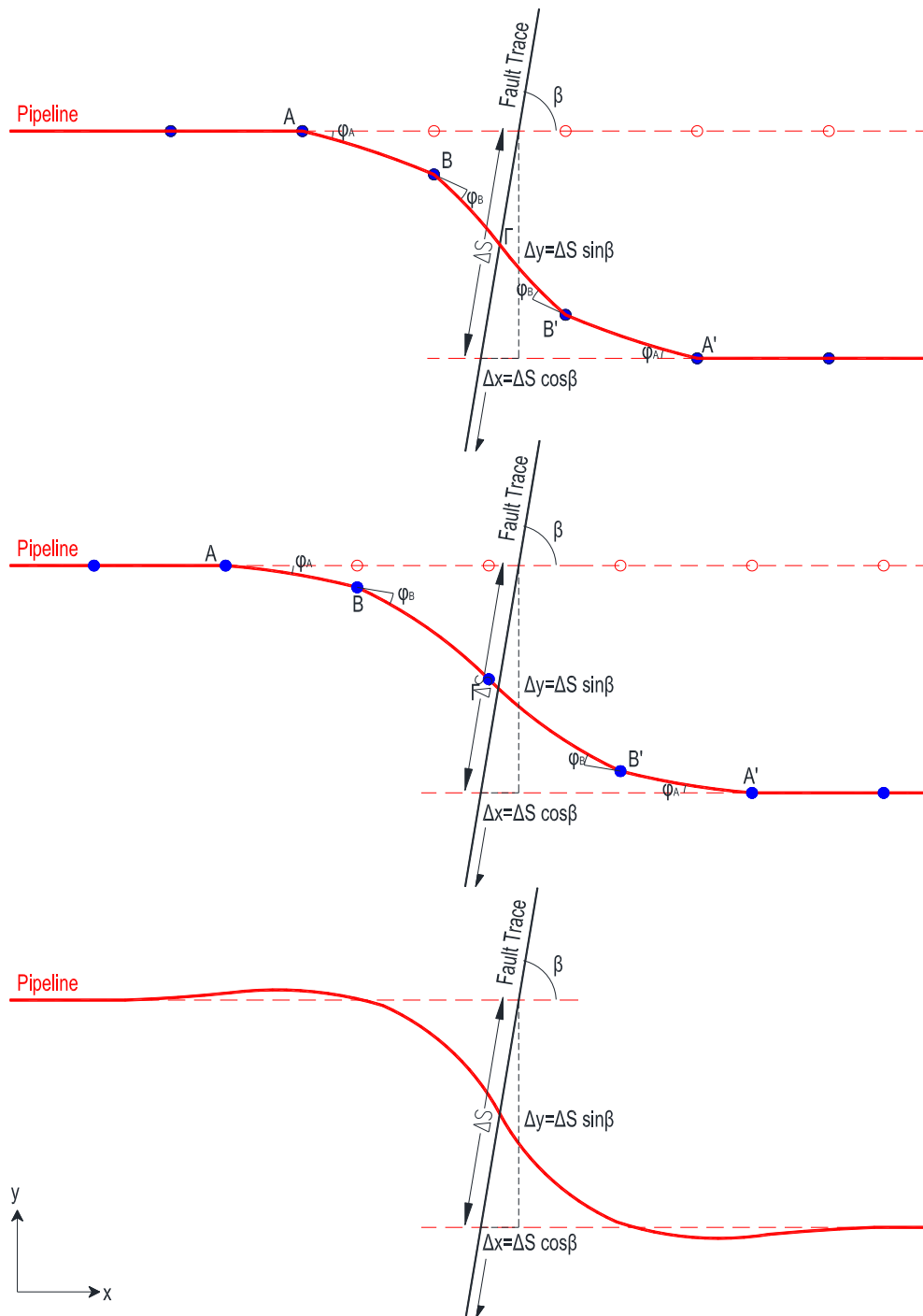
### **4.3 Ομοιότητες & Διαφορές σχετικά με τους συνεχείς αγωγούς**

Η ύπαρξη εύκαμπτων κόμβων στον αγωγό επηρεάζει την συμπεριφορά του αγωγού κατά την διάρρηξη ρήγματος σε σχέση με την συμπεριφορά των συνεχών αγωγών. Στο Σχήμα 4.4(α) και Σχήμα 4.4(β) φαίνεται ο παραμορφωμένος φορέας όταν το ρήγμα διασταυρώνεται με αγωγό στη μέση μεταξύ των δύο κόμβων ή τέμνει τον αγωγό ακριβώς δίπλα από έναν κόμβο. Προς σύγκριση, στο Σχήμα 4.4(γ) φαίνεται ο παραμορφωμένος φορέας όταν διασταυρώνεται με τον άξονα του αγωγού, αλλά χωρίς την παρουσία εύκαμπτων κόμβων.

Από το Σχήμα 4.4 διαπιστώθηκαν οι ακόλουθες ομοιότητες μεταξύ των δύο προβλημάτων:

- Ο αγωγός παραμένει συμμετρικός ως προς τη θέση διασταύρωσης με το ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης, σημείο όπου λόγω ισορροπίας μηδενίζεται η ροπή κάμψης. Ως εκ τούτου επαρκεί η επίλυση του μισού φορέα αντικαθιστώντας τον υπόλοιπο με μια άρθρωση.
- Υπάρχει ένα μήκος αγκύρωσης στο οποίο αναπτύσσεται σχετική ολίσθηση μεταξύ του αγωγού και του περιβάλλοντος εδάφους, λόγω των αξονικών τάσεων που επιβάλλει η διάρρηξη του ρήγματος στον αγωγό, οι οποίες μειώνονται σταδιακά λόγω των δυνάμεων τριβής. Δεδομένου ότι οι αξονικές τάσεις μπορεί να ξεπεράσουν τις τάσεις διαρροής του χάλυβα, ορίζεται ένα ελαστικό και ένα πλαστικό μήκος αγκύρωσης.
- Όταν ένα μέρος της διατομής διαρρέει λόγω της αξονικής δύναμης και της καμπτικής ροπής που του ασκείται, εφαρμόζεται ειδική μεθοδολογία για τον

υπολογισμό των καμπτικών παραμορφώσεων, όπως περιγράφεται στην πορεία.

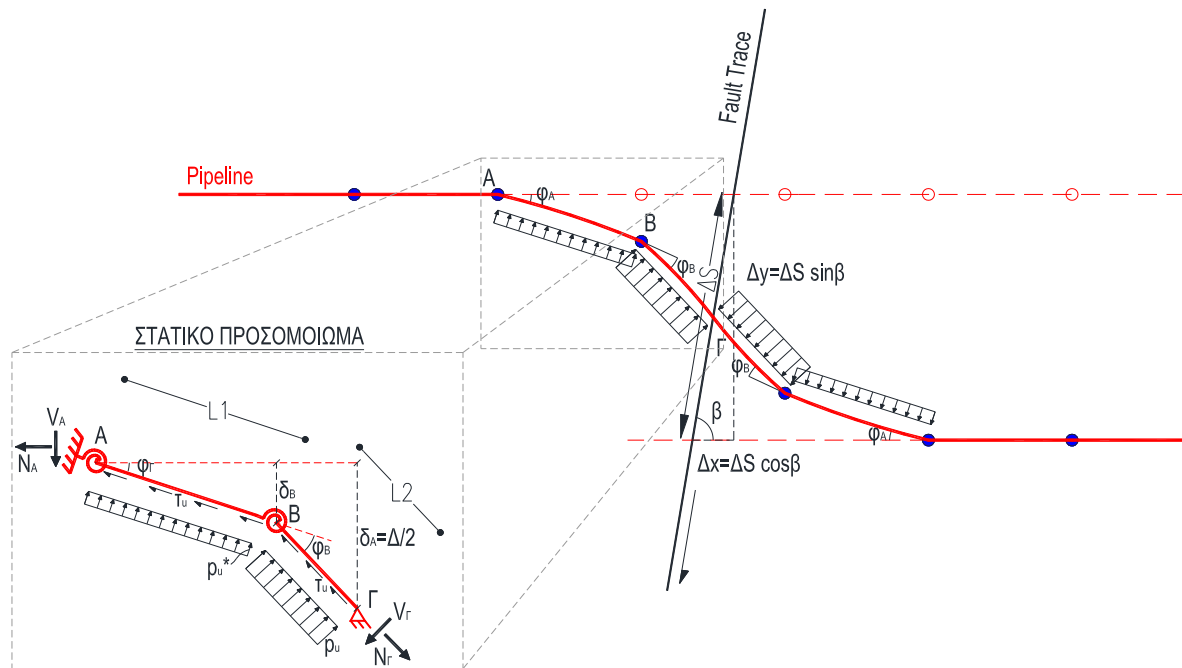


**Σχήμα 4.4:** Παραμορφωμένος φορέας αγωγού που διασταυρώνεται με ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης (α) ανάμεσα σε δύο εύκαμπτους κόμβους, (β) ακριβώς δίπλα από έναν απ' αυτούς και (γ) σε θέση χωρίς εύκαμπτους κόμβους.

Οι βασικές διαφορές που εντοπίστηκαν στα δύο προβλήματα και εισήχθησαν στο στατικό προσομοίωμα του συνολικού φορέα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5 είναι οι εξής:

- Οι εύκαμπτοι κόμβοι έχουν μικρότερη στροφική δυσκαμψία από ότι τα συνεχή τμήματα του αγωγού, και κατά συνέπεια συγκεντρώνεται σε αυτούς στροφή ως προς τον άξονα  $Z$ , ενώ τα ενδιάμεσα τμήματα του αγωγού παραμένουν σχετικά ευθύγραμμα και αναπτύσσονται μικρές καμπτικές παραμορφώσεις σε αυτά.
- Το μήκος του καμπλωμένου τμήματος, δηλαδή της περιοχής με τις έντονες εγκάρσιες μετατοπίσεις, δεν εξαρτάται από την αντοχή των πλευρικών ελατηρίων, την ακαμψία του αγωγού και το μέγεθος της επιβαλλόμενης μετακίνησης από το ρήγμα, όπως στην περίπτωση των συνεχών αγωγών. Τώρα, είναι εξαρχής δεδομένο, εφόσον περιορίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις μεταξύ των σημείων  $AB\Gamma B'A'$ . Αυτό που δεν είναι εξαρχής δεδομένο είναι οι γωνίες  $\varphi_A$  και  $\varphi_B$  ή αλλιώς το ποσοστό της συνολικής εγκάρσιας μετατόπισης, που θα παραληφθεί λόγω της στροφής των κόμβων από τα τμήματα  $AB$  και  $B\Gamma$  αντίστοιχα.
- Εφόσον ο αγωγός πριν από το σημείο  $A$  υφίσταται αμελητέες εγκάρσιες μετατοπίσεις δεν χρειάζεται να επιλυθεί ως ημι-απειρομήκης δοκός επί ελαστικών στηρίξεων. Για το λόγο αυτό στο προσομοίωμα το τμήμα αυτό αντικαθίσταται από μια άρθρωση. Η αξονική δύναμη που ασκείται λόγω ισορροπίας του τμήματος  $AB$  είναι πρακτικά ίση με την αξονική που αναπτύσσεται στο τμήμα του αγωγού πριν το σημείο  $A$  και η οποία παραλαμβάνεται μέσω της τριβής που ασκείται κατά μήκος του τμήματος αυτού.
- Οι εγκάρσιες μετατοπίσεις μεταξύ των κόμβων  $A$  και  $B$  μπορεί να είναι μικρές και να μην αρκούν να εξαντληθεί η οριακή εγκάρσια αντίσταση του εδάφους, έτσι σε αυτό το τμήμα θα θεωρηθεί ότι η φόρτιση του εδάφους έχει μέγιστη τιμή  $p_u^*$ , η οποία, για πολύ μικρές τιμές εγκάρσιας μετατόπισης του κόμβου  $B$ , δεν ταυτίζεται κατ' ανάγκην με την οριακή αντοχή του εδάφους  $p_u$ . Για λόγους απλοποίησης των εξισώσεων η επιβαλλόμενη φόρτιση λαμβάνεται σταθερή και όχι τριγωνικής κατανομής, με μέγιστη τιμή ίση με τη μισή της μέγιστης αναπτυσσόμενης. Μετά τον κόμβο  $B$  η εγκάρσια αντίσταση του

εδάφους μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και ίση με την μέγιστη, εφόσον πολύ γρήγορα φτάνει σε αυτή ακόμα και για περιπτώσεις μηδενικής μετακίνησης του σημείου B.



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

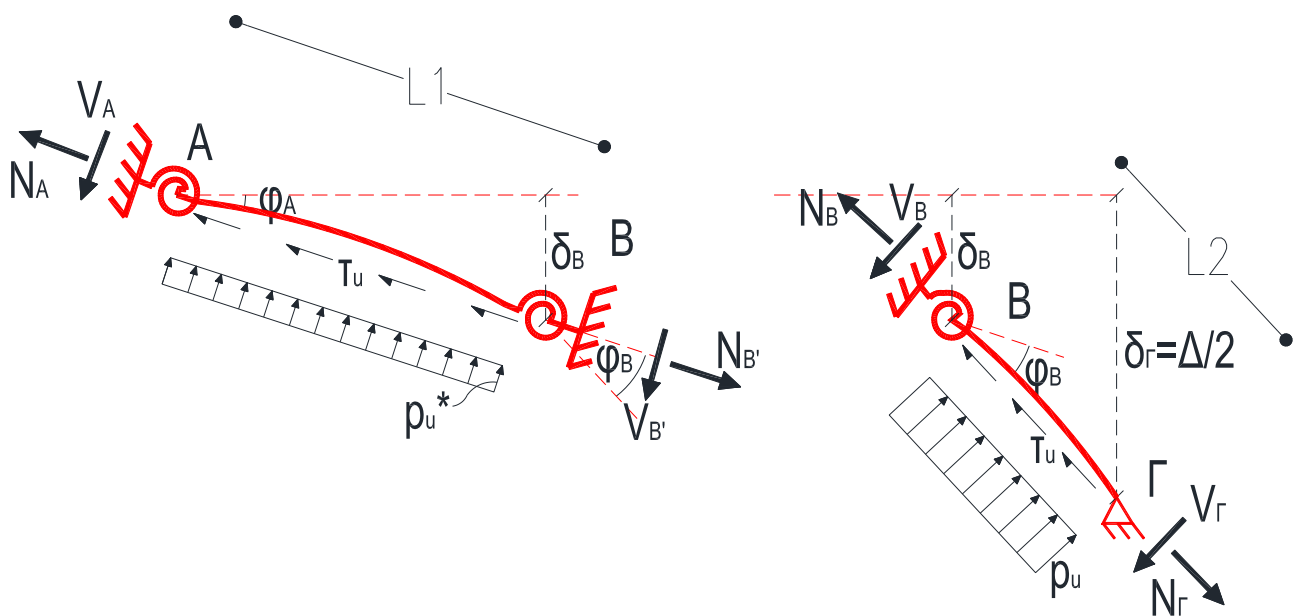
#### 4.4 Περιγραφή της μεθοδολογίας

Ακολουθώντας τις παραδοχές που έχουν ήδη αναφερθεί, η μεθοδολογία βασίζεται σε έναν επαναληπτικό αλγόριθμο, ο οποίος παρουσιάζεται στη συνέχεια. Η διαδικασία έχει προγραμματιστεί σε ένα απλό κώδικα excel, όπου εισάγονται βασικές παράμετροι της ανάλυσης και με τη χρήση μακροεντολών η επίλυση ολοκληρώνεται και κατασκευάζονται διαγράμματα για τα βασικά μεγέθη της ανάλυσης.

##### Βήμα 1<sup>ο</sup> Αρχική «ελαστική» επίλυση του φορέα

Επιλύεται στατικά ο φορέας χρησιμοποιώντας τις αρχικές τιμές δυσκαμψίας του αγωγού για όλες τις ράβδους. Λόγω του ότι οι εξισώσεις έχουν πεπλεγμένη μορφή, απαιτείται επαναληπτική διαδικασία επίλυσης.

Όπως προαναφέρθηκε το προσομοίωμα είναι συμμετρικό ως προς το σημείο τομής με τον αγωγό και το ίχνος του ρήγματος. Αυτό ισχύει και για τις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν (δήλαδή όταν το ρήγμα διέρχεται ακριβώς στο μέσο των δύο κόμβων ή ακριβώς στην παρειά του ενός από τους δύο κόμβους. Ως εκ τούτου μπορεί να λυθεί μόνο ο μισός φορέας τοποθετώντας άρθρωση εκεί όπου είναι η τομή του αγωγού με το ρήγμα. Ο μισός φορέας, χωρίζεται σε δύο τμήματα, AB και BΓ, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5. Και τα δύο τμήματα θεωρούνται ελαστικές δοκοί, οι οποίες βρίσκονται κάτω από ταυτόχρονη δράση αξονικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μεγάλες αξονικές που προκαλούνται λόγω της διαμήκου παραμόρφωσης του ρήγματος, επηρεάζουν σημαντικά τις αναπτυσσόμενες τέμνουσες δυνάμεις και ροπές, λόγω φαινομένων δευτέρας τάξης.



**Σχήμα 4.6:** Κατά τμήματα ανάλυση του αγωγού στην παραμορφωμένη κατάσταση.

Η βασική σχέση που περιγράφει την παραμόρφωση μίας ελαστικής δοκού, στην οποία εφαρμόζονται ταυτόχρονα αξονικές και εγκάρσιες δυνάμεις, είναι:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} - N \frac{d^2 w}{dx^2} = q \quad (4.3)$$

- 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.



Η σχέση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί η εγκάρσια μετατόπιση της δοκού σε κάθε θέση. Ολοκληρώνοντας την εξίσωση αυτή για τον παραμορφωμένο φορέα, παίρνουμε:

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

όπου  $a^2 = N/EI$

$w(0)$  η εγκάρσια μετατόπιση της δοκού στην αρχή του εξεταζόμενου τμήματος ( $x=0$ ),

$\varphi(0)$  η στροφή λόγω κάμψης του αγωγού στο ίδιο σημείο,

$M(0)$  η ροπή και

$V(0)$  η τέμνουσα δύναμη που ασκούνται στο ίδιο σημείο.

Η Εξίσωση 4.4 μπορεί να εφαρμοστεί και στα δύο τμήματα AB και ΒΓ (δείκτης 1 και 2 αντίστοιχα) του αγωγού, λαμβάνοντας υπόψη τις σωστές αρχικές συνοριακές συνθήκες λόγω της κάμψης του ίδιου του αγωγού, τις στροφές στους κόμβους και την ισορροπία δυνάμεων σε αυτούς. Συγκεκριμένα, για το πρόβλημά μας:

$$w_1(0)=0$$

$$w_2(0)=\delta_1(L_1)$$

$$\varphi_1(0)=0$$

$$\varphi_2(0)=0$$

$$M_1(0)=-M_A=C_r \cdot \varphi_A$$

$$M_2(0)=-M_B=C_r \cdot \varphi_B$$

$$V_1(0)=V_A$$

$$V_2(0)=N_1(L_1) \cdot \sin\varphi_B - V_1(L_1) \cdot \cos\varphi_B$$

όπου  $C_r$  είναι η στρωφική δυσκαμψία των εύκαμπτων κόμβων.

Έτσι, μετά την επίλυση της Εξίσωσης 4.4 μπορεί να προκύψει η στροφή, η τέμνουσα δύναμη και η καμπτική ροπή ανά θέση, ως ακολούθως:

$$\varphi(x) = w'(x) \quad (4.5)$$

$$V(x) = E_i I_i w'''(x) - N(x) \cdot w'(x) + V_A/2 \quad (4.6)$$

$$M(x) = \int_0^x V(x) dx \quad (4.7)$$

Οι τέσσερις πρώτες παράγωγοι της εγκάρσιας μετατόπισης  $w$  της δοκού προκύπτουν:

$$w'(x) = \varphi(0) \cosh ax + \frac{M(0)}{EIa} \sinh ax + \frac{V(0)}{EIa^2} [\cosh ax - 1] + \frac{q}{N} \left[ \frac{\sinh ax}{a} - x \right] \quad (4.8)$$

$$w''(x) = a \varphi(0) \sinh ax + \frac{M(0)}{EI} \cosh ax + \frac{V(0)}{EIa} \sinh ax + \frac{q}{N} [\cosh ax - 1] \quad (4.9)$$

$$w'''(x) = a^2 \varphi(0) \cosh ax + a \frac{M(0)}{EI} \sinh ax + \frac{V(0)}{EI} \cosh ax + a \frac{q}{N} \sinh ax \quad (4.10)$$

$$w''''(x) = a^3 \varphi(0) \sinh ax + a^2 \frac{M(0)}{EI} \cosh ax + a \frac{V(0)}{EI} \sinh ax + a^2 \frac{q}{N} \cosh ax \quad (4.11)$$

Οι συνολικές μετακινήσεις ( $w$ ) λόγω των εσωτερικών εντατικών μεγεθών και των στροφών των εύκαμπτων κόμβων, δίνονται ακολούθως από τις Εξισώσεις 4.12 και 4.13 για τις δοκούς AB (1) και ΒΓ (2) αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} \delta_1(x) &= w_1(x) + x \cdot \sin \varphi_A = \\ &= \frac{M(0)}{E_1 I_1 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{V(0)}{E_1 I_1 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{q_u^*}{N(x)} \left[ \frac{\cosh ax - 1}{a^2} - \frac{x^2}{2} \right] + x \cdot \sin \varphi_A \end{aligned} \quad (4.12)$$

με  $0 \leq x \leq L_1$ .

$$\begin{aligned} \delta_2(x) &= w_2(x) + x \cdot \sin(\varphi_A + \varphi_B + w'_1(L_1)) = \\ &= \delta_1(L_1) + \frac{M(0)}{E_1 I_1 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{V(0)}{E_1 I_1 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{q_u}{N(x)} \left[ \frac{\cosh ax - 1}{a^2} - \frac{x^2}{2} \right] + \\ &+ x \cdot \sin(\varphi_A + \varphi_B + w'_1(L_1)) \end{aligned} \quad (4.13)$$

με  $0 \leq x \leq L_2$ .

Στις ανωτέρω εξισώσεις υπάρχουν τρεις βασικοί άγνωστοι: Οι γωνίες  $\varphi_A$  και  $\varphi_B$  των δύο εύκαμπτων κόμβων και η τέμνουσα δύναμη  $V_1(0)=V_A$  που οφείλεται στο τμήμα του αγωγού πριν την άρθρωση στο σημείο A το οποίο και δεν αναλύεται. Επιπλέον, σε κάθε θέση απαιτείται η γνώση της αξονικής δύναμης  $N(x)$ . Έτσι, για την επίλυση του προβλήματος, χρησιμοποιούνται οι εξής τέσσερις εξισώσεις ισορροπίας και συνέχειας:

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

$$M_1(L_1) = -M_B = C_r \cdot \varphi_B \approx 0 \quad (4.14)$$

- (2) Λόγω συμμετρίας, η ροπή στη θέση διασταύρωσης με το ρήγμα πρέπει να είναι ίση με το μηδέν:

$$M_2(L_2) = 0 \quad (4.15)$$

- (3) Το άθροισμα των εγκάρσιων μετατοπίσεων πρέπει να ισούται με τη συνολική εγκάρσια μετακίνηση που επιβάλλει το ρήγμα, και πιο συγκεκριμένα, λόγω συμμετρίας:

$$\delta_2(L_2) = \delta_1(L_1) + w_2(L_2) = dy/2 \quad (4.16)$$

- (4) 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  $\Delta L_{req}$ ) και αυτής που προκύπτει από τις αναπτυσσόμενες τάσεις στον αγωγό (διαθέσιμη επιμήκυνση  $\Delta L_{av}$ ):

$$\Delta L_{req} = \Delta L_{av} \quad (4.17)$$

Από την Εξίσωση 4.17 μπορούμε να υπολογίσουμε αναλυτικά την οριζόντια δύναμη  $N_T$  στη θέση της διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα συναρτήσει των γωνιών  $\varphi_A$  και  $\varphi_B$ , και ακολούθως την κατανομή της δύναμης με την απόσταση από το ρήγμα σύμφωνα με τη σχέση:

$$N(x) = \begin{cases} N_T - (L_2 - x)t_u & \text{για τη ράβδο } B\Gamma \\ N_B - (L_1 - x)t_u & \text{για τη ράβδο } AB \end{cases} \quad (4.18)$$

Πιο συγκεκριμένα η απαιτούμενη επιμήκυνση λαμβάνεται ίση με:

$$\Delta L_{req} = \Delta x + 2 \left( \frac{L_1}{\cos \varphi_A} - L_1 \right) + 2 \left( \frac{L_2}{\cos(\varphi_A + \varphi_B)} - L_2 \right) \quad (4.19)$$

δηλαδή ίση με την επιβαλλόμενη από το ρήγμα οριζόντια μετατόπιση  $\Delta x$  και την απαιτούμενη επιμήκυνση λόγω της στροφής των τμημάτων  $AB$  και  $B\Gamma$  του αγωγού.

Η διαθέσιμη επιμήκυνση  $\Delta L_{av}$  ορίζεται ως αυτή που προκύπτει από την ολοκλήρωση των αξονικών παραμορφώσεων κατά μήκος του τμήματος του αγωγού όπου υπάρχει σχετική ολίσθηση με το περιβάλλον έδαφος, δηλαδή του μήκους αγκύρωσης, και δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta L_{av} = 2 \int_0^{L_{anch}} \varepsilon(L) dL \quad (4.20)$$

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

Δεδομένου ότι το περιβάλλον έδαφος ασκεί μία δύναμη τριβής  $\tau_u$  κατά μήκος του αγωγού, προκύπτει έτσι ότι το μήκος αγκύρωσης είναι ίσο με:

$$L_{anch} = \frac{F_a}{\tau_u} = \frac{\sigma_a A_s}{\tau_u} \quad (4.21)$$

όπου  $F_a$  και  $\sigma_a$  είναι η αξονική δύναμη και τάση αντίστοιχα, που αναπτύσσεται στη θέση διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό, ενώ αντίστοιχα η αξονική τάση του αγωγού σε απόσταση  $L$  από το ρήγμα είναι:

$$\sigma(L) = \sigma_a - \frac{\tau_u}{A_s} L \quad (4.22)$$

Η αξονική τάση που αναπτύσσεται στον αγωγό υπολογίζεται με δύο τρόπους ανάλογα με το αν είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της  $\sigma_1$  (όριο διαρροής). Εφόσον έχει θεωρηθεί το διγραμμικό μοντέλο του Σχήματος 4.2 για το υλικό του χάλυβα του αγωγού, για την περίπτωση που η τάση  $\sigma_\alpha$  είναι μικρότερη της  $\sigma_1$ , δηλαδή αναπτύσσονται μόνο ελαστικές παραμορφώσεις στον αγωγό λόγω της αξονικής δύναμης, έχουμε:

$$\Delta L_{av} = 2 \int_0^{L_{anch}} \frac{\sigma(L)}{E_1} dL = \frac{\sigma_\alpha^2 A_s}{E_1 \tau_u} \quad (4.23)$$

και προκειμένου να υπάρχει το συμβιβαστό παραμορφώσεων  $\Delta L_{av} = \Delta L_{req}$  η αξονική τάση στη θέση διασταύρωσης με το ρήγμα για την περίπτωση που αναπτύσσονται μόνο ελαστικές τάσεις, προκύπτει:

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\frac{E_1 \tau_u \Delta L_{req}}{A_s}} \quad (4.24)$$

Αντίστοιχα, αν η απαιτούμενη επιμήκυνση είναι μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί σε  $\sigma_\alpha = \sigma_1$ , δηλαδή αν  $\Delta L_{req} > \frac{\sigma_1^2 A_s}{E_1 \tau_u}$ , αναπτύσσονται και πλαστικές παραμορφώσεις λόγω της αξονικής τάσης και η Εξίσωση 4.20 γίνεται:

$$\Delta L_{av} = 2 \left[ \int_0^{L_1} \left( \varepsilon_1 + \frac{\sigma(L) - \sigma_1}{E_2} \right) dL + \int_{L_1}^{L_{anch}} \frac{\sigma(L)}{E_1} dL \right] \quad (4.25)$$

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

$$L_1 = \frac{(\sigma_\alpha - \sigma_1) A_s}{\tau_u} \quad (4.26)$$

Από τις εξισώσεις 4.20, 4.21, 4.25 και 4.26 προκύπτει ότι η αξονική τάση στη θέση της διασταύρωσης με το ρήγμα, για την περίπτωση που αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις, είναι ίση με:

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1 (E_1 - E_2) \pm \sqrt{\sigma_1^2 (E_2 - E_1 E_2) + E_1^2 E_2 \Delta L_{req} \frac{\tau_u}{A_s}}}{E_1} \quad (4.27)$$

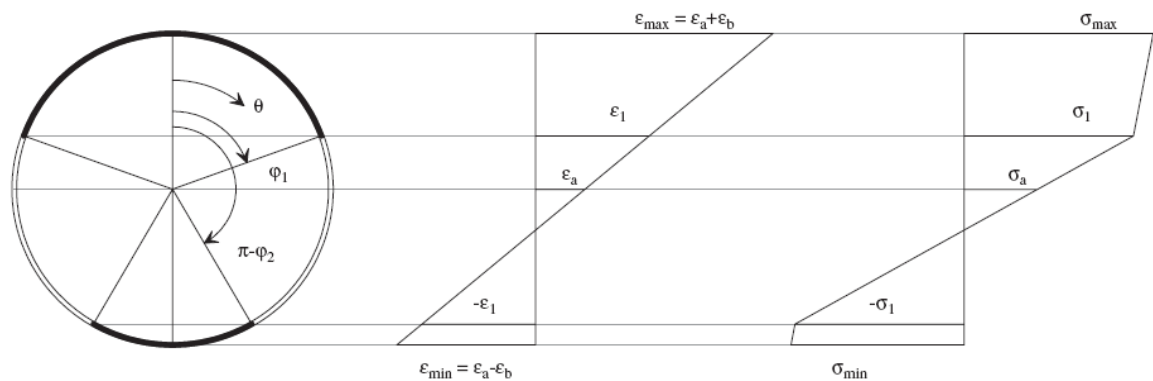
Ανεξαρτήτως του αν η  $\sigma_\alpha$  υπολογίζεται από τη σχέση 4.24 ή τη 4.27, η αξονική δύναμη  $F_\alpha$  στη θέση διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα είναι:

$$F_\alpha = \sigma_\alpha A_s \quad (4.28)$$

Όπως προαναφέρθηκε, λόγω της πεπλεγμένης μορφής των υπόλοιπων αναλυτικών σχέσεων για την τελική επίλυση εφαρμόστηκε μία απλή αριθμητική μεθοδολογία, κατά την οποία σε κάθε βήμα γίνεται μικρή διόρθωση των τριών μεγεθών. Πιο συγκεκριμένα για τα τρία μεγέθη  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$  και  $V_A$  λαμβάνονται οι παρακάτω αρχικές τιμές για το πρώτο βήμα:  $\varphi_A = 0.1^\circ$ ,  $\varphi_B = 2.0^\circ$  και  $V_A = 100\text{kN}$ . Στη συνέχεια σε κάθε βήμα τα μεγέθη  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$  και  $V_A$  αυξάνονται ή μειώνονται κατά ένα μικρό ποσοστό του σφάλματος στον υπολογισμό των μεγεθών  $d_y$ - $\delta_2(L_2)$ ,  $M_2(L_2)$  και  $M_1(L_1)$  αντίστοιχα.

**Βήμα 2<sup>ο</sup> Υπολογισμός μέγιστων τάσεων, παραμορφώσεων και τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας.**

Όταν ο αγωγός μπαίνει στην πλαστική περιοχή υπό την ταυτόχρονη δράση αξονικών και καμπτικών δυνάμεων, οι παραμορφώσεις διαφοροποιούνται και δεν είναι μόνο απευθείας συνάρτηση των τιμών των τάσεων, αλλά και της κατανομής τους στη διατομή. Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται ενδεικτικά η κατανομή τάσεων και παραμορφώσεων, για την περίπτωση που μόνο ένα τμήμα της διατομής έχει διαρρέψει (με τη θεώρηση επίπεδης διατομής).



**Σχήμα 4.7:** Κατανομή τάσεων-παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής (από Karamitros et al., 2007)

Για τον υπολογισμό των μέγιστων τάσεων & παραμορφώσεων επιλέγεται η δυσμενέστερη διατομή για κάθε ράβδο, δηλαδή οι διατομές στις οποίες αναπτύσσεται η μέγιστη ροπή, και υπολογίζεται η κατανομή των τάσεων που πρέπει να υπάρχουν έτσι ώστε να αναπτύσσεται ο συγκεκριμένος συνδυασμός ροπής και αξονικής, διατηρώντας τη θεώρηση επιπεδότητας της διατομής. Δηλαδή επιλύεται το σύστημα:

$$N = \int_{-R}^{+R} \sigma(z) dz \quad (4.29)$$

$$M = \int_{-R}^{+R} z \cdot \sigma(z) dz \quad (4.30)$$

με την τάση να υπολογίζεται μέσω της παραμόρφωσης από τη Σχέση 4.31 η οποία ακολουθεί επί της ουσίας τον δι-γραμμικό νόμο που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 4.2. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι η παραμόρφωση έχει μέση τιμή  $\varepsilon_\alpha$ , και μεταβάλλεται γραμμικά με την απόσταση από το κέντρο της διατομής  $z$  σύμφωνα με την Εξίσωση 4.32. Άρα:

$$\sigma(z) = \frac{(E_1 - E_2)\varepsilon(z)}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_2)\varepsilon(z)}{\sigma_1}\right)^r\right]^{1/r}} + E_2\varepsilon(z) \quad (4.31)$$

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_\alpha + kz \quad (4.32)$$

Η επίλυση και σε αυτή την περίπτωση γίνεται επαναληπτικά, διορθώνοντας σε κάθε βήμα τις τιμές των  $\varepsilon_\alpha$  και  $k$  μέχρι να επαληθευτούν οι Σχέσεις 4.29 και 4.30.

### Βήμα 3<sup>ο</sup>: Διόρθωση του μέτρου ελαστικότητας και επανάληψη της διαδικασίας.

Επειδή το σύνολο των υπολογισμών μέχρι τώρα έχει γίνει θεωρώντας ότι ο αγωγός συμπεριφέρεται ελαστικά, στο βήμα αυτό υπολογίζεται για κάθε ράβδο το τέμνον μέτρο ελαστικότητας  $E_{cur}$  με βάση την Εξίσωση 4.33 και επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί για τα βήματα 1 και 2 μέχρι το σύστημα να ισορροπήσει.

$$E_{cur}^{i+1} = \frac{E_{cur}^i + \frac{\sigma_\alpha}{\varepsilon_\alpha}}{2} \quad (4.33)$$

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

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

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

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

όπου SF οι συντελεστές ασφαλείας σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς.

Το **Βήμα 2** αφορά το σχεδιασμό του ίδιου του αγωγού, μια και μας δίνει τις αναμενόμενες ροπές, τάσεις και παραμορφώσεις των ενδιάμεσων τμημάτων του αγωγού.





# 5

## Παρουσίαση αριθμητικής μεθοδολογίας για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης

---

### 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. 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 τον 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 βραχέδους 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 οριζόντιου ρήγματος  $\delta$ , αναλύεται σε δυο ορθογωνικές συνιστώσες ( $\delta x$  και  $\delta y$ ).

#### 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:

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

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

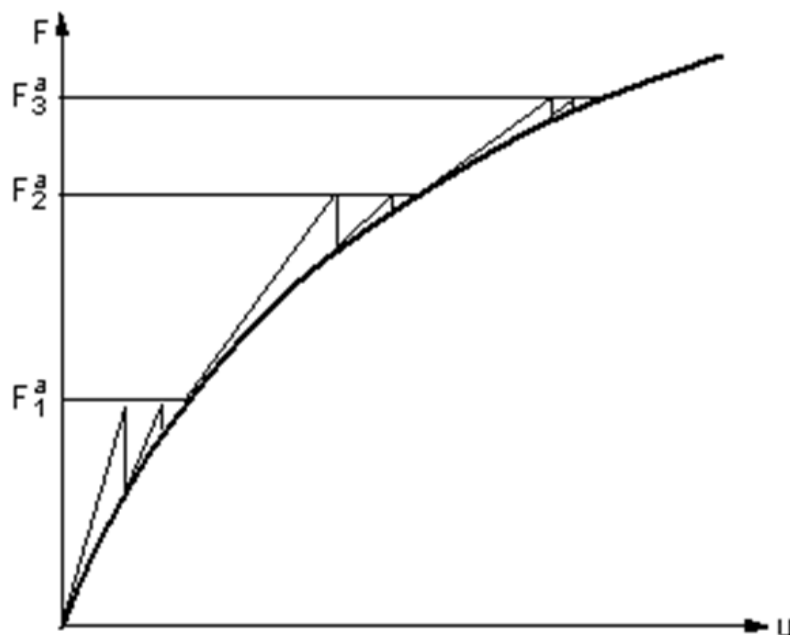
όπου

$[K_i^T]$  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

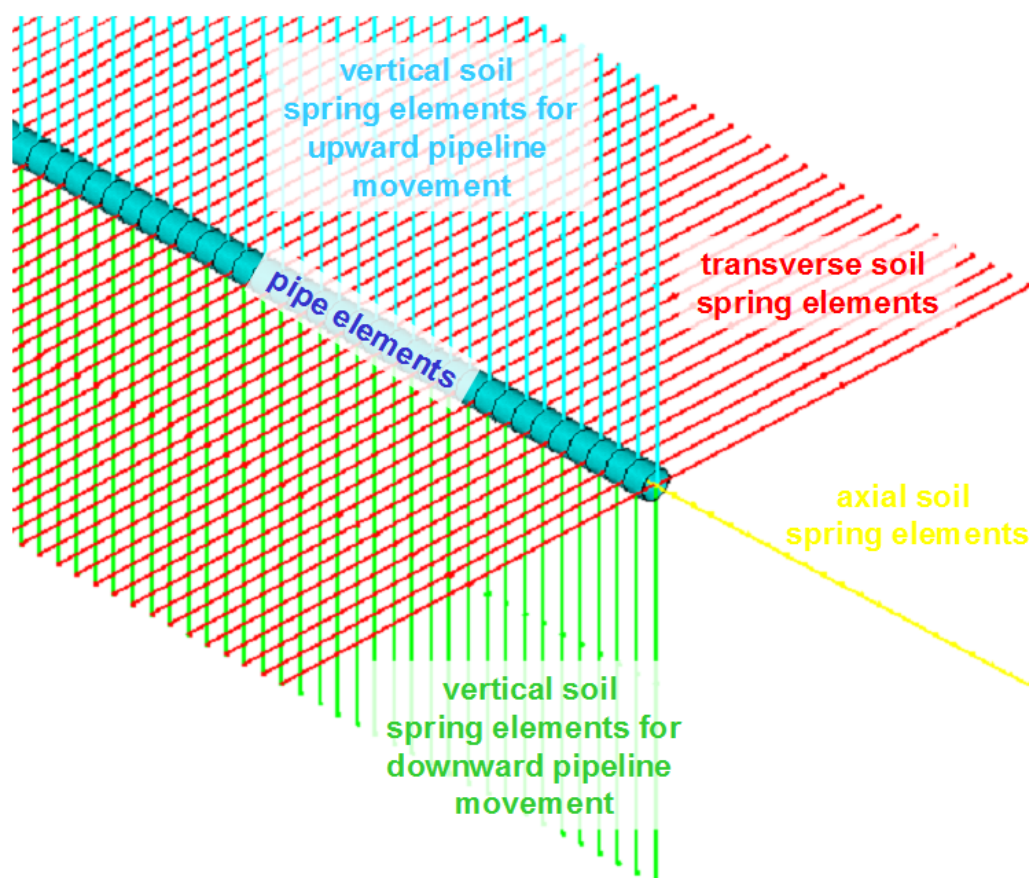
Σε κάθε επανάληψη τα  $[K_i^T]$  και  $\{F^{nr}\}$  υπολογίζονται συναρτήσει των τιμών του  $\{u_i\}$ . Συνεπώς το δεξί τμήμα της σχέσης (5.2) αποτελεί το μέτρο της «απόκλισης» από την τελική λύση, αφού είναι ουσιαστικά το διάνυσμα των απομενόντων (εκτός-ισορροπίας) φορτίων.



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
$\gamma$	υπό άνωση ειδικό βάρος επίχωσης
$\delta$	γωνία τριβής μεταξύ αγωγού και επίχωσης

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

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

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

$$B = 0,85 / p_u$$

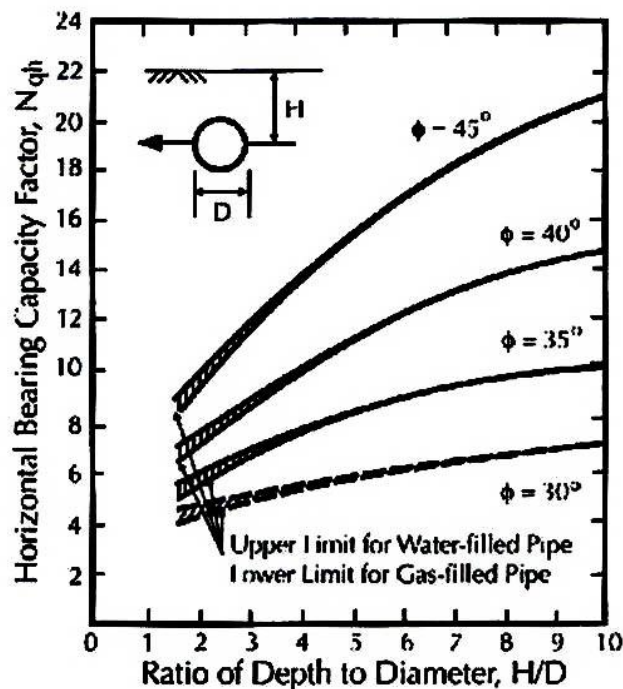
$$p_u = \gamma \cdot H \cdot N_{qn} \cdot D$$

$N_{qn}$  = συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας που υπολογίζεται συντηρητικά από το Σχήμα 4.4 (Trautmann & O'Rourke, 1983).

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

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

Για την προσάρτηση της δι-γραμμικής ελαστοπλαστικής σχέσης στην σχέση (5.5) για  $p=0.5p_u$ , οι προηγούμενες τιμές του  $\gamma_u$  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.

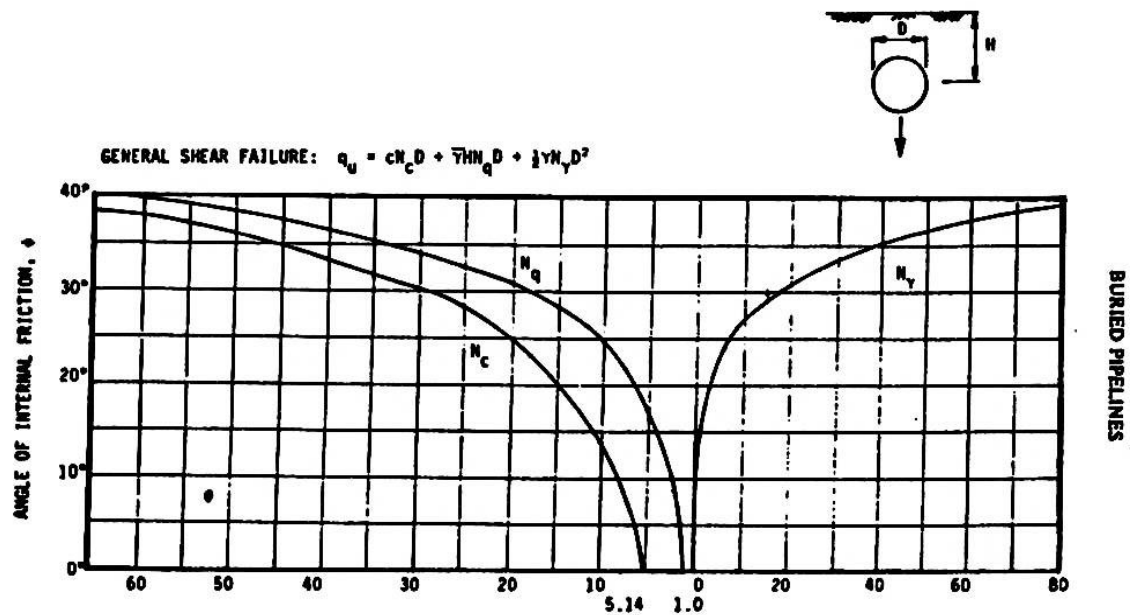
Για την προς τα κάτω κατεύθυνση της κίνησης ο αγωγός θεωρείται ότι ενεργεί ως κυλινδρικό θεμέλιο - λωρίδα και η μέγιστη εδαφική αντίσταση  $q_u$  ανά μονάδα μήκους δίνεται από τη συμβατική θεωρία φέρουσας ικανότητας. Έτσι για μη συνεκτικά εδάφη ισχύει:

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

όπου

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

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



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

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

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

$$B = 0,93 / q_u$$

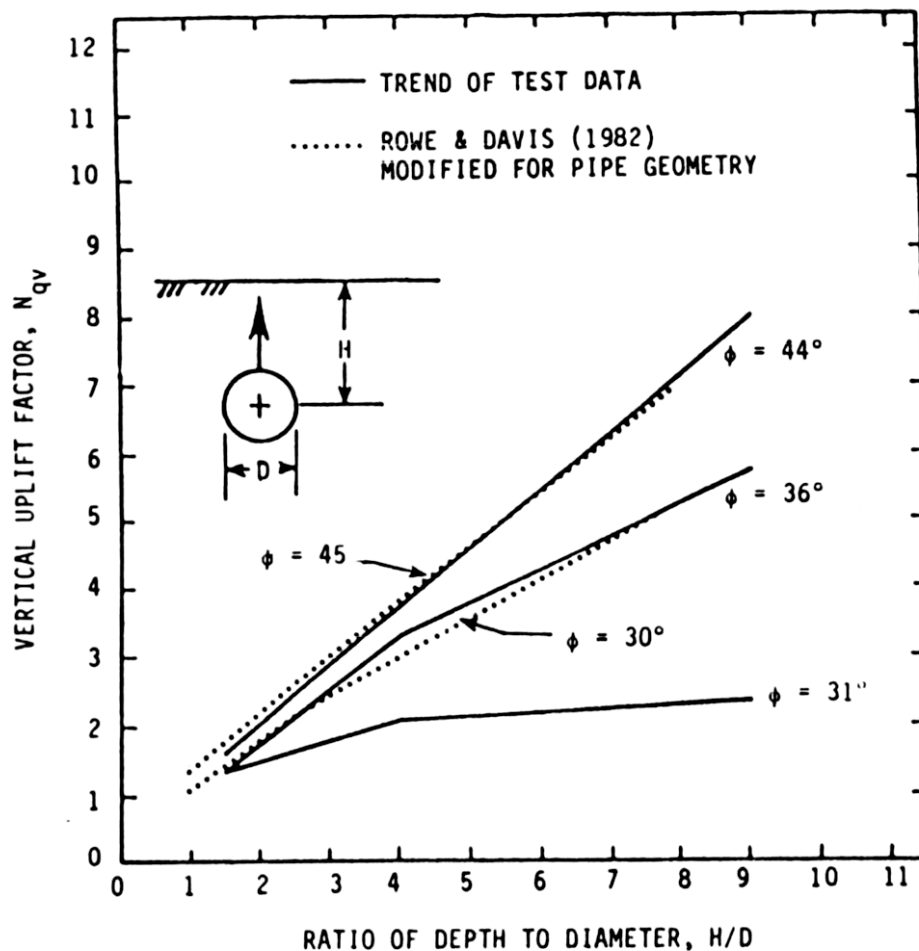
Για μη συνεκτικά εδάφη η μέγιστη αντίσταση σε κατακόρυφη προς τα άνω μετατόπιση εκφράζεται ως (Trautmann & O'Rourke, 1983):

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

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  $\phi$ .



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 μετατοπίσεις 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

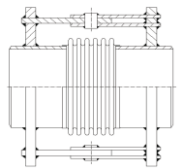
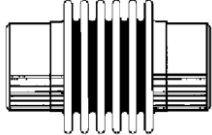
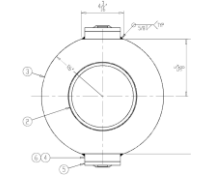
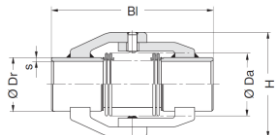
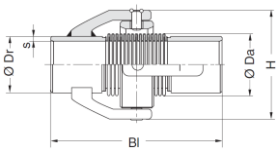
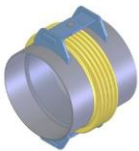
	<b>Εξωτ. διάμετρος σωλήνα, D (mm)</b>	762.0
<b>ΑΞΟΝΙΚΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ</b>	Οριακό φορτίο $t_u$ (kN/m)	22.75
	Μετατόπιση διαρροής $x_u$ (mm)	3.0
<b>ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ</b>	Οριακό φορτίο $p_u$ (kN/m)	134.45 ( $N_{qh}=6.2$ )
	Μετατόπιση διαρροής $y_u$ (mm)	35.7
<b>ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ (-ΠΡΟΣ ΤΑ ΑΝΩ)</b>	Οριακό φορτίο $q_u$ (kN/m)	41.20 ( $N_{qv}=1.9$ )
	Μετατόπιση διαρροής $z_{u,up}$ (mm)	2.57
<b>ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ (-ΠΡΟΣ ΤΑ ΚΑΤΩ)</b>	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 <sub>INT</sub> Σχεδιασ- μού	Εσωτε- ρική διάμε- τρος	Δυνατό- τητα στροφής	Στροφικό ελατήριο	Δυνατό- τητα αξον. μετακ.	Αξονικό ελατήριο	Δυνατό- τητα εγκ.μετ ακ.	Εγκάρσιο ελατήριο	Περιορισμός Μετακινή- σεων
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 1.03MP a	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 1.60MP a	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 1.60MP a	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:

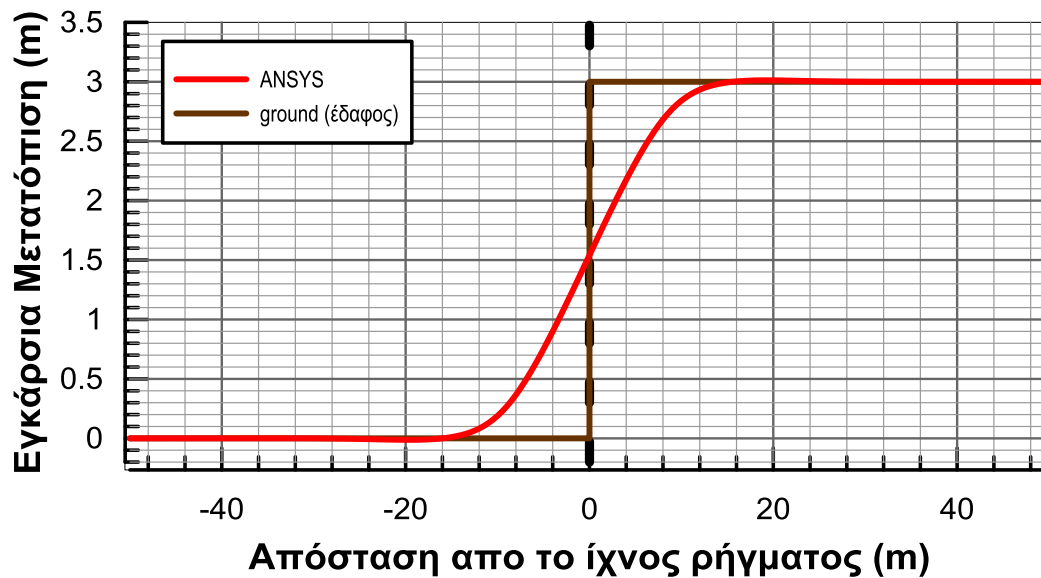
- Η πρώτη ανάλυση αφορά ένα συνεχή αγωγό χωρίς εύκαμπτους κόμβους, ο οποίος διασταυρώνεται στο μέσο του με το ρήγμα. Η γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια είναι  $\beta=90^\circ$  και ο λόγος μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού είναι  $D_f/D=4$ , δηλαδή η συνολική μετακίνηση του ρήγματος είναι ίση με 3m.
- Η δεύτερη ανάλυση αφορά ένα αγωγό με 6 εύκαμπτους κόμβους τοποθετημένους ανά 6m στην περιοχή γύρω από το ρήγμα. Το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό στη μέση μεταξύ του 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κόμβου και η γωνία του επιπέδου του με την οριζόντια είναι  $\beta=90^\circ$ . Και σε αυτήν την περίπτωση ο λόγος μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού είναι  $D_f/D=4$ , δηλαδή η συνολική μετακίνηση του ρήγματος είναι ίση με 3m.

### 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. Επίσης σε όλα τα σχήματα με διακεκομμένη κατακόρυφη μαύρη γραμμή παριστάνεται η θέση του ρήγματος.

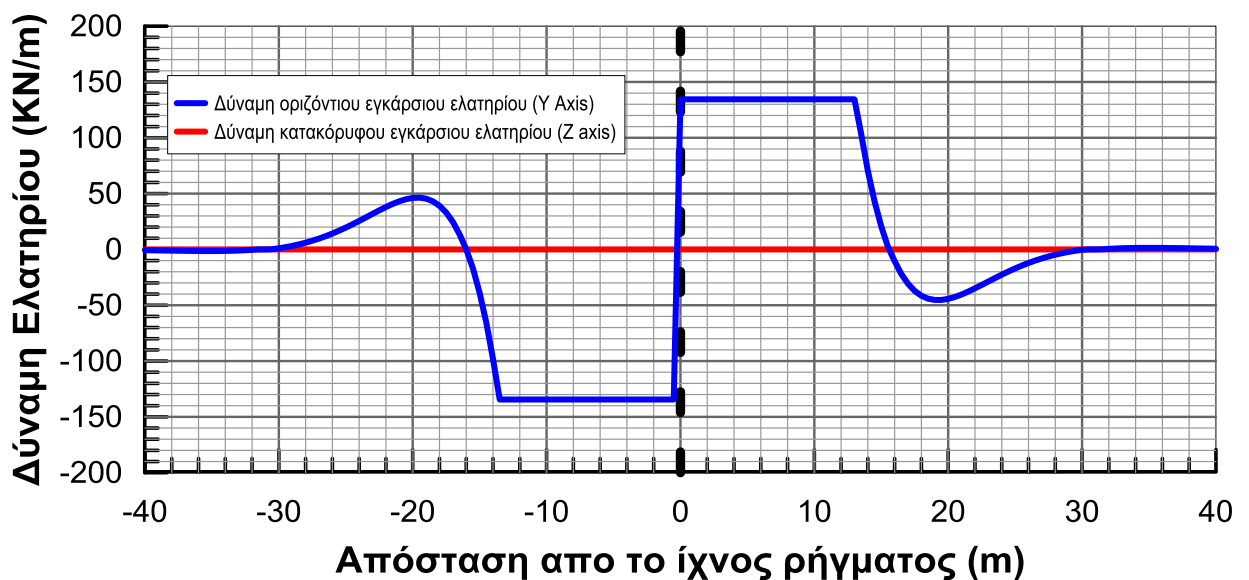


Σχήμα 5.6: Σχετική στροφή κατά μήκος του αγωγού

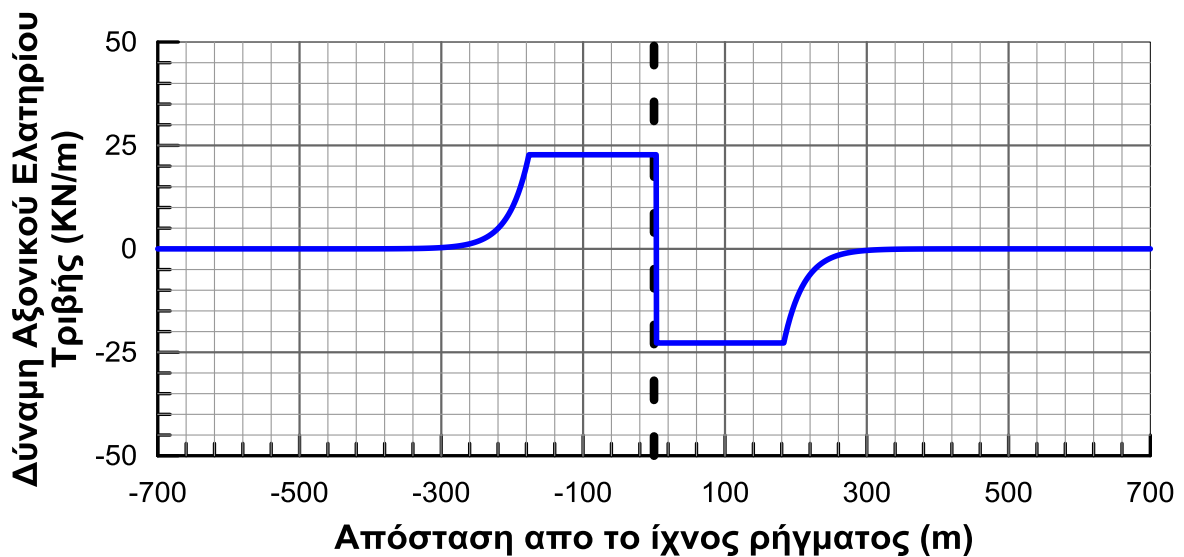


Σχήμα 5.7: Μετατοπίσεις του αγωγού κατά την εγκάρσια κατακόρυφη διεύθυνση

Στη συνέχεια παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.8 και 5.9 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 δυνάμεων των εγκάρσιων ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού

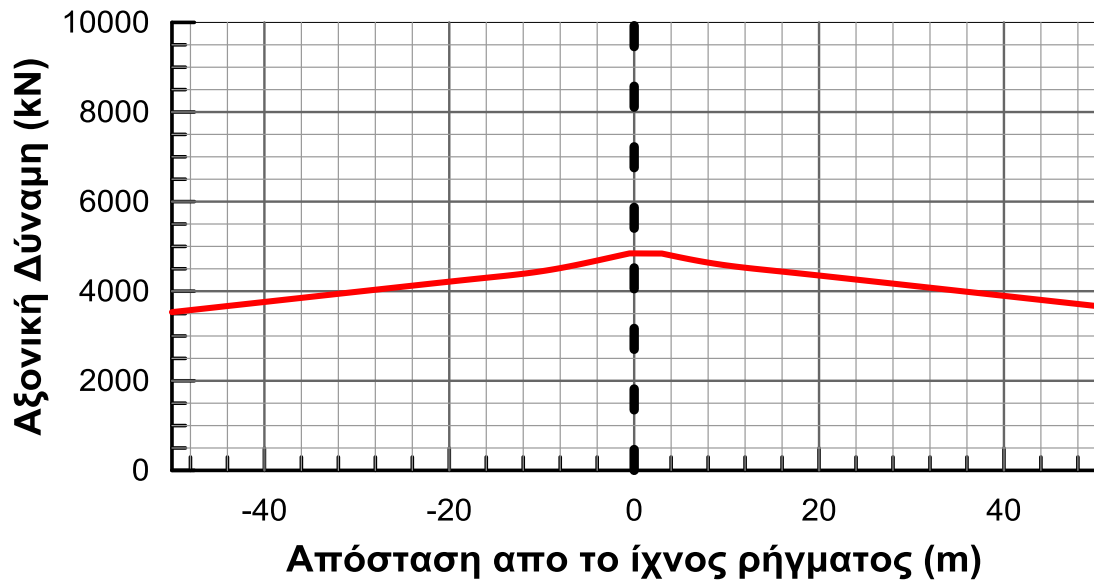


**Σχήμα 5.9:** Κατανομή των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού

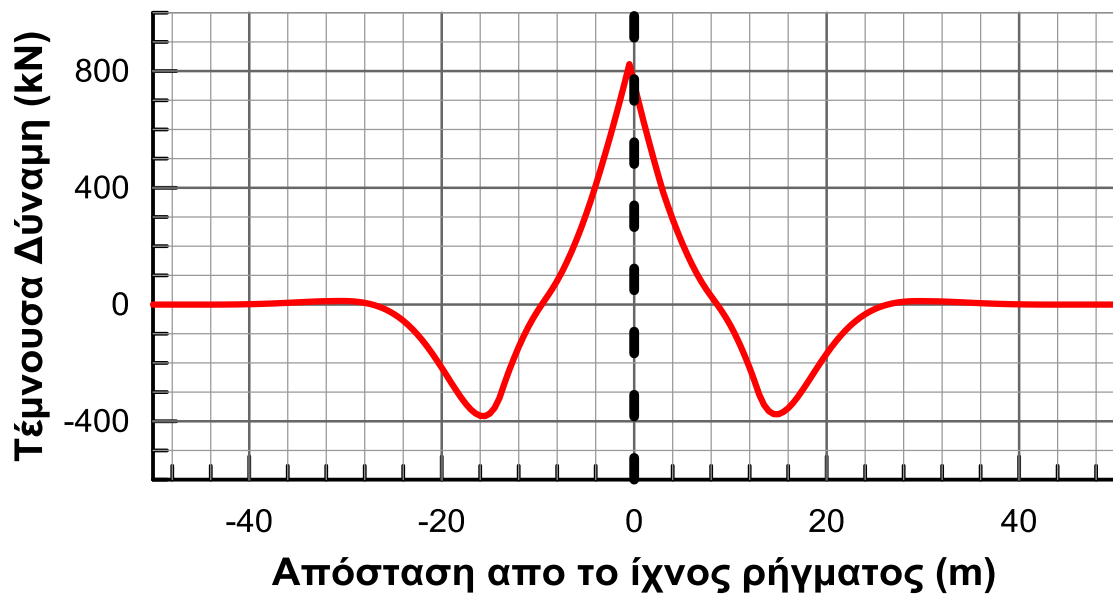
Από το Σχήμα 5.8 παρατηρείται ότι το μήκος καμπύλωσης του αγωγού, δηλαδή το μήκος στο οποίο καμπυλώνεται ο αγωγός και αναπτύσσονται μεγάλες εγκάρσιες μετατοπίσεις σε αυτόν, είναι 30m εκατέρωθεν του ρήγματος.

Από το Σχήμα 5.9, συμπεραίνεται ότι το μήκος αγκύρωσης, δηλαδή η απόσταση από το ρήγμα στην οποία μηδενίζεται η σχετική ολίσθηση μεταξύ αγωγού και εδάφους άρα και οι επιβαλλόμενες παραμορφώσεις, είναι 340m.

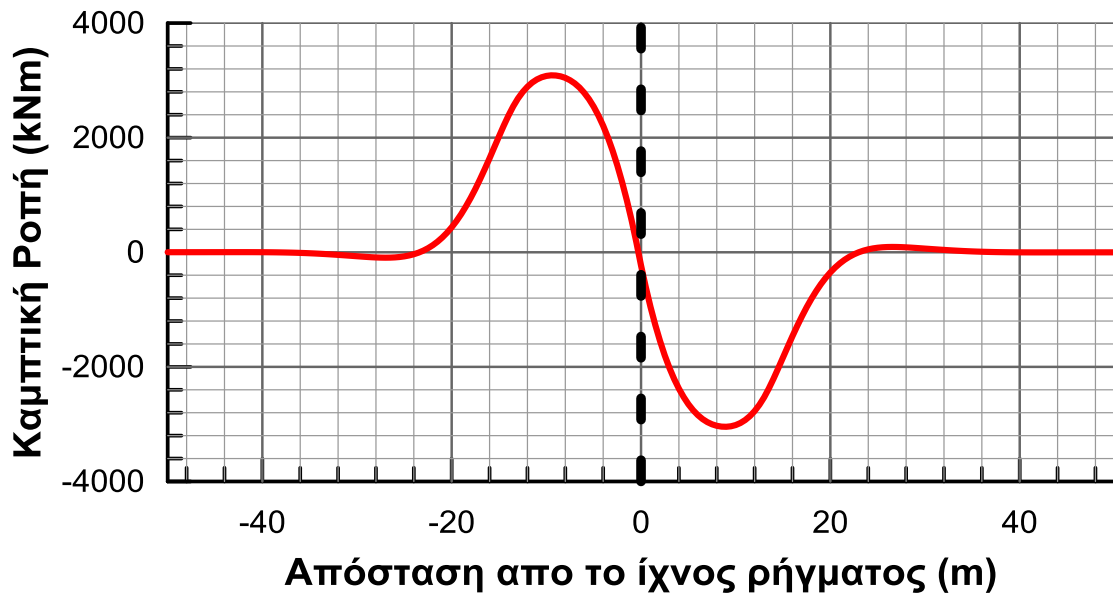
Στα Σχήματα 5.10, 5.11 και 5.12 ακολουθούν τα διαγράμματα των κατανομών των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στον αγωγό. Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 5.10 απεικονίζονται οι αξονικές δυνάμεις κατά μήκος του αγωγού, στο Σχήμα 5.11 οι τέμνουσες δυνάμεις και τέλος στο Σχήμα 5.12 οι καμπτικές ροπές. Παρατηρείται ότι η διακύμανση των ροπών στη περιοχή του ίχνους του ρήγματος είναι μεταξύ -3050kNm έως 3090kNm.



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

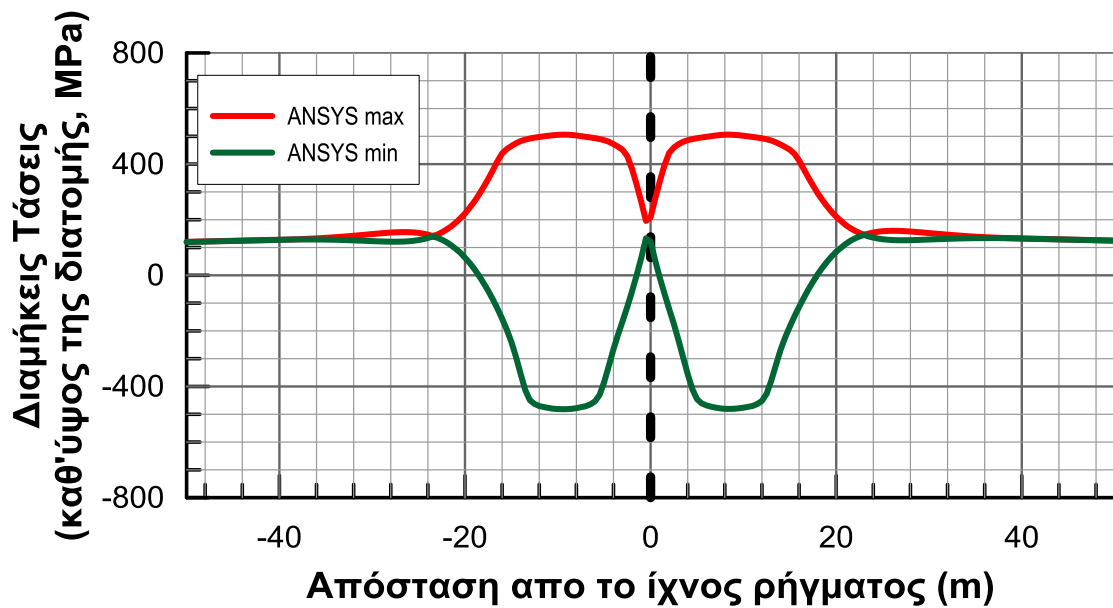


Σχήμα 5.11: Κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού



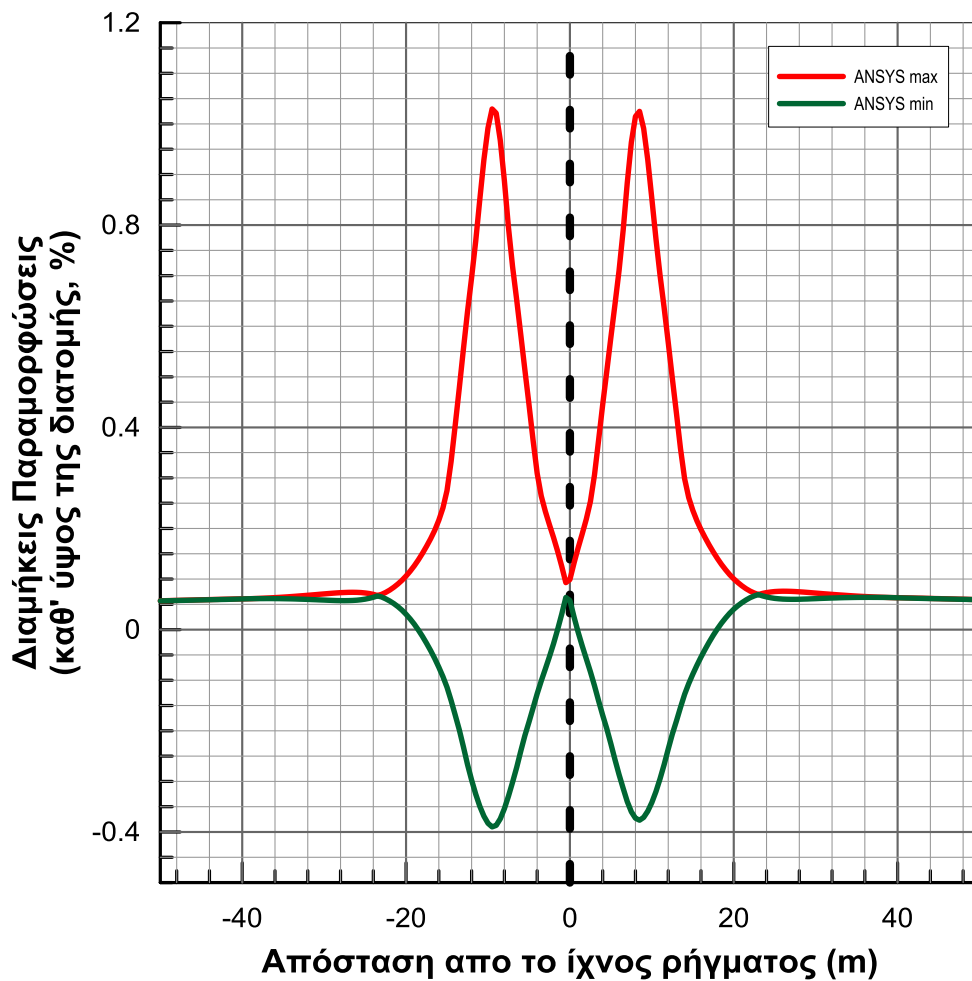
Σχήμα 5.12: Κατανομή των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

Τέλος στα Σχήματα 5.13 και 5.14 απεικονίζεται η κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων τάσεων και αξονικών παραμορφώσεων αντίστοιχα, που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού.



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





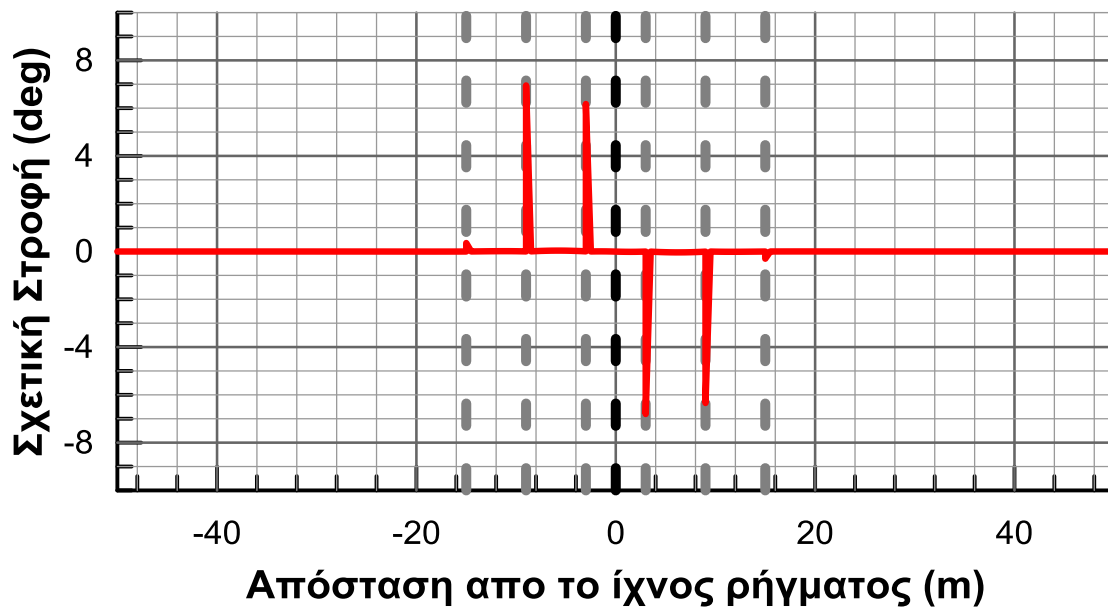
**Σχήμα 5.14:** Κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

Παρατηρείται ότι οι αξονικές παραμορφώσεις που είναι το πλέον σύνηθες κριτήριο ελέγχου του αγωγού κυμαίνονται από -0.4% (θλίψη) έως 1.03% (εφελκυσμός).

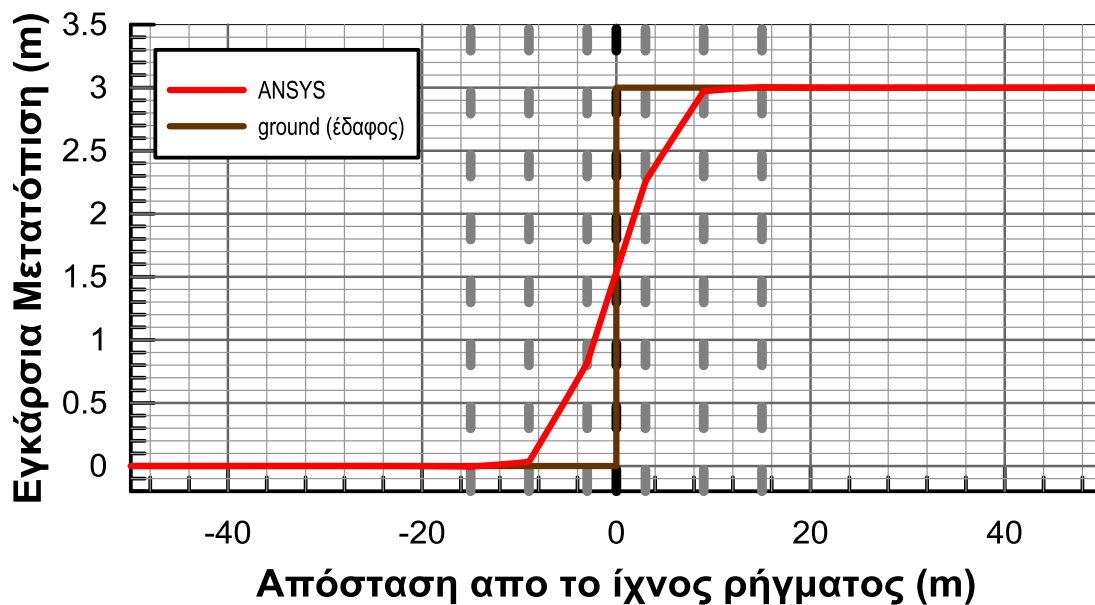
### 5.5.2 Αριθμητική ανάλυση αγωγού με εύκαμπτους κόμβους

Όπως προαναφέρθηκε, η ανάλυση αυτή αφορά αγωγό με 6 εύκαμπτους κόμβους τοποθετημένους ανά 6m στην περιοχή γύρω από το ρήγμα, το οποίο διασταυρώνεται με τον αγωγό μεταξύ του 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κόμβου. Η γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια είναι  $\beta=90^\circ$  και η συνολική μετακίνηση του ρήγματος ισούται με 3m.

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.

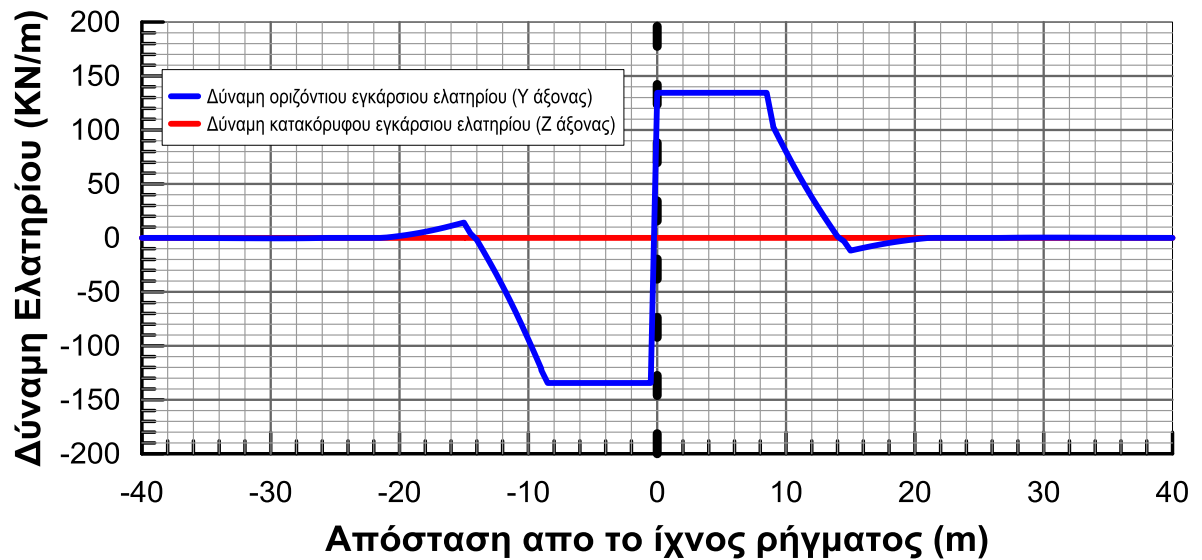


Σχήμα 5.15: Σχετική στροφή κατά μήκος του αγωγού



Σχήμα 5.16: Μετατοπίσεις του αγωγού κατά την εγκάρσια διεύθυνση

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 δυνάμεων των εγκάρσιων ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού

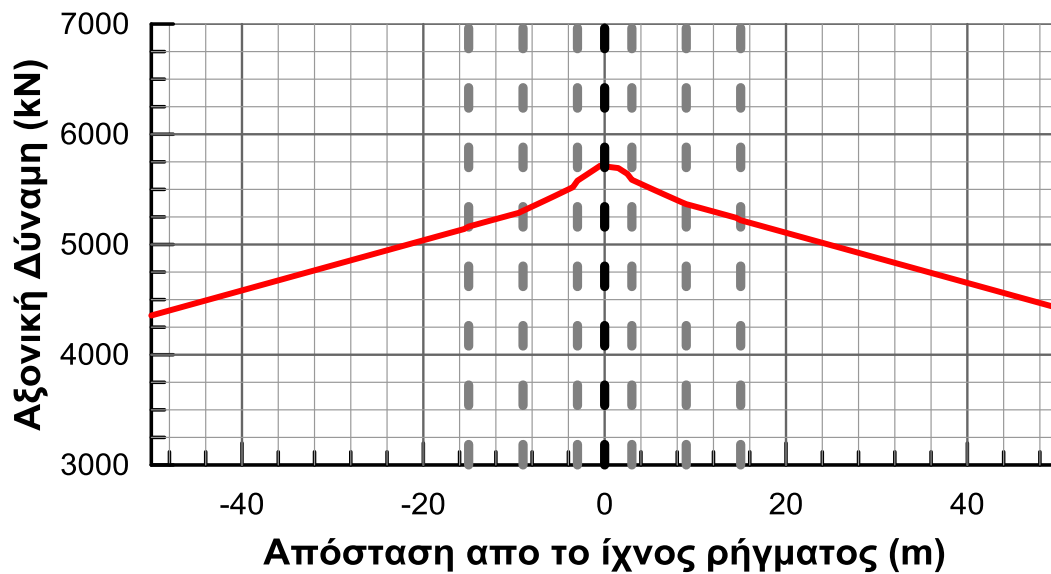


Σχήμα 5.18: Κατανομή των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού

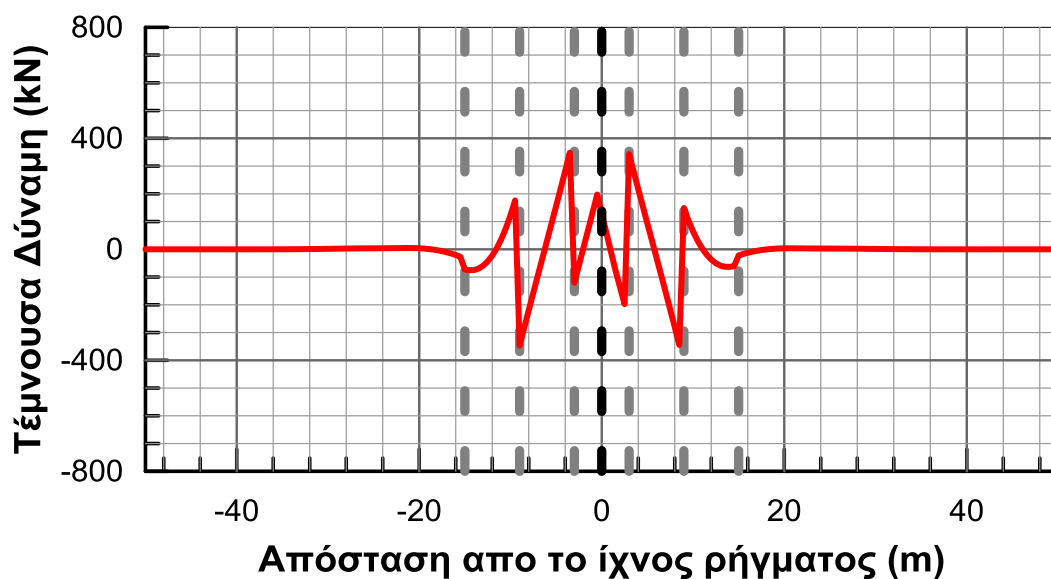
Από το Σχήμα 5.17 παρατηρείται ότι το μήκος καμπύλωσης του αγωγού δηλαδή το μήκος στο οποίο καμπυλώνεται ο αγωγός και αναπτύσσονται μεγάλες εγκάρσιες μετατοπίσεις σε αυτόν είναι 23m, εκατέρωθεν του ρήγματος.

Από το Σχήμα 5.18, συμπεραίνεται ότι το μήκος αγκύρωσης, δηλαδή η απόσταση από το ρήγμα στην οποία μηδενίζεται η σχετική ολίσθηση μεταξύ αγωγού και εδάφους άρα και οι επιβαλλόμενες παραμορφώσεις, είναι 340m.

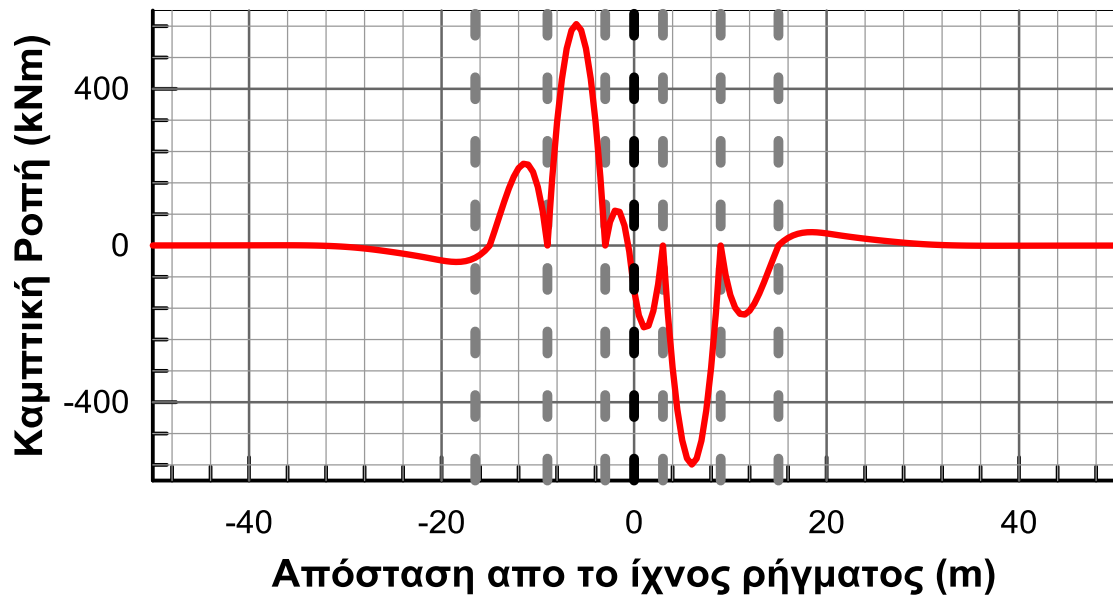
Στα Σχήματα 5.19, 5.20 και 5.21 ακολουθούν τα διαγράμματα των κατανομών των αξονικών δυνάμεων, των τεμνουσών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται στον αγωγό αντίστοιχα.



Σχήμα 5.13: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού



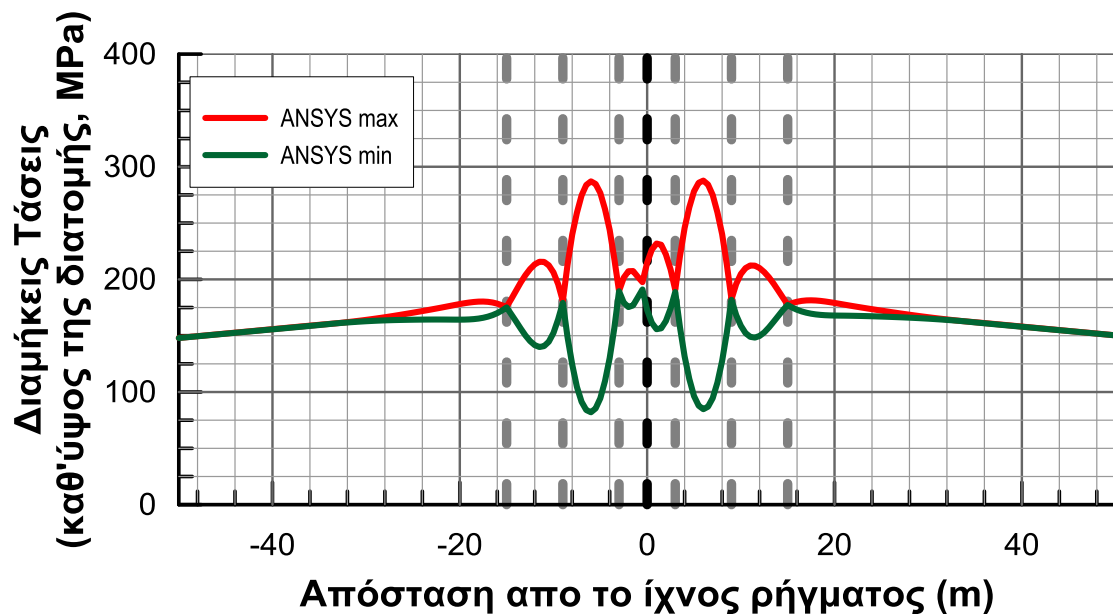
Σχήμα 5.20: Κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού



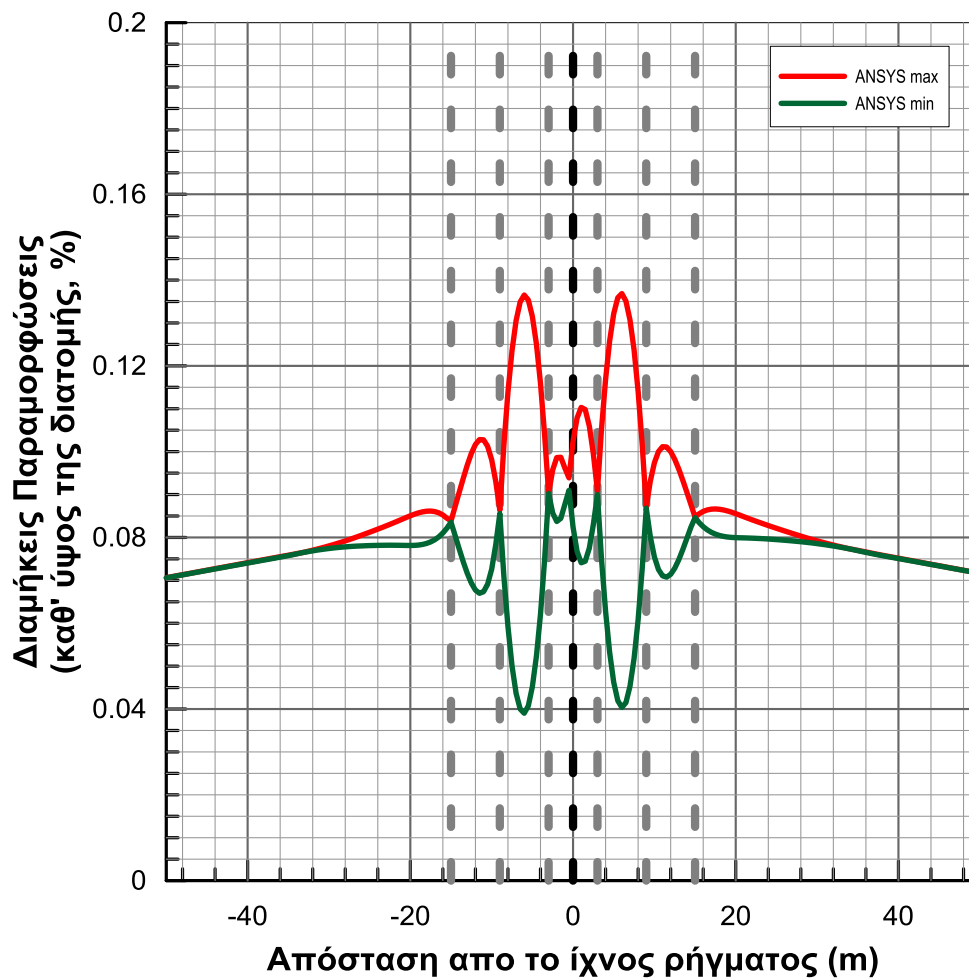
Σχήμα 5.21: Κατανομή των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

Παρατηρείται ότι το εύρος διακύμανσης των ροπών έχει τώρα μειωθεί σημαντικά σε  $-555\text{kNm}$  έως  $560\text{kNm}$  από  $-3050\text{kNm}$  έως  $3090\text{kNm}$  που ήταν πριν.

Επιπρόσθετα στα Σχήματα 5.22 και 5.23 απεικονίζεται η κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων τάσεων και αξονικών παραμορφώσεων αντίστοιχα, που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού.



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



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

Παρατηρείται ότι οι αξονικές παραμορφώσεις έχουν μειωθεί δραστικά σε -0.04% (θλίψη) έως 0.14% (εφελκυσμός), από -0.4% έως 1.03% που κυμαινόταν πριν για συνεχή αγωγή.

# 6

## Σύγκριση προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας με αριθμητικά αποτελέσματα

---

### 6.1 Παρουσίαση εκτελεσθέντων αναλύσεων

Για την επαλήθευση της ακρίβειας της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, που παρουσιάστηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 4, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 40 αριθμητικές αναλύσεις για αγωγό διαμέτρου 0.762m και πάχους τοιχώματος 12.5mm με έξι εύκαμπτους κόμβους και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις εκτιμήσεις της αναλυτικής μεθοδολογίας.

Οι αναλύσεις χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες ανάλογα με την απόσταση των εύκαμπτων κόμβων μεταξύ τους (6m, 8m ή 12m) και πραγματοποιήθηκαν 15, 17 και 8 αναλύσεις σε κάθε ομάδα αντίστοιχα. Οι αναλύσεις αποτελούνται από συνδυασμούς των τιμών της γωνίας  $\beta=90^\circ$ ,  $60^\circ$  και  $30^\circ$  και του λόγου  $D_f/D=1, 2$  και  $4$ , δηλαδή συνολική μετακίνηση ρήγματος ίση με 0.75m, 1.5m και 3m. Εφόσον η χρήση εύκαμπτων κόμβων προβλέπεται για περιπτώσεις μεγάλων μετακινήσεων, όπου οι συμβατικές μέθοδοι σχεδιασμού δεν επαρκούν, τα βασικά συμπεράσματα για τη μεθοδολογία θα εξαχθούν από τα αποτελέσματα για τις αυξημένες μετατοπίσεις ρήγματος (1.5m και 3m), ενώ οι αναλύσεις για μετακίνηση ρήγματος ίση με 0.75m είχαν περισσότερο συμπληρωματικό χαρακτήρα. Οι αναλύσεις αφορούν τις περιπτώσεις που το ρήγμα διασταυρώνεται: (α) ακριβώς στη μέση του αγωγού, μεταξύ του 3<sup>ου</sup> και του 4<sup>ου</sup> εύκαμπτου κόμβου ή (β) στην άκρη, ακριβώς μετά τον 3<sup>ο</sup> κόμβο.

Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά και οι τιμές των παραμέτρων της κάθε ανάλυσης συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 6.1).

Πίνακας 6.1: Βασικά χαρακτηριστικά των εκτελεσθέντων παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων

A/A	Απόσταση Κόμβων (m)	Θέση διασταύρωσης	Γωνία β (°)	Μετακίνηση ρήγματος (m)	Δx (m)	Δy (m)
<b>ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΑΝΑ 6m</b>						
1	6	Ανάμεσα	90	3	0.000	3.000
2	6	Ανάμεσα	60	3	1.500	2.598
3	6	Ανάμεσα	30	3	2.598	1.500
4	6	Άκρη	90	3	0.000	3.000
5	6	Άκρη	60	3	1.500	2.598
6	6	Άκρη	30	3	2.598	1.500
7	6	Ανάμεσα	90	1.5	0.000	1.500
8	6	Ανάμεσα	60	1.5	0.750	1.299
9	6	Ανάμεσα	30	1.5	1.299	0.750
10	6	Άκρη	90	1.5	0.000	1.500
11	6	Άκρη	60	1.5	0.750	1.299
12	6	Άκρη	30	1.5	1.299	0.750
13	6	Ανάμεσα	90	0.75	0.000	0.750
14	6	Ανάμεσα	60	0.75	0.375	0.649
15	6	Ανάμεσα	30	0.75	0.649	0.375
<b>ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΑΝΑ 8m</b>						
16	8	Ανάμεσα	90	3	0.000	3.000
17	8	Ανάμεσα	60	3	1.500	2.598
18	8	Ανάμεσα	30	3	2.598	1.500
19	8	Άκρη	90	3	0.000	3.000
20	8	Άκρη	60	3	1.500	2.598
21	8	Άκρη	30	3	2.598	1.500
22	8	Ανάμεσα	90	1.5	0.000	1.500
23	8	Ανάμεσα	60	1.5	0.750	1.299
24	8	Ανάμεσα	30	1.5	1.299	0.750
25	8	Άκρη	90	1.5	0.000	1.500
26	8	Άκρη	60	1.5	0.750	1.299
27	8	Άκρη	30	1.5	1.299	0.750
28	8	Ανάμεσα	90	0.75	0.000	0.750
29	8	Ανάμεσα	60	0.75	0.375	0.649
30	8	Ανάμεσα	30	0.75	0.649	0.375
31	8	Άκρη	90	0.75	0.000	0.750
32	8	Άκρη	60	0.75	0.375	0.649
<b>ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΑΝΑ 12m</b>						
33	12	Ανάμεσα	90	3	0.000	3.000
34	12	Ανάμεσα	30	3	2.598	1.500
35	12	Άκρη	90	3	0.000	3.000
36	12	Ανάμεσα	90	1.5	0.000	1.500
37	12	Ανάμεσα	60	1.5	0.750	1.299
38	12	Ανάμεσα	30	1.5	1.299	0.750
39	12	Ανάμεσα	60	0.75	0.375	0.649
40	12	Ανάμεσα	30	0.75	0.649	0.375



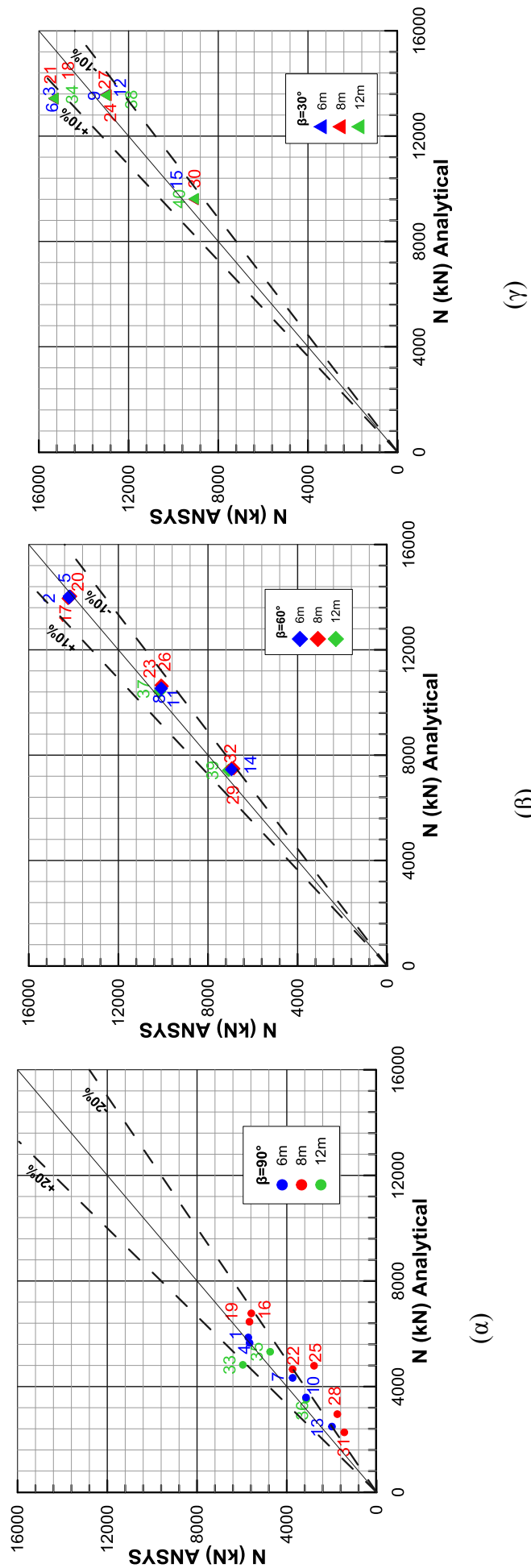
## **6.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών και αριθμητικών αναλύσεων**

Οι λεπτομερείς συγκρίσεις, για ολόκληρο το μήκος του αγωγού παρουσιάζονται υπό μορφή διαγραμμάτων στο Παράρτημα Β. Για κάθε ανάλυση παρουσιάζεται και συγκρίνεται η μεταβολή κατά μήκος του αγωγού των ακόλουθων μεγεθών:

- αξονικής δύναμης
- τέμνουσας δύναμης
- καμπτικής ροπής
- σχετικής στροφής
- τάσης
- παραμόρφωσης

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας με τα αποτελέσματα των παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων, με κύριο σκοπό να εξακριβωθεί η ακρίβεια της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας, έτσι ώστε στο μέλλον να μπορεί να γίνει αδρή εκτίμηση της ευεργετικής συνεισφοράς των κόμβων από το αναλυτικό μοντέλο, χωρίς την πραγματοποίηση σύνθετων αριθμητικών αναλύσεων. Η σύγκριση γίνεται μέσω διαγραμμάτων «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 στρόφη στους κόμβους. Από τα διαγράμματα αυτά, προκύπτει έμμεσα και ο λόγος των μέγιστων τιμών των μεγεθών αυτών όπως αυτές προέκυψαν από τις αριθμητικές και αναλυτικές επιλύσεις. Κάθε σημείο στα διαγράμματα συνοδεύεται από έναν αριθμό, ο οποίος αντιστοιχεί στον αριθμό της ανάλυσης του Πίνακα 6.1.

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» των μέγιστων τιμών της αξονικής δύναμης για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις  $(\alpha)90^\circ$ ,  $(\beta)60^\circ$ ,  $(\gamma)30^\circ$  όπως αυτή προέκυψε από τις αριθμητικές και αναλυτικές επιλύσεις.

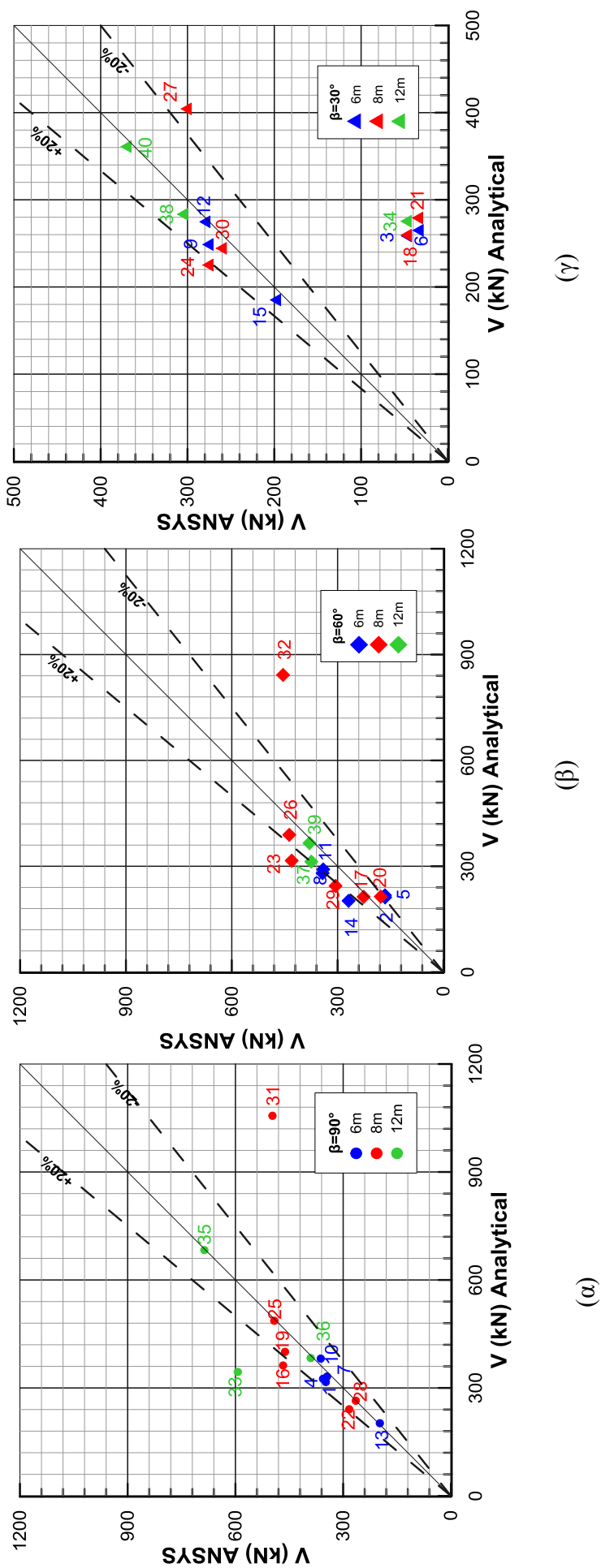


Σχήμα 6.1: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της αξονικής δύναμης για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις (α)  $90^\circ$ , (β)  $60^\circ$ , (γ)  $30^\circ$

Γενικότερα παρατηρείται ότι η αξονική δύναμη προσεγγίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια, με τη διακύμανση να φτάνει μέχρι  $\pm 10\%$  για γωνίες διασταύρωσης  $60^\circ$  και  $30^\circ$  και  $\pm 20\%$  για γωνία διασταύρωσης  $90^\circ$  με μία τάση υπερτίμησης των αξονικών στη τελευταία. Ο λόγος για την αύξηση αυτή του σχετικού σφάλματος είναι ότι η αξονική δύναμη υπολογίζεται αθροιστικά από την επιβαλλόμενη επιμήκυνση λόγω της συνιστώσας  $\Delta x$  της μετακίνησης του ρήγματος και από την επιμήκυνση λόγω της καμπύλωσης του αγωγού, η οποία όμως μπορεί να υπολογιστεί μόνο προσεγγιστικά. Όπως είναι αναμενόμενο, όσο μεγαλώνει η γωνία διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα, η αναπτυσσόμενη αξονική δύναμη μειώνεται, εφόσον μειώνεται η συνιστώσα  $\Delta x$  της μετακίνησης του ρήγματος. Οι μικρότερες αξονικές αναμένονται για γωνία διασταύρωσης  $90^\circ$ , οπότε και οφείλονται αποκλειστικά στην επιμήκυνση λόγω της καμπύλωσης του αγωγού. Από αυτό προκύπτει, ότι το ίδιο απόλυτο σφάλμα στον υπολογισμό της αξονικής λόγω καμπύλωσης του αγωγού στις περιπτώσεις  $30^\circ$ - $60^\circ$ - $90^\circ$ , μεταφράζεται σε μεγαλύτερο σχετικό σφάλμα στις συνολικά μικρότερες τιμές της αξονικής δύναμης για γωνία  $90^\circ$  έναντι των μικρότερων γωνιών  $30^\circ$  και  $60^\circ$ . Επιπρόσθετα από τα Σχήματα 6.1α, 6.1β και 6.1γ φαίνεται ότι, για την ίδια μετακίνηση ρήγματος, η απόσταση των εύκαμπτων κόμβων δεν παίζει κάποιο σημαντικό ρόλο στις αναπτυσσόμενες αξονικές δυνάμεις.

Η εκτίμηση της αξονικής δύναμης έχει ιδιαίτερη σημασία για την αξιοπιστία της μεθοδολογίας. Μια μικρή υποτίμηση (ή υπερτίμηση) της αξονικής δύναμης μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένες τάσεις (ή αυξημένες τάσεις αντίστοιχα). Αν όμως η αναπτυσσόμενη τάση ξεπεράσει το όριο διαρροής  $\sigma_1$  και η διατομή του αγωγού μπει στην πλαστική περιοχή, μικρές μεταβολές στις τάσεις οδηγούν σε μεγάλες διακυμάνσεις στις παραμορφώσεις, οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζουν το  $E_{cur}$  και κατά συνέπεια τις εκτιμώμενες καμπτικές ροπές και τέμνουσες δυνάμεις. Έτσι, αν υπερτιμηθεί λίγο η τάση και ο αγωγός είναι στην πλαστική περιοχή, η μικρή υπερτίμηση οδηγεί σε δυσανάλογα μεγάλη υπερτίμηση της παραμόρφωσης και υποεκτίμηση της καμπτικής ροπής και της τέμνουσας δύναμης.

Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» της τέμνουσας δύναμης για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις (α) $90^\circ$ , (β) $60^\circ$ , (γ) $30^\circ$  όπως αυτή προέκυψε από τις αριθμητικές και αναλυτικές επιλύσεις.

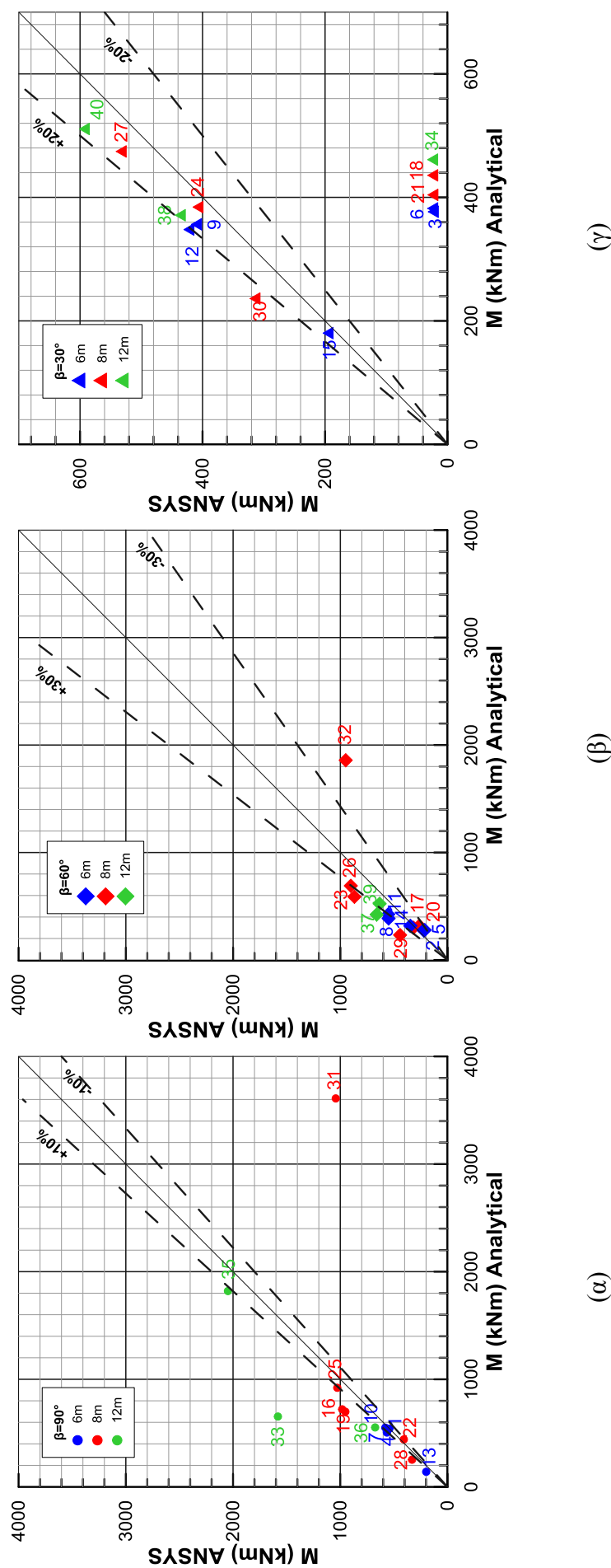


Σχήμα 6.2: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της τέμνουσας δύναμης για διαστάρωση του ρηγματός με τον αγωγό στις (α)  $90^\circ$ , (β)  $60^\circ$ , (γ)  $30^\circ$

Σχετικά με τον υπολογισμό της τέμνουσας δύναμης παρατηρεί κανείς ότι η πλειοψηφία των σημείων έχει διακύμανση  $\pm 20\%$  ανεξάρτητα από την γωνία διασταύρωσης. Οι αναλύσεις με αριθμούς 3, 6, 18, 21 και 34 δεν εμπίπτουν στην πιο πάνω διακύμανση εφόσον οι αναλυτικές εκτιμήσεις είναι μεγαλύτερες από αυτές των αριθμητικών επιλύσεων. Οι αναλύσεις αντιστοιχούν σε γωνία διασταύρωσης ρήγματος  $30^\circ$  με μετατόπιση 3m, περιπτώσεις στις οποίες, όπως φαίνεται από Σχήμα 6.1γ, αναπτύσσεται πολύ μεγάλη αξονική δύναμη, ενώ η αναλυτική μεθοδολογία την υποτιμά ελαφρά ( $\sim 14\%$ ). Όπως προαναφέρθηκε, αυτή η μικρή υποτίμηση των αξονικών τάσεων, επειδή ο αγωγός βρίσκεται εντός της πλαστικής περιοχής παραμορφώσεων, προκαλεί δυσανάλογα μεγάλη υποτίμηση στην εκτίμηση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων και κατά συνέπεια υπερτίμηση του τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας  $E_{cur}$  και των εκτιμώμενων ροπών και τεμνουσών στον αγωγό.

Παρατηρείται επίσης ότι οι αναλύσεις με αριθμό 31 και 32 που εμφανίζονται στα Σχήματα 6.2α και 6.2β αντίστοιχα, δεν εμπίπτουν στο εύρος διακύμανσης των περισσότερων αναλύσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι η μετατόπιση που επιβάλλει το ρήγμα στον αγωγό είναι τόσο μικρή, που το σύνολο των μετακινήσεων πραγματοποιείται μεταξύ των δύο πλησιέστερων κόμβων στο ρήγμα. Ο εν λόγω παραμορφωμένος φορέας απέχει από αυτόν που θεωρήθηκε κατά την ανάπτυξη της αναλυτικής μεθοδολογίας, στην οποία έχει θεωρηθεί ότι θα ενεργοποιηθούν τουλάχιστον δύο κόμβοι από κάθε πλευρά. Το εν λόγω όριο εφαρμογής της μεθοδολογίας έχει μικρή σημασία, εφόσον η χρήση εύκαμπτων κόμβων έχει νόημα να προταθεί μόνο για τις περιπτώσεις μεγάλων επιβαλλόμενων μετακινήσεων από το ρήγμα, τις οποίες δε μπορεί να καλύψει ο συμβατικός σχεδιασμός.

Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» της καμπτικής ροπής, για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις (α) $90^\circ$ , (β) $60^\circ$ , (γ) $30^\circ$  όπως αυτή προέκυψε από τις αριθμητικές και αναλυτικές επιλύσεις. Από τα σχήματα γίνεται φανερό ότι ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα με τα διαγράμματα για τις τέμνουσες δυνάμεις του Σχήματος 6.2.

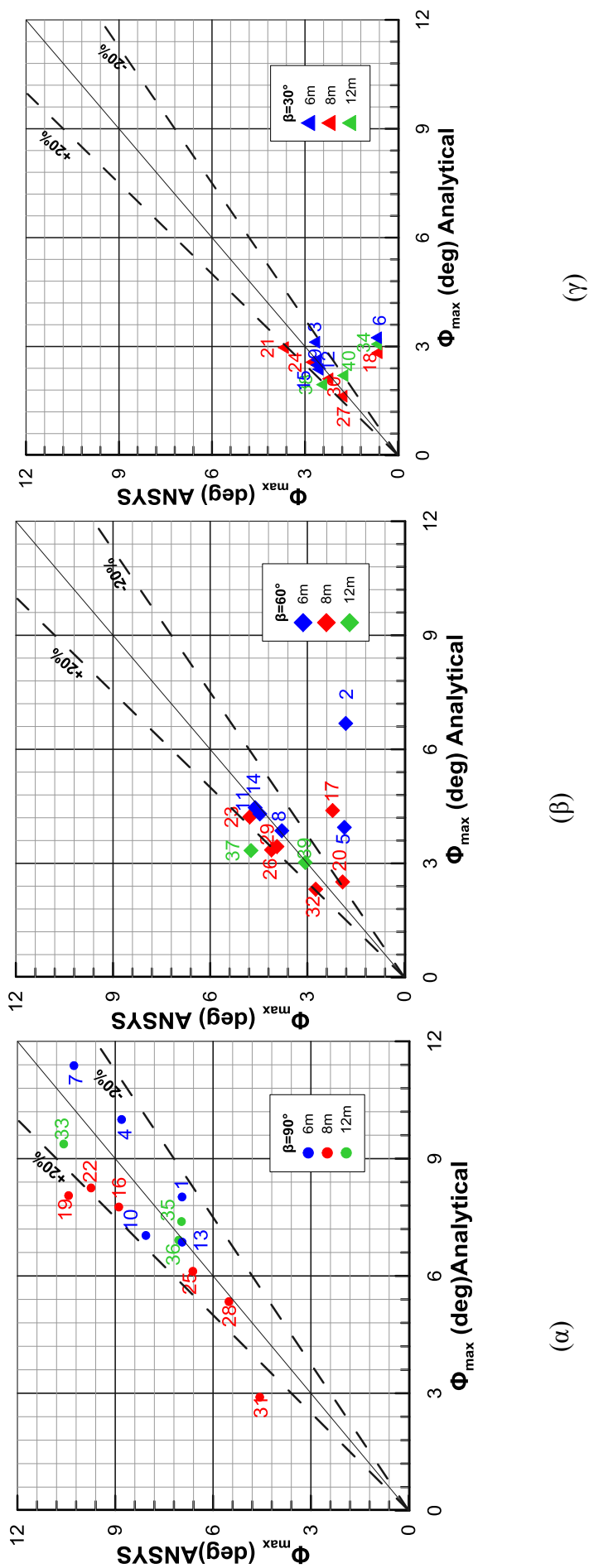


Σχήμα 6.3: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της ροπής για διασάρωση του ρήγματος με τον σιλωγό στις (α) 90°, (β) 60°, (γ) 30°

Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» της σχετικής στροφής, για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις (α)90°, (β)60°, (γ)30° όπως αυτή προέκυψε από τις αριθμητικές και αναλυτικές επιλύσεις.

Η αναλυτική μεθοδολογία φαίνεται να έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην εκτίμηση της μέγιστης σχετικής στροφής με τα σημεία να κυμαίνονται στο  $\pm 20\%$ , ενώ σε μέρος των αναλύσεων για γωνία  $\beta$  ίση με 30° και 60° υπάρχει λίγο μεγαλύτερη απόκλιση (αναλύσεις 2, 5, 6, 11, 17, 18 και 34), με τις εκτιμήσεις της αναλυτικής μεθοδολογίας να είναι συντηρητικές.

Επιπροσθέτως, στις περιπτώσεις που οι εύκαμπτοι κόμβοι βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους (6m), μερικές φορές (αναλύσεις 2 και 5) ενεργοποιούνται περισσότεροι κόμβοι από ότι εκτιμάται στο αναλυτικό μοντέλο, με αποτέλεσμα να υπάρχει συντηρητική εκτίμηση των στροφών (έχουμε ενεργοποίηση 3 κόμβων έναντι 2 εκατέρωθεν του ρήγματος). Οι αναλύσεις με αριθμούς 6, 18 και 34 που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.4γ, αφορούν όπως ειπώθηκε και πριν αγωγό που τέμνει το ρήγμα στις 30° με μετακίνηση 3m.



Σχήμα 6.4: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της στροφής στον αγωγό για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις (α) 90°, (β) 60°, (γ) 30°

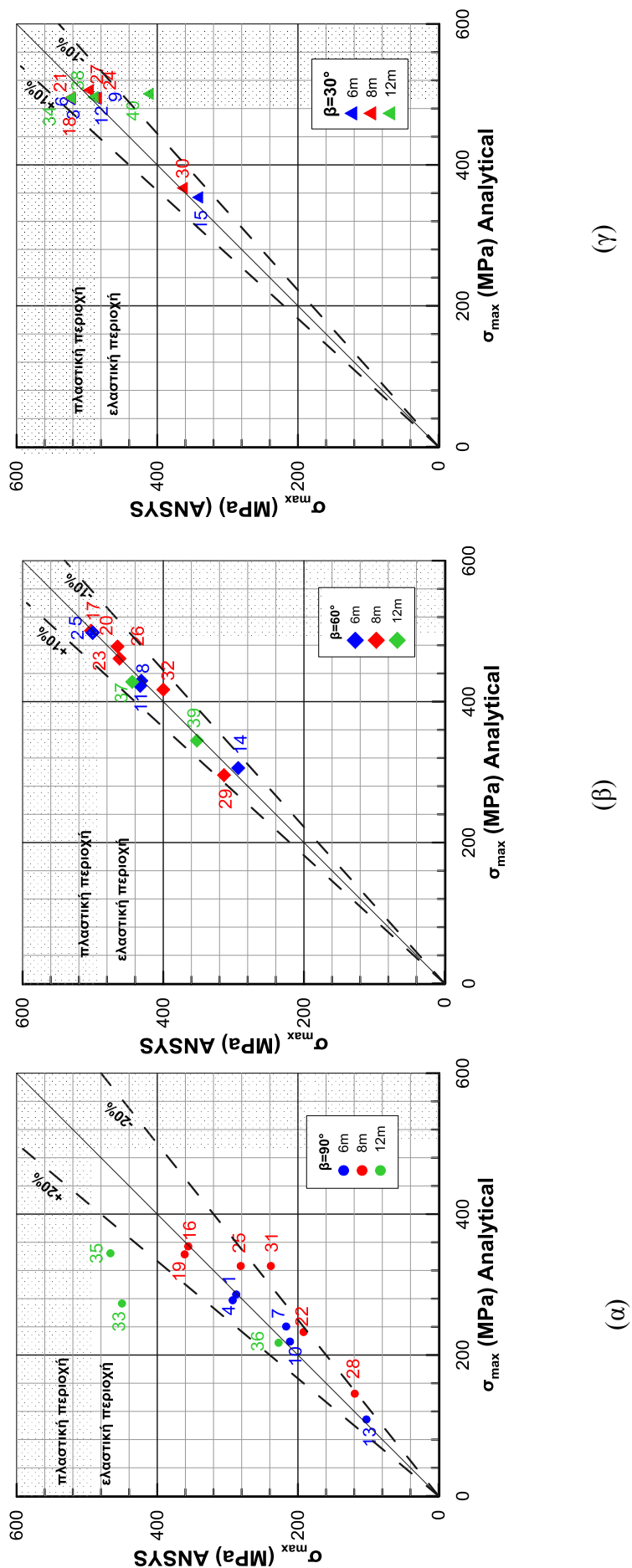


Στα Σχήματα 6.5 και 6.6 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» της μέγιστης και ελάχιστης τάσης αντίστοιχα, για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις (α)90°, (β)60°, (γ)30° όπως αυτή προέκυψε από τις αριθμητικές και αναλυτικές επιλύσεις.

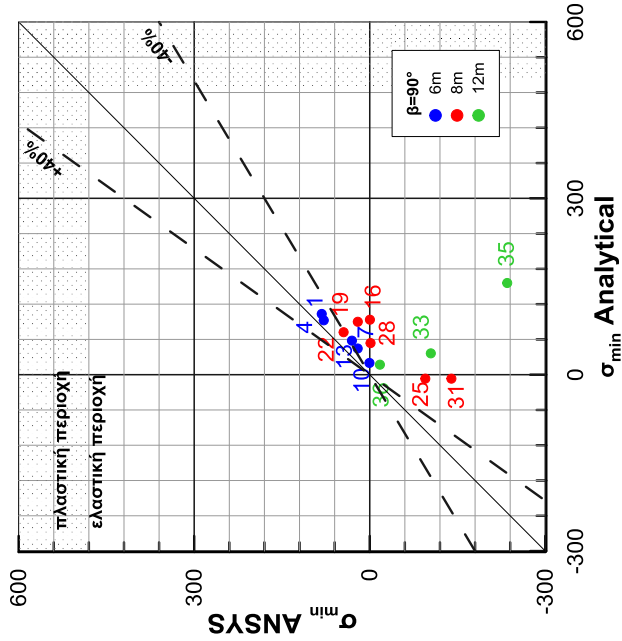
Στην πλειοψηφία τους οι αναλύσεις που παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν, δίνουν αποτελέσματα που προσεγγίζουν αυτά του αριθμητικού μοντέλου με τις μέγιστες τάσεις στις 30° και 60° να κυμαίνονται μέχρι  $\pm 10\%$  και στις 90° μέχρι  $\pm 20\%$ . Ειδικά στην ανάλυση με αριθμό 33 οι μέγιστες τιμές στις τάσεις παρουσιάζονται μεταξύ του 2<sup>ου</sup> και 3<sup>ου</sup> κόμβου κάτι το οποίο δεν προέβλεψε η μεθοδολογία αφού εκτιμάται ότι οι μέγιστες τιμές θα ήταν μεταξύ του 3ου κόμβου και του σημείου διασταύρωσης ρήγματος.

Σχετικά με τις ελάχιστες τάσεις παρατηρείται ότι οι αναλυτικές εκτιμήσεις για τις περιπτώσεις 3, 6, 18, 21 και 34 που αφορούν μετακίνηση ρήγματος 3m και διασταύρωση με αγωγό στις 30° αποκλίνουν περισσότερο (έως και 60% των εκτιμήσεων των αριθμητικών αναλύσεων), σε αντιστοιχία με τα σφάλματα στα προηγούμενα διαγράμματα για γωνία 30°.

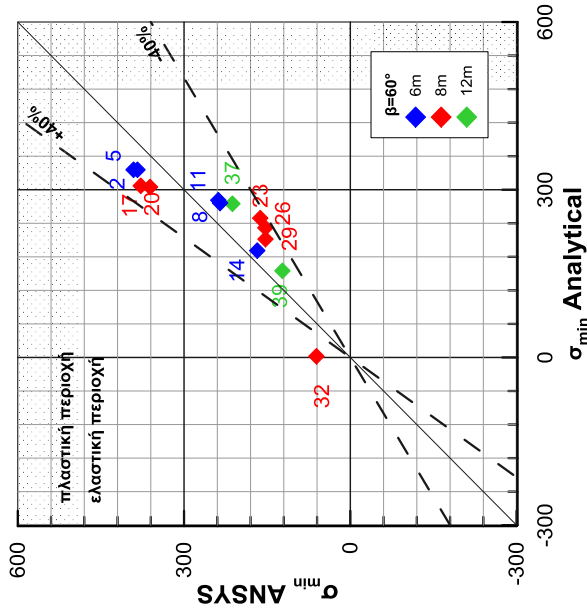
Στα Σχήματα 6.7 και 6.8 παρουσιάζονται τα διαγράμματα «1 προς 1» με τις συγκρίσεις για την μέγιστη και ελάχιστη παραμόρφωση, για τις περιπτώσεις διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό στις (α) 90°, (β) 60° και (γ) 30° αντίστοιχα.



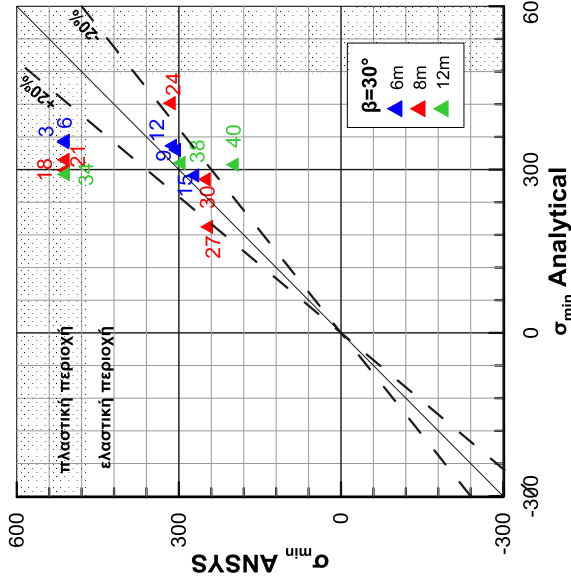
Σχήμα 6.5: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της αξονικής τάσης στον αγωγό για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις ( $\alpha$ )  $90^\circ$ , ( $\beta$ )  $60^\circ$ , ( $\gamma$ )  $30^\circ$



(α)

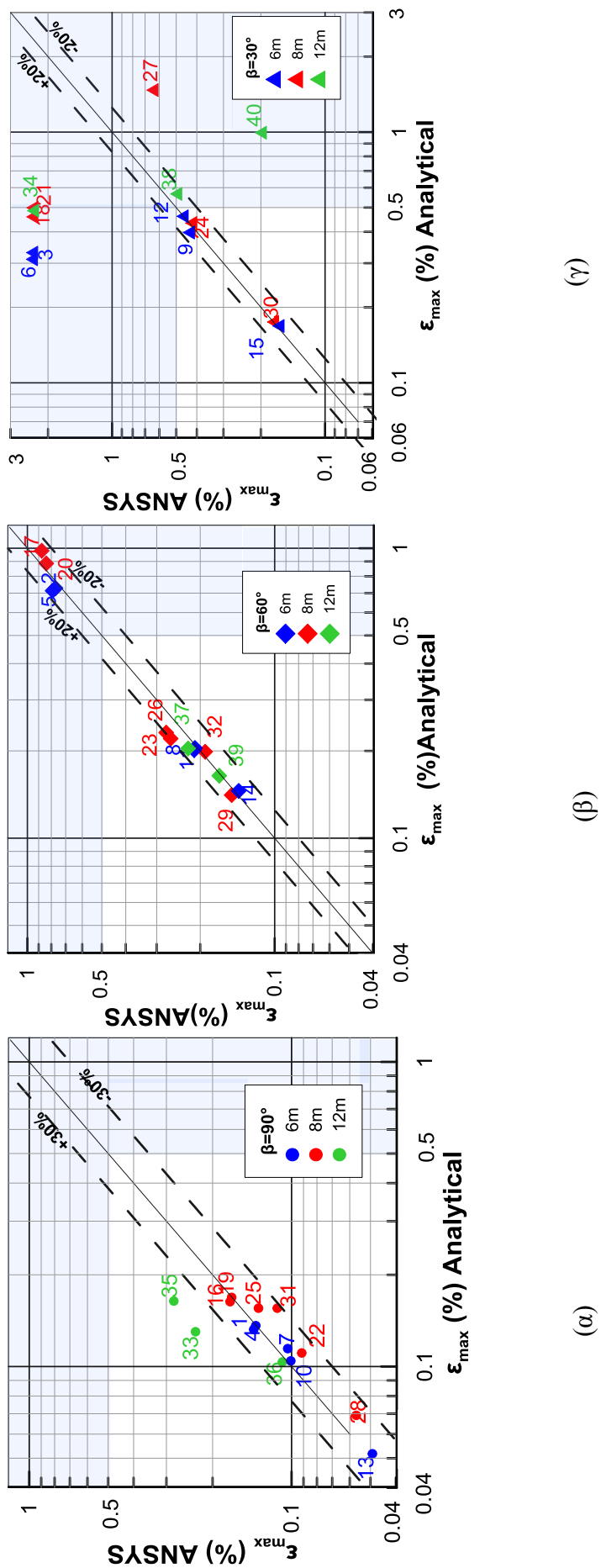


(β)



(γ)

Σχήμα 6.6: Σύγκριση 1-1 για τις ελάχιστες τιμές της αξονικής τάσης στον αγωγό για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις (α)  $90^\circ$ , (β)  $60^\circ$ , (γ)  $30^\circ$

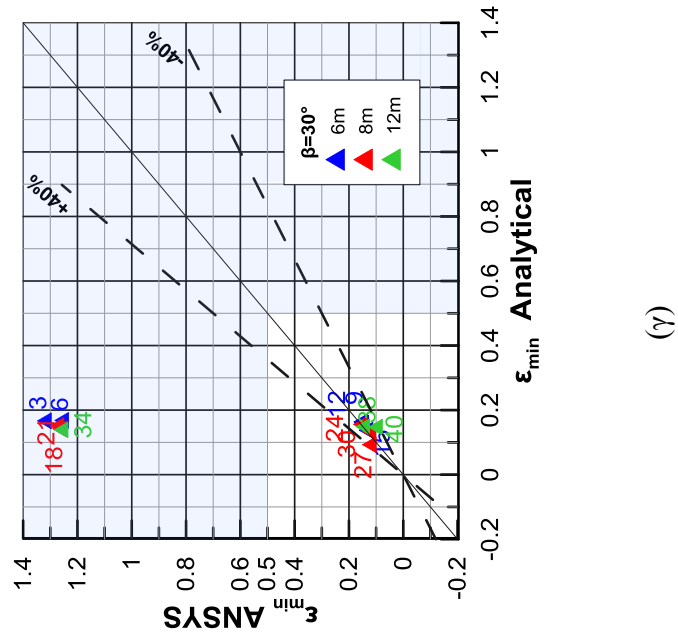
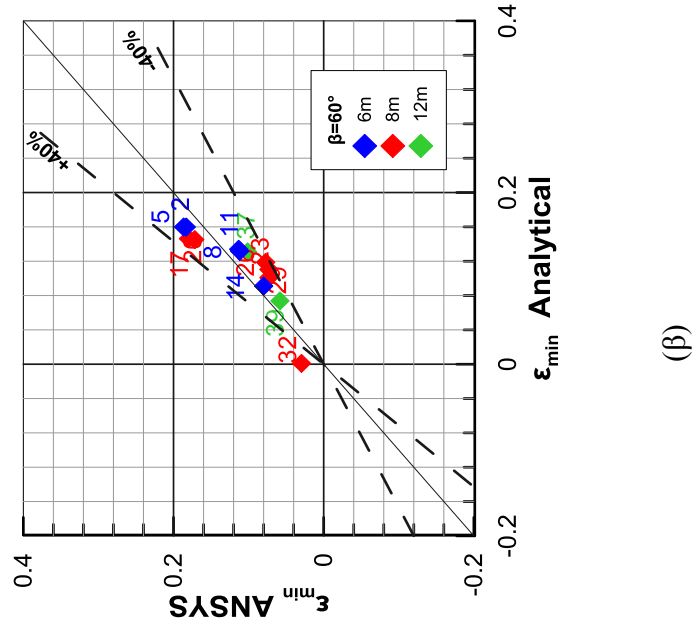
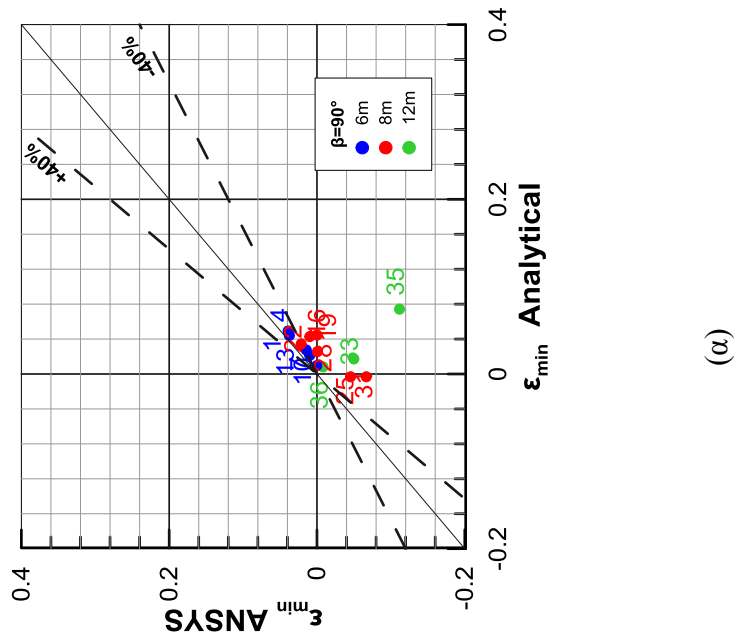


(α)

(β)

(γ)

Σχήμα 6.7: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της αξονικής παραμόρφωσης για διασταύρωση με τον αγωγό στις (α)  $90^\circ$ , (β)  $60^\circ$ , (γ)  $30^\circ$



Σχήμα 6.8: Σύγκριση 1-1 για τις ελάχιστες τιμές της αξονικής παραμόρφωσης για διασταύρωση με τον αγωγό στις (α) 90°, (β) 60°, (γ) 30°

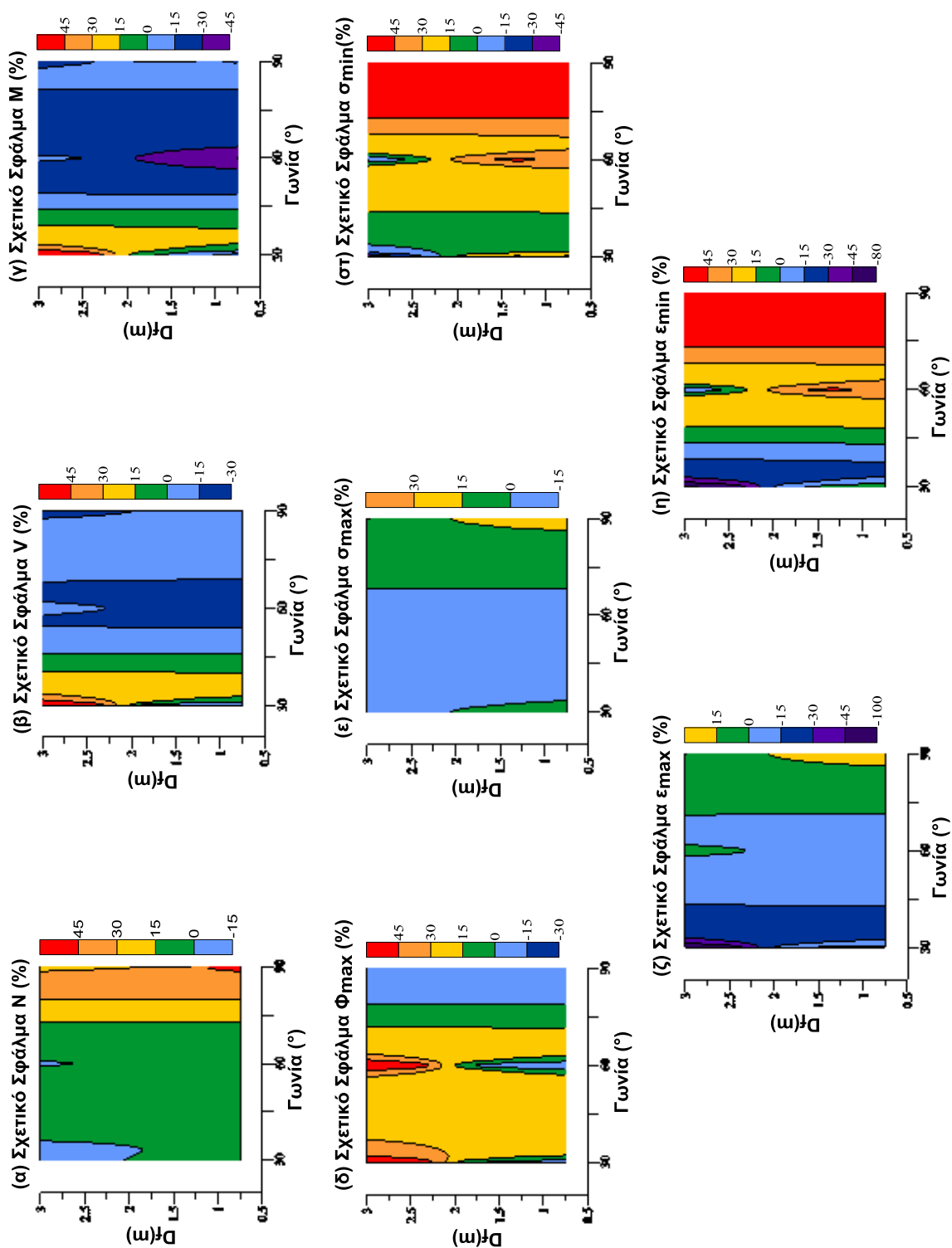
Στην πλειοψηφία τους οι αναλύσεις που παρουσιάζονται σε αυτά τα σχήματα δίνουν αποτελέσματα που προσεγγίζουν αυτά του αριθμητικού μοντέλου. Οι μέγιστες παραμορφώσεις κυμαίνονται στο  $\pm 20\%$  και οι ελάχιστες παραμορφώσεις στο  $\pm 40\%$  για  $30^\circ$  και  $60^\circ$ , ενώ στις  $90^\circ$  οι μέγιστες παραμορφώσεις έχουν διακύμανση  $\pm 30\%$  και οι ελάχιστες  $\pm 40\%$ . Στα Σχήματα 6.7γ και 6.8γ παρουσιάζονται και πάλι οι αναλύσεις που αντιστοιχούν σε αγωγό που προσπίπτει με  $30^\circ$  στο ρήγμα να έχουν απόκλιση μεγαλύτερη από  $100\%$ . Αυτό οφείλεται στο ότι έχει υποτιμηθεί ελαφρά η τάση αλλά ο αγωγός είναι στην πλαστική περιοχή, η μικρή υποτίμηση οδηγεί σε δυσανάλογα μεγάλη υποτίμηση της παραμόρφωσης.

Στα Σχήματα 6.7 και 6.8 έχει σκιαγραφηθεί με γαλάζιο χρώμα η περιοχή όπου θεωρείται ότι ο αγωγός έχει αστοχήσει, με το  $0.5\%$  να αποτελεί όριο αστοχίας για συγκολλημένα τμήματα και κατ' επέκταση χρησιμοποιήθηκε και σαν όριο αστοχίας στους εύκαμπτους κόμβους.

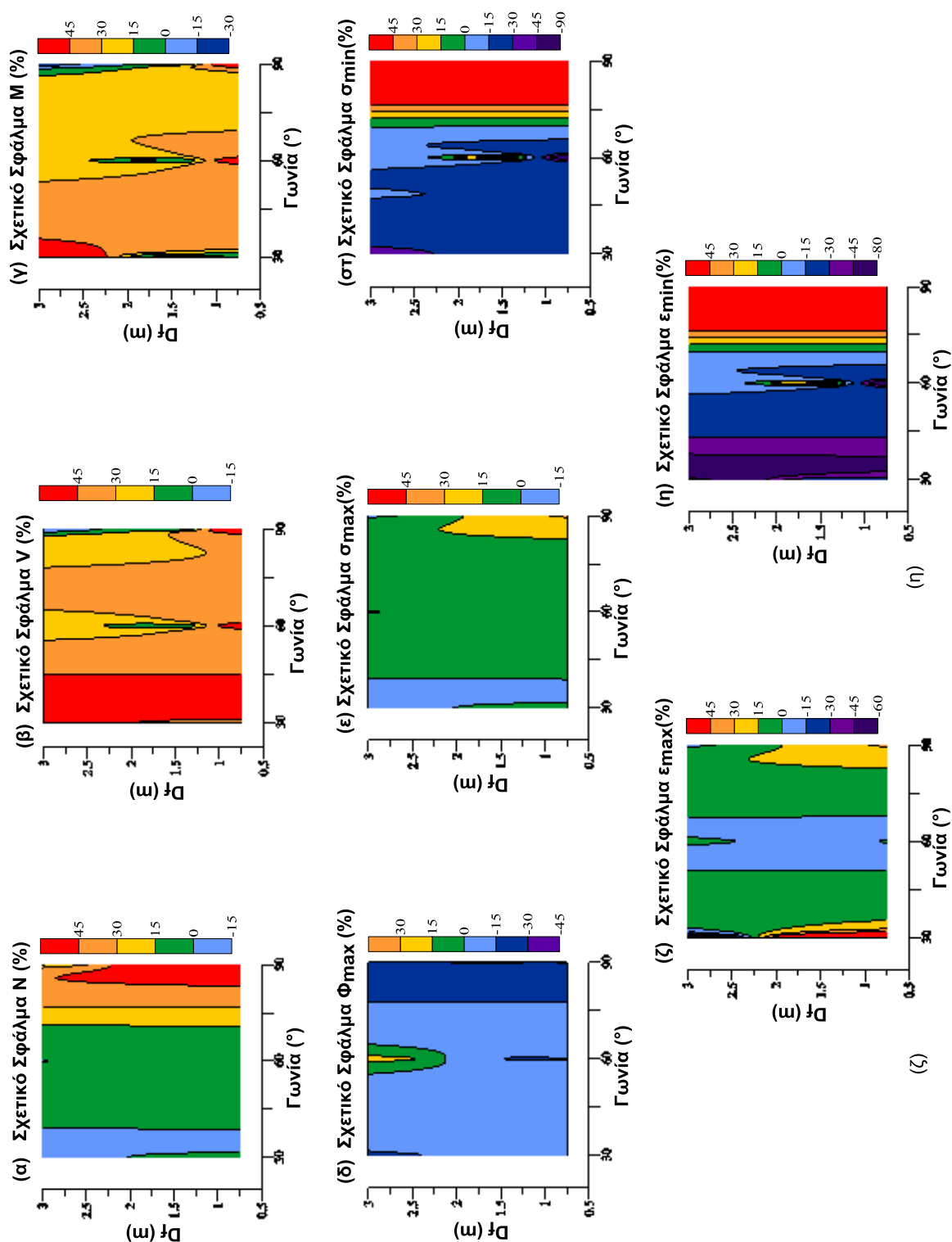
### **6.3 Διαγράμματα σχετικού σφάλματος προτεινόμενης μεθοδολογίας**

Από τις «1 προς 1» συγκρίσεις που έγιναν κρίθηκε σκόπιμο να κατασκευαστούν διαγράμματα σχετικού σφάλματος συναρτήσει της γωνίας  $\beta$ , της απόστασης των εύκαμπτων κόμβων καθώς και της μετακίνησης του ρήγματος προκειμένου να είναι πιο ξεκάθαρα τα όρια εφαρμογής της αναλυτικής μεθοδολογίας.

Στα Σχήματα 6.9 και 6.10 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σχετικού σφάλματος συναρτήσει της μετακίνησης του ρήγματος και της γωνίας διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα, για διασταύρωση ρήγματος στην μέση του αγωγού και στην άκρη, αντίστοιχα. Στο κάθε σχήμα απεικονίζεται το σχετικό σφάλμα για: (α) αξονική δύναμη  $N$ , (β) τέμνουσας δύναμης  $V$ , (γ) καμπτικής ροπής  $M$ , (δ) σχετικής στροφής  $\varphi_{max}$  (ε) μέγιστης τάσης  $\sigma_{max}$  (στ) ελάχιστης τάσης  $\sigma_{min}$  (ζ) μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_{max}$  (η) ελάχιστης αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_{min}$ .



**Σχήμα 6.9:** Διάγραμμα σχετικού λάθους συναρτήσει της μετακίνησης του ρήγματος και της γωνίας διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα, για διασταύρωση ρήγματος στη μέση του αγωγού για απόσταση κόμβων ίση με  $\delta m$



**Σχήμα 6.10:** Διάγραμμα σχετικού λάθους συναρτήσει της μετακίνησης του ρήγματος και της γωνίας διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα, για διασταύρωση ρήγματος στην άκρη ακριβώς μετά τον 3<sup>ο</sup> κόμβο για απόσταση κόμβων ίση με 8m

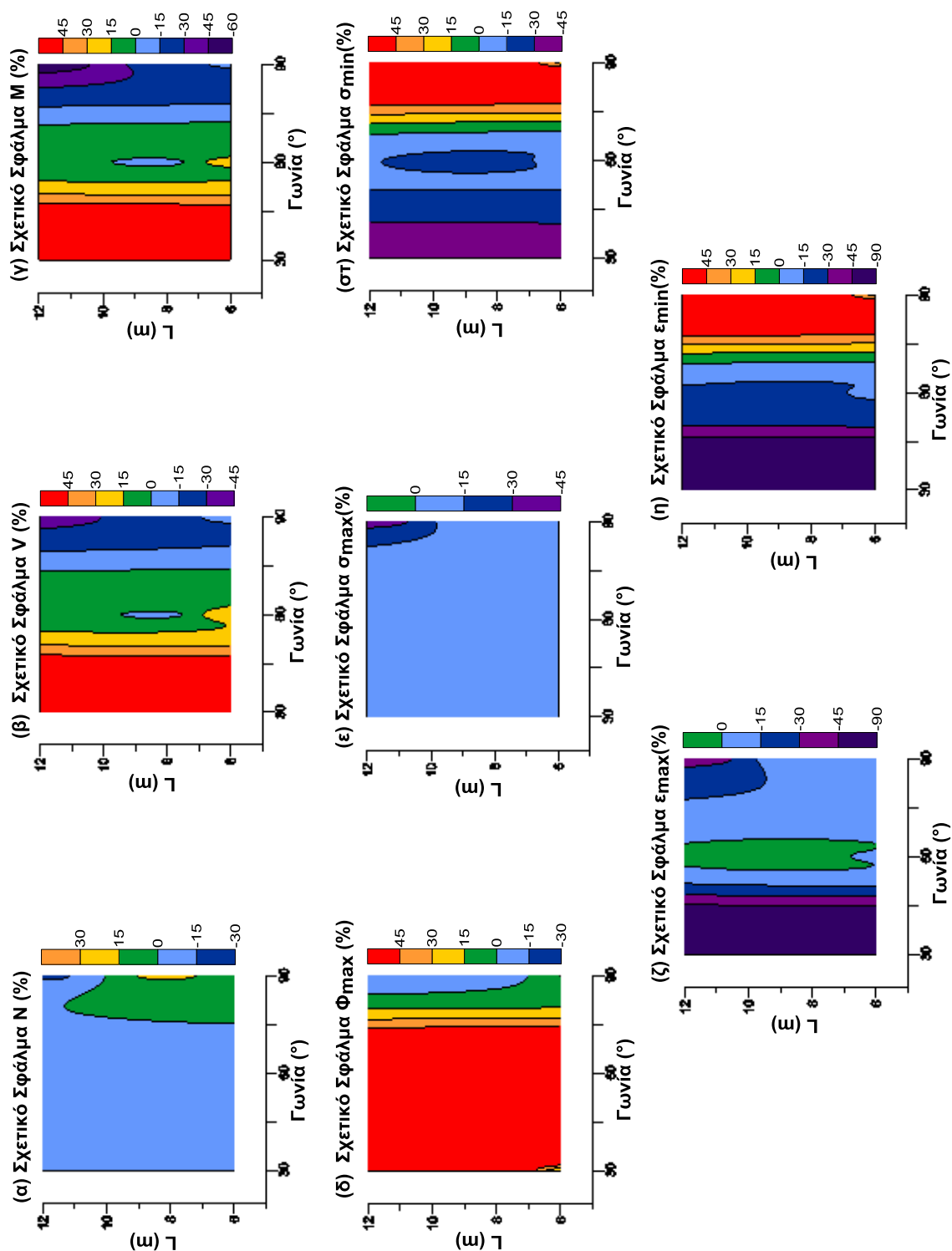


Από τα Σχήματα 6.9 και 6.10 φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι αξονικές δυνάμεις παρουσιάζουν μεγαλύτερο σφάλμα στις 90° από ότι στις υπόλοιπες. Ο λόγος είναι όπως ειπώθηκε και πριν ότι στις 90° δεν προκαλείται καθόλου επιμήκυνση στην οριζόντια διεύθυνση  $x$  λόγω διάρρηξης του ρήγματος και συνεπώς η αξονική υπολογίζεται μονάχα από καμπύλωση του αγωγού. Η αξονική όμως που προκύπτει λόγω στροφής υπολογίζεται προσεγγιστικά αφού προκύπτει δευτερογενώς από την καμπύλωση του αγωγού και συνεπώς το σχετικό σφάλμα στις 90° παρουσιάζεται να είναι μεγαλύτερο.

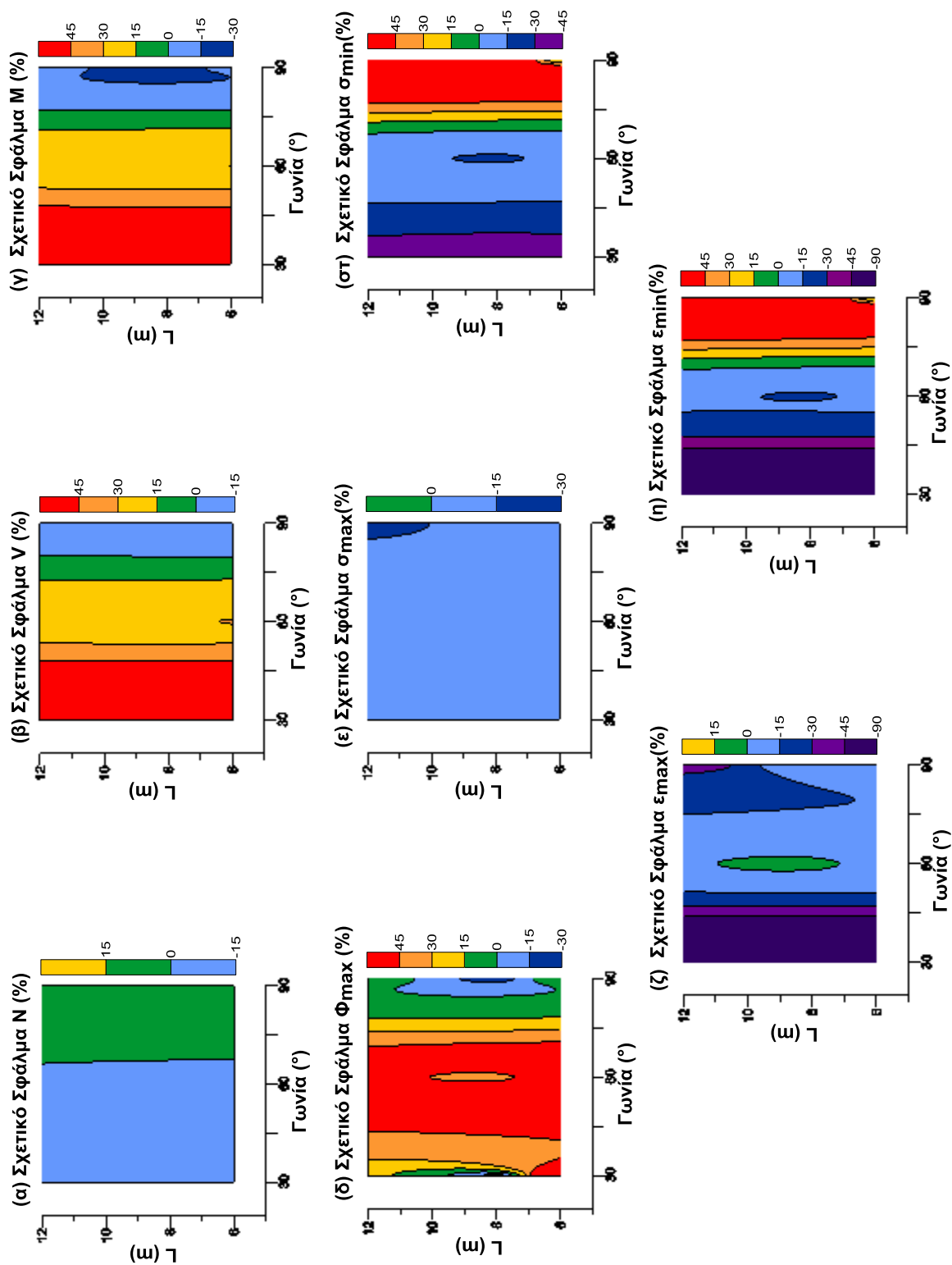
Από το Σχήμα 6.9 παρουσιάζονται εν γένει σφάλματα (μικρότερα του  $\pm 15\%$ ) στις αναλύσεις που αφορούν τις 30° και μεγάλες μετατοπίσεις ρήγματος ενώ αναφορικά με τα σφάλματα που προκύπτουν στο Σχήμα 6.10 για τις 30° μοίρες είναι αυξημένα για όλο το εξεταζόμενο εύρος μετακίνησης.

Απόρροια τόσο από το Σχήμα 6.9 όσο και από το 6.10 είναι και το αυξημένο σφάλμα που παρουσιάζουν οι αναλύσεις που αφορούν τις 90° στις ελάχιστες τάσεις και παραμορφώσεις. Αν εξαιρέσουμε λοιπόν τα μεγάλα σφάλματα στις αξονικές και στις ελάχιστες τάσεις και παραμορφώσεις, το σχετικό σφάλμα στα υπόλοιπα μεγέθη για γωνίες μεγαλύτερες των 60° είναι μικρότερο του  $\pm 30\%$  .

Στα Σχήματα 6.11 και 6.12 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σχετικού σφάλματος συναρτήσει της απόστασης των εύκαμπτων κόμβων και της γωνίας διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα, για διασταύρωση ρήγματος στην μέση του αγωγού και στην άκρη, ακριβώς μετά τον 3<sup>ο</sup> κόμβο αντίστοιχα. Στο κάθε σχήμα απεικονίζεται το σχετικό σφάλμα για: (α) αξονική δύναμη  $N$ , (β) τέμνουσας δύναμης  $V$ , (γ) καμπτικής ροπής  $M$ , (δ) σχετικής στροφής  $\varphi_{max}$  (ε) μέγιστης τάσης  $\sigma_{max}$  (στ) ελάχιστης τάσης  $\sigma_{min}$  (ζ) μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_{max}$  (η) ελάχιστης αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_{min}$ .



**Σχήμα 6.11:** Διάγραμμα σχετικού λάθους συναρτήσει της απόστασης των εύκαμπτων κόμβων και της γωνίας διαστάρωσης του αγωγού με το ρήγμα, για διαστάρωση ρήγματος στη μέση του αγωγού για μετακίνηση ρήγματος ίση με 3m



**Σχήμα 6.12:** Διάγραμμα σχετικού λάθους συναρτήσει της απόστασης των εύκαπτων κόμβων και της γωνίας διαστύρωσης του αγωγού με το ρήγμα, για διαστύρωση ρήγματος στην άκρη ακριβώς μετά τον 3<sup>ο</sup> κόμβο για μετακίνηση ρήγματος ίση με 3m

Τα Σχήματα 6.11 και 6.12 επιβεβαιώνουν όσα σχολιάστηκαν και πιο πριν με αφορμή τα Σχήματα 6.9 και 6.10. Συγκεκριμένα παρατηρείται αυξημένη αξονική δύναμη στις 90° συγκριτικά με τις 30° και τις 60°. Επίσης στις 90° το σφάλμα παρουσιάζεται αυξημένο (μεγαλύτερο του +30%) για τις ελάχιστες τάσεις και παραμορφώσεις.

Από το Σχήμα 6.11 που αφορά διασταύρωση ρήγματος στη μέση, παρατηρείται σφάλμα στις 30° και στις 60° μεγαλύτερο του  $\pm 30\%$  στη μέγιστη σχετική στροφή και για τις τρεις αποστάσεις κόμβων. Ενώ από το Σχήμα 6.12 που αφορά διασταύρωση ρήγματος με τον αγωγό στον εύκαμπτο κόμβο, παρατηρείται σφάλμα μεγαλύτερο του  $\pm 30\%$  στις 30° για την τέμνουσα δύναμη, τη ροπή και την ελάχιστη τάση και παραμόρφωση (ανεξάρτητα από την απόσταση των εύκαμπτων κόμβων), καθώς επίσης και στη μέγιστη σχετική στροφή όταν οι κόμβοι είναι τοποθετημένοι ανά 6m.

Σχετικά με τα μεγάλα σχετικά σφάλματα για όλες τις περιπτώσεις υπολογισμού της ελάχιστης αναπτυσσόμενης παραμόρφωσης και τάσης (Σχήματα 6.11 και 6.12στ, η) 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 16 -κόμβοι ανά 8m,  $\beta=90^\circ$ , ρήγμα στη μέση,  $Df=3m$ - (βλ. και τα σχετικά διαγράμματα της περίπτωσης B.16 που παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β), η οποία φαίνεται να εμφανίζει σφάλμα της τάξεως του 30789% στον υπολογισμό της ελάχιστης αναπτυσσόμενης παραμόρφωσης. Η ελάχιστη παραμόρφωση της διατομής υπολογίζεται  $\epsilon_{\min}=0.0445\%$  από την αναλυτική μεθοδολογία και  $\epsilon_{\min}=-0.0014\%$  από την αριθμητική ανάλυση. Αν δούμε όμως την ελάχιστη παραμόρφωση σαν μέγεθος όμως η απόκλιση αυτή δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Για τον ίδιο λόγο, τα σχετικά σφάλματα που αφορούν τις ελάχιστες αναπτυσσόμενες τάσεις (Σχήμα 6.12 και 6.11στ) δεν είναι τόσο μεγάλα στην πραγματικότητα.

Συνεπώς, η χρήση της αναλυτικής μεθοδολογίας κρίνεται ασφαλής και επιτρεπτή για περιπτώσεις γωνίας πρόσπτωσης ρήγματος με τον αγωγό μεγαλύτερες ή ίσες των 60° και για μετακίνηση ρήγματος μεγαλύτερη του 1.5D (~1.00m). Παρόλο που στις περισσότερες περιπτώσεις η αναλυτική μεθοδολογία δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και για μικρές μετακινήσεις ρήγματος (ίσες με D), εντούτοις, εφόσον η

μέθοδος σχεδιασμού αφορά μεγάλες μετακινήσεις, προτείνεται να μην χρησιμοποιείται η αναλυτική επίλυση για μικρές μετακινήσεις, όπου μπορεί να υπάρχει μεγαλύτερο σφάλμα.

## **6.4 Συμπεράσματα**

Από τις ανωτέρω συγκρίσεις, προκύπτει ότι η προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία προσεγγίζει ικανοποιητικά το μηχανισμό του φαινομένου, καθώς δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην πλειονότητα των περιπτώσεων που εξετάστηκαν.

Ωστόσο, μέσα από την παραπάνω εποπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών και αριθμητικών επιλύσεων καθορίζονται τα όρια της αναλυτικής μεθοδολογίας. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις που η τομή του ρήγματος με τον άξονα του αγωγού είναι στις  $30^\circ$ , οι κόμβοι αν και δρουν ευεργετικά, δεν επηρεάζουν αισθητά τα αποτελέσματα, εφόσον οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις οφείλονται κυρίως στη διαμήκη συνιστώσα της εδαφικής μετακίνησης  $\Delta x$ . Έτσι, παρά το γεγονός ότι η μεθοδολογία προσεγγίζει αρκετά ικανοποιητικά τις τιμές των αναπτυσσόμενων αξονικών δυνάμεων και τάσεων, ο αγωγός βρίσκεται λόγω των αξονικών τάσεων στην πλαστική περιοχή και πολύ μικρές διαφοροποιήσεις στην εκτίμηση των τάσεων προκαλούν δυσανάλογα μεγάλες διαφορές στις εκτιμήσεις των παραμορφώσεων, ροπών και τεμνουσών δυνάμεων. Πάρα ταύτα, το συγκεκριμένο όριο εφαρμογής της μεθοδολογίας έχει περιορισμένη σημασία, εφόσον έτσι κι αλλιώς η χρήση εύκαμπτων κόμβων σε περιπτώσεις που αναπτύσσονται τόσο μεγάλες αξονικές δυνάμεις λόγω της μικρής γωνίας διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα, θα ήταν ασύμφορη, εφόσον δε θα απομείωναν ουσιαστικά τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις και συνεπώς θα έπρεπε να προβούμε σε μια διαφορετική λύση ή αλλαγή της χάραξης του αγωγού.

Επιπρόσθετα σε κάποιες περιπτώσεις των πολύ μικρών μετατοπίσεων του ρήγματος δεν κατέστη δυνατή η εξαγωγή ικανοποιητικών αποτελεσμάτων από την προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία. Αυτό συμβαίνει γιατί η μετακίνηση του αγωγού περιορίζεται μέχρι τον πρώτο κόμβο, ενώ σύμφωνα με τη μεθοδολογία έχει θεωρηθεί ότι θα ενεργοποιηθούν τουλάχιστον δύο κόμβοι από κάθε πλευρά. Παρόλα αυτά επειδή η χρήση εύκαμπτων κόμβων κρίνεται σκόπιμη μόνο στην περίπτωση μεγάλων μετατοπίσεων (ίσων 2-4 φορές τη διάμετρο του αγωγού στην περίπτωση

των ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης), ούτε αυτή η αδυναμία αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα για την αξιοπιστία της μεθοδολογίας.

# 7

## Σύγκριση της νέας μεθόδου σχεδιασμού εύκαμπτων κόμβων με τις συμβατικές

---

### 7.1 Εισαγωγή

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι 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 εφαρμογής της αλλά και το κόστος εφαρμογής της.

### 7.2 Μεθοδολογίες αντιμετώπισης εδαφικών μετατοπίσεων λόγω διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων

Στο συμβατικό (παραδοσιακό) σχεδιασμό υπόγειων αγωγών, η μείωση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων σε έναν αγωγό οποίος διασταυρώνεται με ένα ρήγμα 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 προκατασκευασμένου κιβωτίου (culvert) από οπλισμένο σκυρόδεμα κατάλληλων διαστάσεων, εντός του οποίου ο αγωγός είναι ελεύθερος να κινηθεί.

Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν αφορούν δύο εναλλακτικές γωνίες πρόσπτωσης ρήγματος με αγωγό 90° και 60°, διότι η ευεργετική επιρροή των εύκαμπτων κόμβων διαφοροποιείται ουσιαστικά αναλόγως της γωνίας διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα. Να σημειωθεί ότι βάσει των συμπερασμάτων του Κεφαλαίου 6, η χρήση των εύκαμπτων κόμβων δεν ενδείκνυται για μικρότερες γωνίες των 60°.

Για τη μελέτη των εναλλακτικών μεθόδων σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε ως βάση ένας απλός αγωγός, ποιότητας API 5L Grade X65 και πάχους  $t=12.5\text{mm}$ . Πρώτα εξετάστηκε η αύξηση του πάχους τοιχώματος του αγωγού, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του και την μείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν συνεχείς αγωγοί εξωτερικής διαμέτρου  $D=0.762\text{m}$  και πάχους  $t=12.5\text{mm}$ ,  $t=16\text{mm}$  και  $t=20\text{mm}$ . Για την εκπόνηση των αναλύσεων αυτών έγινε χρήση της αναλυτικής μεθοδολογίας των Karamitros et al. (2011) και μέσω σταδιακής αύξησης 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 0.5%. Στη συνέχεια θεωρήθηκε ότι ο αγωγός πρέπει να ενισχυθεί αυξάνοντας το πάχος 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 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 αυτός ο αγωγός από το ρήγμα.

Για να εκτιμηθεί η επιρροή του είδους του χάλυβα στις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις θεωρήθηκε σκόπιμο -πάλι με τη χρήση της αναλυτικής μεθοδολογίας των Karamitros et al. (2011)- οι πιο πάνω αναλύσεις που έγιναν με ποιότητα χάλυβα API 5L Grade X65 να γίνουν και για αναβαθμισμένη ποιότητα χάλυβα Grade X70.



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 σύμφωνα με τις τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1. Προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα με αυτά των μεθόδων που ακολουθούν και που, στην ουσία, βελτιώνουν την περιοχή γύρω από το ρήγμα, έγινε αναγωγή του κόστους ανά μέτρο μήκους του αγωγού.

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

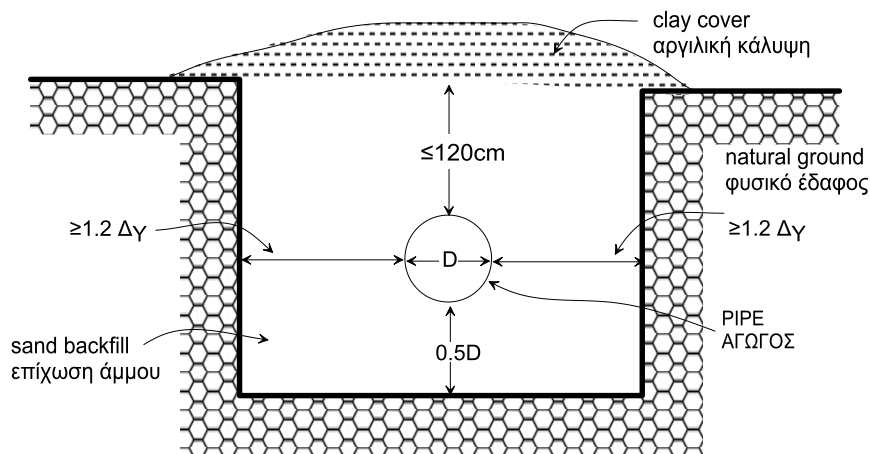
	<b>API 5L Grade X65</b> <b>Unit price (€/tn)</b>	<b>API 5L Grade X70</b> <b>Unit price (€/tn)</b>
<b>Αγωγός D=30", t=12.5mm</b>	1120	1130
<b>Αγωγός D=30", t=16mm</b>	1200	1300
<b>Αγωγός D=30", t=20mm</b>	1308	1530

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις και για την περίπτωση όπου ο αγωγός βρίσκεται μέσα σε τάφρο με ελαφρόπετρα, μεθοδολογία που αποσκοπεί στην απομείωση των επιβαλλόμενων δυνάμεων στον αγωγό. Το μειωμένο βάρος αυτών των υλικών, μειώνει τις επιβαλλόμενες γεωστατικές τάσεις στον αγωγό και κατά συνέπεια των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια εδάφους και αγωγού, αυξάνοντας το μήκος αγκύρωσης του αγωγού και μείωση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων. Για να επιτευχθεί η απαραίτητη απομείωση και στην εγκάρσια αντίσταση του αγωγού η εκσκαφή διευρύνεται όπως και στις υπόλοιπες περιπτώσεις. Οι αναλύσεις που προέκυψαν για τη συγκεκριμένη μέθοδο αντιμετώπισης αφορούν συνεχή αγωγό εξωτερικής διαμέτρου  $D=0.762m$ , πάχους  $t=12.5mm$  και χάλυβα API 5L Grade X65 ενώ και πάλι έγινε χρήση της αναλυτικής μεθοδολογίας των Karamitros et al. (2011) αφού τροποποιήθηκαν ανάλογα με το ειδικό βάρος της ελαφρόπετρα ( $\gamma=8kN/m^3$ ) τα ελατήρια προσομοίωσης του εδάφους, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2.

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

Είδος ελατηρίων	Δύναμη	Μετακίνηση
	(KN/m)	(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

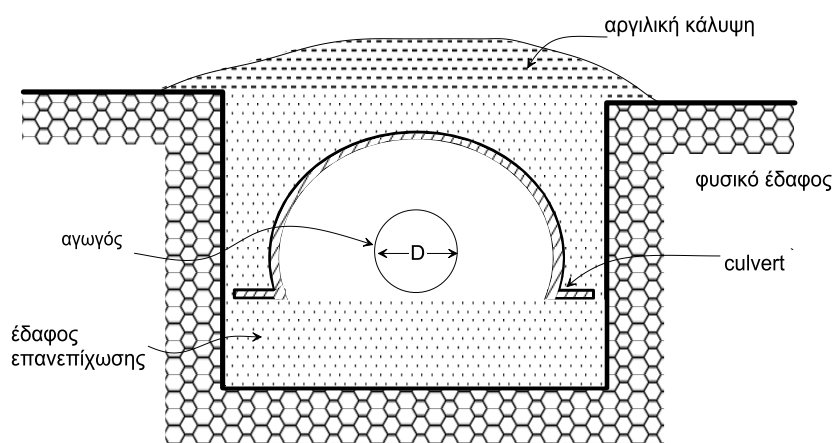
Το κόστος της ελαφρόπετρας, ελήφθη ίσο με  $40\text{€/m}^3$ , τιμή στην οποία περιλαμβάνεται η προμήθεια και μεταφορά της ελαφρόπετρας καθώς και η επίχωση του χάνδακα. Έτσι για να υπολογιστεί το συνολικό κόστος αυτής της μεθόδου, πολλαπλασιάστηκε το εν λόγω ποσό, με το εμβαδό της διατομής της τάφρου (Βλ. Σχήμα 7.1) και προστέθηκε έπειτα σ' αυτό και το κόστος προμήθειας του σωλήνα ανηγμένο ανά μέτρο μήκους.



**Σχήμα 7.1:** Εμβαδόν διατομής τάφρου

Τέλος, θεωρήθηκε ότι ο αγωγός μπορεί να προστατευθεί από τις μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις λόγω της διάρρηξης ρήγματος με την κατασκευή ενός υπόγειου προκατασκευασμένου «θυσιαζόμενου» κιβωτίου (culvert) από οπλισμένο σκυρόδεμα (Βλ. Σχήμα 7.2) κατάλληλων διαστάσεων, εντός του οποίου ο αγωγός είναι ελεύθερος να κινηθεί. Στην ουσία η κατασκευή αποτελείται από μια σειρά προκατασκευασμένων κιβωτίων τα οποία περιβάλλουν τον αγωγό. Τα κιβώτια αυτά εφάπτονται μεταξύ τους, ενώ σε περίπτωση διάρρηξης έχουν τη δυνατότητα να μετακινηθούν σχετικά μεταξύ τους και να παραλάβουν την μετακίνηση του ρήγματος.

Ο αγωγός στην περίπτωση αυτή καλείται να αναλάβει μόνο την επιμήκυνση  $\Delta x$  λόγω της μετακίνησης. Για να υπολογιστεί η επιμήκυνση έχει γίνει 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. Ωστόσο επιβλήθηκε μόνο η οριζόντια συνιστώσα της επιβαλλόμενης μετακίνησης 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%. Οι εν λόγω παραμορφώσεις αναμένεται να αναπτυχθούν στα άκρα του μήκους του αγωγού που προστατεύεται από τα κιβώτια culvert, το οποίο θεωρήθηκε εδώ ότι συμπίπτει με το καμπυλωμένο μήκος του αγωγού, καθώς εκεί αναπτύσσονται μεγάλες αξονικές δυνάμεις. Να σημειωθεί ότι έγιναν αναλύσεις μόνο για γωνία διασταύρωσης ίση με  $60^\circ$ , εφόσον στην περίπτωση της γωνίας  $90^\circ$ , η οριζόντια επιμήκυνση είναι πολύ μικρή, και οφείλεται αποκλειστικά στην καμπύλωση του αγωγού (η  $\Delta x$  λόγω του ρήγματος είναι μηδενική). Κατά συνέπεια δεν αναμένεται να αναπτύσσονται ουσιαστικές παραμορφώσεις στον αγωγό σε αυτή την περίπτωση και για τις ανάγκες της σύγκρισης λαμβάνεται μία σταθερή μικρή τιμή.



**Σχήμα 7.2:** Διατομή Περιβλήματος Σκυροδέματος (Culvert)

Το κόστος προκατασκευής, μεταφοράς και τοποθέτησης του κυκλικού κιβωτίου (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 του υπερμεγέθους κιβωτίου. 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. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι 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. Επιπρόσθετα στα παραπάνω πρέπει να προστεθεί και το κόστος για την επανεπίχωση με διαβαθμισμένο υλικό, το οποίο κυμαίνεται περίπου στα 30€/m. Συνεπώς για να προκύψει το συνολικό κόστος θεωρείται ίσο με 280€/m και αφορά ημι-κυλινδρικά κελύφη με ακτίνα 130cm. Το κιβώτιο αυτό θεωρείται ότι επαρκεί για την περίπτωση μετατόπισης του ρήγματος περί το 1D, έτσι ώστε να υπάρχει και ένα περιθώριο ασφαλείας μεταξύ του αγωγού και του κιβωτίου. 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  $D=0.762m$ , πάχους  $t=12.5mm$  και χάλυβα API 5L Grade X65, ανά μέτρο μήκους. 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.

Για το εύρος εφαρμογής της μεθόδου με εύκαμπτους κόμβους, χρησιμοποιήθηκε η αναλυτική μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, για την περίπτωση απόστασης μεταξύ των κόμβων ίση με 6m και 8m, που κρίνονται ως οι πιο αποτελεσματικές αποστάσεις. Οι αναλύσεις έγιναν για αγωγό εξωτερικής διαμέτρου  $D=0.762m$  πάχους  $t=12.5mm$  και χάλυβα API 5L Grade X65 για διασταύρωση ρήγματος με τον αγωγό λίγο μετά τον 4<sup>ο</sup> εύκαμπτο κόμβο (επειδή θεωρείται δυσμενέστερη περίπτωση από την διασταύρωση ρήγματος ακριβώς στο κέντρο του αγωγού). Από τις αναλύσεις διαπιστώθηκε η τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης στην οποία αναπτύσσονται μέγιστες αξονικές παραμορφώσεις που υπερβαίνουν το όριο του 0.5%.

Για την εκτίμηση του κόστους αυτής της λύσης, λήφθηκαν υπόψη προσφορές της εταιρίας BOA Group και χρησιμοποιήθηκε ενδεικτική τιμή κόμβου €3653 έκαστος, η

οποία αφορά κόμβους με τα απαραίτητα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (τύπου 7510 και ονομασία DN800). Το κόστος της μεθόδου διαιρέθηκε με το συνολικό μήκος εφαρμογής των επτά κόμβων (τρεις κόμβοι εκατέρωθεν της διασταύρωσης με το ρήγμα), ενώ προστέθηκε σ' αυτό και το κόστος προμήθειας του σωλήνα ανηγμένο ανά μέτρο μήκους. Η εν λόγω προσφορά αφορά τιμές λιανικής και κατά συνέπεια είναι δυσμενής όσον αφορά το κόστος.

Πρέπει να σημειωθεί 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.

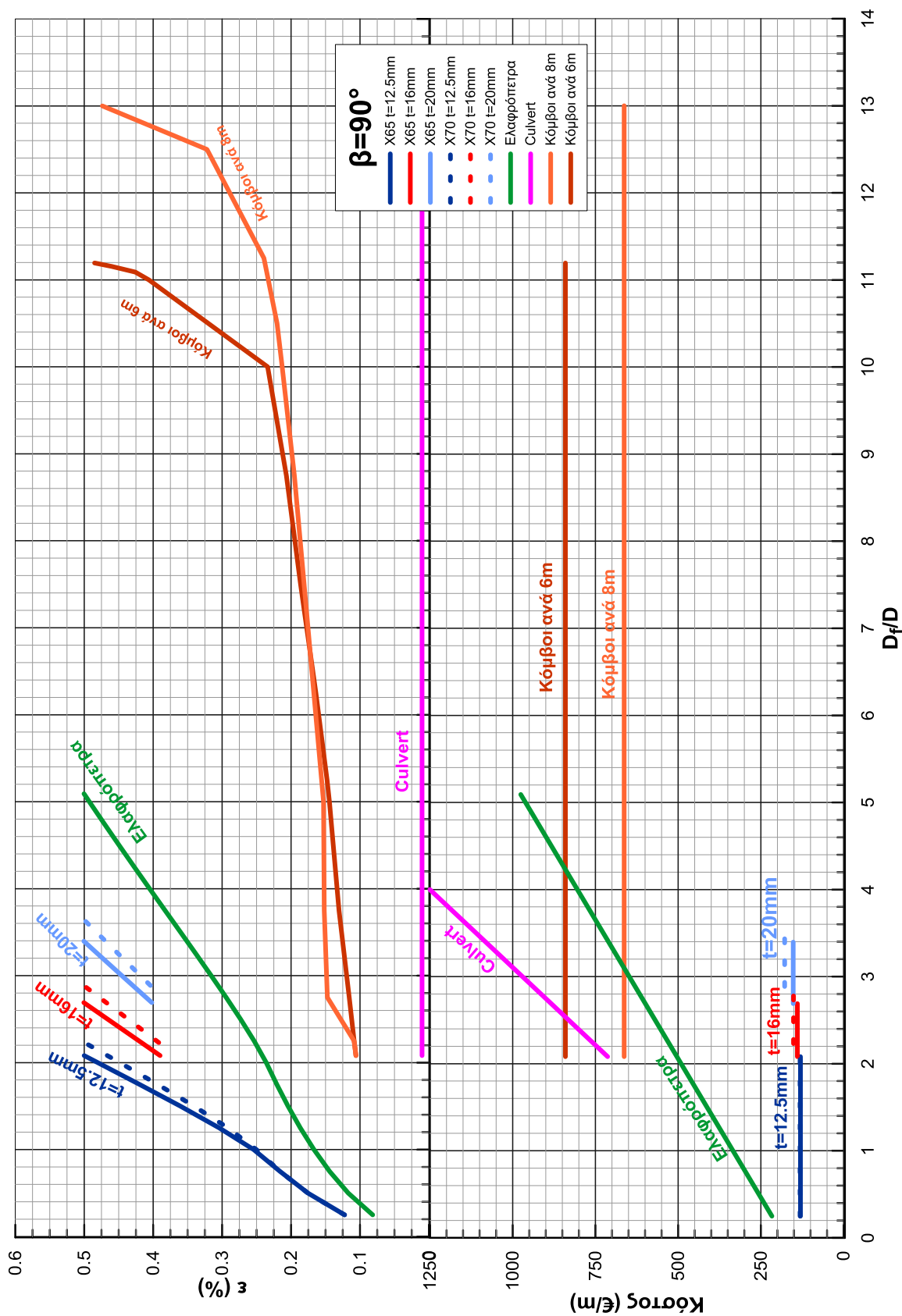
### **7.3 Σύγκριση μεθοδολογιών ως προς την αποδοτικότητα και το κόστος**

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.

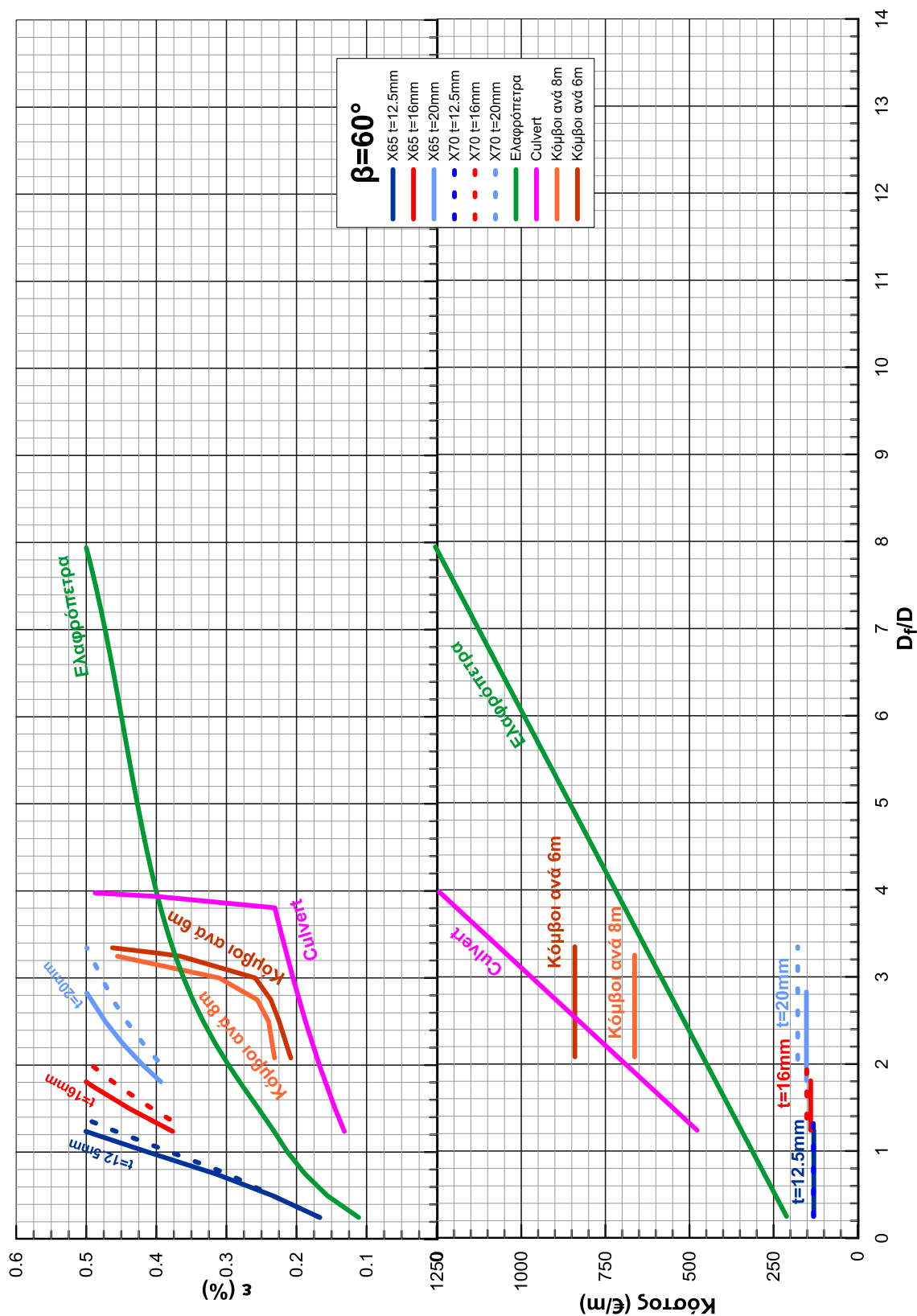
Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 7.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα των μέγιστων αναπτυσσόμενων αξονικών παραμορφώσεων του αγωγού συναρτήσει του λόγου της μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού,  $D_f/D$  για την περίπτωση διασταύρωσης ρήγματος με τον αγωγό στις  $90^\circ$ , για κάθε μια εναλλακτική μέθοδο, έτσι ώστε να αποτιμηθεί η αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα της κάθε μεθόδου. Παράλληλα συσχετίζεται και το ανηγμένο κόστος ως προς το μήκος καμπύλωσης της κάθε μεθόδου με το λόγο  $D_f/D$ , για να διαπιστωθεί σε ποιο πεδίο εδαφικών μετακινήσεων είναι οικονομικά συμφέρουσα η κάθε εναλλακτική μεθοδολογία. Στο Σχήμα 7.4 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για την περίπτωση διασταύρωσης ρήγματος με τον αγωγό στις  $60^\circ$ .

Και στα δύο Σχήματα παρατηρείται ότι η αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού, παρόλο που πρακτικά αποτελεί τον επικρατέστερο τρόπο αντιμετώπισης των επαυξημένων παραμορφώσεων λόγω διάρρηξης ρηγμάτων, δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλη ευμενή επιρροή στην απομείωση των παραμορφώσεων του αγωγού, καθώς

δεν καλύπτει τις περιπτώσεις πολύ μεγάλων επιβαλλόμενων μετατοπίσεων (μεγαλύτερων από 3.6D για διασταύρωση ρήγματος στις 90° και μεγαλύτερων του 3.35D για διασταύρωση ρήγματος στις 60°). Παράλληλα είναι εμφανές ότι ακόμη και για αυτές τις μικρές μετατοπίσεις, το κόστος αυξάνεται κατά 16% για ποιότητα χάλυβα API 5L Grade X65, και 35% για ποιότητα χάλυβα API 5L Grade X70 με την αύξηση του πάχους της διατομής του αγωγού από  $t=12.5\text{mm}$  σε  $t=20\text{mm}$ .



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 σε γωνία διασταύρωσης ρήγματος με αγωγό στις 90°



Σχήμα 7.4: Διαγράμματα μέγιστων αναπτυσσόμενων αξονικών παραμορφώσεων και κόστους συναρτήσει του λόγου της μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού για κάθε εναλλακτική μέθοδο σε γωνία διασταύρωσης ρήγματος με αγωγό στις 60°



Όσον αφορά την αναβάθμιση της ποιότητας του χάλυβα API 5L X70 σε X65, παρατηρείται ότι πρόκειται για μέτρο με μικρή αποτελεσματικότητα, με δυσανάλογα μεγάλο κόστος.

Σύμφωνα με το Σχήμα 7.3 για γωνία διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό στις 90°, η χρήση ελαφρόπετρας για την επίχωση της τάφρου παρατηρείται να έχει μέτρια επιρροή στην απομείωση των παραμορφώσεων, καθώς προστατεύει τον αγωγό από επιβαλλόμενες μετατοπίσεις μέχρι 5D περίπου. Ωστόσο είναι δυσεύρετη σε μεγάλες ποσότητες και αποτελεί οικονομικά ακριβή λύση (σε σχέση και την απόδοση και το κόστος των εύκαμπτων κόμβων) για μέτριες μετατοπίσεις. Αντίθετα για την περίπτωση πρόσπτωσης ρήγματος με τον αγωγό στις 60°, η χρήση ελαφρόπετρας φαίνεται να είναι η λύση που επιτρέπει την παραλαβή των μέγιστων μετατοπίσεων αφού για να αστοχήσει ο αγωγός η μετακίνηση που προκαλεί το ρήγμα φτάνει μέχρι και τα 7.95D ενώ είναι μέτρια ακριβή λύση. Χάρη στην ελαφρόπετρα παραλαμβάνονται οι αξονικές δυνάμεις λόγω της ικανότητας που έχει να μειώνει την τριβή μεταξύ αγωγού και εδάφους, κάτι που δεν επιτυγχάνεται τόσο έντονα με τους εύκαμπτους κόμβους άλλωστε ο σχεδιασμός τους δεν αποσκοπούσε εξ αρχής στην παραλαβή των αξονικών δυνάμεων.

Η χρήση εύκαμπτων κόμβων ανά 6m και 8m παρουσιάζει να έχει τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα (με εξαίρεση την κατασκευή culvert) για την περίπτωση διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό στις 90° (Σχήμα 7.3), αφού οι επιβαλλόμενες μετακινήσεις ρήγματος φτάνουν μέχρι και 13D όταν οι κόμβοι είναι τοποθετημένοι ανά 8m, και 11.2D όταν οι κόμβοι τοποθετηθούν ανά 6m. Ενώ το κόστος είναι μικρό σε σχέση με την απόδοση και το κόστος άλλων μεθόδων.

Στη περίπτωση διασταύρωσης ρήγματος με αγωγό στις 60°, όταν οι κόμβοι είναι τοποθετημένοι ανά 8m και 6m η επιβαλλόμενη μετακίνηση που μπορεί να παραλάβει με ασφάλεια ο αγωγός φτάνει τα 3.25D, και τα 3.35D αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι για την γωνία αυτή η χρήση εύκαμπτων κόμβων έχει ένα όριο ως προς την μετακίνηση που μπορεί να παραλάβει με ασφάλεια ο αγωγός χωρίς να αστοχήσει, ενώ το κόστος είναι εν γένει μεγαλύτερο από την περίπτωση με χρήση ελαφρόπετρας.

Η προστασία του αγωγού από υπόγεια κιβώτια (culvert) οπλισμένου σκυροδέματος κατάλληλου πλάτους αντίστοιχου με την αναμενόμενη μετακίνηση του ρήγματος

πρόκειται για μέθοδο μέτριας αποδοτικότητας, αφού όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.4 για την περίπτωση που ο αγωγός διασταυρώνεται στις 60° μπορεί να εφαρμοστεί μέχρι και για μετακίνηση ρήγματος 4D. Το κόστος όμως είναι ιδιαίτερα ακριβότερο από το κόστος εφαρμογής των μεθόδων με ελαφρόπετρα ή εύκαμπτους κόμβους. Όσον αφορά την χρήση culvert για την περίπτωση που ο αγωγός διασταυρώνεται στις 90° (Σχήμα 7.3) παρουσιάζεται να είναι η πιο ακριβή λύση, αλλά επί της ουσίας μπορεί να εφαρμοστεί ανεξαρτήτως μετατόπισης του ρήγματος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το σχετικά χαμηλό κόστος ανά μέτρο μήκους που λήφθηκε υπόψη στα διαγράμματα για το κιβώτιο από σκυρόδεμα, αφορά προκατασκευασμένα κυκλικά κιβώτια και θεωρήθηκε απλή γραμμική αύξηση με το μέγεθος της μετατόπισης. Στην πραγματικότητα σε περιπτώσεις μεγάλων μετατοπίσεων το εξωτερικό περίβλημα (culvert) θα πρέπει να κατασκευαστεί με συμβατικές μεθόδους σκυροδέτησης (καλούπια) με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος. Επιπλέον, το κόστος για την απαιτούμενη υπερεκσκαφή ώστε να τοποθετηθεί το κιβώτιο αυξάνει δυσανάλογα με την αύξηση της διαμέτρου του περιβλήματος.

Συνοψίζοντας, η αύξηση του πάχους παρουσιάζεται να είναι η βέλτιστη λύση για μικρές και μεσαίες μετατοπίσεις ρήγματος (περίπου μικρότερες του 3.5D). Η χρήση εύκαμπτων κόμβων φαίνεται να είναι βέλτιστη για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης όταν ο αγωγός διασταυρώνεται με το ρήγμα στις 90° με την τοποθέτηση των κόμβων ανά 8m να είναι πιο αποδοτική, με μειωμένο κόστος σε σχέση με την χρήση ελαφρόπετρας που αποτελεί την τρίτη επικρατέστερη λύση. Η χρήση culvert μπορεί να θεωρείται μια ασφαλής λύση αλλά δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα, αφού όσο αυξάνεται η επιβαλλόμενη μετατόπιση ρήγματος αυξάνεται υπέρογκα και το κόστος της συγκεκριμένης λύσης.

Όσον αφορά την απόδοση των εύκαμπτων κόμβων σε σχέση με το κόστος στην περίπτωση όπου η διασταύρωση ρήγματος με τον αγωγό είναι στις 60° δεν αποτελεί την βέλτιστη λύση αφού η χρήση ελαφρόπετρας μειώνει επαρκώς τις παραμορφώσεις και κοστίζει λιγότερο. Φυσικά η χρήση εύκαμπτων κόμβων αποτελεί και σε αυτή την περίπτωση εναλλακτικό τρόπο σχεδιασμού σε περιοχές που δεν είναι εύκολο ή οικονομικά συμφέρον να μεταφερθεί η απαραίτητη ελαφρόπετρα.

# 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 2.5-3.0 διαμέτρους του αγωγού). Εξαιρεση 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, στον Τομέα Γεωτεχνικής του ΕΜΠ μελετήθηκε 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 οριζόντιας ολίσθησης. 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:

- Κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος μεγαλύτερη από δύο φορές τη διάμετρο του αγωγού ( $D_f > 2D$ )
- Γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα μεγαλύτερη ή ίση των  $60^\circ$ .

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 ( $>2.5-3.0 D$ ), ενώ όταν ο αγωγός διασταυρώνεται με το ρήγμα υπό μικρή γωνία, η χρήση κόμβων δεν ενδείκνυται, εφόσον οι παραμορφώσεις στον αγωγό οφείλονται κατά κύριο λόγο από τις αξονικές μετατοπίσεις και η χρήση στροφικών κόμβων δεν απομειώνει ουσιαστικά τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις.

Από την οικονομοτεχνική σύγκριση μεταξύ της προτεινόμενης μεθόδου σχεδιασμού με εύκαμπτους κόμβους με τις «συμβατικές» μεθόδους, διαπιστώθηκε ότι για να έχει τη μέγιστη αποτελεσματικότητα η χρήση εύκαμπτων κόμβων, ο αγωγός πρέπει να τέμνει κάθετα το ρήγμα. Επιπροσθέτως, 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 όταν τέμνει τον αγωγό υπό κλίση  $60^\circ$ , και έως 10D, για την περίπτωση κάθετης τομής. Κατά συνέπεια η μέθοδος αυτή έχει 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 ναι μεν ακριβότερη λύση για μεσαίες μετατοπίσεις από τη χρήση ελαφρόπετρας ή την αύξηση του πάχους του αγωγού, όμως η μεν αύξηση πάχους έχει όριο εφαρμογής περί τα 3.5D ενώ η χρήση ελαφρόπετρας περί τα 5.1D. Επιπροσθέτως η χρήση εύκαμπτων κόμβων είναι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων φθηνότερη της κατασκευής εξωτερικού περιβλήματος (culvert), ενώ κατασκευαστικά δεν χρειάζεται καμία πρόσθετη πρόβλεψη εφόσον οι κόμβοι απλά συγκολλούνται στις προβλεπόμενες θέσεις, όπως τα υπόλοιπα τμήματα του αγωγού.

Συνοψίζοντας, καταλήγουμε ότι για την περίπτωση κάθετης διασταύρωσης με το ρήγμα, η αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού ενδείκνυται για επιβαλλόμενες μετατοπίσεις  $d_f \leq 3.5D$ , όπου  $D$  είναι η διάμετρος του αγωγού. Η χρήση εύκαμπτων κόμβων αποτελεί την πιο αποτελεσματική και συμφέρουσα λύση για μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις  $3.5D < d_f \leq 10D$  ενώ, για ακόμη μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις  $d_f > 10D$  συστήνεται η προστασία του αγωγού από υπόγεια κιβώτια (culvert) οπλισμένου σκυροδέματος.

Για την περίπτωση διασταύρωσης υπό γωνία, η αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού ενδείκνυται για επιβαλλόμενες μετατοπίσεις  $d_f \leq 3.0D$ , όπου  $D$  είναι η διάμετρος του αγωγού, ενώ για μεγαλύτερες μετατοπίσεις η χρήση ελαφρόπετρας αποτελεί τη βέλτιστη λύση, αφού μειώνει επαρκώς τις παραμορφώσεις και κοστίζει λιγότερο.



# 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.



# **Παράρτημα Α΄**

---

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



## A1. Εισαγωγή

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

Πιο συγκεκριμένα, 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.

## A2. 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

$\sigma_1$ : 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:

$\varepsilon_a$ : 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  $\varepsilon_a$  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  $\varepsilon_a$  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  $\varepsilon_a$  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  $\varepsilon_a$  και  $k$  προκύπτουν οι ζητούμενες κατανομές των τάσεων και παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής.

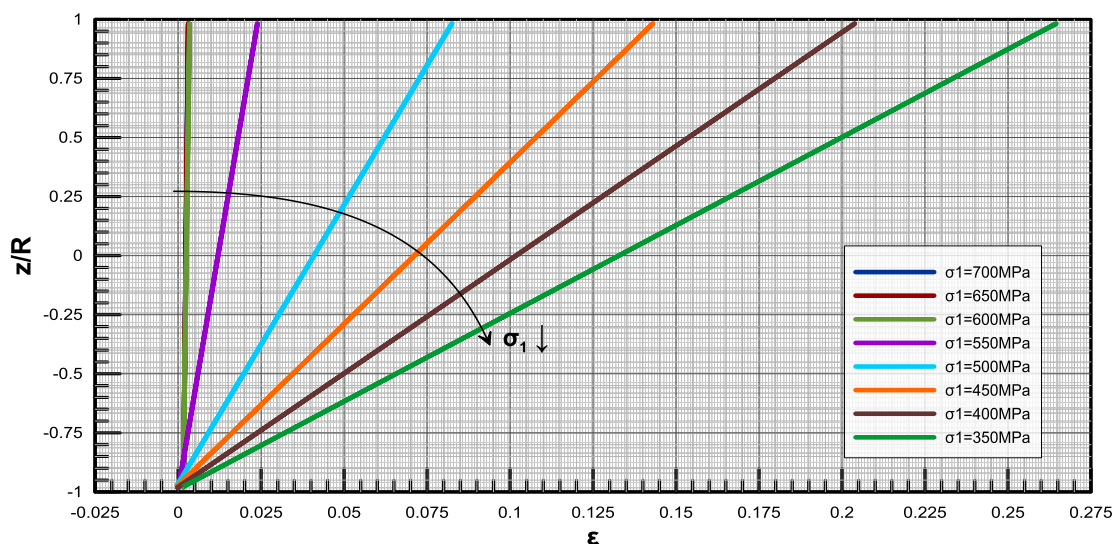
Όσον αφορά την αριθμητική μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε, αρχικά επιλέχτηκε να εφαρμοστεί η μέθοδος της τέμνουσας, η οποία αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου Newton-Raphson και μας απαλλάσσει από το δύσκολο υπολογισμό της παραγώγου. Ωστόσο επειδή παρατηρήθηκε ότι στο συγκεκριμένο πρόβλημα η μέθοδος αυτή δε συγκλίνει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

### **A3. Παραμετρική διερεύνηση επιρροής της τάσης διαρροής**

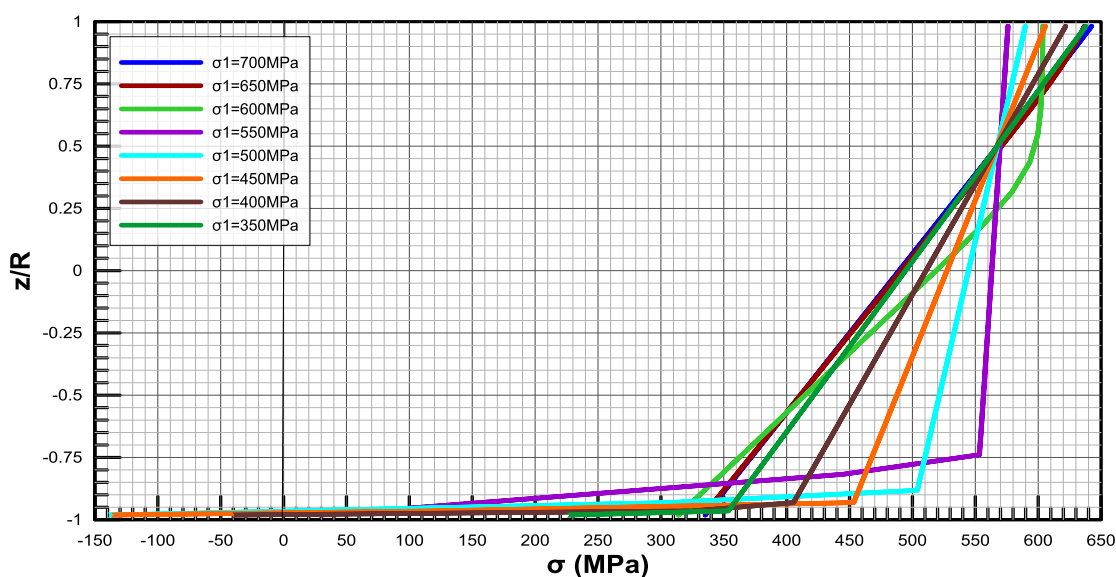
Πραγματοποιήθηκαν δύο ομάδες αναλύσεων με διαφορετικό συνδυασμό εξωτερικά επιβαλλόμενων μεγεθών  $N$  και  $M$ . Πιο συγκεκριμένα στην πρώτη ομάδα αναλύσεων επιβάλλεται στη διατομή ροπή  $M=850\text{kNm}$  και μεγάλη αξονική δύναμη  $N=14400\text{kN}$ , ενώ στη δεύτερη ομάδα ροπή  $M=2100\text{kNm}$  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.

### A3.1 1<sup>η</sup> 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  $\sigma_1$ . Τα διάφορα χρώματα σε όλα τα διαγράμματα αντιπροσωπεύουν τις διάφορες τάσεις διαρροής.

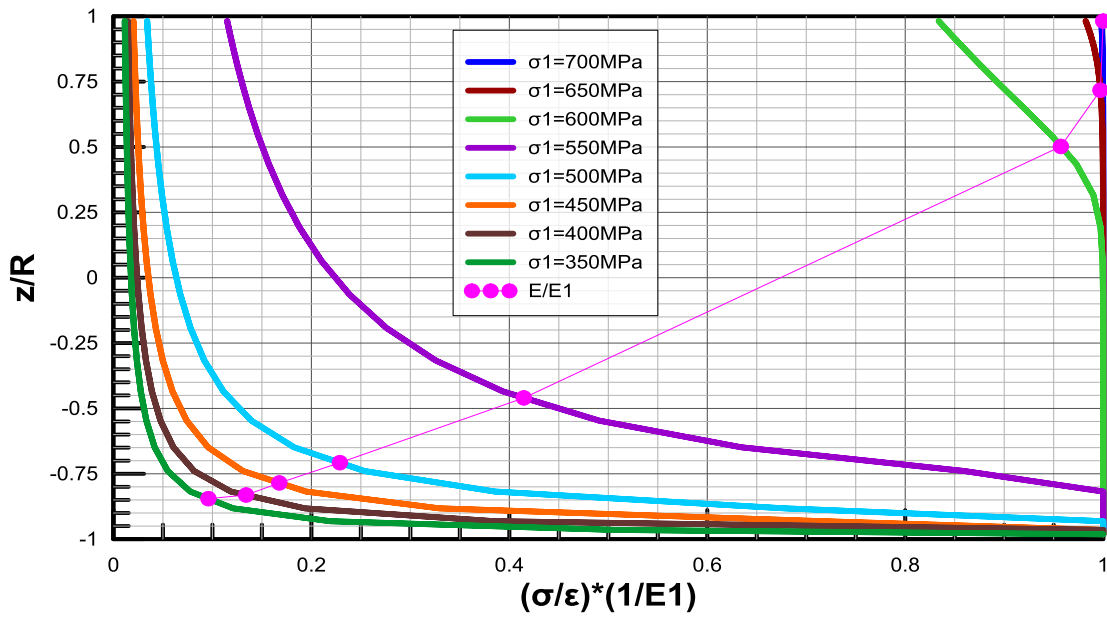


**Σχήμα 1:** Κατανομή παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής ( $N=14000\text{kN}$  &  $M=850\text{kNm}$ ).



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

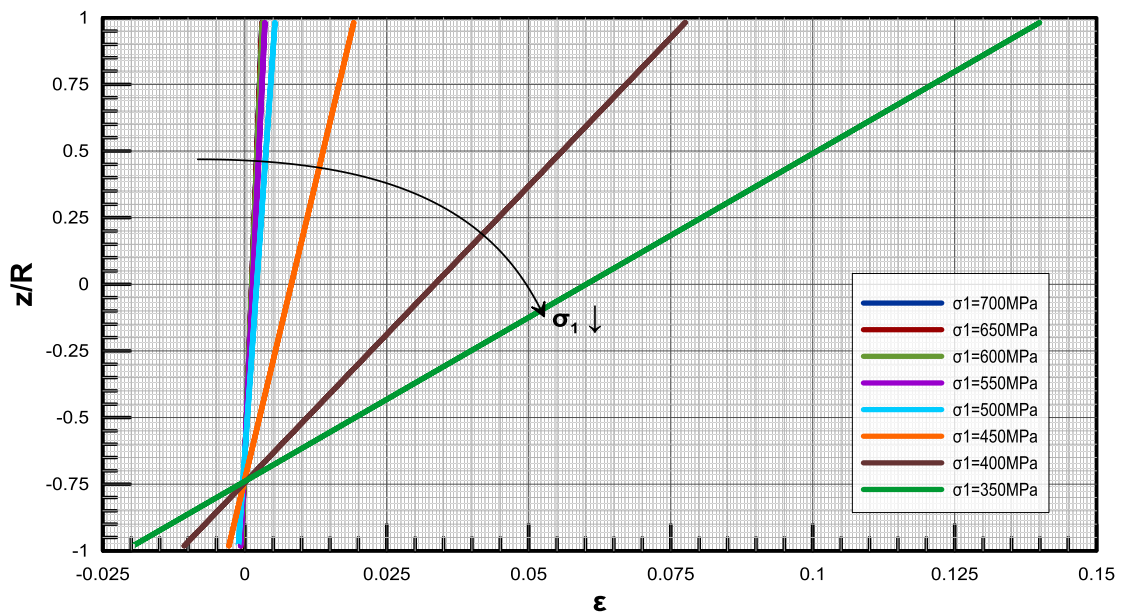




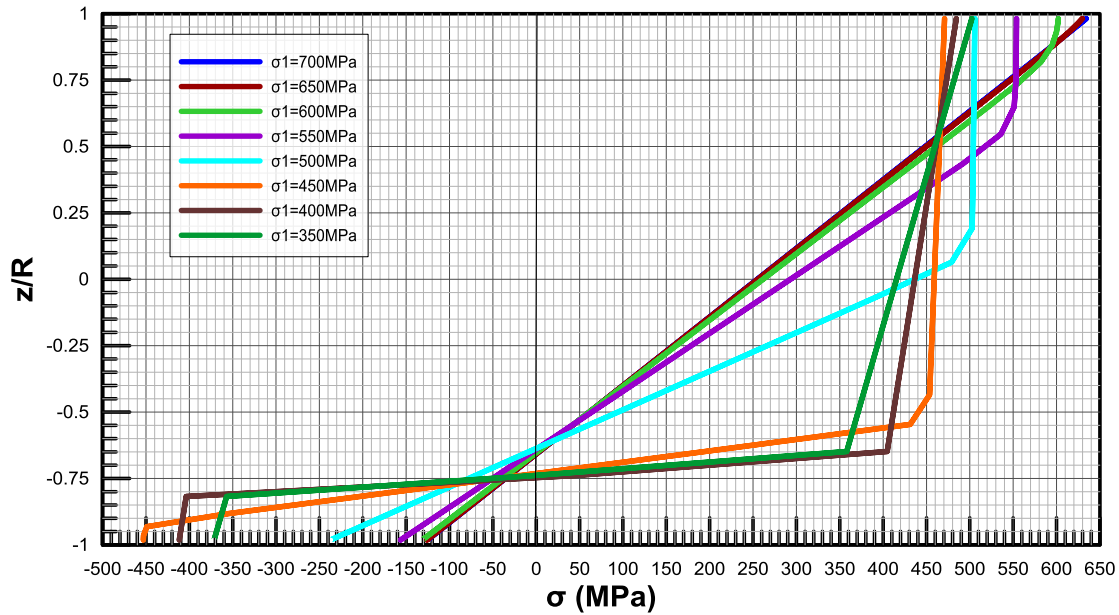
Σχήμα 3: Διάγραμμα  $E/E_1$  καθ' ύψος της διατομής ( $N=14000kN$  &  $M=850kNm$ ).

### A3.2 2η Ομάδα αναλύσεων (Μικρή αξονική δύναμη & Μεγάλη Ροπή)

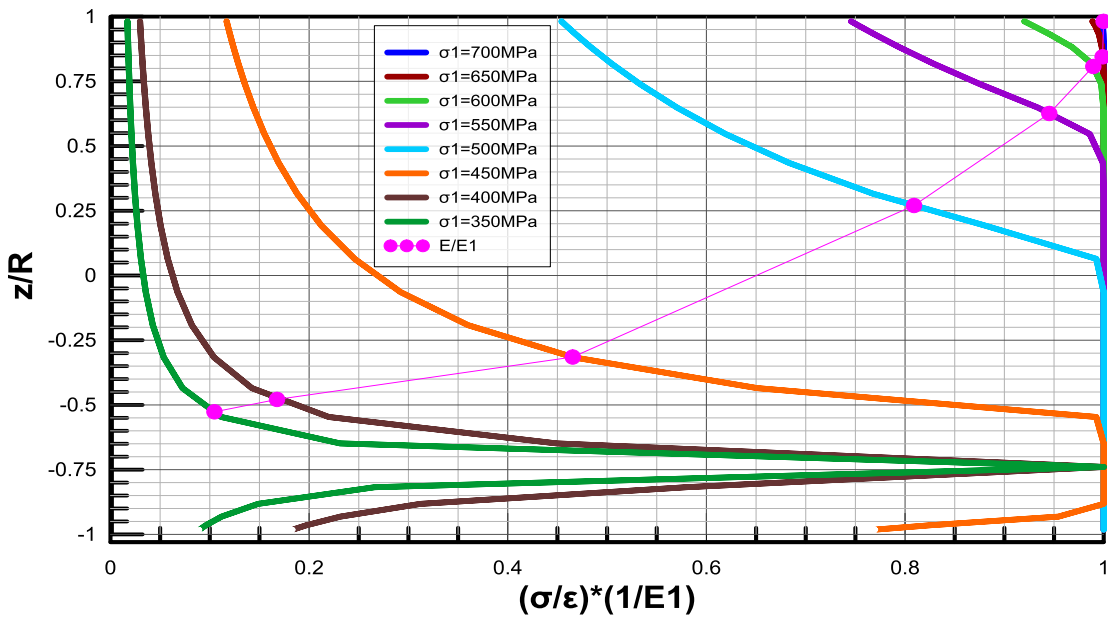
Στη δεύτερη ομάδα αναλύσεων επιβλήθηκε στη διατομή αρκετά μικρότερη αξονική δύναμη  $N=7500kN$  και ροπή  $M=2100kNm$  περί το διαμήκη άξονα του αγωγού. Στα Σχήματα 4 έως 6 απεικονίζονται αντίστοιχα διαγράμματα για την περίπτωση των παραμορφώσεων, της τάσης και του μέτρου ελαστικότητας.



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  $E/E_1$  καθ' ύψος της διατομής (N=7500kN & M=2100kNm).

### A3.3 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  $\sigma_1$  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  $\sigma_1$  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  $600\text{MPa}$  σε  $550\text{MPa}$ , 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  $450\text{MPa}$  σε  $400\text{MPa}$ . Επίσης στη δεύτερη ομάδα αναλύσεων παρατηρείται ότι για τις τιμές ορίου διαρροής  $450, 400$  και  $350\text{MPa}$  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  $\sigma_1$  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 την μεγάλη αξονική δύναμη, είναι η απότομη αλλαγή στην συμπεριφορά της διατομής για μείωση του ορίου διαρροής από  $600\text{MPa}$  σε  $550\text{MPa}$ , όπου πλέον σχεδόν όλη η διατομή έχει ξεπεράσει το όριο διαρροής.

#### **A4. 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.

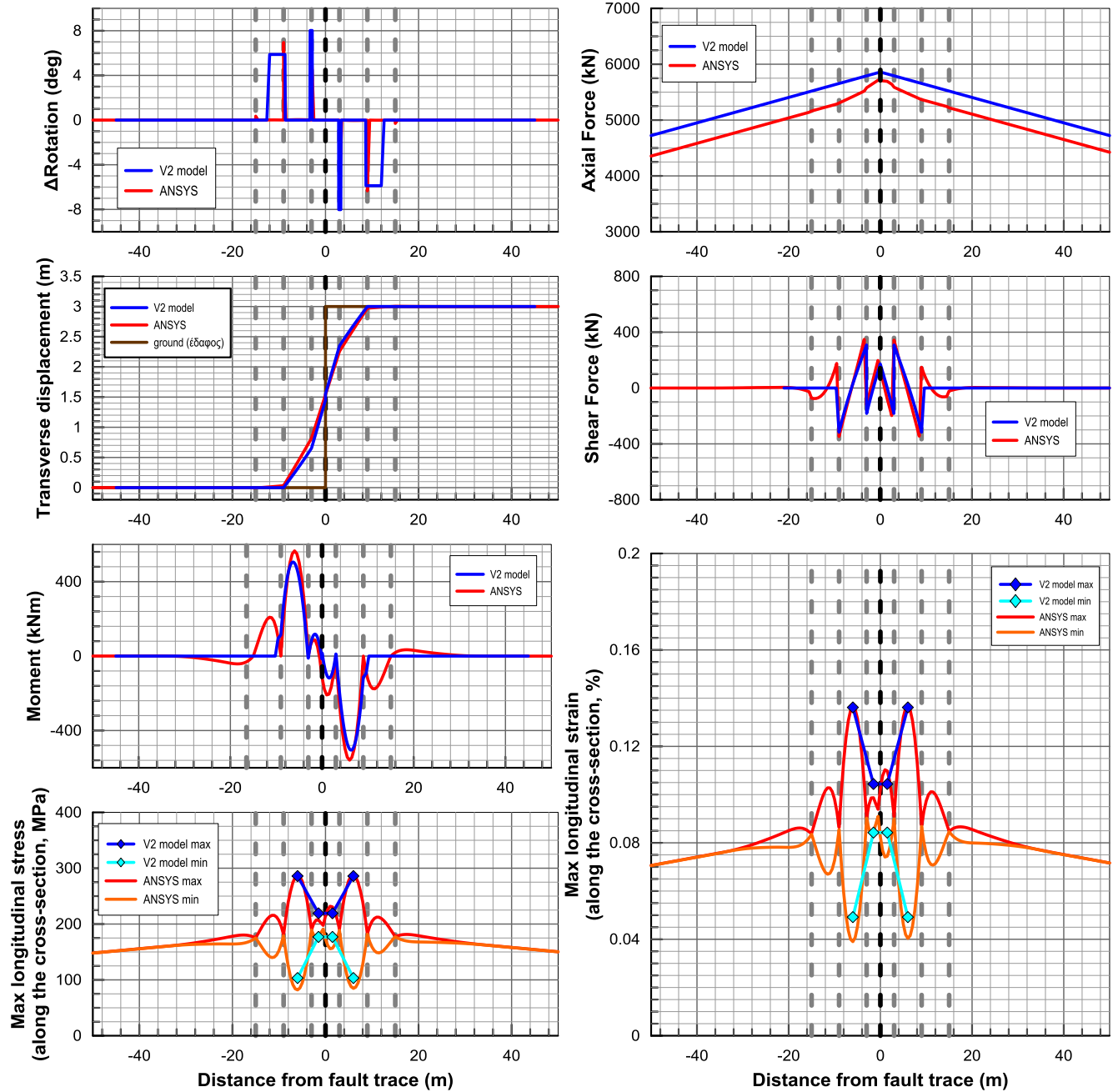
# **Παράρτημα Β΄**

---

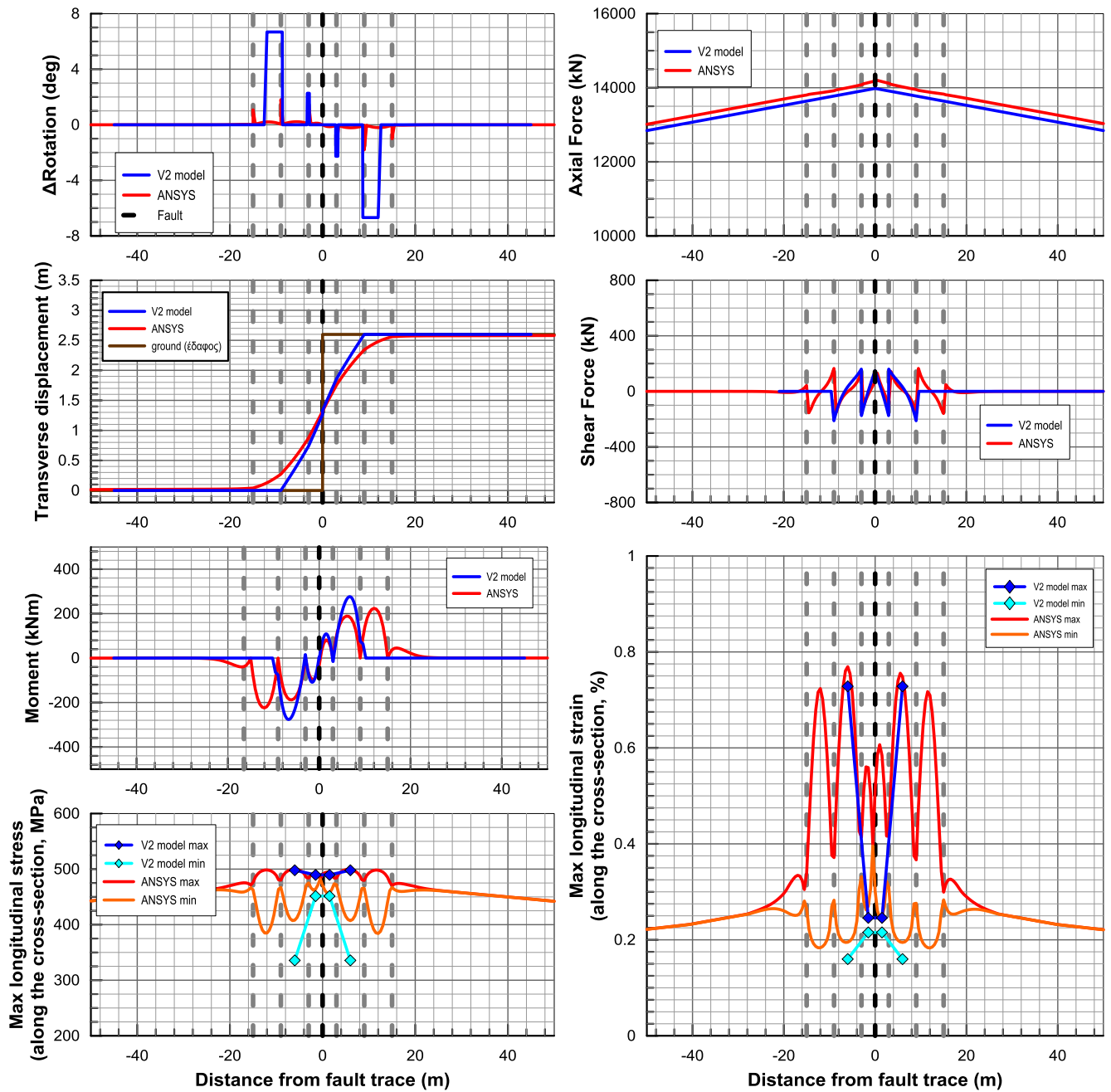
**Λεπτομερή Αποτελέσματα Παραμετρικών Αναλύσεων**



## B1) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=3m$ $\beta=90^\circ$

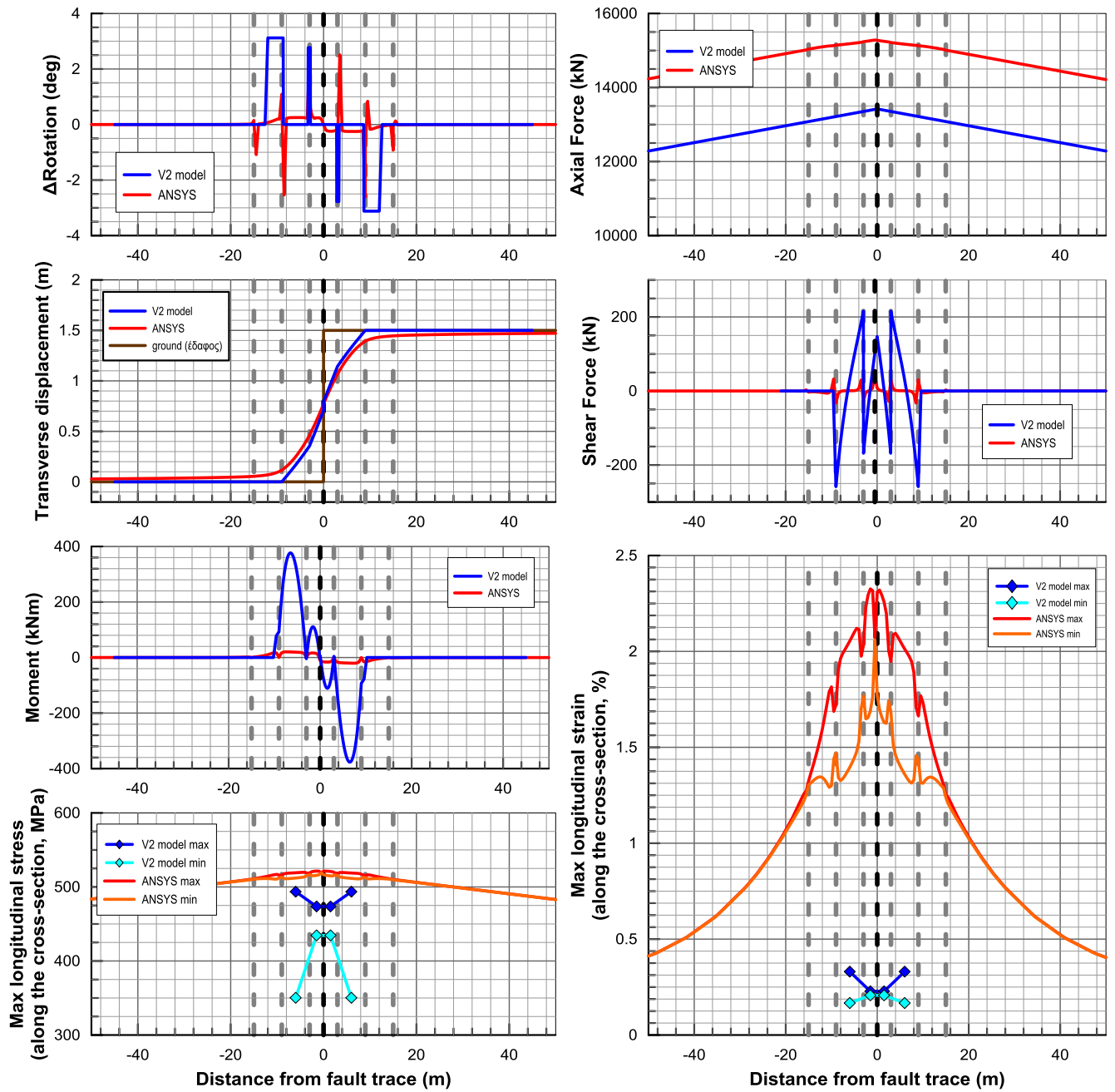


## B2) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – $Df=3m$ $\beta=60^\circ$

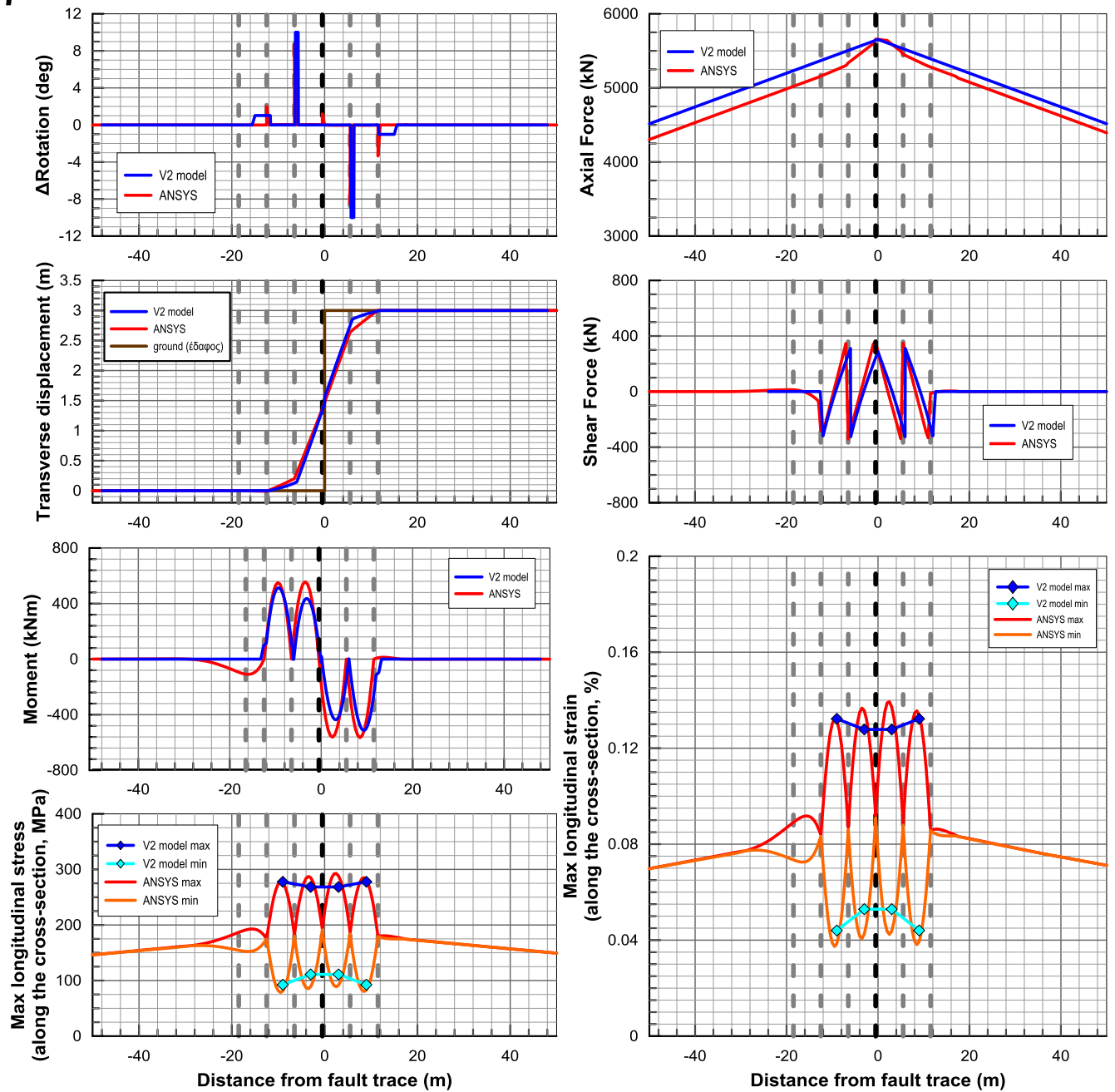




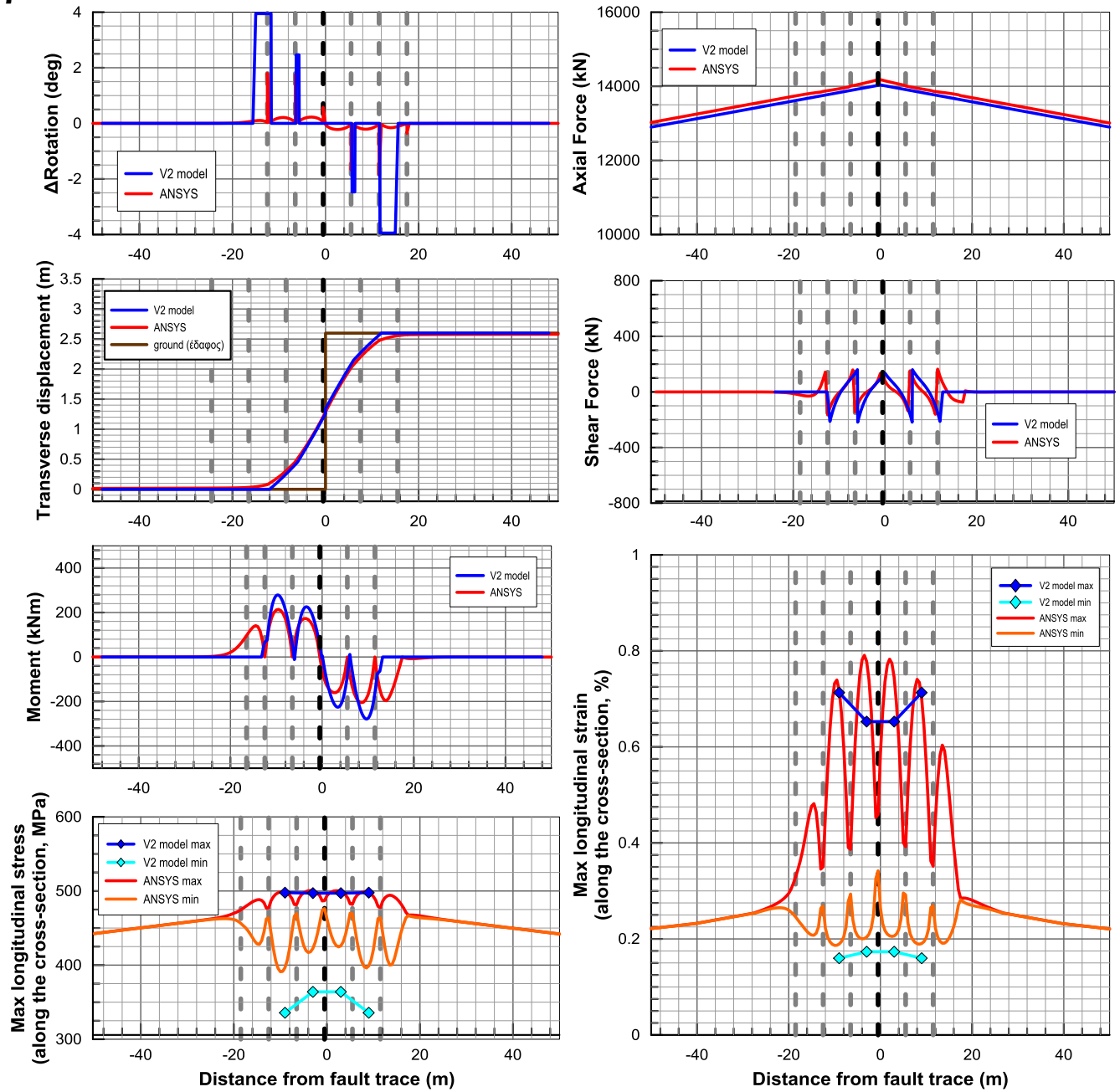
### B3) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – $Df=3m$ $\beta=30^\circ$



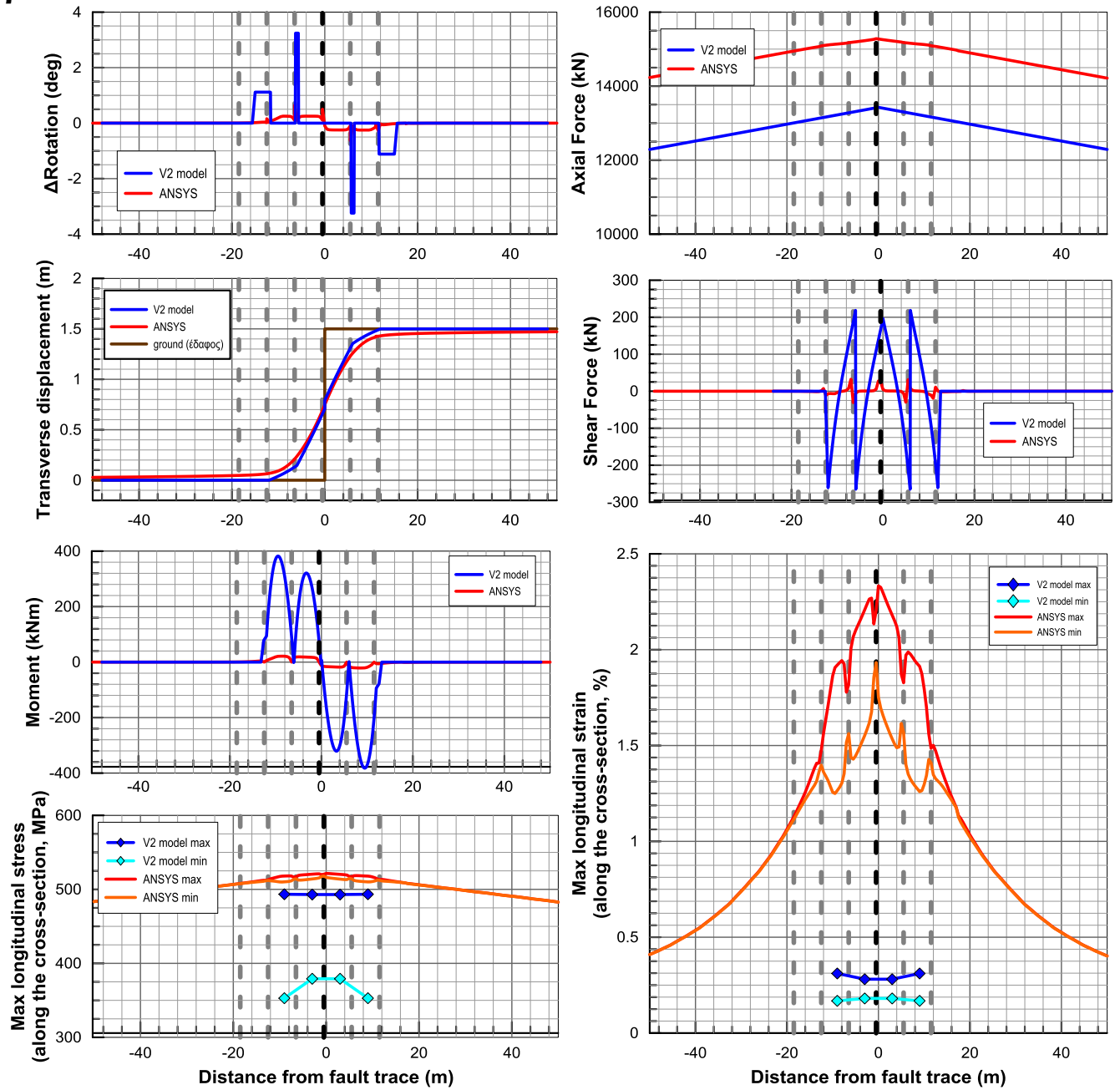
## B4) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=3m$ $\beta=90^\circ$



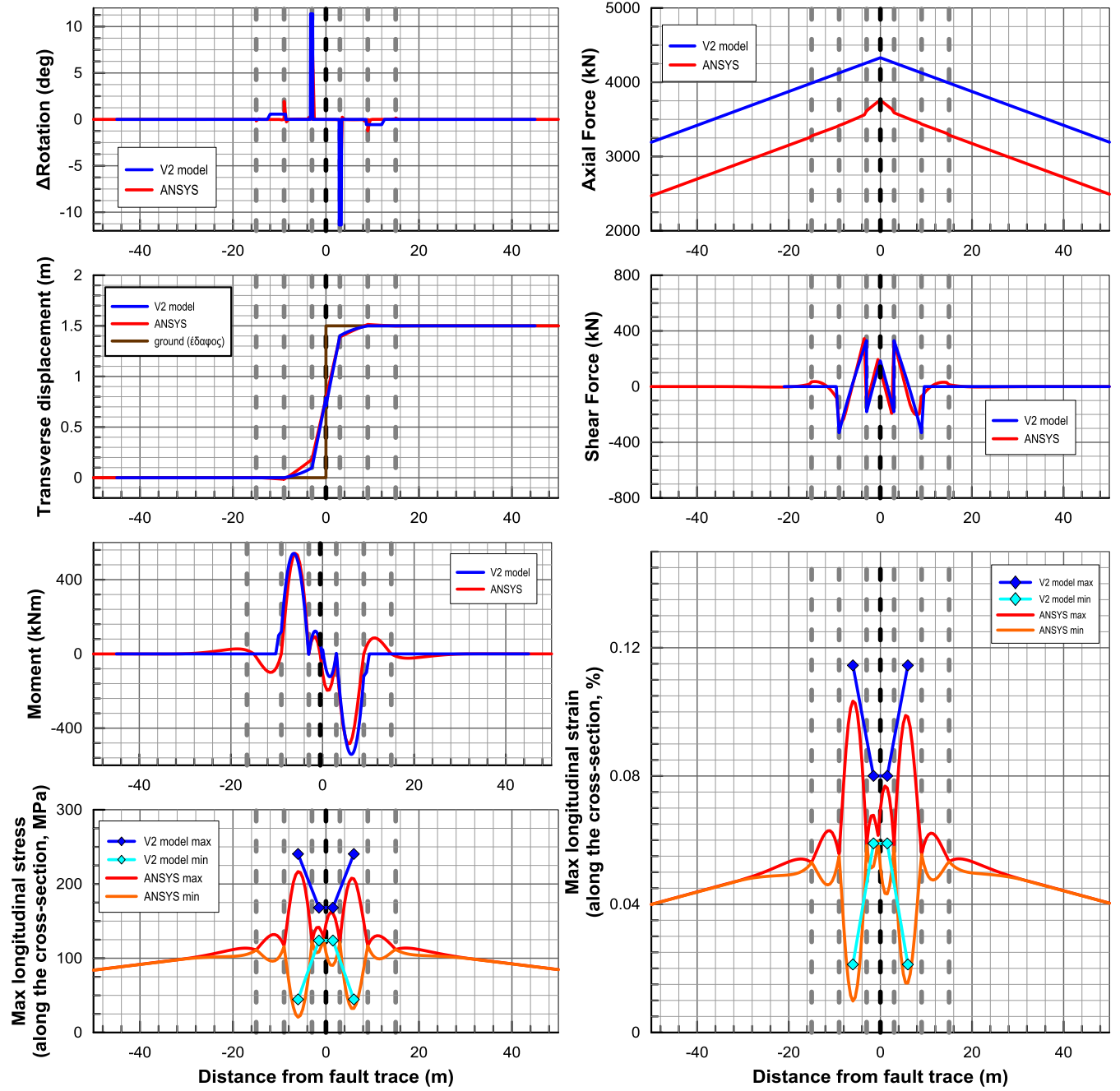
## B5) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=3m$ $\beta=60^\circ$



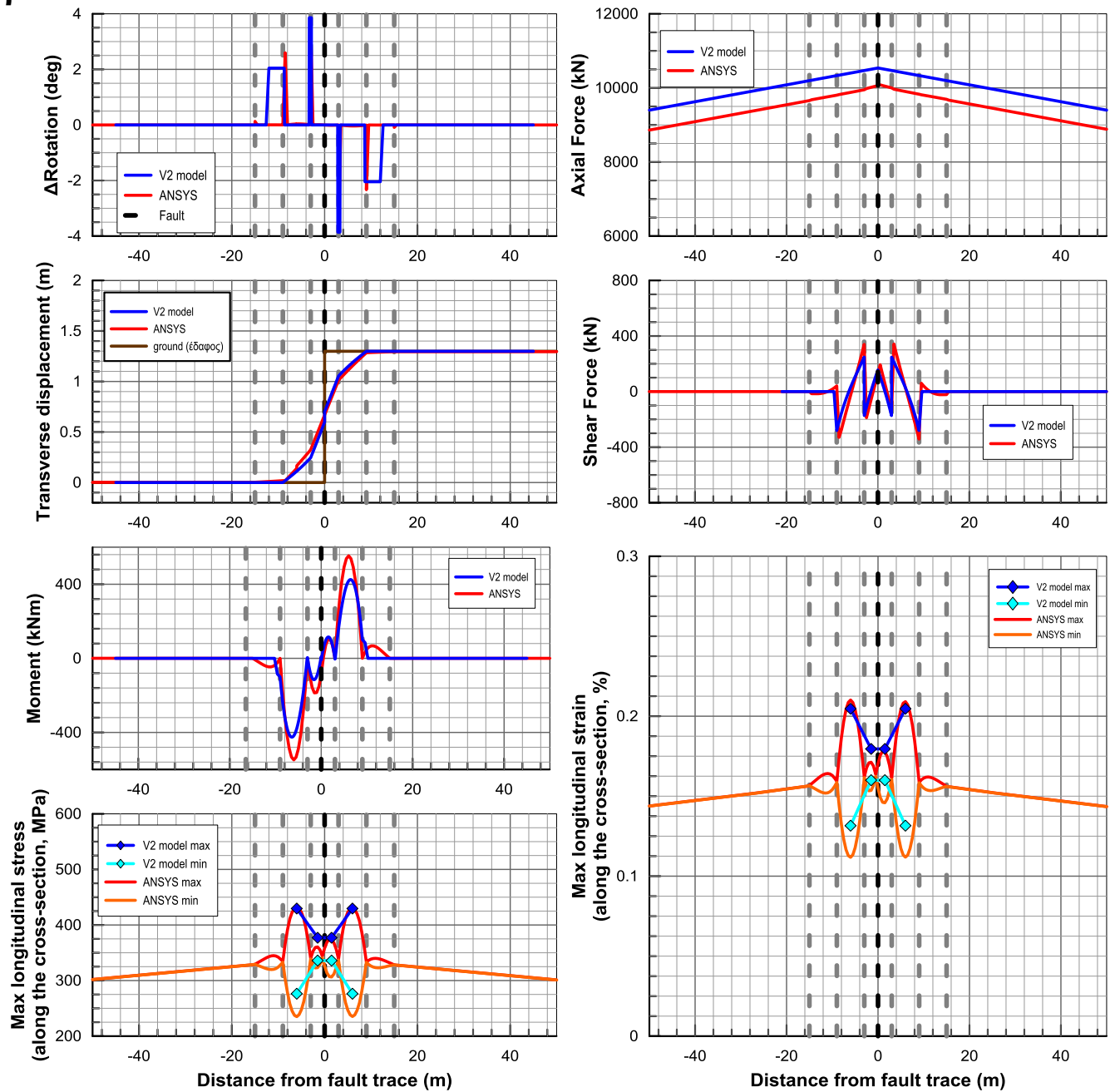
## B6) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=3m$ $\beta=30^\circ$



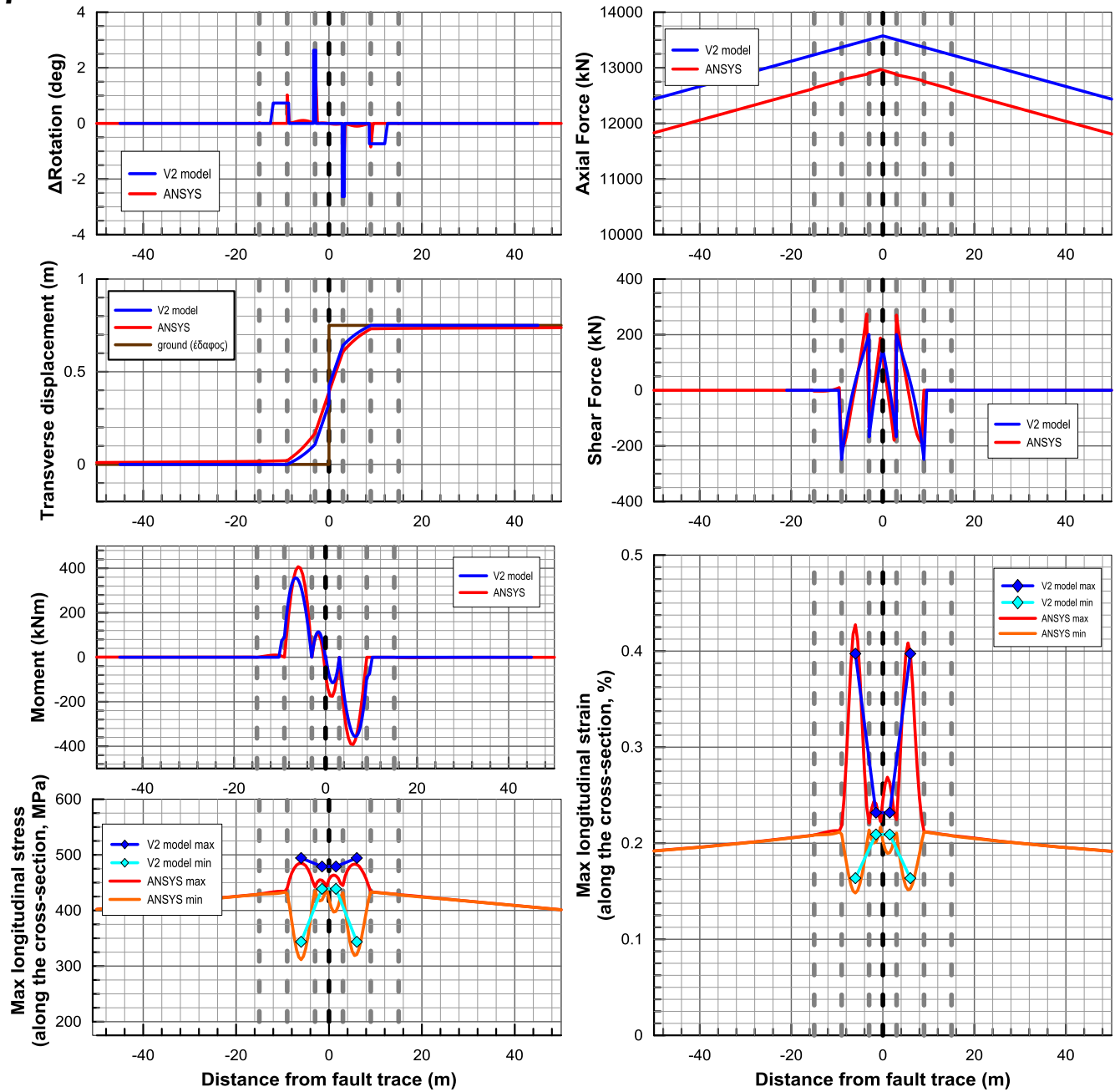
## B7) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=1.5m$ $\beta=90^\circ$



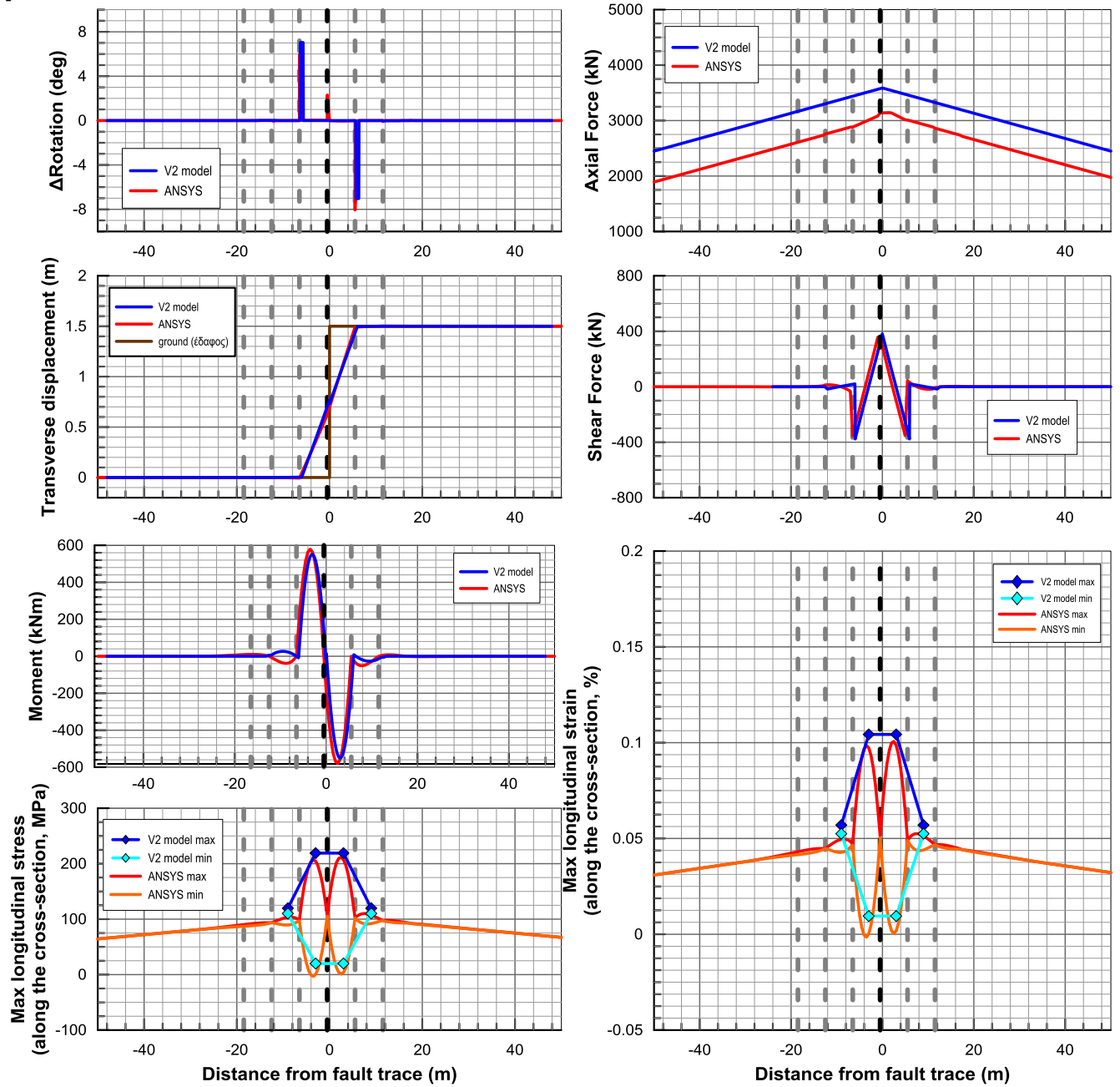
## B8) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=1.5m$ $\beta=60^\circ$



## B9) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=1.5m$ $\beta=30^\circ$

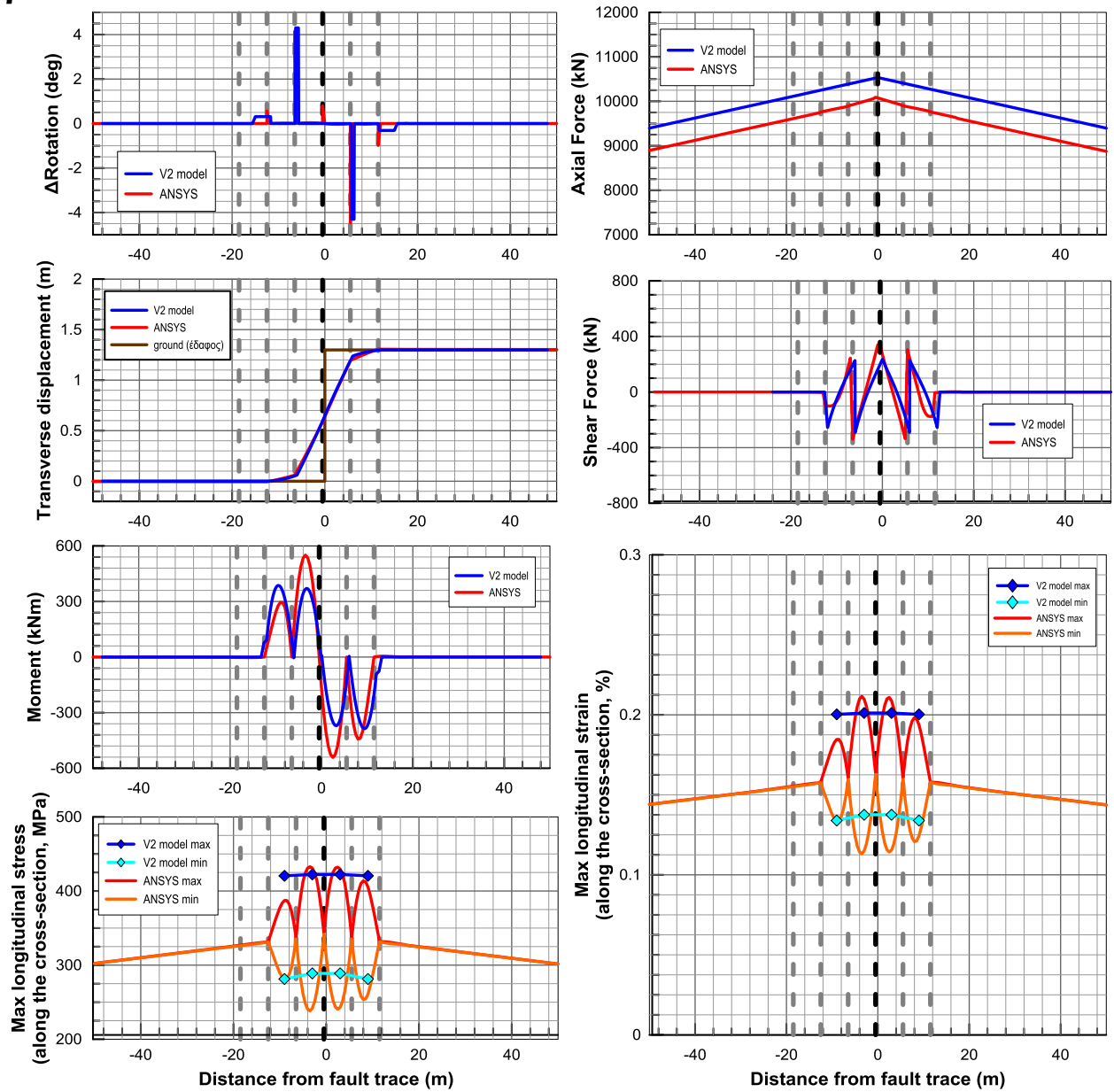


# B10) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=1,5m$ $\beta=90^\circ$

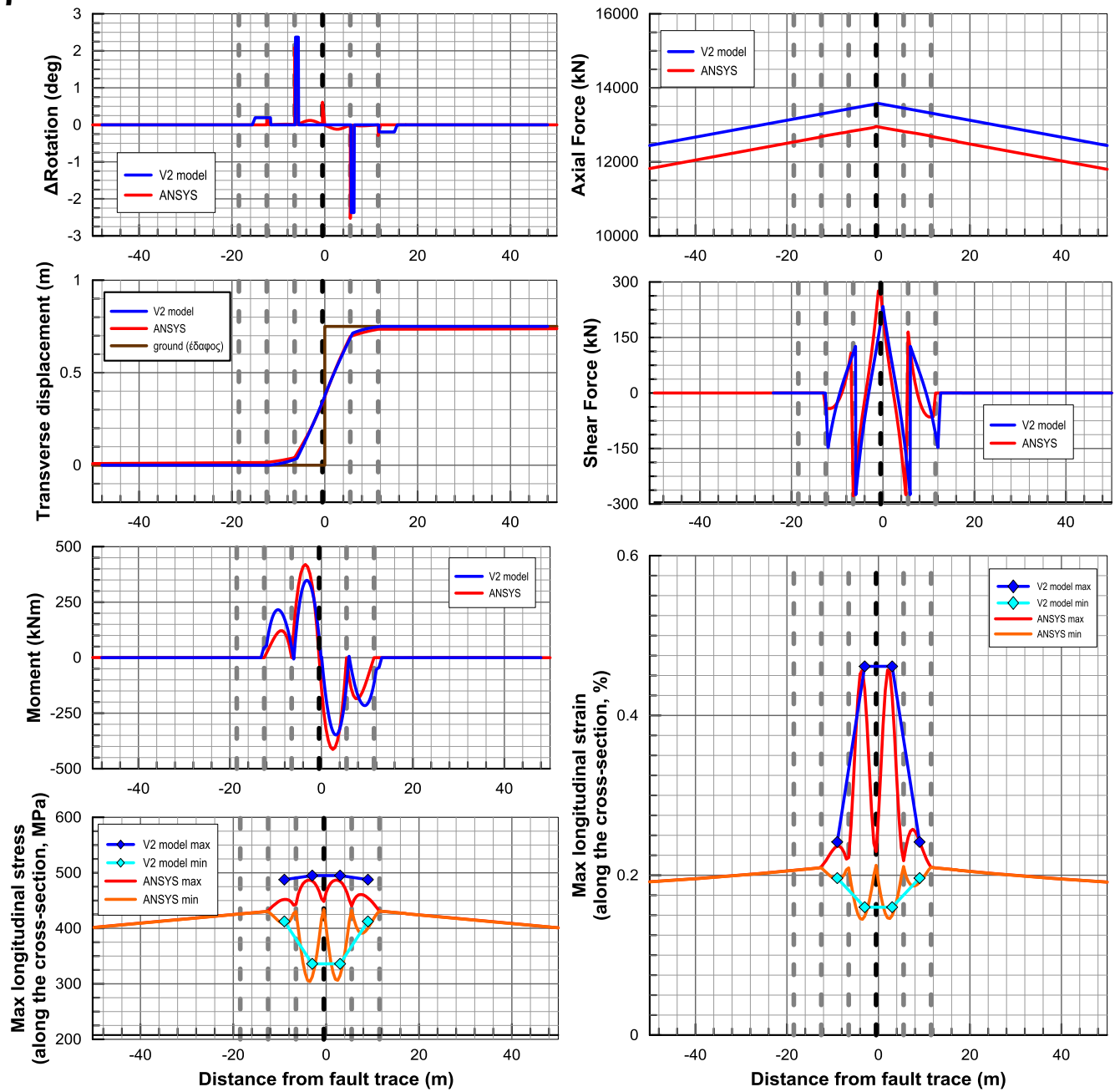




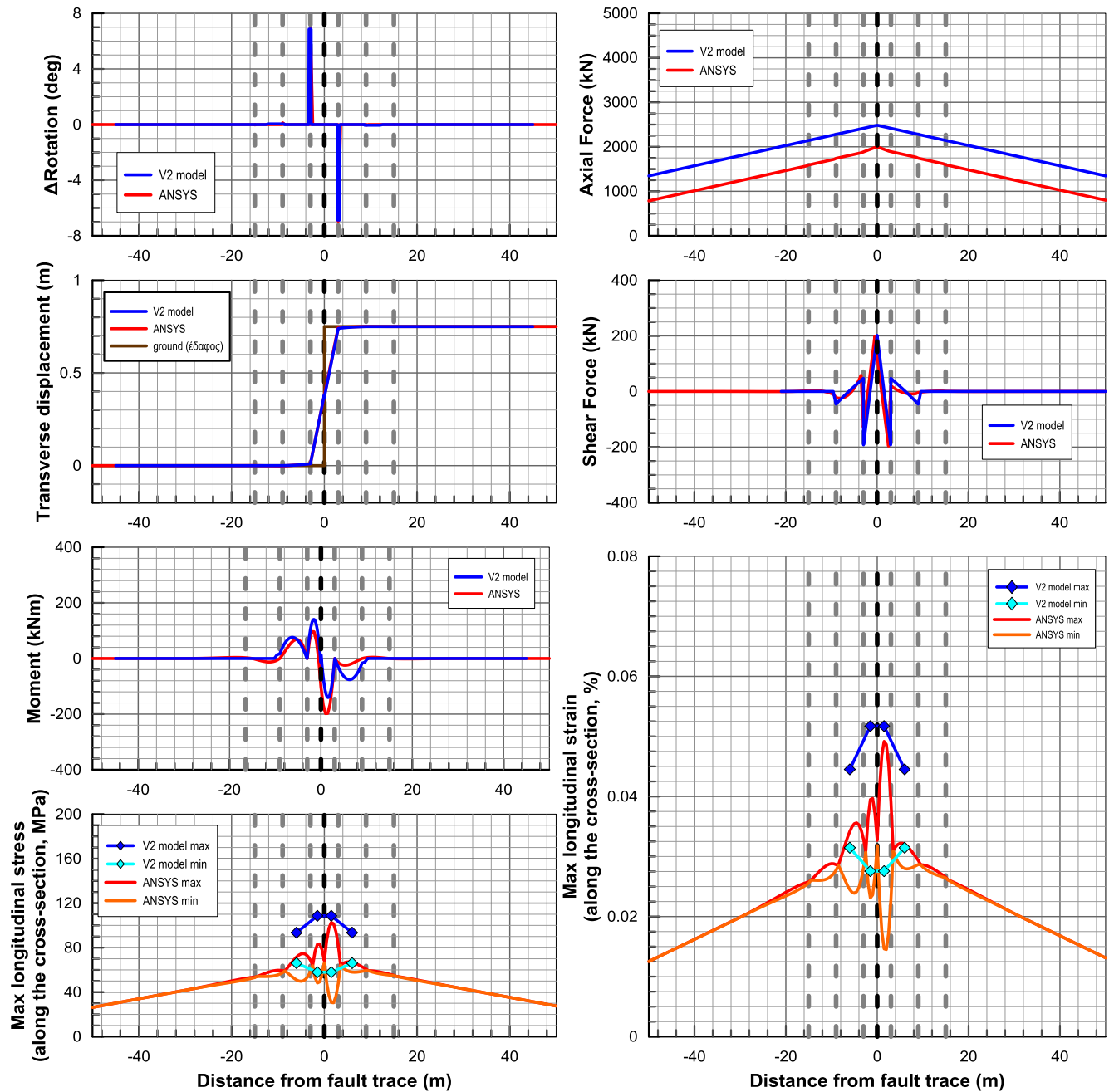
# B11) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=1,5m$ $\beta=60^\circ$



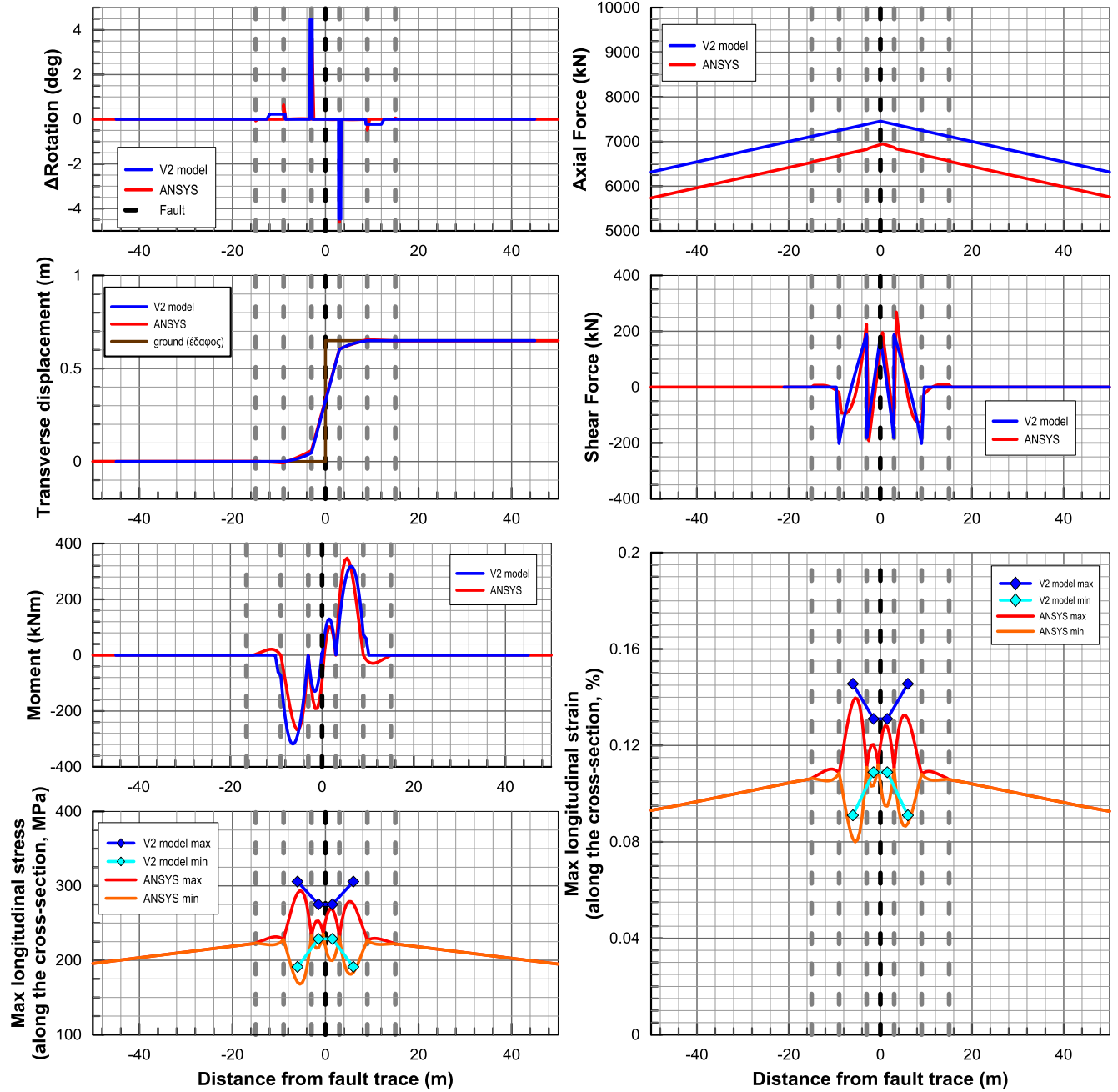
## B12) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=1,5m$ $\beta=30^\circ$



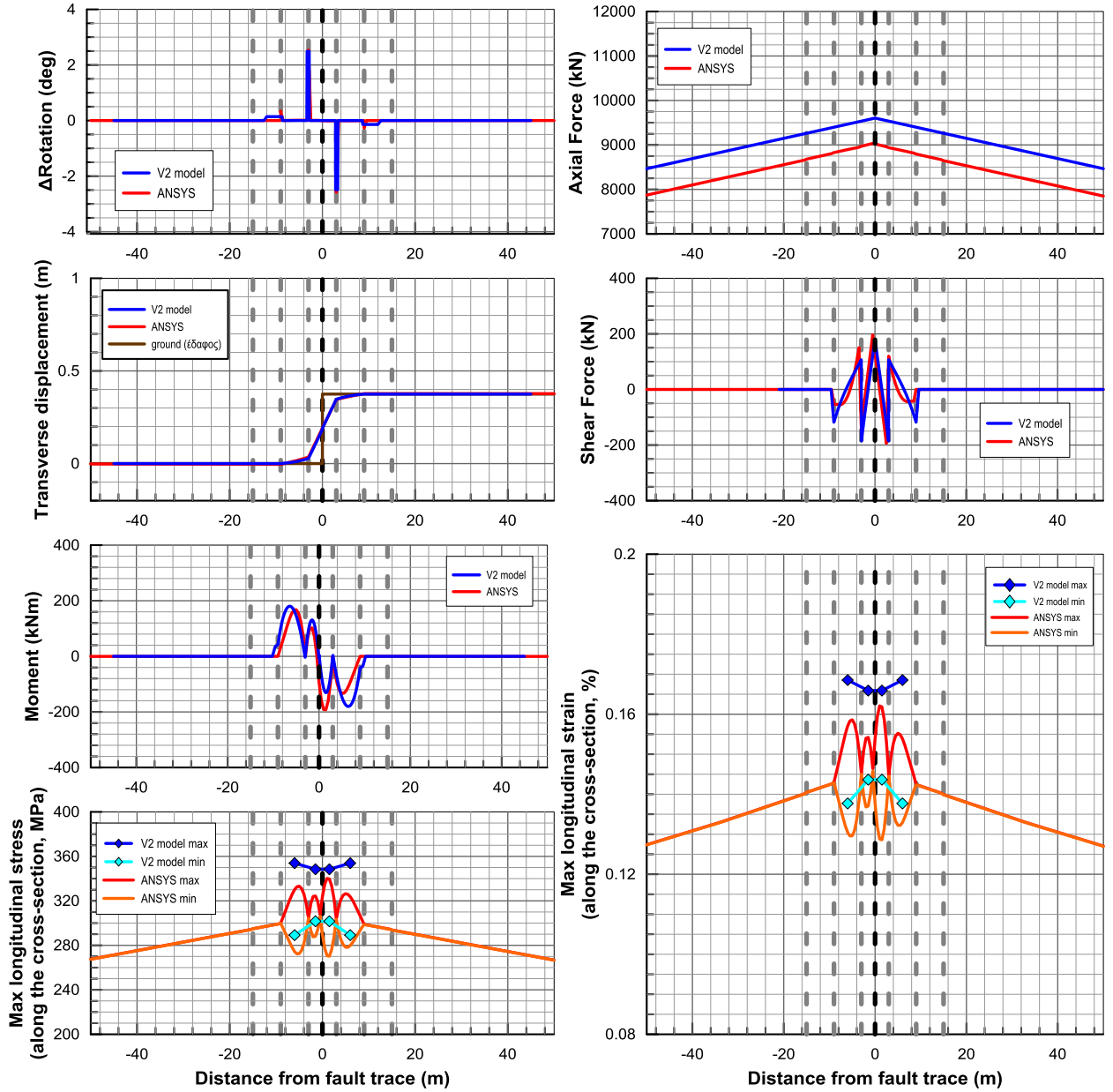
# B13) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=0.75m$ $\beta=90^\circ$



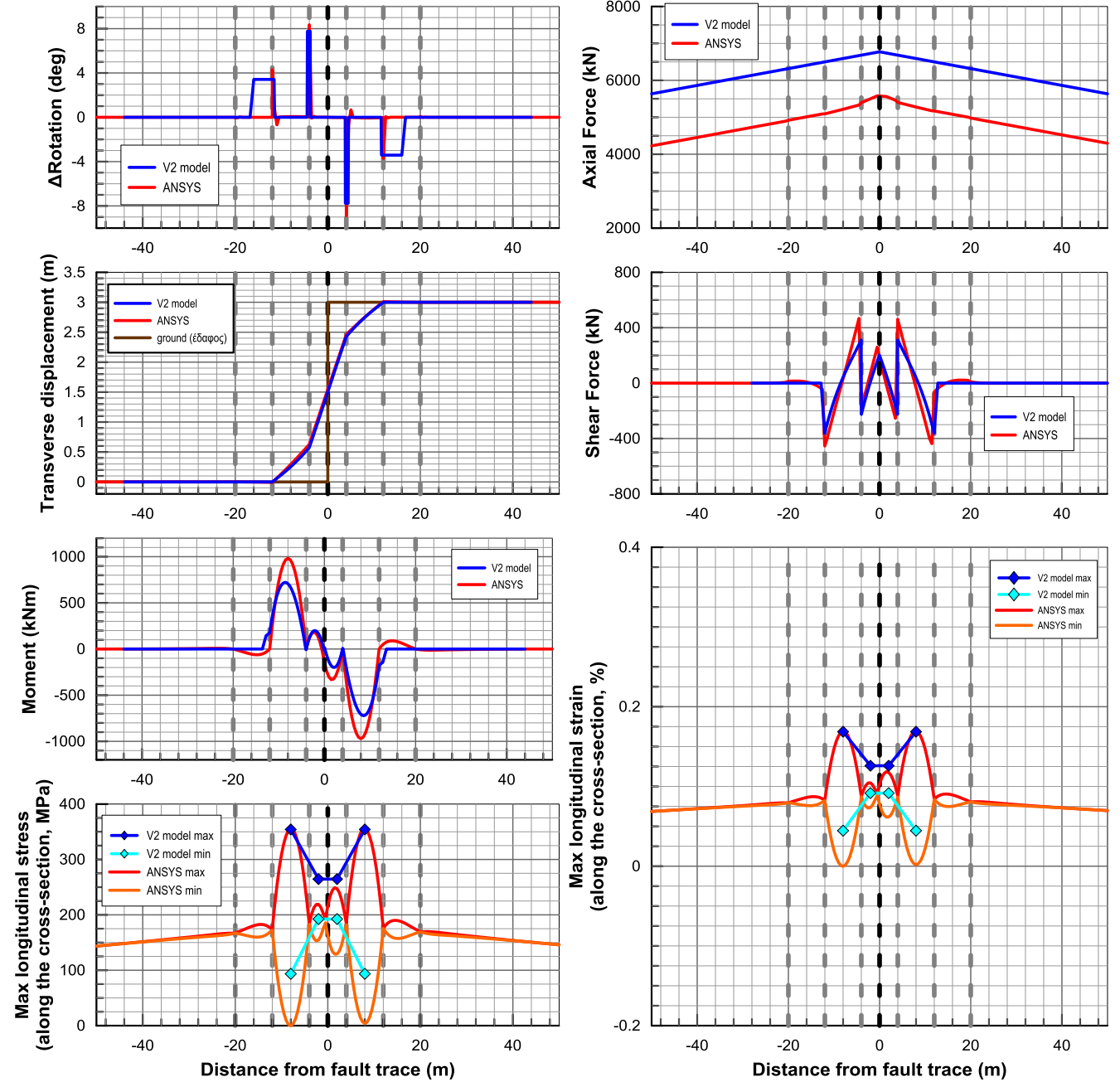
# B14) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=0.75m$ $\beta=60^\circ$



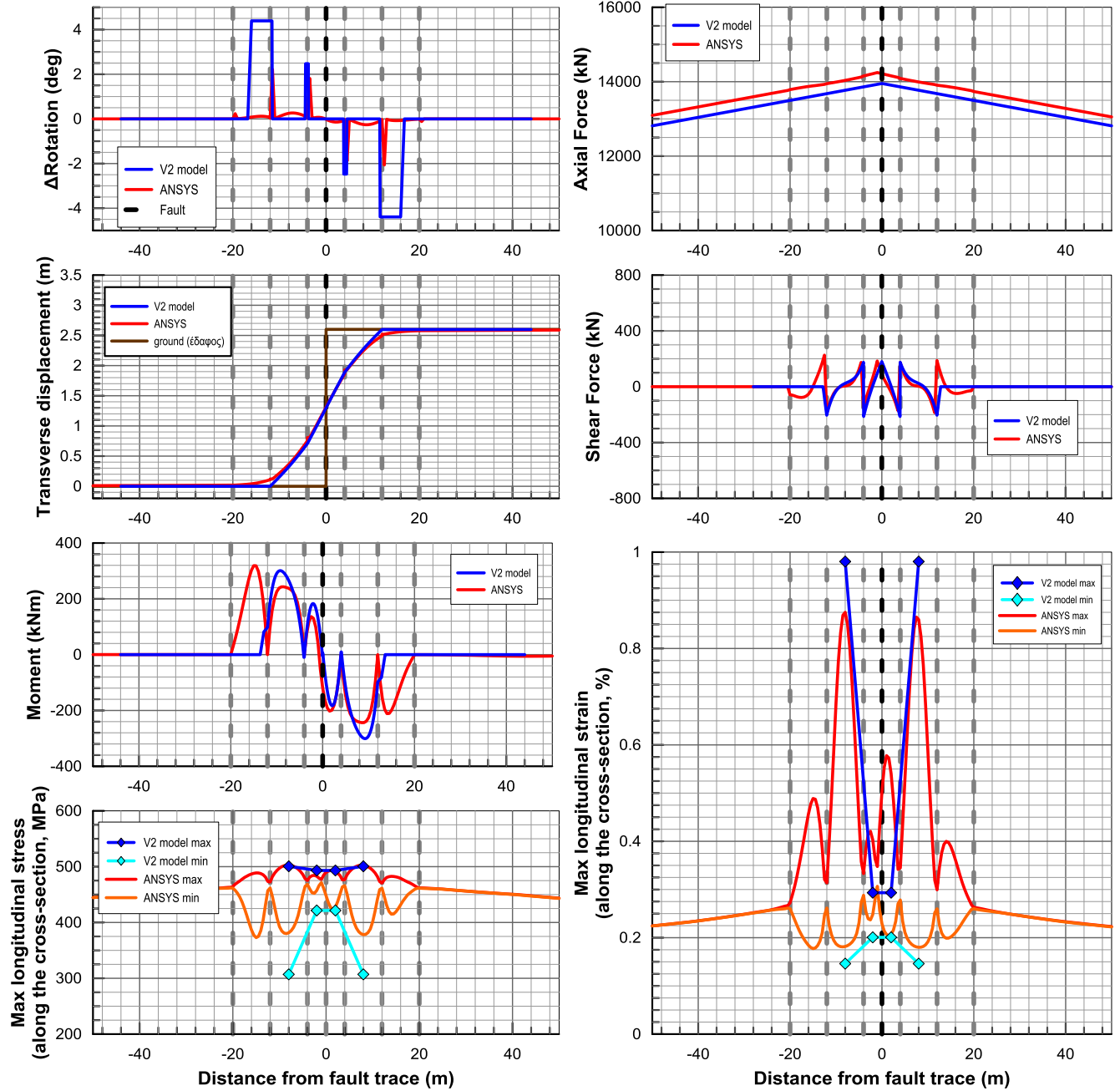
# B15) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=0.75m$ $\beta=30^\circ$



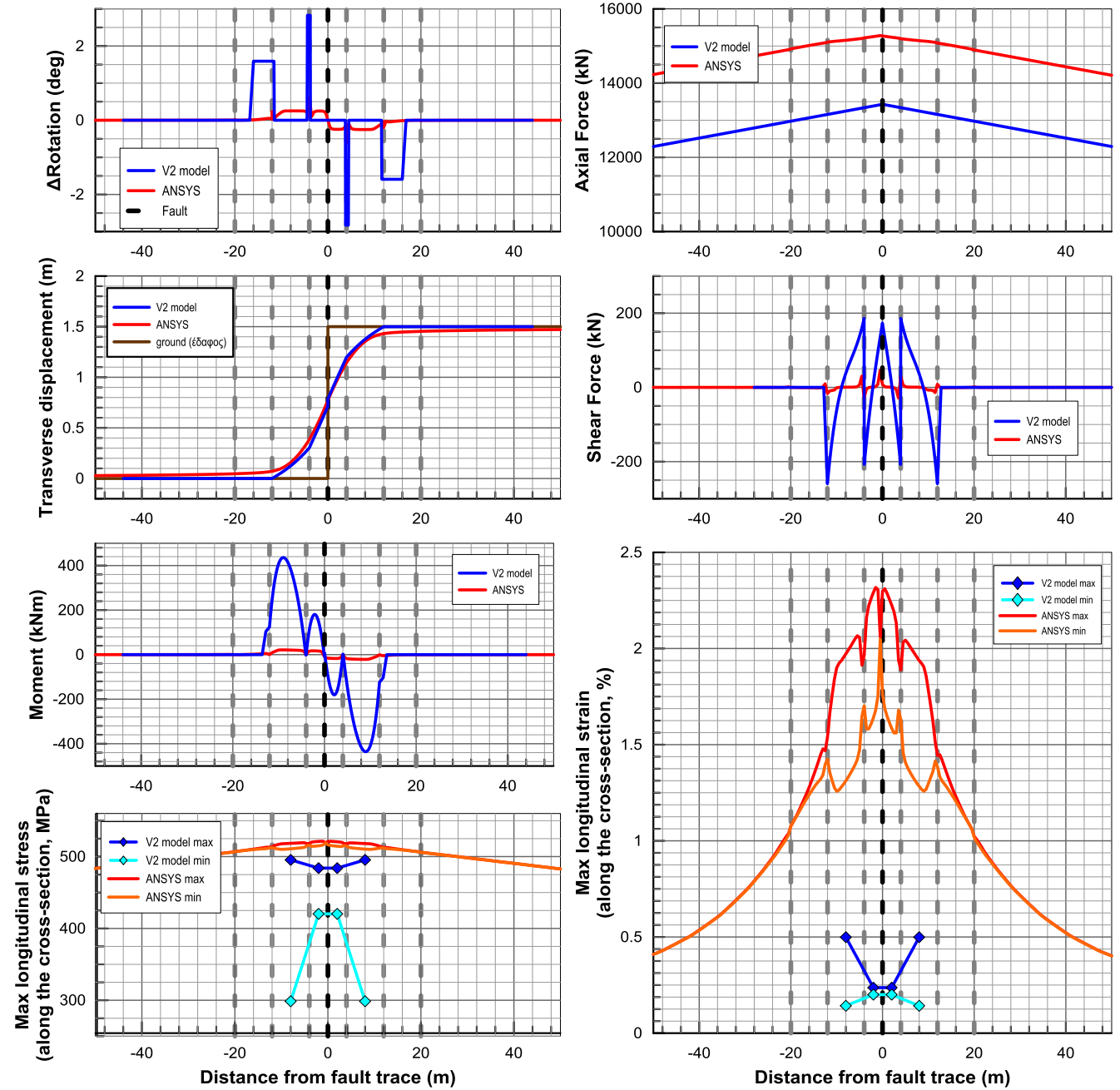
# B16) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=3m$ $\beta=90^\circ$



# B17) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=3m$ $\beta=60^\circ$

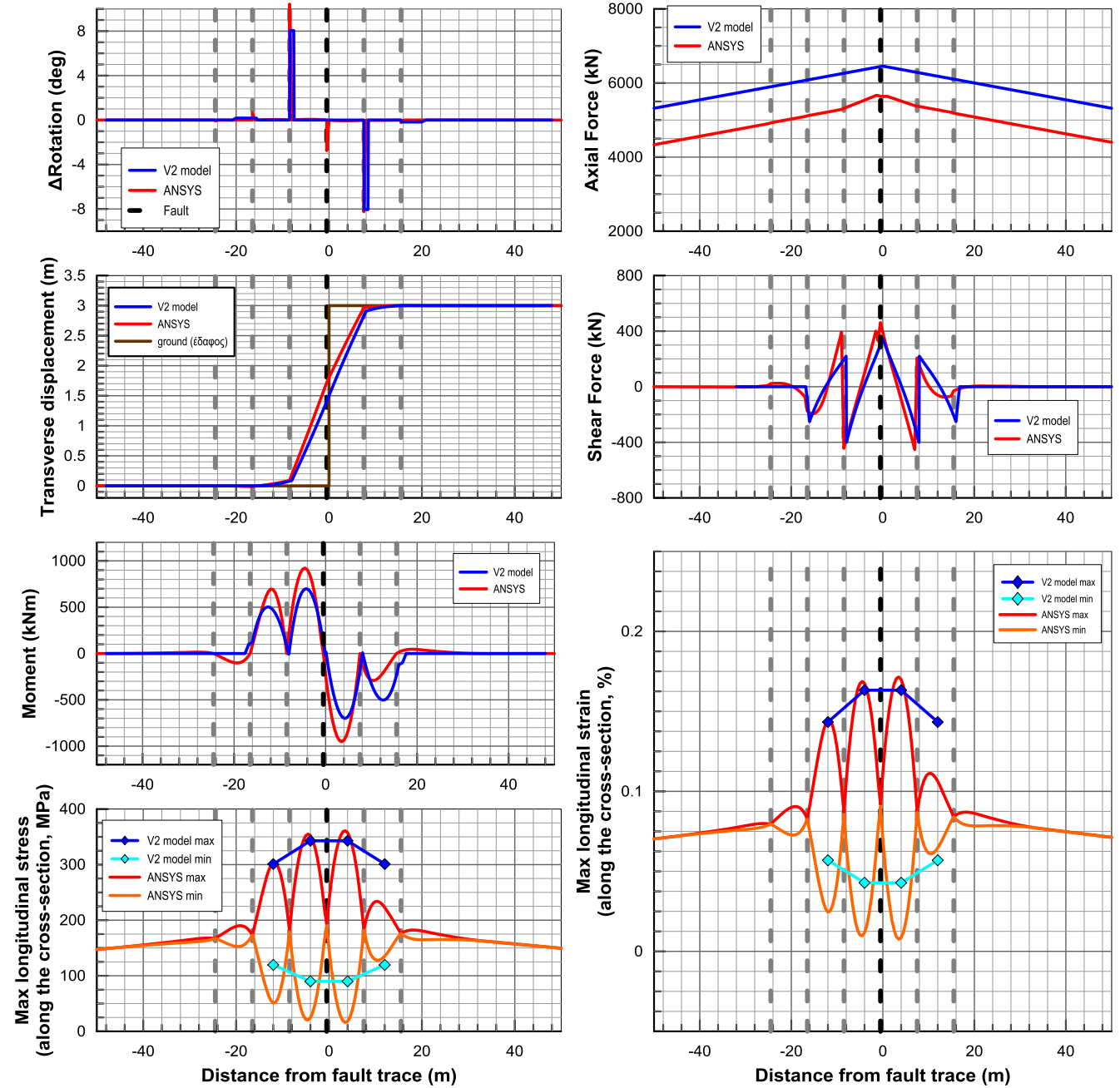


# B18) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=3m$ $\beta=30^\circ$

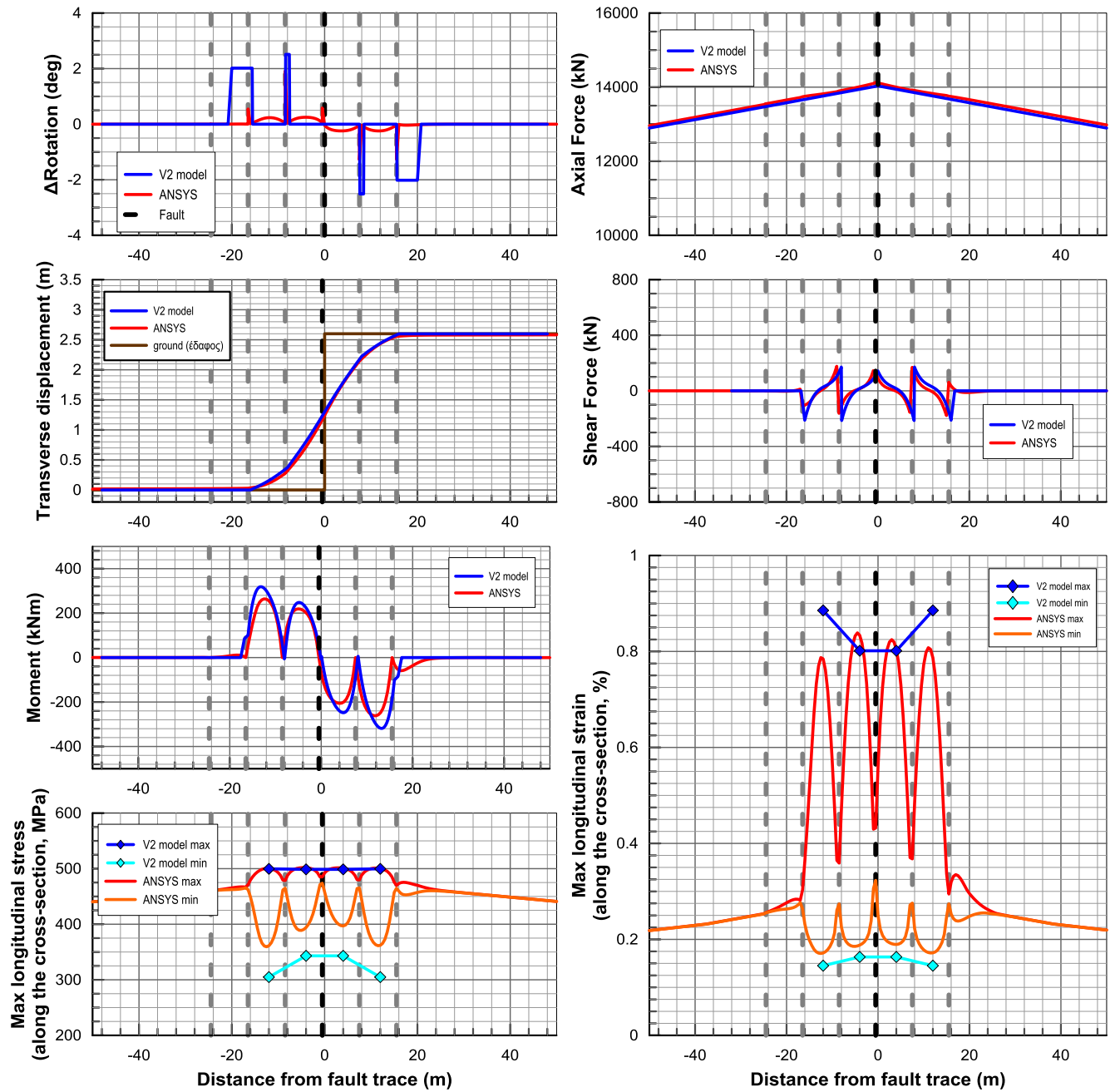




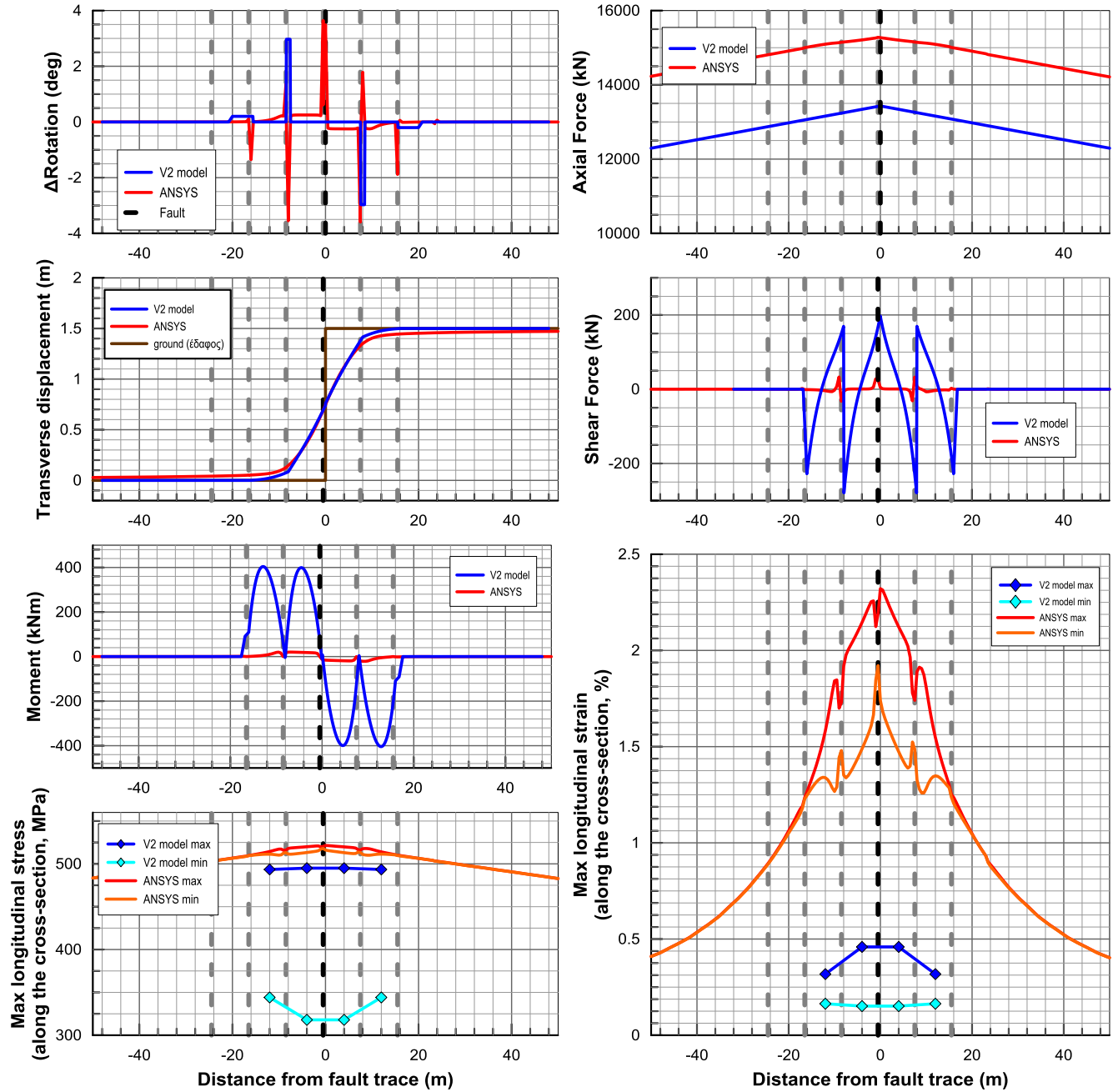
# B19) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=3m$ $\beta=90^\circ$



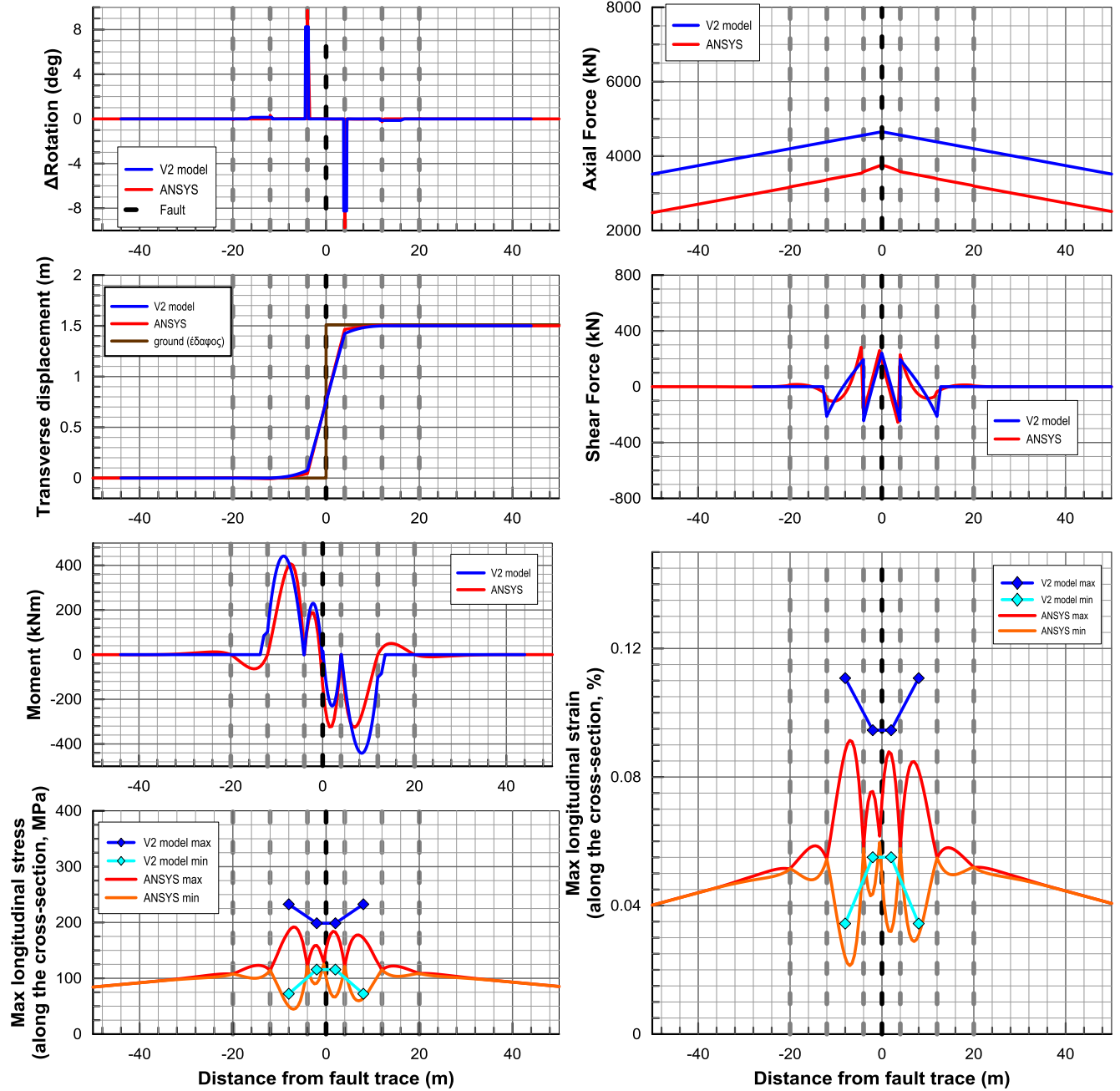
## B20) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=3m$ $\beta=60^\circ$



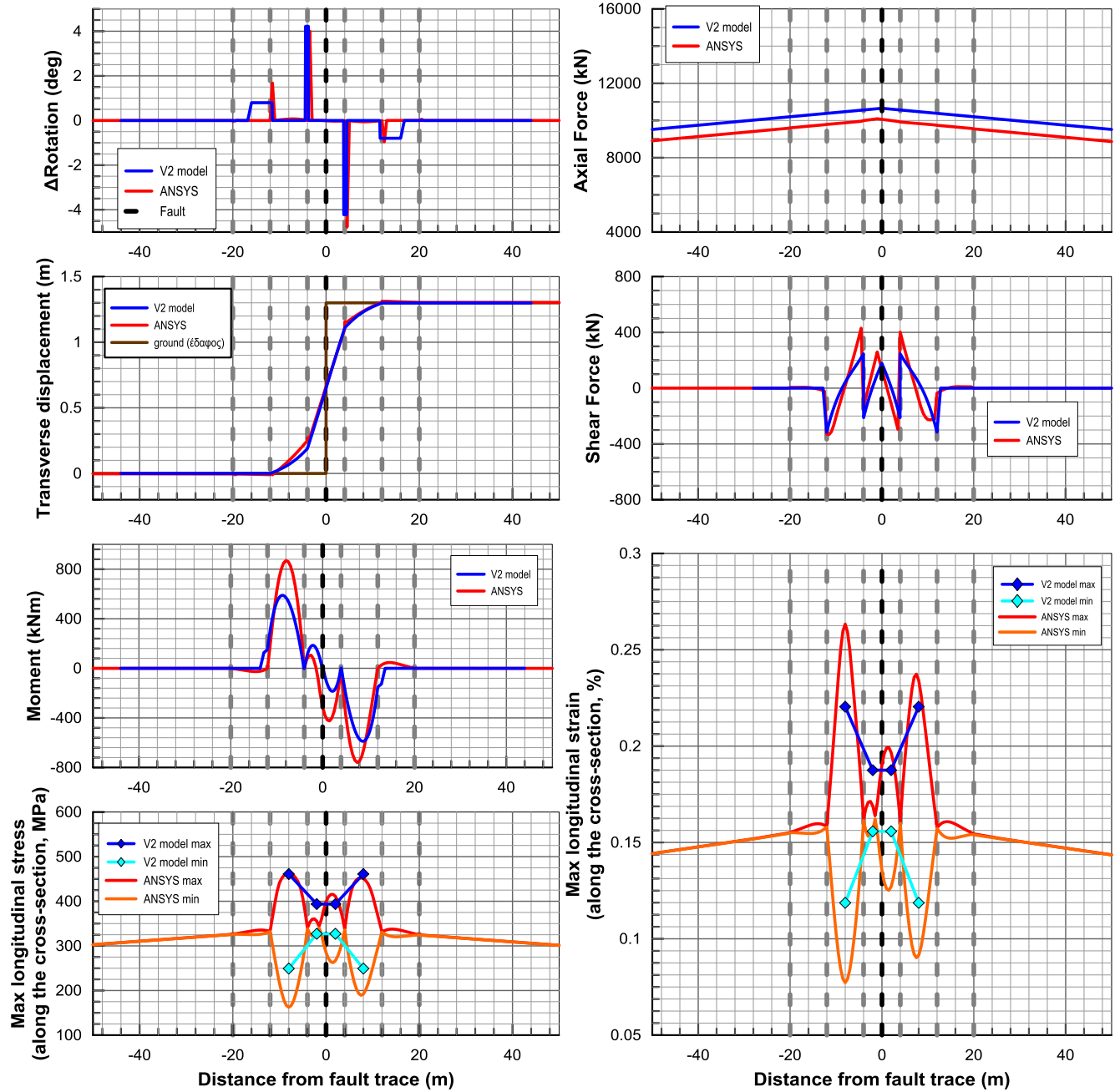
# B21) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=3m$ $\beta=30^\circ$



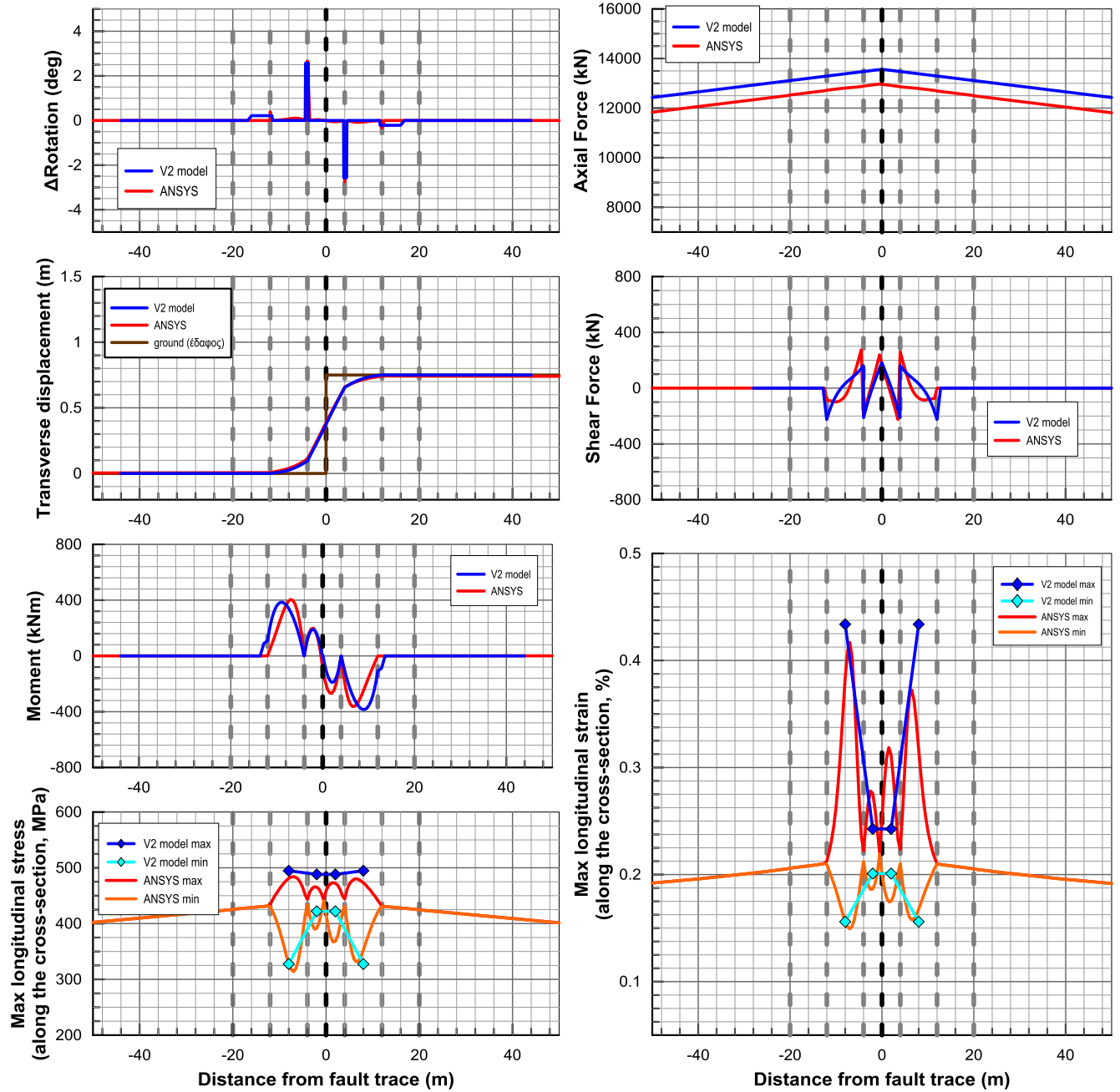
## B22) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=1,5m$ $\beta=90^\circ$



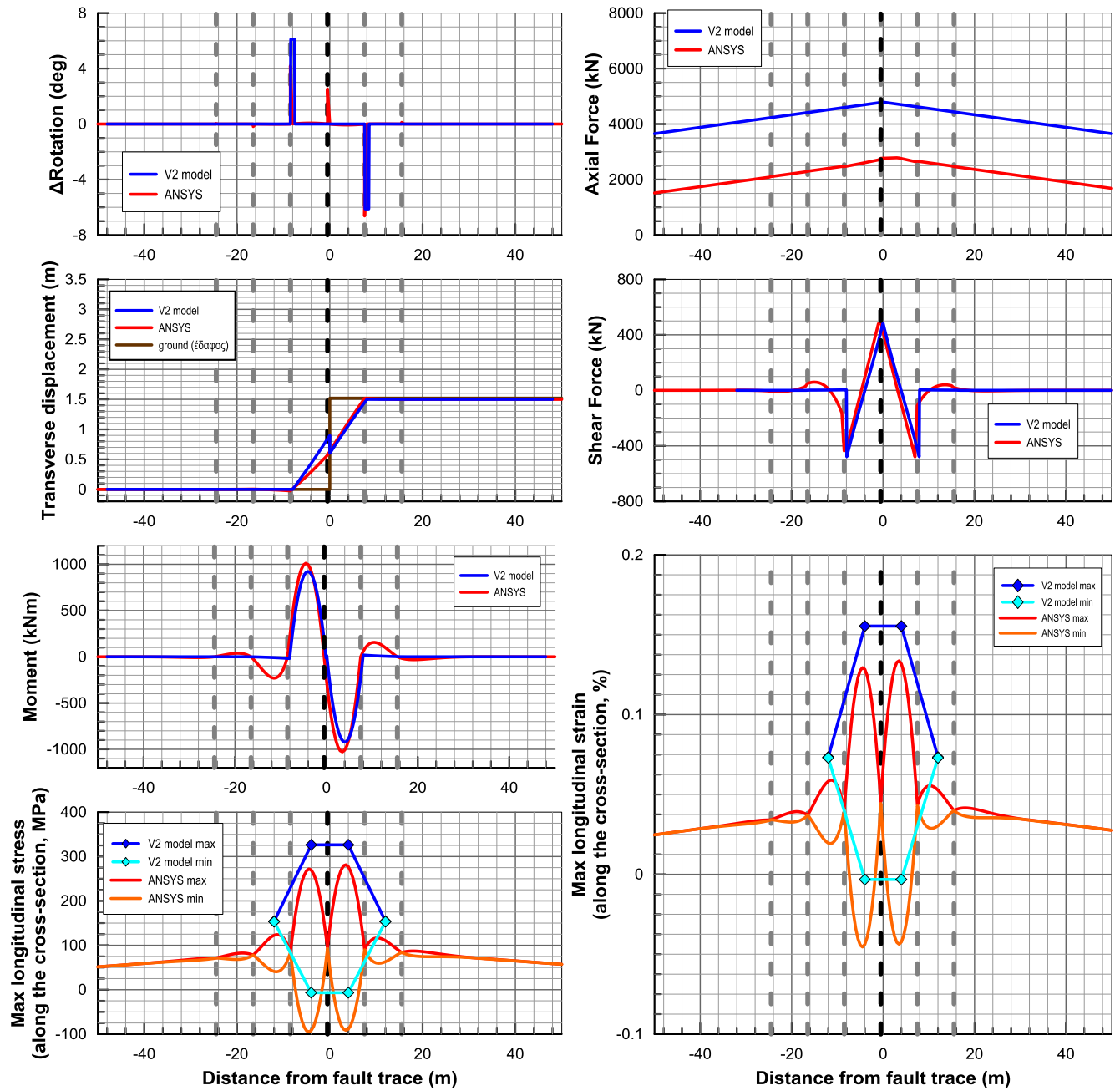
## B23) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=1,5m$ $\beta=60^\circ$



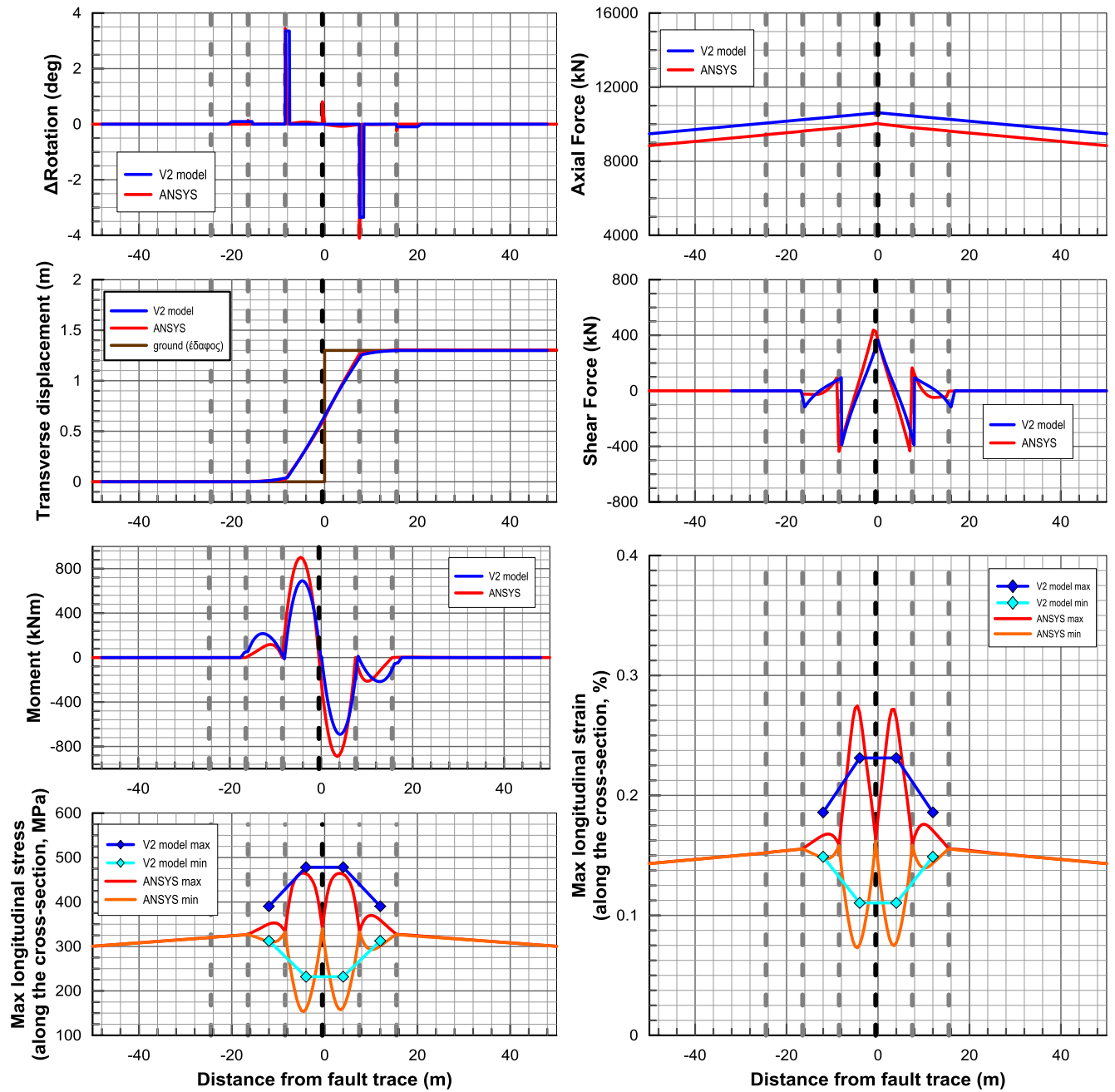
## B24) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=1,5m$ $\beta=30^\circ$



## B25) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=1,5m$ $\beta=90^\circ$

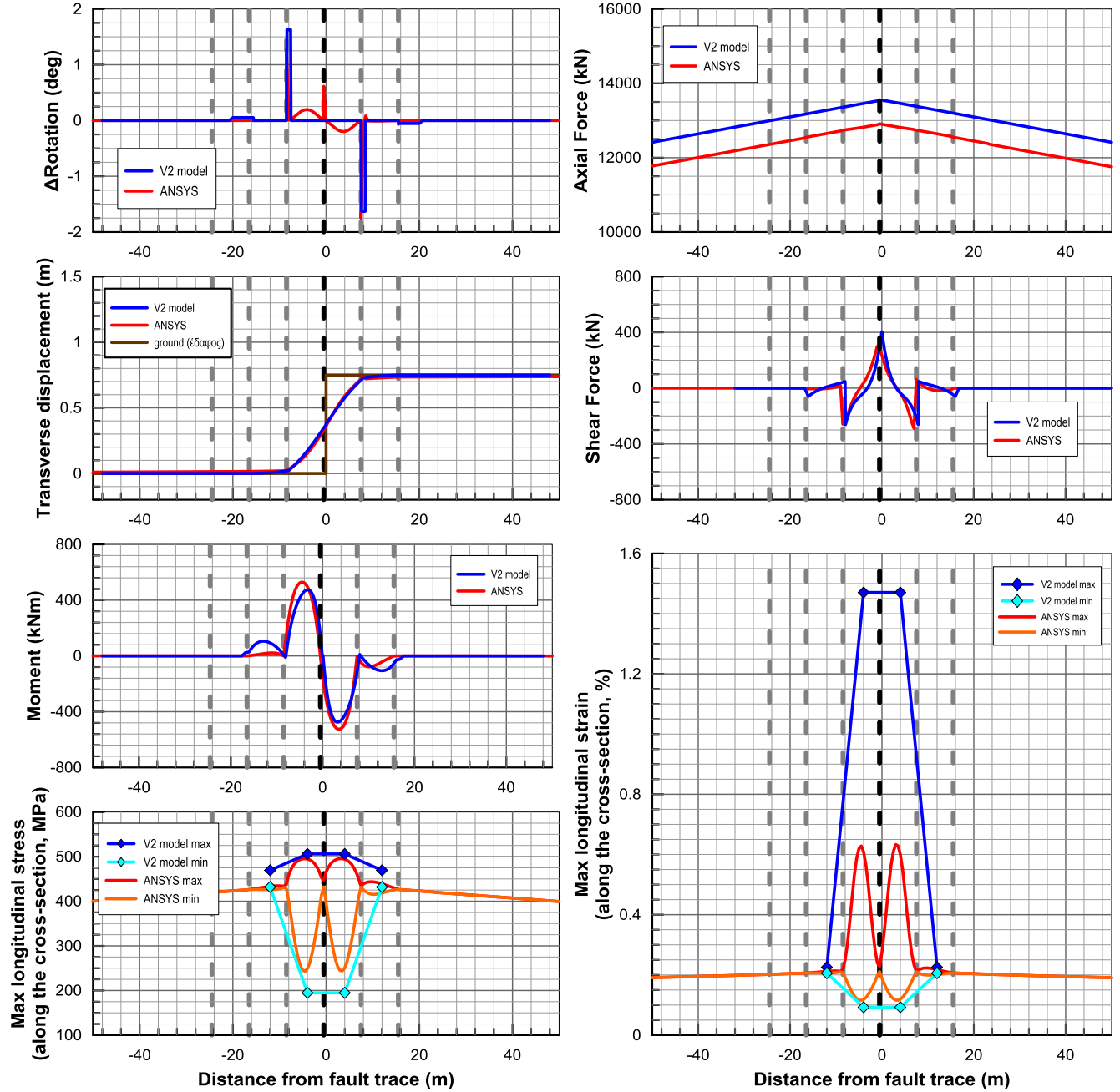


## B26) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=1,5m$ $\beta=60^\circ$

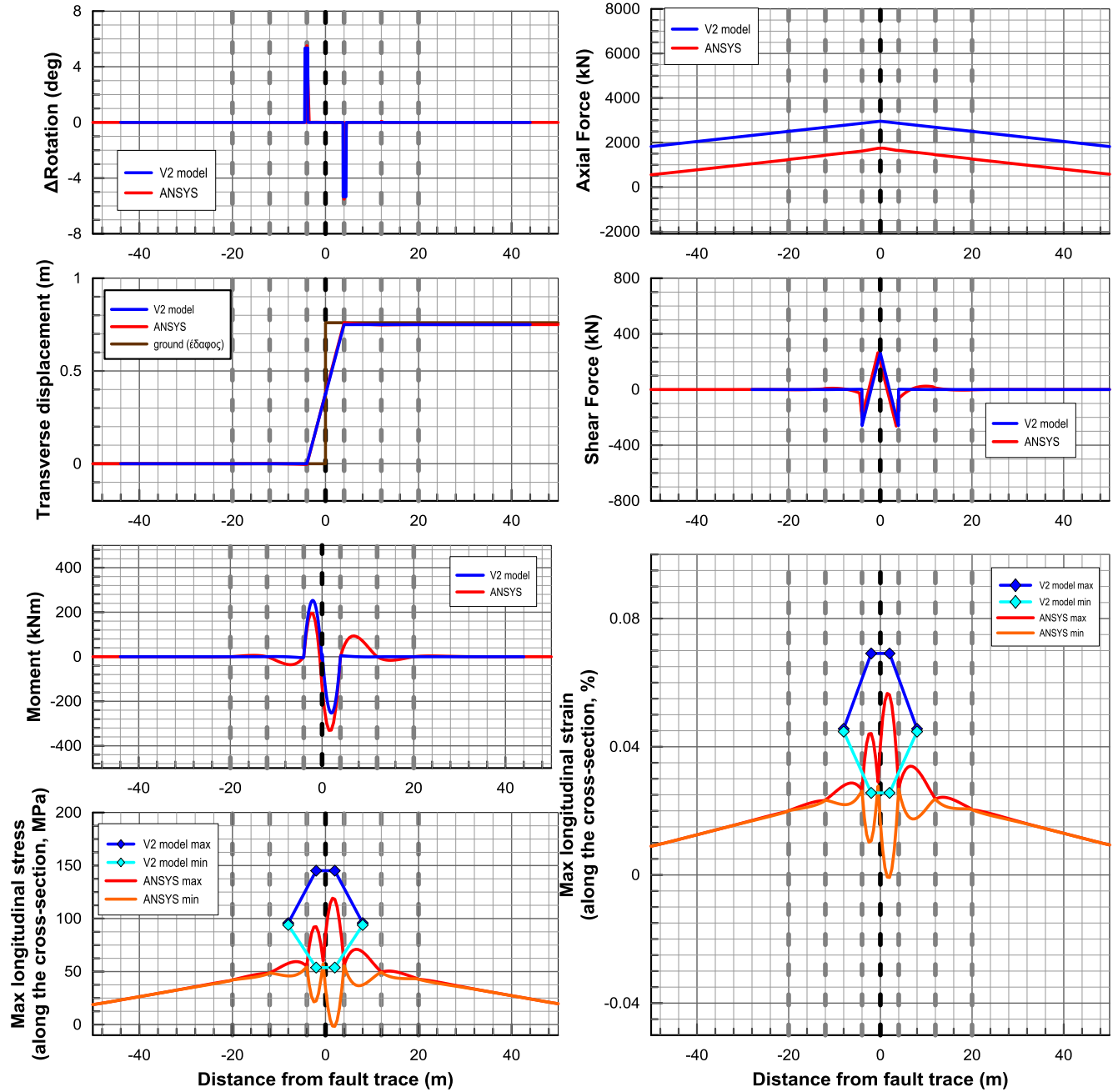




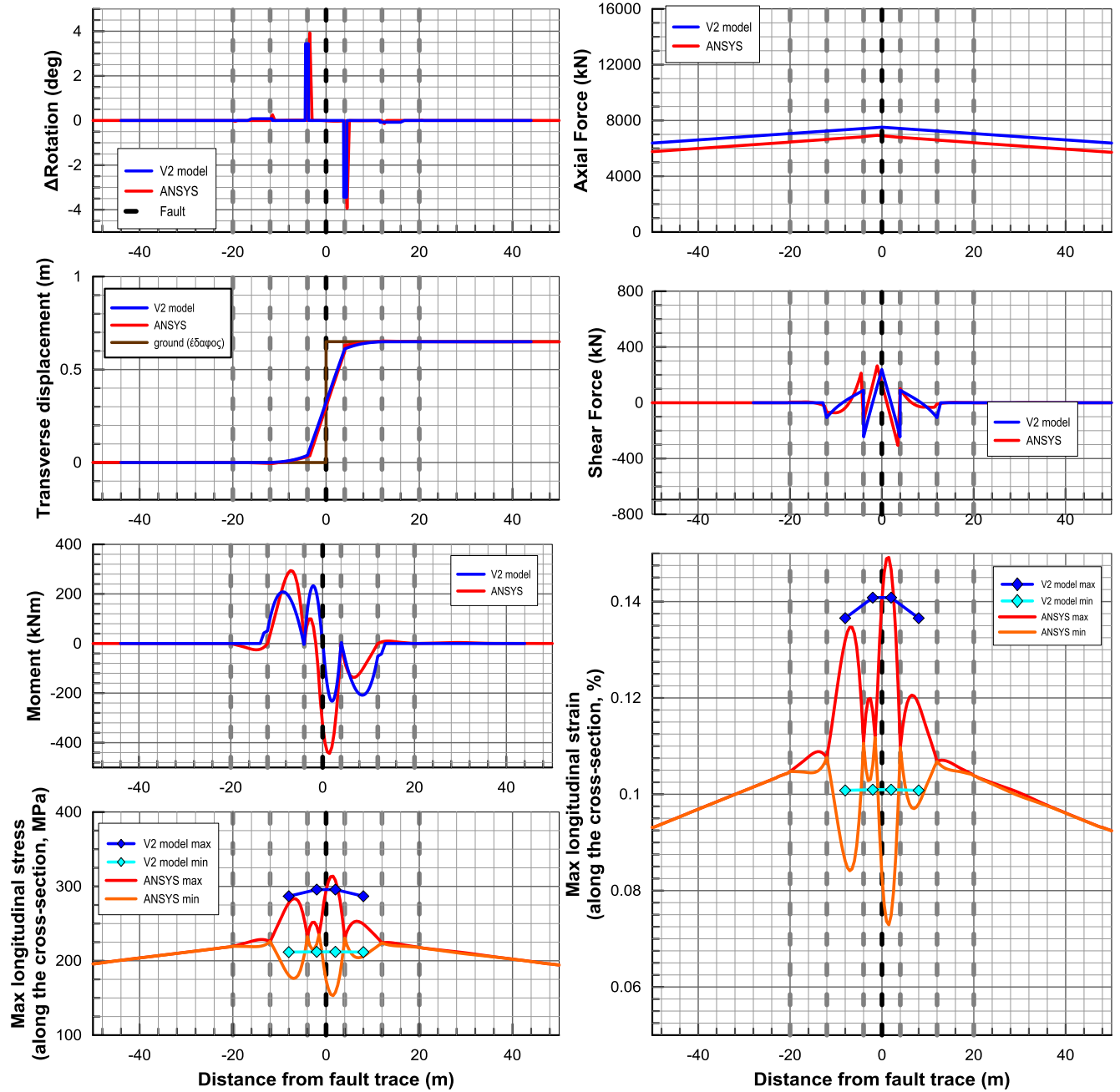
## B27) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=1,5m$ $\beta=30^\circ$



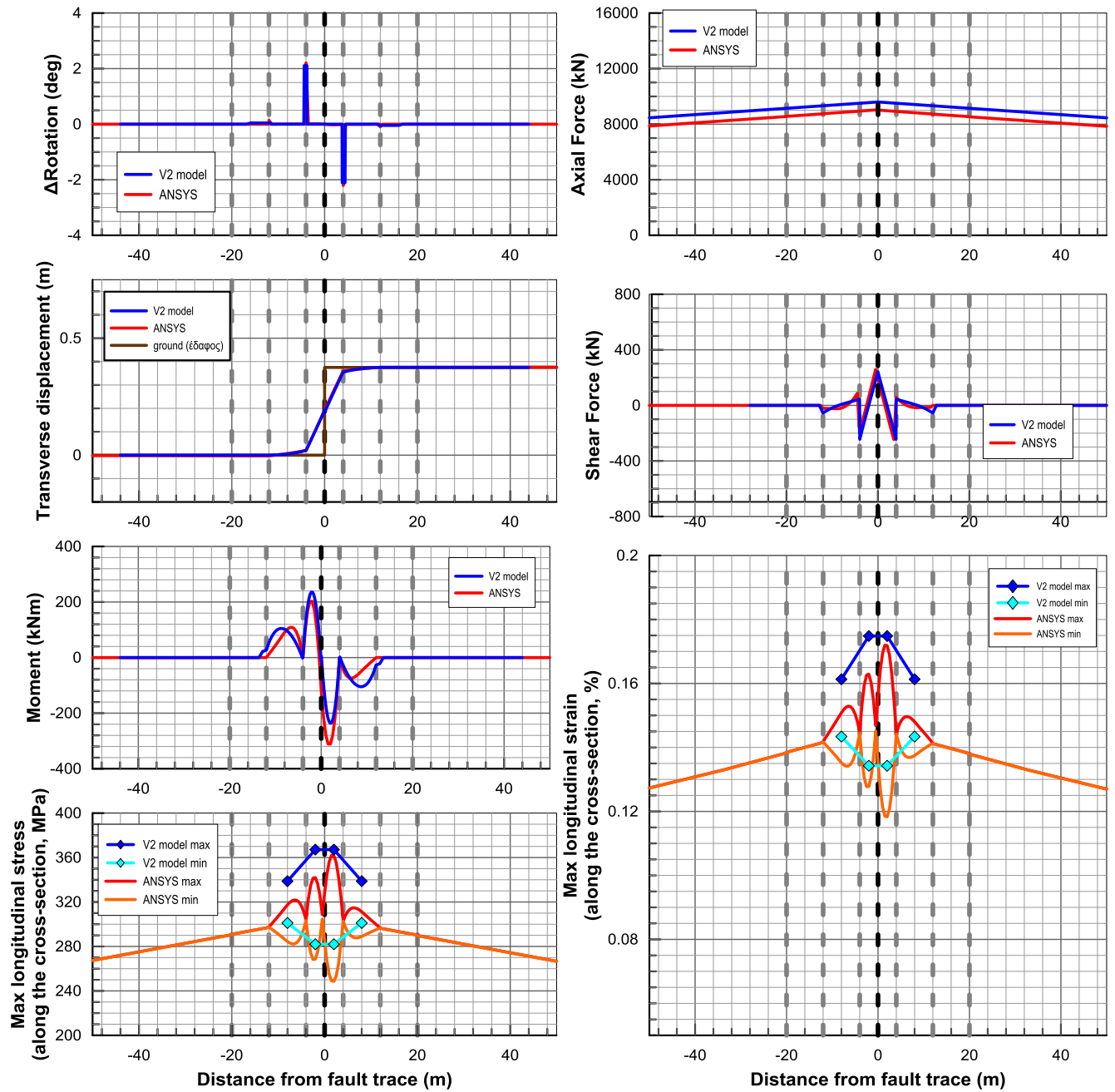
## B28) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=0,75m$ $\beta=90^\circ$



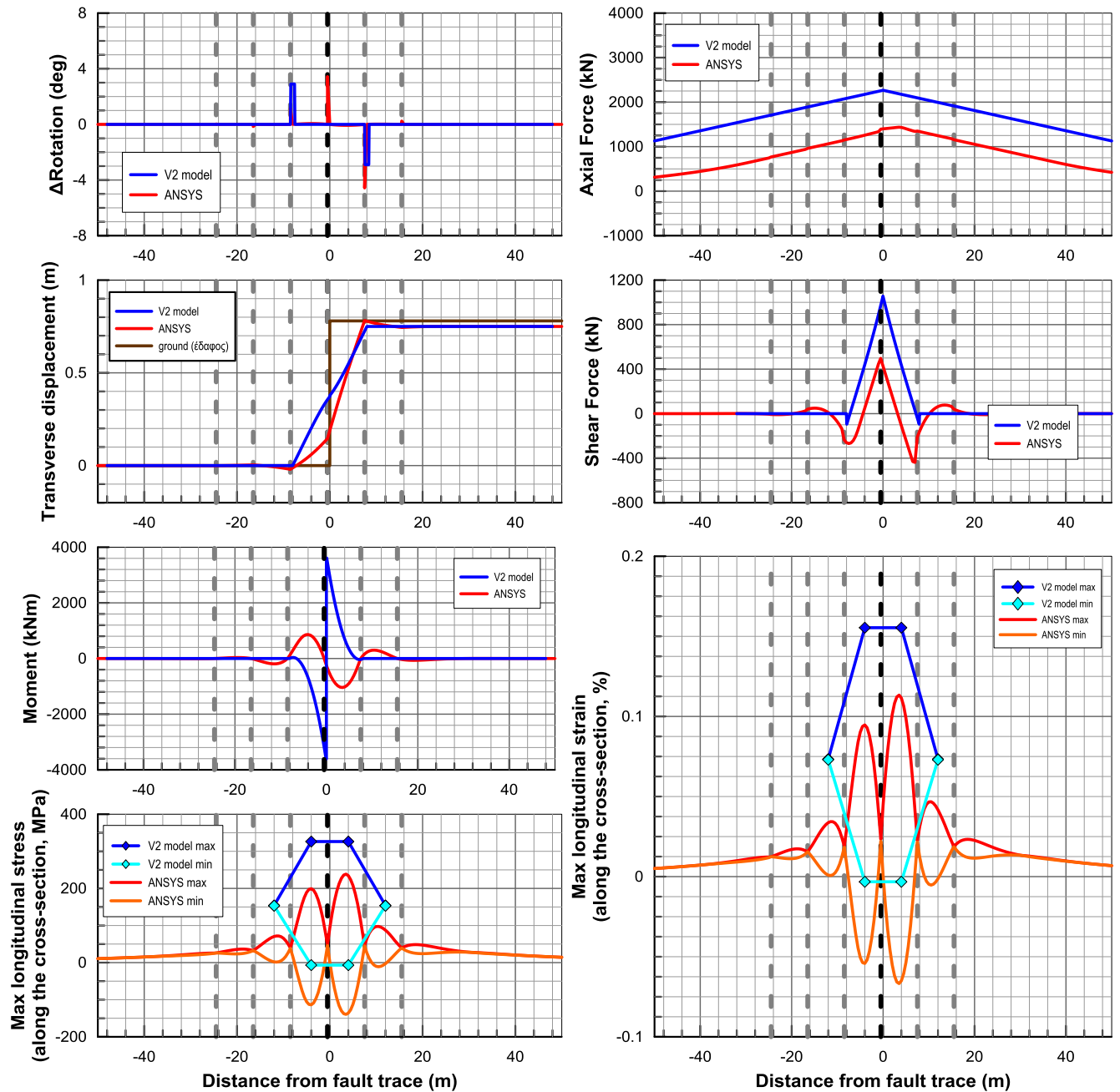
## B29) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=0,75m$ $\beta=60^\circ$



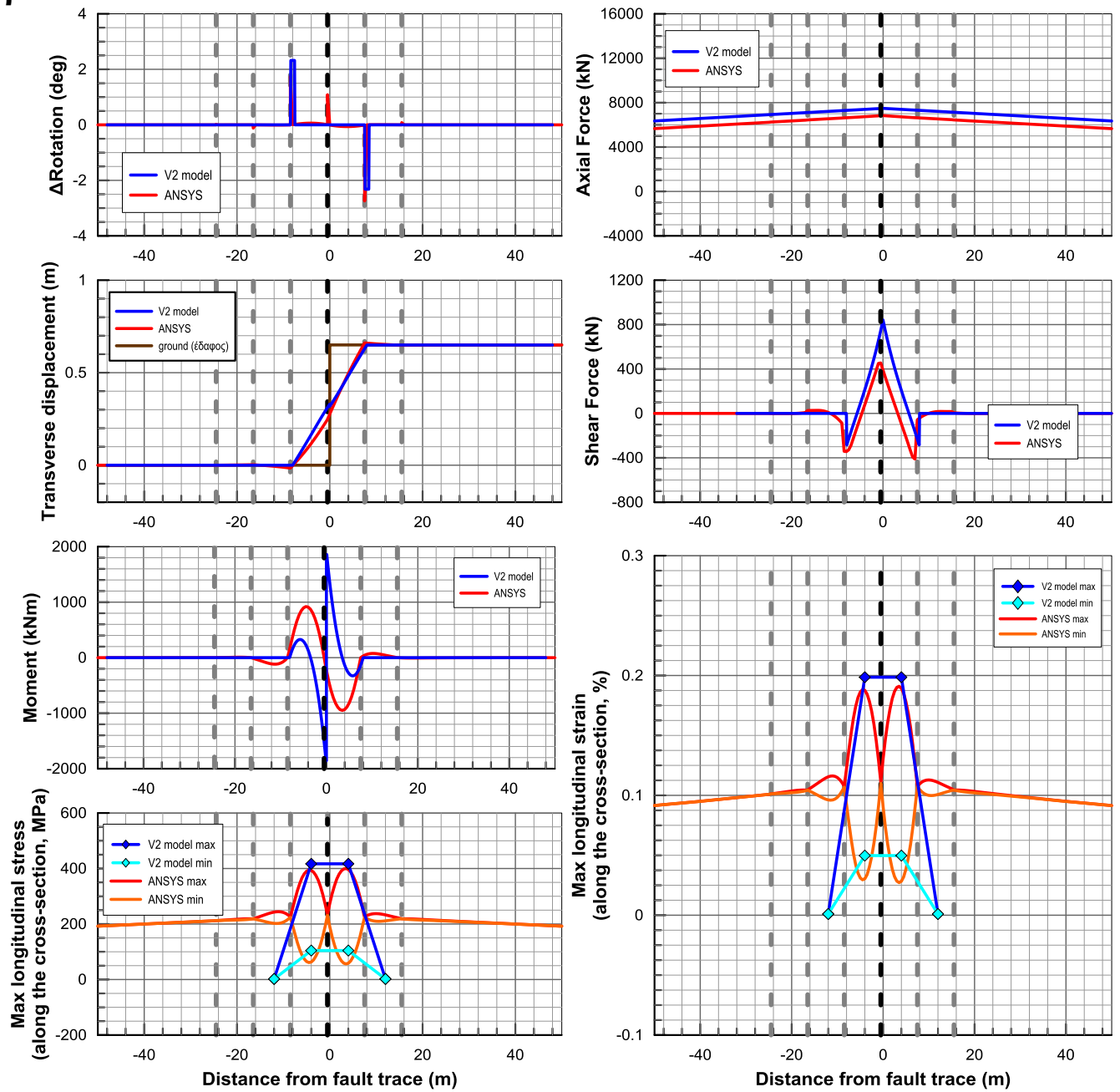
## B30) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=0,75m$ $\beta=30^\circ$



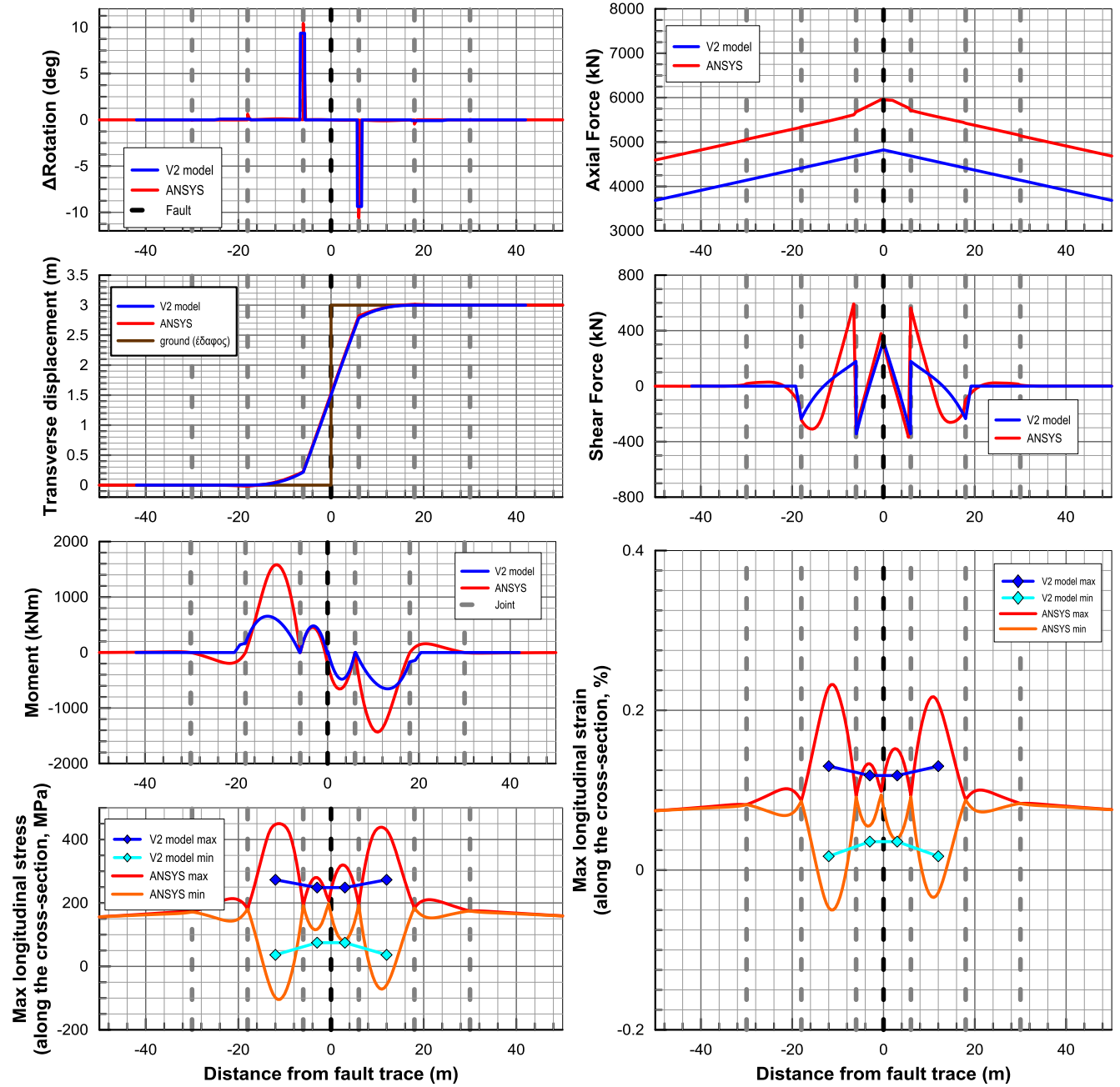
# B31) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=0,75m$ $\beta=90^\circ$



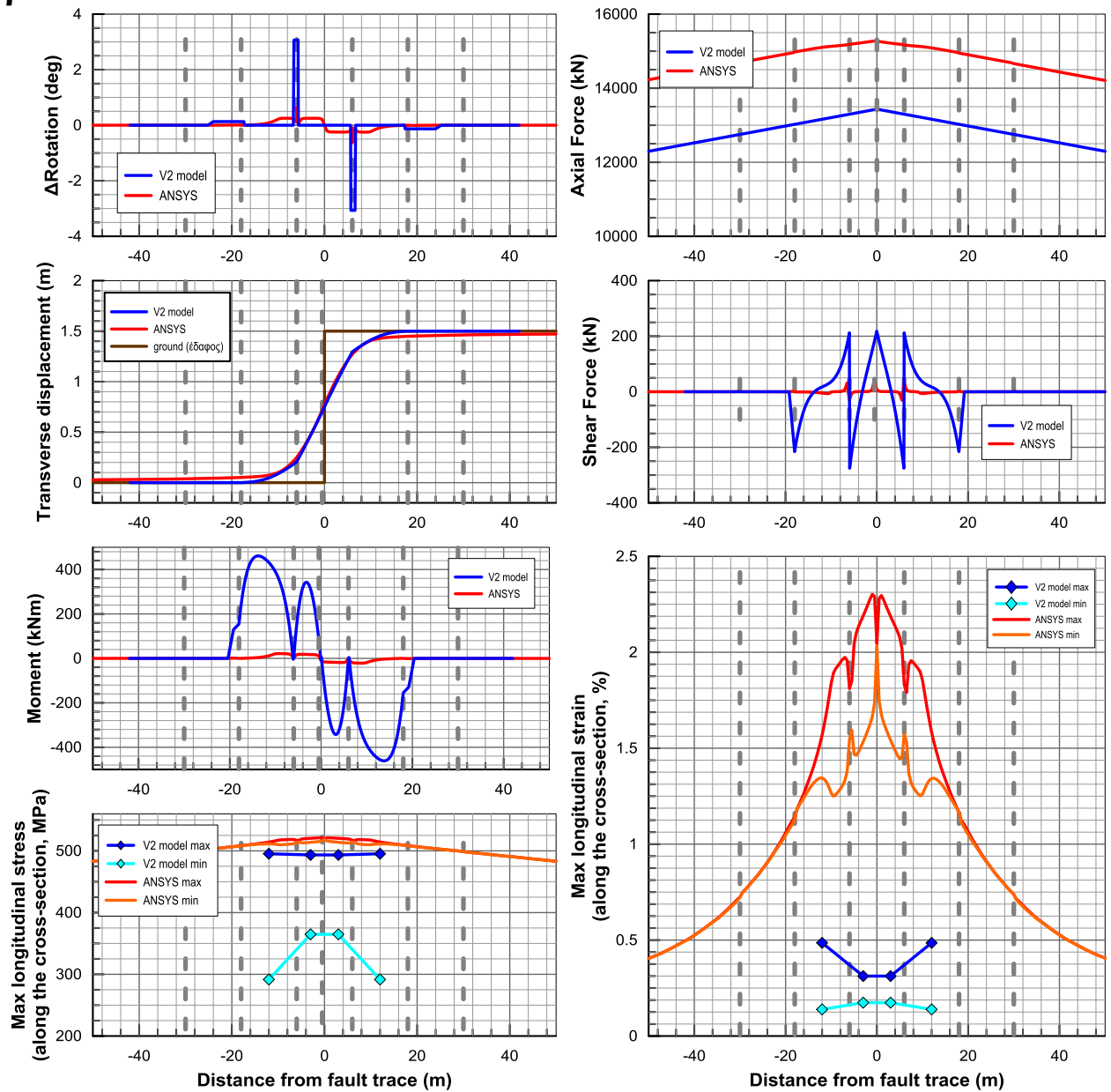
## B32) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=0,75m$ $\beta=60^\circ$



# B33) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m – Ρήγμα στην μέση – $D_f=3m$ $\beta=90^\circ$

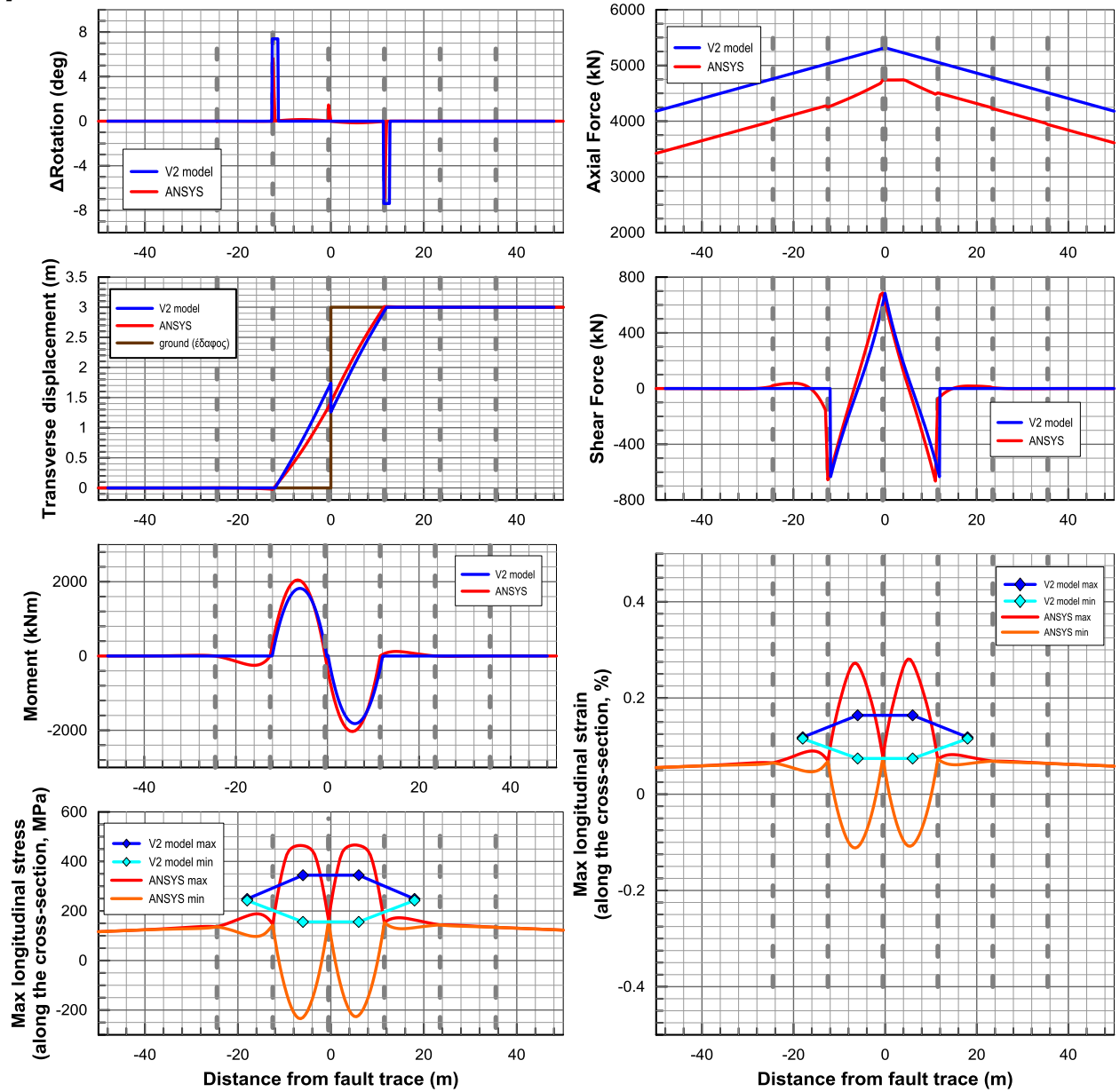


# B34) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m – Ρήγμα στην μέση – $D_f=3m$ $\beta=30^\circ$

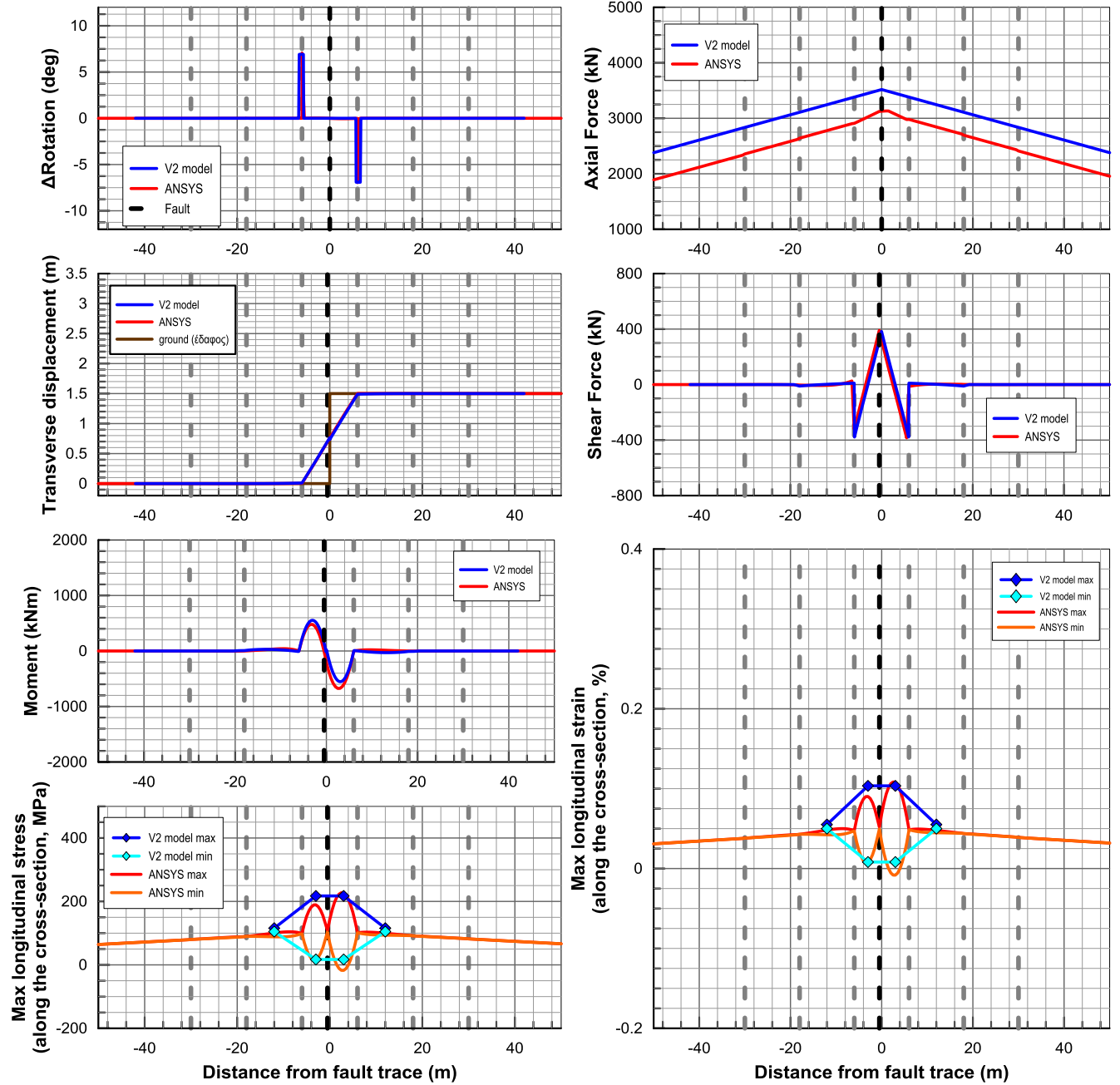




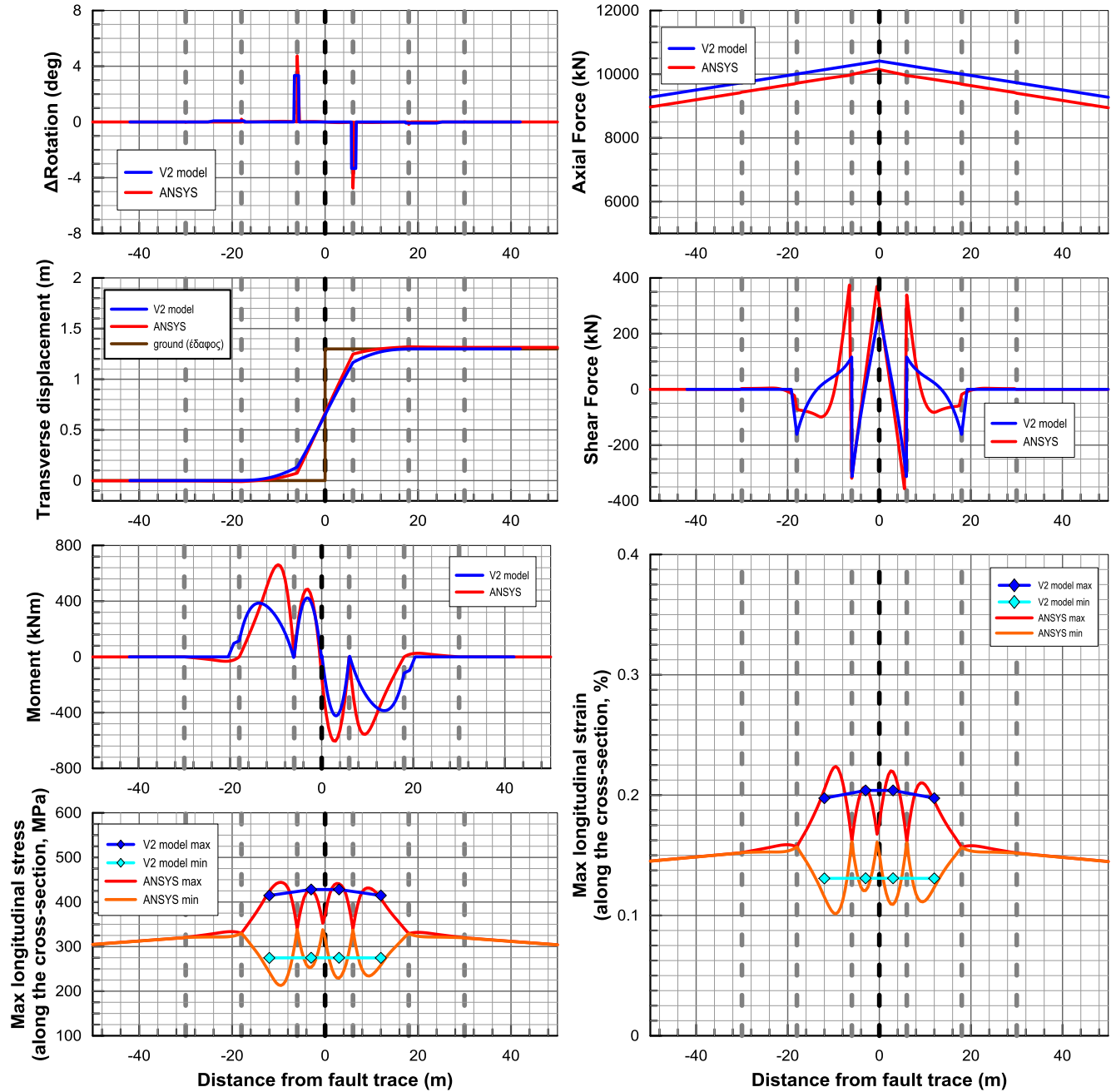
## B35) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=3m$ $\beta=90^\circ$



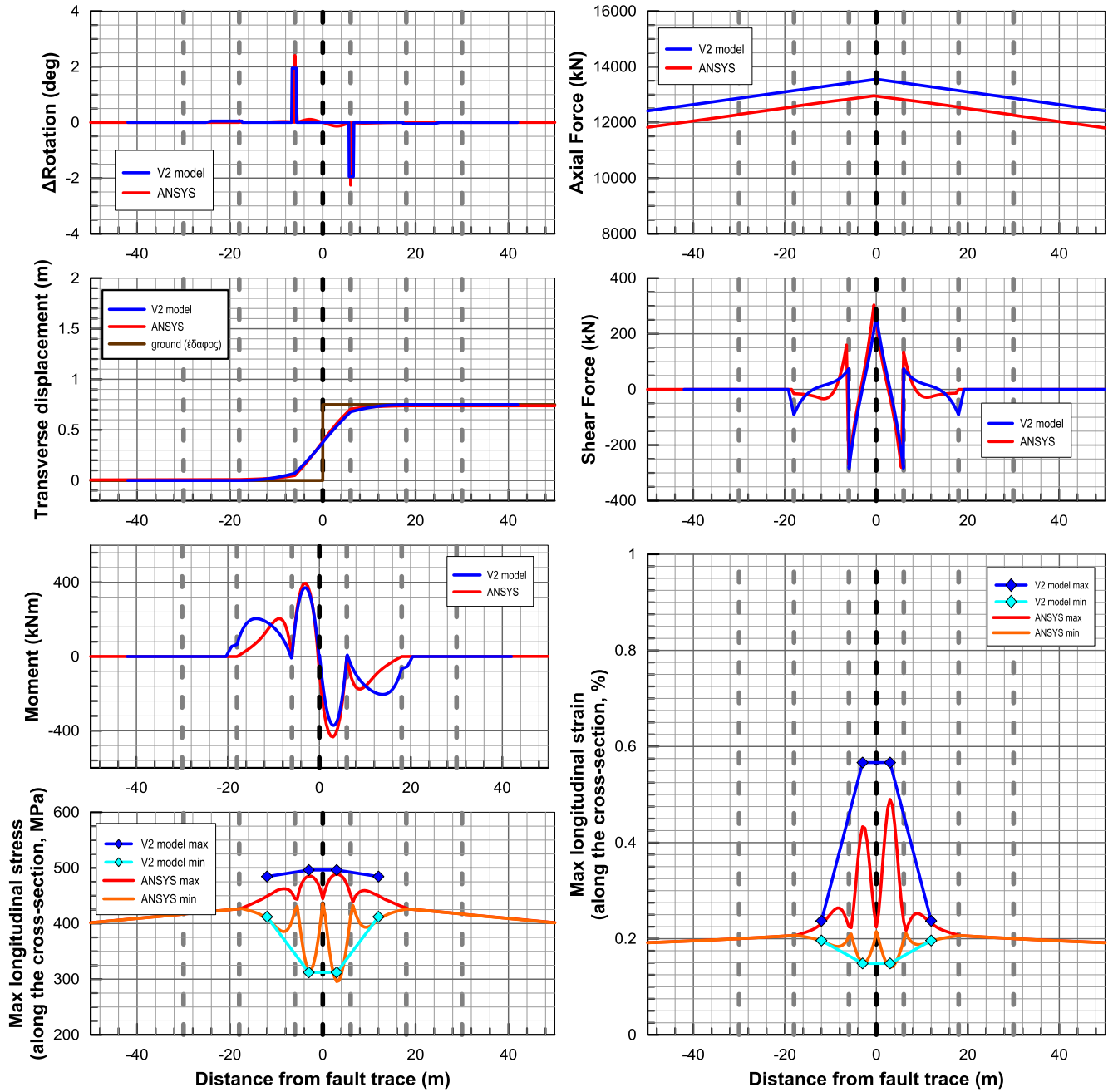
# B36) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m – Ρήγμα στην μέση – $D_f=1,5m$ $\beta=90^\circ$



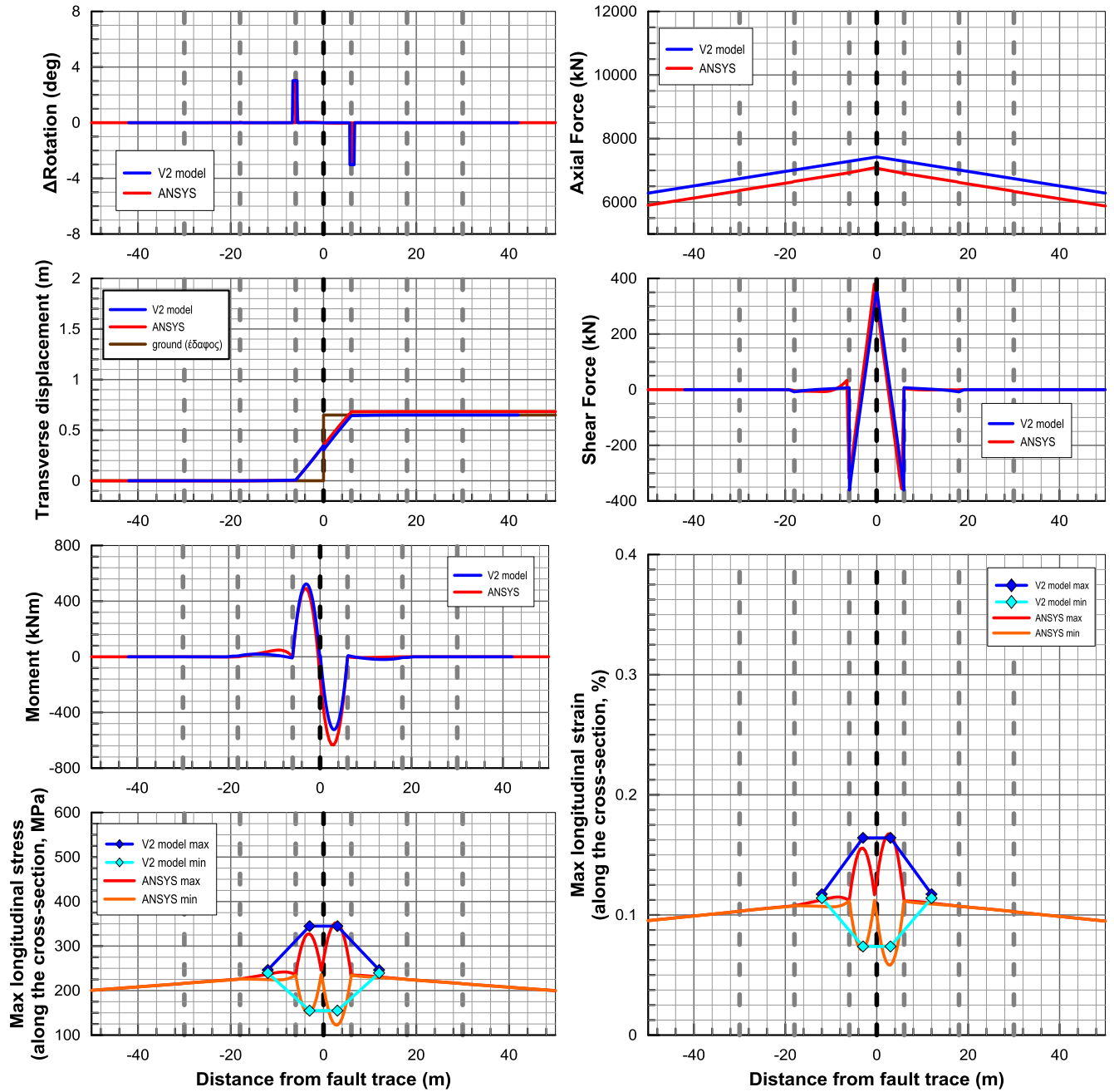
# B37) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m – Ρήγμα στην μέση – $D_f=1,5m$ $\beta=60^\circ$



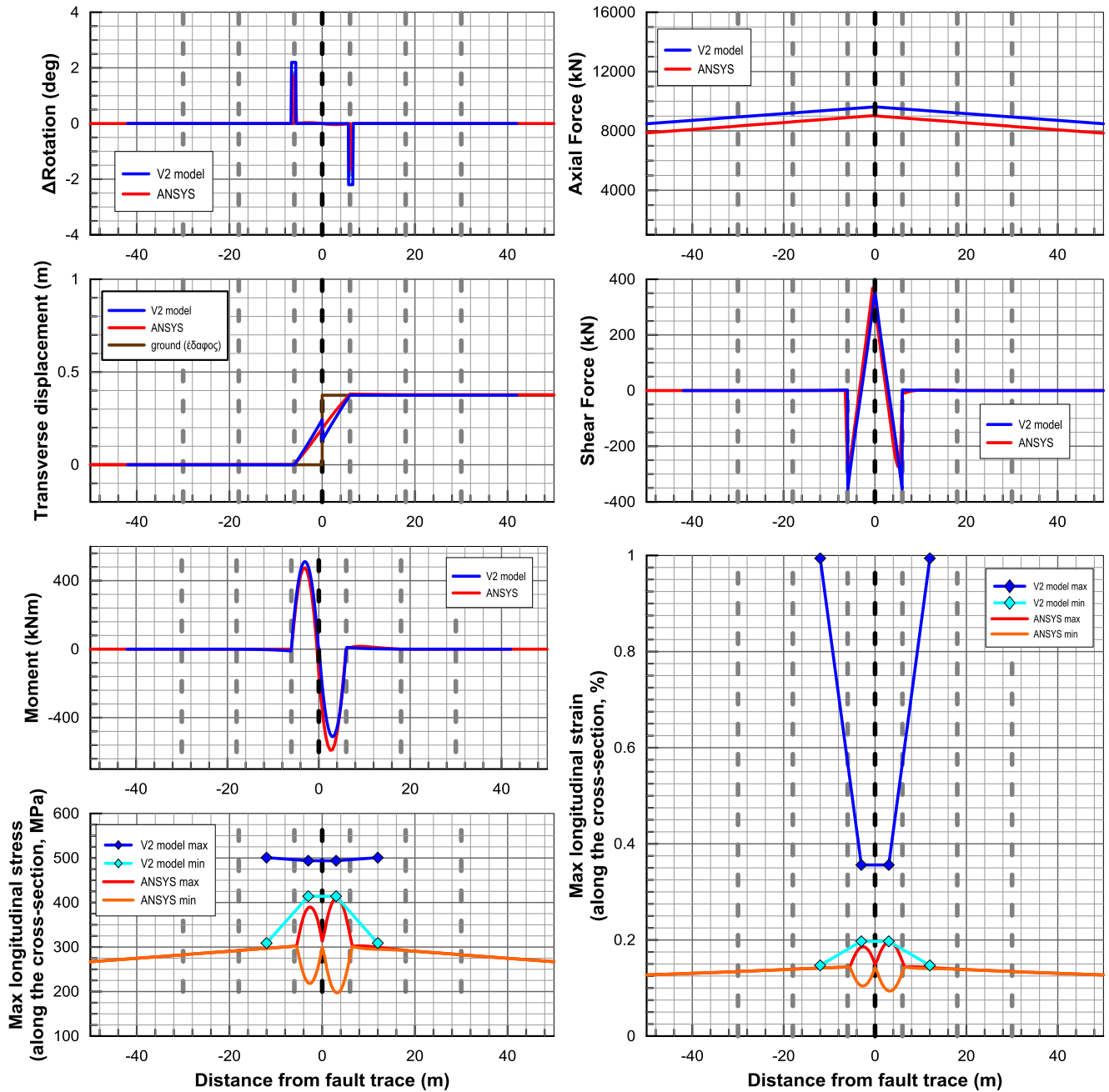
# B38) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m – Ρήγμα στην μέση – $D_f=1,5m$ $\beta=30^\circ$



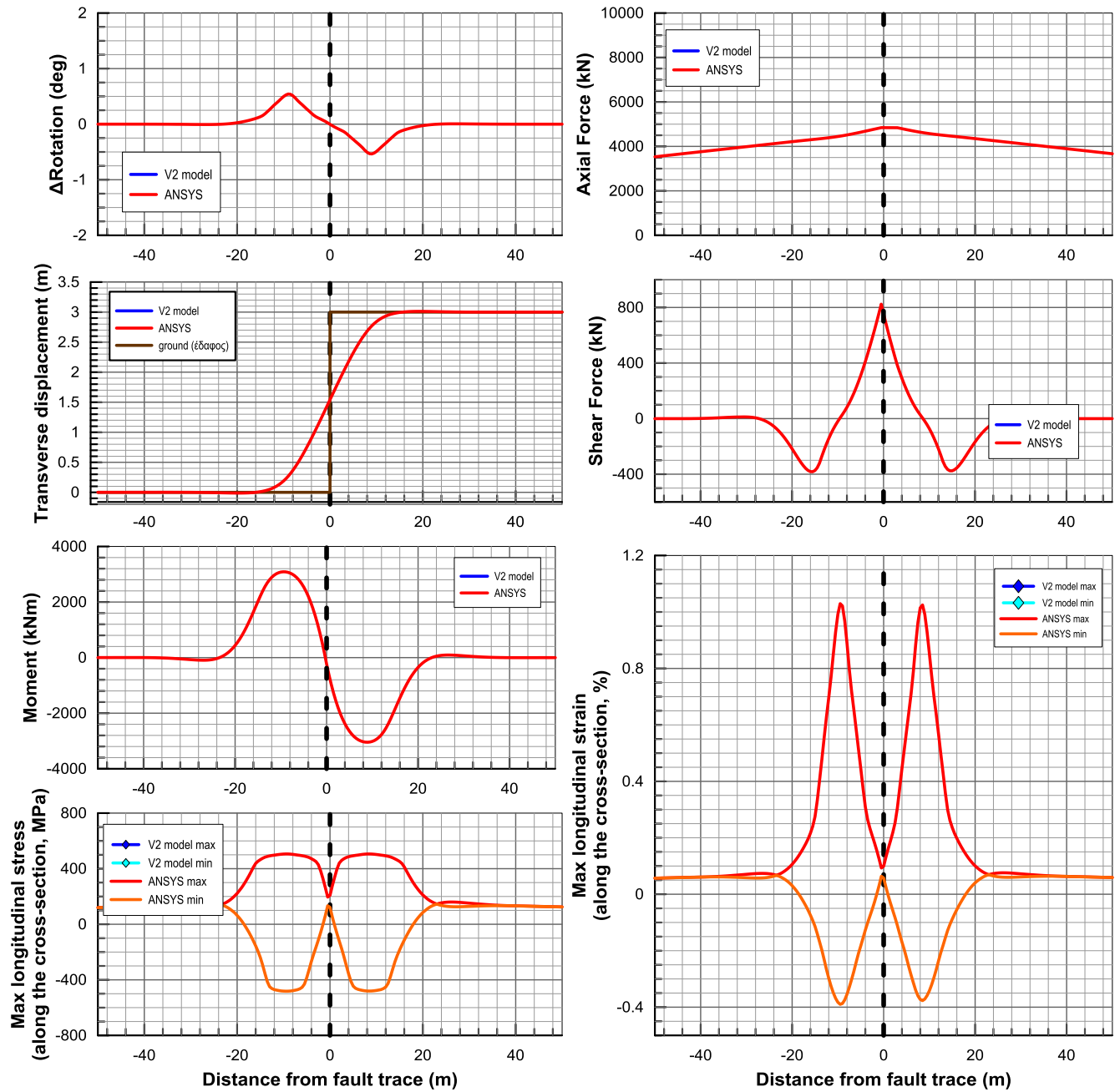
## B39) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m – Ρήγμα στην μέση – $D_f=0.75m$ $\beta=60^\circ$



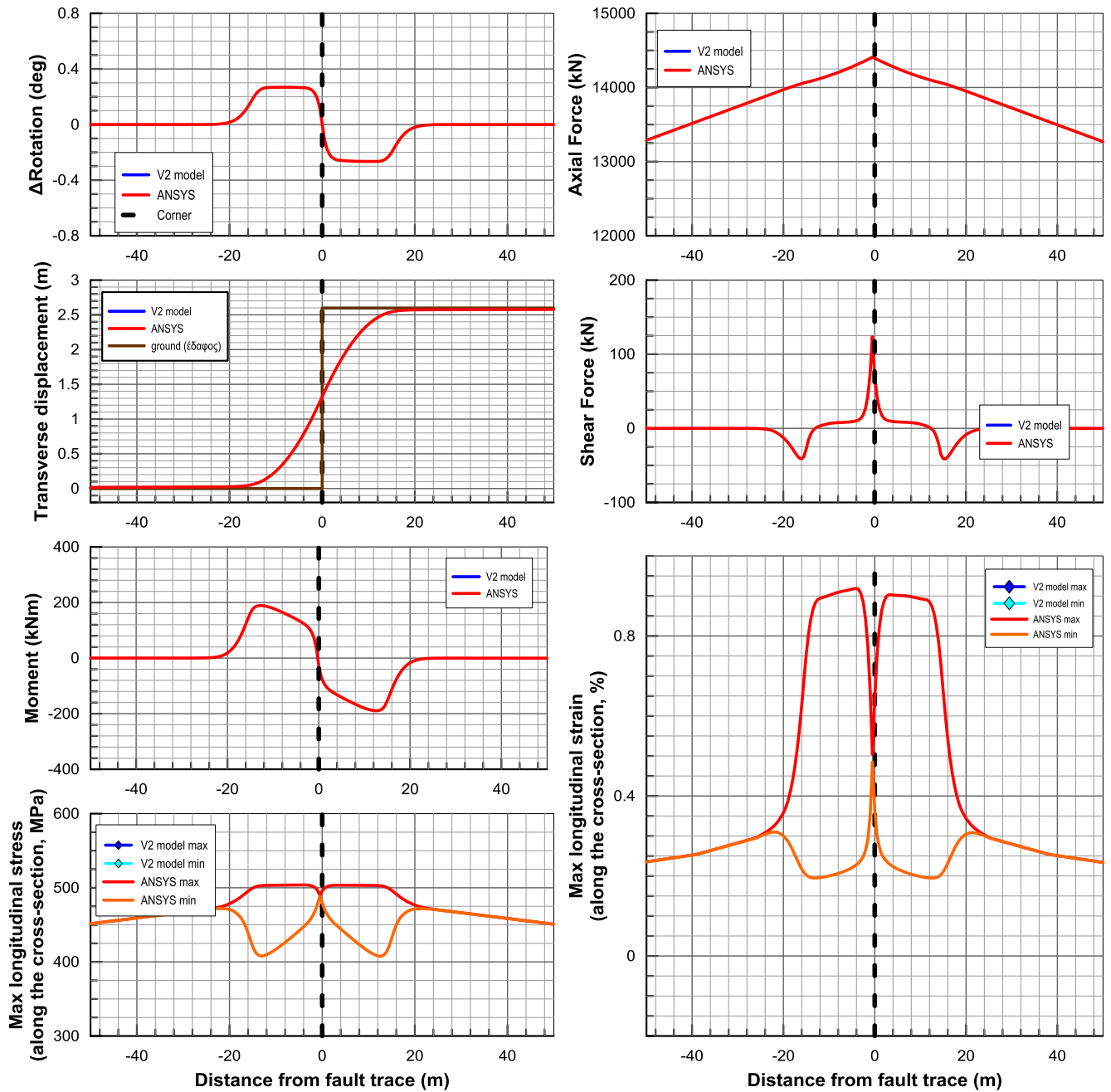
## B40) Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m – Ρήγμα στην μέση – $D_f=0.75m$ $\beta=30^\circ$



## Β Ι) Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 3m$ $\beta = 90^\circ$

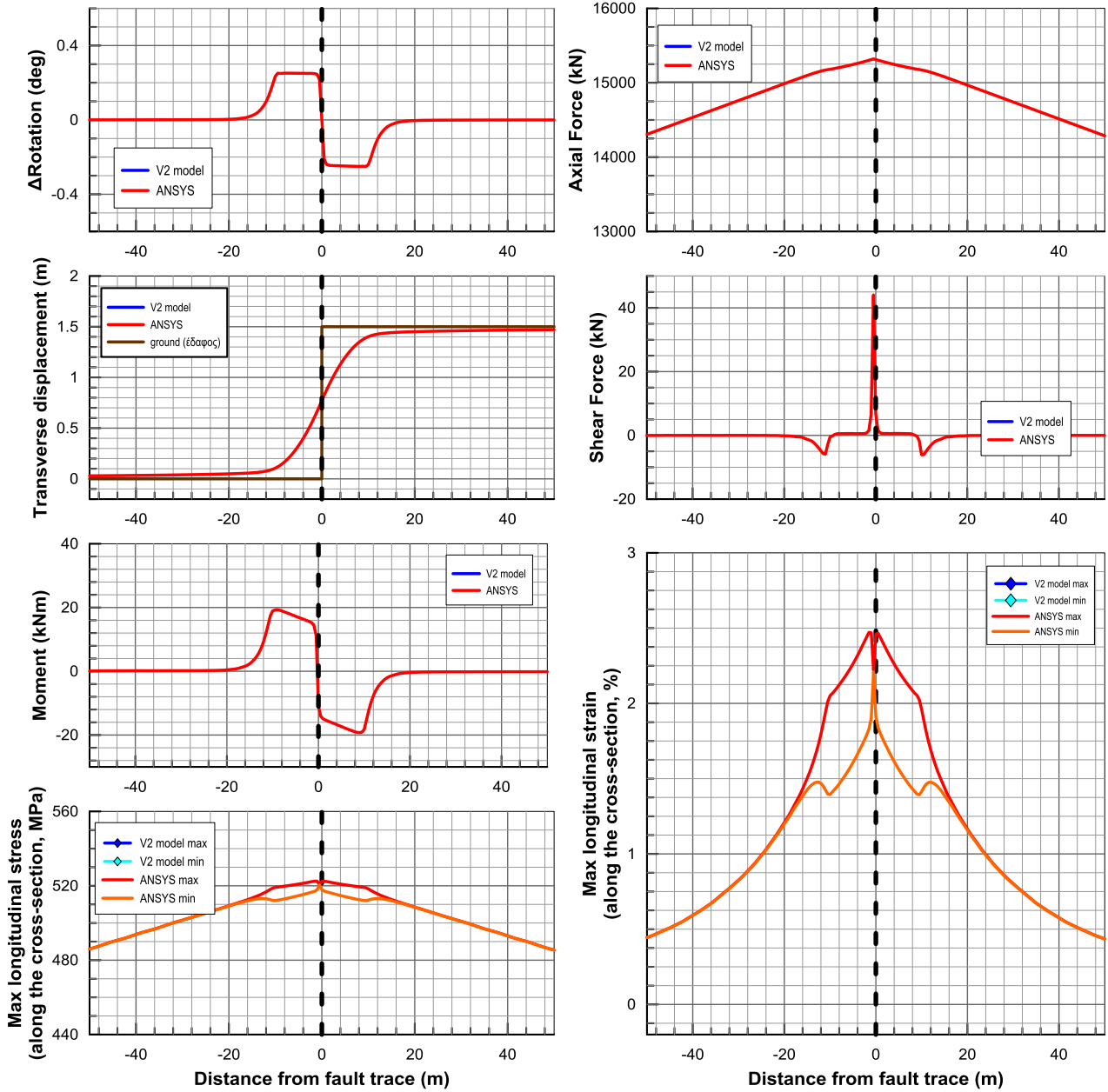


## Β ΙΙ) Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 3m$ $\beta = 60^\circ$

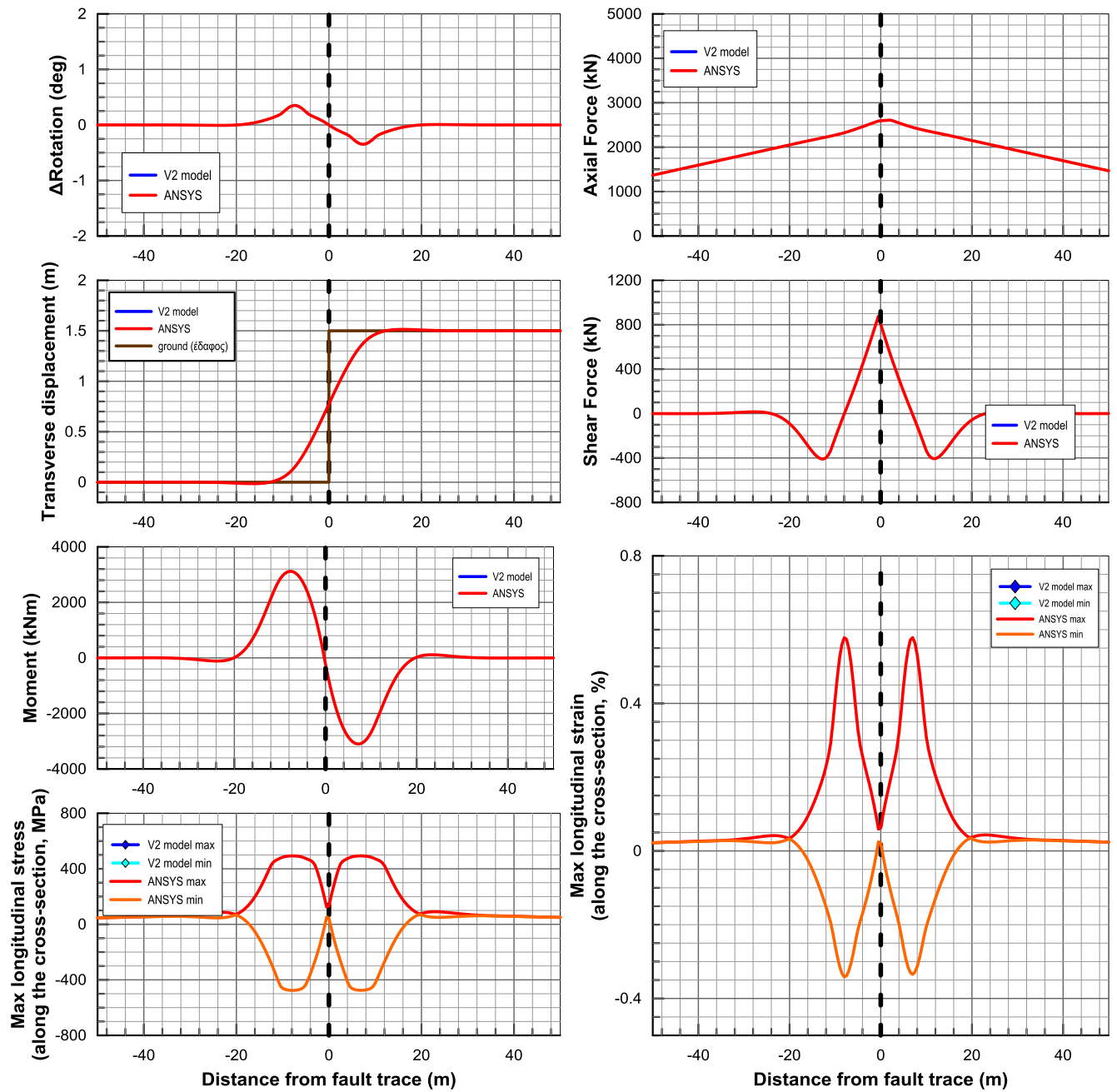




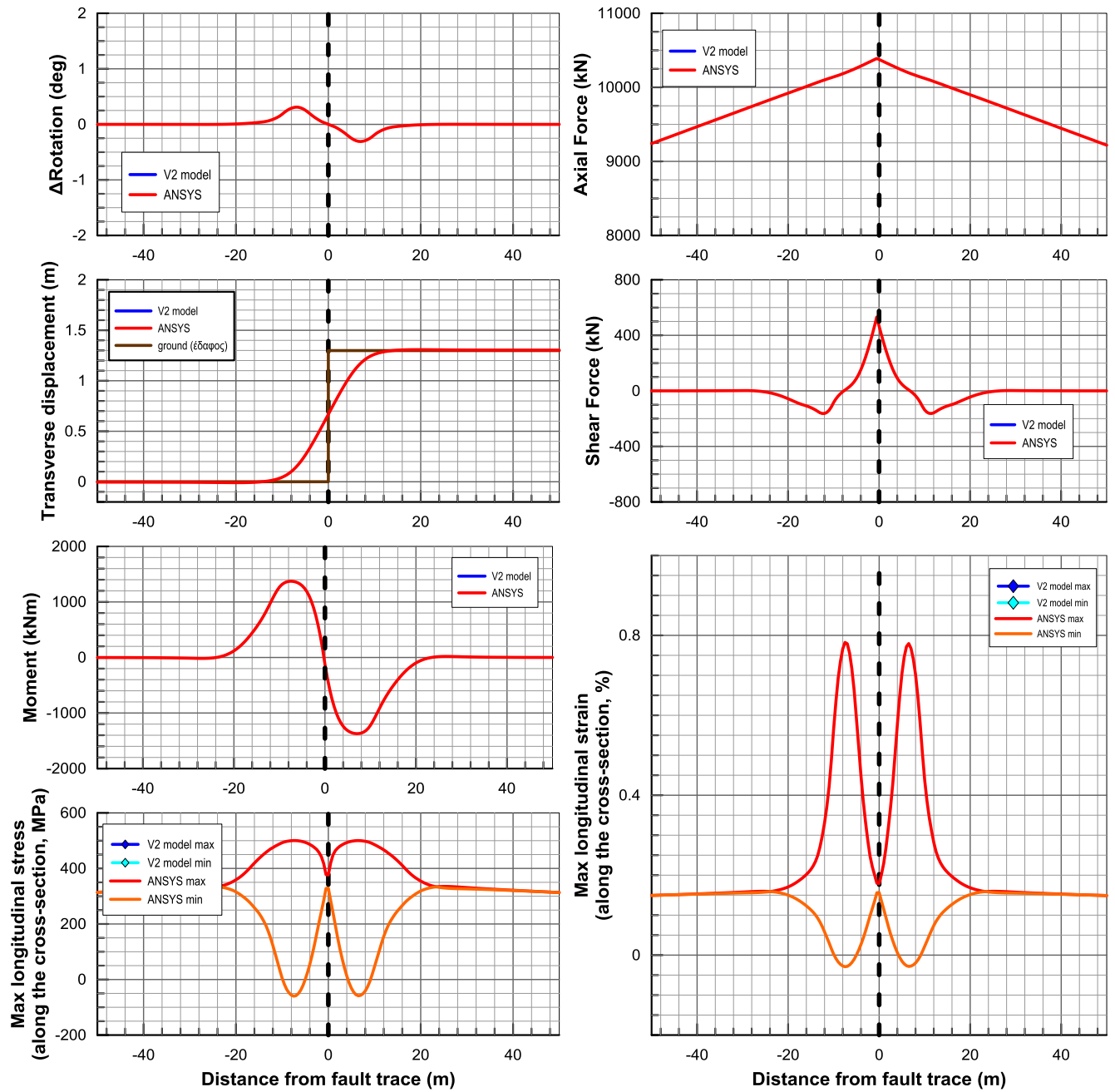
## Β ΙΙΙ) Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 3m$ $\beta = 30^\circ$



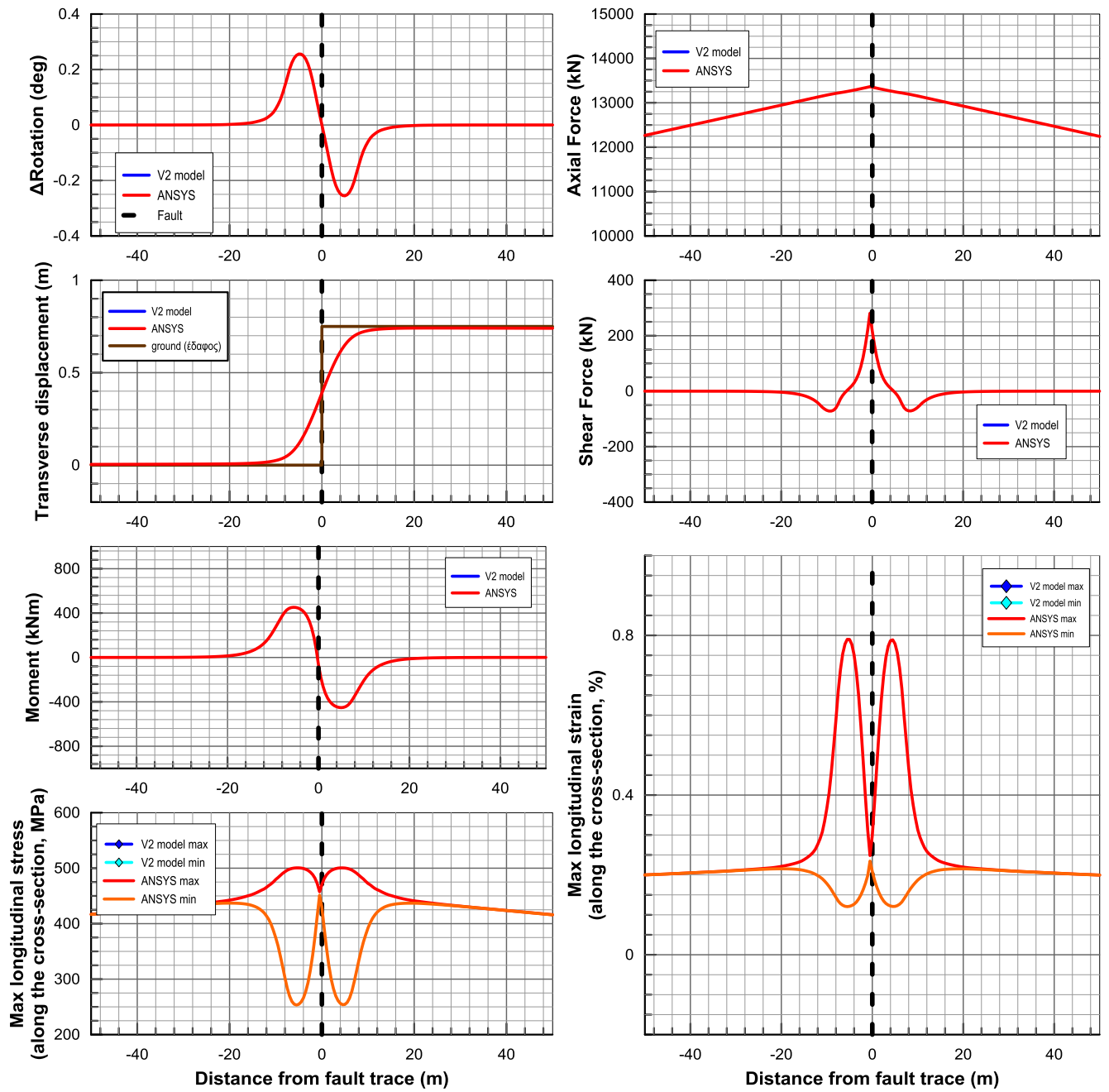
## Β IV) Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 1.5m$ $\beta = 90^\circ$



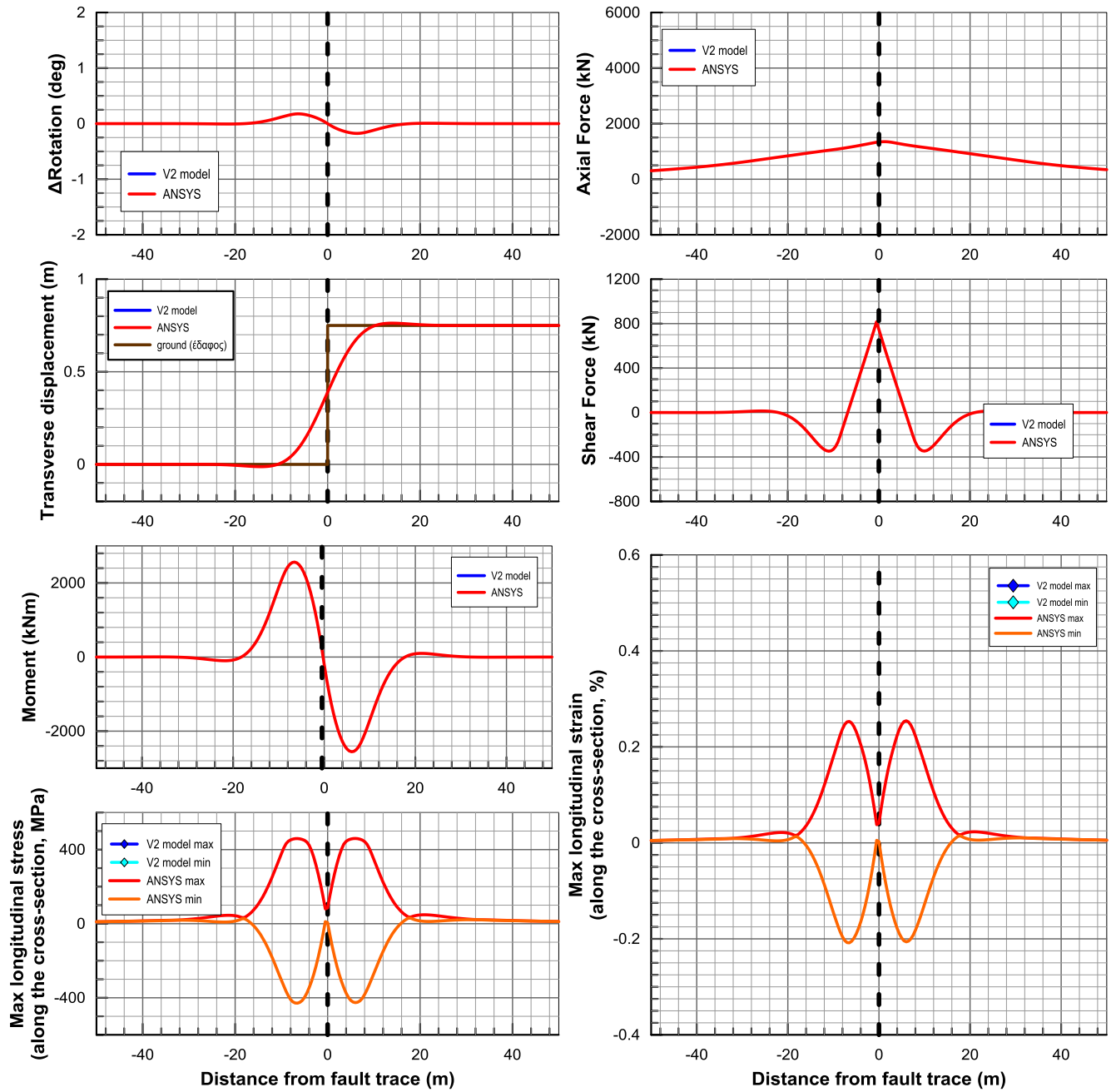
## Β V) Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 1.5m$ $\beta = 60^\circ$



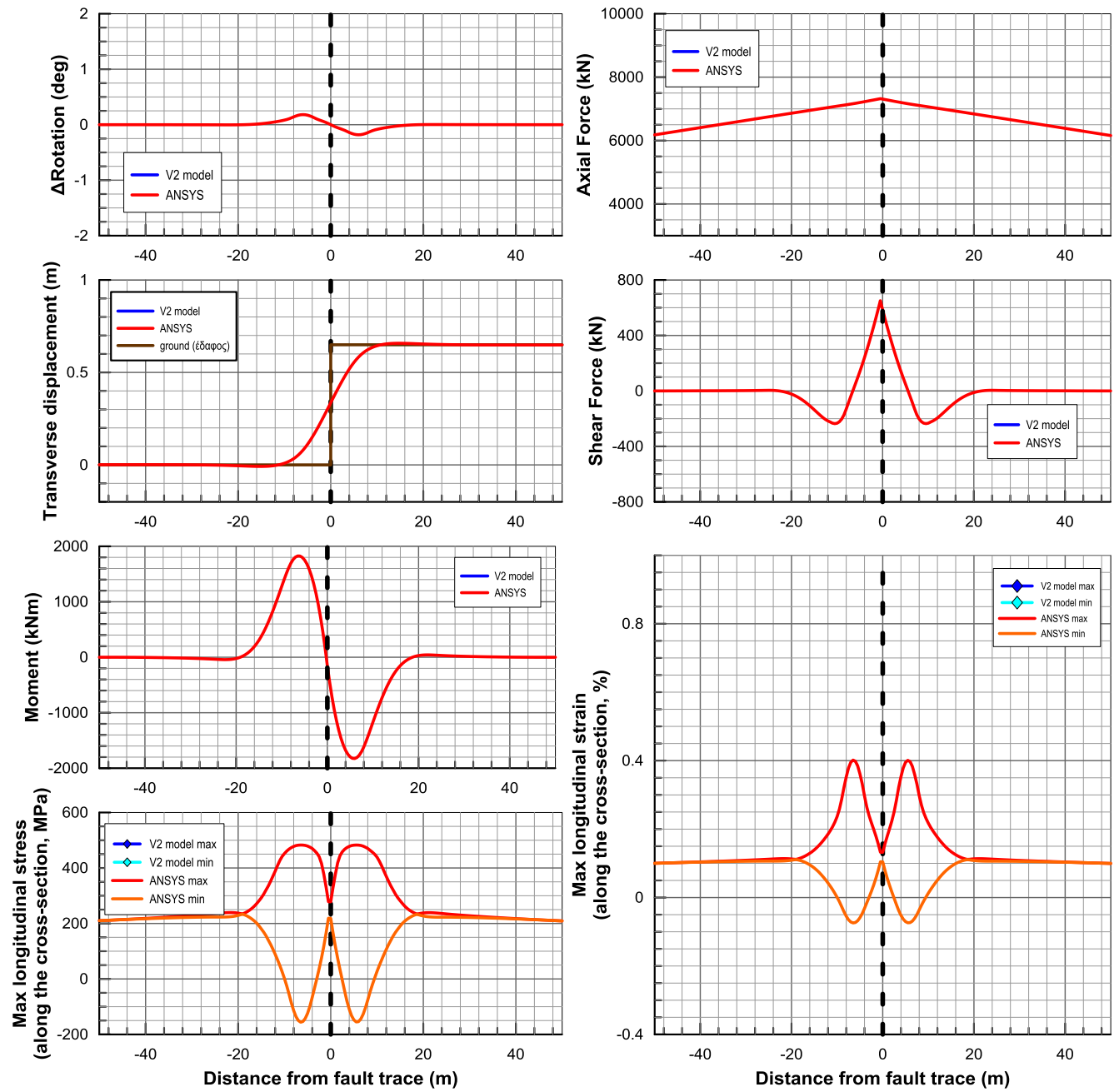
## Β VI) Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 1.5m$ $\beta = 30^\circ$



## B VII) Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 0.75m$ $\beta = 90^\circ$



## Β VIII) Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f=0.75m$ $\beta=60^\circ$



## Β ΙΧ) Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 0.75m$ $\beta = 30^\circ$

