



## ΔΡΑΣΗ: «ΑΡΙΣΤΕΙΑ ΙΙ»

### ΤΙΤΛΟΣ:

«Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών  
για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών»

4916-ENSSTRAM

Επιστημονικός Υπεύθυνος: **Καθ. Χ. ΓΑΝΤΕΣ**

### ΕΝΟΤΗΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ (Ε.Ε.) 11

*Ανάπτυξη αναλυτικής μεθοδολογίας για σχεδιασμό υπόγειων  
αγωγών με εύκαμπτους κόμβους*

### ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 11.1:

*Τεχνική έκθεση ανάπτυξης αναλυτικής μεθοδολογίας για σχεδιασμό  
υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους κόμβους*

2015



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ





NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

9 Iroon Polytechniou Str., GR-15780, Zografou, Greece

## PROJECT: «ARISTEIA II»

TITLE:

«Novel design concepts for ENergy related Steel  
STRuctures using Advanced Materials»

4916-ENSSTRAM

Research Coordinator: Prof. C. GANTES

### WORK PACKAGE (W.P.) 11

*Development of an analytical methodology for the design of  
underground pipes with flexible joints*

DELIVERABLE 11.1:

*Technical report for the development of an analytical methodology  
for the design of underground pipes with flexible joints*

2015



European Union  
European Social Fund



MINISTRY OF EDUCATION & RELIGIOUS AFFAIRS, CULTURE & SPORTS  
MANAGING AUTHORITY

Co-financed by Greece and the European Union



EUROPEAN SOCIAL FUND



## Summary

---

This Research Report is the deliverable of Work Package (WP 11), of the research program with title “Novel design concepts for ENergy related Steel STRuctures using Advanced Materials” (ENSSTRAM), coordinated by Professor Ch. Gantes, of NTUA.

The Report describes the analytical solution which has been developed for the analysis and design of segmented pipelines, with flexible joints, at active fault crossings. The proposed methodology applies directly to two different crossing cases: (a) oblique crossing of the pipeline with the trace of a strike-slip fault, and (b) perpendicular crossing of the pipeline with a normal fault with random fault plane inclination.

The equally common case of oblique crossing of the pipeline with a normal fault trace can be readily analyzed with superposition of cases (a) and (b) above. It is noted that, the superposition process of the two different solution results does not reduce the accuracy of predictions as the critical pipeline sections for strike slip and normal fault crossings do not coincide, while rotation angles of the flexible joints correspond to different planes and can be vectorially added.

Development of the proposed analytical methodology was based upon the concepts incorporate in earlier analytical solutions for continuous pipelines and various fault types, presented by Karamitros et al. (2007, 2011) and Trifonov & Cherniy (2010). In summary, the pipeline is analyzed as a non-linear beam on Winkler foundation (NBWF), subjected to concurrent tension and bending. The equilibrium equations are expressed at the deformed state of the pipeline so that second order effects are consistently taken into account in the computation of bending moments and resulting pipeline strains and joint rotation angles. Note that such effects become important for the problem at hand, due to the very large anticipated ground displacements induced by an active fault rupture.

The analytical predictions for **strike-slip fault crossings** were verified against the results of twelve (12) parametric analyses for a 30" diameter pipeline with 12.5mm

wall thickness. The flexible joints were placed at 8m apart, while two extreme scenarios were considered for the location of the fault trace: in the middle between two subsequent joints and adjacent to the joint. The comparison was performed for two intersection angles, 90° (perpendicular crossing) and 60° (oblique crossing) and three fault displacements equal to 0.75m, 1.5m and 3.0m.

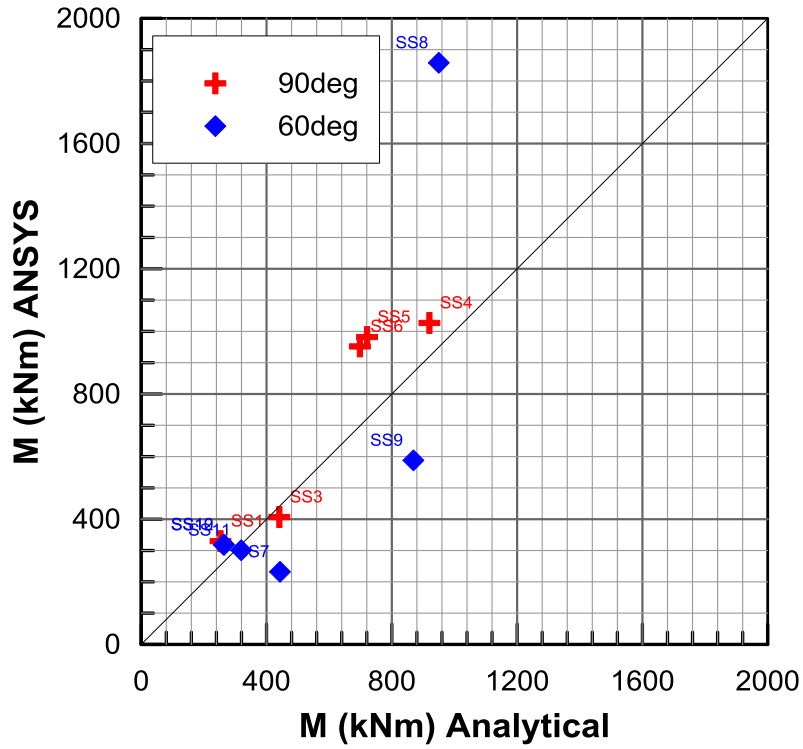
The basic input data for these analyses are listed in the following Table 1.

**Πίνακας 1:** Βασικά χαρακτηριστικά των εκτελεσθέντων παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης.

**Table 1:** Basic characteristics of the performed parametric numerical analyses for strike-slip faults.

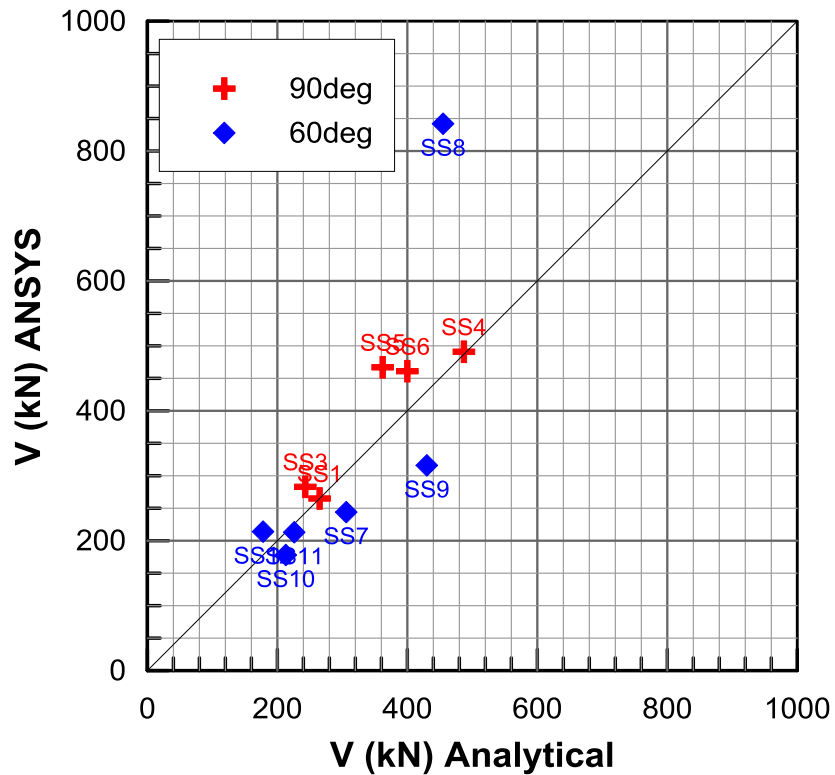
A/A	D	t (mm)	Distance between joints (m)	Crossing Position	Angle $\beta$ (°)	Fault Displacement (m)	$\Delta x$ (m)	$\Delta y$ (m)
SS1	30"	12,5	8,00	Between	90	0,75	0,00	0,75
SS2	30"	12,5	8,00	Edge	90	0,75	0,00	0,75
SS3	30"	12,5	8,00	Between	90	1,50	0,00	1,50
SS4	30"	12,5	8,00	Edge	90	1,50	0,00	1,50
SS5	30"	12,5	8,00	Between	90	3,00	0,00	3,00
SS6	30"	12,5	8,00	Edge	90	3,00	0,00	3,00
SS7	30"	12,5	8,00	Between	60	0,75	0,38	0,65
SS8	30"	12,5	8,00	Edge	60	0,75	0,38	0,65
SS9	30"	12,5	8,00	Between	60	1,50	0,75	1,30
SS10	30"	12,5	8,00	Edge	60	1,50	0,75	1,30
SS11	30"	12,5	8,00	Between	60	3,00	1,50	2,60
SS12	30"	12,5	8,00	Edge	60	3,00	1,50	2,60

In addition, Figures 1 to 6 present “one-to-one” comparisons for the basic design parameters, namely: maximum forces, moments and pipeline strains, as well as, maximum rotations of the flexible joints.



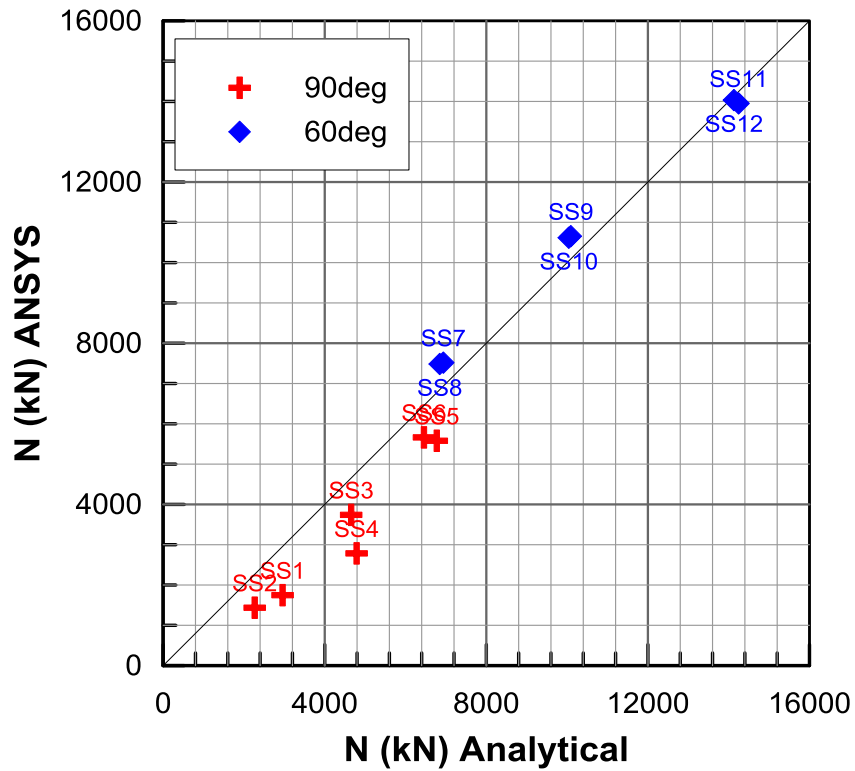
Σχήμα 1: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων: Ροπές.

Figure 1: “1-1” comparison for all parametric analyses: Moments.



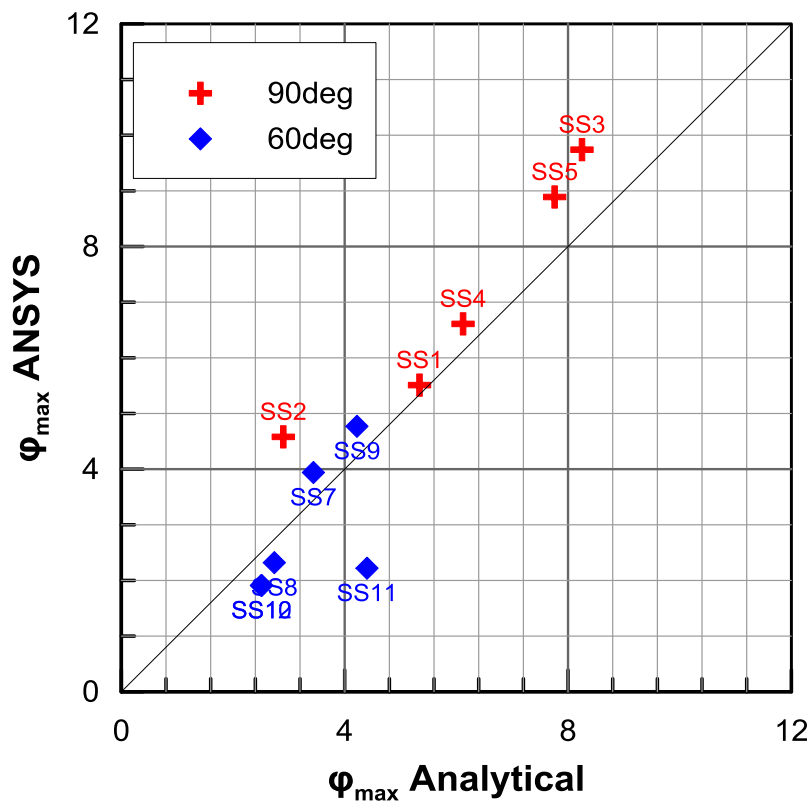
Σχήμα 2: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων: Τέμνουσες.

Figure 2: “1-1” comparison for all parametric analyses: Vertical Force.



Σχήμα 3: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων: Αξονικές.

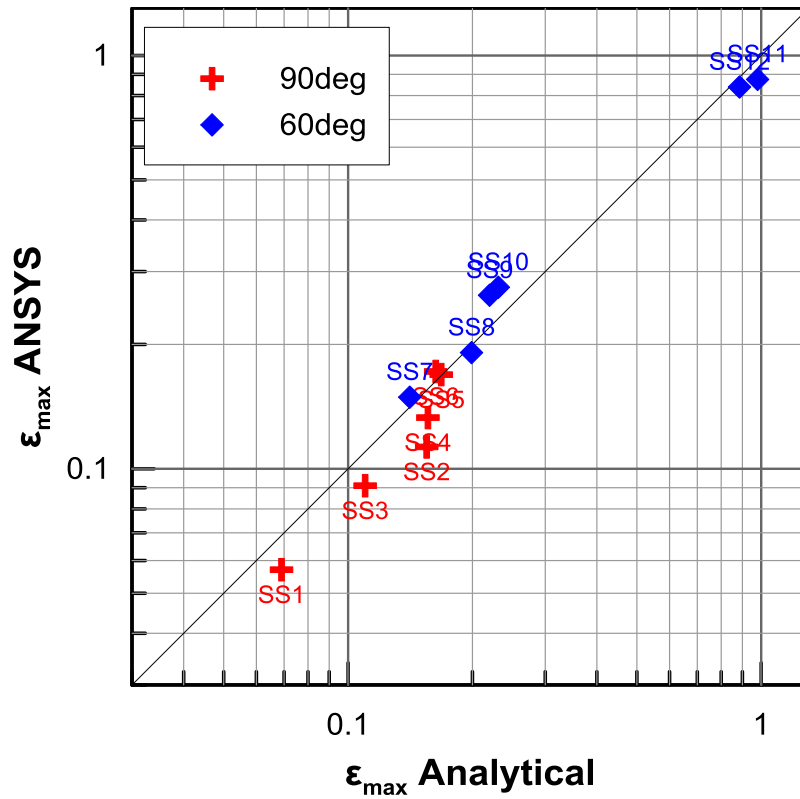
Figure 3: “1-1” comparison for all parametric analyses: Axial.



Σχήμα 4: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων:  $\phi_{max}$ .

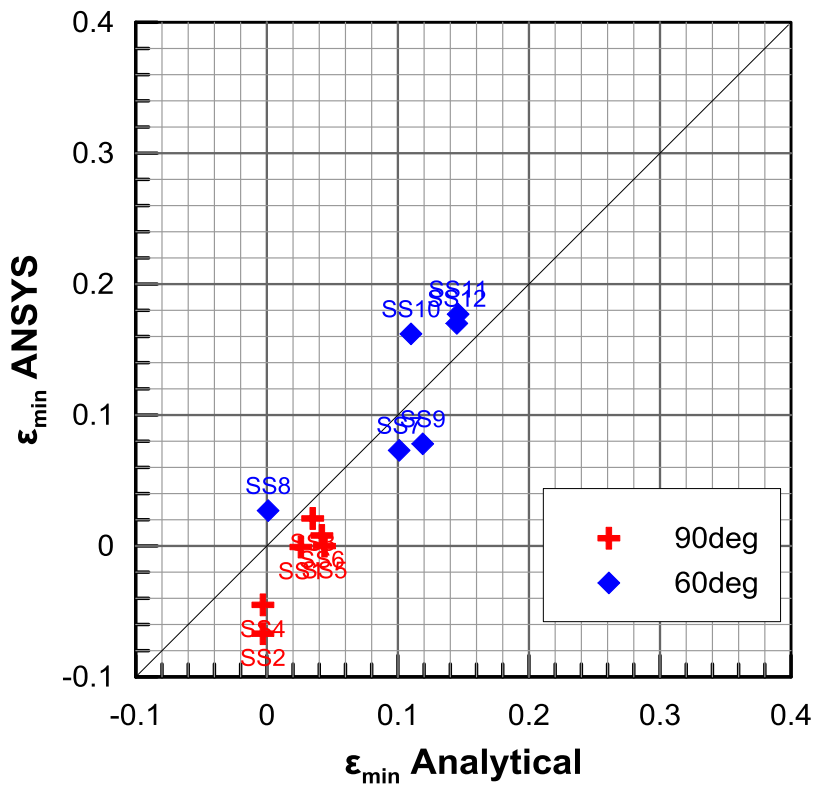
Figure 4: “1-1” comparison for all parametric analyses:  $\phi_{max}$ .





Σχήμα 5: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων:  $\epsilon_{\max}$ .

Figure 5: “1-1” comparison for all parametric analyses:  $\epsilon_{\max}$ .



Σχήμα 6: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων:  $\epsilon_{\min}$ .

Figure 6: “1-1” comparison for all parametric analyses:  $\epsilon_{\min}$ .

Similarly, the accuracy of the analytical predictions **normal fault crossings** was verified against numerical predictions from twelve (12) parametric analyses for a 30" diameter pipeline with 12.5mm wall thickness. In all analyses, the nodes were placed 8m apart, while the fault trace intersected the pipeline either at the middle of two subsequent nodes, or adjacent to a node. Solutions were provided for two different fault plane inclinations, equal to 90° (vertical plane) and 60° (incline plane), and a 90° (perpendicular) intersection between the pipeline axis and the fault trace. Applied differential ground displacements were equal to 0.375m, 0.75m και 1.5m.

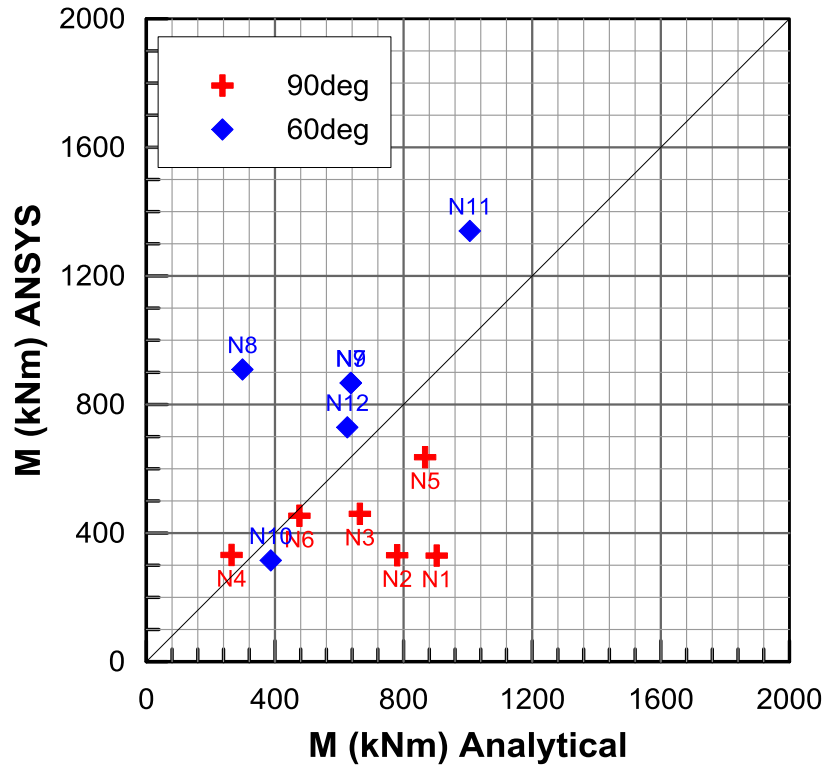
The basic input data for these analyses are listed in the following Table 2.

**Πίνακας 6.1:** Βασικά χαρακτηριστικά των εκτελεσθέντων παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων για την περίπτωση κανονικών ρηγμάτων.

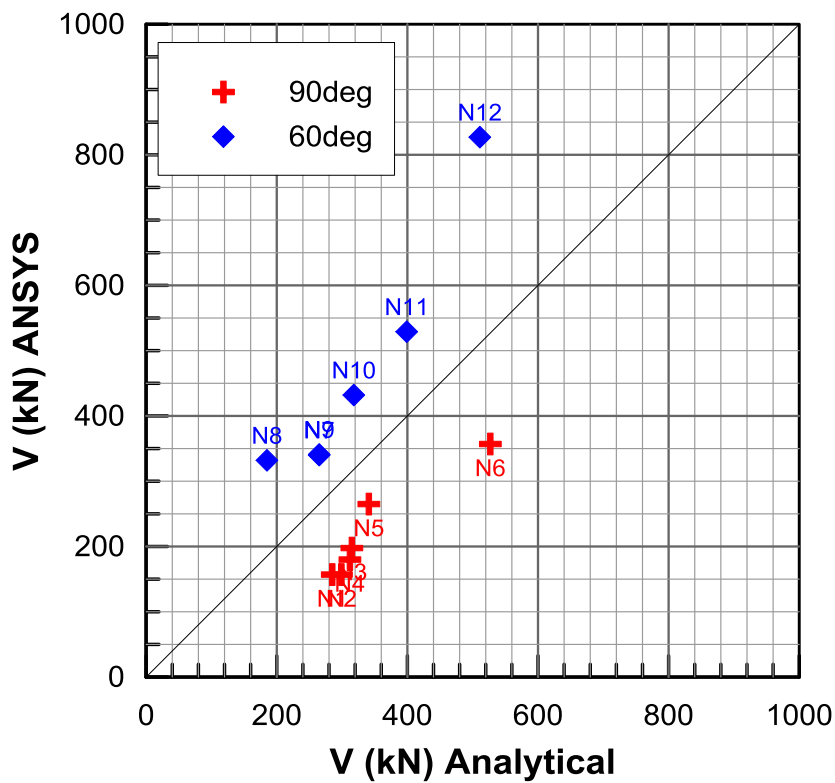
**Table 6.1:** Basic characteristics of the performed parametric numerical analyses for normal faults.

A/A	D	t (mm)	Distance between joints (m)	Crossing Position	Angle $\psi$ (°)	Fault Displacement (m)	$\Delta x$ (m)	$\Delta z$ (m)
N1	30"	12,5	8,00	Between	90	0,38	0,00	0,38
N2	30"	12,5	8,00	Edge	90	0,38	0,00	0,38
N3	30"	12,5	8,00	Between	90	0,75	0,00	0,75
N4	30"	12,5	8,00	Edge	90	0,75	0,00	0,75
N5	30"	12,5	8,00	Between	90	1,50	0,00	1,50
N6	30"	12,5	8,00	Edge	90	1,50	0,00	1,50
N7	30"	12,5	8,00	Between	60	0,38	0,19	0,32
N8	30"	12,5	8,00	Edge	60	0,38	0,19	0,32
N9	30"	12,5	8,00	Between	60	0,75	0,38	0,65
N10	30"	12,5	8,00	Edge	60	0,75	0,38	0,65
N11	30"	12,5	8,00	Between	60	1,50	0,75	1,30
N12	30"	12,5	8,00	Edge	60	1,50	0,75	1,30

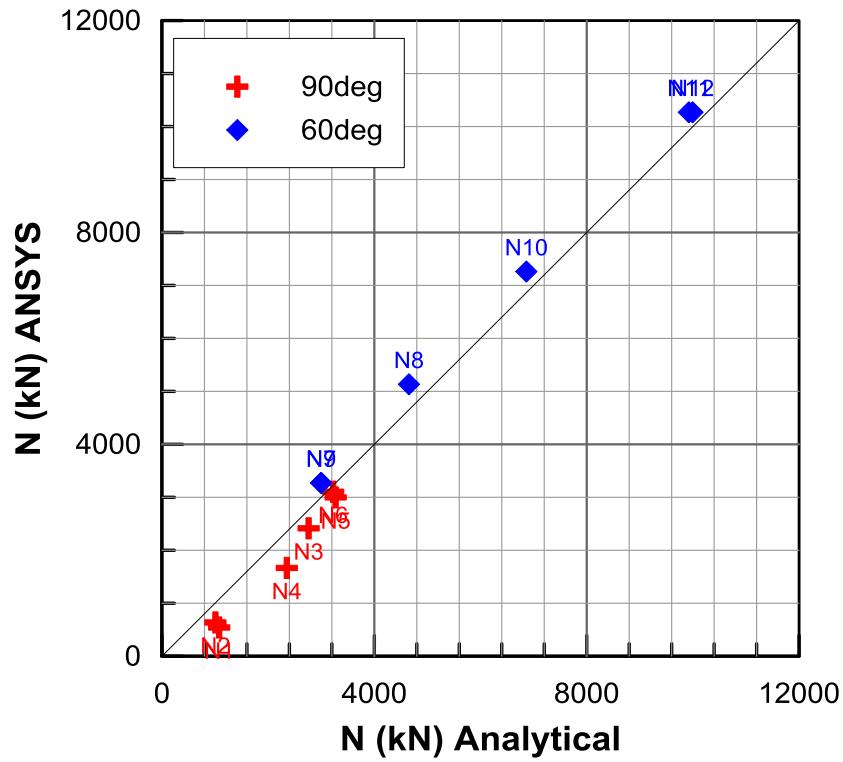
In addition, Figures 7 to 12 present “one-to-one” comparisons for the basic design parameters, namely: maximum forces, moments and pipeline strains, as well as, maximum rotations of the flexible joints.



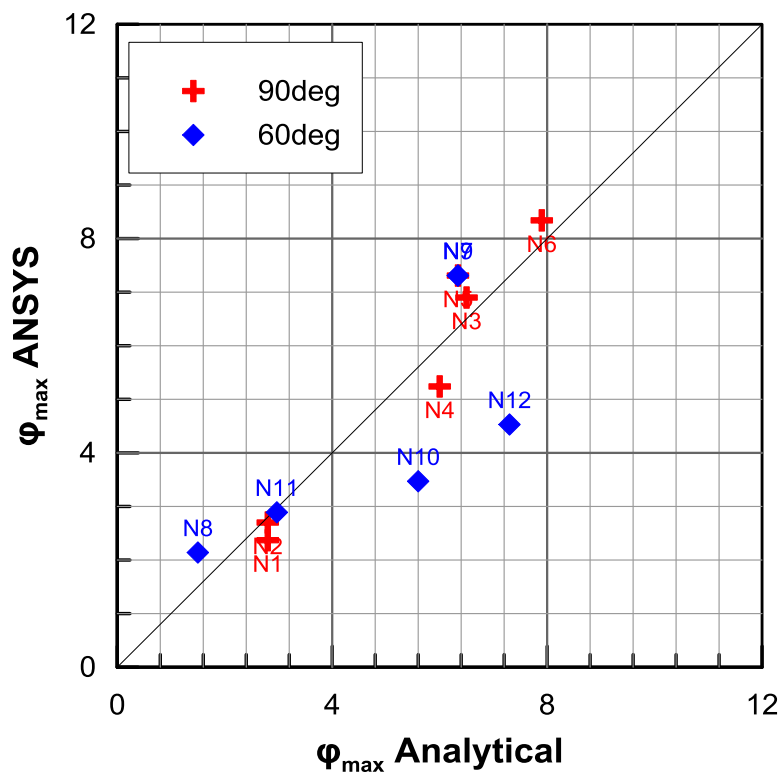
Σχήμα 7: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων: Ροπές.  
 Figure 7: “1-1” comparison for all parametric analyses: Moments.



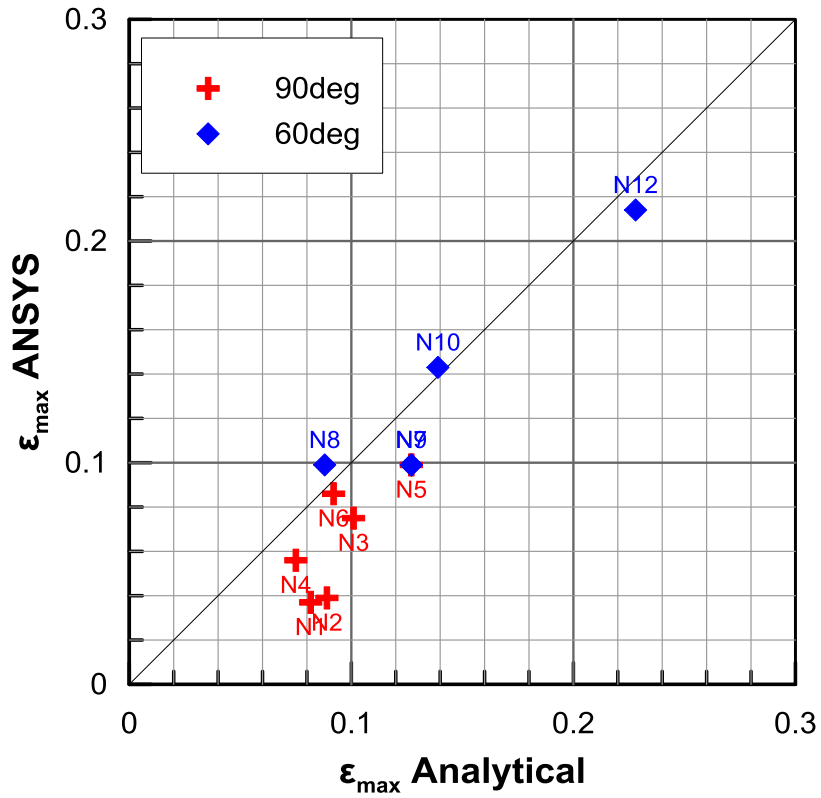
Σχήμα 8: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων: Τέμνουσες.  
 Figure 8: “1-1” comparison for all parametric analyses: Vertical Force.



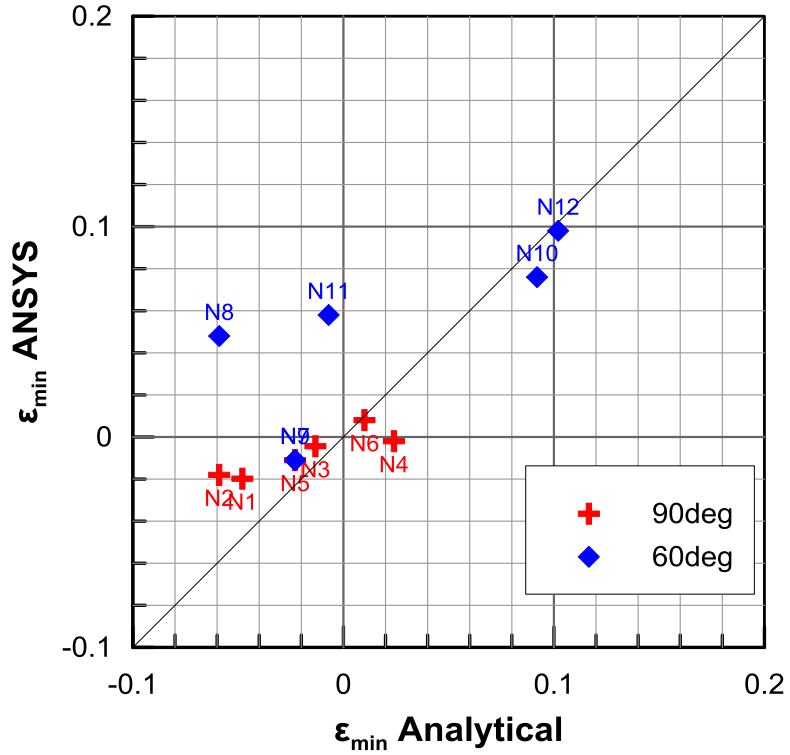
Σχήμα 9: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων: Αξονικές.  
 Figure 9: “1-1” comparison for all parametric analyses: Axial.



Σχήμα 10: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων:  $\phi_{max}$ .  
 Figure 10: “1-1” comparison for all parametric analyses:  $\phi_{max}$ .



Σχήμα 11: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων:  $\epsilon_{\max}$ .  
 Figure 11: “1-1” comparison for all parametric analyses:  $\epsilon_{\max}$ .



Σχήμα 12: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων:  $\epsilon_{\min}$ .  
 Figure 12: “1-1” comparison for all parametric analyses:  $\epsilon_{\min}$ .

Based on all previous analyses, it may be concluded that the proposed analytical prediction method provides fairly accurate results, for a wide variety of fault crossing conditions, and may be consequently applied for the preliminary design of segmented pipelines with flexible joints. Note that additional comparisons with parametric numerical predictions will be performed during the next Work Package WP 12 of this study, which aims to define the application limits of flexible joints in practice, depending on the anticipated fault displacements and the total pipeline construction cost.

# Περιεχόμενα

---

Περιεχόμενα .....	1
1. Εισαγωγή .....	3
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση      Αναλυτικών Μεθοδολογιών .....	5
2.1 Γενικά .....	5
2.2 Υπάρχουσες αναλυτικές μεθοδολογίες για συνεχείς αγωγούς .....	6
2.3 Υπάρχουσες αναλυτικές και ημι-αναλυτικές μεθοδολογίες για σπονδυλωτούς αγωγούς .....	11
2.4 Συμπεράσματα .....	19
3. Ρήγματα Οριζόντιας Ολίσθησης: Παρουσίαση Αναλυτικής Μεθοδολογίας .	21
3.1 Εισαγωγή.....	21
3.2 Παραδοχές αναλυτικής μεθοδολογίας.....	21
3.3 Ομοιότητες & Διαφορές σχετικά με τους συνεχείς αγωγούς.....	24
3.4 Περιγραφή της μεθοδολογίας .....	28
4. Ρήγματα Οριζόντιας Ολίσθησης: Σύγκριση με Αριθμητικές Αναλύσεις.....	36
4.1 Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων .....	36
4.1.1 Προσομοίωμα Πεπερασμένων Στοιχείων.....	36
4.1.2 Ελατήρια Προσομοίωσης Εδάφους.....	39
4.1.3 Προσομοίωση εόκαμπτων κόμβων .....	45
4.2 Δεδομένα Αριθμητικών Αναλύσεων .....	46
4.3 Σύγκριση με αναλυτικές προβλέψεις .....	47
5. Κανονικά Ρήγματα: Παρουσίαση Αναλυτικής Μεθοδολογίας.....	63
5.1 Εισαγωγή.....	63
5.2 Πρόσθετες παραδοχές αναλυτικής μεθοδολογίας για κανονικά ρήγματα .	63

5.3 Περιγραφή της μεθοδολογίας .....	68
<b>6. Κανονικά Ρήγματα: Σύγκριση με Αριθμητικές Αναλύσεις .....</b>	<b>75</b>
6.1 Παρουσίαση Αριθμητικών Αναλύσεων.....	75
6.2 Συγκρίσεις.....	76
<b>7. Συμπεράσματα.....</b>	<b>92</b>
<b>Βιβλιογραφικές Αναφορές.....</b>	<b>94</b>



# 1

## Εισαγωγή

---

Η παρούσα Τεχνική Έκθεση αποτελεί παραδοτέο του Ερευνητικού Προγράμματος με τίτλο:

### ΔΡΑΣΗ «ΑΡΙΣΤΕΙΑ II»

#### Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών (ENSSTRAM)

που πραγματοποιείται κάτω από το γενικό συντονισμό του Καθηγητή Χαράλαμπου Γαντέ (Κύριος Ερευνητής).

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζει τις δράσεις που προδιαγράφονται στην **Ενότητα Εργασίας Ε.Ε. 11**, με τίτλο:

*«Ανάπτυξη αναλυτικής μεθοδολογίας  
για σχεδιασμό υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους κόμβους (S-BP)»*

Το αντικείμενο της **Ενότητας Εργασίας Ε.Ε. 11**, έχει περιγραφεί στην εγκεκριμένη Ερευνητική Πρόταση ως:

*«Θα αναπτυχθεί μία εκτενής αναλυτική μεθοδολογία για επαλήθευση της σεισμικής ασφάλειας υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους κόμβους (S-BP) που υποβάλλονται σε μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις, βασισμένη στη θεώρηση “δοκού επί ελατηριωτού εδάφους” (Winkler). Θα απαιτηθούν συγκρίσεις μεταξύ των πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω, προκειμένου να εκτιμηθεί το επίπεδο της ακρίβειας της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας και να προσδιοριστούν τα όρια της εφαρμογής της σε όρους μεγέθους εδαφικών μετατοπίσεων, καθώς και χαρακτηριστικών της διατομής του αγωγού και των κόμβων».*

Το εν λόγω αντικείμενο έχει καλυφθεί πλήρως, όπως περιγράφεται στα κεφάλαια που ακολουθούν. Πιο συγκεκριμένα:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται βιβλιογραφική ανασκόπηση για υπάρχουσες αναλυτικές μεθοδολογίες σχεδιασμού συνεχών και σπονδυλωτών αγωγών.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται εκτενώς η προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης.

Στο **Κεφάλαιο 4** συγκρίνονται οι προβλέψεις της αναλυτικής μεθοδολογίας με τα αποτελέσματα από αριθμητικές αναλύσεις για την περίπτωση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται εκτενώς η προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία για κανονικά ρήγματα.

Στο **Κεφάλαιο 6** συγκρίνονται οι προβλέψεις της αναλυτικής μεθοδολογίας με τα αποτελέσματα από αριθμητικές αναλύσεις για την περίπτωση κανονικού ρήγματος.

Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα της παρούσας έκθεσης.

Οι εργασίες που περιγράφονται έχουν πραγματοποιηθεί με συμμετοχή των παρακάτω μελών της **Ερευνητικής Ομάδας**:

- Γιώργος Μπουκοβάλας, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αλέξανδρος Βαλσαμής, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Χαράλαμπος Γαντές, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αθανάσιος Τριανταφύλλου, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
- Παύλος Αστερίου, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Στυλιανός Βερνάρδος, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αριστομένης Τσαντίλης, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών

# 2

## Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Αναλυτικών Μεθοδολογιών

---

### 2.1 Γενικά

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 ίσως το πιο σοβαρό κίνδυνο που αντιμετωπίζουν οι υπόγειοι αγωγοί μεταφοράς πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Για αυτό το λόγο, η δυνατότητα να διατυπωθεί μία απλή μεθοδολογία σχεδιασμού αγωγών που διασταυρώνονται με ενεργά ρήγματα έχει απασχολήσει τους ερευνητές διεθνώς.

Οι αναλυτικές μεθοδολογίες που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία αφορούν όμως είτε συνεχείς, ευθύγραμμους υπόγειους αγωγούς, είτε σπονδυλωτούς αγωγούς όπου οι συνδέσεις αποτελούν το ευαίσθητο σημείο του σχεδιασμού τους (πιθανό σημείο αστοχίας). Στη βιβλιογραφία δεν εντοπίστηκε ούτε μία αναλυτική μεθοδολογία που να αφορά τον συνολικό σχεδιασμό αγωγών με εύκαμπτους κόμβους, το οποίο ήταν αναμενόμενο καθότι η εισαγωγή των εύκαμπτων κόμβων αποτελεί μία νέα λογική σχεδιασμού.

Αν και η συμπεριφορά ενός αγωγού με εύκαμπτους κόμβους απέχει σημαντικά από αυτή των συνεχών αγωγών, οι μεθοδολογίες για συνεχείς αγωγούς αποτελούν τη βάση για οποιαδήποτε περαιτέρω έρευνα και για αυτό θα περιγραφούν συνοπτικά. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η βιβλιογραφία για τους σπονδυλωτούς αγωγούς.

Πρέπει να σημειωθεί εκ προοιμίου ότι το σύνολο των δικτύων μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου (υψηλής πίεσης) και η πλειοψηφία των δικτύων διανομής (μέσης πίεσης) κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα και κατά συνέπεια, όλες οι υπάρχουσες μεθοδολογίες για τον σχεδιασμό υπόγειων αγωγών υπό μόνιμες μετατοπίσεις, αναφέρονται σχεδόν αποκλειστικά σε αυτό το υλικό κατασκευής.

## 2.2 Υπάρχουσες αναλυτικές μεθοδολογίες για συνεχείς αγωγούς

Ήδη από τη δεκαετία του 1970 προτάθηκαν οι πρώτες αναλυτικές λύσεις για την εκτίμηση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων σε συνεχείς, ευθύγραμμους και ομοιόμορφους αγωγούς, ενώ το ερευνητικό ενδιαφέρον στον τομέα αυτό συνεχίζεται μέχρι και σήμερα.

**Newmark & Hall (1975).**— Η πρώτη συστηματική προσπάθεια για την ανάπτυξη αναλυτικής μεθοδολογίας για το σχεδιασμό αγωγών που διασταυρώνονται με ενεργά ρήγματα, έγινε από τους Newmark & Hall (1975). Η μέθοδος προορίζεται για ρήγματα τα οποία προκαλούν επιμήκυνση του αγωγού, δηλαδή κανονικά ή οριζόντιας ολίσθησης, τα οποία συναντάει ο αγωγός υπό οξεία γωνία  $\beta$ . Τα βασικά στοιχεία και οι παραδοχές της μεθοδολογίας είναι οι εξής:

- Ο αγωγός θεωρείται λεπτότοιχος, με διάμετρο  $D$  και πάχος τοιχώματος  $t$ .
- Η συμπεριφορά του αγωγού περιγράφεται από ένα διγραμμικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων, με μέτρα ελαστικότητας  $E_1$  και  $E_2$  για την ελαστική και την πλαστική περιοχή αντίστοιχα.
- Το ρήγμα θεωρείται επίπεδο, με μηδενικό πάχος ζώνης διάρρηξης και κατά συνέπεια η μετατόπιση του ρήγματος μπορεί με απλούς γεωμετρικούς τύπους να αναλυθεί σε τρεις συνιστώσες (παράλληλα, εγκάρσια οριζόντια και εγκάρσια κατακόρυφα προς τον αγωγό).
- Θεωρώντας μεγάλες μετατοπίσεις, η αλληλεπίδραση του εδάφους με τον αγωγό εισάγεται μέσω σταθερών κατά μήκος δυνάμεων τριβής.
- Θεωρείται επαλληλία των εντάσεων που αναπτύσσονται λόγω των μετατοπίσεων σε κάθε κατεύθυνση.
- Η επίλυση γίνεται επαναληπτικά μέχρι να εξισωθεί η απαιτούμενη επιμήκυνση του αγωγού λόγω της διάρρηξης του ρήγματος με τη διαθέσιμη επιμήκυνση από την εντατική κατάσταση του αγωγού, η οποία εξαρτάται από την αξονική τάση που αναπτύσσεται στον αγωγό.

Η κυριότερη αδυναμία της μεθόδου αυτής είναι ότι αγνοεί πλήρως την αντίσταση του εδάφους στις εγκάρσιες μετακινήσεις, οι οποίες δημιουργούν εν γένει σημαντικές καμπτικές τάσεις και παραμορφώσεις στον αγωγό.

**Kenedy et al. (1977).**— Η μεθοδολογία των Kennedy et al. (1977) επέκτεινε και βελτίωσε την προγενέστερη εργασία των Newmark and Hall (1975), λαμβάνοντας υπόψη και την εγκάρσια αντίσταση του εδάφους. Τα στοιχεία και οι βασικές παραδοχές της μεθοδολογίας είναι οι εξής:

- Ο αγωγός θεωρείται λεπτότοιχος και η διασταύρωση του αγωγού με το ρήγμα σημειακή, σε αντιστοιχία με την προηγούμενη μεθοδολογία.
- Εφαρμόζεται σε κανονικά ρήγματα και ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, ενώ επικεντρώνεται σε περιπτώσεις διαρρήξεων ρήγματος οι οποίες επιβάλλουν εφελκυσμό στον αγωγό.

- Η καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων που περιγράφει τη συμπεριφορά του υλικού του αγωγού, προσεγγίζεται από τη σχέση των Ramberg και Osgood.
- Λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της εσωτερικής πίεσης του αγωγού.
- Η αλληλεπίδραση εδάφους - αγωγού λόγω της σχετικής τους μετατόπισης, περιγράφεται με την εφαρμογή των κατανεμημένων φορτίων  $p_u$ ,  $q_u$  και  $t_u$  στον αγωγό, όπου:

$p_u$  είναι η μέγιστη (παθητική) πλευρική αντίσταση του εδάφους σε οριζόντια εγκάρσια μετατόπιση του αγωγού, η οποία λαμβάνεται υπόψη μόνο στο καμπυλωμένο τμήμα.

$q_u$  είναι η οριακή αντίσταση του αγωγού στην προς τα άνω κίνηση του η οποία επίσης λαμβάνεται υπόψη στο καμπυλωμένο τμήμα. Προς τα κάτω η αντίσταση του εδάφους είναι συγκριτικά πολύ μεγαλύτερη και, ως εκ τούτου, θεωρείται άπειρη δηλ. ο αγωγός δεν καμπυλώνεται προς τα κάτω.

$t_u$  είναι η τριβή που αναπτύσσεται ανάμεσα στον αγωγό και στο έδαφος. Στο καμπυλωμένο τμήμα του αγωγού όπου αναπτύσσονται παθητικές πλευρικές ωθήσεις, η πλευρική τριβή παρουσιάζεται επαυξημένη ( $1 \div 4 t_u$ ) και συμβολίζεται με  $t_{uc}$ .

- Σε αντιστοιχία με την προηγούμενη μεθοδολογία η επίλυση γίνεται επαναληπτικά μέχρι να εξισωθεί η απαιτούμενη επιμήκυνση του αγωγού λόγω της διάρρηξης του ρήγματος και της καμπυλότητας του αγωγού με τη διαθέσιμη επιμήκυνση με ολοκλήρωση των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές τιμές της οριακής τριβής σε ευθύ και καμπυλωμένο τμήμα.

Η εν λόγω μέθοδος είναι εν γένει συντηρητική μια και παραβλέπει την καμπτική δυσκαμψία του αγωγού, κάτι που ισχύει όταν οι καμπτικές παραμορφώσεις είναι μικρότερες από το 80 % των αντίστοιχων αξονικών ή όταν όλη η διατομή του αγωγού βρίσκεται υπό διαρροή (περίπτωση μεγάλων επιβαλλόμενων μετατοπίσεων ρήγματος), οπότε και ο αγωγός συμπεριφέρεται ουσιαστικά ως καλώδιο.

**Wang & Yeh (1985).** Σε συνέχεια των Kennedy et al. (1977) οι Wang & Yeh (1985) πρότειναν μια βελτιωμένη αναλυτική μεθοδολογία για περιπτώσεις ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης. Οι παραδοχές και τα υπόλοιπα στοιχεία της μεθοδολογίας αυτής είναι:

- Ο αγωγός θεωρείται λεπτότοιχος και η διασταύρωση του αγωγού με το ρήγμα σημειακή.
- Εφαρμόζεται σε ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και για περιπτώσεις διαρρήξεων ρήγματος οι οποίες επιβάλλουν είτε εφελκυσμό είτε θλίψη στον αγωγό.

- Η συμπεριφορά του αγωγού περιγράφεται από ένα διγραμμικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων, με μέτρα ελαστικότητας  $E_1$  και  $E_2$  για την ελαστική και την πλαστική περιοχή αντίστοιχα.
- Λαμβάνεται υπόψη η καμπτική δυσκαμψία του αγωγού.
- Χωρίζουν τον αγωγό, συμμετρικά ως προς το ρήγμα, σε τέσσερα τμήματα, δύο εκ των οποίων θεωρούνται ότι κάμπτονται υπό σταθερή καμπυλότητα, ενώ τα άλλα δύο ως ημιάπειρες ελαστικές δοκούς, επί συνεχών ελατηριωτών στηρίξεων.
- Στα καμπύλα τμήματα υπάρχει πλήρης ανάπτυξη των εγκάρσιων εδαφικών ωθήσεων (μέγιστες παθητικές) και η δύναμη τριβής λαμβάνεται σταθερή και επαυξημένη λόγω αυτών.
- Στις δοκούς επί ελαστικής θεμελίωσης αναπτύσσονται σταθερές εγκάρσιες εδαφικές ωθήσεις ίσες με τις ουδέτερες ωθήσεις και η δύναμη τριβής σταθερή χωρίς επαύξηση.
- Η επίλυση γίνεται επαναληπτικά για την τιμή της έπικεντρης γωνίας των καμπύλων τμημάτων μέχρι να εξισωθούν η απαιτούμενη επιμήκυνση με τη διαθέσιμη επιμήκυνση. Στη συνέχεια προσδιορίζονται τα εντατικά μεγέθη στον αγωγό επαναληπτικά, ενώ σε κάθε βήμα προσδιορίζεται το τέμνον μέτρο ελαστικότητας του αγωγού.

Οι βασικές αδυναμίες της μεθοδολογίας είναι δύο. Πρώτον, στα καμπύλα τμήματα του αγωγού, η καμπυλότητα θεωρείται σταθερή και ανεξάρτητη από την εφελκυστική δύναμη που αναπτύσσεται σε κάθε σημείο του κυκλικού τόξου. Επιπλέον, θεωρείται 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, παραδοχή που απέχει σημαντικά από την πραγματικότητα.

**Takada et al. (2001).** \_ Οι Takada, Hassani και Fukuda πρότειναν το 2001 μία μέθοδο, που συνδυάζει απλές αναλυτικές επιλύσεις με αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Τα βασικά στοιχεία και οι παραδοχές της μεθοδολογίας αυτής είναι:

- Ο αγωγός θεωρείται λεπτότοιχος και η διασταύρωση του αγωγού με το ρήγμα σημειακή.
- Εφαρμόζεται σε ρήγματα κανονικά και οριζόντιας ολίσθησης, για περιπτώσεις διαρρήξεων ρήγματος οι οποίες επιβάλλουν είτε εφελκυσμό είτε θλίψη στον αγωγό.
- Η συμπεριφορά του αγωγού περιγράφεται από ένα διγραμμικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων, με μέτρα ελαστικότητας  $E_1$  και  $E_2$  για την ελαστική και την πλαστική περιοχή αντίστοιχα.
- Οι επιβαλλόμενες τάσεις στον αγωγό σύμφωνα με τις προτάσεις των Kennedy et al. (1977)
- Λαμβάνεται υπόψη και 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.

- Κατά την επίλυση υπολογίζεται το καμπυλωμένο τμήμα σύμφωνα με τους Kennedy et al. (1977) και ακολουθεί ανάλυση κελυφών για την εύρεση της μέγιστης παραμόρφωσης του αγωγού.

Η μεθοδολογία προτείνει να λαμβάνεται υπόψη η στρέβλωση της διατομής, σε αντίθεση με τους προγενέστερους μελετητές, γεγονός που αφορά μέγιστες παραμορφώσεις του αγωγού πέραν του 2-3% οι οποίες είναι και οι κατά μέγιστο επιτρεπόμενες από τους ισχύοντες Κανονισμούς για τον χάλυβα του αγωγού.

**Karamitros et al (2007).**\_ Οι Karamitros et al. (2007) πρότειναν μία αρχικά μια αναλυτική για τον έλεγχο ευθύγραμμων αγωγών σε διασταυρώσεις με ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης των οποίων οι στατικά επιβαλλόμενες μετατοπίσεις προκαλούν εφελκυσμό στον αγωγό. Τα βασικά στοιχεία της μεθοδολογίας είναι τα εξής:

- Ο αγωγός θεωρείται λεπτότοιχος και η διασταύρωση του αγωγού με το ρήγμα σημειακή.
- Η εφαρμογή της περιορίζεται στα επιτρεπτά όρια παραμορφώσεων των αγωγών, τα οποία καθορίζονται από τους ισχύοντες Κανονισμούς.
- Η συμπεριφορά του αγωγού περιγράφεται από ένα δι-γραμμικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων, με μέτρα ελαστικότητας  $E_1$  και  $E_2$  για την ελαστική και την πλαστική περιοχή αντίστοιχα.
- Σε αντιστοιχία με τη μεθοδολογία των Wang & Yeh (1985) ο αγωγός χωρίζεται σε τέσσερα τμήματα συμμετρικά ως προς τη διασταύρωση με το ρήγμα.
- Η ανάλυση των τμημάτων του αγωγού που βρίσκονται στην περιοχή υψηλών καμπυλοτήτων σύμφωνα με τη θεωρία ελαστικής δοκού στα οποία ασκείται σταθερή εδαφική αντίσταση (ίση με την οριακή τιμή), ενώ τα άλλα δύο αναλύονται ως δοκοί επί ελαστικών στηριξεων και η εδαφική αντίσταση σε κάθε σημείο είναι ανάλογη της εγκάρσιας μετατόπισης του αγωγού.
- Η τριβή και στα δύο τμήματα θεωρείται η ίδια, παραμένει σταθερή σε όλο το μήκος τους και ίση με την οριακή της τιμή, δίχως προσαύξηση του μεγέθους της στο καμπύλο τμήμα λόγω ανάπτυξης σε αυτό παθητικών εδαφικών πιέσεων.
- Η εκτίμηση της επίδρασης της καμπυλότητας στις αξονικές παραμορφώσεις γίνεται μέσω της θεώρησης της ακριβούς κατανομής των τάσεων στη διατομή του αγωγού.
- Η επίλυση γίνεται επαναληπτικά, υπολογίζοντας σε κάθε βήμα το τέμνον μέτρο ελαστικότητας του αγωγού, μέχρι τη σύγκλιση.

Η σύγκριση των αναλυτικών αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας με αριθμητικές αναλύσεις δείχνει ότι εκτιμά με ικανοποιητική ακρίβεια τις αναμενόμενες

παραμορφώσεις, ενώ ο κύριος περιορισμός της είναι η συμμετρικότητα της επίλυσης που περιορίζει την εφαρμογή της μόνο σε ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης.

**Trifonov & Cherniy (2010).**\_ Οι Trifonov & Cherniy (2010) πρότειναν μία ημι-αναλυτική μεθοδολογία για την ανάλυση αγωγών που διασταυρώνονται με κανονικά ή και οριζόντιας ολίσθησης ρήγματα. Οι ερευνητές ακολουθούν την προτεινόμενη μεθοδολογία των Karamitros et al. (2007), στην οποία έχουν κάνει τις παρακάτω βελτιώσεις:

- Ο αγωγός χωρίζεται σε τέσσερα τμήματα σύμφωνα με την πρόταση των Karamitros et al. (2007), τα οποία όμως δε θεωρούνται συμμετρικά ως προς το ρήγμα με αποτέλεσμα να μπορούν να αναλυθούν και περιπτώσεις κανονικών ρηγμάτων.
- Λαμβάνεται υπόψη και η επιμήκυνση του αγωγού λόγω των εγκάρσιων μετατοπίσεων.
- Εισάγεται η επιρροή της αξονικής δύναμης μέσα στις εξισώσεις ισορροπίας του καμπύλου τμήματος, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ανάγκη εκτίμησης της αλληλεπίδρασης μεταξύ των αξονικών και των καμπτικών παραμορφώσεων.
- Ο αγωγός χωρίζεται σε δύο τμήματα: στο τμήμα που λειτουργεί ως «δοκός» και στο τμήμα που λειτουργεί ως «καλώδιο»

Η μεθοδολογία συγκρίνεται ικανοποιητικά με τις αριθμητικές αναλύσεις, ενώ η εφαρμογή της απαιτεί την χρήση ειδικού λογισμικού για την επίλυση των μη γραμμικών αναλύσεων ισορροπίας και συμβιβαστού των μετατοπίσεων.

**Karamitros et al (2011).**\_ Επέκτειναν την μεθοδολογία των Karamitros et al. (2007) στον αναλυτικό υπολογισμό των παραμορφώσεων σε αγωγούς λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος. Η επίλυση ακολουθεί την εν λόγω προγενέστερη μεθοδολογία, με τις παρακάτω διαφορές:

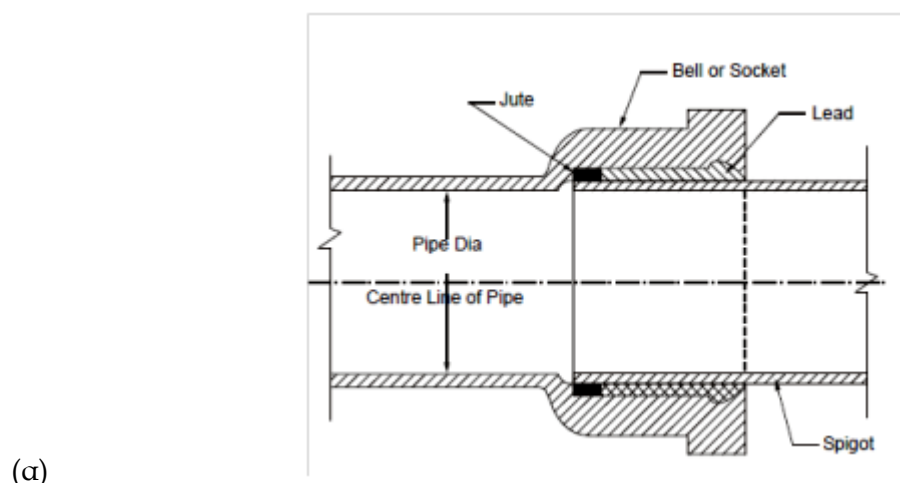
- Δεν υπάρχει συμμετρία φόρτισης και επομένως η ανάλυση δε μπορεί να επικεντρωθεί στο μισό μόνο τμήμα του αγωγού αλλά σε όλο το μήκος του.
- Οι εγκάρσιες δυνάμεις που ασκούνται από το έδαφος είναι διαφορετικές στο σταθερό και στο ολισθαίνον τέμαχος του ρήγματος. Αντίστοιχα οι αναπτυσσόμενες ροπές και παραμορφώσεις διαφέρουν στα τμήματα του αγωγού πριν και μετά το ρήγμα.
- Το σημείο μηδενισμού των ροπών δε βρίσκεται πάνω στη διασταύρωση του αγωγού με το ρήγμα αλλά προς το σταθερό τέμαχος του ρήγματος.
- Σε συνδυασμό με την προηγούμενη μεθοδολογία των Karamitros et al. (2007) για την εκτίμηση των παραμορφώσεων σε ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, η εν λόγω μεθοδολογία καλύπτει ουσιαστικά όλους τις περιπτώσεις ρηγμάτων (οριζόντιας ολίσθησης & κανονικά) καθώς και όλες τις γωνίες τομής (αρκεί να οδηγούν σε αξονικό εφελκυσμό και όχι σε θλίψη).



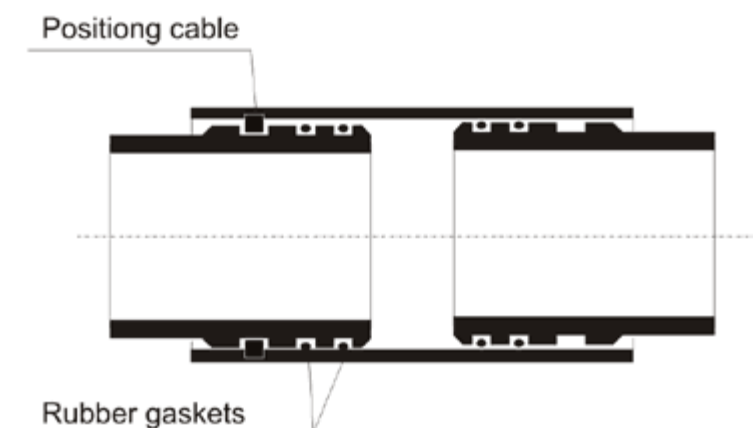
Η μεθοδολογία συγκρίνεται πολύ καλά με τις αριθμητικές αναλύσεις για την εκτίμηση των μέγιστων αναμενόμενων παραμορφώσεων του αγωγού, χωρίς να απαιτεί ειδικό λογισμικό επίλυσης των αντίστοιχων εξισώσεων.

### 2.3 Υπάρχουσες αναλυτικές και ημι-αναλυτικές μεθοδολογίες για σπονδυλωτούς αγωγούς

Σπονδυλωτοί αγωγοί (segmented pipes) ονομάζονται οι αγωγοί που αποτελούνται από όμοια τμήματα τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με τρόπο που δεν εξασφαλίζει απόλυτα τη συνέχεια μεταξύ των τμημάτων, όπως συμβαίνει με τη συγκόλληση διαδοχικών τμημάτων του αγωγού. Όπως έχει αποδειχτεί πολλές φορές στο παρελθόν, π.χ. σε ιστορικά περιστατικά σεισμών (π.χ. Sun & Shien 1983, O'Rourke & Ballantyne 1992), οι ενώσεις αυτές αποτελούν ευαίσθητα σημεία του αγωγού και σχετίζονται με λειτουργικές ή/και δομικές αστοχίες. Παρόλο που η ακριβής διαμόρφωση τους εξαρτάται από τον κατασκευαστή των σωλήνων, ο συνηθέστερος τύπος σύνδεσης είναι τηλεσκοπικής μορφής (bell and spigot joints), όπως αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1α.



(α)



(β)

**Σχήμα 2.1:** Συνήθεις ενώσεις αγωγών: α) τηλεσκοπικής μορφής και β) με εξωτερικό χιτώνιο.

**Figure 2.1:** Common types of pipe joints: a) bell & spigot and b) sleeve coupling.

Για την αναλυτική προσομοίωση των σπονδυλωτών αγωγών (segmented pipelines) γίνονται αντίστοιχες παραδοχές με την προσομοίωση των συνεχών αγωγών, δηλαδή το κάθε τμήμα του αγωγού θεωρείται ότι αποτελεί μία ελαστική δοκό που εδράζεται σε ελαστοπλαστικά εδαφικά ελατήρια, στην κατακόρυφη και στην οριζόντια διεύθυνση (ALA Guidelines 2001).

Πιο συγκεκριμένα, αν και αυτού του είδους οι αγωγοί έχουν αρκετές ομοιότητες με τους αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους που εξετάζουμε, η ουσιαστική διαφορά με την περίπτωση που εξετάζεται στην έκθεση αυτή είναι ότι τα τμήματα του αγωγού συνδέονται μεταξύ τους με συνδέσεις που έχουν τη δυνατότητα στροφής αλλά και σχετικής μετακίνησης. Επιπλέον, θεωρείται ότι τα ενδιάμεσα τμήματα του αγωγού διέπονται από ελαστικό νόμο φορτίου-μετατόπισης, ή παραμένουν απολύτως απαραμόρφωτα, παραδοχές που είναι κοντά στην πραγματικότητα για συνήθεις αγωγούς (π.χ. ύδρευσης, αποχέτευσης) αλλά όχι για τους λεπτότοιχους αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους που εξετάζονται εδώ.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι οι συνδέσεις σε αυτήν την περίπτωση αποτελούν το ευαίσθητο σημείο της διάταξης, βάζοντας σοβαρούς περιορισμούς στις μέγιστες επιβαλλόμενες μετακινήσεις που μπορούν να ανεχτούν οι συνδέσεις λόγω της διάρρηξης του ρήγματος. Αντίθετα στο σχεδιασμό με εύκαμπτους κόμβους, οι κόμβοι δρουν βοηθητικά στην αντοχή του αγωγού, εφόσον απομειώνουν τις καμπτικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε αυτόν και, στο βαθμό που είναι σωστά διαστασιολογημένοι, ο σχεδιασμός γίνεται σύμφωνα με την αντοχή του αγωγού σε παραμόρφωση (όριο εφελκυστικής παραμόρφωσης: όριο αντοχής συγκολλήσεων, όριο θλιπτικής παραμόρφωσης: αποφυγή τοπικού λυγισμού).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι αναλυτικές μεθοδολογίες για σπονδυλωτούς αγωγούς που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία.

**O'Rourke & Trautmann (1981).** Οι εν λόγω ερευνητές θεώρησαν ότι ο ίδιος ο αγωγός μπορεί να θεωρηθεί απολύτως απαραμόρφωτος ( $EA=\infty$ ,  $EI=\infty$ ), σε σύγκριση με τις πολύ μικρότερης αντοχής συνδέσεις των τμημάτων του αγωγού. Έτσι η επιβαλλόμενη μετατόπιση του ρήγματος εντοπίζεται αποκλειστικά στις συνδέσεις των τμημάτων του αγωγού. Με βάση απλές γεωμετρικές σχέσεις εκτιμήθηκε ότι η επιτρεπόμενη μετακίνηση του ρήγματος  $\delta_f$  δίνεται από τη σχέση:

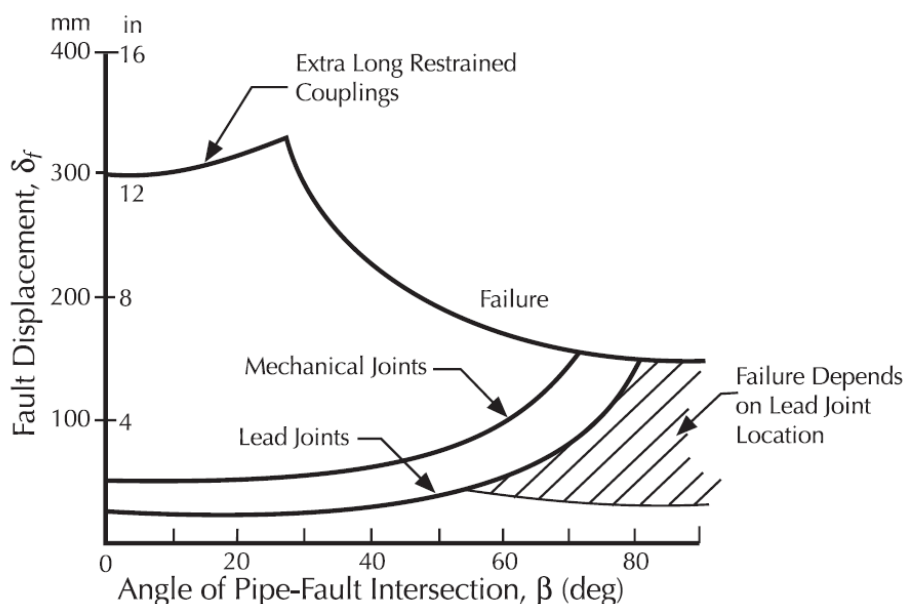
$$\delta_f = \min \left\{ \begin{array}{l} \delta_a \frac{1}{\cos\beta} \\ \delta_l \frac{1}{\sin\beta} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

- όπου  $\beta$  η γωνία διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό,  
 $\delta_a$  η ικανότητα διαμήκους μετακίνησης της κάθε σύνδεσης και  
 $\delta_l$  η ικανότητα εγκάρσιας μετακίνησης της κάθε σύνδεσης, η οποία εξαρτάται από την ικανότητα στροφής της σύνδεσης και μπορεί να υπολογιστεί από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για τυπικούς αγωγούς.

Δεδομένου ότι το είδος της αναμενόμενης αποτυχίας εξαρτάται από τη γωνία  $\beta$  διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό (για μικρές  $\beta$  επικρατούν οι αξονικές μετακινήσεις και για μεγάλες  $\beta$  οι εγκάρσιες), οι ερευνητές πρότειναν την ακόλουθη Εξίσωση 2.2 για την εκτίμηση της βέλτιστης γωνίας διασταύρωσης, δηλαδή τη γωνία που επιτρέπει τη μέγιστη μετατόπιση του ρήγματος χωρίς να αποχήσουν οι συνδέσεις σε εφελκυσμό ή στροφή.

$$\beta_{optimal} = \arctan\left(\frac{\delta_l}{\delta_a}\right) \quad (2.2)$$

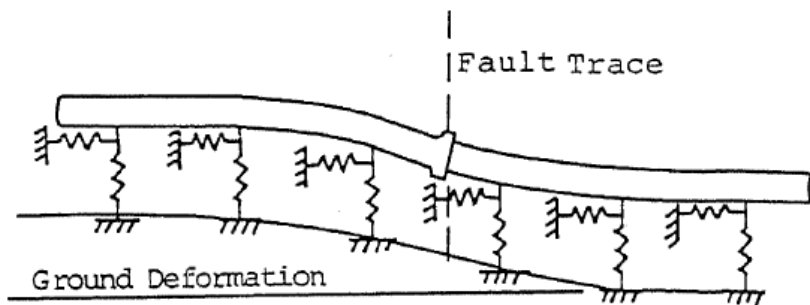
Επιπροσθέτως, λαμβάνοντας υπόψη τα συνήθη υλικά κατασκευής συνδέσεων (τύπων αντιστοιχών με αυτές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1), πρότειναν τελικά το Σχήμα 2.1 για την εκτίμηση της μέγιστης επιτρεπόμενης μετακίνησης του ρήγματος συναρτήσει της γωνίας διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό και του είδους της σύνδεσης.



**Σχήμα 2.2:** 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).

**Figure 2.2:** Maximum allowable fault displacement relatively to the crossing angle of the fault and the segmented pipe joint type according to O'Rourke & Trautmann (1981).

**Takada (1984).** Ο Takada (1984) παρουσίασε το αναλυτικό προσομοίωμα του Σχήματος 2.3 για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός σπονδυλωτού αγωγού υποκειμένου σε μετακινήσεις λόγω διάρρηξης ενεργού ρήγματος. Ο αγωγός θεωρήθηκε ότι αποτελείται από τμήματα ελαστικής δοκού, τα οποία συνδέονται κατά μήκος με εύκαμπτους κόμβους που ακολουθούν μη-γραμμικούς νόμους σχετικής μετακίνησης και στροφής. Το έδαφος προσομοιώθηκε με ελατήρια winkler κατά μήκος και κάθετα προς τον αγωγό, τα οποία ακολουθούν ελαστοπλαστικές σχέσεις φορτίου μετατόπισης. Η μετακίνηση του ρήγματος επιβλήθηκε στις άκρες των ελατηρίων του εδάφους.



**Σχήμα 2.3:** Αναλυτικό προσομοίωμα σπονδυλωτού αγωγού σύμφωνα με τον Takada (1984).

**Figure 2.3:** Analytical model of segmented pipeline simulation according to Takada (1984).

Ο ερευνητής βασίστηκε στις σχέσεις ελαστικής δοκού για τις κατά μήκος και για τις εγκάρσιες μετακινήσεις

$$-EA \frac{d^2u}{dx^2} = k_u(U - u) \quad (2.3)$$

$$EI \frac{d^4v}{dx^4} = k_v(V - v) \quad (2.4)$$

όπου  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του αγωγού,  $A$  και  $I$  είναι η επιφάνεια και η γεωμετρική ροπή ακαμψίας της διατομής του, ενώ  $k_u$  και  $k_v$  είναι οι αντιστάσεις των ελατηρίων του εδάφους κατά μήκος και εγκάρσια αντίστοιχα προς τον άξονα του αγωγού. Οι μετακινήσεις  $u$  και  $v$  συμβολίζουν τις παραμορφώσεις του αγωγού και οι  $U$  και  $V$  τις εδαφικές μετακινήσεις κατά μήκος και εγκάρσια προς τον άξονα του αγωγού. Οι ακόλουθες σχέσεις περιγράφουν την μετατόπιση και τη δύναμη στο δεξιό άκρο της δοκού  $k$  σε σχέση με αυτές στο αριστερό άκρο της δοκού  $k+1$ .

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ \varphi \end{pmatrix}_{k+1}^L = \begin{pmatrix} u \\ v \\ \varphi \end{pmatrix}_k^R + \begin{pmatrix} -N/k_T \\ -M/k_R \\ 0 \end{pmatrix}_k^R \quad (2.5)$$

$$\begin{pmatrix} N \\ M \\ Q \end{pmatrix}_{k+1}^L = \begin{pmatrix} N \\ M \\ Q \end{pmatrix}_k^R \quad (2.6)$$

όπου  $k_T$  και  $k_R$  είναι οι δυσκαμψίες των ελατηρίων μετακίνησης (κατά μήκος) και στροφής που αντιπροσωπεύουν τις μηχανικές ιδιότητες του τυπικού εδάμπτου 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 2.4.

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{array}{c} l_k \rightarrow (\otimes) \leftarrow l_{k+1} \\ M_k^R \quad M_{k+1}^L \end{array} & 
 \begin{array}{c} l_k \uparrow (\otimes) \downarrow l_{k+1} \\ Q_k^R \quad Q_{k+1}^L \end{array} & 
 \begin{array}{c} l_k \leftarrow (\otimes) \rightarrow l_{k+1} \\ N_k^R \quad N_{k+1}^L \end{array} \\
 \left\{ \begin{array}{l} M_{k+1}^L = M_k^R \\ = -k_R (\phi_{k+1}^L - \phi_k^R) \end{array} \right. & 
 Q_{k+1}^L = Q_k^R & 
 \left\{ \begin{array}{l} N_{k+1}^L = N_k^R \\ = -k_T (u_{k+1}^L - u_k^R) \end{array} \right.
 \end{array}$$

Σχήμα 2.4: Σχέσεις ισορροπίας στους κόμβους σύμφωνα με τον Takada (1984).

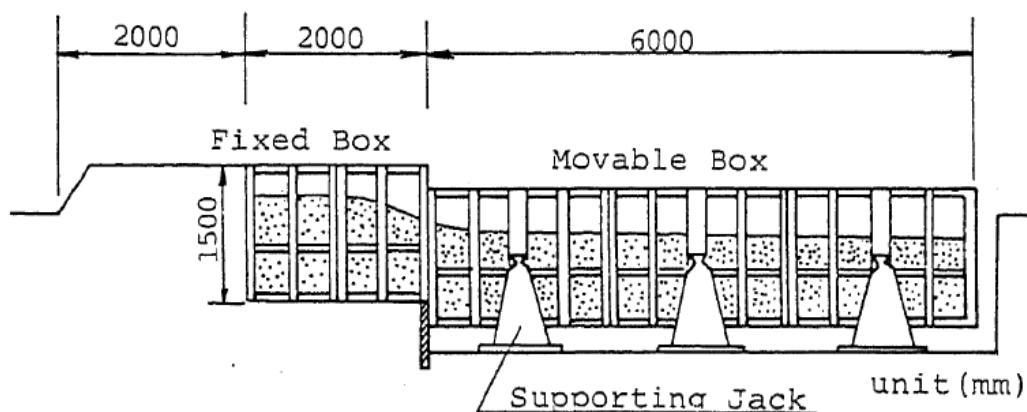
Figure 2.4: Equilibrium state at joints according to Takada (1984).

Προς αξιολόγηση της αναλυτικής λύσης, πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα (με την πειραματική διάταξη του Σχήματος 2.5), εξετάζοντας δύο περιπτώσεις οπονδλωτών 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.



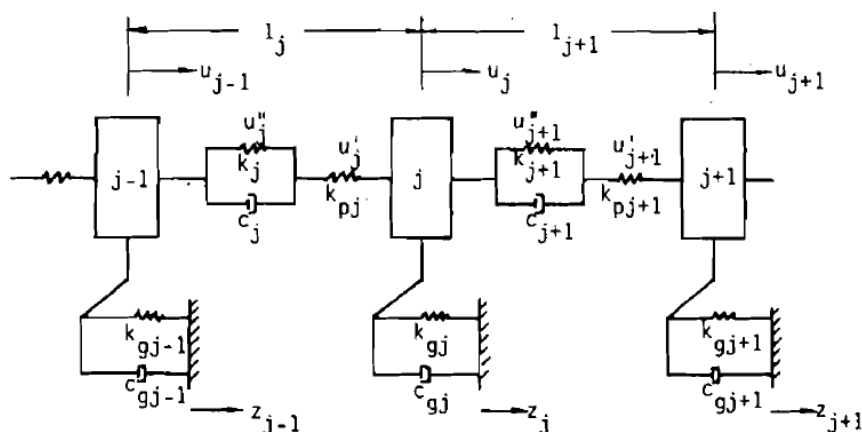
Σχήμα 2.5: Πειραματική διάταξη του Takada (1984).

Figure 2.5: Experimental apparatus from Takada (1984).

**Tan & Yang (1988).** Μελετήθηκε η συμπεριφορά υπόγειων οπονδλωτών αγωγών υποκείμενων σε παραμορφώσεις λόγω της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, και πρότάθηκε το αναλυτικό προσομοίωμα του Σχήματος 2.6 για την εκτίμηση των αναμενόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό και των σχετικών μετακινήσεων στις συνδέσεις. Το υλικό του αγωγού θεωρήθηκε ελαστικό, ενώ κάθε σύνδεση

αντικαταστάθηκε από ένα ελατήριο και ένα αποσβεστήρα. Η μεθοδολογία αυτή δεν αφορά άμεσα το υπό εξέταση πρόβλημα και αναφέρεται για λόγους πληρότητας της παρουσίασης των αναλυτικών μεθοδολογιών που αφορούν σπονδυλωτούς αγωγούς.

Με βάση αυτό το αναλυτικό προσομοίωμα, μελετήθηκε και η περίπτωση που ο αγωγός βρίσκεται σε μη-ομοιόμορφο εδαφικό προφίλ, ενώ κατέληξαν ότι για τα περισσότερα προβλήματα η ψευδο-στατική ανάλυση της συμπεριφοράς του αγωγού επαρκεί, αν και υποεκτιμούνται οι παραμορφώσεις στον αγωγό οδηγώντας σε συντηρητική εκτίμηση των συνδέσεων. Επιπροσθέτως διαπιστώθηκε ότι οι παραμορφώσεις του αγωγού και οι σχετικές μετακινήσεις στις συνδέσεις είναι συνάρτηση του λόγου  $k/k_p$ , δηλαδή του λόγου της δυσκαμψίας των συνδέσεων ως προς τη δυσκαμψία του αγωγού. Όσο αυξάνεται ο λόγος αυτός, τόσο μεγαλύτερες παραμορφώσεις αναμένονται στον αγωγό και μικρότερες σχετικές μετακινήσεις στις συνδέσεις.



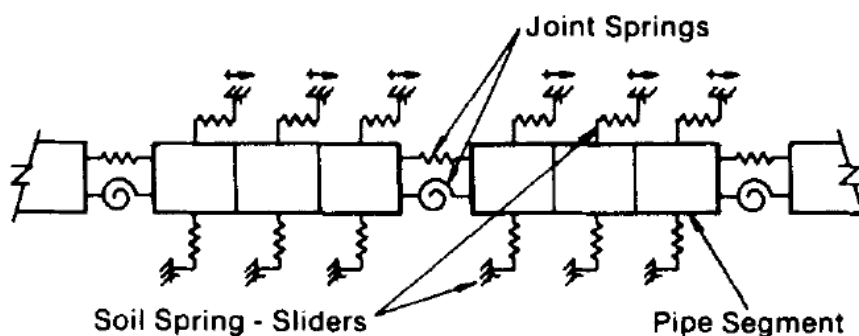
**Σχήμα 2.6:** Αναλυτικό προσομοίωμα σπονδυλωτού αγωγού σύμφωνα με τους Tan & Yang (1988).

**Figure 2.6:** Analytical model of segmented pipeline simulation according to Tan & Yang (1988).

**Elhmedi & O'Rourke (1990).** Αντίστοιχο αναλυτικό προσομοίωμα με το προηγούμενο χρησιμοποιήθηκε και από τους Elhmedi & O'Rourke (1990) για την προσομοίωση σπονδυλωτού αγωγού υποκειμένου σε παραμορφώσεις λόγω σεισμικών κυμάτων, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7. Και αυτή η μεθοδολογία δεν αφορά άμεσα το υπό εξέταση πρόβλημα και αναφέρεται για λόγους πληρότητας της παρουσίασης.

Κάθε ευθύγραμμο τμήμα του αγωγού προσομοιώθηκε από μία σειρά στοιχείων δοκού και αγνοήθηκαν οι δακτυλιοειδείς τάσεις που αναπτύσσονται στο τοίχωμα, δεχόμενοι ότι η κύρια μορφή αστοχίας που παρατηρείται σε τέτοιου είδους αγωγούς είναι η εφελκυστική διάρρηξη της σύνδεσης. Οι συνδέσεις προσομοιώθηκαν με δι-

γραμμικά αξονικά και στροφικά ελατήρια. Το έδαφος προσομοιώθηκε με ελαστοπλαστικά ελατήρια τόσο εγκάρσια (spring) όσο και κατά μήκος (sliders) της διεύθυνσης του αγωγού.



**Σχήμα 2.7:** Αναλυτικό προσομοίωμα σπονδυλωτού αγωγού σύμφωνα με τους Elhmedi & O'Rourke (1990).

**Figure 2.7:** Analytical model of segmented pipeline simulation according to Elhmedi & O'Rourke (1990).

**ALA Guidelines (ASCE 2005).** Ο εν λόγω κανονισμός αφορά οδηγίες για τη σεισμική εξασφάλιση αγωγών νερού (ύδρευση, άρδευση, αποχέτευση). Δεδομένου ότι ένα μεγάλο μέρος τέτοιων αγωγών κατασκευάζεται με συνδέσεις, προβλέφθηκε αναλυτική μεθοδολογία για την εκτίμηση των παραμορφώσεων στις συνδέσεις για την περίπτωση οριζόντιας διάρρηξης ενεργού ρήγματος που διασταυρώνεται με σπονδυλωτό αγωγό. Η ανάλυση βασίστηκε στην παραδοχή ότι το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό στη μέση ενός από τα τμήματα του, ενώ οι συνδέσεις θεωρούνται ότι λειτουργούν ως αρθρώσεις, δηλαδή μπορούν να στρίψουν ελεύθερα και να μεταφέρουν μόνο τέμνουσες δυνάμεις τριβής. Σε αυτή την περίπτωση, επιβάλλονται οι παρακάτω αξονικές και γωνιακές μετατοπίσεις, συμμετρικά σε κάθε μία από τις δύο συνδέσεις:

$$\delta_{joint} = \frac{\delta}{2} \cos\beta \quad (2.7)$$

$$\gamma_{joint} = \text{Arcsin}\left(\frac{\delta}{L_p} \sin\beta\right) \quad (2.8)$$

όπου  $\delta$  η μετακίνηση του ρήγματος

$\beta$  η γωνία διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό και

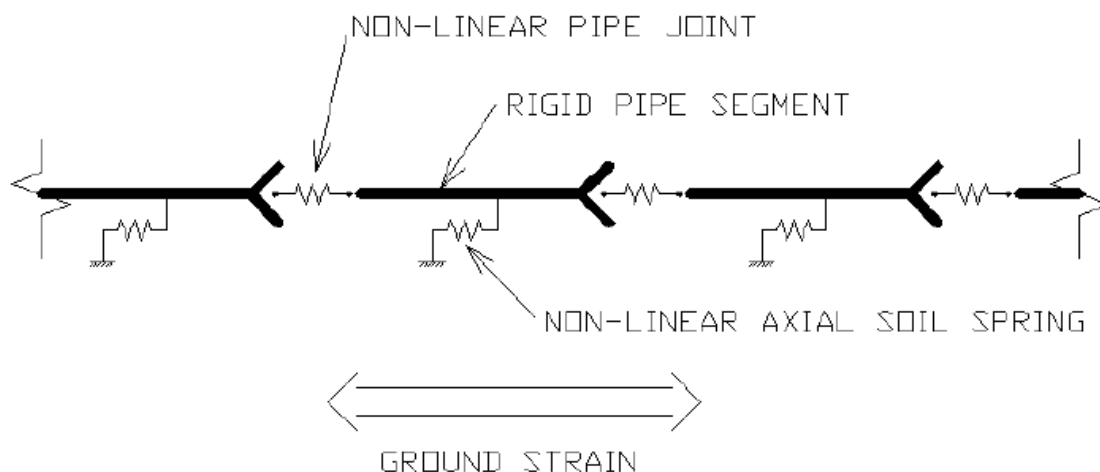
$L_p$  το μήκος του κάθε τμήματος του αγωγού μεταξύ των συνδέσεων.

Θεωρώντας 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:

$$V = \frac{p_u L_p}{4} \quad (2.9)$$

$$M_{max} = \frac{p_u L_p^2}{32} \quad (2.10)$$

**Ο'Rourke (2009).** Χρησιμοποιήθηκε το αναλυτικό προσομοίωμα του Σχήματος 2.8 για να διατυπωθεί μία 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 2.8:** Αναλυτικό προσομοίωμα σπονδυλωτού αγωγού σύμφωνα με τον Ο'Rourke (2009).

**Figure 2.8:** Analytical model of segmented pipeline simulation according to Ο'Rourke (2009).

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

Πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω του περιορισμένου χαρακτήρα του προτεινόμενου προσομοιώματος, εφόσον αυτό αφορά αποκλειστικά παραμορφώσεις κατά μήκος του αγωγού, δε δύναται να αξιοποιηθεί για το σχεδιασμό αγωγών με εύκαμπτους κόμβους οι οποίοι διασταυρώνονται με ρήγματα υπό τυχαία γωνία.



**O'Rourke & Liu (2012).** Εξετάσθηκε η μεθοδολογία που προτείνεται από τις ALA Guidelines (ASCE 2005), και παρουσιάστηκε προηγουμένως, και διαπιστώθηκε ότι παραβλέπει την επιβαλλόμενη αξονική παραμόρφωση στη σύνδεση λόγω της στροφής του τμήματος του αγωγού ανάμεσα στις συνδέσεις. Η παραμόρφωση αυτή αντιστοιχεί σε μεταβολή μήκους του αγωγού ίση προς:

$$\delta_{rotational} = \frac{L_p}{2} - \sqrt{\left(\frac{L_p}{2}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{2} \sin\beta\right)^2} \quad (2.11)$$

και προστίθεται ή αφαιρείται από την τιμή της Εξίσωσης 2.7, αναλόγως αν λόγω της στροφής δημιουργείται έκταση ή συμπίεση του αγωγού. 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 2.8.

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 είναι να διέρχεται ακριβώς δίπλα από τη σύνδεση, οπότε η επιβαλλόμενη ροπή αυξάνεται σε:

$$M_{max} = \frac{p_u L_p^2}{8} \quad (2.12)$$

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

$$\delta_{joint} = \delta \cos\beta \quad (2.13)$$

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

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\delta}{2L_p} \sin\beta\right) \quad (2.14)$$

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.

## 2.4 Συμπεράσματα

Από την ανωτέρω σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση, διαπιστώνεται ότι για τους συνεχείς αγωγούς έχουν διατυπωθεί σήμερα μεθοδολογίες, όπως των Karamitros et al (2007, 2011), οι οποίες δίνουν μία αρκετά καλή προσέγγιση της έντασης συνεχών αγωγών σε διασταυρώσεις με ενεργά ρήγματα, και θέτουν τις βάσεις για την περαιτέρω θεώρηση σπονδυλωτών αγωγών με ελαστικούς κόμβους η οποία επιχειρείται στην παρούσα ερευνητική εργασία.

Αντίθετα, τα διαθέσιμα αναλυτικά προσομοιώματα για σπονδυλωτούς αγωγούς είναι λιγότερο αναπτυγμένα. Ο κύριος περιορισμός τους έγκειται στο ότι εστιάζουν στην καταπόνηση και την αστοχία των συνδέσεων και όχι των τμημάτων του αγωγού που παρεμβάλλονται μεταξύ αυτών, θεωρώντας τις εξαρχής ως "αδύναμους

κρίκους". Επιπλέον, το τμήμα του αγωγού μεταξύ των κόμβων θεωρείται ως "άκαμπτο" και "απαραμόρφωτο". Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα, χωρίς εκτενή διόρθωση και προσαρμογή για το πρόβλημα που εξετάζεται, όπου η χρήση συνδέσεων "ικανής" δυσκαμψίας και αντοχής, σε μεγάλη σχετικά απόσταση μεταξύ τους, δρα ευεργετικά για τον αγωγό αλλά δεν αποτρέπει τελικώς την αστοχία των τμημάτων που παρεμβάλλονται μεταξύ των συνδέσεων.

Πάρα ταύτα, η προτεινόμενη μεθοδολογία από τους O'Rourke & Liu (2012) για τους σπονδυλωτούς αγωγούς αποτελεί την πλέον κοντινή μεθοδολογία που υπάρχει στη βιβλιογραφία και έχει σημαντικές αναλογίες με το πρόβλημα που εξετάζεται.

# 3

## Ρήγματα Οριζόντιας Ολίσθησης: Παρουσίαση Αναλυτικής Μεθοδολογίας

---

### 3.1 Εισαγωγή

Όπως παρουσιάστηκε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο, δεν έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα αναλυτικές μεθοδολογίες για την εκτίμηση των παραμορφώσεων σε αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους. Οι υπάρχουσες απλές μεθοδολογίες για σπονδυλωτούς αγωγούς δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας στο υπό εξέταση πρόβλημα, κυρίως διότι οι «συνδέσεις» στους σπονδυλωτούς αγωγούς θεωρούνται αδύνατοι κρίκοι που διαθέτουν κάποια ανοχή μετακίνησης και στροφής και ο σχεδιασμός γίνεται με στόχο να περιοριστούν οι μετακινήσεις και οι στροφές στον κόμβο εντός των ανεκτών ορίων. Αντίθετα στην περίπτωση εφαρμογής «εύκαμπτων κόμβων» για τον περιορισμό των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό, οι κόμβοι είναι σε θέση να παραλάβουν ασφαλώς τις όποιες επιβαλλόμενες αξονικές και διατμητικές τάσεις και δεν αποτελούν αδύνατο κρίκο του αγωγού.

Ως βάση για την ανάπτυξη της επιζητούμενης αναλυτικής μεθοδολογίας χρησιμοποιούνται οι προτεινόμενες μεθοδολογίες των Karamitros et al. (2007, 2011), και των Trifonov & Cherniy (2010).

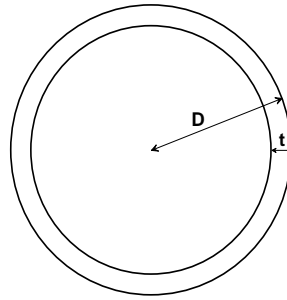
### 3.2 Παραδοχές αναλυτικής μεθοδολογίας

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

- Η μέθοδος αφορά λεπτότοιχο χαλύβδινο αγωγό με εξωτερική διάμετρο  $D$ , και πάχος τοιχώματος  $t$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Η διατομή έχει εμβαδόν και ροπή αδράνειας που προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$A_s = \pi(D - t)t \quad (3.1)$$

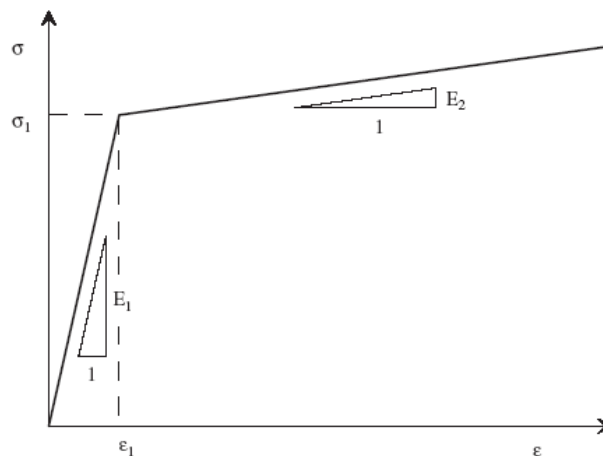
$$I = \pi \left( \frac{D-t}{2} \right)^2 t \quad (3.2)$$



**Σχήμα 3.1:** Γεωμετρία Διατομής αγωγού.

**Figure 3.1:** Geometry of pipe section.

- Η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του χάλυβα του αγωγού περιγράφεται από το απλό διγραμμικό προσομοίωμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2, όπου  $E_1$  και  $E_2$  είναι το ελαστικό και το πλαστικό μέτρο ελαστικότητας αντίστοιχα,  $\sigma_1$  είναι η τάση διαρροής του χάλυβα και  $\epsilon_1$  η αντίστοιχη παραμόρφωση. Επίσης ορίζεται η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση  $\sigma_2$  και η αντίστοιχη παραμόρφωση  $\epsilon_2$ , πέραν της οποίας αστοχεί το υλικό του χάλυβα.

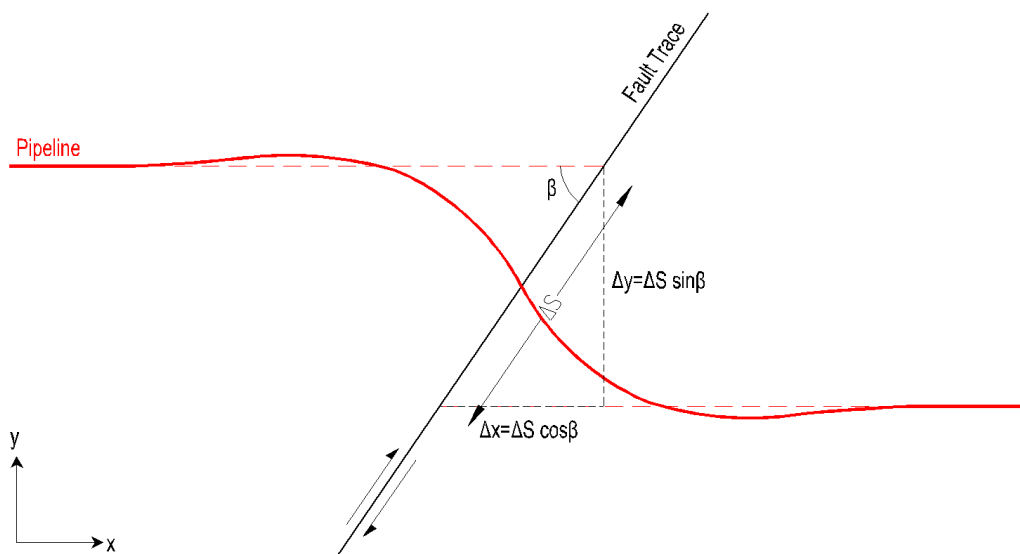


**Σχήμα 3.2:** Διγραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του χάλυβα του αγωγού

**Figure 3.2:** Bilinear stress-strain relation of the pipe steel material.

- Το ρήγμα θεωρείται επίπεδο, με μηδενικό πάχος ζώνης διάρρηξης, έτσι ώστε η τομή του με τον αγωγό να μπορεί να θεωρηθεί σημειακή και η μετατόπισή του να μπορεί να αναλυθεί σε δύο συν-επίπεδες συνιστώσες  $\Delta x$  και  $\Delta y$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.

### STRIKE-SLIP FAULT



**Σχήμα 3.3:** Η μετατόπιση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης αναλύεται στη συνιστώσα  $\Delta x$  παράλληλα και  $\Delta y$  εγκάρσια ως προς τον αγωγό.

**Figure 3.3:** The strike-slip fault displacement is analyzed to two components  $\Delta x$  parallel and  $\Delta y$  horizontal transverse to the pipe.

- Η αλληλεπίδραση του αγωγού με το περιβάλλον έδαφος της επίχωσης εξασφαλίζεται μέσω ελαστοπλαστικών ελατηρίων Winkler τόσο για τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις τριβής (όταν υπάρχει σχετική ολίσθηση μεταξύ εδάφους και αγωγού) όσο και για την εγκάρσια αντίσταση του εδάφους στην μετατόπιση του αγωγού. Ο τρόπος υπολογισμού των ελατηρίων Winkler, παράλληλα και εγκάρσια προς τον αγωγό, παρουσιάζεται αναλυτικά στην παράγραφο 4.2.
- Παρά τον έντονο μη-γραμμικό χαρακτήρα του προβλήματος, γίνεται η γενική παραδοχή ότι ισχύει η αρχή της επαλληλίας για τις επιβαλλόμενες φορτίσεις (αξονικές και εγκάρσιες).
- Παρά τις έντονες παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή του ρήγματος, θεωρείται ότι ισχύει η παραδοχή της επιπεδότητας της διατομής.
- Οι εύκαμπτοι κόμβοι θεωρείται ότι μπορούν να παραμορφώνονται στροφικά περί τον άξονα  $z$ , με σταθερή στροφική δυσκαμψία ίση με  $C_r$ , ενώ έχουν διαμήκη και στροφική δυσκαμψία στους υπόλοιπους άξονες αντιστοιχη με αυτή των ενδιάμεσων τμημάτων του αγωγού. Πρέπει να σημειωθεί ότι η στροφική δυσκαμψία των κόμβων είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα να συμπεριφέρονται ουσιαστικά ως αρθρώσεις και να αναπτύσσονται ιδιαίτερα μικρές ροπές σε αυτούς.
- Δεδομένου ότι υπάρχει αβεβαιότητα στην ακριβή θέση της διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα, κατά το σχεδιασμό θα πρέπει να καλύπτεται η περιοχή περί το ίχνος με εύκαμπτους κόμβους με σταθερή απόσταση μεταξύ τους.

Κατά συνέπεια το αναλυτικό προσομοίωμα αναπτύχθηκε με την παραδοχή ότι θα υπάρχουν τουλάχιστον δύο κόμβοι εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος. Επιπροσθέτως, θεωρήθηκε ότι το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό στην μέση μεταξύ δύο κόμβων ή δίπλα σε κάποιον από αυτούς.

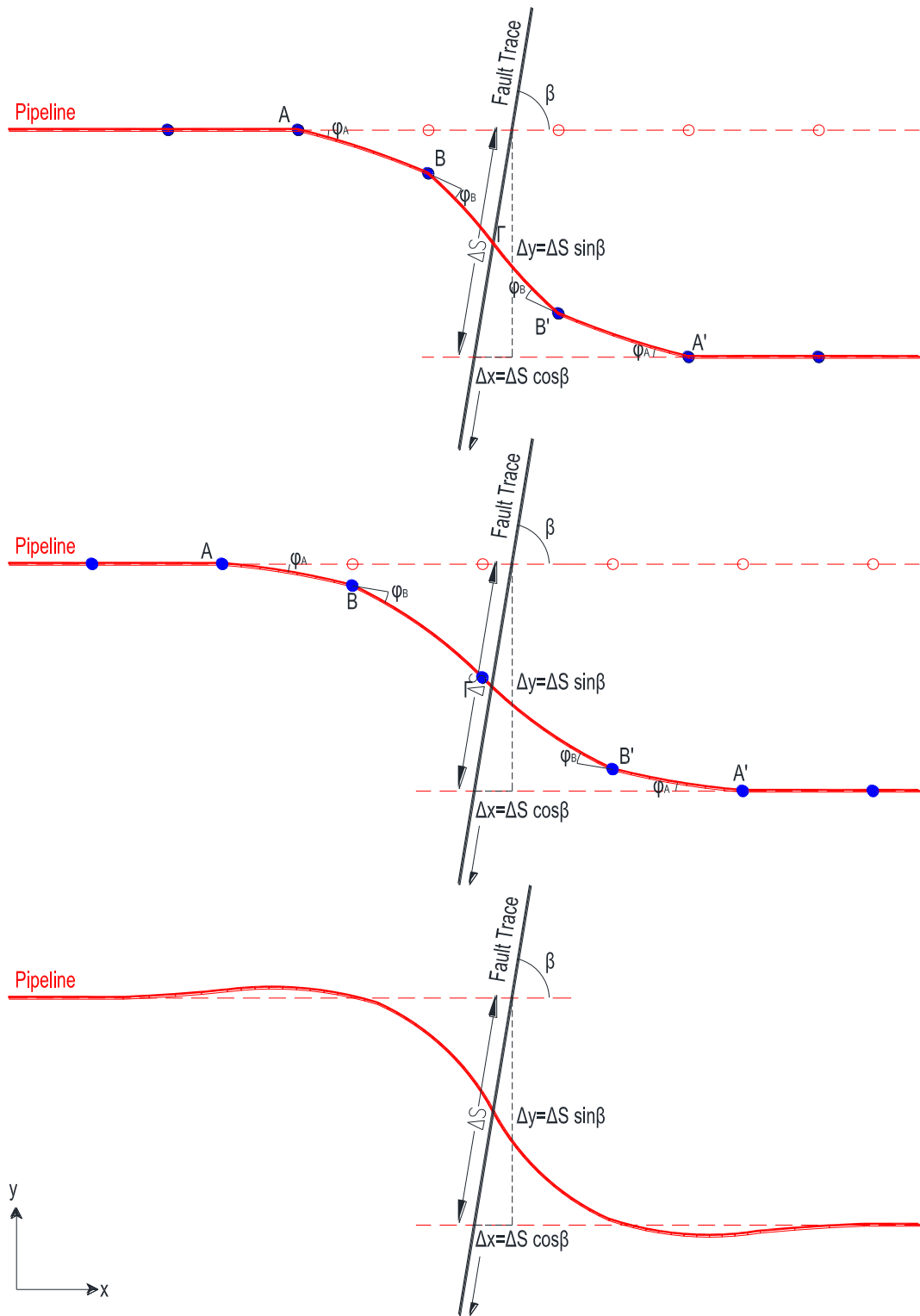
### 3.3 Ομοιότητες & Διαφορές σχετικά με τους συνεχείς αγωγούς

Η ύπαρξη εύκαμπτων κόμβων στην ευρύτερη περιοχή που επηρεάζει η διάρρηξη του ρήγματος, διαφοροποιεί αισθητά τη συμπεριφορά του αγωγού με εύκαμπτους κόμβους συγκριτικά με αυτή των συνεχών αγωγών. Στα Σχήματα 3.4α και 3.4β παρουσιάζονται οι παραμορφωμένοι φορείς για τις δύο ακραίες περιπτώσεις: (α) το ρήγμα να διασταυρώνεται με τον αγωγό στην μέση μεταξύ δύο κόμβων και (β) να τέμνει τον άξονα του αγωγού ακριβώς δίπλα από ένα κόμβο. Επίσης, για τη διευκόλυνση της σύγκρισης, στο Σχήμα 3.4γ παρουσιάζεται ο παραμορφωμένος φορέας ενός αγωγού χωρίς εύκαμπτους κόμβους.

Από τα σχήματα γίνεται φανερό ότι, σε αντιστοιχία με τα ευρήματα των Wang & Yeh (1985) και Karamitros et al (2007) για τους συνεχείς αγωγούς που διασχίζουν ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, ο φορέας παραμορφώνεται συμμετρικά ως προς το σημείο διασταύρωσης με το ρήγμα. Σε αντιστοιχία με το «καμπυλωμένο τμήμα» των ενιαίων αγωγών, οι εγκάρσιες μετατοπίσεις συγκεντρώνονται τώρα μεταξύ των σημείων Α και Γ εκατέρωθεν του ρήγματος, ενώ στον υπόλοιπο αγωγό, και για μήκος ίσο με το «μήκος αγκύρωσης», αναπτύσσονται μόνο αξονικές δυνάμεις τριβής.

Πιο συγκεκριμένα, οι βασικές ομοιότητες που διαπιστώθηκαν μεταξύ των δύο προβλημάτων και οι οποίες μπορούν να διατηρηθούν από τα προηγούμενα αναλυτικά προσομοιώματα των Karamitros et al. (2007) και Trifonov & Cherniy (2010), είναι οι εξής:

- Το πρόβλημα είναι συμμετρικό ως προς τη θέση διασταύρωσης με το ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης, σημείο που λόγω ισορροπίας μηδενίζεται η ροπή κάμψης. Κατά συνέπεια μόνο ο μισός φορέας απαιτείται να επιλυθεί, και το υπόλοιπο τμήμα αντικαθίσταται από μία άρθρωση.
- Ορίζεται και σε αυτή την περίπτωση ένα μήκος αγκύρωσης, δηλαδή το μήκος στο οποίο αναπτύσσεται σχετική ολίσθηση μεταξύ του αγωγού και του περιβάλλοντος εδάφους λόγω των αξονικών τάσεων που επιβάλλει στον αγωγό η διάρρηξη του ρήγματος και οι οποίες σταδιακά μειώνονται λόγω των αναπτυσσόμενων δυνάμεων τριβής. Δεδομένου ότι οι αξονικές τάσεις μπορεί να ξεπεράσουν τις τάσεις διαρροής του χάλυβα, ορίζεται εν γένει ένα ελαστικό και ένα πλαστικοποιημένο μήκος αγκύρωσης.
- Όταν μέρος της διατομής του αγωγού διαρρέει λόγω συνδυασμένης αξονικής και καμπτικής φόρτισης, εφαρμόζεται ειδική μεθοδολογία για τον αναλυτικό υπολογισμό των καμπτικών παραμορφώσεων, όπως περιγράφεται σε επόμενες παραγράφους.



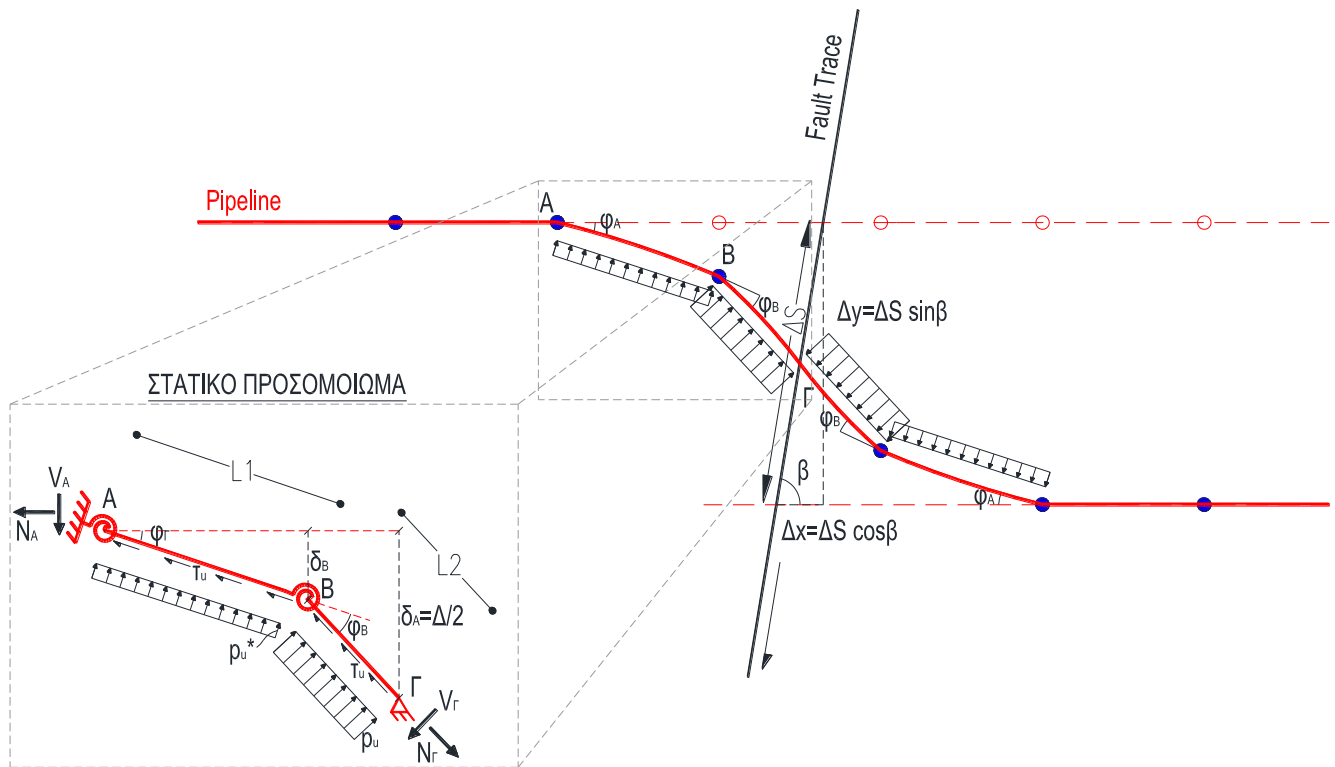
**Σχήμα 3.4:** Παραμορφωμένος φορέας αγωγού που διασταυρώνεται με ρήγμα οριζόντιας ολισθήσης (α) ανάμεσα σε δύο εύκαμπτους κόμβους, (β) ακριβώς δίπλα από έναν απ' αυτούς και (γ) σε θέση χωρίς εύκαμπτους κόμβους.

**Figure 3.4:** Deformed shape of the pipe when crossing a strike-slip fault (a) at the area between two flexible joints, (b) exactly after one of the flexible joints and (c) in area without any flexible joints.

Οι βασικές διαφορές που εντοπίστηκαν στους αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους (έναντι των συνεχών), και εισήχθησαν στο στατικό προσομοίωμα του συνολικού φορέα που παρουσιάζεται (Σχήμα 3.5), είναι οι εξής:

- Δεδομένου ότι οι εύκαμπτοι κόμβοι έχουν πολύ μικρότερη στροφική δυσκαμψία από ότι τα συνεχή τμήματα του αγωγού τα οποία τους συνδέουν, σχεδόν το σύνολο της παραμόρφωσης στον κάθετο προς τον αγωγό άξονα  $y$  (στροφή ως προς τον άξονα  $z$ ) συγκεντρώνεται σε αυτούς και τα ενδιάμεσα τμήματα του αγωγού παραμένουν σχεδόν ευθύγραμμα και δεν αναπτύσσονται σε αυτά σημαντικές καμπτικές παραμορφώσεις.
- Το μήκος του «καμπλωμένου τμήματος», δηλαδή της περιοχής που υπάρχουν έντονες εγκάρσιες μετατοπίσεις, δεν εξαρτάται από το συνδυασμό της αντοχής των πλευρικών ελατηρίων (εγκάρσια αντοχή του εδάφους), την ακαμψία του αγωγού και το μέγεθος της επιβαλλόμενης μετακίνησης από το ρήγμα όπως στην περίπτωση των συνεχών αγωγών, αλλά είναι εξαρχής δεδομένο εφόσον περιορίζεται εντός της περιοχής  $ABΓB'A'$  που ορίζεται από τους δύο πλησιέστερους κόμβους πριν (ή μετά) τη διασταύρωση με το ρήγμα. Αυτό που δεν είναι εξαρχής δεδομένο είναι το μέγεθος των γωνιών  $\varphi_A$  και  $\varphi_B$ , ή ισοδύναμα το ποσοστό της συνολικής εγκάρσιας μετατόπισης που θα παραληφθεί λόγω της στροφής των κόμβων, από τα τμήματα  $AB$  και  $BΓ$  αντίστοιχα.
- Εφόσον ο αγωγός πριν από το σημείο  $A$  υφίσταται αμελητέες εγκάρσιες μετατοπίσεις, δεν απαιτείται να επιλυθεί ως ημί-απειρομήκης δοκός επί ελαστικών στηρίξεων όπως στην περίπτωση των Karamitros et al. (2007) και Trifonov & Cherniy (2010). Για αυτό το λόγο, στο προτεινόμενο προσομοίωμα, το παραπάνω τμήμα του αγωγού αντικαθίσταται από μια άρθρωση. Η οριζόντια δύναμη που υπολογίζεται σε αυτή λόγω της ισορροπίας του τμήματος  $AB$ , είναι πρακτικά ίση προς την αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στο τμήμα του αγωγού πριν το σημείο  $A$  και η οποία παραλαμβάνεται μέσω της τριβής που ασκείται κατά μήκος του τμήματος αυτού.
- Επειδή οι εγκάρσιες μετατοπίσεις μεταξύ του κόμβου  $A$  και του κόμβου  $B$  μπορεί να είναι μικρές και να μην αρκούν για να εξαντληθεί η οριακή εγκάρσια αντίσταση του εδάφους, σε αυτό το τμήμα πρέπει να θεωρηθεί ότι η φόρτιση του εδάφους έχει μέγιστη τιμή  $p_u^*$  η οποία δεν ταυτίζεται κατ' ανάγκη με την οριακή εγκάρσια αντοχή του εδάφους  $p_u$  για πολύ μικρές στροφές του κόμβου  $A$ . Για λόγους απλοποίησης των εξισώσεων λαμβάνεται σταθερή και όχι τριγωνική κατανομή της φόρτισης και σε αυτό το τμήμα. Μετά τον κόμβο  $B$  η εγκάρσια αντίσταση του εδάφους μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και ίση με τη μέγιστη, εφόσον πολύ γρήγορα φτάνει σε αυτή ακόμη και για τις περιπτώσεις μηδενικής μετακίνησης του σημείου  $B$ .





**Σχήμα 3.5:** Στατικό προσομοίωμα του συνόλου του φορέα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της αναλυτικής μεθοδολογίας.

**Figure 3.5:** Static pipeline model used for the development of the analytical methodology.

Όπως προαναφέρθηκε, το εν λόγω προσομοίωμα είναι συμμετρικό ως προς το σημείο τομής του αγωγού με το ίχνος του ρήγματος  $\Gamma$ . Αυτό ισχύει και για τις δύο ακραίες περιπτώσεις γεωμετρίας που εξετάζονται, δηλαδή όταν (α) το ρήγμα διέρχεται στο μέσον μεταξύ δύο διαδοχικών κόμβων, ή (β) ακριβώς στην παρειά ενός από τους κόμβους. Κατά συνέπεια, και στις δύο περιπτώσεις μπορεί να λυθεί μόνο ο μισός φορέας θεωρώντας ότι υπάρχει άρθρωση στη θέση της διασταύρωσης. Στην πρώτη από τις περιπτώσεις (α) και (β) παραπάνω, η απόσταση  $L2$  (βλ. Σχήμα 3.5) είναι ίση με  $L1/2$  ενώ στη δεύτερη είναι ίση με  $L1$ .

Διευκρινίζεται ότι το αναλυτικό προσομοίωμα που περιγράφηκε παραπάνω μπορεί να επεκταθεί για οποιαδήποτε άλλη σχέση μεταξύ των αποστάσεων  $L1$  και  $L2$ , προκειμένου να εξεταστούν και ενδιαμέσες περιπτώσεις π.χ. για πιο ακριβή σχεδιασμό σε περιπτώσεις που γνωρίζουμε με απόλυτη ακρίβεια τη θέση διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό. Σε αυτή την περίπτωση βέβαια δεν θα ισχύει η παραδοχή του «συμμετρικού φορέα» και θα πρέπει οι εξισώσεις επίλυσης του φορέα να επαναδιατυπωθούν.

### 3.4 Περιγραφή της μεθοδολογίας

Με βάση τις προαναφερθείσες παραδοχές, η επαναληπτική διαδικασία επίλυσης για το προτεινόμενο αναλυτικό προσομοίωμα είναι η εξής:

- **Βήμα 1<sup>ο</sup>:** Αρχική «ελαστική» επίλυση φορέα.

Γίνεται η στατική επίλυση του φορέα χρησιμοποιώντας τις αρχικές τιμές δυσκαμψίας του αγωγού για όλες τις ράβδους, ανεξαρτήτως φόρτισης. Λόγω της πεπλεγμένης φύσης των εξισώσεων το βήμα απαιτεί με μία απλή επαναληπτική διαδικασία επίλυσης.

- **Βήμα 2<sup>ο</sup>:** Υπολογισμός μέγιστων τάσεων-παραμορφώσεων και τέμνοντος Μέτρου Ελαστικότητας.

Επιλέγεται η διατομή με το δυσμενέστερο συνδυασμό επιβαλλόμενης ροπής και αξονικής δύναμης σε κάθε ράβδο και υπολογίζεται η κατανομή τάσεων και παραμορφώσεων σε αυτή. Στη συνέχεια υπολογίζεται ένα αντιπροσωπευτικό τέμνον μέτρο ελαστικότητας για την κάθε ράβδο, ως η μέση τιμή του προηγούμενου μέτρου ελαστικότητας (του αρχικού ελαστικού μέτρου στο πρώτο βήμα) και αυτού που προκύπτει ως ο λόγος τάσεων/παραμορφώσεων για τον άξονα της διατομής. Και σε αυτή την περίπτωση η επίλυση της διατομής γίνεται με μία απλή αριθμητική μεθοδολογία.

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

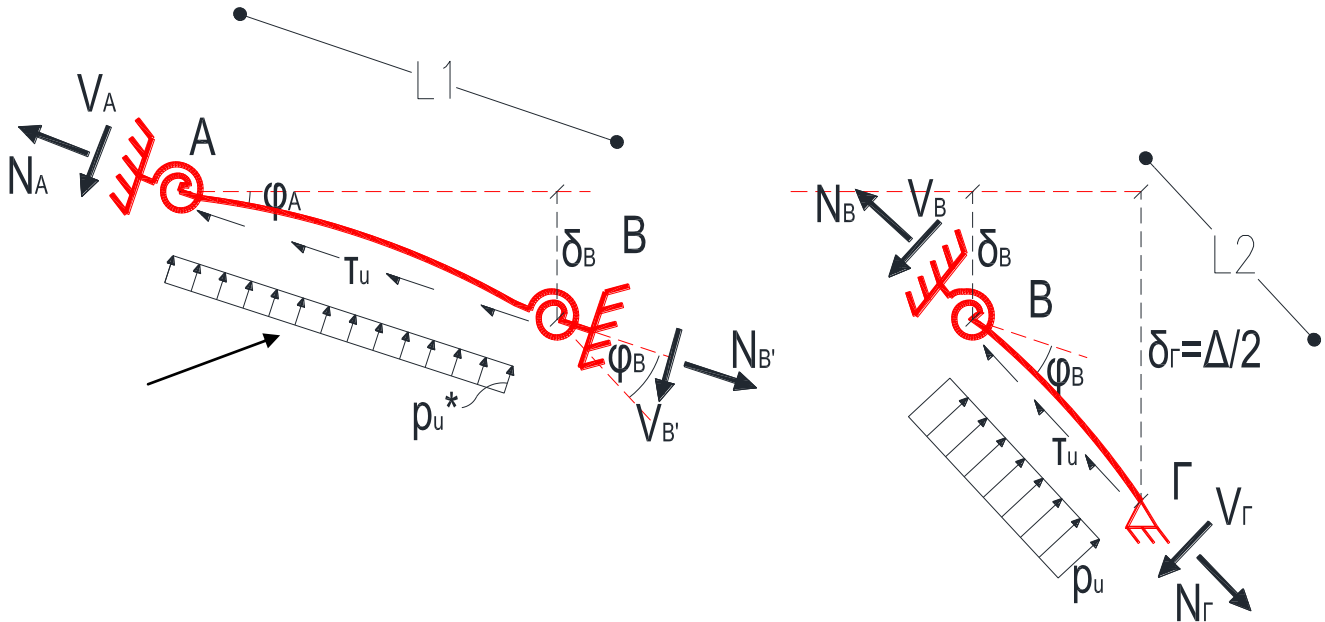
Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 και 2 με το νέο (τέμνον) μέτρο ελαστικότητας σε κάθε ράβδο μέχρι να έχουμε σύγκλιση.

Η ανωτέρω διαδικασία επίλυσης έχει προγραμματιστεί σε κώδικα excel, στον οποίο εισάγονται αρχικά οι βασικές παράμετροι της ανάλυσης και με την εκτέλεση μίας μακροεντολής ολοκληρώνεται η επίλυση και κατασκευάζονται διαγράμματα για τα βασικά μεγέθη της ανάλυσης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα 1, 2 και 3 της επίλυσης.

**Βήμα 1ο: Αρχική «ελαστική» επίλυση φορέα**

Το στατικό προσομοίωμα για τον παραμορφωμένο φορέα του τμήματος ΑΒΓ του αγωγού που αναλύεται, μπορεί να χωριστεί στα δύο κομμάτια, ΑΒ και ΒΓ, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6.



**Σχήμα 3.6:** Κατά τμήματα ανάλυση του αγωγού στην παραμορφωμένη κατάσταση.

**Figure 3.6:** Segment analysis of the pipeline at the deformed condition.

Τα τμήματα ΑΒ και ΒΓ θεωρούνται ελαστικές δοκοί κάτω από ταυτόχρονη (εσωτερική) δράση αξονικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών. Η μετατόπιση του σημείου Γ οφείλεται κατά κύριο λόγο στη στροφή των κόμβων Α και Β, αλλά ταυτόχρονα και στην παραμόρφωση των τμημάτων του αγωγού ανάμεσα. Παρά το μικρό μέγεθος της παραμόρφωσης αυτής, δεν πρέπει να αγνοηθεί εφόσον οι πολύ μεγάλες αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στον αγωγό κατά τη διάρρηξη του ρήγματος, προκαλούν σημαντική διαφοροποίηση στις αναπτυσσόμενες ροπές λόγω φαινομένων δευτέρας τάξης.

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

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} - N \frac{d^2 w}{dx^2} = q \quad (3.3)$$

- 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 (βύθιση). Ολοκληρώνοντας την εξίσωση αυτή για τον παραμορφωμένο φορέα, παίρνουμε:

$$w(x) = w(0) + \varphi(0) \frac{\sinh ax}{a} + \frac{M(0)}{EIa^2} [\cosh ax - 1] + \frac{V(0)}{EIa^3} [\sinh ax - ax] + \frac{q}{N} \left[ \frac{\cosh ax - 1}{a^2} - \frac{x^2}{2} \right] \quad (3.4)$$

όπου  $\alpha^2 = N/EI$

$w(0)$  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 3.4 μπορεί να εφαρμοστεί και στα δύο τμήματα ΑΒ 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 πρόβλημα μας:

$$\begin{aligned} w_1(0) &= 0 & w_2(0) &= \delta_1(L_1) \\ \varphi_1(0) &= 0 & \varphi_2(0) &= 0 \\ M_1(0) &= -M_A = C_r \cdot \varphi_A & M_2(0) &= -M_B = C_r \cdot \varphi_B \\ V_1(0) &= V_A & V_2(0) &= N_1(L_1) \cdot \sin \varphi_B - V_1(L_1) \cdot \cos \varphi_B \end{aligned}$$

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

Ετσι, μετά την επίλυση της Εξίσωσης 3.4 μπορεί να προκύψει η στροφή, η τέμνουσα δύναμη και η καμπτική ροπή ανά θέση, ως ακολούθως:

$$\varphi(x) = w'(x) \quad (3.5)$$

$$V(x) = E_i I_i w'''(x) - N(x) \cdot w'(x) + \frac{V_A}{2} \quad (3.6)$$

$$M(x) = \int_0^x V(x) dx \quad (3.7)$$

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

$$w'(x) = \varphi(0) \cosh ax + \frac{M(0)}{EIa} \sinh ax + \frac{V(0)}{EIa^2} [\cosh ax - 1] + \frac{q}{N} \left[ \frac{\sinh ax}{a} - x \right] \quad (3.8)$$

$$w''(x) = a \varphi(0) \sinh ax + \frac{M(0)}{EI} \cosh ax + \frac{V(0)}{EIa} \sinh ax + \frac{q}{N} [\cosh ax - 1] \quad (3.9)$$

$$w'''(x) = a^2 \varphi(0) \cosh ax + a \frac{M(0)}{EI} \sinh ax + \frac{V(0)}{EI} \cosh ax + a \frac{q}{N} \sinh ax \quad (3.10)$$

$$w''''(x) = a^3 \varphi(0) \sinh ax + a^2 \frac{M(0)}{EI} \cosh ax + a \frac{V(0)}{EI} \sinh ax + a^2 \frac{q}{N} \cosh ax \quad (3.11)$$

Οι συνολικές μετακινήσεις ( $w$ ) λόγω των εσωτερικών εντατικών μεγεθών και των στροφών των εύκαμπτων κόμβων, δίνονται ακολούθως από τις Εξισώσεις 3.12 και 3.13 για τις δοκούς AB (1) και ΒΓ (2) αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} \delta_1(x) &= w_1(x) + x \cdot \sin \varphi_A = \\ &= \frac{M(0)}{E_1 I_1 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{V(0)}{E_1 I_1 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{q_u^*}{N(x)} \left[ \frac{\cosh ax - 1}{a^2} - \frac{x^2}{2} \right] + x \cdot \sin \varphi_A \end{aligned} \quad (3.12)$$

με  $0 \leq x \leq L_1$ .

$$\begin{aligned} \delta_2(x) &= w_2(x) + x \cdot \sin(\varphi_A + \varphi_B + w'_1(L_1)) = \\ &= \delta_1(L_1) + \frac{M(0)}{E_1 I_1 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{V(0)}{E_1 I_1 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{q_u}{N(x)} \left[ \frac{\cosh ax - 1}{a^2} - \frac{x^2}{2} \right] + \\ &\quad + x \cdot \sin(\varphi_A + \varphi_B + w'_1(L_1)) \end{aligned} \quad (3.13)$$

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:

$$M_1(L_1) = -M_B = C_r \cdot \varphi_B \approx 0 \quad (3.14)$$

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

$$M_2(L_2) = 0 \quad (3.15)$$

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

$$\delta_2(L_2) = \delta_1(L_1) + w_2(L_2) = dy/2 \quad (3.16)$$

- (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  $\Delta L_{av}$ ):

$$\Delta L_{req} = \Delta L_{av} \quad (3.17)$$

Από την Εξίσωση 3.17 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:

$$N(x) = \begin{cases} N_T - (L_2 - x)t_u & \text{για τη ράβδο } B\Gamma \\ N_B - (L_1 - x)t_u & \text{για τη ράβδο } AB \end{cases} \quad (3.18)$$

Πιο συγκεκριμένα η απαιτούμενη επιμήκυνση λαμβάνεται ίση με:

$$\Delta L_{req} = \Delta x + 2 \left( \frac{L_1}{\cos\varphi_A} - L_1 \right) + 2 \left( \frac{L_2}{\cos(\varphi_A + \varphi_B)} - L_2 \right) \quad (3.19)$$

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 που υπάρχει σχετική ολίσθηση με το περιβάλλον έδαφος, δηλαδή του μήκους αγκύρωσης, και δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta L_{av} = 2 \int_0^{L_{anch}} \varepsilon(L) dL \quad (3.20)$$

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:

$$L_{anch} = \frac{F_a}{\tau_u} = \frac{\sigma_a A_s}{\tau_u} \quad (3.21)$$

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:

$$\sigma(L) = \sigma_a - \frac{\tau_u}{A_s} L \quad (3.22)$$

Εφόσον έχει θεωρηθεί το διγραμμικό μοντέλο του Σχήματος 3.2 για το υλικό του χάλυβα του αγωγού, για την περίπτωση που η τάση  $\sigma_a$  είναι μικρότερη της  $\sigma_1$ , δηλαδή αναπτύσσονται μόνο ελαστικές παραμορφώσεις στον αγωγό λόγω της αξονικής δύναμης, έχουμε:

$$\Delta L_{av} = 2 \int_0^{L_{anch}} \frac{\sigma(L)}{E_1} dL = \frac{\sigma_a^2 A_s}{E_1 \tau_u} \quad (3.23)$$

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:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{E_1 \tau_u \Delta L_{req}}{A_s}} \quad (3.24)$$

Αντίστοιχα, αν η απαιτούμενη επιμήκυνση είναι μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί σε  $\sigma_\alpha = \sigma_1$ , δηλαδή αν  $\Delta L_{req} > (\sigma_1^2 A_s) / (E_1 \tau_u)$ , αναπτύσσονται και πλαστικές παραμορφώσεις λόγω της αξονικής τάσης και η Εξίσωση 3.20 γίνεται:

$$\Delta L_{av} = 2 \left[ \int_0^{L_1} \left( \varepsilon_1 + \frac{\sigma(L) - \sigma_1}{E_2} \right) dL + \int_{L_1}^{L_{anch}} \frac{\sigma(L)}{E_1} dL \right] \quad (3.25)$$

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

$$L_1 = \frac{(\sigma_\alpha - \sigma_1) A_s}{\tau_u} \quad (3.26)$$

Από τις εξισώσεις 3.20, 3.21, 3.25 και 3.26 προκύπτει ότι η αξονική τάση στη θέση της διασταύρωσης με το ρήγμα, για την περίπτωση που αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις, είναι ίση με:

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1(E_1 - E_2) \pm \sqrt{\sigma_1^2(E_2^2 - E_1 E_2) + E_1^2 E_2 \Delta L_{req} \frac{\tau_u}{A_s}}}{E_1} \quad (3.27)$$

Ανεξαρτήτως του αν η  $\sigma_\alpha$  υπολογίζεται από τη σχέση 3.24 ή τη 3.27, η αξονική δύναμη  $F_\alpha$  στη θέση διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα είναι:

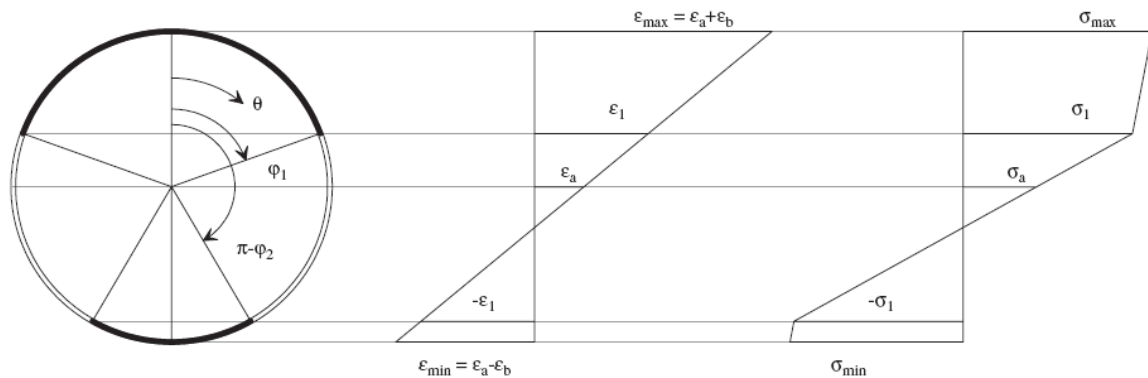
$$F_\alpha = \sigma_\alpha A_s \quad (3.28)$$

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 2ο: 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 3.7 παρουσιάζεται ενδεικτικά η κατανομή τάσεων και παραμορφώσεων για την περίπτωση που μόνο ένα τμήμα της διατομής έχει διαρρέψει (με τη θεώρηση επίπεδης διατομής).



**Σχήμα 3.7:** Κατανομή τάσεων-παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής (από Karamitros et al., 2007)

**Figure 3.7:** Stress distribution over the pipeline cross section (from 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 υπάρχει έτσι ώστε να αναπτύσσεται ο συγκεκριμένος συνδυασμός ροπής και αξονικής, διατηρώντας τη θεώρηση επιπεδότητας της διατομής. Δηλαδή επιλύεται το σύστημα:

$$N = \int_{-R}^{+R} \sigma(z) dz \tag{3.29}$$

$$M = \int_{-R}^{+R} z \cdot \sigma(z) dz \tag{3.30}$$

με την τάση να υπολογίζεται μέσω της παραμόρφωσης από τη Σχέση 3.31 η οποία ακολουθεί επί της ουσίας τον δι-γραμμικό νόμο που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.2. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι η παραμόρφωση έχει μέση τιμή  $\epsilon_a$ , και μεταβάλλεται γραμμικά με την απόσταση από το κέντρο της διατομής  $z$  σύμφωνα με την Εξίσωση 3.32. Άρα:

$$\sigma(z) = \frac{(E_1 - E_2)\epsilon(z)}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_2)\epsilon(z)}{\sigma_1}\right)^r\right]^{1/r}} + E_2\epsilon(z) \tag{3.31}$$

$$\epsilon(z) = \epsilon_a + kz \tag{3.32}$$



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 3.29 και 3.30.

### **Βήμα 3ο: 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 3.33 και επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί για τα βήματα 1 και 2 μέχρι το σύστημα να ισοροπήσει.

$$E_{cur}^{i+1} = \frac{E_{cur}^i + \frac{\sigma_\alpha}{\varepsilon_\alpha}}{2} \quad (3.33)$$

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

- οι τιμές των γωνιών  $\varphi_A$  και  $\varphi_B$ ,
- οι τέμνουσες δυνάμεις  $V_A$ ,  $V_B$  και  $V_T$ ,
- οι αξονικές δυνάμεις  $N_A$ ,  $N_B$  και  $N_T$ .

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

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

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.

# 4

## Ρήγματα Οριζόντιας Ολίσθησης: Σύγκριση με Αριθμητικές Αναλύσεις

---

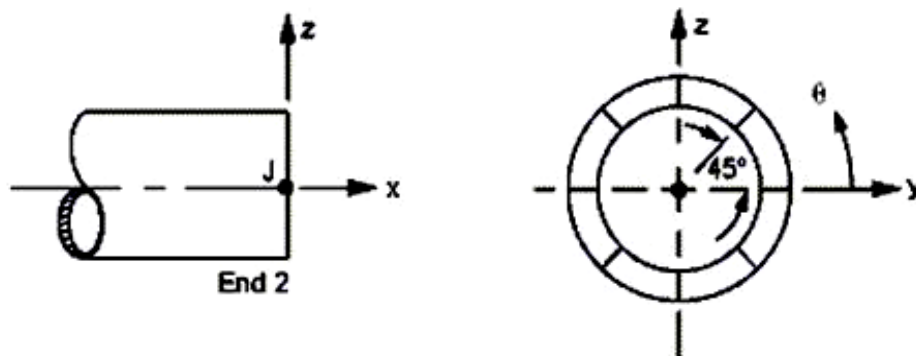
### 4.1 Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων

Με δεδομένη την έλλειψη επαρκώς τεκμηριωμένων πειραματικών αποτελεσμάτων ή ιστορικών περιστατικών στα οποία να είχαν χρησιμοποιηθεί εύκαμπτοι κόμβοι για την απομείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό, η ακρίβεια της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας ελέγχεται ακολούθως σε σύγκριση με αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων. Επισημαίνεται ότι οι εν λόγω αριθμητικές αναλύσεις θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να προσομοιώσουν την επιβολή μεγάλων μετατοπίσεων στις διασταυρώσεις με τα ενεργά ρήγματα, ενώ θα πρέπει να επιτρέπουν την προσομοίωση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του χάλυβα κατασκευής του αγωγού. Για τους ανωτέρω λόγους εφαρμόστηκε η μη-γραμμική μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων μέσω του κώδικα ANSYS (2009).

#### 4.1.1 Προσομοίωμα Πεπερασμένων Στοιχείων

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 NPS και πάχος τοιχώματος  $t$ . Συγκρινόμενα με τα πιο συνήθη στοιχεία δοκού (beam elements), τα στοιχεία «αγωγού» επιτρέπουν την εφαρμογή σταθερής εσωτερικής πίεσης παράλληλα με τα επιβαλλόμενα εξωτερικά φορτία.

Οκτώ (8) σημεία ολοκλήρωσης ορίζονται στην περίμετρο της κάθε διατομής, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις του αγωγού υπολογίζονται σε αυτά τα οκτώ σημεία, λαμβάνοντας υπόψη τη συνεισφορά των αξονικών δυνάμεων, καμπτικών ροπών και εσωτερικής πίεσης. Η υιοθέτηση οκτώ (8) σημείων ολοκλήρωσης αυξάνει την ακρίβεια των υπολογισμών των τάσεων και των παραμορφώσεων, ακόμα και σε περιπτώσεις μεγάλων παραμορφώσεων, όταν μεγάλο ποσοστό της διατομής του αγωγού έχει πλέον διαρρεύσει.



Σχήμα 4.1: Σημεία ολοκλήρωσης στην περίμετρο της διατομής του αγωγού.

Figure 4.1: Integration points along the pipe element's cross-section.

**Προσομοίωση Χάλυβα Αγωγού.-** Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του χάλυβα εισάγεται στο προσομοίωμα ως μια πολυγραμμική καμπύλη βασισμένη στη μαθηματική σχέση Ramberg-Osgood για τον χάλυβα L450 (API X65) που έγινε το σύνολο των αριθμητικών αναλύσεων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν 100 γραμμικά τμήματα για κάθε έναν από τους δύο κλάδους του νόμου του υλικού, σε εφελκυσμό και σε θλίψη. Ο λόγος του Poisson ελήφθη ίσος προς 0.20.

**Μόνιμες Εδαφικές Μετατοπίσεις.-** Οι μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις λόγω διάρρηξης των ρηγμάτων επιβάλλονται στη βάση των ισοδύναμων εδαφικών ελατηρίων, κατά μήκος του τμήματος του αγωγού που εδράζεται στο κινούμενο τέμαχος του ρήγματος. Η πιθανή ευνοϊκή επίδραση μαλακού εδάφους μεταξύ του αγωγού και του βραχώδους υποβάθρου, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την κατανομή της μετατόπισης υπό μορφή καμπύλης S, σε μεγαλύτερο μήκος αγωγού (όχι σημειακά), έχει συντηρητικά αγνοηθεί κατά τους υπολογισμούς. Σημειώνεται ότι η ίδια παραδοχή έχει υιοθετηθεί και στην αναλυτική λύση.

Σε αντιστοιχία με τις αναλυτικές μεθοδολογίες, η συνολική μετατόπιση του ρήγματος δ αναλύεται εν γένει σε τρεις ορθογωνικές συνιστώσες ( $\delta x$ ,  $\delta y$  και  $\delta z$ ), ενώ για την περίπτωση ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης η μετατόπιση  $\delta z$  είναι μηδενική.

**Αλγόριθμος μη Γραμμικής Επίλυσης.-** Η επίλυση προβλημάτων με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων οδηγεί σε ένα σύστημα εξισώσεων, με την ακόλουθη μητρική μορφή:

$$[K]\{u\} = \{F^a\} \quad (4.1)$$

όπου:

$[K]$  = μητρώο δυσκαμψίας

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

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

Στην περίπτωση που το μητρώο δυσκαμψίας  $[K]$  αποτελεί συνάρτηση των αγνώστων τιμών των βαθμών ελευθερίας, ή των παραγώγων αυτών, τότε η Εξίσωση 4.1 είναι μη γραμμική. Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την επίλυση τέτοιων μη γραμμικών εξισώσεων είναι η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson, η οποία περιγράφεται στο Σχήμα 4.2 και συνοψίζεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$[K_i^T]\{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F^{nr}\} \quad (4.2)$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\} \quad (4.3)$$

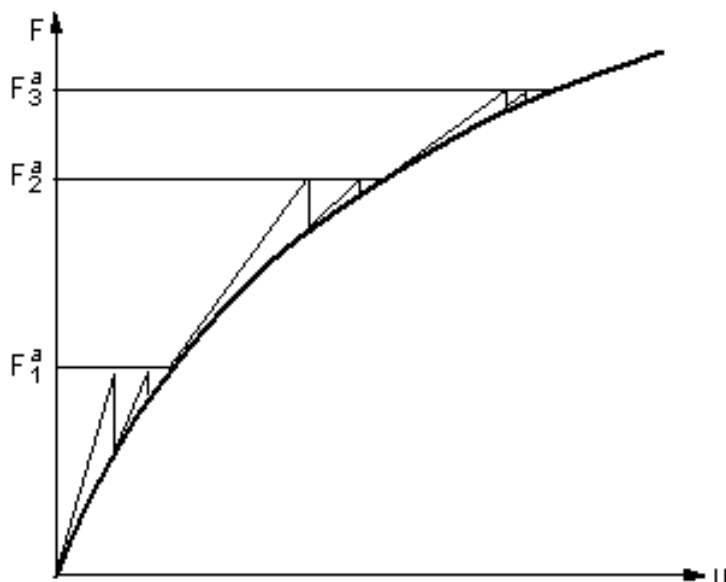
όπου:

$$[K_i^T] = \text{εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας}$$

$$i = \text{δείκτης που υποδηλώνει την τρέχουσα επανάληψη}$$

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

Σε κάθε επανάληψη, τα  $[K_i^T]$  και  $\{F^{nr}\}$  υπολογίζονται συναρτήσει των τιμών του  $\{u_i\}$ . Έτσι, το δεξί τμήμα της Εξίσωσης 4.2 είναι ουσιαστικά το διάνυσμα των απομενόντων (εκτός-ισορροπίας) φορτίων. Αποτελεί, δηλαδή, μέτρο της «απόκλισης» από την τελική λύση.



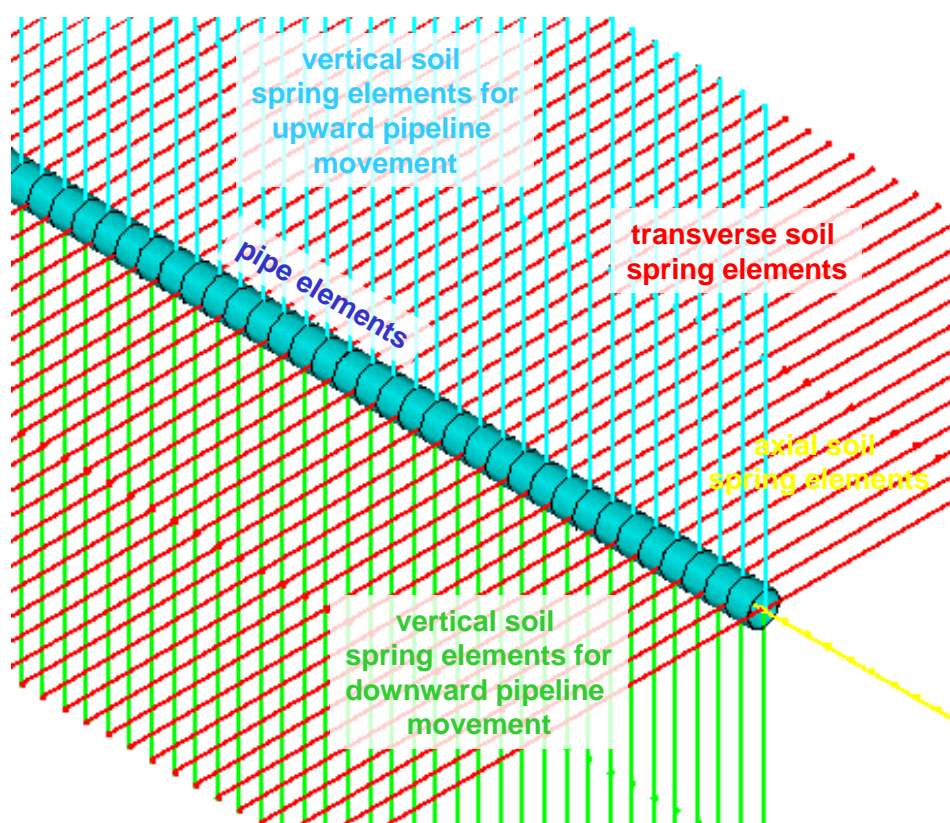
**Σχήμα 4.2:** Επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson.

**Figure 4.2:** Iteration Method Newton-Raphson.

#### 4.1.2 Ελατήρια Προσομοίωσης Εδάφους

Η αλληλεπίδραση εδάφους-αγωγού προσομοιώνεται μέσω πέντε ανελαστικών ελατηρίων ανά διατομή: ένα στην αξονική και τέσσερα στις δύο (2) εγκάρσιες διευθύνσεις (Σχήμα 4.3). Θεωρείται πάκτωση στο ελεύθερο άκρο του κάθε ελατηρίου, ενώ οι σχέσεις που τα διέπουν περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο.

Επισημαίνεται ότι ο αγωγός θεωρήθηκε ότι είναι τοποθετημένος εντός τάφρου επίχωσης ικανού μεγέθους, έτσι ώστε η αστοχία του εδάφους να μπορεί να αναπτυχθεί εξ ολοκλήρου μέσα σε αυτή. Συνεπώς, τα ελατήρια αντιστοιχούν στις ιδιότητες του υλικού επίχωσης (χαλαρή έως μέσης πυκνότητας άμμος) και όχι του φυσικού εδάφους.



**Σχήμα 4.3:** Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους-αγωγού με ελαστοπλαστικά ελατήρια.

**Figure 4.3:** Simulation of the pipe-ground interaction with elastoplastic springs.

Για τις αριθμητικές αναλύσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο για την επαλήθευση της αναλυτικής μεθοδολογίας, θεωρήθηκε ότι ο αγωγός θα τοποθετηθεί 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:	$\phi = 36 \text{ deg}$

Γωνία τριβής μεταξύ αγωγού και εδάφους:	$\delta = 24 \text{ deg}$
Συντελεστής ουδέτερης ώθησης γαιών:	$K_o = 0.50$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, για λόγους συμβατότητας, οι παράμετροι για τα εδαφικά ελατήρια που χρησιμοποιούνται στις αριθμητικές αναλύσεις, θα χρησιμοποιηθούν επίσης και στους υπολογισμούς με την αναλυτική μεθοδολογία.

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

$$t_u = \frac{\pi \cdot D}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot (1 + K_o) \cdot \tan \delta \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (4.4)$$

όπου,  $K_o$  = συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών

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

$D$  = εξωτερική διάμετρος αγωγού

$\gamma$  = υπό άνωση ειδικό βάρος επίχωσης

$\delta$  = γωνία τριβής μεταξύ αγωγού και επίχωσης

Ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας του αγωγού, η γωνία τριβής  $\delta$  είναι ίση με το 50÷100% της γωνίας τριβής  $\phi$  της επίχωσης. Για τα οριζόντια ελατήρια της αριθμητικής προσομοίωσης χρησιμοποιείται μία μέση τιμή γωνίας  $\delta=2/3\phi$ .

Η μέγιστη αξονική αντίσταση επιτυγχάνεται αρχικά σε μία σχετική μετατόπιση  $x_u$  της τάξης των 2.5 έως 5.0 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 ελατήρια αυτά προσομοιώνουν την αντίσταση που ασκείται από το περιβάλλον έδαφος σε οποιαδήποτε οριζόντια μετατόπιση του αγωγού. Κατά συνέπεια, οι μηχανισμοί της αλληλεπίδρασης εδάφους-αγωγού είναι παρόμοιοι με εκείνους των κατακόρυφων πλακών αγκύρωσης ή των θεμελίων που κινούνται οριζόντια σχετικά με το περιβάλλον έδαφος, ενεργοποιώντας έτσι 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 and O'Rourke, 1983b):

$$p = \frac{y}{A + B \cdot y} \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (4.5)$$

όπου,  $A = 0.15 y_u / p_u$

$B = 0.85 / p_u$

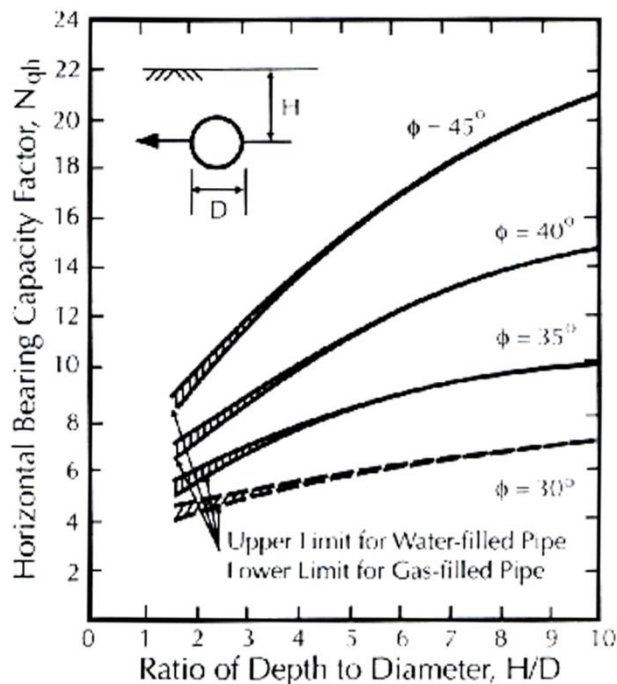
$p_u = \gamma H N_{qh} D$

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

$y_u = 0.07 \text{ to } 0.10 (H+D/2)$  για χαλαρή άμμο ή

$y_u = 0.02 \text{ to } 0.03 (H+D/2)$  για πυκνή άμμο

Στην περίπτωση προσάρτησης δι-γραμμικής ελαστοπλαστικής σχέσης στην Εξίσωση 4.5 για  $p=0.5p_u$  όπως αυτή που κάνουμε στα πλαίσια του εν λόγω παραδοτέου, οι προηγούμενες τιμές του  $y_u$  θα πρέπει να πολλαπλασιασθούν επί 0.26.



**Σχήμα 4.4:** Συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας σύμφωνα με τους Trautmann & O'Rourke (1983b)

**Figure 4.4:** Lateral bearing capacity coefficient after Trautmann & O'Rourke (1983b)

**Εγκάρσια Κατακόρυφα Ελατήρια.-** Οι δυνάμεις αντίστασης για τα κατακόρυφα ελατήρια είναι μη συμμετρικές, δηλαδή η απόκριση είναι διαφορετική για τις «προς

τα κάτω» και για τις «προς τα πάνω» μετακινήσεις, δεδομένου ότι η αντίσταση που εφαρμόζεται από το σχετικά λεπτό στρώμα της επίχωσης πάνω από τον αγωγό είναι σημαντικά μικρότερη.

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

$$q_u = \gamma \cdot H \cdot N_q \cdot D + 0.5 \cdot \gamma \cdot D^2 \cdot N_\gamma \quad (\text{δύναμη/μονάδα μήκους}) \quad (4.6)$$

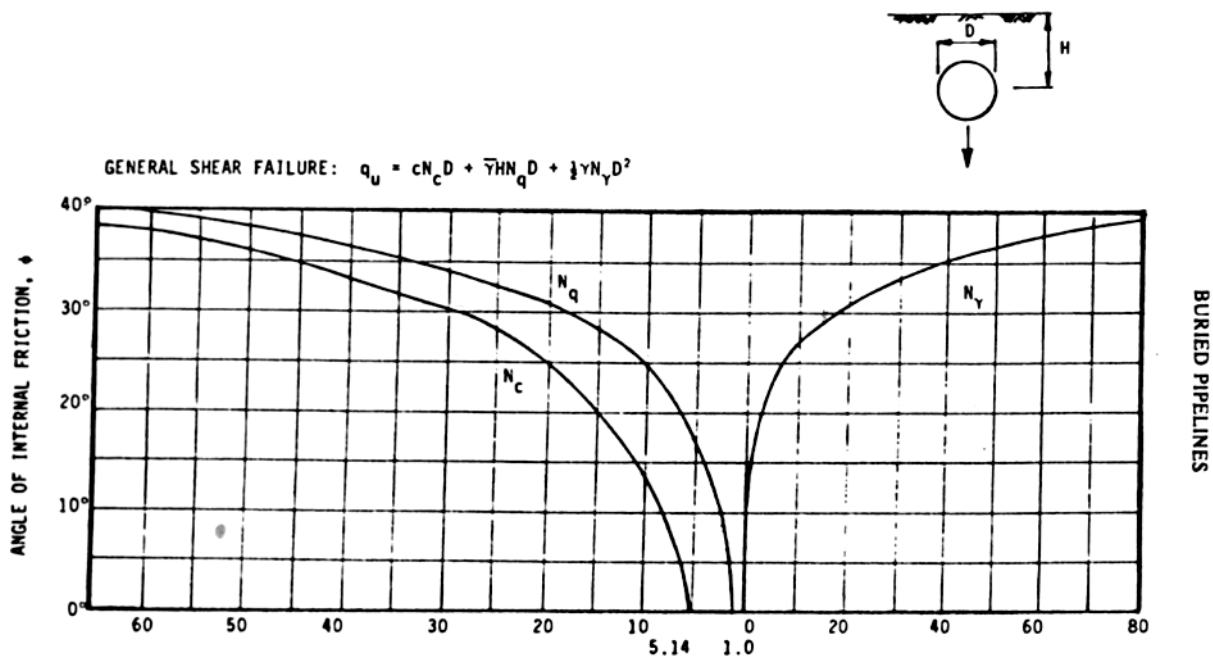
όπου:  $N_q, N_\gamma$  = συντελεστές φέρουσας ικανότητας για λωριδωτά θεμέλια που φορτίζονται κατακόρυφα προς τα κάτω-υπολογίζονται από το Σχήμα 4.5 συναρτήσει της γωνίας τριβής  $\phi$  (Meyerhof, 1955),

$\gamma$  = 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 4.5: Συντελεστές κατακόρυφης (προς τα κάτω) φέρουσας ικανότητας, σύμφωνα με τον Meyerhof (1955)

Figure 4.5: Vertical (downwards) bearing capacity coefficient after Meyerhof (1955)

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  $\zeta$  (Trautmann and O'Rourke 1983b):



$$q = \frac{z}{A + B \cdot z} \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (4.7)$$

όπου:  $A = 0.07 z_u / q_u$

$$B = 0.93 / q_u$$

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

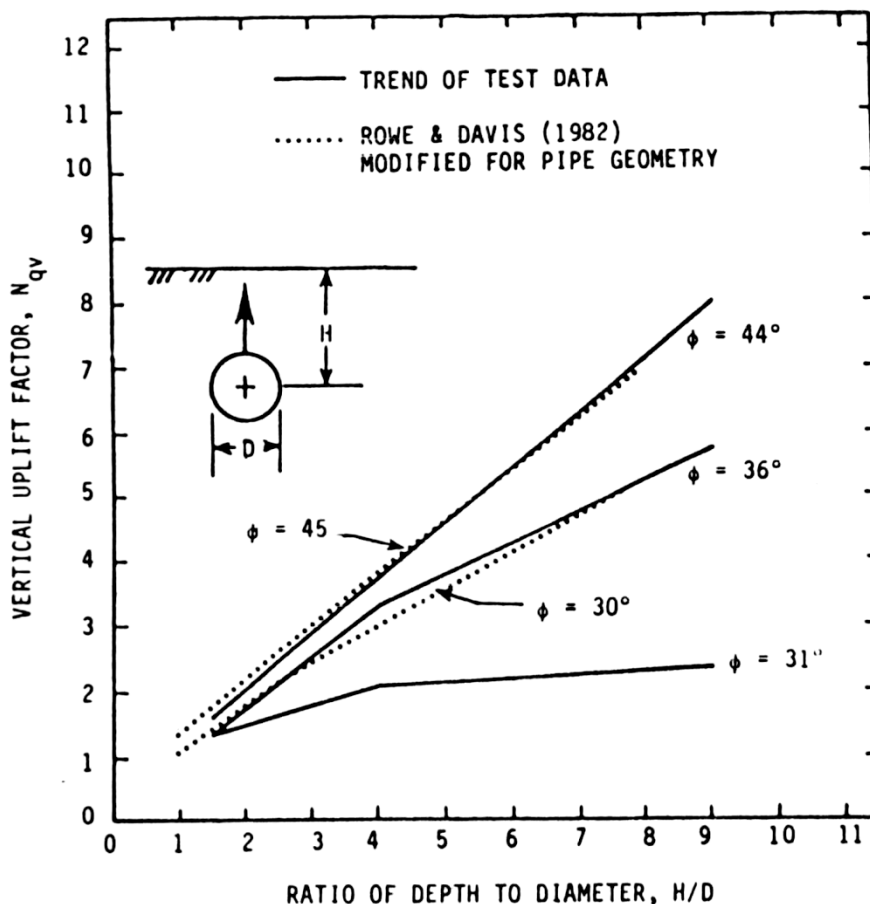
$$q_u = \gamma \cdot H \cdot N_{qv} \cdot D \quad (4.8)$$

όπου ο συντελεστής κατακόρυφης ανύψωσης  $N_{qv}$  δίνεται στο Σχήμα 4.6 ως συνάρτηση του λόγου του βάθους του άξονα του αγωγού προς τη διάμετρο  $H/D$  και της γωνίας τριβής της επιχώσης  $\phi$ .

Από τις δύο ομάδες καμπύλων που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.6, 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.

Με βάση τις δοκιμές πεδίου (Esquivel-Diaz, 1967, Trautman and O'Rourke 1983a), η τιμή της προς τα άνω μετατόπισης που απαιτείται για έναρξη της διαρροής είναι  $z_{u,up} = (0.010 \pm 0.015)H$ , για πυκνές έως χαλαρές άμμους αντίστοιχα. Όταν στην Εξ. 4.10 προσαρμόζεται 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 4.1.



Σχήμα 4.6: Συντελεστής κατακόρυφης (προς τα άνω) φέρουσας ικανότητας σύμφωνα με τους Trautmann & O'Rourke (1983b)

Figure 4.6: Vertical (upwards) bearing capacity coefficient after Trautmann & O'Rourke (1983b)

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά των εδαφικών ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές αναλύσεις.

Table 4.1: Characteristics of the ground springs used for the numerical analyses.

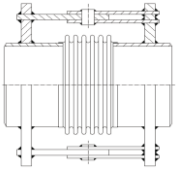
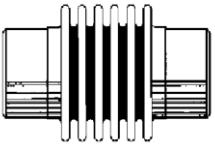
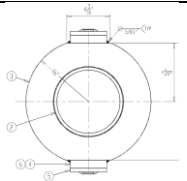
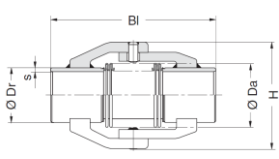
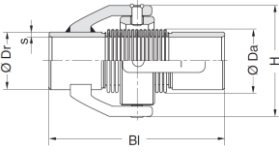
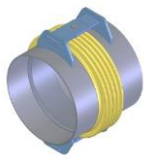
	Εξωτ. διάμετρος σωλήνα, D (mm)	762.0
<b>ΑΞΟΝΙΚΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ</b>	Οριακό φορτίο, $t_u$ (kN/m)	22.75
	Μετατόπιση διαρροής, $x_u$ (mm)	3.0
<b>ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ</b>	Οριακό φορτίο, $p_u$ (kN/m)	134.45 ( $N_{qh}=6.2$ )
	Μετατόπιση διαρροής, $y_u$ (mm)	35.7
<b>ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ (-ΠΡΟΣ ΤΑ ΑΝΩ)</b>	Οριακό φορτίο, $q_u$ (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 ( $N_q=37, N_v=42$ )
	Μετατόπιση διαρροής, $z_{u,dn}$ (mm)	95.3

### 4.1.3 Προσομοίωση εύκαμπτων κόμβων

Όπως παρουσιάστηκε εκτενώς στο παραδοτέο 7.1 της Ε.Ε. 7, οι εμπορικά διαθέσιμοι εύκαμπτοι κόμβοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοιου είδους εφαρμογές είναι τύπου “Bellows”. Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των εν λόγω κόμβων, με βάση τις προσφορές που συγκεντρώθηκαν στα πλαίσια της Ε.Ε. 7.

**Πίνακας 4.2:** Σύγκριση εμπορικά διαθέσιμων εύκαμπτων κόμβων, σύμφωνα με τις συγκεντρωμένες προσφορές στα πλαίσια του Παραδοτέου 7.1.

**Table 4.2:** Comparison of commercially available flexible joints, according to the collected offers from Deliverable 7.1.

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

Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά, οι εύκαμπτοι κόμβοι προσομοιώθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων 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 υπάρχει η δυνατότητα να οριστεί μια τιμή για τη μέγιστη στροφή, ύστερα από την οποία ο κόμβος είτε «καταστρέφεται» και σταματάει να μεταφέρει ροπές, είτε «μαγκώνει» και η στροφή περιορίζεται στη μέγιστη. Για τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του κόμβου, ελλείπει ακριβέστερων δεδομένων από τους κατασκευαστές, επιλέχθηκαν τιμές σε αντιστοιχία με τα ευθύγραμμα τμήματα του αγωγού.

Οι τιμές που επιλέχθηκαν είναι:

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

#### 4.2 Δεδομένα Αριθμητικών Αναλύσεων

Για την επαλήθευση της ακρίβειας της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης έγιναν συνολικά δώδεκα (12) αριθμητικές αναλύσεις, για αγωγό με διάμετρο 30" και πάχος τοιχώματος 12.5mm. Σε κάθε αριθμητική ανάλυση προσομοιώθηκαν έξι (6) συνολικά εύκαμπτοι κόμβοι, οι οποίοι απέχουν μεταξύ τους κατά 8m, ενώ θεωρήθηκαν δύο ακραίες περιπτώσεις: το ρήγμα να διασταυρώνεται με τον αγωγό στη μέση μεταξύ του 3<sup>ου</sup> και του 4<sup>ου</sup> κόμβου ή ακριβώς πριν τον 4<sup>ο</sup> κόμβο. Η γωνία  $\beta$  με την οποία διασταυρώνεται το ρήγμα με τον αγωγό έλαβε τιμές 60° και 90°, ενώ η συνολική μετακίνηση του ρήγματος ήταν ίση με 0.75m, 1.5m και 3.0m.

Τα χαρακτηριστικά και οι τιμές των παραμέτρων της κάθε ανάλυσης συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 4.3:** Βασικά χαρακτηριστικά των εκτελεσθέντων παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων.

**Table 4.3:** Basic characteristics of the performed parametric numerical analyses.

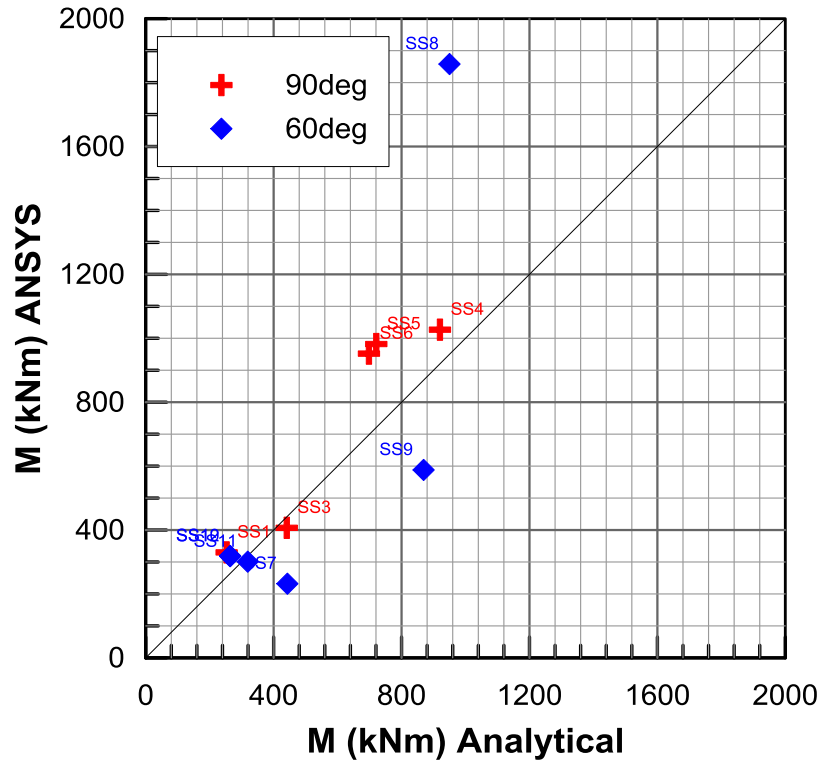
A/A	D	t (mm)	Απόσταση κόμβων (m)	Θέση διασταύρωσης	Γωνία β (°)	Μετακίνηση ρήγματος (m)	Δx (m)	Δy (m)
SS1	30"	12,5	8,00	Ανάμεσα	90	0,75	0,00	0,75
SS2	30"	12,5	8,00	Άκρη	90	0,75	0,00	0,75
SS3	30"	12,5	8,00	Ανάμεσα	90	1,50	0,00	1,50
SS4	30"	12,5	8,00	Άκρη	90	1,50	0,00	1,50
SS5	30"	12,5	8,00	Ανάμεσα	90	3,00	0,00	3,00
SS6	30"	12,5	8,00	Άκρη	90	3,00	0,00	3,00
SS7	30"	12,5	8,00	Ανάμεσα	60	0,75	0,38	0,65
SS8	30"	12,5	8,00	Άκρη	60	0,75	0,38	0,65
SS9	30"	12,5	8,00	Ανάμεσα	60	1,50	0,75	1,30
SS10	30"	12,5	8,00	Άκρη	60	1,50	0,75	1,30
SS11	30"	12,5	8,00	Ανάμεσα	60	3,00	1,50	2,60
SS12	30"	12,5	8,00	Άκρη	60	3,00	1,50	2,60

### 4.3 Σύγκριση με αναλυτικές προβλέψεις

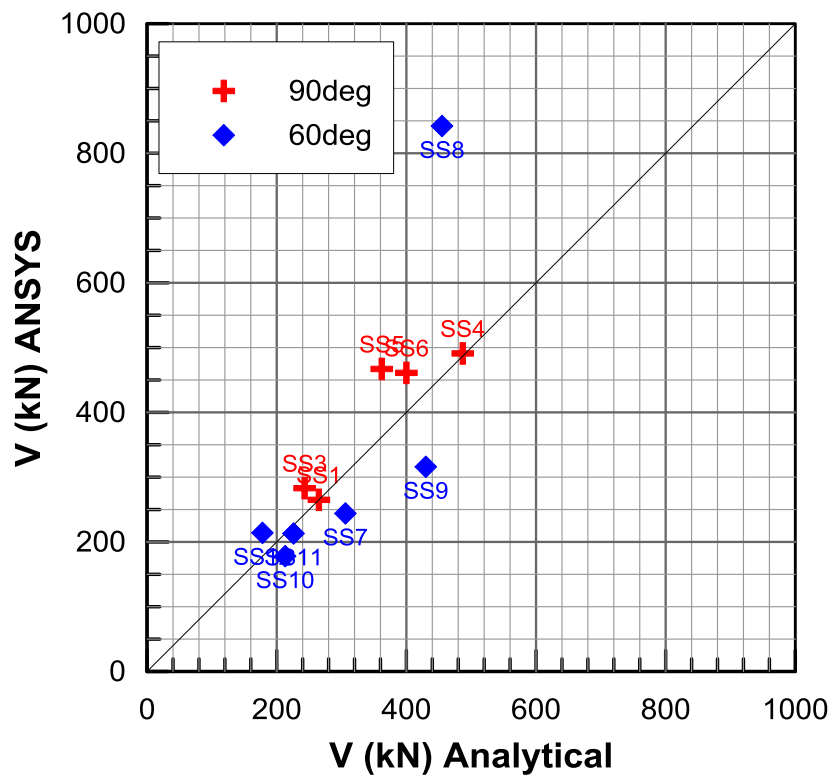
Προκειμένου να γίνει μία εποπτική αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας, στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται συγκρίσεις "1 προς 1" για τα βασικά μεγέθη που μας αφορούν: αναπτυσσόμενες δυνάμεις, ροπές και παραμορφώσεις στον αγωγό, στροφές στους κόμβους. Η σύγκριση αφορά τις μέγιστες τιμές που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση και από την αναλυτική επίλυση. Οι αριθμοί δίπλα από κάθε σημείο αναφέρονται στον αύξοντα αριθμό της κάθε ανάλυσης, όπως αναγράφονται στον Πίνακα 4.3.

Όπως γίνεται φανερό από τις συγκρίσεις η αναλυτική μεθοδολογία δίνει πολύ καλά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, εφόσον λαμβάνει υπόψη της και τα φαινόμενα δευτέρας τάξης που προκαλούνται από τις πολύ μεγάλες αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στον αγωγό. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην αναπτυσσόμενη αξονική δύναμη και κατά συνέπεια εξαρτώνται ισχυρά από τη σωστή εκτίμηση τους. Επιπροσθέτως η μεθοδολογία δίνει συντηρητικά αποτελέσματα για μικρές επιβαλλόμενες μετατοπίσεις, οπότε και δεν ενεργοποιείται ο θεωρούμενος μηχανισμός, αλλά οι μετακινήσεις περιορίζονται μέχρι τον πρώτο κόμβο.

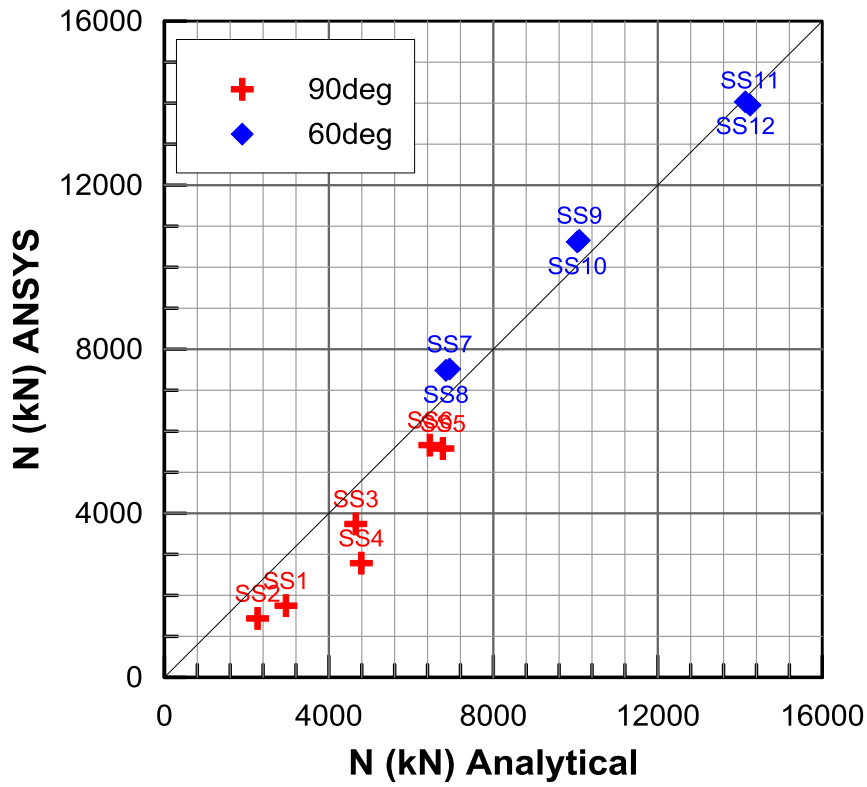
Μετά την εποπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση των διαγραμμάτων κάθε επιμέρους επίλυσης στα Σχήματα 4.14 έως 4.30. Τα σχήματα αφορούν διάμετρο αγωγού  $D=30''$  και πάχος τοιχώματος  $t=12.5\text{mm}$ .



Σχήμα 4.7: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων: Ροπές.  
 Figure 4.7: “1-1” comparison for all parametric analyses: Moments.

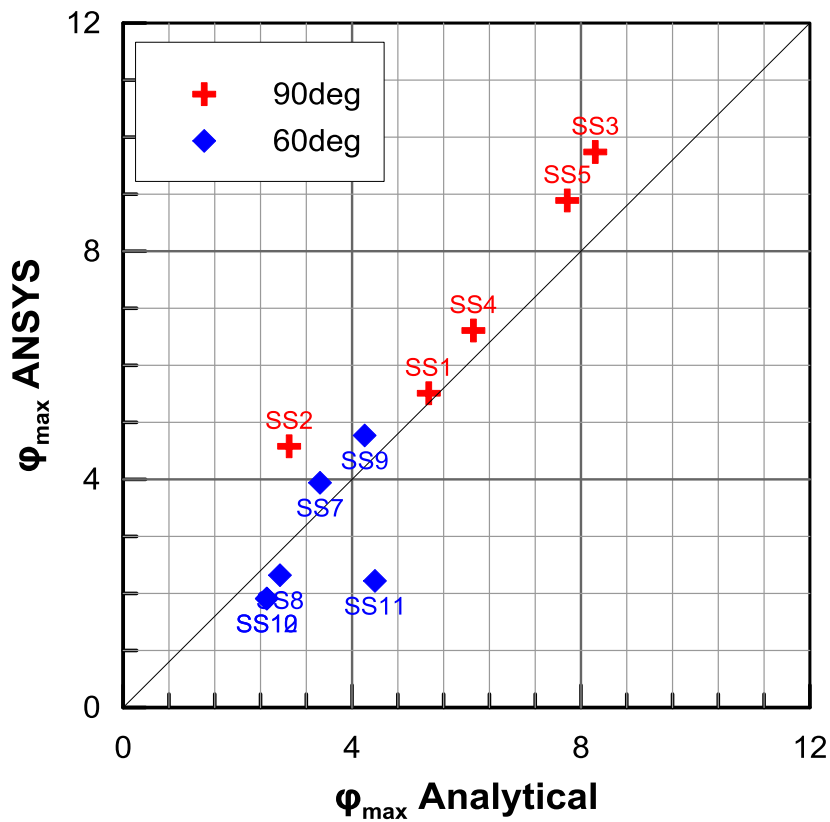


Σχήμα 4.8: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων: Τέμνουσες.  
 Figure 4.8: “1-1” comparison for all parametric analyses: Vertical Force.



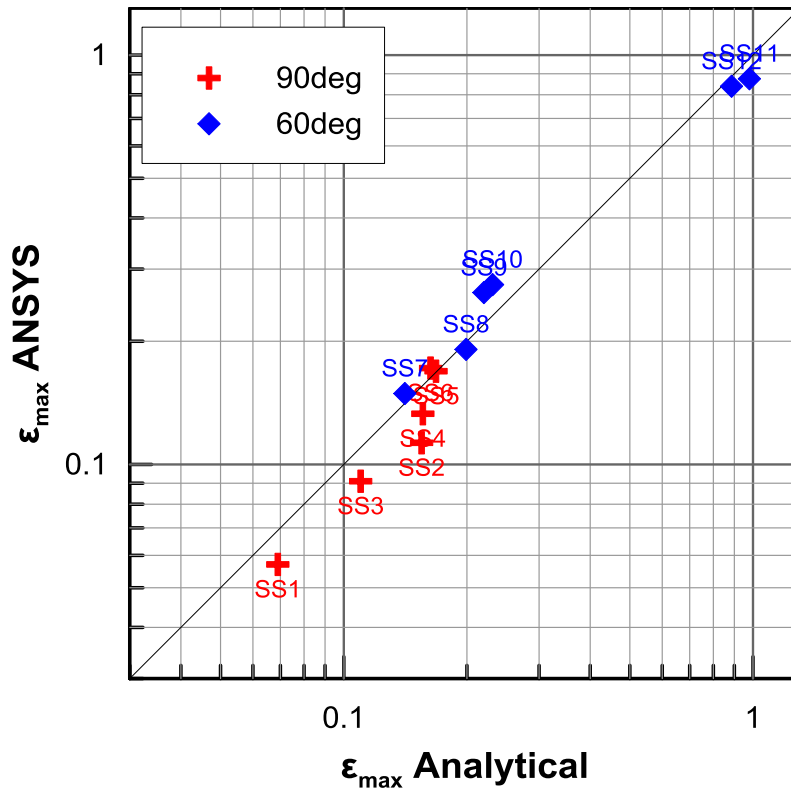
Σχήμα 4.9: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων: Αξονικές.

Figure 4.9: “1-1” comparison for all parametric analyses: Axial.



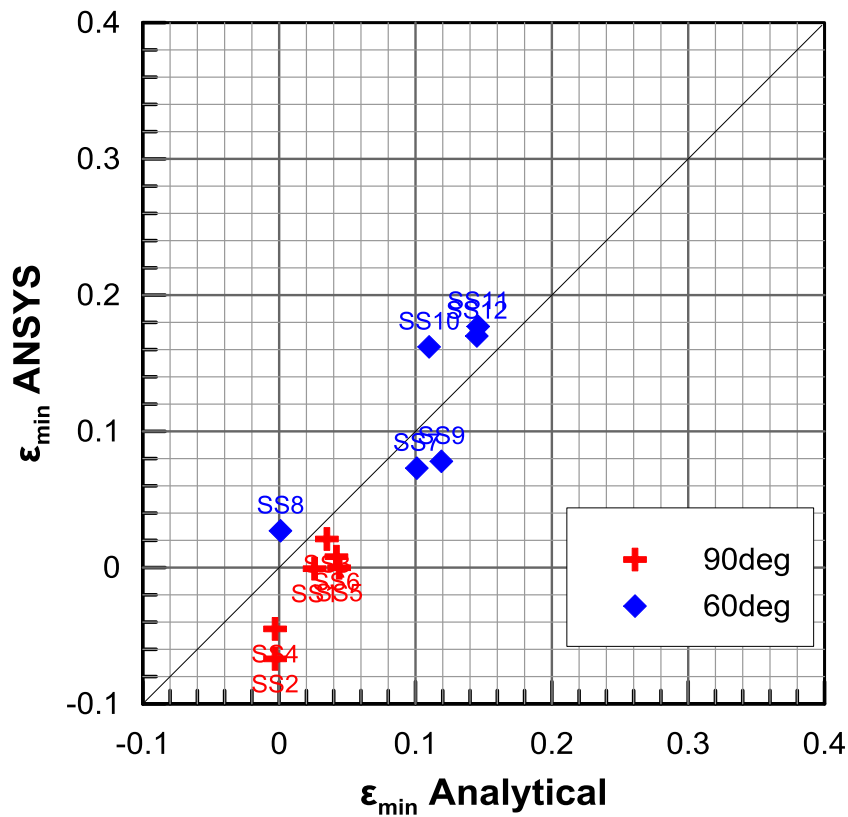
Σχήμα 4.10: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων:  $\phi_{max}$ .

Figure 4.10: “1-1” comparison for all parametric analyses:  $\phi_{max}$ .



Σχήμα 4.11: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων:  $\epsilon_{max}$ .

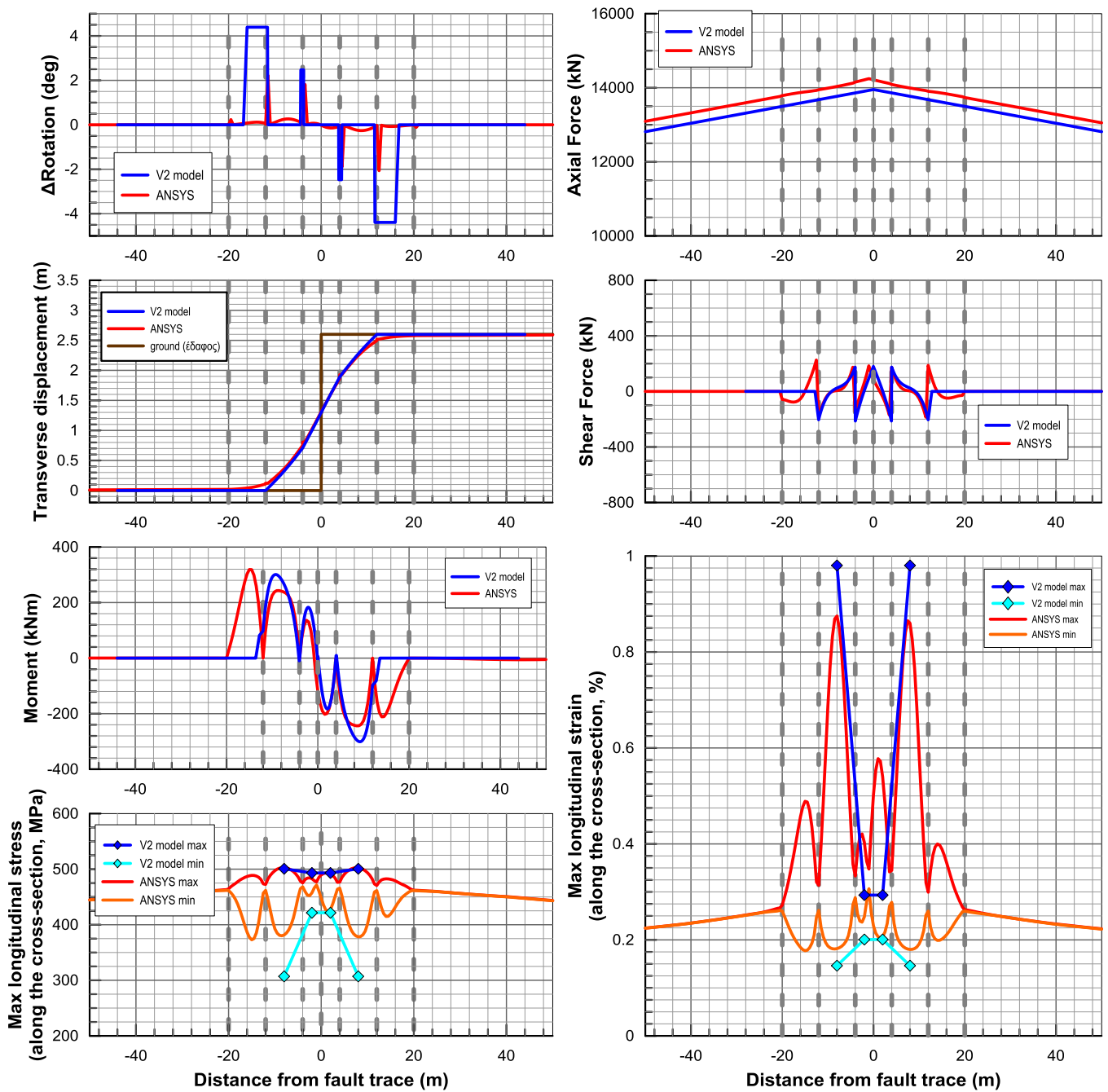
Figure 4.11: “1-1” comparison for all parametric analyses:  $\epsilon_{max}$ .



Σχήμα 4.12: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων:  $\epsilon_{min}$ .

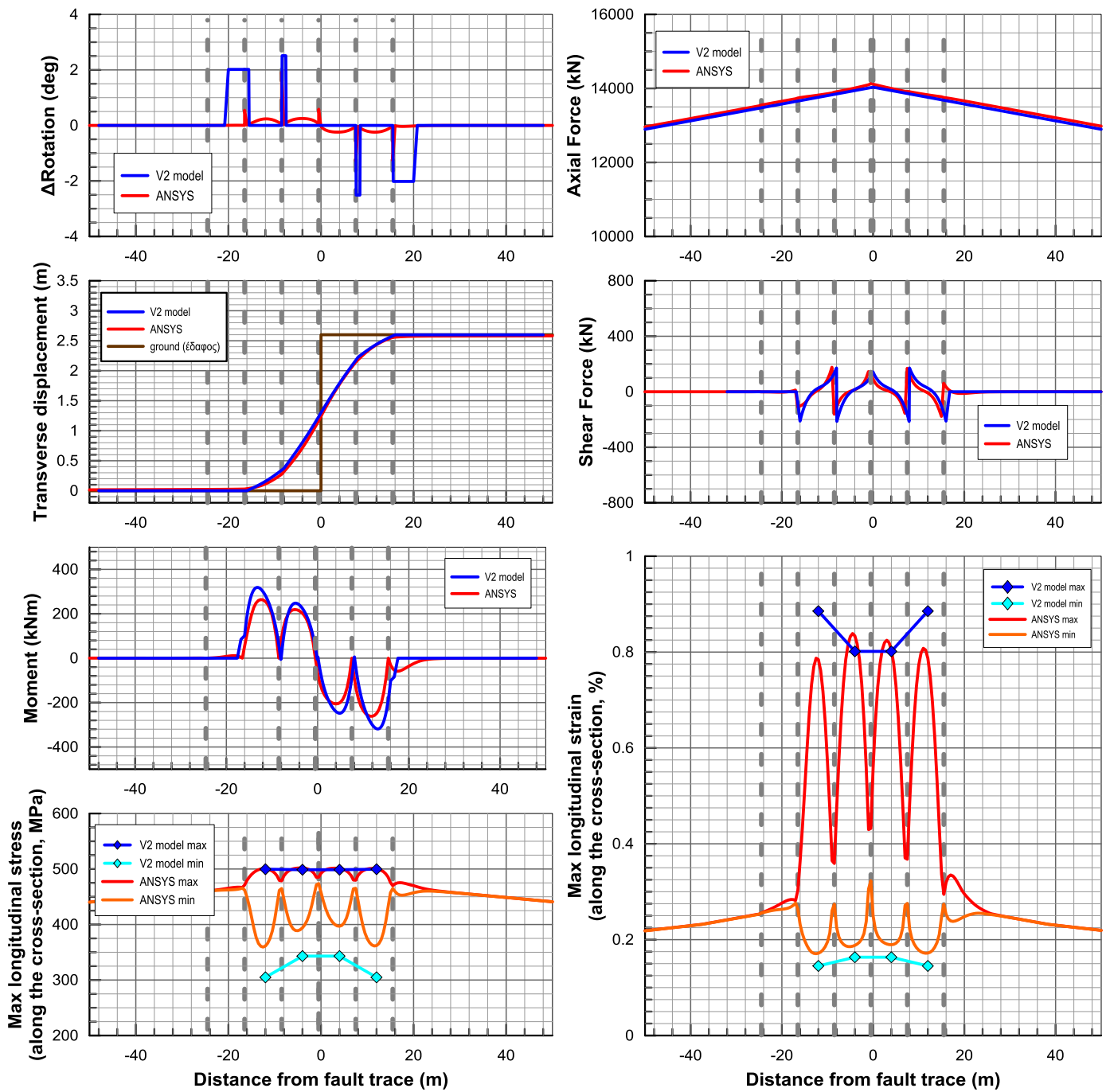
Figure 4.12: “1-1” comparison for all parametric analyses:  $\epsilon_{min}$ .





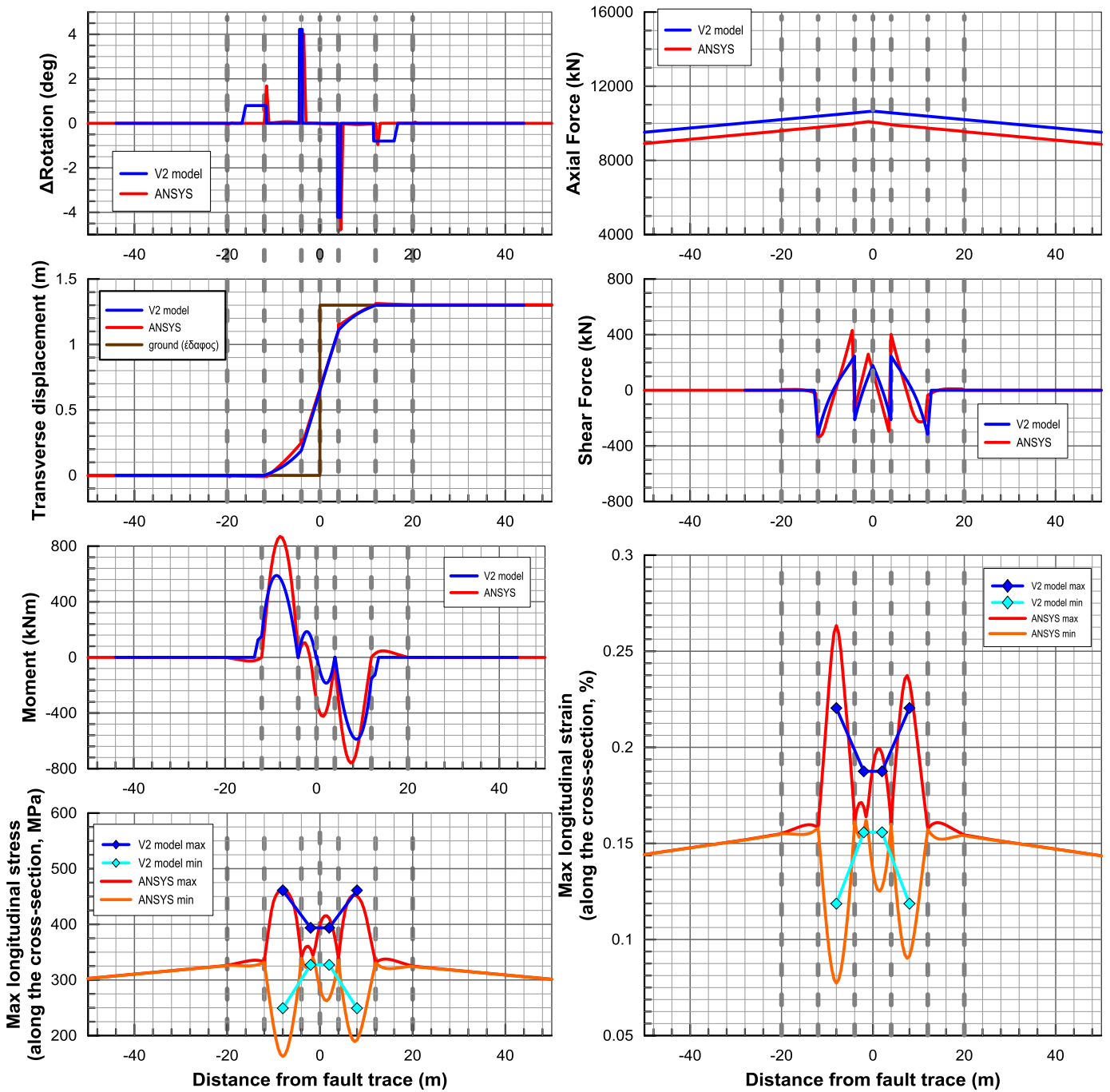
Σχήμα 4.13: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 3m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=60^\circ$  και θέση ανάμεσα από τους κόμβους.

Figure 4.13: Comparison of results for the case with fault displacement 3m, crossing angle  $\beta=60^\circ$  and position between the two joints.



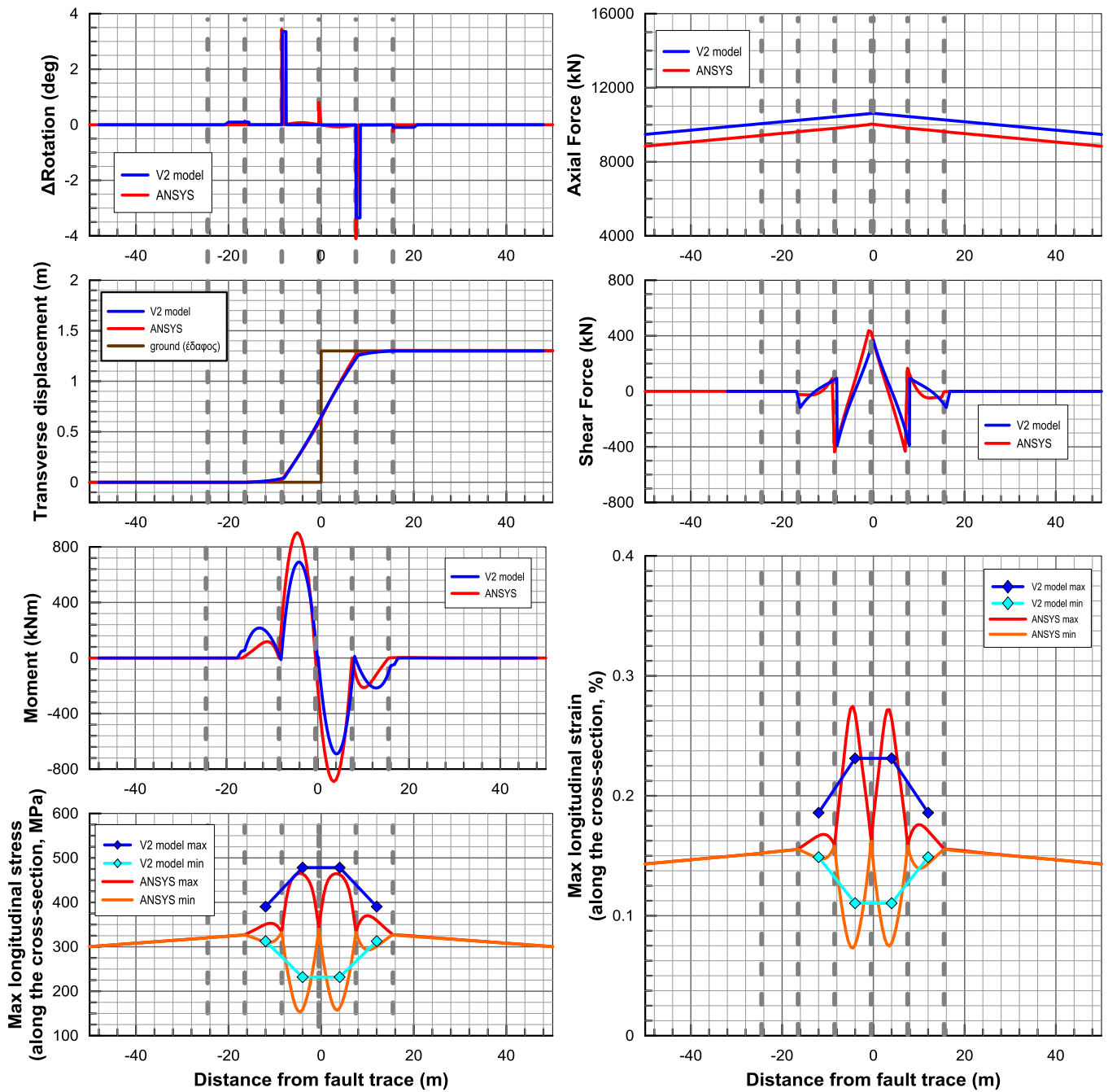
Σχήμα 4.14: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 3m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=60^\circ$  και θέση δίπλα σε κόμβο.

Figure 4.14: Comparison of results for the case with fault movement 3m, crossing angle  $\beta=60^\circ$  and position near a joint.



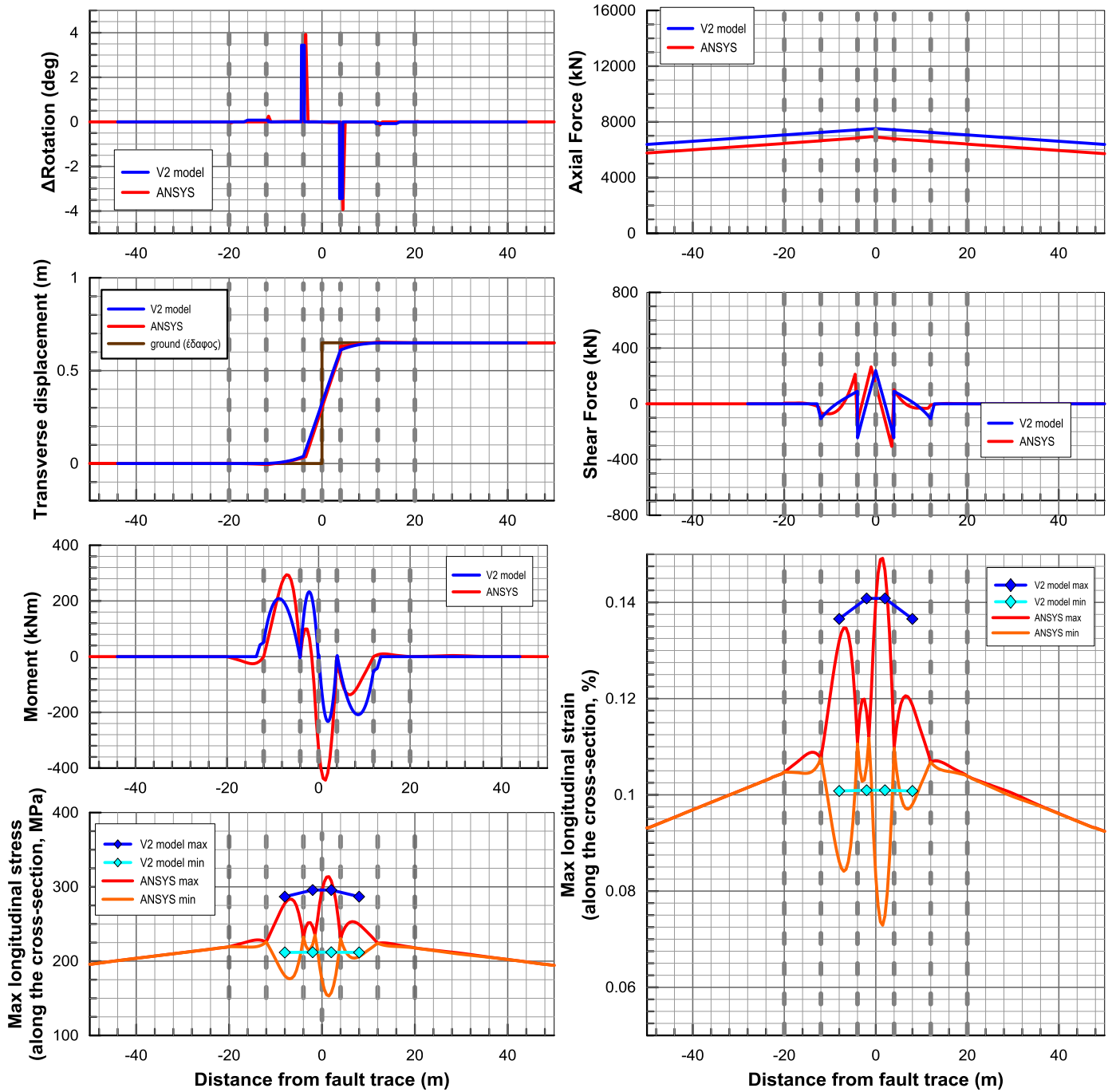
Σχήμα 4.15: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 1.5m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=60^\circ$  και θέση ανάμεσα από τους κόμβους.

Figure 4.15: Comparison of results for the case with fault displacement 1.5m, crossing angle  $\beta=60^\circ$  and position between the two joints.



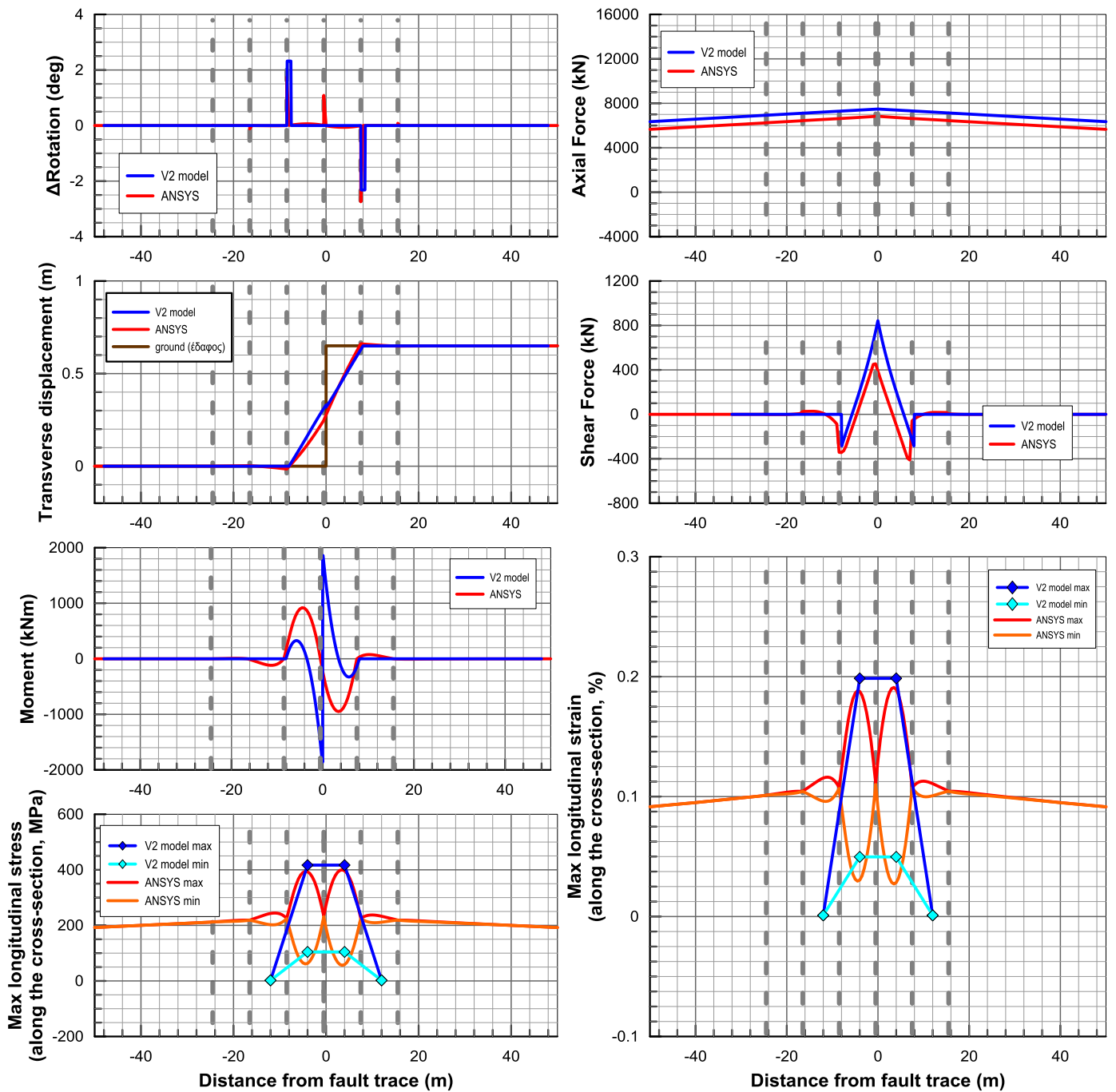
Σχήμα 4.16: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 1.5m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=60^\circ$  και θέση δίπλα σε κόμβο.

Figure 4.16: Comparison of results for the case with fault displacement 1.5m, crossing angle  $\beta=60^\circ$  and position near a joint.



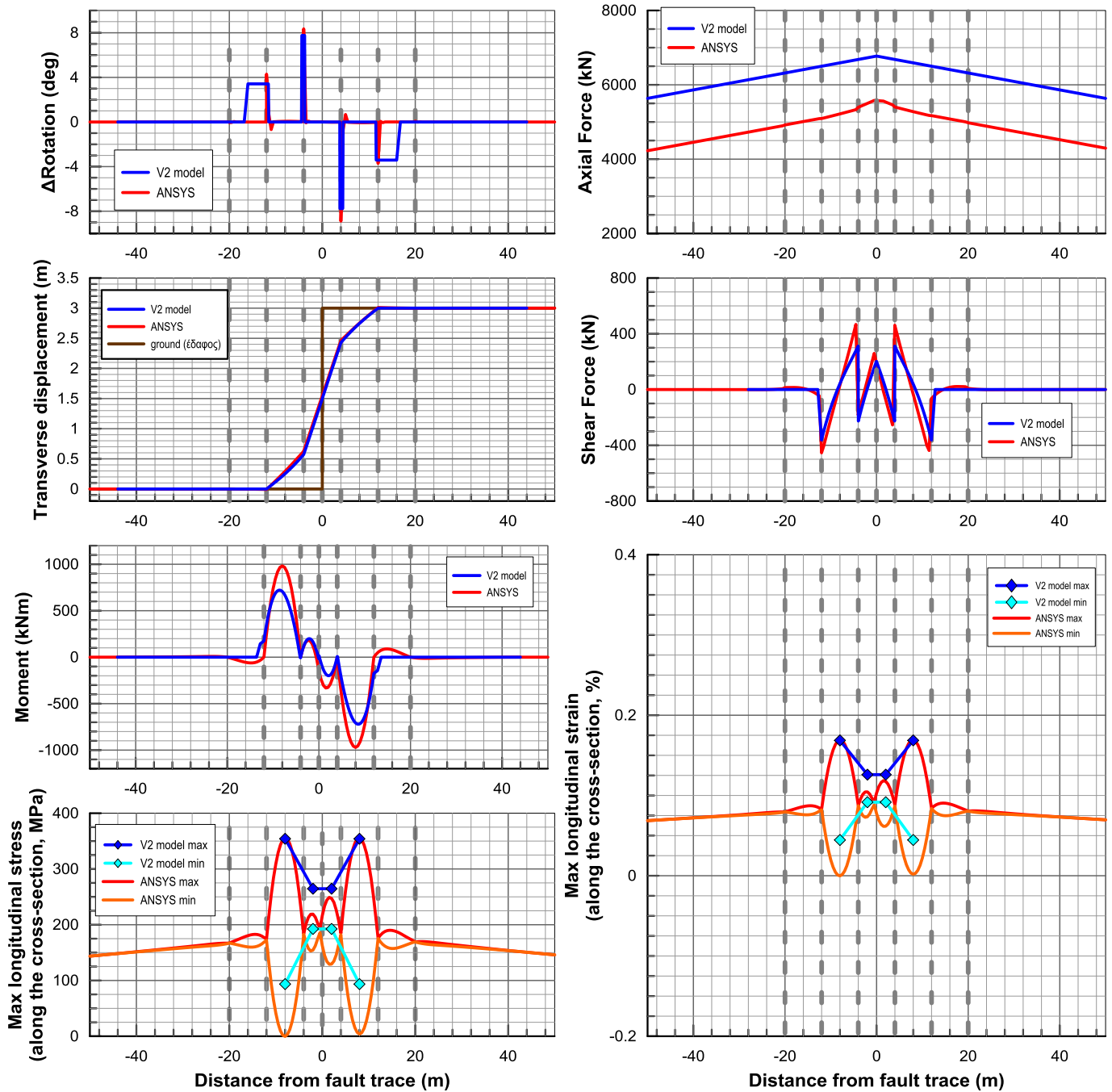
Σχήμα 4.17: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 0.75m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=60^\circ$  και θέση ανάμεσα από τους κόμβους.

Figure 4.17: Comparison of results for the case with fault displacement 0.75m, crossing angle  $\beta=60^\circ$  and position between the two joints.



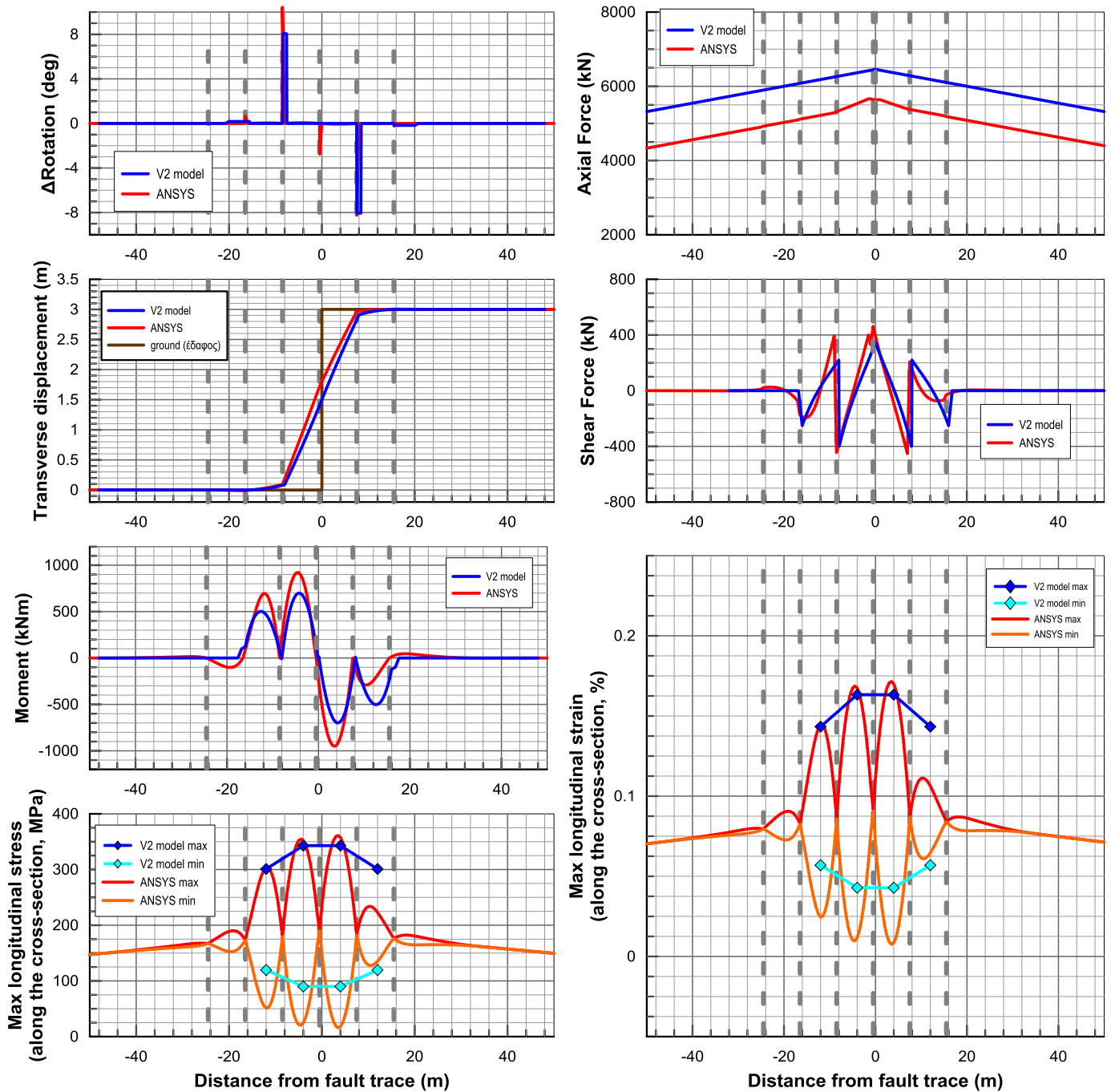
Σχήμα 4.18: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 0.75m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=60^\circ$  και θέση δίπλα σε κόμβο.

Figure 4.18: Comparison of results for the case with fault displacement 0.75m, crossing angle  $\beta=60^\circ$  and position near a joint.



Σχήμα 4.19: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 3m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=90^\circ$  και θέση ανάμεσα από τους κόμβους.

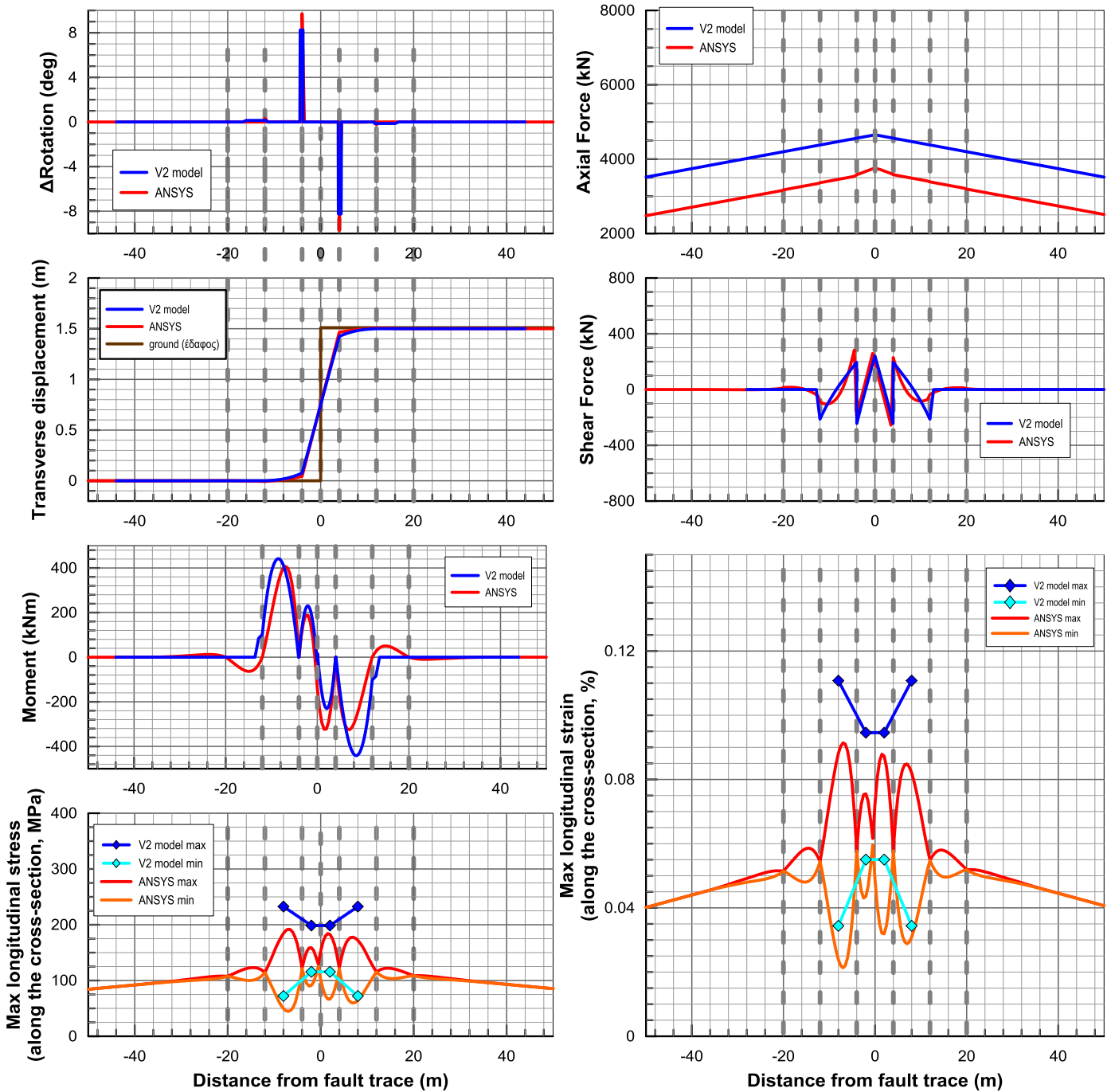
Figure 4.19: Comparison of results for the case with displacement 3m, crossing angle  $\beta=90^\circ$  and position between the two joints.



Σχήμα 4.20: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 3m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=90^\circ$  και θέση δίπλα σε κόμβο.

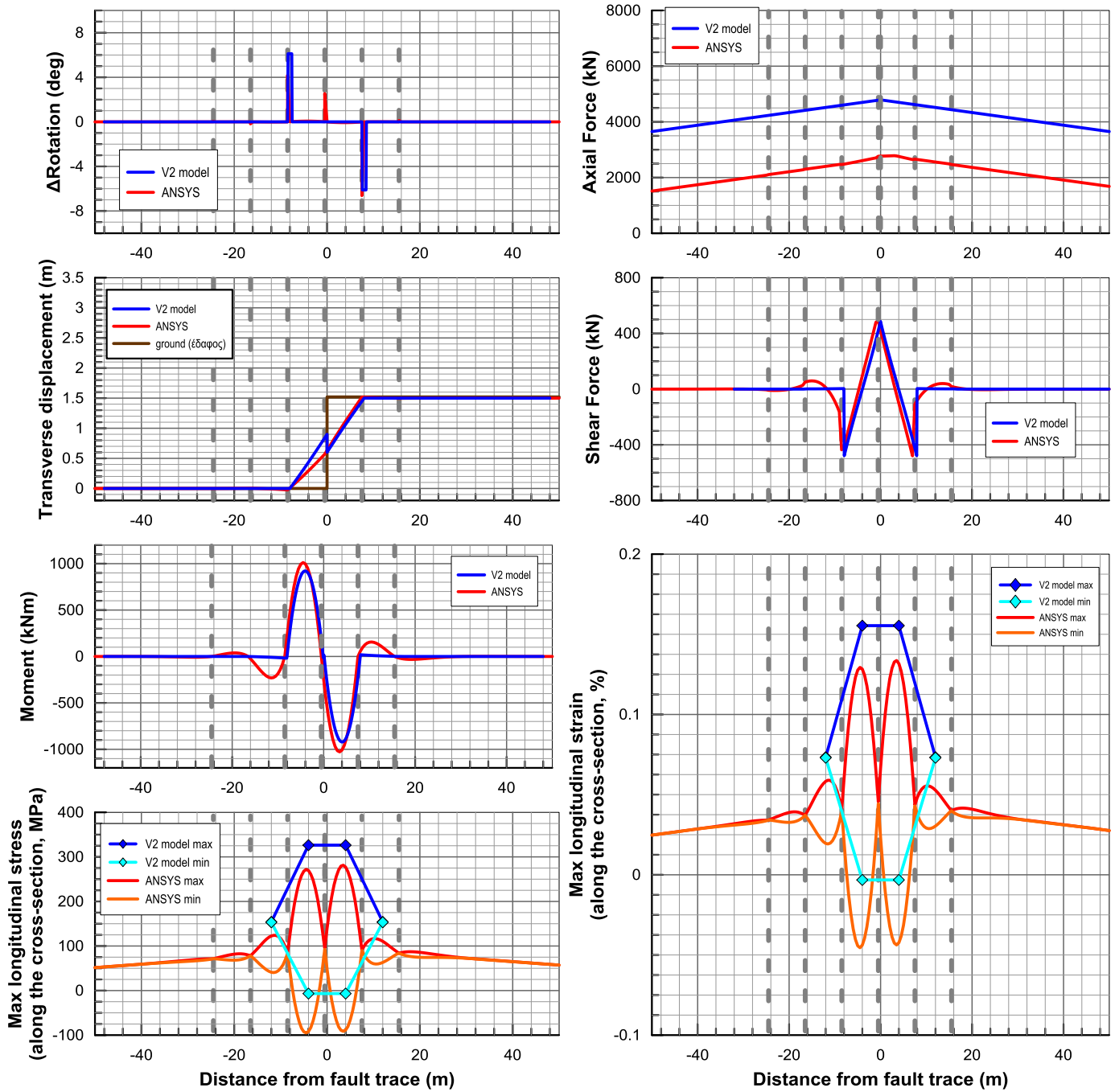
Figure 4.20: Comparison of results for the case with fault displacement 3m, crossing angle  $\beta=90^\circ$  and position near a joint.





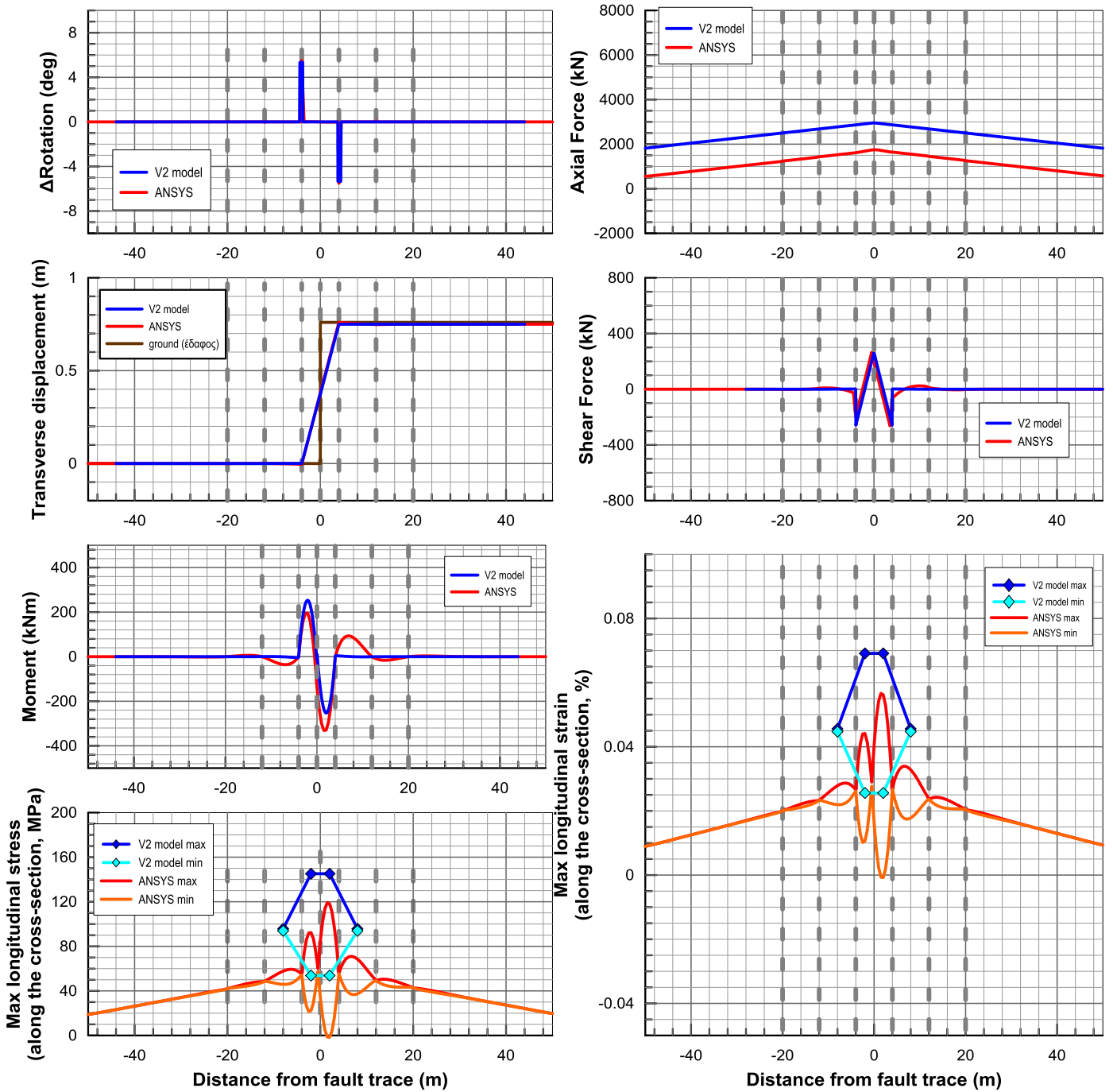
Σχήμα 4.21: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 1.5m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=90^\circ$  και θέση ανάμεσα από τους κόμβους.

Figure 4.21: Comparison of results for the case with fault displacement 1.5m, crossing angle  $\beta=90^\circ$  and position between the two joints.



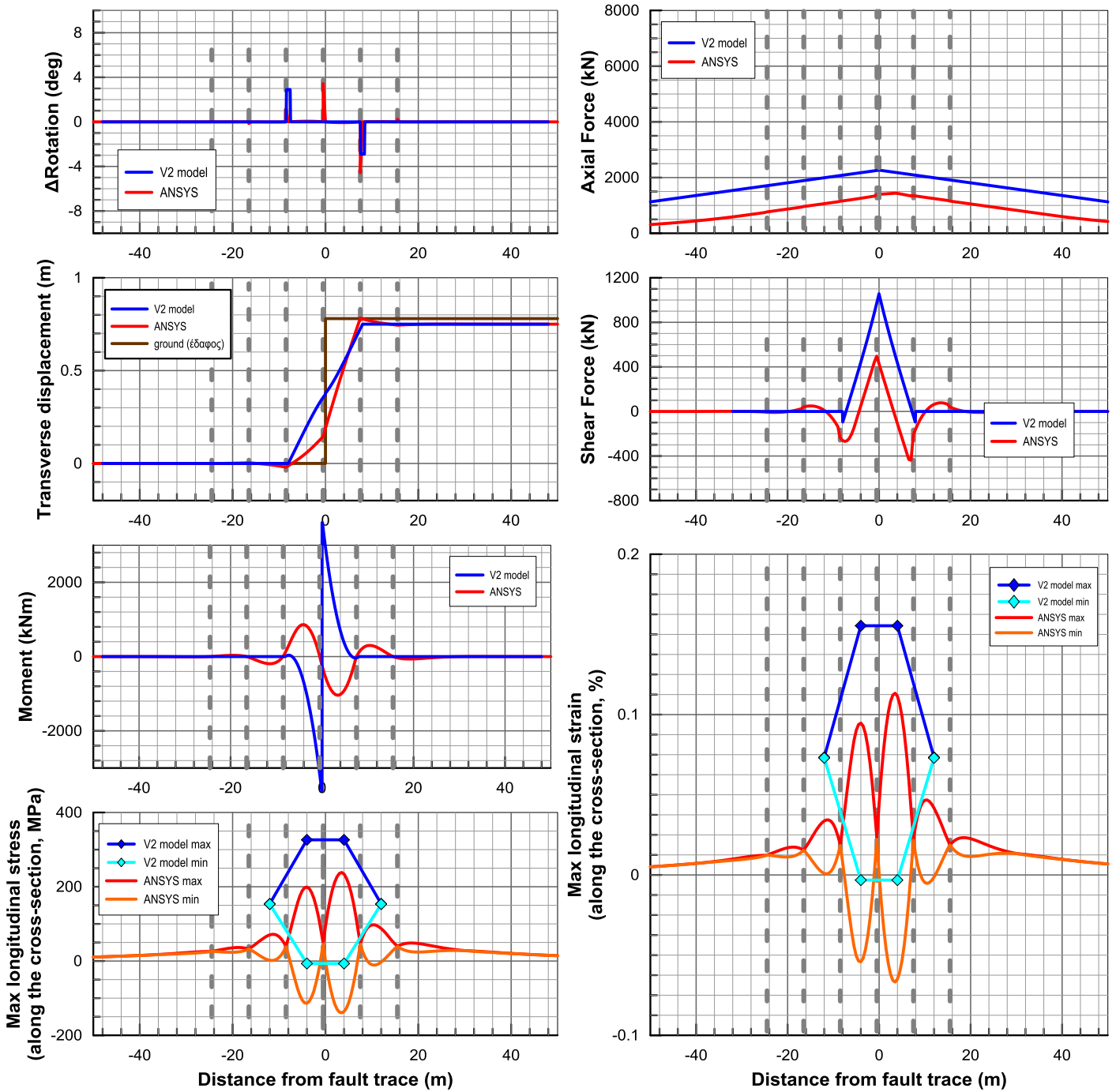
Σχήμα 4.22: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 1.5m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=90^\circ$  και θέση δίπλα σε κόμβο.

Figure 4.22: Comparison of results for the case with fault displacement 1.5m, crossing angle  $\beta=90^\circ$  and position near a joint.



Σχήμα 4.23: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 0.75m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=90^\circ$  και θέση ανάμεσα από τους κόμβους.

Figure 4.23: Comparison of results for the case with fault displacement 0.75m, crossing angle  $\beta=90^\circ$  and position between the two joints.



Σχήμα 4.24: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 0.75m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=90^\circ$  και θέση δίπλα σε κόμβο.

Figure 4.24: Comparison of results for the case with fault displacement 0.75m, crossing angle  $\beta=90^\circ$  and position near a joint.

# 5

## Κανονικά Ρήγματα: Παρουσίαση Αναλυτικής Μεθοδολογίας

---

### 5.1 Εισαγωγή

Η μεθοδολογία για τα ορθά ρήγματα ακολουθεί την ίδια ακριβώς λογική όπως και η μεθοδολογία για τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης που παρουσιάστηκε εκτενώς στο τρίτο κεφάλαιο. Για αυτό το λόγο δε θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι βασικές παραδοχές που είναι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.2 για τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και θα αναφερθούν μόνο οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο μεθοδολογιών.

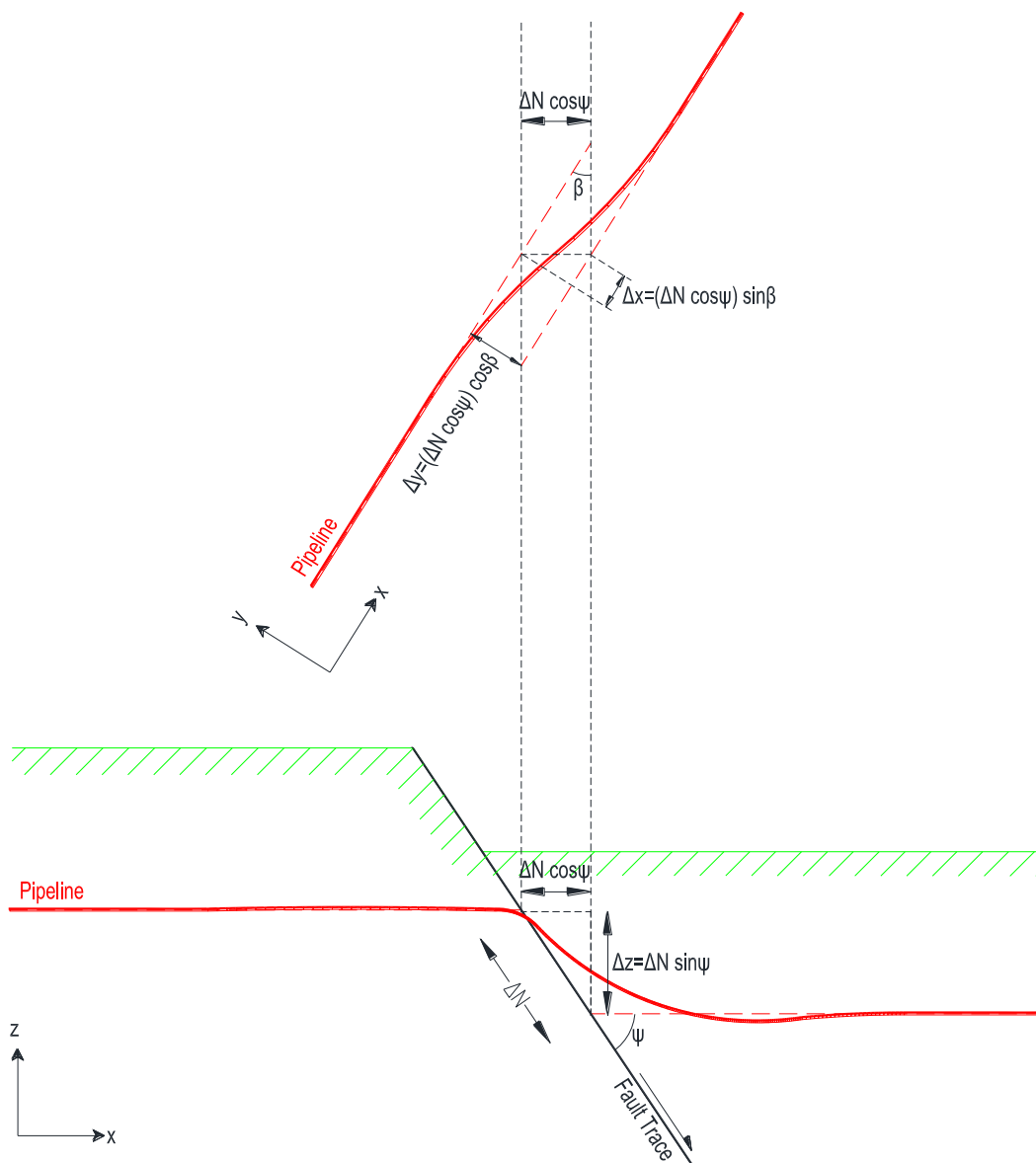
### 5.2 Πρόσθετες παραδοχές αναλυτικής μεθοδολογίας για κανονικά ρήγματα

Σε αντιστοιχία με την αναλυτική μεθοδολογία για τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης η αλληλεπίδραση του αγωγού με το περιμετρικό έδαφος της επίχωσης εξασφαλίζεται μέσω ελαστοπλαστικών ελατηρίων Winkler τόσο για τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις τριβής (όταν υπάρχει σχετική ολίσθηση μεταξύ εδάφους και αγωγού) όσο και για την εγκάρσια αντίσταση του εδάφους στην μετατόπιση του αγωγού, όπως έχει παρουσιαστεί αναλυτικά στην παράγραφο 4.2.

Οι εύκαμπτοι κόμβοι θεωρείται ότι μπορούν να παραμορφώνονται στροφικά περί τον άξονα  $y$ , με σταθερή στροφική δυσκαμψία ίση με  $C_r$ , ενώ έχουν διαμήκης και στροφική δυσκαμψία στους υπόλοιπους άξονες αντίστοιχη με αυτή των ενδιάμεσων τμημάτων του αγωγού. Πρέπει να σημειωθεί ότι η στροφική δυσκαμψία των κόμβων είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα να συμπεριφέρονται ουσιαστικά ως αρθρώσεις και να αναπτύσσονται ιδιαίτερα μικρές ροπές σε αυτούς.

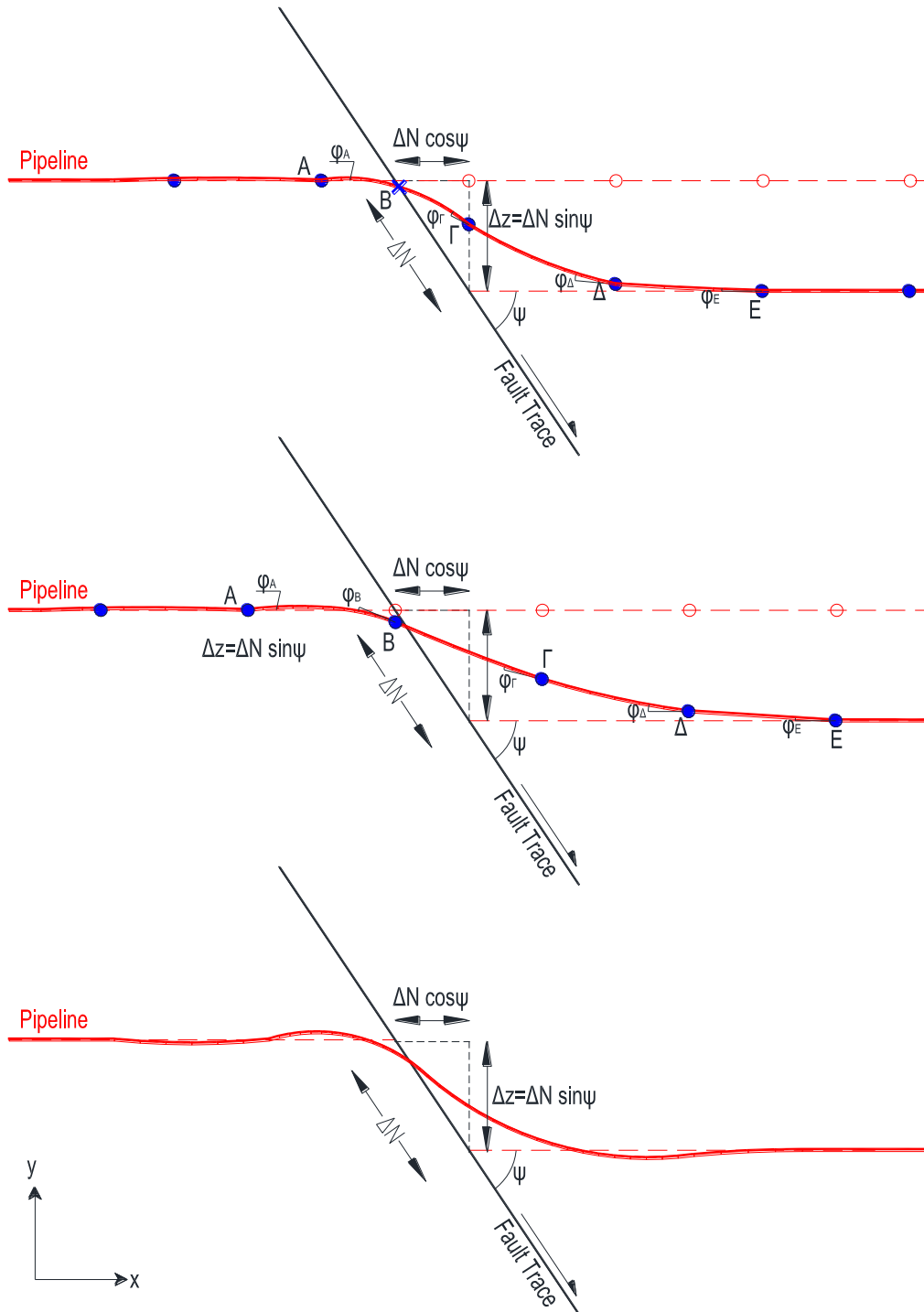
Και σε αυτή την περίπτωση το αναλυτικό προσομοίωμα αναπτύχθηκε με την παραδοχή ότι θα υπάρχει τουλάχιστον ένας κόμβος στο υπερκείμενο τμήμα (hanging wall) του ρήγματος και τουλάχιστον τρεις κόμβοι στο ολισθαίνον τμήμα. Πέραν τούτου, το προσομοίωμα θα πρέπει να μπορεί να λάβει υπόψη του την περίπτωση που το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό στην μέση μεταξύ δύο κόμβων ή δίπλα σε κάποιον από αυτούς.

Τέλος το ρήγμα θεωρείται επίπεδο, με μηδενικό πάχος ζώνης διάρρηξης, έτσι ώστε η τομή του με τον αγωγό να μπορεί να θεωρηθεί σημειακή και η μετατόπισή του να μπορεί να αναλυθεί σε δύο συν-επίπεδες συνιστώσες  $\Delta x$  και  $\Delta z$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1.



**Σχήμα 5.1:** Ανάλυση της μετατόπισης κανονικού ρήγματος στις συνιστώσες  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  και  $\Delta z$ .

**Figure 5.1:** Analysis of the normal fault displacement to the components  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  and  $\Delta z$ .



**Σχήμα 5.2:** Παραμορφωμένος φορέας αγωγού που διασταυρώνεται κάθετα με το ίχνος κανονικού ρήγματος: (α) ανάμεσα σε δύο εύκαμπτους κόμβους, (β) ακριβώς δίπλα από έναν απ' αυτούς και (γ) σε θέση χωρίς εύκαμπτους κόμβους.

**Figure 5.2:** Deformed shape of the pipe at a perpendicular crossing with a normal fault trace: (a) intersection between two flexible joints, (b) intersection exactly after one of the flexible joints and (c) intersection along a segment without any flexible joints.

Η ύπαρξη εύκαμπτων κόμβων στην ευρύτερη περιοχή που επηρεάζει η διάρρηξη του ρήγματος, διαφοροποιεί αισθητά τη συμπεριφορά του αγωγού με εύκαμπτους κόμβους συγκριτικά με αυτή των συνεχών αγωγών. Στα Σχήματα 5.2α και 5.2β παρουσιάζονται οι παραμορφωμένοι φορείς για τις δύο ακραίες περιπτώσεις: (α) το ρήγμα να διασταυρώνεται με τον αγωγό στην μέση μεταξύ δύο κόμβων και (β) να τέμνει τον άξονα του αγωγού ακριβώς δίπλα από ένα κόμβο. Επίσης, για τη διευκόλυνση της σύγκρισης, στο Σχήμα 5.2γ παρουσιάζεται ο παραμορφωμένος φορέας ενός αγωγού χωρίς εύκαμπτους κόμβους.

Από τα σχήματα αυτά γίνεται φανερό ότι η βασική διαφορά στη συμπεριφορά αγωγών όταν διασχίζουν κανονικά ρήγματα αντί για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, είναι ότι ο φορέας δεν παραμορφώνεται συμμετρικά ως προς το σημείο διασταύρωσης με το ρήγμα, αφού υπάρχει μεγάλη διαφορά στην αντίσταση του εδάφους όταν κινείται ο αγωγός προς τα κάτω και προς τα πάνω. Σε αντιστοιχία με το «καμπυλωμένο τμήμα» των ενιαίων αγωγών, οι εγκάρσιες μετατοπίσεις συγκεντρώνονται τώρα μεταξύ των σημείων Α και Ε εκατέρωθεν του ρήγματος, ενώ στον υπόλοιπο αγωγό, και για μήκος ίσο με το «μήκος αγκύρωσης», αναπτύσσονται μόνο αξονικές δυνάμεις τριβής.

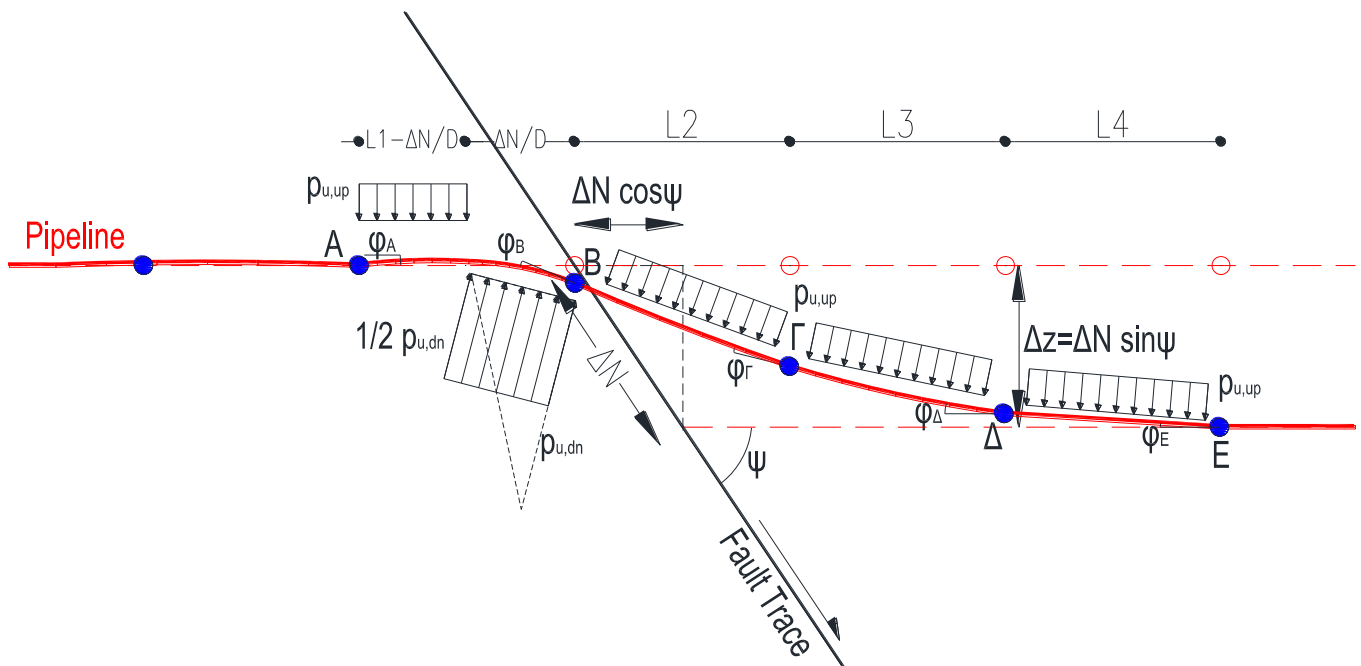
Οι βασικές διαφορές που εντοπίζονται στους αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους (έναντι των συνεχών), και εισήχθησαν στο στατικό προσομοίωμα του συνολικού φορέα (Σχήμα 5.3), είναι οι εξής:

- Δεδομένου ότι οι εύκαμπτοι κόμβοι έχουν πολύ μικρότερη στροφική δυσκαμψία από ότι τα συνεχή τμήματα του αγωγού τα οποία τους συνδέουν, το μεγαλύτερο μέρος της παραμόρφωσης στον κάθετο προς τον αγωγό άξονα z (στροφή ως προς τον άξονα y) συγκεντρώνεται σε αυτούς και τα ενδιάμεσα τμήματα του αγωγού παραμένουν σχεδόν ευθύγραμμα, χωρίς να αναπτύσσονται σε αυτά σημαντικές καμπτικές παραμορφώσεις.
- Το μήκος του «καμπυλωμένου τμήματος», δηλαδή της περιοχής όπου υπάρχουν έντονες εγκάρσιες μετατοπίσεις, δεν εξαρτάται από το συνδυασμό της αντοχής των εδαφικών ελατηρίων (εγκάρσια κατακόρυφη αντοχή του εδάφους), την ακαμψία του αγωγού και το μέγεθος της επιβαλλόμενης μετακίνησης από το ρήγμα όπως στην περίπτωση των συνεχών αγωγών, αλλά είναι εξαρχής δεδομένο ότι περιορίζεται εντός της περιοχής ΑΒΓΔΕ που ορίζεται από τον πλησιέστερο κόμβο πριν από το ρήγμα και τους τρεις κόμβους μετά το ρήγμα. Αυτό που δεν είναι εξαρχής δεδομένο είναι το μέγεθος των γωνιών  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$ ,  $\varphi_C$ ,  $\varphi_D$  και  $\varphi_E$  ή ισοδύναμα το ποσοστό της συνολικής κατακόρυφης μετατόπισης που θα παραληφθεί λόγω της στροφής κάθε κόμβου.
- Εφόσον ο αγωγός πριν από το σημείο Α και μετά το σημείο Ε υφίσταται αμελητέες εγκάρσιες μετατοπίσεις, δεν απαιτείται να επιλυθεί ως ημί-απειρομήκης δοκός επί ελαστικών στηρίξεων όπως στην περίπτωση των Karamitros et al. (2007) και Trifonov & Cherniy (2010). Για αυτό το λόγο, στο προτεινόμενο προσομοίωμα, ο υπόλοιπος αγωγός αντικαθίσταται από μία κύλιση (ελεύθερη κατά X), ενώ η οριζόντια δύναμη που υπολογίζεται σε αυτή



λόγω της ισορροπίας του τμήματος ΑΒΓΔΕ, είναι πρακτικά ίση προς την αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στο τμήμα του αγωγού πριν το σημείο Α και μετά το σημείο Ε. Οι εν λόγω δυνάμεις παραλαμβάνονται μέσω της τριβής που ασκείται κατά μήκος των τμημάτων αυτών.

- Λόγω της πολύ μεγάλης αντίστασης του εδάφους στην προς τα κάτω μετακίνηση του αγωγού, το τμήμα ΑΒ του αγωγού καμπλώνεται έντονα με αποτέλεσμα ο αγωγός στο αρχικό τμήμα να μετακινείται προς τα άνω, ο εύκαμπτος κόμβος στο σημείο Α να παίρνει θετικές (προς τα άνω) μετατοπίσεις και να αναπτύσσονται στην αρχή του τμήματος αρνητικές πιέσεις από το έδαφος (προς τα κάτω). Επειδή το σημείο στο οποίο αλλάζουν οι τάσεις εξαρτάται από τη γεωμετρία του προβλήματος, στα πλαίσια διατύπωσης της αναλυτικής μεθοδολογίας θεωρήθηκε συντηρητικά ότι το τμήμα του αγωγού ΑΒ που κινείται προς τα κάτω και κατά συνέπεια αναπτύσσονται θετικές πιέσεις από το έδαφος, είναι ίσο με  $\Delta N/D$ , δηλαδή ίσο με τον λόγο της επιβαλλόμενης μετατόπισης από το ρήγμα ως προς την διάμετρο του αγωγού. Επιπροσθέτως, επειδή για να ενεργοποιηθεί το σύνολο της αντίστασης του εδάφους προς τα κάτω απαιτούνται αρκετά μεγάλες μετατοπίσεις, θα πρέπει να ληφθεί τριγωνική κατανομή για τις τάσεις σε αυτό το τμήμα, ή να θεωρηθεί απλοποιητικά ομοιόμορφη κατανομή με τιμή ίση με το μισό της μέγιστης.



Σχήμα 5.3: Στατικό προσομοίωμα του συνόλου του φορέα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της αναλυτικής μεθοδολογίας.

Figure 5.3: Static model for the entire pipeline that was used for the development of the analytical methodology.

Όπως προαναφέρθηκε, το εν λόγω προσομοίωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τις δύο ακραίες περιπτώσεις γεωμετρίας, δηλαδή όταν (α) το ρήγμα διέρχεται στο μέσον μεταξύ δύο διαδοχικών κόμβων (οπότε η γωνία  $\varphi_B$  είναι μηδενική), ή (β) ακριβώς στην παρειά ενός από τους κόμβους. Στην πρώτη από τις δύο παραπάνω περιπτώσεις (Σχήμα 5.2), τα μήκη  $L_1$  και  $L_2$  είναι ίσα με  $L/2$  και τα  $L_3$  και  $L_4$  ίσα με  $L$ , ενώ στη δεύτερη όλες οι αποστάσεις είναι ίσες με  $L$  (την απόσταση μεταξύ διαδοχικών κόμβων).

### 5.3 Περιγραφή της μεθοδολογίας

Σε πλήρη αντιστοιχία με το ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης, η επαναληπτική διαδικασία επίλυσης για το προτεινόμενο αναλυτικό προσομοίωμα είναι η εξής:

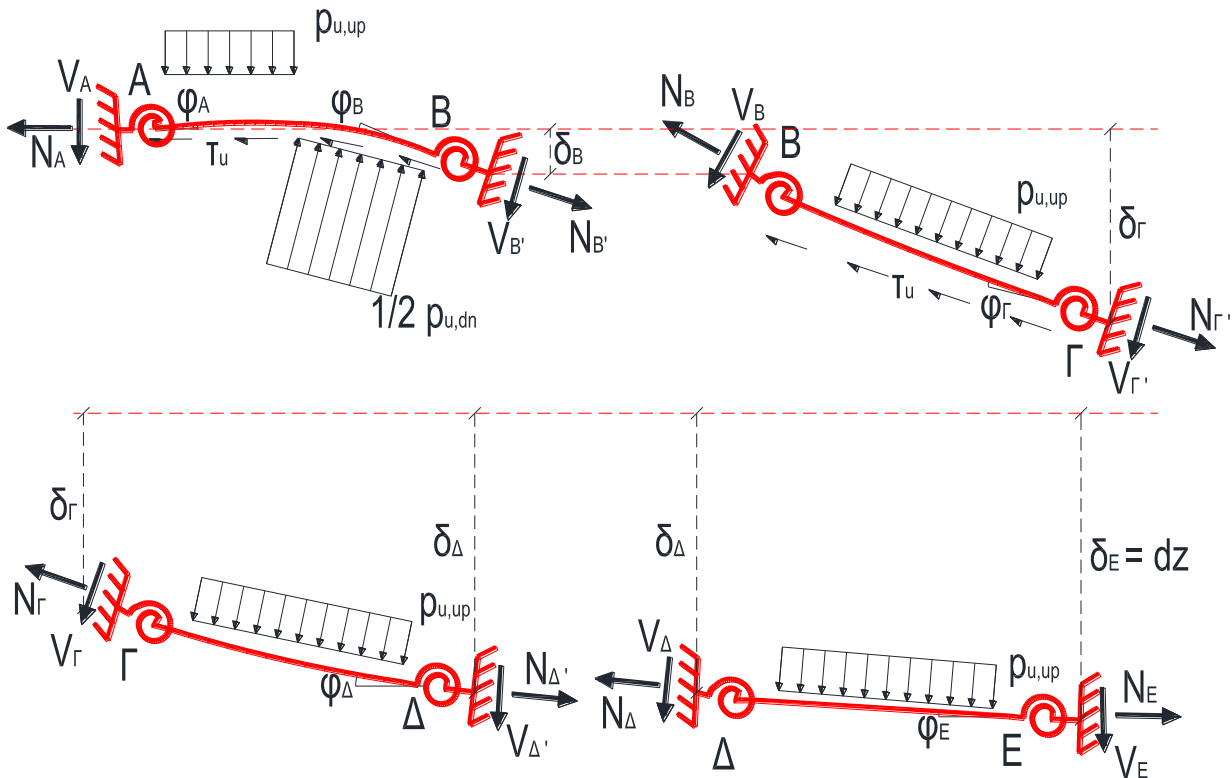
- **Βήμα 1<sup>ο</sup>:** Αρχική «ελαστική» επίλυση φορέα  
Γίνεται η στατική επίλυση του φορέα χρησιμοποιώντας τις αρχικές τιμές δυσκαμψίας του αγωγού για όλες τις ράβδους, ανεξαρτήτως φόρτισης. Λόγω της πεπλεγμένης φύσης των εξισώσεων το βήμα πραγματοποιείται με μία απλή επαναληπτική διαδικασία επίλυσης.
- **Βήμα 2<sup>ο</sup>:** Υπολογισμός μέγιστων τάσεων, παραμορφώσεων και τέμνοντος Μέρου Ελαστικότητας.  
Επιλέγεται η διατομή με το δυσμενέστερο συνδυασμό επιβαλλόμενης ροπής και αξονικής δύναμης σε κάθε ράβδο και υπολογίζεται η κατανομή τάσεων και παραμορφώσεων σε αυτή. Στη συνέχεια υπολογίζεται ένα αντιπροσωπευτικό τέμνων μέτρο ελαστικότητας για την κάθε ράβδο, ως τη μέση τιμή του προηγούμενου μέτρου ελαστικότητας (του αρχικού ελαστικού μέτρου στο πρώτο βήμα) και αυτού που προκύπτει ως ο λόγος τάσεων/παραμορφώσεων για τον άξονα της διατομής. Και σε αυτή την περίπτωση η επίλυση της διατομής γίνεται με μία απλή αριθμητική μεθοδολογία.
- **Βήμα 3<sup>ο</sup>:** Διόρθωση του μέτρου ελαστικότητας και επανάληψη της διαδικασίας  
Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 και 2 με το νέο (τέμνον) μέτρο ελαστικότητας σε κάθε ράβδο μέχρι να έχουμε σύγκλιση.

Και σε αυτή την περίπτωση η διαδικασία επίλυσης έχει προγραμματιστεί σε ένα απλό κώδικα excel, στον οποίο επιλέγονται οι βασικές παράμετροι της ανάλυσης και με την εκτέλεση μίας μακροεντολής ολοκληρώνεται η επίλυση και κατασκευάζονται διαγράμματα για τα βασικά μεγέθη της ανάλυσης.

Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα της επίλυσης.

**Βήμα 1ο: Αρχική «ελαστική» επίλυση φορέα**

Το στατικό προσομοίωμα για τον παραμορφωμένο φορέα του τμήματος ΑΒΓΔΕ του αγωγού, μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα τμήματα, ΑΒ, ΒΓ, ΓΔ και ΔΕ όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6. Τα τμήματα αυτά συμπεριφέρονται ως ελαστικές δοκοί υπό την ταυτόχρονη δράση αξονικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών και το βέλος τους περιγράφεται από τις γενικές εξισώσεις 3.3 και 3.4. Η απόσταση  $x$  σε κάθε τμήμα να μετράται από τις άκρη του κάθε τμήματος προς το ίχνος του ρήγματος.



**Σχήμα 5.4:** Ανάλυση των τμημάτων του αγωγού στην παραμορφωμένη κατάσταση.

**Figure 5.4:** Analysis of the pipe parts at the deformed condition.

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

$w_1(0)=0$	$w_2(0)=\delta_3(L_3)$
$\varphi_1(0)=0$	$\varphi_2(0)=0$
$M_1(0)=-M_A=C_r*\varphi_A$	$M_2(0)=-M_\Gamma=C_r*\varphi_\Gamma$
$V_1(0)=V_A$	$V_2(0)=N_3(L_3)*\sin\varphi_\Gamma-V_3(L_3)*\cos\varphi_\Gamma$
$w_3(0)=\delta_4(L_4)$	$w_4(0)=0$
$\varphi_3(0)=0$	$\varphi_4(0)=0$

$$M_3(0)=-M_{\Delta}=C_r*\varphi_{\Delta} \quad M_4(0)=-M_E=C_r*\varphi_E$$

$$V_3(0)=N_4(L_4)*\sin\varphi_{\Delta}-V_4(L_4)*\cos\varphi_{\Delta} \quad V_4(0)=V_E$$

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

Κατά συνέπεια, οι συνολικές μετακινήσεις λόγω των εσωτερικών εντατικών μεγεθών ( $w$ ) και των στροφών των εύκαμπτων κόμβων, δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις για τις δοκούς AB (1), ΒΓ (2), ΓΔ (3) και ΔΕ (4) αντίστοιχα:

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

$$\delta_1(x) = \begin{cases} \frac{M(0)}{E_1 I_1 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{V(0)}{E_1 I_1 a^2} [\cosh ax - 1] + x \cdot \sin \varphi_A & 0 \leq x \leq L^* \\ \frac{M(0)}{E_1 I_1 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{V(0)}{E_1 I_1 a^2} [\cosh ax - 1] + \\ + \frac{q_u^{dn}}{2N(x)} \left[ \frac{\cosh(a(x-L^*)) - 1}{a^2} - \frac{(x-L^*)^2}{2} \right] + (L^* + x) \cdot \sin \varphi_A & L^* \leq x \leq L_1 \end{cases} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} \delta_2(x) &= w_2(x) + x \cdot \sin(\varphi_r + \varphi_{\Delta} + \varphi_E + w'_3(L_3) + w'_4(L_4)) = \\ &= \delta_3(L_3) + \frac{M(0)}{E_2 I_2 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{V(0)}{E_2 I_2 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{q_u^{up}}{N(x)} \left[ \frac{\cosh ax - 1}{a^2} - \frac{x^2}{2} \right] + \\ &\quad + x \cdot \sin(\varphi_r + \varphi_{\Delta} + \varphi_E + w'_3(L_3) + w'_4(L_4)) \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\text{με } 0 \leq x \leq L_2.$$

$$\begin{aligned} \delta_3(x) &= w_3(x) + x \cdot \sin(\varphi_{\Delta} + \varphi_E + w'_4(L_4)) = \\ &= \delta_4(L_4) + \frac{M(0)}{E_3 I_3 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{V(0)}{E_3 I_3 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{q_u^{up}}{N(x)} \left[ \frac{\cosh ax - 1}{a^2} - \frac{x^2}{2} \right] + \\ &\quad + x \cdot \sin(\varphi_{\Delta} + \varphi_E + w'_4(L_4)) \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\text{με } 0 \leq x \leq L_3.$$

$$\begin{aligned} \delta_4(x) &= w_4(x) + x \cdot \sin(\varphi_E) = \\ &= \frac{M(0)}{E_4 I_4 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{V(0)}{E_4 I_4 a^2} [\cosh ax - 1] + \frac{q_u^{up}}{N(x)} \left[ \frac{\cosh ax - 1}{a^2} - \frac{x^2}{2} \right] + x \cdot \sin(\varphi_E) \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$\text{με } 0 \leq x \leq L_4.$$

Στις Σχέσεις 5.1 έως 5.4 υπάρχουν έξι βασικοί άγνωστοι: Οι γωνίες  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$ ,  $\varphi_{\Delta}$  και  $\varphi_E$  των εύκαμπτων κόμβων και οι τέμνουσες δυνάμεις  $V_1(0)=V_A$  και  $V_4(0)=V_E$  που οφείλονται στον υπόλοιπο αγωγό, πριν το σημείο A και μετά το σημείο E, τα οποία και  $V_1(0)=V_A$  δεν αναλύονται, ενώ σε κάθε θέση απαιτείται η γνώση της αξονικής δύναμης  $N(x)$ . Επιπροσθέτως για την περίπτωση που το ρήγμα διέρχεται ακριβώς δίπλα από ένα εύκαμπτο κόμβο (σημείο B), η γωνία  $\varphi_B$  δεν είναι κατ' ανάγκη ίση με το μηδέν, αλλά εξαρτάται από την εξίσωση ισορροπίας του κόμβου αυτού.

**Διασταύρωση δίπλα σε κόμβο.** Για την επίλυση χρησιμοποιούνται οι εξής οχτώ εξισώσεις ισορροπίας και συνέχειας:

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

$$M_1(L_1) = -M_B = C_T \cdot \varphi_B \quad (5.5)$$

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

$$M_2(L_2) = -M_B = C_T \cdot \varphi_B \quad (5.6)$$

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

$$M_3(L_3) = -M_\Gamma = C_T \cdot \varphi_\Gamma \quad (5.7)$$

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

$$M_4(L_4) = -M_\Delta = C_T \cdot \varphi_\Delta \quad (5.8)$$

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

$$\delta_1(L_1) + \delta_2(L_2) = dy \quad (5.9)$$

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

$$\varphi_A + \varphi_B + w'_1(L_1) = \varphi_\Gamma + \varphi_\Delta + \varphi_E + w'_2(L_2) + w'_3(L_3) + w'_4(L_4) \quad (5.10)$$

- (7) Για τον υπολογισμό της γωνίας  $\varphi_B$  λαμβάνεται η ισορροπία εγκάρσιων δυνάμεων του κόμβου Β:

$$V_1(L_1) = V_2(L_2) \cdot \cos\varphi_B + N_B \cdot \sin\varphi_B \quad (5.11)$$

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

$$\Delta L_{req} = \Delta L_{av} \quad (5.12)$$

Για τον υπολογισμό της οριζόντιας δύναμης  $N_B$  ισχύουν οι Σχέσεις 3.23, 3.26 και 3.27, με απαιτούμενη επιμήκυνση πλέον ίση με:

$$\Delta L_{req} = \Delta x + 1.5 \left[ \left( \frac{L_1}{\cos\varphi_A} - L_1 \right) + \left( \frac{L_2}{\cos(\varphi_\Gamma + \varphi_\Delta + \varphi_E)} - L_2 \right) + \left( \frac{L_3}{\cos(\varphi_\Delta + \varphi_E)} - L_3 \right) + \left( \frac{L_4}{\cos(\varphi_E)} - L_4 \right) \right] \quad (5.13)$$

δηλαδή ίση με την επιβαλλόμενη από το ρήγμα οριζόντια μετατόπιση  $\Delta x$  και την απαιτούμενη επιμήκυνση λόγω της στροφής των τμημάτων του αγωγού. Λόγω του πολύ μικρού μεγέθους της απαιτούμενης επιμήκυνσης λόγω της στροφής συγκριτικά με την επιβαλλόμενη από το ρήγμα, αυτή μπορεί να αγνοηθεί σε όλες τις άλλες περιπτώσεις εκτός από τα ρήγματα με  $\psi=90^\circ$ .

Και σε αυτή την περίπτωση, λόγω της πεπλεγμένης μορφής των αναλυτικών σχέσεων εφαρμόστηκε μία απλή αριθμητική μεθοδολογία για την τελική επίλυση του συστήματος εξισώσεων, κατά την οποία σε κάθε βήμα γίνεται μικρή διόρθωση των έξι βασικών μεγεθών. Πιο συγκεκριμένα για τα μεγέθη  $\varphi_A$ ,  $\varphi_\Gamma$ ,  $\varphi_\Delta$ ,  $\varphi_E$ ,  $V_A$  και  $V_E$  λαμβάνονται οι παρακάτω αρχικές τιμές για το πρώτο βήμα:

$$\varphi_A = -0.1^\circ, \varphi_\Gamma = 1.5^\circ, \varphi_\Delta = 0.5^\circ, \varphi_E = 0.5^\circ, V_A = -1000\text{kN} \text{ και } V_E = 100\text{kN}.$$

Στη συνέχεια, σε κάθε βήμα, τα μεγέθη  $\varphi_A$ ,  $\varphi_\Gamma$ ,  $\varphi_\Delta$ ,  $\varphi_E$ ,  $V_A$  και  $V_E$  αυξάνονται ή μειώνονται κατά ένα μικρό μέγεθος ανάλογο με το σφάλμα που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα για τα μεγέθη:  $w'_1(L_1) - w'_2(L_2)$ ,  $M_2(L_2)$ ,  $M_3(L_3)$ ,  $w_1(L_1) + w_2(L_2) = dz$ ,  $M_1(L_1)$  και  $M_4(L_4)$ .

**Διασταύρωση μεταξύ δύο κόμβων.** \_ Για την επίλυση χρησιμοποιούνται οι εξής εφτά εξισώσεις ισορροπίας και συνέχειας:

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

$$M_1(L_1) = M_2(L_2) \quad (5.14)$$

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

$$V_1(L_1) = V_2(L_2) \quad (5.15)$$

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

$$M_3(L_3) = -M_\Gamma = C_r * \varphi_\Gamma \quad (5.16)$$

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

$$M_4(L_4) = -M_\Delta = C_r * \varphi_\Delta \quad (5.17)$$

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

$$\delta_1(L_1) + \delta_2(L_2) = dy \quad (5.18)$$

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

$$\varphi_A + w'_1(L_1) = \varphi_\Gamma + \varphi_\Delta + \varphi_E + w'_2(L_2) + w'_3(L_3) + w'_4(L_4) \quad (5.19)$$

- (7) Η αξονική δύναμη μπορεί να προκύψει από το συμβιβαστό των παραμορφώσεων όπως και για την περίπτωση που το ρήγμα πέφτει ακριβώς πάνω στον κόμβο, άρα από τις εξισώσεις 5.12 και 5.13.

Και σε αυτή την περίπτωση, λόγω της πεπλεγμένης μορφής των αναλυτικών σχέσεων εφαρμόστηκε μία απλή αριθμητική μεθοδολογία για την τελική επίλυση του συστήματος εξισώσεων, κατά την οποία σε κάθε βήμα γίνεται μικρή διόρθωση των έξι

βασικών μεγεθών. Πιο συγκεκριμένα για τα μεγέθη  $\varphi_A$ ,  $\varphi_G$ ,  $\varphi_\Delta$ ,  $\varphi_E$ ,  $V_A$  και  $V_E$  λαμβάνονται οι παρακάτω αρχικές τιμές για το πρώτο βήμα:

$$\varphi_A = -0.1^\circ, \varphi_G = 1.5^\circ, \varphi_\Delta = 1.0^\circ, \varphi_E = 0.1^\circ, V_A = -200\text{kN} \text{ και } V_E = 100\text{kN}.$$

Στη συνέχεια, σε κάθε βήμα, τα μεγέθη  $\varphi_A$ ,  $\varphi_G$ ,  $\varphi_\Delta$ ,  $\varphi_E$ ,  $V_A$  και  $V_E$  αυξάνονται ή μειώνονται κατά ένα μικρό μέγεθος ανάλογο με το σφάλμα που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα για τα μεγέθη:  $w_1'(L_1)-w_2'(L_2)$ ,  $V_1(L_1)-V_2(L_2)$ ,  $M_3(L_3)$ ,  $w_1(L_1)+w_2(L_2)=dz$ ,  $M_1(L_1)-M_2(L_2)$  και  $M_4(L_4)$ .

### **Βήμα 2ο: Υπολογισμός μέγιστων τάσεων, παραμορφώσεων και τέμνοντος Μέτρου Ελαστικότητας.**

Σε αντιστοιχία με τη μεθοδολογία για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, επιλέγεται η δυσμενέστερη διατομή για κάθε μία από τις τέσσερις ράβδους, δηλαδή οι διατομές στις οποίες αναπτύσσεται η μέγιστη ροπή, και υπολογίζεται η κατανομή των τάσεων που πρέπει να υπάρχει έτσι ώστε να αναπτύσσεται ο συγκεκριμένος συνδυασμός ροπής και αξονικής, διατηρώντας τη θεώρηση επιπεδότητας της διατομής. Δηλαδή επιλύεται το σύστημα:

$$N = \int_{-R}^{+R} \sigma(z) dz \quad (5.20)$$

$$M = \int_{-R}^{+R} z \cdot \sigma(z) dz \quad (5.21)$$

με την τάση να υπολογίζεται μέσω της παραμόρφωσης από τη Εξίσωση 5.22 η οποία ακολουθεί επί της ουσίας τον δι-γραμμικό νόμο που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.2. 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 5.23.

$$\sigma(z) = \frac{(E_1 - E_2)\varepsilon(z)}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_2)\varepsilon(z)}{\sigma_1}\right)^{r_1}\right]^{1/r_1}} + E_2\varepsilon(z) \quad (5.22)$$

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_\alpha + kz \quad (5.23)$$

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 5.20 και 5.21.

### **Βήμα 3ο: 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 τη Εξίσωση 5.24 και επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί για τα βήματα 1 και 2 μέχρι το σύστημα να ισοροπήσει.

$$E_{cur}^{i+1} = \frac{E_{cur}^i + \frac{\sigma_\alpha}{\varepsilon_\alpha}}{2} \quad (5.24)$$

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

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

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

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

όπου SF οι συντελεστές ασφαλείας σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς.

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



# 6

## Κανονικά Ρήγματα: Σύγκριση με Αριθμητικές Αναλύσεις

---

### 6.1 Παρουσίαση Αριθμητικών Αναλύσεων

Για την επαλήθευση της ακρίβειας της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας για κανονικά ρήγματα χρησιμοποιήθηκε η αριθμητική μεθοδολογία που παρουσιάστηκε αναλυτικά στην παράγραφο 4.1, ενώ έγιναν συνολικά δώδεκα (12) αριθμητικές αναλύσεις.

Σε κάθε αριθμητική ανάλυση προσομοιώθηκαν έξι (6) συνολικά κόμβοι, οι οποίοι απέχουν μεταξύ τους κατά 8m, ενώ θεωρήθηκαν δύο ακραίες περιπτώσεις: το ρήγμα να διασταυρώνεται με τον αγωγό στη μέση μεταξύ του 3<sup>ου</sup> και του 4<sup>ου</sup> κόμβου ή ακριβώς πριν τον 4<sup>ο</sup> κόμβο.

Η γωνία  $\psi$  του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια ορίστηκε σε  $60^\circ$  και  $90^\circ$ , ενώ για όλες τις περιπτώσεις θεωρήθηκε ότι το αγωγός διασταυρώνεται κάθετα με το ίχνος του ρήγματος, δηλαδή ότι η γωνία  $\beta$  είναι ίση με  $90^\circ$ . Η συνολική μετακίνηση του ρήγματος επιλέχθηκε να είναι ίση με 0.375m, 0.75m και 1.5m, για κάθε γεωμετρία, ενώ ο αγωγός έχει διάμετρο 30" και πάχος τοιχώματος 12.5mm.

Τα χαρακτηριστικά και οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την κάθε ανάλυση παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 6.1:** Βασικά χαρακτηριστικά των εκτελεσθέντων παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων για την περίπτωση κανονικών ρηγμάτων.

**Table 6.1:** Basic characteristics of the performed parametric numerical analyses for normal faults.

A/A	D	t (mm)	Απόσταση κόμβων (m)	Θέση διασταύρωσης	Γωνία β (°)	Μετακίνηση ρήγματος (m)	Δx (m)	Δz (m)
N1	30"	12,5	8,00	Ανάμεσα	90	0,38	0,00	0,38
N2	30"	12,5	8,00	Άκρη	90	0,38	0,00	0,38
N3	30"	12,5	8,00	Ανάμεσα	90	0,75	0,00	0,75
N4	30"	12,5	8,00	Άκρη	90	0,75	0,00	0,75
N5	30"	12,5	8,00	Ανάμεσα	90	1,50	0,00	1,50
N6	30"	12,5	8,00	Άκρη	90	1,50	0,00	1,50
N7	30"	12,5	8,00	Ανάμεσα	60	0,38	0,19	0,32
N8	30"	12,5	8,00	Άκρη	60	0,38	0,19	0,32
N9	30"	12,5	8,00	Ανάμεσα	60	0,75	0,38	0,65
N10	30"	12,5	8,00	Άκρη	60	0,75	0,38	0,65
N11	30"	12,5	8,00	Ανάμεσα	60	1,50	0,75	1,30
N12	30"	12,5	8,00	Άκρη	60	1,50	0,75	1,30

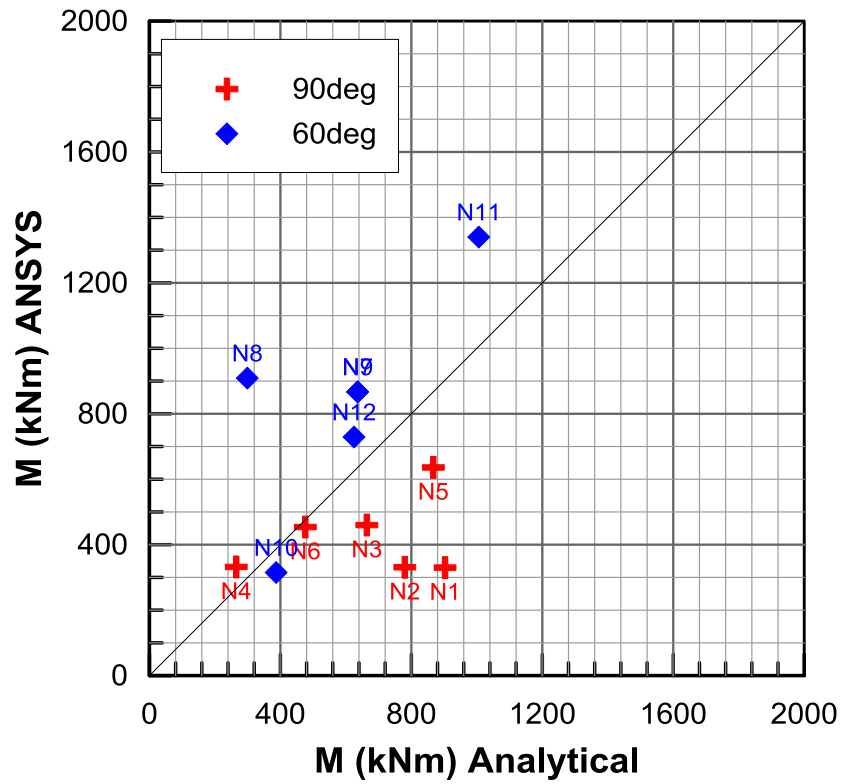
## 6.2 Συγκρίσεις

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των αναλυτικών προβλέψεων με τα αποτελέσματα των παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων, για τα βασικά μεγέθη που ενδιαφέρουν τον σχεδιασμό ενός αγωγού.

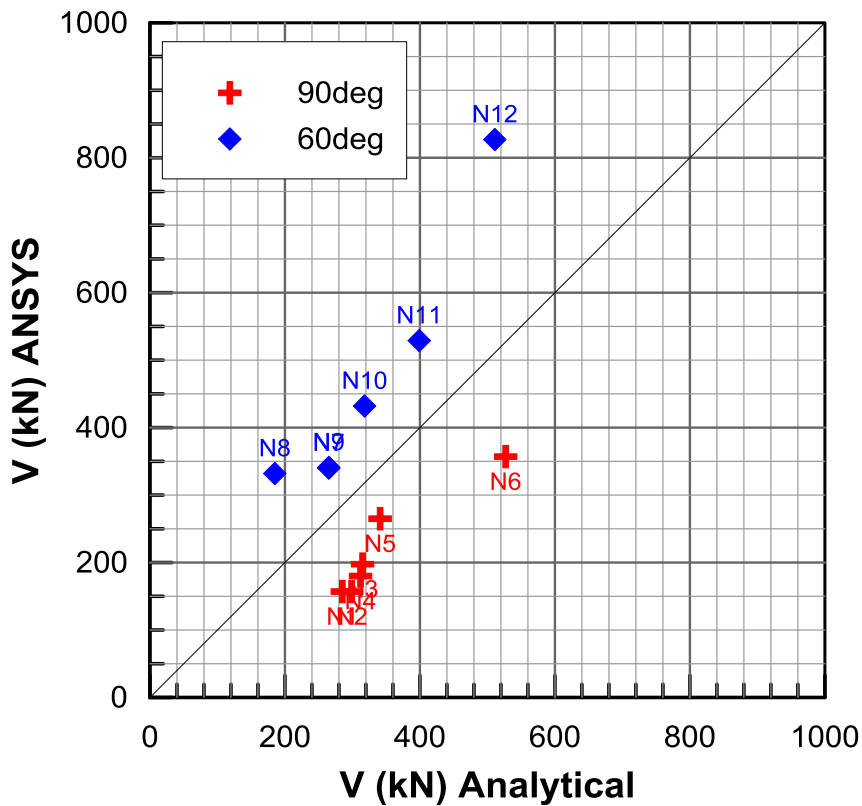
Προκειμένου να γίνει μία εποπτική αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας, στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται συγκρίσεις "1 προς 1" για τα βασικά μεγέθη που μας αφορούν (αναπτυσσόμενες δυνάμεις, ροπές και παραμορφώσεις στον αγωγό, στροφές στους αγωγούς), δηλαδή άμεση σύγκριση των μέγιστων τιμών που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση και από την αναλυτική επίλυση. Τα νούμερα δίπλα από κάθε σημείο αναφέρονται στο νούμερο της κάθε ανάλυσης όπως αυτές αναγράφονται στον Πίνακα 6.1.

Όπως γίνεται φανερό από τις συγκρίσεις η αναλυτική μεθοδολογία δίνει πολύ καλά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, εφόσον λαμβάνει υπόψη της και τα φαινόμενα δευτέρας τάξης που προκαλούνται από τις πολύ μεγάλες αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στον αγωγό. Και σε αυτή την περίπτωση οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό είναι ιδιαίτερος ευαίσθητες στην αναπτυσσόμενη αξονική δύναμη και κατά συνέπεια εξαρτώνται έντονα από τη σωστή εκτίμηση τους. Επίσης, η μεθοδολογία δίνει συντηρητικά αποτελέσματα για μικρές επιβαλλόμενες μετατοπίσεις, οπότε και δεν ενεργοποιείται ο θεωρούμενος μηχανισμός, αλλά οι μετακινήσεις περιορίζονται μέχρι τον πρώτο κόμβο.

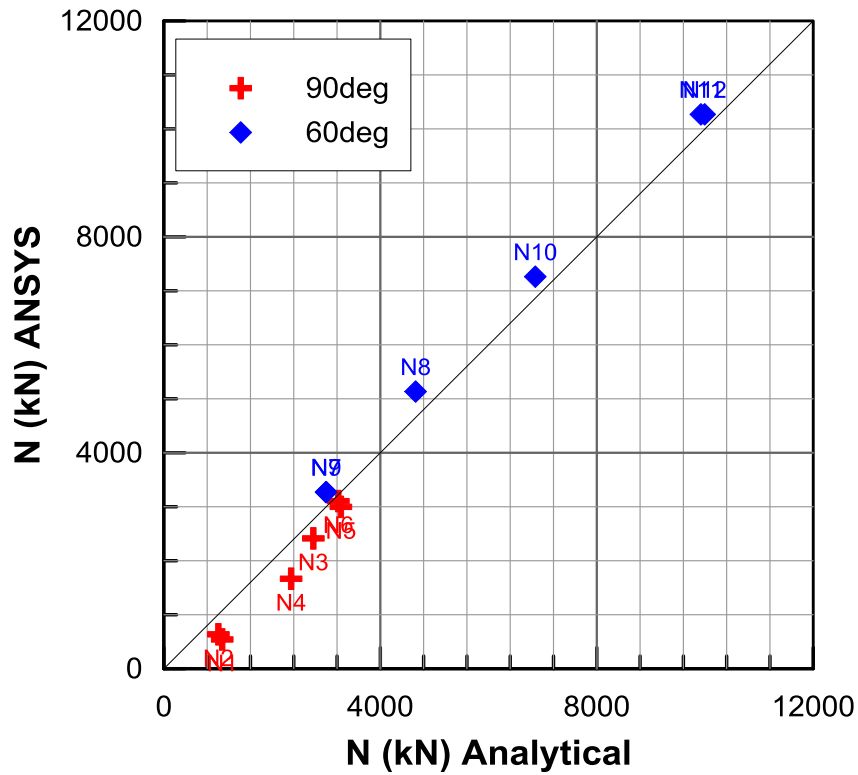
Μετά την εποπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση των διαγραμμάτων κάθε επιμέρους επίλυσης στα Σχήματα 6.14 έως 6.30. Τα σχήματα αφορούν διάμετρο αγωγού  $D=30''$  και πάχος τοιχώματος  $t=12.5\text{mm}$ .



Σχήμα 6.1: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων: Ροπές.  
 Figure 6.1: “1-1” comparison for all parametric analyses: Moments.

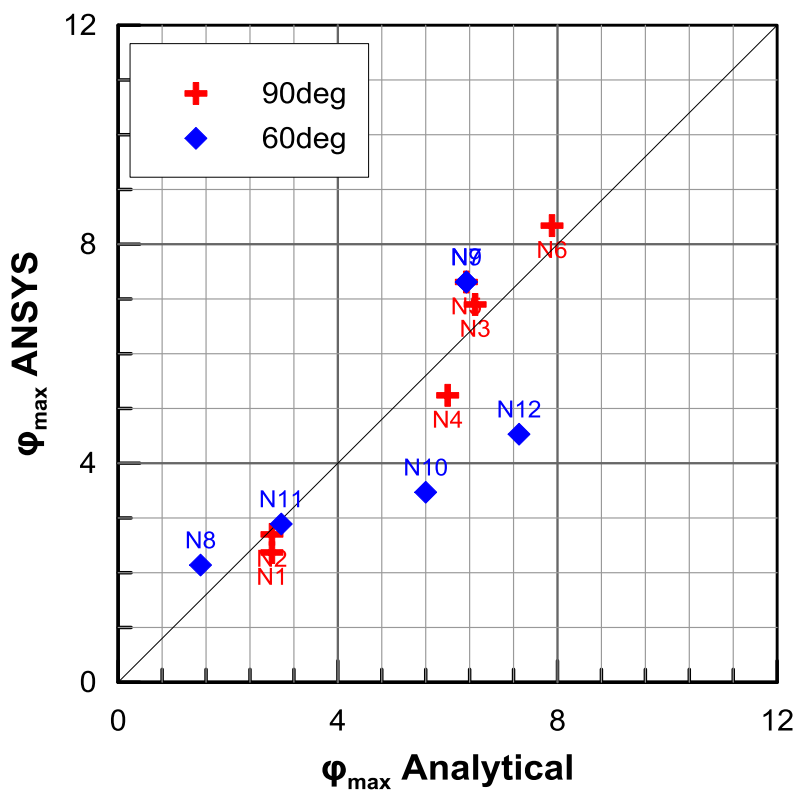


Σχήμα 6.2: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων: Τέμνουσες.  
 Figure 6.2: “1-1” comparison for all parametric analyses: Vertical Force.



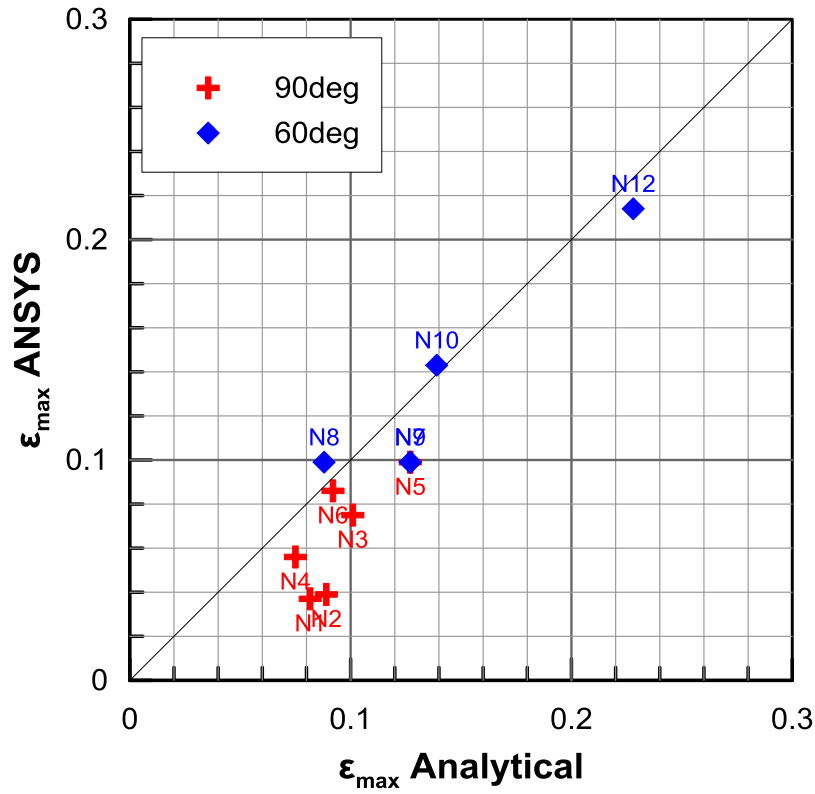
Σχήμα 6.3: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων: Αξονικές.

Figure 6.3: “1-1” comparison for all parametric analyses: Axial.



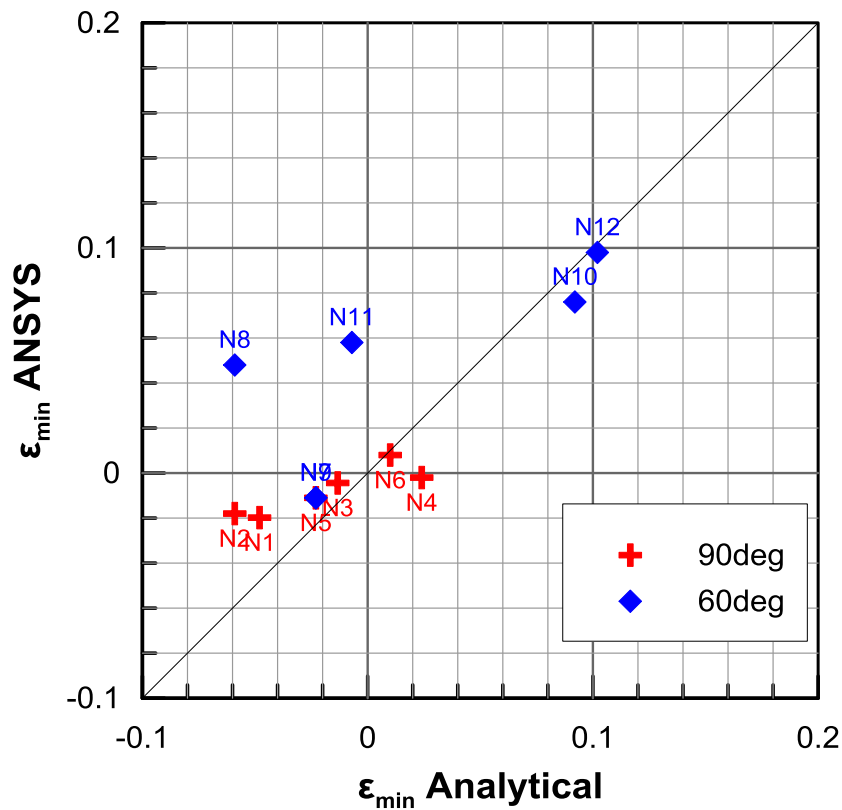
Σχήμα 4.4: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων:  $\phi_{max}$ .

Figure 4.4: “1-1” comparison for all parametric analyses:  $\phi_{max}$ .



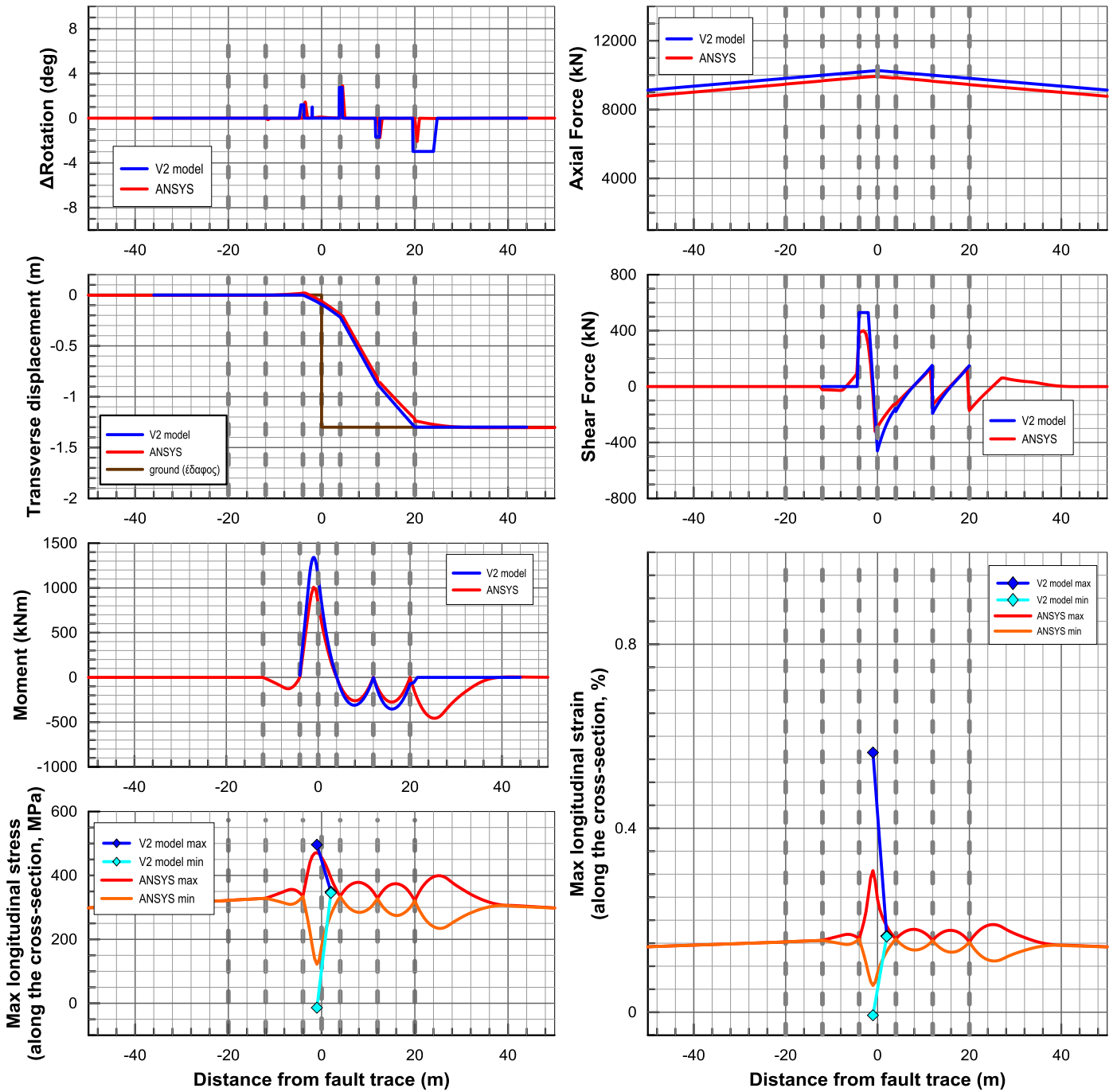
Σχήμα 4.5: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων:  $\epsilon_{\max}$ .

Figure 4.5: “1-1” comparison for all parametric analyses:  $\epsilon_{\max}$ .



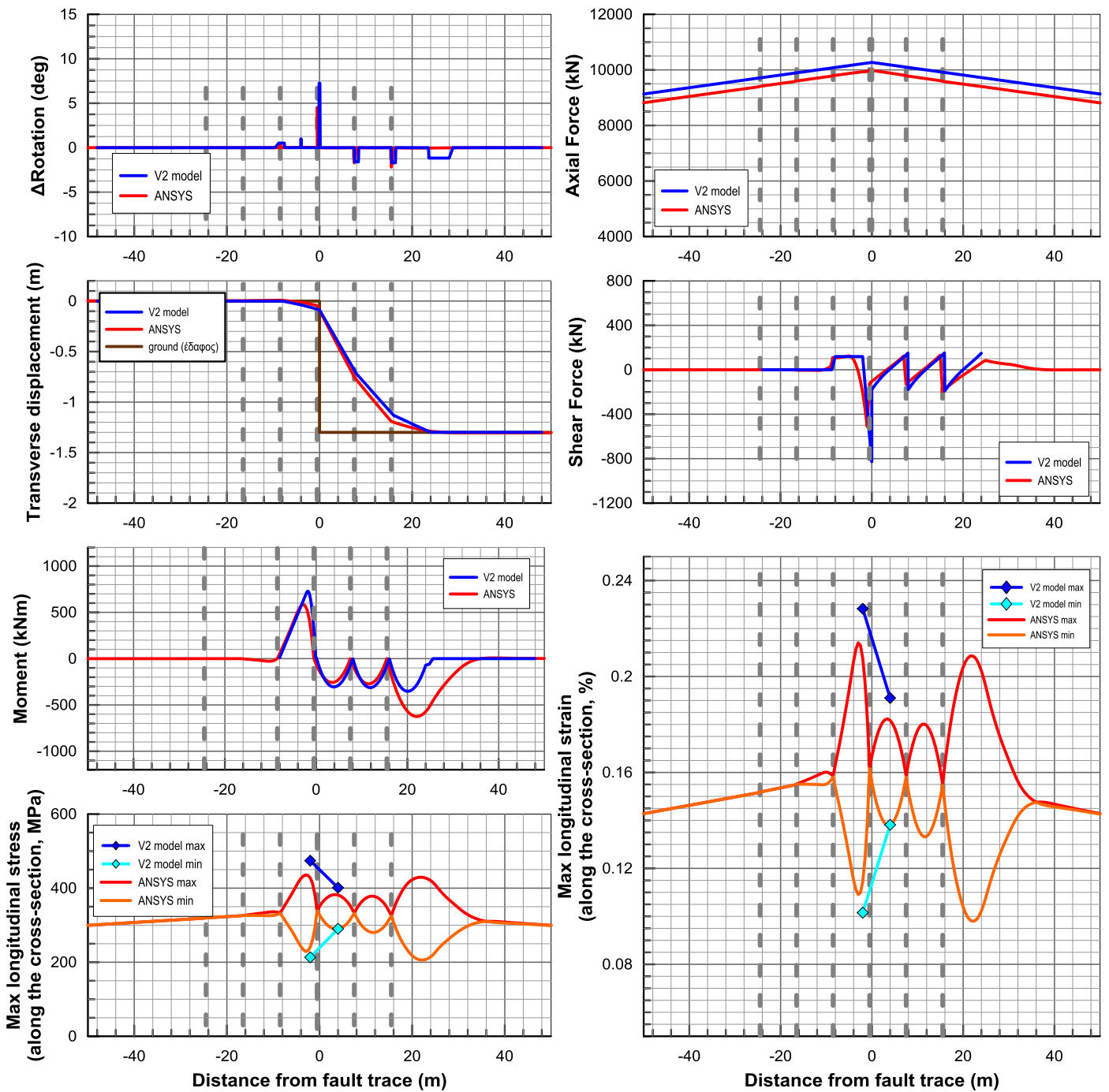
Σχήμα 4.6: Σύγκριση “1-1” για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων:  $\epsilon_{\min}$ .

Figure 4.6: “1-1” comparison for all parametric analyses:  $\epsilon_{\min}$ .



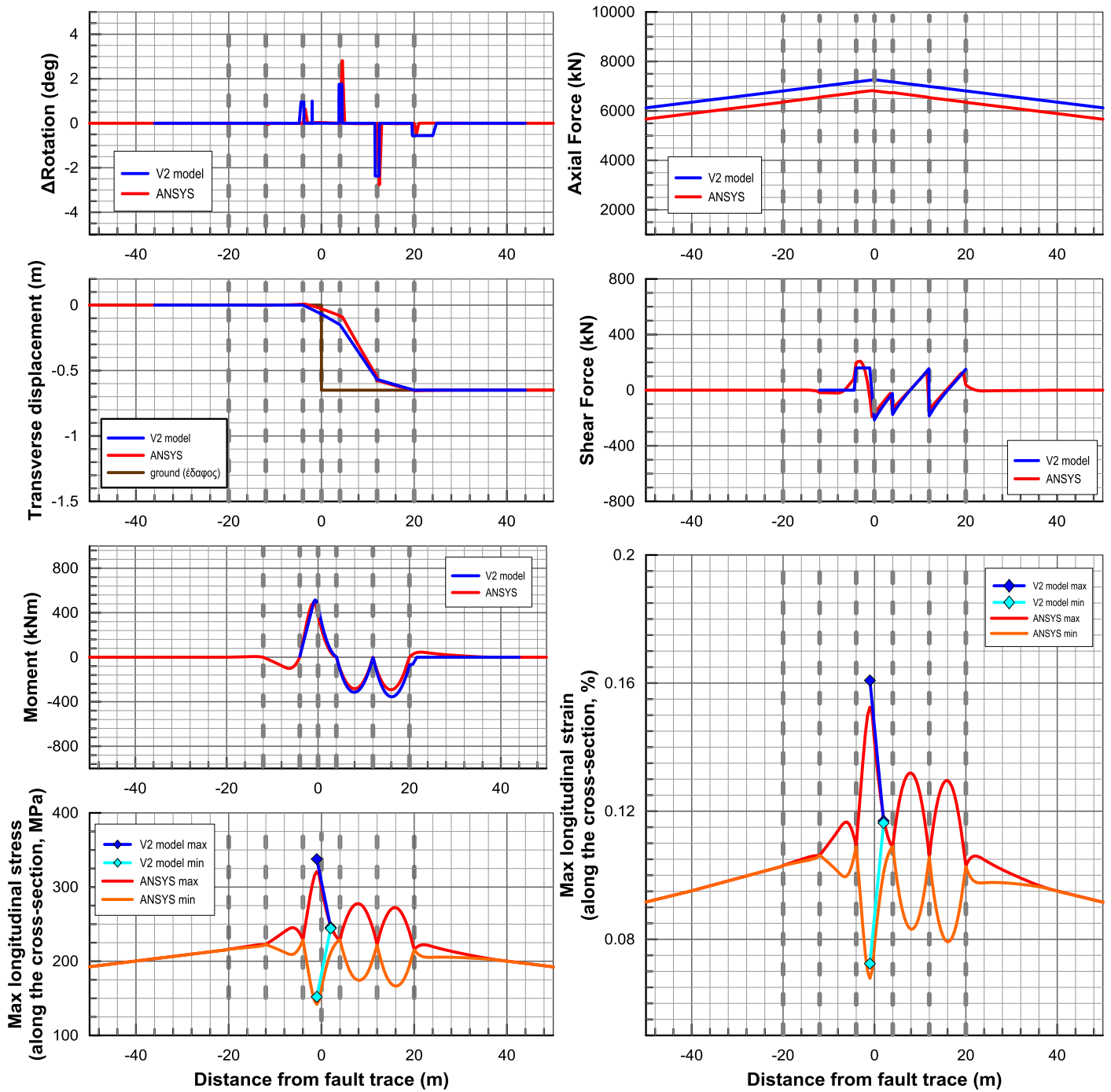
Σχήμα 6.7: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 1.5m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=60^\circ$  και θέση ανάμεσα από τους κόμβους.

Figure 6.7: Comparison of results for the case with fault displacement 1.5m, crossing angle  $\beta=60^\circ$  and position between the two joints.



Σχήμα 6.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 1.5m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=60^\circ$  και θέση δίπλα σε κόμβο.

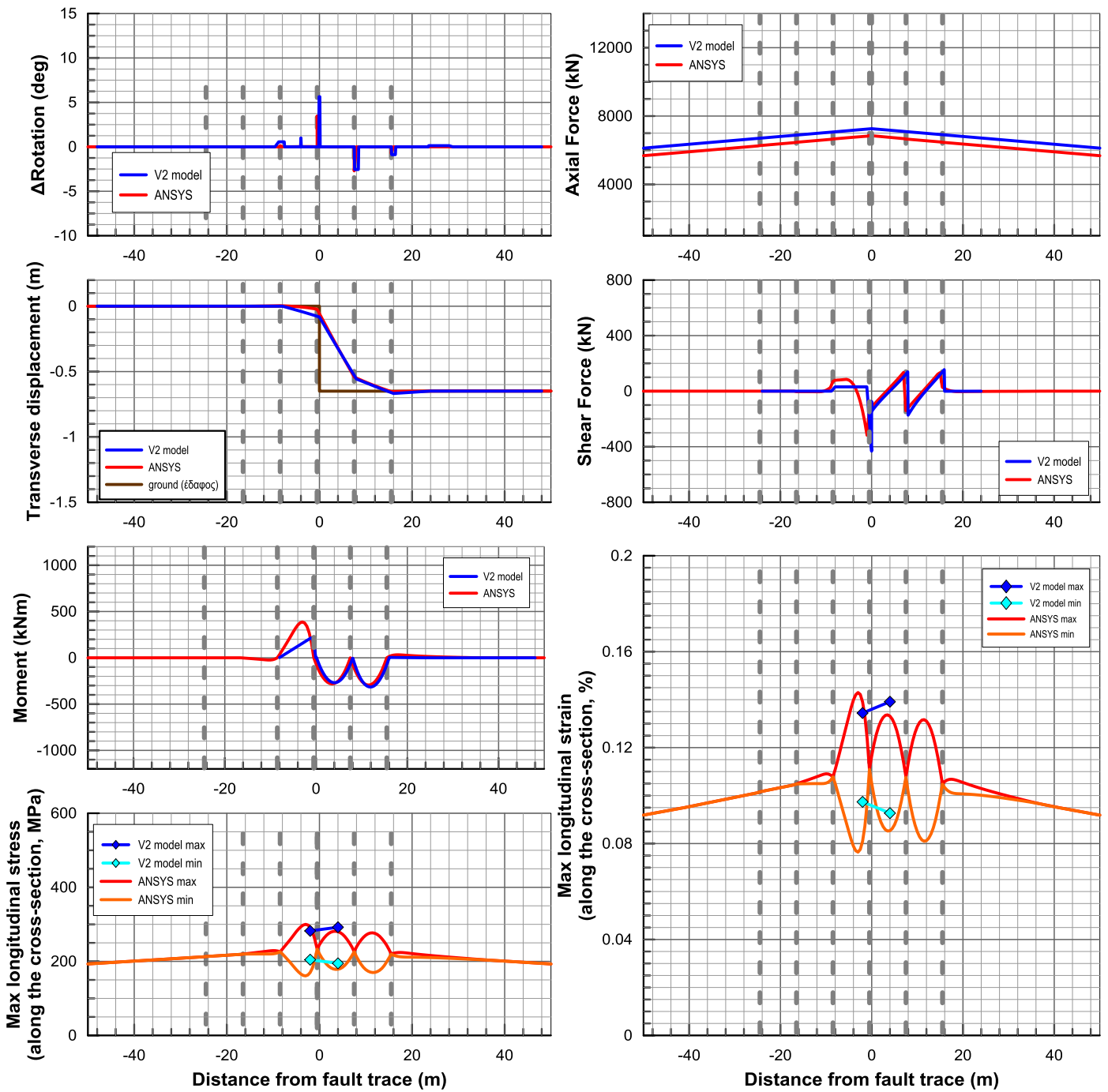
Figure 6.8: Comparison of results for the case with fault movement 1.5m, crossing angle  $\beta=60^\circ$  and position near a joint.



**Σχήμα 6.9:** Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 0.75m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=60^\circ$  και θέση ανάμεσα από τους κόμβους.

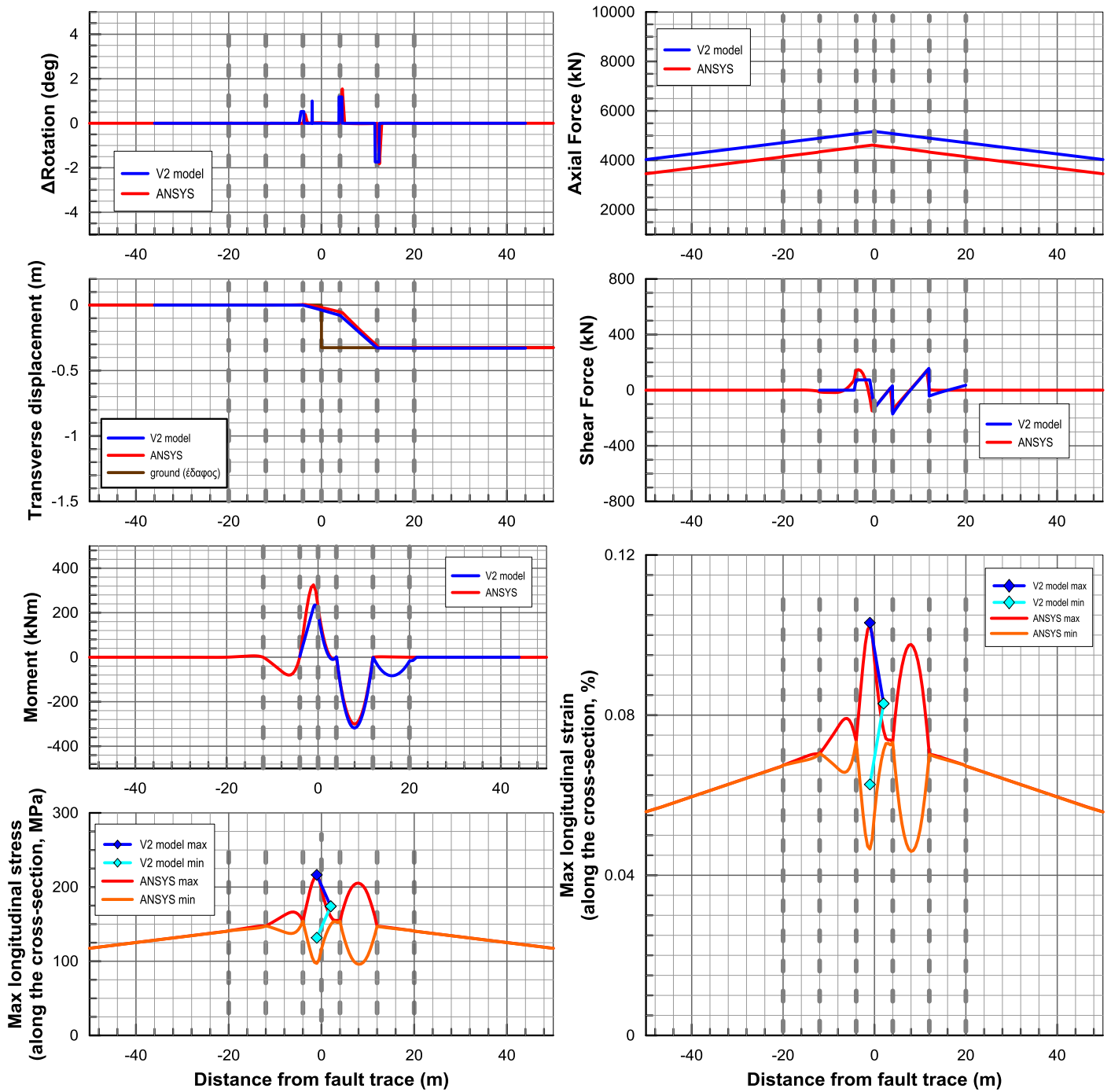
**Figure 6.9:** Comparison of results for the case with fault displacement 0.75m, crossing angle  $\beta=60^\circ$  and position between the two joints.





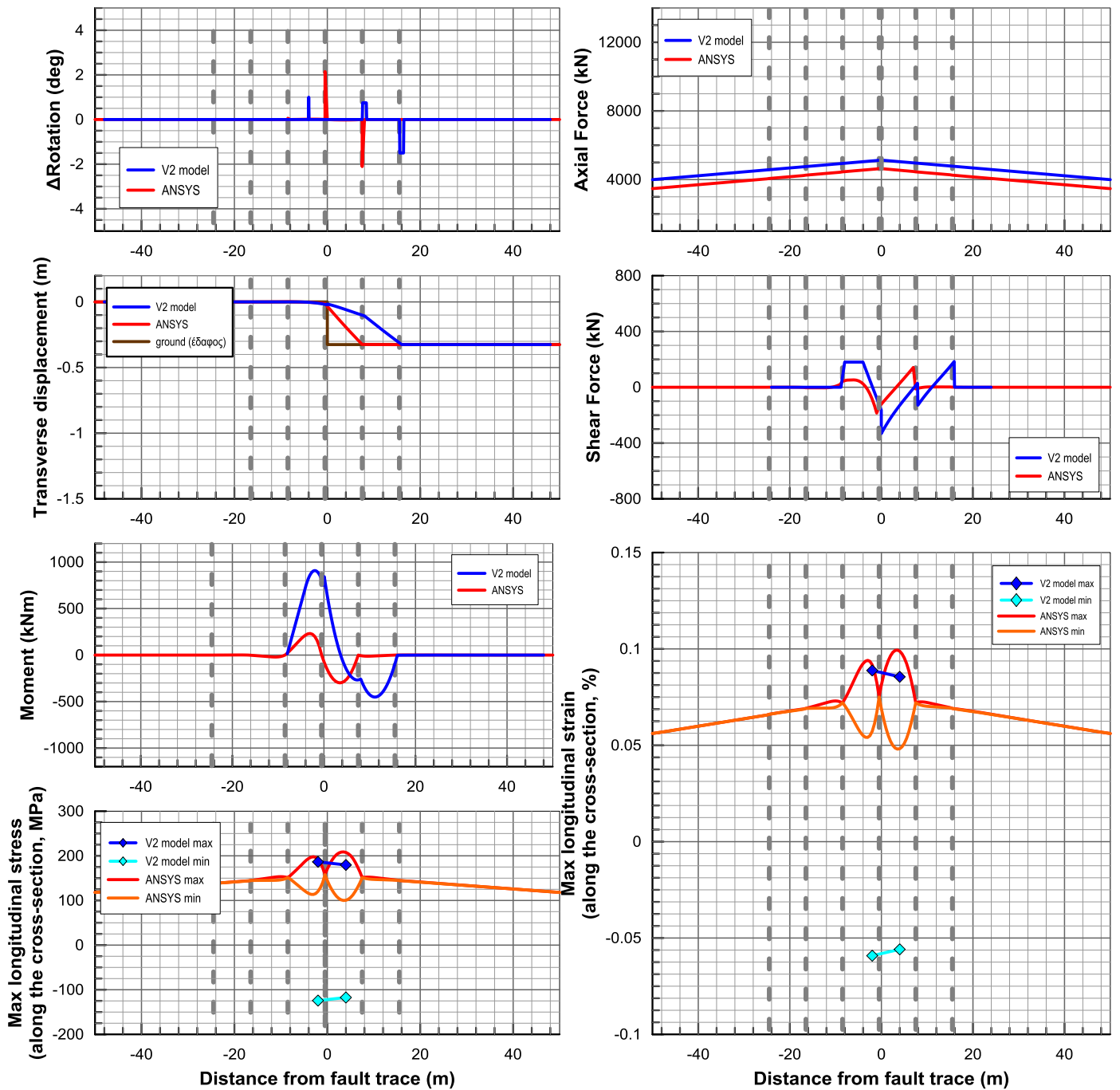
Σχήμα 6.10: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 0.75m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=60^\circ$  και θέση δίπλα σε κόμβο.

Figure 6.10: Comparison of results for the case with fault displacement 0.75m, crossing angle  $\beta=60^\circ$  and position near a joint.



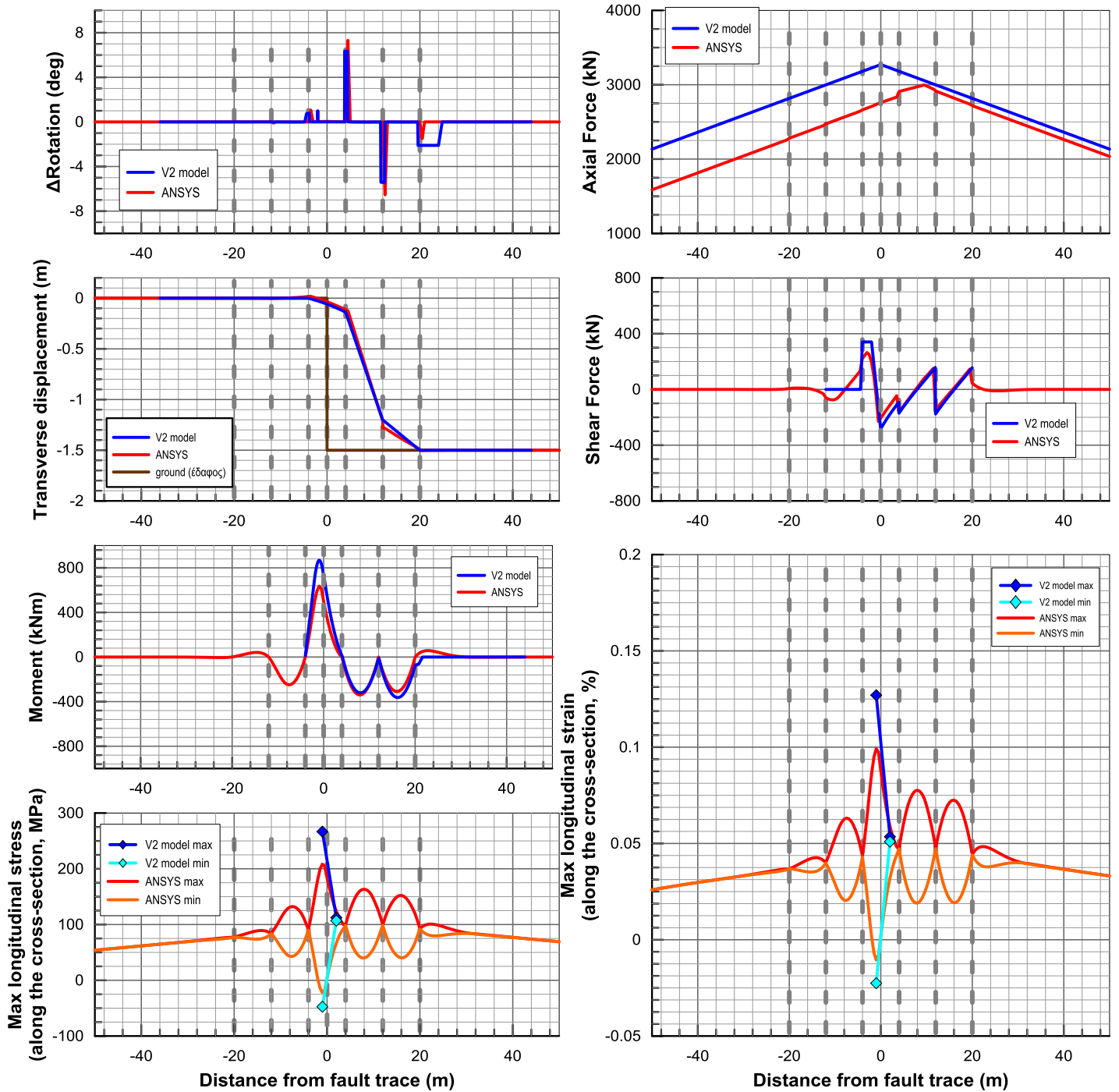
Σχήμα 6.11: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 0.375m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=60^\circ$  και θέση ανάμεσα από τους κόμβους.

Figure 6.11: Comparison of results for the case with fault displacement 0.375m, crossing angle  $\beta=60^\circ$  and position between the two joints.



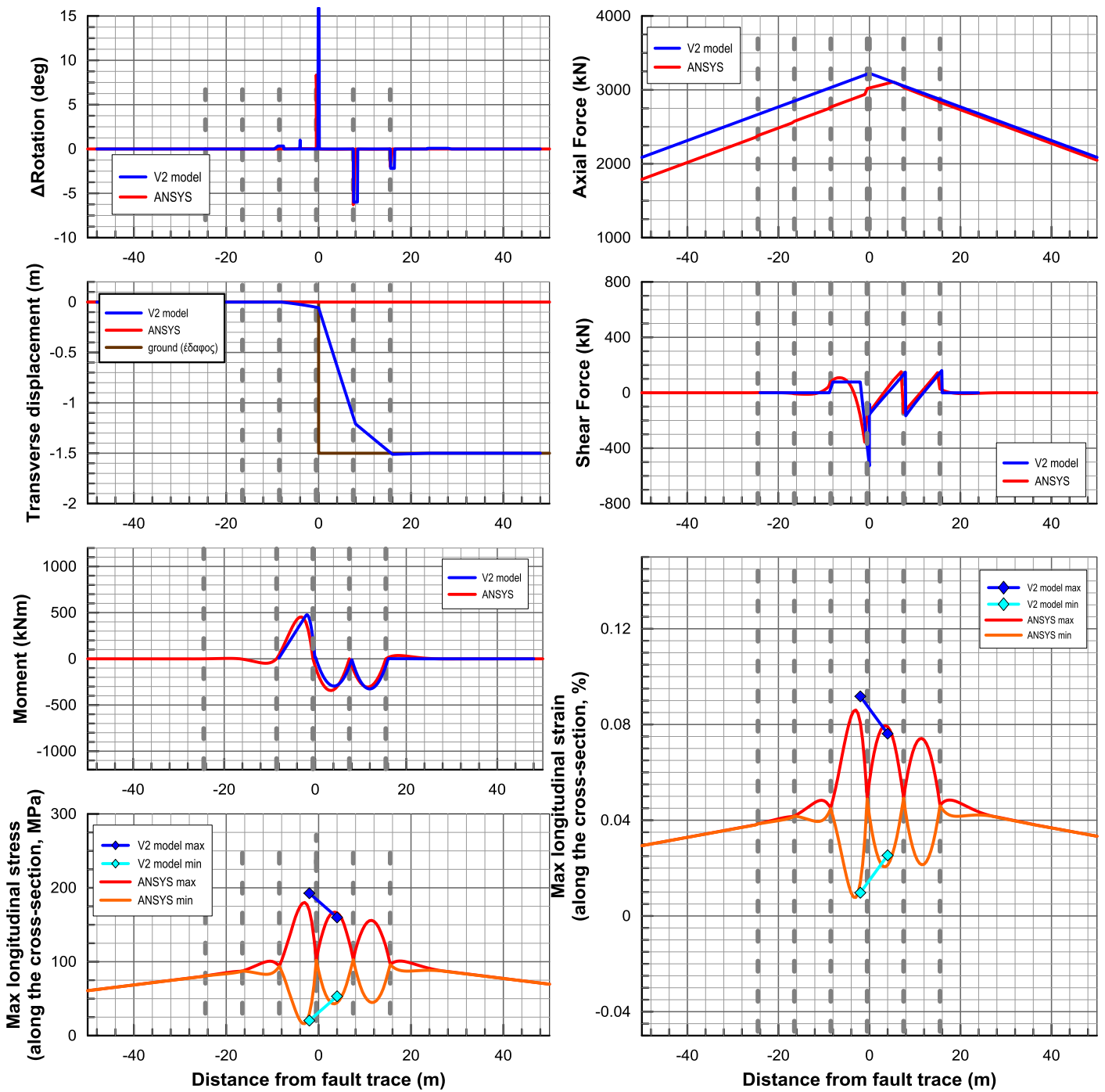
Σχήμα 6.12: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 0.375m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=60^\circ$  και θέση δίπλα σε κόμβο.

Figure 6.12: Comparison of results for the case with fault displacement 0.375m, crossing angle  $\beta=60^\circ$  and position near a joint.



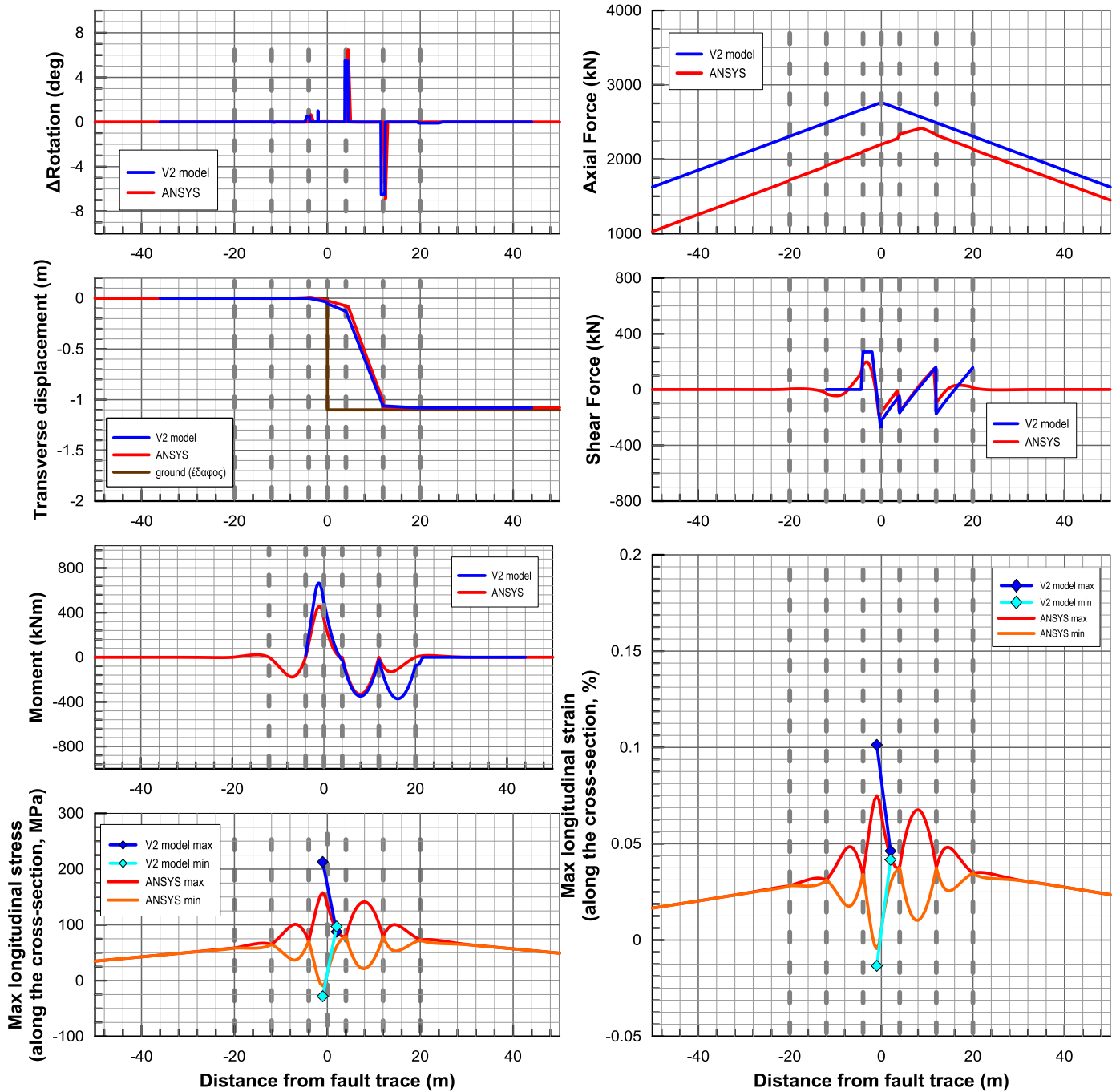
Σχήμα 6.13: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 1.5m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=90^\circ$  και θέση ανάμεσα από τους κόμβους.

Figure 6.13: Comparison of results for the case with displacement 1.5m, crossing angle  $\beta=90^\circ$  and position between the two joints.



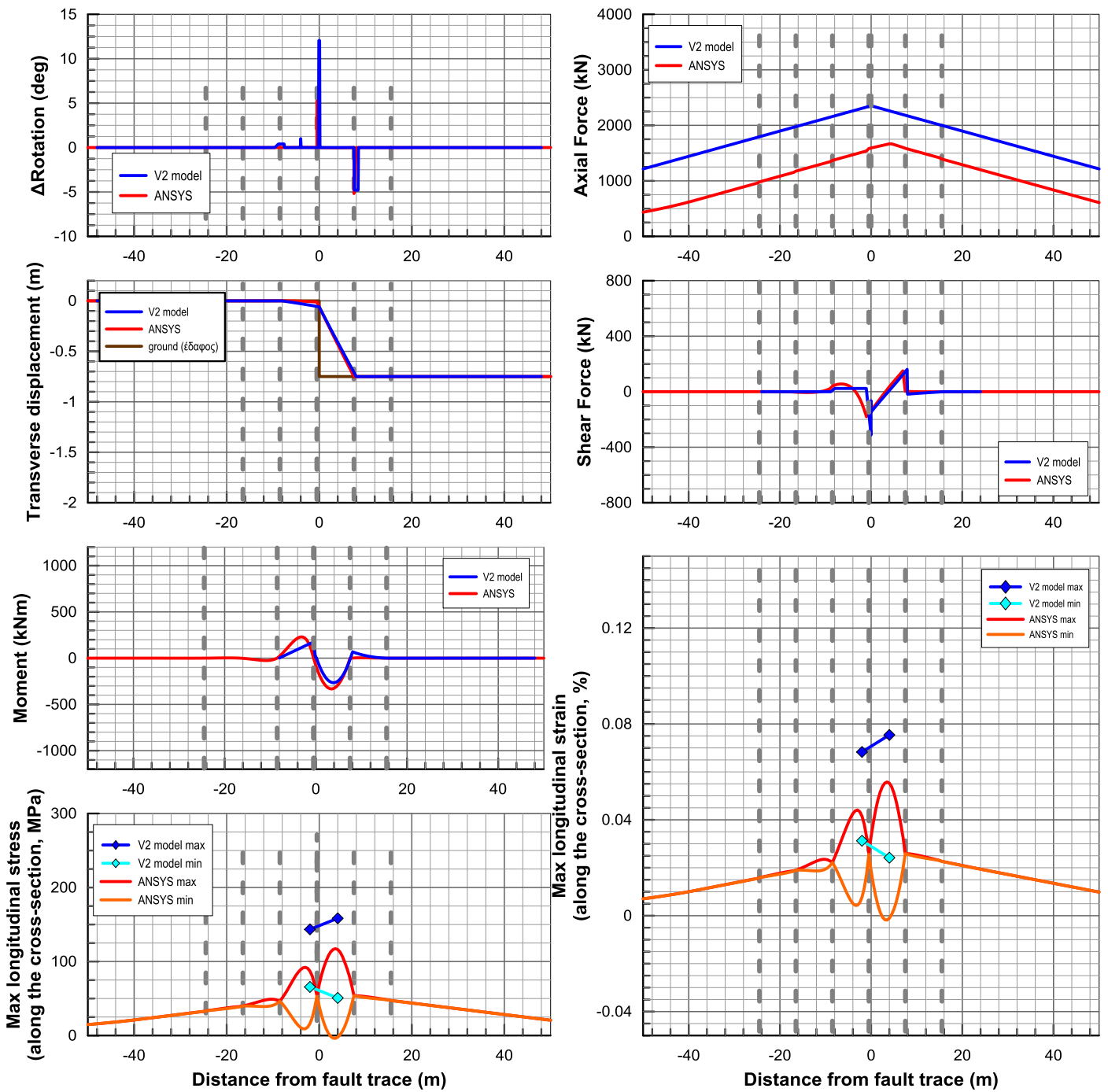
Σχήμα 6.14: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 1.5m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=90^\circ$  και θέση δίπλα σε κόμβο.

Figure 6.14: Comparison of results for the case with fault displacement 1.5m, crossing angle  $\beta=90^\circ$  and position near a joint.



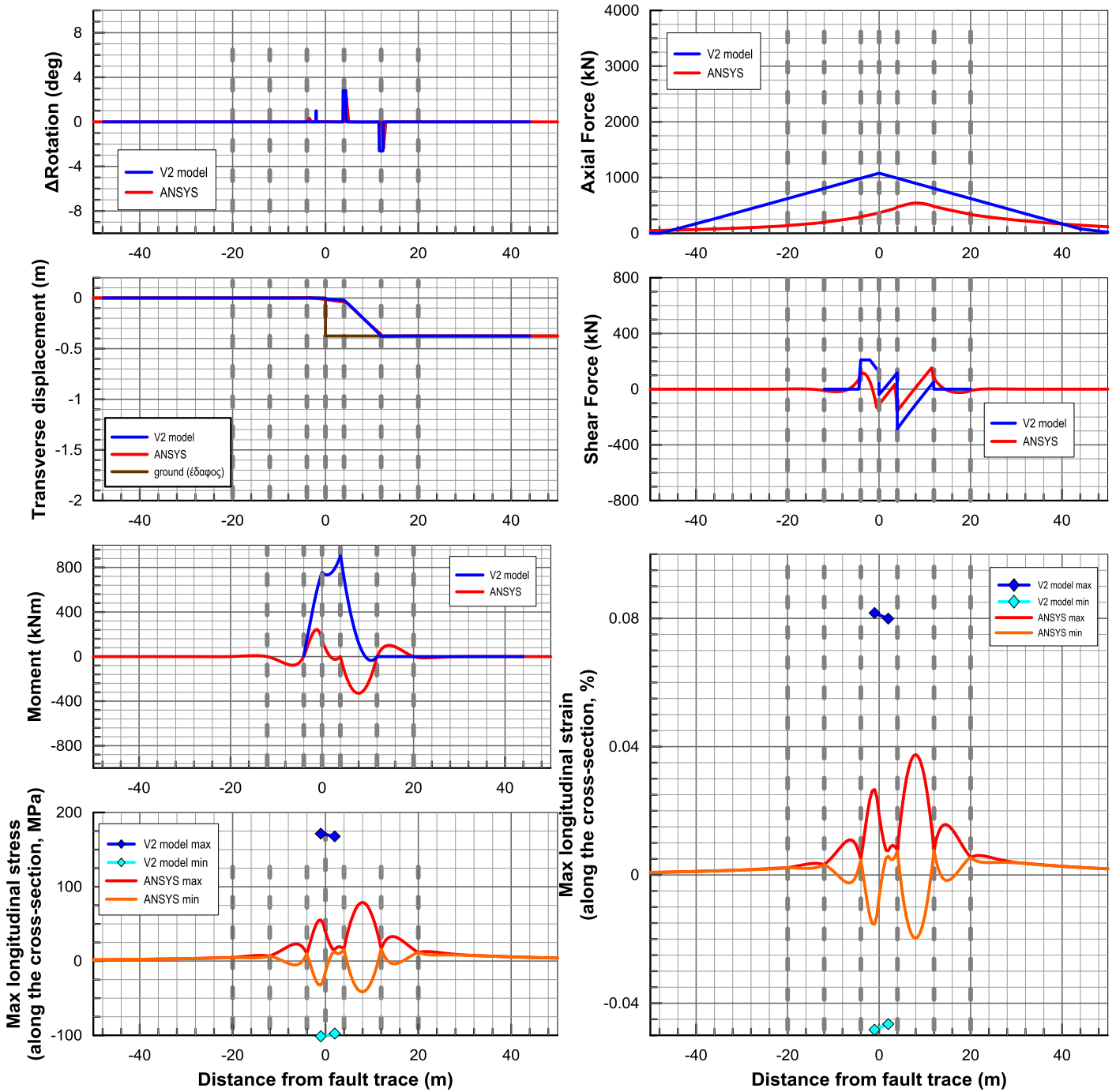
Σχήμα 6.15: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 1.1m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=90^\circ$  και θέση ανάμεσα από τους κόμβους.

Figure 6.15: Comparison of results for the case with fault displacement 1.1m, crossing angle  $\beta=90^\circ$  and position between the two joints.



Σχήμα 6.16: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 0.75m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=90^\circ$  και θέση δίπλα σε κόμβο.

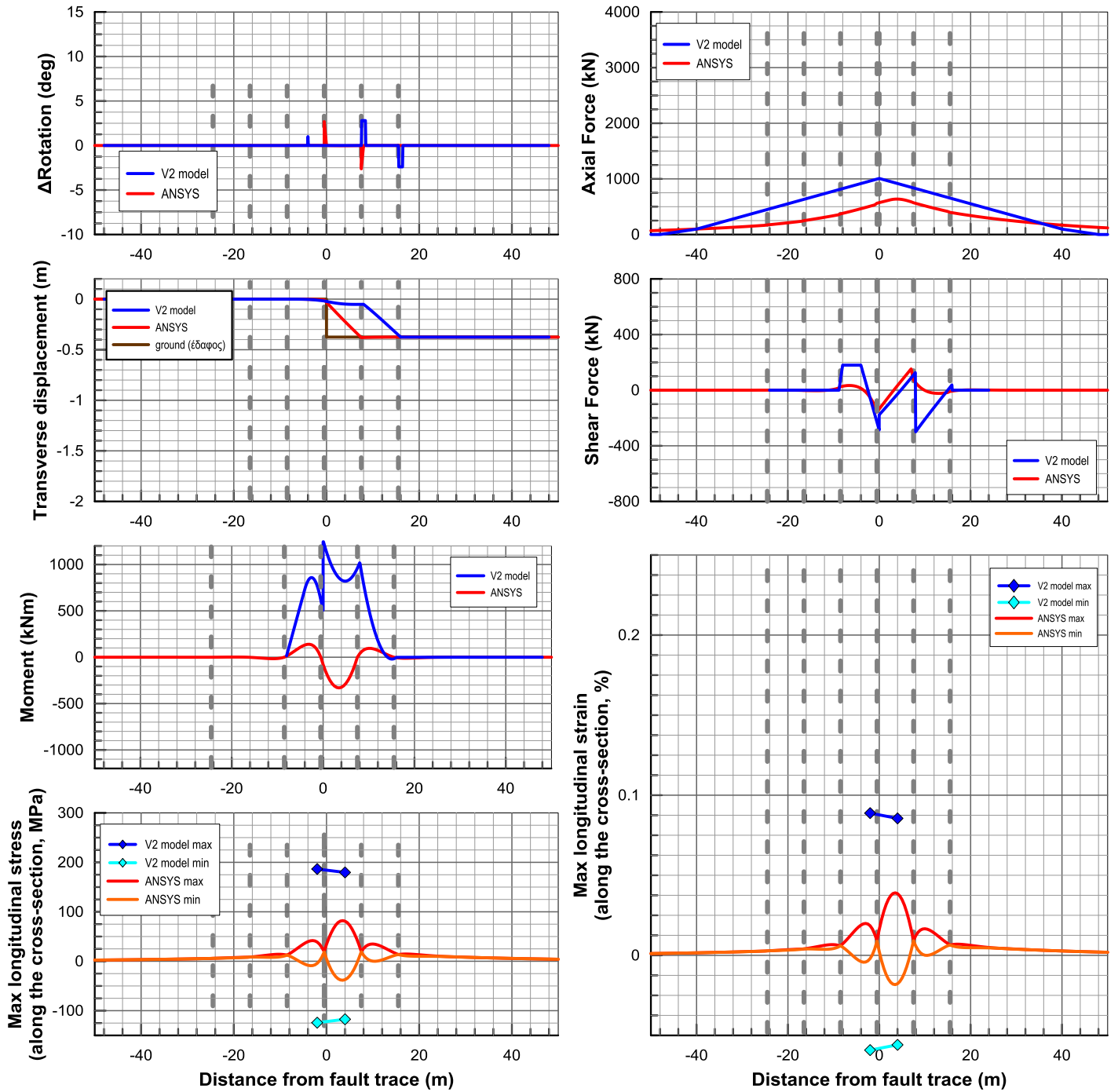
Figure 6.16: Comparison of results for the case with fault displacement 0.75m, crossing angle  $\beta=90^\circ$  and position near a joint.



Σχήμα 6.17: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 0.75m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=90^\circ$  και θέση ανάμεσα από τους κόμβους.

Figure 6.17: Comparison of results for the case with fault displacement 0.75m, crossing angle  $\beta=90^\circ$  and position between the two joints.





Σχήμα 6.18: Σύγκριση αποτελεσμάτων για μετακίνηση 0.375m, γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα  $\beta=90^\circ$  και θέση δίπλα σε κόμβο.

Figure 6.18: Comparison of results for the case with fault displacement 0.375m, crossing angle  $\beta=90^\circ$  and position near a joint.

# 7

## Συμπεράσματα

---

Στα πλαίσια της παρούσας ενότητας εργασίας (EE-11), διατυπώθηκε μία αναλυτική μεθοδολογία για την ανάλυση αγωγών με εύκαμπτους κόμβους σε διασταυρώσεις με ενεργά ρήγματα. Εξετάστηκαν δύο διακριτές περιπτώσεις: (α) η διασταύρωση υπό γωνία  $\beta$  με το ίχνος ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης, και (β) η κάθετη διασταύρωση ( $\beta=90^\circ$ ) με κανονικό ρήγμα ορθής διάρρηξης, υπό τυχούσα γωνία κλίσης  $\psi$  του επιπέδου του ρήγματος ως προς την οριζόντια.

Η επίσης συνήθης περίπτωση διασταύρωσης με κανονικό ρήγμα ορθής διάρρηξης υπό τυχούσα γωνία τομής  $\beta$  καλύπτεται από επαλληλία των περιπτώσεων (α) και (β) ανωτέρω. Επισημαίνεται ότι η εν λόγω επαλληλία δεν μειώνει την ακρίβεια των υπολογισμών δεδομένου ότι οι διατομές μέγιστης καταπόνησης του αγωγού στην περίπτωση (α) και (β) είναι διαφορετικές ενώ οι αντίστοιχες γωνίες στροφής των κόμβων αφορούν διαφορετικά επίπεδα (το οριζόντιο και το κατακόρυφο) και μπορούν να προστεθούν διανυσματικά.

Ως βάση για την ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθοδολογίας χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν για την εκτίμηση των παραμορφώσεων σε συνεχείς αγωγούς. Πιο συγκεκριμένα, ελήφθησαν στοιχεία από την μεθοδολογία των Karamitros et al. (2007, 2011) για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και για κανονικά, η οποία έχει επαληθευτεί εκτενώς μέσω αριθμητικών αναλύσεων, αλλά και από την μεθοδολογία των Trifonov & Cherniy (2010) για ρήγματα κάθε τύπου.

Συνοπτικά, η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στις σχέσεις ελαστικής δοκού υπό ταυτόχρονο εφελκυσμό και κάμψη και στην αρχή της επιπεδότητας της διατομής. Δεδομένου ότι οι σχέσεις ισοροπίας έχουν διατυπωθεί για τον παραμορφωμένο φορέα, έχουν ληφθεί υπόψη και φαινόμενα δεύτερης τάξης, τα οποία είναι σημαντικά λόγω των πολύ μεγάλων αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στον αγωγό, όταν αυτός διασταυρώνεται με το ρήγμα υπό γωνία.

Από τις εκτενείς συγκρίσεις με αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της ενότητας εργασίας, γίνεται φανερό ότι η αναλυτική μεθοδολογία δίνει πολύ καλά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, ενώ στην αναλυτική παραμετρική διερεύνηση που θα πραγματοποιηθεί στην επόμενη ενότητα εργασίας θα εκτιμηθούν τα όρια εφαρμογής της, σε συνδυασμό με κριτήρια κόστους.

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

---

American Lifeline Alliance -ALA/ASCE- (2001), "Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe", ASCE, (with addenda through February 2005) 76p.

American Lifeline Alliance -ALA- (2005), "Design Guidelines for Seismic Resistant Water Pipeline Installations", FEMA, 255p.

ANSYS (2009), "ANSYS Multiphysics", SAS IP Inc. Release 12.1.

ElHmadi K. & O'Rourke M.J. (1990), "Seismic damage to segmented buried pipelines", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 19, pp. 529-539.

Esquivel-Diaz R.F. (1967), "Pullout resistance of deeply buried anchors in sand," M.S. Thesis presented to Duke University, Durham, N.C., U.S.A.

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.

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.

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.

Meyerhof G.G. (1955), " Influence of Roughness of Base and Ground-Water Conditions On The Ultimate Bearing Capacity of Foundations", Geotechnique, Volume 5, Issue 3, September, pp. 227-242.

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.

O'Rourke M.J. & Ballantyne D. (1992), "Observations on Water System and Pipeline Performance in the Limon Area of Costa Rica Due to the April 22, 1991 Earthquake", Technical Report NCEER-92-0017, MCEER, Buffalo.

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.

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. (2008), "Geotechnics of Pipeline System Response to Earthquakes", Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV Congress 2008.

O'Rourke M.J. & Liu J.X. (2012), "Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines", Monograph MCEER-12-MN04, November 2012.

Singhal A. C. (1980). "Strength Characteristics of Buried Jointed Pipelines", report to the Engineering Foundation and ASCE, Grant No. RC-A-77-6A.

Sun S. & Shien L. (1983), "Analysis of Seismic Damage to Buried Pipelines in Tangshan Earthquake", Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment, PVP-77, ASME, New York, June, pp. 365-367.

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.

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.

Tan R.Y. & Yang C.H. (1988), "Structural Responses of Underground Pipelines to Dynamic Loadings", Mech. Struct. & Mach., 16 (1), pp.103-122.

Trautmann C. H. & O'Rourke T.D. (1983), "Behavior of pipe in dry sand under lateral and uplift loading", Geotechnical Engineering Report 83-7, Cornell University.

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.

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.