



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.) 12

*Παραμετρικές αναλύσεις απόκρισης υπόγειων αγωγών με
εύκαμπτους κόμβους*

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 12.1:

*Τεχνική Έκθεση παραμετρικών αναλύσεων απόκρισης
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





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.) 12

*Parametric analyses for the evaluation of the response of
underground pipes with flexible joints*

DELIVERABLE 12.1:

*Technical report of parametric analyses for the evaluation of
the response 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 12 (WP 12), of the research program with title “Novel design concepts for **EN**ergy related **Steel STR**uctures using **Advanced M**aterials” (ENSSTRAM), coordinated by Professor Ch. Gantes, of NTUA.

According to the Research Proposal, the scope of this deliverable is “...to perform extensive parametric analyses, for conventional continuous underground pipes (C-BP) and for underground pipes with flexible joints (S-BP), in order to have all the necessary data for a comparative evaluation of the novel design concept that is being proposed. For the analyses the models that have been developed in W.P.10 and W.P.11, and all the parameters that have been referred to in W.P.9. The comparison will lead to design recommendations that will be in the scope of W.P.13”.

More specifically, in W.P. 12, a comparative evaluation of the proposed design method has been made, by utilizing the numerical methodology that has been analytically presented at WPs 8, 10 and 11 and the analytical model proposed at WP 11. The evaluation covered two cases, when the pipe crosses a strike-slip fault or a normal fault.

Strike-slip fault crossing. The proposed alternative design method for strike-slip faults has been evaluated against the results of forty (40) parametric analyses for a 30" diameter pipeline with 12.5mm wall thickness. The distance L between the flexible joints varied from 6m to 12m, while two extreme scenarios were considered for the location of the fault trace: at the middle between two subsequent joints and

adjacent to a joint. The analyses covered cases with fault crossing angle ranging from $\beta=30^\circ$ to 90° (perpendicular crossing) and three fault displacements equal to $d_f = 0.75\text{m}$, 1.50m and 3.00m .

The parametric investigation has shown that the proposed design method with flexible joints can reduce pipeline strains up to 86.5%, when it crosses vertically the fault ($\beta=90^\circ$), and up to 72.9%, when it crosses the fault with a steep angle ($\beta\geq 60^\circ$). Their effect is essentially zero for smaller crossing angles ($\beta<45^\circ$), since the developing strain are caused by the axial forces, due to tension from axial component of the fault movement, and not due to bending moments. Thus, the proposed design method can be used for the reinforcement of underground pipelines against strike-slip faults, as long as pipeline axis is designed to cross the fault with steep angle i.e. for $\beta=45^\circ-90^\circ$.

There is no question that, among the two proposed methodologies for the evaluation of the pipeline response with flexible joints, the numerical methodology is the most accurate but also considerably more time consuming. On the other hand, from the extensive comparison of the analytical methodology with the performed numerical analyses, it is concluded that the former is also reasonably accurate for the vast majority of the cases that have been performed and can be readily used for preliminary predictions at a fraction only of the time (and cost) required for numerical analyses. In addition, through this comparison, the following application limits of the analytical methodology have been defined:

- Horizontal fault offset larger than two times the pipeline diameter ($D_f > 2D$)
- Fault crossing angle larger or equal to 45° .

Note that, this does not practically limit the use of the analytical methodology, since the use of flexible joints is proposed only for large ground displacements ($>2.5-3.0 D$), and for steep crossing angles where bending strains are of concern.

From an economic-technical comparison for perpendicular crossing, the following limits are proposed for the application of various design methods against strike-slip fault offset ($\beta=90^\circ$):

- Increase of the pipeline wall thickness for small to medium displacements $d_f \leq 3.5D$.
- Use of flexible joints for larger displacements $d_f > 3.5D$
- The use of culverts around the pipeline is a safe but not economical solution, since its cost increases enormously with the magnitude of the fault offset.

For the cases of oblique pipeline-fault crossing (i.e. $\beta < 90^\circ$), it was found that the best solution is:

- Increase of the pipeline wall thickness for small and medium displacement $d_f \leq 3.3D$.
- Replacement of the soil fill with pumice stone for larger displacement $d_f > 3.5D$.
- The use of flexible joints or the construction of culvert around the pipeline, are more expensive solutions from the use of pumice. Nevertheless, they are alternative solutions in areas where the supply of pumice is difficult or uneconomic.

Normal fault crossing. The proposed alternative design method for normal faults has been evaluated against the results of thirty nine (39) parametric analyses for a 30" diameter pipeline with 12.5mm wall thickness. The distance L between the flexible joints varied from 6m to 12m, while two extreme scenarios were considered for the location of the fault trace: at the middle between two subsequent joints and adjacent to a joint. The analyses covered cases of perpendicular crossing and fault plane dip angle ψ ranging from 60° to 90° as well as three fault displacements equal to $d_f = 0.375\text{m}$, 0.75m and 1.50m .

The parametric investigation has shown that the proposed design method with flexible joints can reduce pipeline strains up to 87.5%, for the theoretical case that the fault plane is vertical ($\beta = 90^\circ$), and up to 83.3% and 71.5%, for the more common cases of normal faults that the fault plane dip angle is equal to 75° and 60° respectively.

From the two proposed methodologies for the evaluation of the pipeline response with flexible joints, the numerical methodology is considered as the most reliable for

describing and accurately predicting it. In addition, from the extensive comparison of the analytical methodology with the performed numerical analyses, it is concluded that the former is also fairly accurately for the vast majority of the cases that have been performed at a fraction only of the time and cost required for the numerical analyses. In addition, through this comparison, the following application limits of the analytical methodology have been defined:

- Horizontal fault offset larger than one time the pipeline diameter ($D_f > D$)
- Distance between the flexible joints L smaller than 12m.

From an economic-technical comparison that has been performed, the following limits are proposed for the application of the various design methods against normal faults:

- Increase of the pipeline wall thickness for small to medium displacements $d_f \leq 1.5D$.
- Use of pumice stone for displacements $1.5D < d_f \leq 2.0D$.
- Use of flexible joints for displacements $2.0D < d_f \leq 3.5D$.
- For larger displacements $d_f > 3.5D$ the use of culverts around the pipeline is the only method that can safely protect the pipeline, although with a sharp increase of the associated cost.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	4
2. Συνοπτική Παρουσίαση των Μεθοδολογιών Εκτέλεσης των Παραμετρικών Αναλύσεων.....	7
2.1 Γενικά	7
2.2 Αριθμητική μεθοδολογία προσομοίωσης υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους κόμβους	8
2.3 Βασικές παραδοχές αναλυτικών μεθοδολογιών προσομοίωσης υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους κόμβους	18
3. Ρήγματα Οριζόντιας Ολίσθησης: Συγκριτική Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων ...	23
3.1 Γενικά	23
3.2 Παρουσίαση εκτελεσθέντων αναλύσεων	23
3.3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών και αριθμητικών αναλύσεων.....	26
3.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων δύο τυπικών αριθμητικών αναλύσεων	26
3.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων τυπικής ανάλυσης συνεχούς αγωγού	26
3.3.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων τυπικής ανάλυσης αγωγού με εύκαμπτους κόμβους	31
3.3.4 Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Προτεινόμενης Μεθόδου Σχεδιασμού.....	36
3.3.5 Εκτίμηση Εύρους Εφαρμογής Προτεινόμενων Μεθοδολογιών Σχεδιασμού (Αναλυτικής και Αριθμητικής).....	37

3.4	Αξιολόγηση – Εύρος εφαρμογής μεθοδολογίας.....	49
4.	Κανονικά Ρήγματα: Συγκριτική Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	51
4.1	Γενικά	51
4.2	Παρουσίαση εκτελεσθέντων αναλύσεων	51
4.3	Σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών και αριθμητικών αναλύσεων.....	54
4.3.1	<i>Παρουσίαση αποτελεσμάτων δύο τυπικών αριθμητικών αναλύσεων</i>	<i>54</i>
4.3.2	<i>Παρουσίαση αποτελεσμάτων τυπικής ανάλυσης συνεχούς αγωγού</i>	<i>54</i>
4.3.3	<i>Παρουσίαση αποτελεσμάτων τυπικής ανάλυσης αγωγού με εύκαμπτους κόμβους</i>	<i>59</i>
4.3.4	<i>Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Προτεινόμενης Μεθόδου Σχεδιασμού.....</i>	<i>64</i>
4.3.5	<i>Εκτίμηση Εύρους Εφαρμογής Προτεινόμενων Μεθοδολογιών Σχεδιασμού (Αναλυτικής και Αριθμητικής).....</i>	<i>65</i>
4.4	Αξιολόγηση – Εύρος εφαρμογής μεθοδολογίας.....	77
5.	Τεχνικό-Οικονομική Αξιολόγηση Προτεινόμενης Μεθόδου Σχεδιασμού.....	79
5.1	Εισαγωγή	79
5.2	Παραδοσιακές μέθοδοι αντιμετώπισης εδαφικών μετατοπίσεων λόγω διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων	79
5.3	Σύγκριση μεθόδων ως προς την αποδοτικότητα και το κόστος για την περίπτωση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης.....	85
5.4	Σύγκριση μεθόδων ως προς την αποδοτικότητα και το κόστος για την περίπτωση ρήγματος ορθής διάρρηξης.....	89
6.	Εκτενής Περίληψη - Συμπεράσματα.....	95

7. Βιβλιογραφικές Αναφορές	99
---	-----------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Αναλυτικές και Αριθμητικές επιλύσεις: Ρήγματα Οριζόντιας Ολίσθησης.....	101
---	------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Αναλυτικές και Αριθμητικές επιλύσεις: Ρήγματα Ορθής Διάρρηξης	151
---	------------

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 υπό το γενικό συντονισμό του Καθηγητή Χαράλαμπου Γαντέ (Κύριος Ερευνητής).

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζει τις δράσεις που προδιαγράφονται στην **Ενότητα Εργασίας Ε.Ε. 12**, με τίτλο:

«Παραμετρικές αναλύσεις απόκρισης υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους κόμβους (S-BP)»

Το αντικείμενο της **Ενότητας Εργασίας Ε.Ε. 12**, έχει περιγραφεί στην εγκεκριμένη Ερευνητική Πρόταση ως:

«Θα πραγματοποιηθούν εκτεταμένες παραμετρικές αναλύσεις, για συμβατικούς συνεχείς υπόγειους αγωγούς (C-BP) αλλά και υπόγειους αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους (S-BP), προκειμένου να προκύψουν τα απαραίτητα δεδομένα για μία συγκριτική αποτίμηση της καινοτόμου ιδέας σχεδιασμού που προτείνεται στη συγκεκριμένη έρευνα. Στις αναλύσεις αυτές θα χρησιμοποιηθούν τα βαθμονομημένα μοντέλα που μορφώθηκαν στις Ε.Ε.10 και Ε.Ε.11 και θα διερευνηθούν οι παράμετροι που αναφέρθηκαν στην Ε.Ε.9. Η σύγκριση θα οδηγήσει σε συστάσεις σχεδιασμού που θα αποτελέσουν το αντικείμενο της Ε.Ε.13».

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

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται συνοπτικά οι δύο μεθοδολογίες με τις οποίες θα πραγματοποιηθούν οι παραμετρικές αναλύσεις.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των διαθέσιμων μεθοδολογιών, ενώ σχολιάζεται και το εύρος εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου σχεδιασμού και των μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια αυτού του Ερευνητικού Προγράμματος.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων για κανονικά ρήγματα και γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των διαθέσιμων μεθοδολογιών, ενώ σχολιάζεται και το εύρος εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου σχεδιασμού και των μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια αυτού του Ερευνητικού Προγράμματος.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται συγκριτική οικονομοτεχνική αξιολόγηση των υπάρχουσών «παραδοσιακών» μεθόδων σχεδιασμού με αυτόν που προτείνεται στα πλαίσια του προγράμματος.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα της παρούσας έκθεσης.

Οι εργασίες που περιγράφονται έχουν πραγματοποιηθεί με τη συνεισφορά 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
- Κωνσταντίνος Καλοχαιρέτης, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- 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

Συνοπτική Παρουσίαση των Μεθοδολογιών Εκτέλεσης των Παραμετρικών Αναλύσεων

2.1 Γενικά

Για τη μελέτη της επιρροής των εύκαμπτων κόμβων στη συμπεριφορά ενός υπόγειου αγωγού στον οποίο επιβάλλονται 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), αναπτύχθηκαν δύο εναλλακτικές μεθοδολογίες στα πλαίσια του συγκεκριμένου ερευνητικού προγράμματος.

Η πρώτη μεθοδολογία βασίζεται σε μη-γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις με τη χρήση ενός εμπορικά διαθέσιμου προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων και παρουσιάστηκε αναλυτικά στα παραδοτέα των Ερευνητικών Εργασιών 8, 10 και 11.

Η δεύτερη μεθοδολογία είναι αναλυτική, βασίζεται στη θεωρία ελαστικής δοκού και παρουσιάζεται αναλυτικά στο παραδοτέο της Ερευνητικής Εργασίας 11, για τις περιπτώσεις διασταύρωσης του αγωγού με κανονικά ή οριζόντιας ολίσθησης ρήγματα.

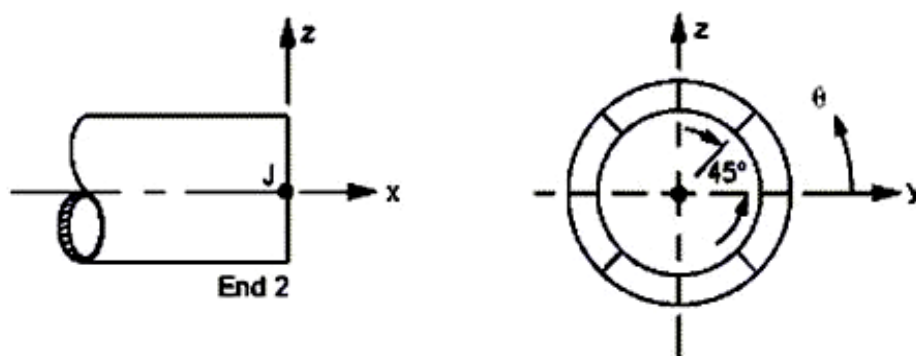
Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται συνοπτικά οι δύο αυτές μεθοδολογίες, οι οποίες στα επόμενα κεφάλαια αξιοποιούνται για την παραμετρική διερεύνηση της προτεινόμενης μεθόδου σχεδιασμού.

2.2 Αριθμητική μεθοδολογία προσομοίωσης υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους κόμβους

Η αριθμητική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει την επιβολή μεγάλων μετατοπίσεων σε διασταυρώσεις με ενεργά ρήγματα και επιτρέπει την προσομοίωση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του χάλυβα κατασκευής του αγωγού και βασίζεται στη μη-γραμμική μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων μέσω του κώδικα ANSYS (2009).

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 2.1. 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 2.1: Σημεία ολοκλήρωσης στην περίμετρο της διατομής του αγωγού.

Figure 2.1: 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 (δx, δy και δz), ενώ για την περίπτωση ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης η μετατόπιση δz 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:

$$[K]\{u\} = \{F^a\} \quad (2.1)$$

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

2.1 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 2.2 και συνοψίζεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$[K_i^T]\{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F^{nr}\} \quad (2.2)$$

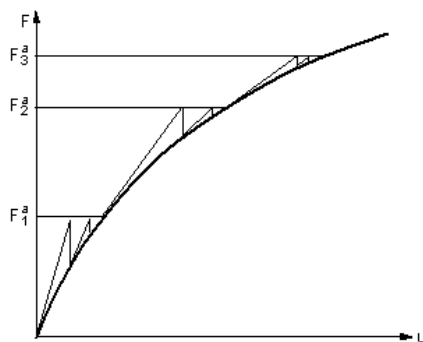
$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} - \{\Delta u_i\} \quad (2.3)$$

όπου: $[K_i^T]$ = εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας

i = δείκτης που υποδηλώνει την τρέχουσα επανάληψη

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

Σε κάθε επανάληψη, τα $[K_i^T]$ και $\{F^{nr}\}$ υπολογίζονται συναρτήσει των τιμών του $\{u_i\}$. Έτσι, το δεξί τμήμα της Εξίσωσης 2.2 είναι ουσιαστικά το διάνυσμα των απομενόντων (εκτός-ισορροπίας) φορτίων. Αποτελεί, δηλαδή, μέτρο της «απόκλισης» από την τελική λύση.

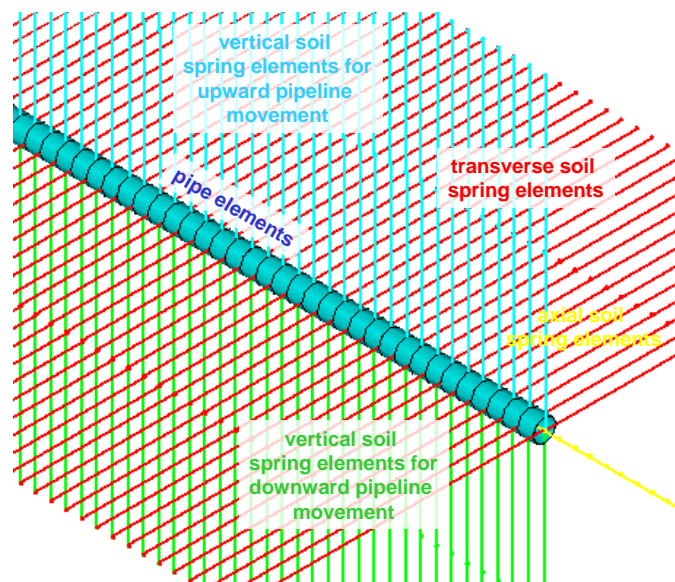


Σχήμα 2.2: Επαυξητική μέθοδος Newton-Raphson.

Figure 2.2: Integration Method Newton-Raphson.

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 2.3). 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 2.3: Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους-αγωγού με ελαστοπλαστικά ελατήρια.

Figure 2.3: 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:	$K_0 = 0.50$

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:

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

(2.4)

όπου, K_o = συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών

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

D = εξωτερική διάμετρος αγωγού

γ = υπό άνωση ειδικό βάρος επίχωσης

δ = γωνία τριβής μεταξύ αγωγού και επίχωσης

Ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας του αγωγού, η γωνία τριβής δ είναι ίση με το 50÷100% της γωνίας τριβής ϕ 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):

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

(2.5)

όπου, $A = 0.15 \gamma_u / \rho_u$

$B = 0.85 / \rho_u$

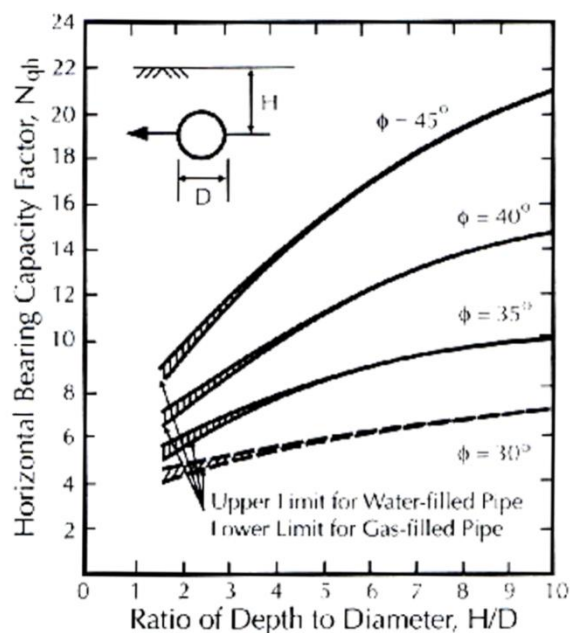
$\rho_u = \gamma H N_{qh} D$

N_{qh} = συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας που υπολογίζεται συντηρητικά από το Σχήμα 2.4 (Trautmann & O'Rourke, 1983b).

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

$\gamma_u = 0.02$ to $0.03 (H+D/2)$ για πυκνή άμμο

Στην περίπτωση προσάρτησης δι-γραμμικής ελαστοπλαστικής σχέσης στην Εξίσωση 2.5 για $p=0.5\rho_u$ όπως αυτή που κάνουμε στα πλαίσια του εν λόγω παραδοτέου, οι προηγούμενες τιμές του γ_u θα πρέπει να πολλαπλασιασθούν επί 0.26.



Σχήμα 2.4: Συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας σύμφωνα με τους Trautmann & O'Rourke (1983b)

Figure 2.4: 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:

$$q_u = \gamma \cdot H \cdot N_q \cdot D + 0.5 \cdot \gamma \cdot D^2 \cdot N_\gamma \quad (\text{δύναμη/μονάδα μήκους}) \quad (2.6)$$

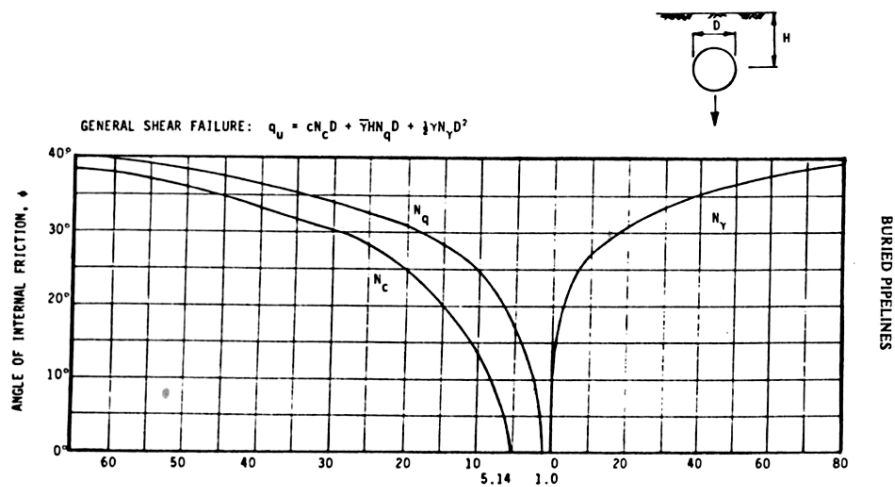
όπου: N_q, N_γ = συντελεστές φέρουσας ικανότητας για λωριδωτά θεμέλια που φορτίζονται κατακόρυφα προς τα κάτω-υπολογίζονται από το Σχήμα 2.5 συναρτήσει της γωνίας τριβής ϕ (Meyerhof, 1955),

γ = υπό άνωση ειδικό βάρος επίχωσης

H = βάθος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι τον άξονα του αγωγού

D = εξωτερική διάμετρος του αγωγού

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

Figure 2.5: 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 z (Trautmann and O'Rourke 1983b):

$$q = \frac{z}{A + B \cdot z} \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (2.7)$$

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):

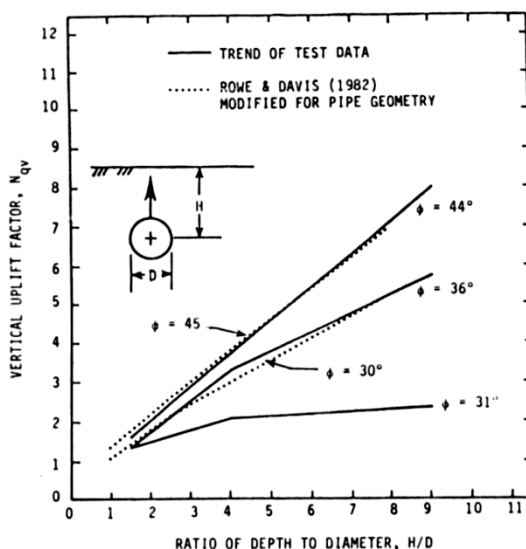
$$q_u = \gamma \cdot H \cdot N_{qv} \cdot D \quad (2.8)$$

όπου ο συντελεστής κατακόρυφης ανύψωσης N_{qv} δίνεται στο Σχήμα 2.6 ως συνάρτηση του λόγου του βάθους του άξονα του αγωγού προς τη διάμετρο H/D και της γωνίας τριβής της επίχωσης ϕ .

Από τις δύο ομάδες καμπύλων που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.6, 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 $z_{u,up}=(0.010\div 0.015)H$, 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 2.1.



Σχήμα 2.6: Συντελεστής κατακόρυφης (προς τα άνω) φέρουσας ικανότητας σύμφωνα με τους Trautmann & O'Rourke (1983b)

Figure 2.6: Vertical (upwards) bearing capacity coefficient after Trautmann & O'Rourke (1983b)

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά των εδαφικών ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές αναλύσεις.

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

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”.

Με βάση τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν για τους διαθέσιμους εμπορικά κόμβους, επιλέχθηκε η προσομοίωση τους στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων να γίνει με τα 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 μία 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, ελλείψει ακριβέστερων δεδομένων από τους κατασκευαστές, επιλέχθηκαν τιμές σε αντιστοιχία με τα ευθύγραμμα τμήματα του αγωγού.

Οι τιμές για τα βασικά μεγέθη των κόμβων που επιλέχθηκαν είναι:

Αξονική δυσκαμψία στους άξονες x, y και z: 674310 kN/m

Στροφική δυσκαμψία ως προς τον άξονα z: 2 kNm/deg

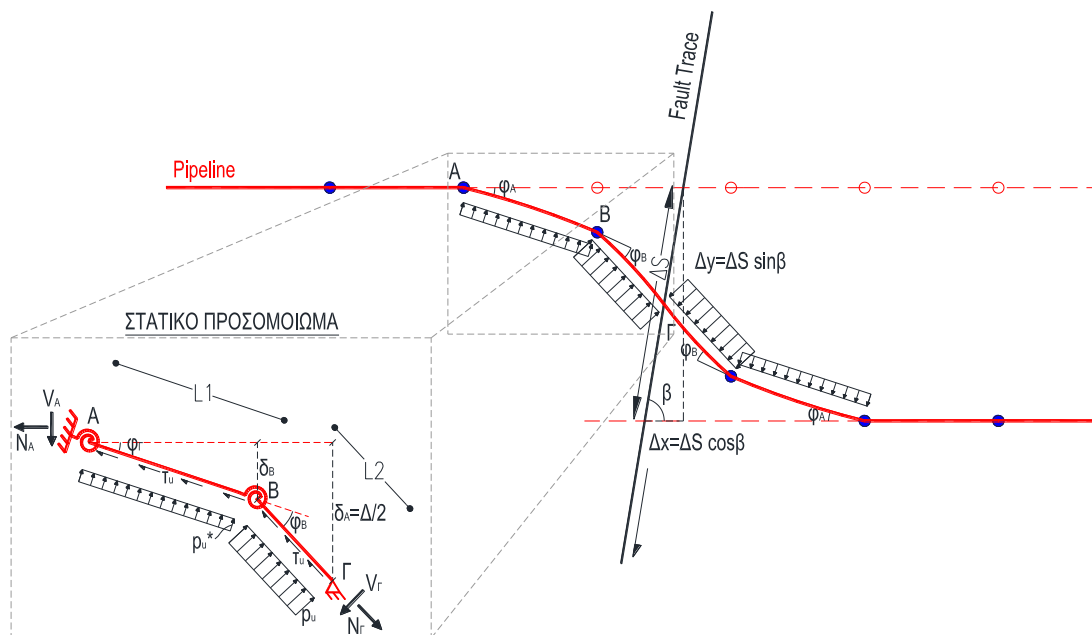
Στροφική δυσκαμψία ως προς τους άξονες x και y: 78000 kNm/deg

2.3 Βασικές παραδοχές αναλυτικών μεθοδολογιών προσομοίωσης υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους κόμβους

Στα πλαίσια της Ερευνητικής Εργασίας 11 αναπτύχθηκε αναλυτική μεθοδολογία για την προσομοίωση της συμπεριφοράς υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους κόμβους για τις ακόλουθες περιπτώσεις:

1) Ρήγματα Οριζόντιας Ολίσθησης: _ Για την περίπτωση διασταύρωσης του αγωγού με ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης το ίδιο αναλυτικό προσομοίωμα χρησιμοποιείται ανεξαρτήτως της θέσης του ρήγματος ως προς τους κόμβους, ενώ τα βασικά του χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.7.

Το εν λόγω προσομοίωμα είναι συμμετρικό ως προς το σημείο τομής του αγωγού με το ίχνος του ρήγματος Γ και για τις δύο ακραίες περιπτώσεις γεωμετρίας που εξετάστηκαν, δηλαδή όταν το ρήγμα διέρχεται στο μέσον μεταξύ δύο διαδοχικών κόμβων, ή ακριβώς στην παρειά ενός από τους κόμβους. Το σύνολο των εγκάρσιων μετακινήσεων θεωρείται ότι περιορίζεται στην περιοχή που ορίζουν οι δύο πλησιέστεροι κόμβοι στο ίχνος του ρήγματος, ανεξαρτήτως των λοιπών γεωμετρικών παραμέτρων του προβλήματος (απόσταση μεταξύ κόμβων, μέγεθος μετακίνησης ρήγματος, κτλ).



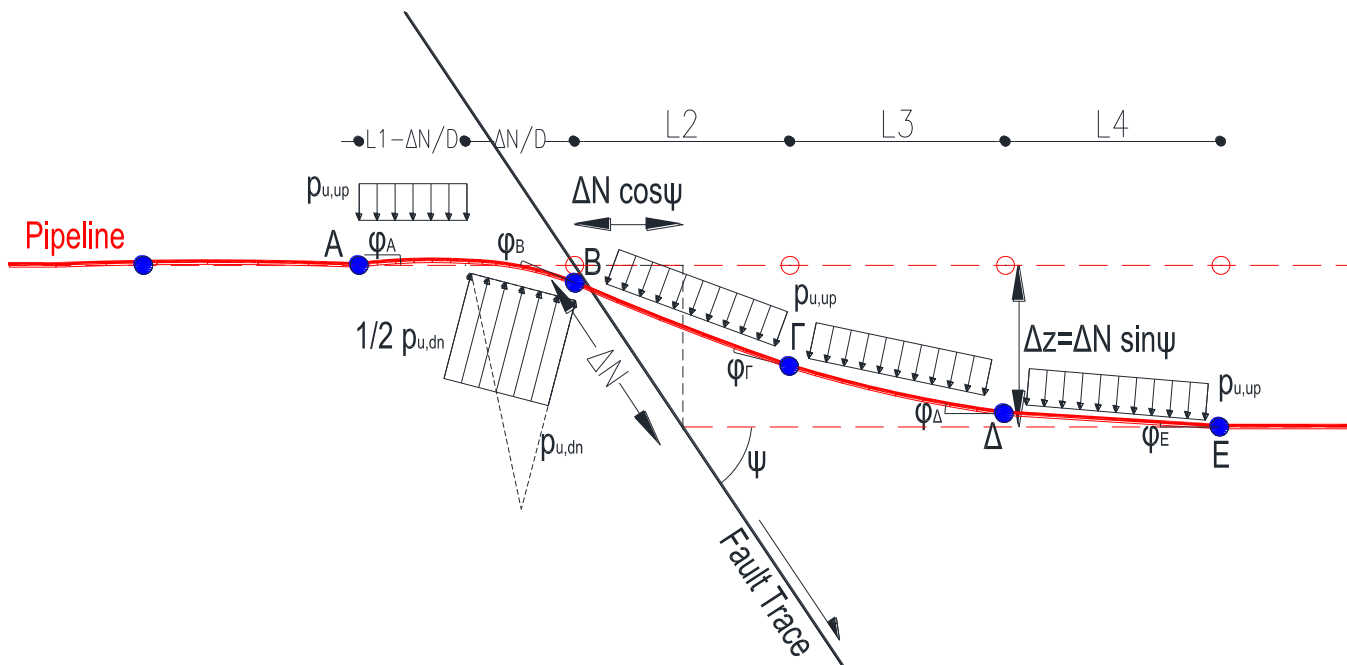
Σχήμα 2.7: Στατικό προσομοίωμα του συνόλου του φορέα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της αναλυτικής μεθοδολογίας σε ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης.

Figure 2.7: Static pipeline model used for the development of the analytical methodology in strike-slip faults.

II) Κανονικά Ρήγματα: Για την περίπτωση διασταύρωσης του αγωγού με κανονικό ρήγμα αναπτύχθηκαν δύο αναλυτικά προσομοιώματα, αναλόγως της θέσης του ίχνους του ρήγματος ως προς τους κόμβους για τις δύο ακραίες περιπτώσεις (α) το ρήγμα να διέρχεται στο μέσον μεταξύ δύο διαδοχικών κόμβων, ή (β) ακριβώς στην παρειά ενός από τους κόμβους. Τα βασικά χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.8. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα μήκη AB και ΒΓ είναι ίσα με $L/2$ για την περίπτωση (α) που προαναφέρθηκε, ενώ είναι ίσα με L για την περίπτωση (β).

Τα προσομοιώματα για τα κανονικά ρήγματα δεν είναι συμμετρικά ως προς το σημείο τομής του αγωγού με το ίχνος του ρήγματος Β, επειδή τα κατακόρυφα προς τα κάτω ελατήρια είναι πολύ μεγαλύτερα από αυτά προς τα πάνω. Το σύνολο των εγκάρσιων μετακινήσεων θεωρείται ότι περιορίζεται στην περιοχή που ορίζουν αφενός ο πλησιέστερος κόμβος στο ίχνος του ρήγματος στο σταθερό τέμαχος και

αφετέρου οι τρεις πλησιέστεροι κόμβοι στο ολισθαίνων τμήμα, ανεξαρτήτως των λοιπών γεωμετρικών παραμέτρων του προβλήματος (απόσταση μεταξύ κόμβων, μέγεθος μετακίνησης ρήγματος, κτλ).



Σχήμα 2.8: Στατικό προσομοίωμα του συνόλου του φορέα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της αναλυτικής μεθοδολογίας.

Figure 2.8: Static model for the entire pipeline that was used for the development of the analytical methodology.

Η επαναληπτική διαδικασία επίλυσης για το σύνολο των προτεινόμενων αναλυτικών προσομοιωμάτων είναι η εξής:

- **Βήμα 1^ο:** 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^ο:** 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^ο**: 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 για κάθε ένα από τα τρία αναλυτικά προσομοιώματα (για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, κανονικά με διασταύρωση ανάμεσα σε δύο κόμβους, κανονικά με διασταύρωση στην άκρη), 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.

3

Ρήγματα Οριζόντιας Ολίσθησης: Συγκριτική Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

3.1 Γενικά

Προκειμένου να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου σχεδιασμού στην απομείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό λόγω της διάρρηξης ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης, πραγματοποιήθηκαν εκτενείς παραμετρικές αναλύσεις και με τις δύο προτεινόμενες μεθοδολογίες (αριθμητική και αναλυτική). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρατίθενται αναλυτικά και σε σύγκριση μεταξύ τους προκειμένου να εκτιμηθεί το εύρος εφαρμογής της προτεινόμενης εναλλακτικής μεθόδου σχεδιασμού.

3.2 Παρουσίαση εκτελεσθέντων αναλύσεων

Για την εκτίμηση των ορίων της ευεργετικής επίδρασης των εύκαμπτων κόμβων στις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό λόγω της διάρρηξης ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 40 αριθμητικές αναλύσεις για αγωγό διαμέτρου 0.762m και πάχους τοιχώματος 12.5mm. Σε όλες τις περιπτώσεις τα προσομοιώματα είχαν έξι εύκαμπτους κόμβους, σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους, ενώ εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις για τη θέση του ρήγματος: (α) στη μέση μεταξύ δύο εύκαμπτων κόμβων (του 3ου και του 4^{ου}) και (β) στην άκρη, ακριβώς δίπλα σε έναν εύκαμπτο κόμβο (αμέσως μετά τον 3ο κόμβο).

Οι αναλύσεις χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες ανάλογα με το μέγεθος της απόστασης των εύκαμπτων κόμβων μεταξύ τους (6m, 8m ή 12m), ενώ πραγματοποιήθηκαν 15, 17 και 9 αναλύσεις για κάθε ομάδα αντίστοιχα. Πέρα από την απόσταση των κόμβων, οι υπόλοιπες παράμετροι που εξετάστηκαν στις αναλύσεις ήταν (α) η τιμή

της γωνίας διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα ($\beta=30^\circ$, 60° και 90°) και (β) η μετακίνηση του ρήγματος (συνολική μετακίνηση ρήγματος ίση με 0.75m, 1,5m και 3m, ήτοι λόγος μετακίνησης/διάμετρος αγωγού $Df/D=1, 2$ και 4).

Πίνακας 3.1: Βασικά χαρακτηριστικά των εκτελεσθέντων παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων για αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους

A/A	Απόσταση Κόμβων (m)	Θέση διασταύρωσης	Γωνία β (°)	Μετακίνηση ρήγματος (m)	Δx (m)	Δy (m)
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΑΝΑ 6m						
1	6.0	Ανάμεσα	90	3.00	0.000	3.000
2	6.0	Ανάμεσα	60	3.00	1.500	2.598
3	6.0	Ανάμεσα	30	3.00	2.598	1.500
4	6.0	Άκρη	90	3.00	0.000	3.000
5	6.0	Άκρη	60	3.00	1.500	2.598
6	6.0	Άκρη	30	3.00	2.598	1.500
7	6.0	Ανάμεσα	90	1.50	0.000	1.500
8	6.0	Ανάμεσα	60	1.50	0.750	1.299
9	6.0	Ανάμεσα	30	1.50	1.299	0.750
10	6.0	Άκρη	90	1.50	0.000	1.500
11	6.0	Άκρη	60	1.50	0.750	1.299
12	6.0	Άκρη	30	1.50	1.299	0.750
13	6.0	Ανάμεσα	90	0.75	0.000	0.750
14	6.0	Ανάμεσα	60	0.75	0.375	0.649
15	6.0	Ανάμεσα	30	0.75	0.649	0.375
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΑΝΑ 8m						
16	8.0	Ανάμεσα	90	3.00	0.000	3.000
17	8.0	Ανάμεσα	60	3.00	1.500	2.598
18	8.0	Ανάμεσα	30	3.00	2.598	1.500
19	8.0	Άκρη	90	3.00	0.000	3.000
20	8.0	Άκρη	60	3.00	1.500	2.598
21	8.0	Άκρη	30	3.00	2.598	1.500
22	8.0	Ανάμεσα	90	1.50	0.000	1.500
23	8.0	Ανάμεσα	60	1.50	0.750	1.299
24	8.0	Ανάμεσα	30	1.50	1.299	0.750
25	8.0	Άκρη	90	1.50	0.000	1.500
26	8.0	Άκρη	60	1.50	0.750	1.299
27	8.0	Άκρη	30	1.50	1.299	0.750
28	8.0	Ανάμεσα	90	0.75	0.000	0.750
29	8.0	Ανάμεσα	60	0.75	0.375	0.649
30	8.0	Ανάμεσα	30	0.75	0.649	0.375
31	8.0	Άκρη	90	0.75	0.000	0.750
32	8.0	Άκρη	60	0.75	0.375	0.649
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΑΝΑ 12m						
33	12.0	Ανάμεσα	90	3.00	0.000	3.000
34	12.0	Ανάμεσα	30	3.00	2.598	1.500
35	12.0	Άκρη	90	3.00	0.000	3.000
36	12.0	Ανάμεσα	90	1.50	0.000	1.500
37	12.0	Ανάμεσα	60	1.50	0.750	1.299
38	12.0	Ανάμεσα	30	1.50	1.299	0.750
39	12.0	Ανάμεσα	60	0.75	0.375	0.649
40	12.0	Ανάμεσα	30	0.75	0.649	0.375

Πρέπει να σημειωθεί ότι εφόσον η χρήση εύκαμπτων κόμβων προβλέπεται για περιπτώσεις μεγάλων μετακινήσεων, όπου οι συμβατικές μέθοδοι σχεδιασμού δεν επαρκούν, τα βασικά συμπεράσματα για τη μεθοδολογία θα εξαχθούν από τα αποτελέσματα για τις αυξημένες μετατοπίσεις ρήγματος (1.5m και 3m ήτοι 2 έως 4D), ενώ οι αναλύσεις για μετακίνηση ρήγματος ίση με 0.75m είχαν περισσότερο συμπληρωματικό χαρακτήρα. Επίσης, μεταξύ των δύο προτεινόμενων μεθόδων επίλυσης (αριθμητική και αναλυτική), η αριθμητική έχει μεγαλύτερες δυνατότητες προσομοίωσης και θεωρείται ότι τα αποτελέσματά της είναι περισσότερο ακριβή (αριθμητικά πειράματα), ενώ αντίθετα η αναλυτική μεθοδολογία είναι απλούστερη στον χειρισμό και το στήσιμο, αλλά έχει περισσότερο προσεγγιστικό χαρακτήρα λόγω των αναγκαίων παραδοχών. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά και οι τιμές των παραμέτρων της κάθε ανάλυσης συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

Προκειμένου να μπορεί να συγκριθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας σχεδιασμού με τη χρήση εύκαμπτων κόμβων, πέρα από τις προαναφερόμενες αναλύσεις εκτελέστηκαν επιπλέον εννιά (9) αριθμητικές αναλύσεις, οι οποίες αφορούν συνεχή αγωγό χωρίς εύκαμπτο κόμβο, τα βασικά στοιχεία των οποίων στον Πίνακα 3.2. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα για τα κρίσιμα μεγέθη σχεδιασμού.

Πίνακας 3.2: Βασικά χαρακτηριστικά των εκτελεσθέντων παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων για συνεχή αγωγό και αποτελέσματα.

α/α	Γωνία β (°)	Μετακίνηση ρήγματος (m)	Δx (m)	Δy (m)	N (kN)	V (kN)	M (kNm)	ε _{max} (%)	ε _{min} (%)	σ _{max} (kPa)	σ _{min} (kPa)
Σ1	30	0.75	0.649	0.375	9532	538	1234	0,360	0,021	478,8	43,7
Σ2	30	1.50	1.299	0.750	13363	281	452	0,121	0,790	500,6	253,3
Σ3	30	3.00	2.598	1.500	15320	44	19	2,472	0,435	522,5	485,4
Σ4	60	0.75	0.375	0.649	7321	1825	651	0,402	-0,074	482,8	-155,8
Σ5	60	1.50	0.750	1.299	10390	532	1373	0,782	-0,029	500,4	-59,9
Σ6	60	3.00	1.500	2.598	14409	124	189	0,919	0,195	503,8	407,5
Σ7	90	0.75	0.000	0.750	1351	816	2563	0,254	-0,208	460,1	-428,9
Σ8	90	1.50	0.000	1.500	2610	877	3118	0,578	-0,342	493,2	-476,3
Σ9	90	3.00	0.000	3.000	4844	824	3088	1,030	-0,390	506,1	-481,8

3.3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών και αριθμητικών αναλύσεων

3.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων δύο τυπικών αριθμητικών αναλύσεων

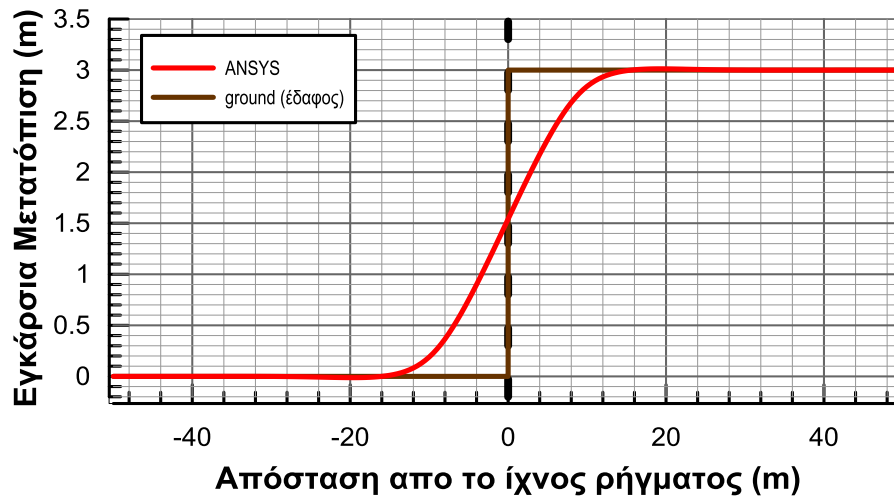
Πριν γίνει η εκτενής σύγκριση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών και αναλυτικών επιλύσεων για την εκτίμηση της ευεργετικής επιρροής της προτεινόμενης μεθόδου, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα δύο τυπικών ενδεικτικών αριθμητικών αναλύσεων, προκειμένου να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά του αγωγού με και χωρίς τη χρήση εύκαμπτων κόμβων. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι αριθμητικές αναλύσεις για τις περιπτώσεις:

- συνεχή αγωγού χωρίς εύκαμπτους κόμβους και
- αγωγού με έξι (6) εύκαμπτους κόμβους τοποθετημένους ανά 6m στην περιοχή γύρω από το ρήγμα. Το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό στη μέση μεταξύ του 3ου και 4ου κόμβου.

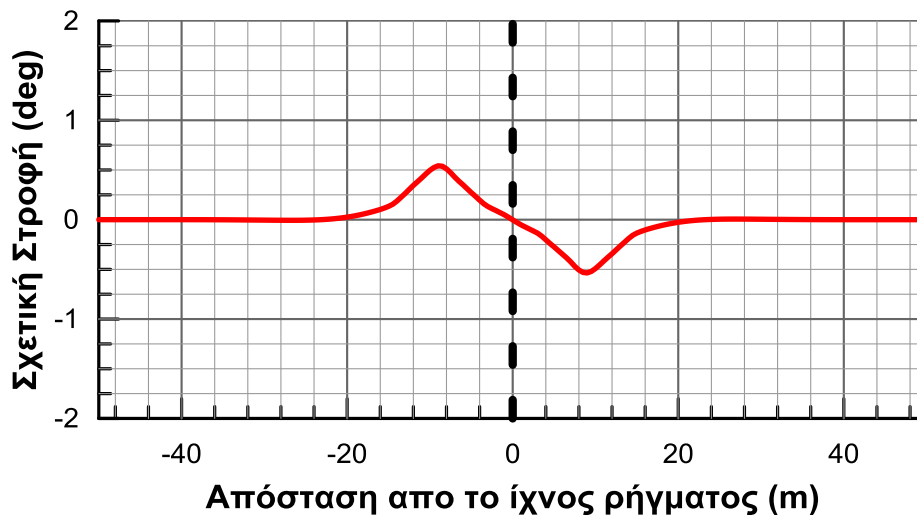
Και στις δύο περιπτώσεις πρόκειται για ένα αγωγό διαμέτρου $D=30''$, με πάχος τοιχώματος $t=12.5\text{mm}$ και ο οποίος διασταυρώνεται με το ίχνος του ρήγματος υπό γωνία $\beta=90^\circ$. Ο λόγος μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού είναι $D_f/D=4$, δηλαδή η συνολική μετακίνηση του ρήγματος είναι ίση με 3m.

3.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων τυπικής ανάλυσης συνεχούς αγωγού

Στα Σχήματα 3.1 και 3.2 που ακολουθούν, παρουσιάζονται η μετακίνηση του αγωγού κατά την εγκάρσια οριζόντια διεύθυνση (άξονας y) και η στροφή του ως προς τον κατακόρυφο άξονα z , αντίστοιχα. Με καφέ γραμμή στο πρώτο σχήμα παρουσιάζεται η μετακίνηση του εδάφους, ενώ σε όλα τα σχήματα που ακολουθούν η θέση του ρήγματος παριστάνεται με διακεκομμένη μαύρη γραμμή.

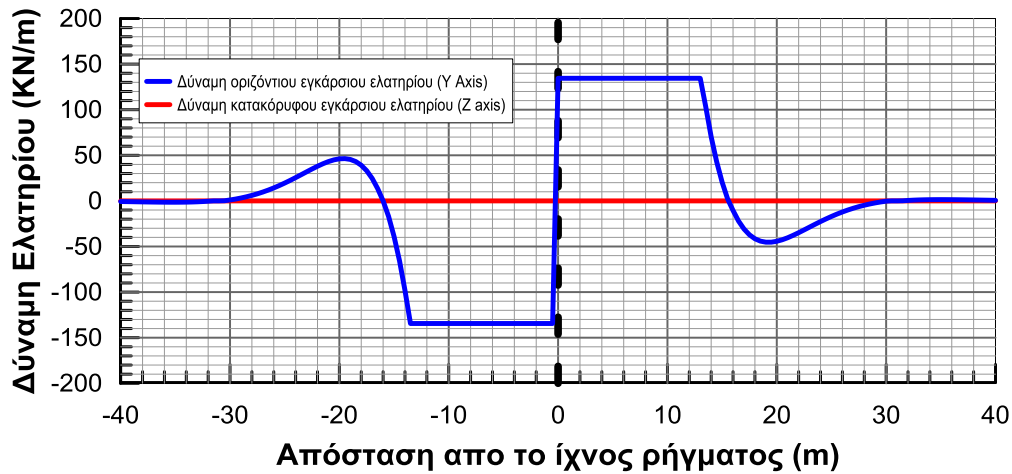


Σχήμα 3.1: Μετατοπίσεις του αγωγού κατά την εγκάρσια οριζόντια διεύθυνση
Figure 3.1: Displacements of pipeline vertically to the fault trace.

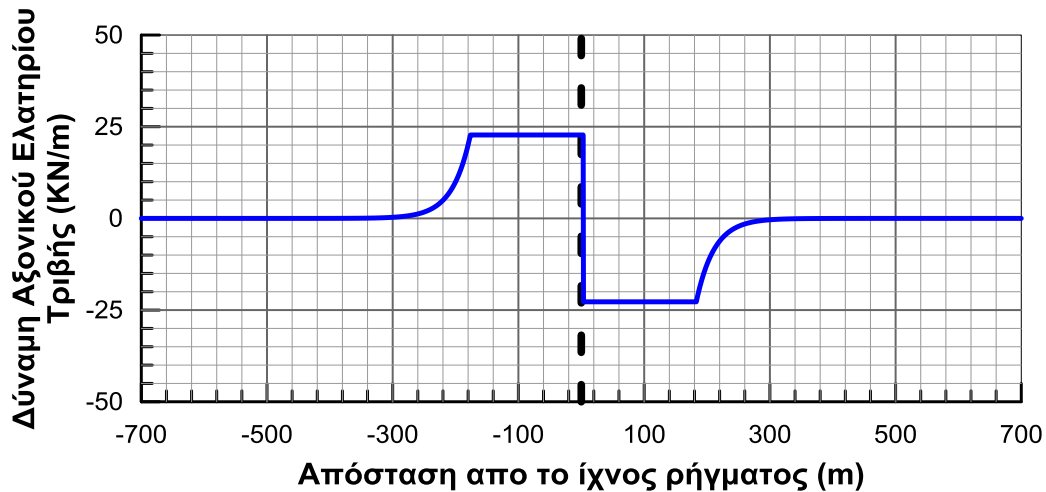


Σχήμα 3.2: Σχετική στροφή του αγωγού γύρω από τον άξονα z.
Figure 3.2: Relative turn of pipeline around z axis.

Το μήκος καμπύλωσης του αγωγού, δηλαδή το μήκος στο οποίο ο αγωγός υφίσταται μεγάλες εγκάρσιες μετατοπίσεις και κατά συνέπεια καμπυλώνεται, είναι περίπου 18m εκατέρωθεν του ρήγματος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή των δυνάμεων των εγκάρσιων ελατηρίων (οριζόντιων και κατακόρυφων) και των αξονικών ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού στα Σχήματα 3.3 και 3.4 αντίστοιχα.

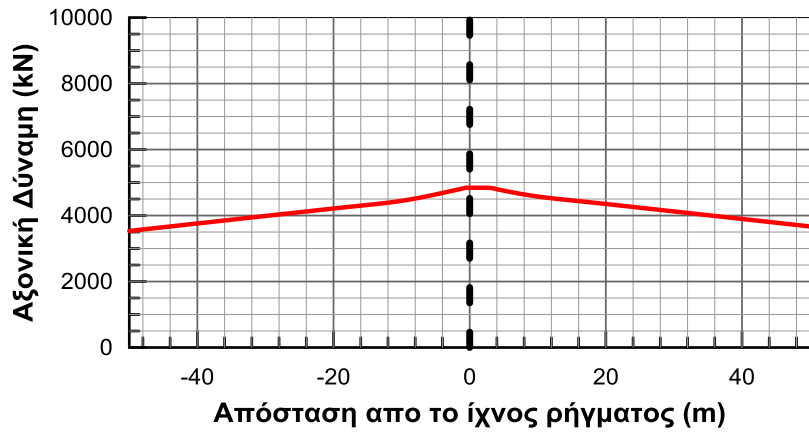


Σχήμα 3.3: Κατανομή των δυνάμεων των εγκάρσιων ελατηρίων στον αγωγό
Figure 3.3: Vertical spring forces along the pipeline.



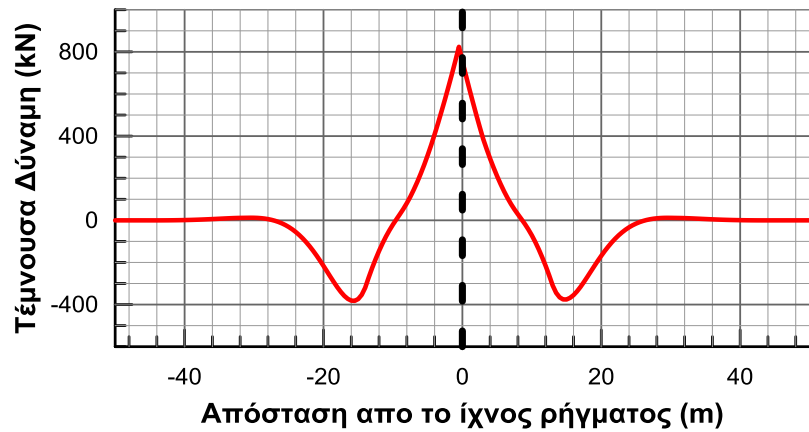
Σχήμα 3.4: Κατανομή των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων στον αγωγό
Figure 3.4: Axial spring forces along the pipeline.

Από το Σχήμα 3.4 προκύπτει ότι το μήκος αγκύρωσης του αγωγού, δηλαδή το μήκος μέσα στο οποίο αναπτύσσονται αξονικές τάσεις λόγω της διάρρηξης του ρήγματος κι οι οποίες παραλαμβάνονται από την τριβή είναι περίπου 180m εκατέρωθεν του ρήγματος. Στα Σχήματα 3.5, 3.6 και 3.7 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα διαγράμματα των κατανομών της αξονικής δύναμης, της τέμνουσας δύναμης και της καμπτικής ροπής, που αναπτύσσονται στον αγωγό, αντίστοιχα.



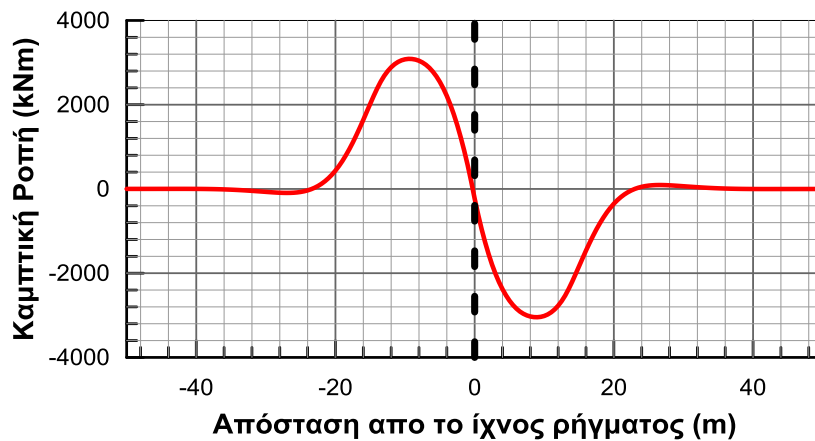
Σχήμα 3.5: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού

Figure 3.5: Axial forces along the pipeline.



Σχήμα 3.6: Κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού

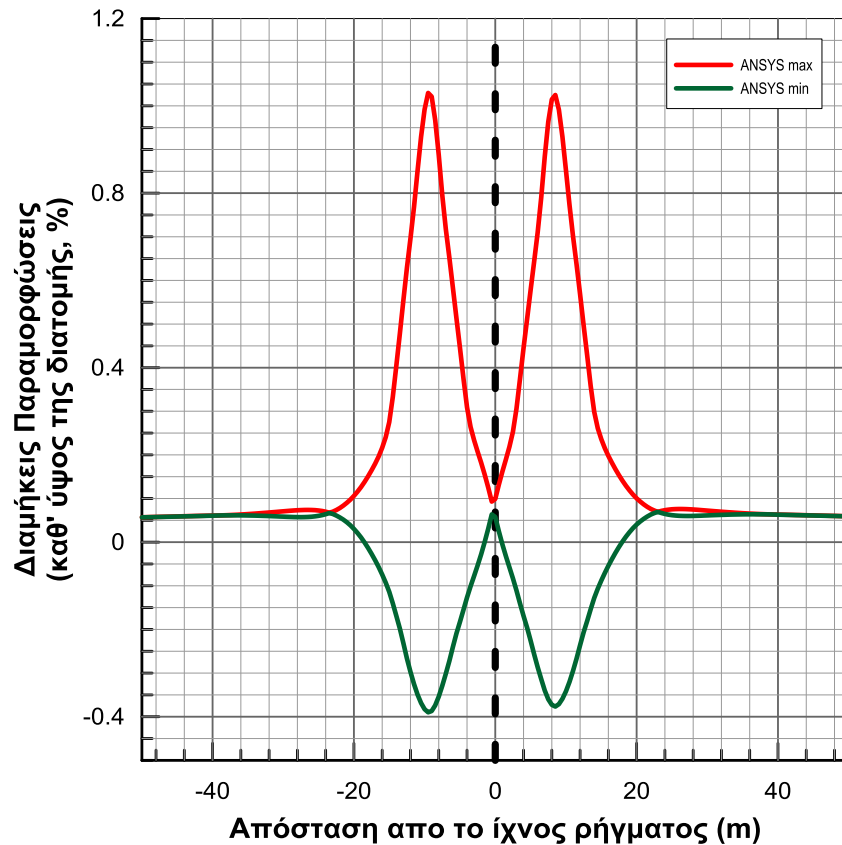
Figure 3.6: Shear forces along the pipeline.



Σχήμα 3.7: Κατανομή των καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού

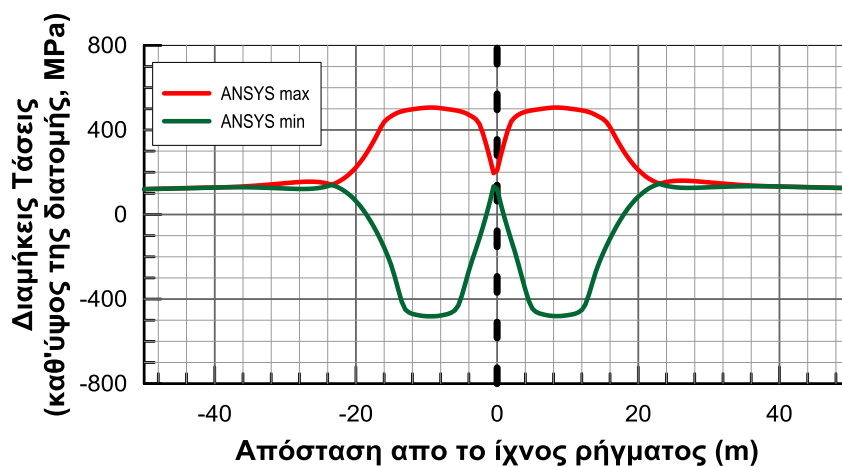
Figure 3.7: Moments along the pipeline.

Τέλος στα Σχήματα 3.8 και 3.9 απεικονίζεται η κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών παραμορφώσεων και τάσεων αντίστοιχα, που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού.



Σχήμα 3.8: Κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

Figure 3.8: Maximum and minimum developed axial strains along the pipeline.

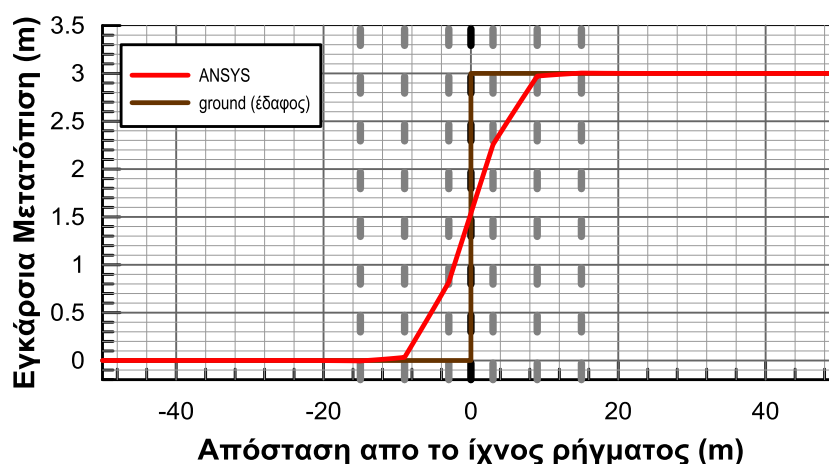


Σχήμα 3.9: Κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

Figure 3.9: Maximum and minimum developed axial stresses along the pipeline.

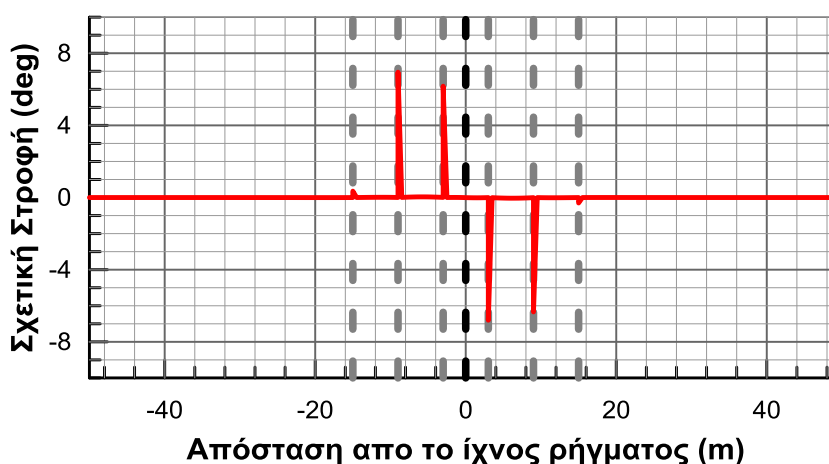
3.3.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων τυπικής ανάλυσης αγωγού με εύκαμπτους κόμβους

Όπως προαναφέρθηκε, η ανάλυση αυτή αφορά αγωγό με 6 εύκαμπτους κόμβους τοποθετημένους ανά 6m στην περιοχή γύρω από το ρήγμα, το οποίο διασταυρώνεται με τον αγωγό μεταξύ του 3^{ου} και 4^{ου} κόμβου. Στα Σχήματα 3.10 και 3.11 απεικονίζεται η μεταβολή κατά μήκος των μετατοπίσεων κατά την εγκάρσια οριζόντια διεύθυνση y και της στροφής του αγωγού γύρω από τον άξονα z αντίστοιχα. Σε όλα τα σχήματα που ακολουθούν σημειώνεται με μαύρη διακεκομμένη γραμμή η θέση στην οποία το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό, ενώ οι θέσεις των εύκαμπτων κόμβων σημειώνονται με τις γκρι διακεκομμένες γραμμές.



Σχήμα 3.10: Μετατοπίσεις του αγωγού κατά την εγκάρσια οριζόντια διεύθυνση

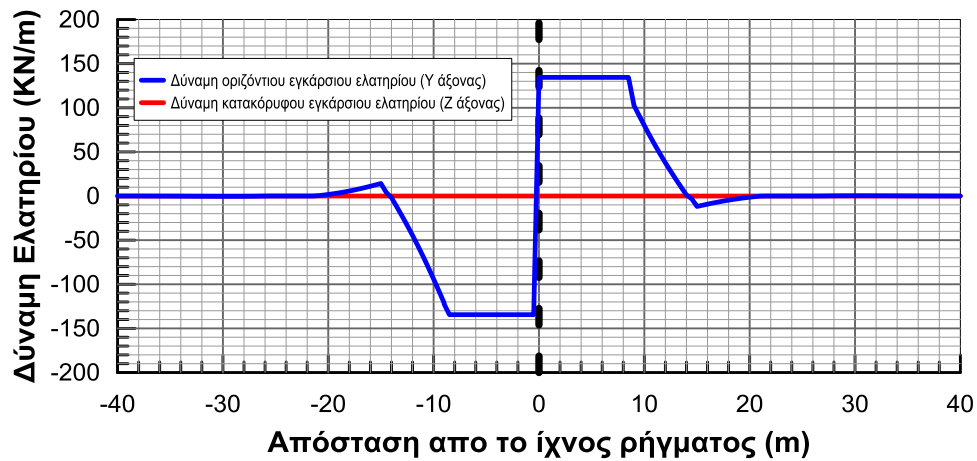
Figure 3.10: Vertical displacements along the pipeline.



Σχήμα 3.11: Σχετική στροφή του αγωγού γύρω από τον άξονα z .

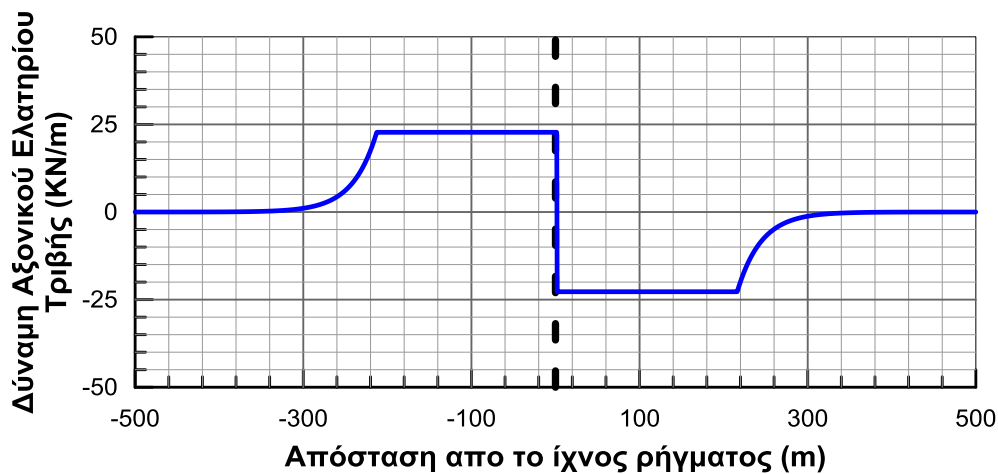
Figure 3.11: Relative turn of the pipeline around the z axis.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων των εγκάρσιων ελατηρίων (οριζόντιων και κατακόρυφων) καθώς και των αξονικών ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού στα Σχήματα 3.12 και 3.13 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.12: Κατανομή των δυνάμεων των εγκάρσιων ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού

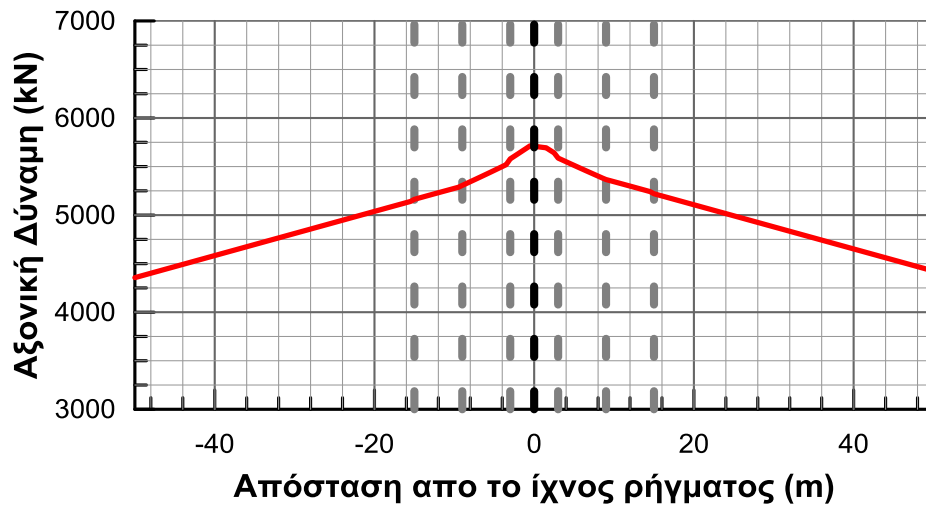
Figure 3.12: Vertical spring forces along the pipeline.



Σχήμα 3.13: Κατανομή των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού

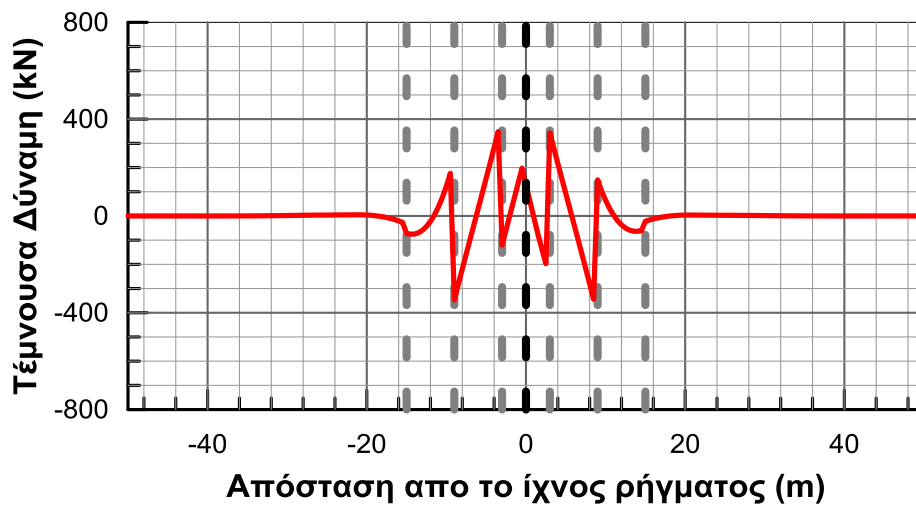
Figure 3.13: Axial spring forces along the pipeline.

Στα Σχήματα 3.14, 3.15 και 3.16 που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των κατανομών των αξονικών δυνάμεων, των τεμνουσών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού αντίστοιχα.



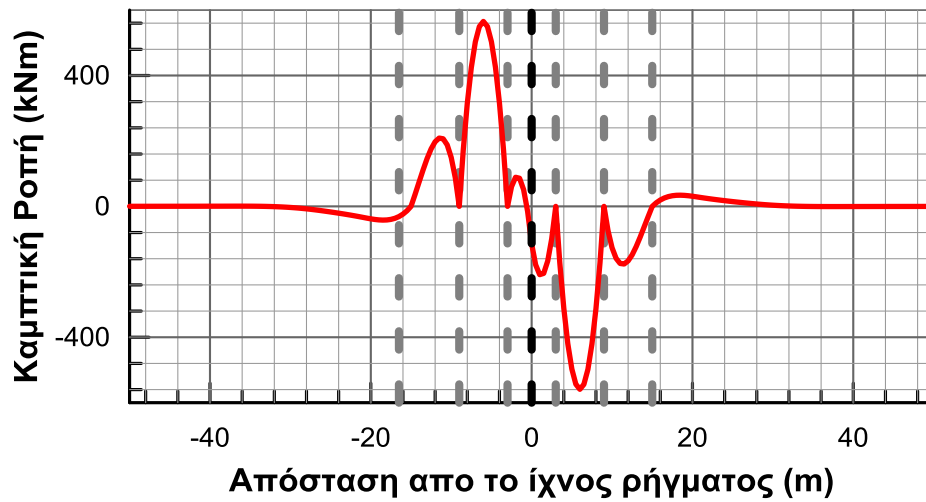
Σχήμα 3.14: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού

Figure 3.14: Axial forces along the pipeline.



Σχήμα 3.15: Κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού

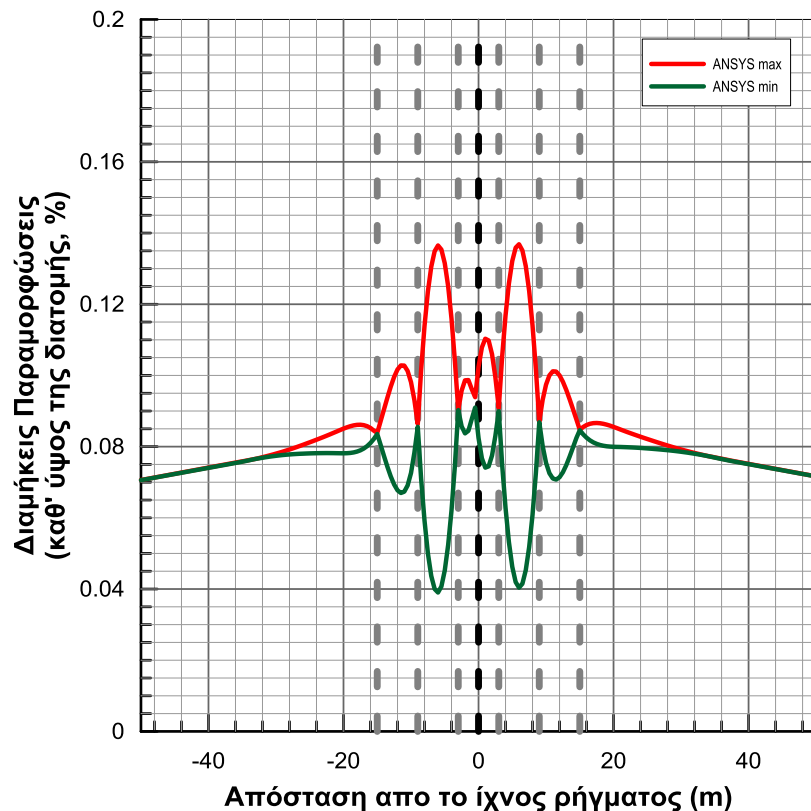
Figure 3.15: Shear forces along the pipeline.



Σχήμα 3.16: Κατανομή των καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού

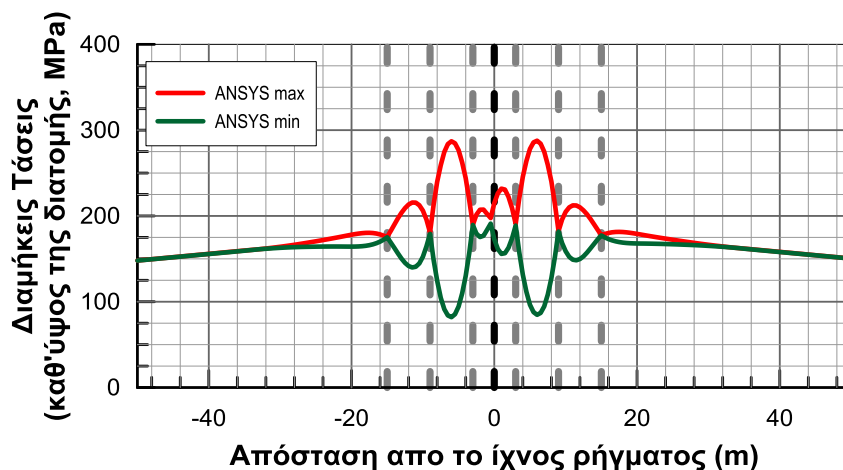
Figure 3.16: Moments along the pipeline.

Τέλος στα Σχήματα 3.17 και 3.18 απεικονίζεται η κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών παραμορφώσεων και τάσεων αντίστοιχα, που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού.



Σχήμα 3.17: Κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

Figure 3.17: Maximum and minimum developed axial strains along the pipeline.



Σχήμα 3.18: Κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγό

Figure 3.18: Maximum and minimum developed axial stresses along the pipeline.

Τα λεπτομερή αποτελέσματα για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τους αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους παρουσιάζονται υπό μορφή συγκεντρωτικών διαγραμμάτων στο Παράρτημα Α.

Για κάθε ανάλυση παρουσιάζεται και συγκρίνεται η μεταβολή κατά μήκος του αγωγού των ακόλουθων μεγεθών:

- αξονική δύναμη
- τέμνουσα δύναμη
- καμπτική ροπή
- μετατόπιση και σχετική στροφή
- μέγιστες και ελάχιστες τάσεις
- μέγιστες και ελάχιστες παραμορφώσεις

Στην επόμενη παράγραφο γίνεται μία συνολική αποτίμηση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθόδου σχεδιασμού.

3.3.4 Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Προτεινόμενης Μεθόδου Σχεδιασμού

Από τα σχήματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο γίνεται φανερό ότι η προτεινόμενη μέθοδος σχεδιασμού με χρήση εύκαμπτων κόμβων μπορεί να απομειώσει σοβαρά τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό λόγω μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων.

Προκειμένου να γίνει μία εποπτική σύγκριση της ευεργετικής επιρροής των εύκαμπτων κόμβων, στον πίνακα που ακολουθεί συγκρίνονται οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό για την περίπτωση του συνεχή αγωγού και του αγωγού με εύκαμπτους κόμβους, αναλόγως της μετατόπισης του ρήγματος και της απόστασης μεταξύ διαδοχικών κόμβων. Σε κάθε περίπτωση παρουσιάζονται οι μέγιστες παραμορφώσεις (δυσμενέστερη περίπτωση) μεταξύ των διατάξεων που το ρήγμα πέφτει ακριβώς πάνω σε κάποιο εύκαμπτο κόμβο ή ανάμεσα σε δύο, ενώ οι τιμές εξήχθησαν από τις ακριβέστερες αριθμητικές αναλύσεις.

Πίνακας 3.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων για το βασικό μέγεθος σχεδιασμού με και χωρίς τη χρήση εύκαμπτων κόμβων.

Γωνία β (°)	Μετακίνηση ρήγματος (m)	Συνε- χής	Κόμβοι ανά 6μ	Κόμβοι ανά 8μ	Κόμβοι ανά 12μ	Συνε- χής	Κόμβοι ανά 6μ	Κόμβοι ανά 8μ	Κόμβοι ανά 12μ
		ε _{max} (%)	ε _{max} (%)	ε _{max} (%)	ε _{max} (%)	ε _{min} (%)	ε _{min} (%)	ε _{min} (%)	ε _{min} (%)
30	0.75	0,360	0,162	0,172	0,196	0,021	0,129	0,030	0,094
30	1.50	0,121	0,457	0,633	0,490	0,790	0,145	0,116	0,141
30	3.00	2,472	2,333	2,321	2,307	0,435	1,250	1,257	0,402
60	0.75	0,402	0,140	0,191	0,167	-0,074	0,080	0,030	0,058
60	1.50	0,782	0,212	0,275	0,879	-0,029	0,112	0,073	0,174
60	3.00	0,919	0,791	0,875	0,863	0,195	0,183	0,172	0,166
90	0.75	0,254	0,049	0,113	-	-0,208	0,015	-0,067	-
90	1.50	0,578	0,103	0,134	0,236	-0,342	0,000	-0,045	-0,154
90	3.00	1,030	0,139	0,172	0,281	-0,390	0,037	0,000	-0,112

Από τις τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα γίνεται φανερό ότι ο σχεδιασμός με εύκαμπτους κόμβους μπορεί να μειώσει τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό έως και 86.5%, όταν διασταυρώνεται κάθετα με το ρήγμα ($\beta=90^\circ$), έως και 72.9%, όταν διασταυρώνεται με το ρήγμα με μεγάλη γωνία ($\beta \geq 60^\circ$), ενώ η επιρροή τους είναι ουσιαστικά μηδαμινή όταν διασταυρώνεται με το ρήγμα με μικρές γωνίες ($\beta < 45^\circ$), οπότε και οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις οφείλονται κατά κύριο λόγο στις αξονικές τάσεις λόγω εφελκυσμού του αγωγού από το ρήγμα.

Κατά συνέπεια η προτεινόμενη εναλλακτική μέθοδος σχεδιασμού μπορεί να αξιοποιηθεί για την ενίσχυση υπόγειων αγωγών σε περιπτώσεις μεγάλων εδαφικών μετατοπίσεων λόγω της διάρρηξης οριζόντιων ρηγμάτων. Η συγκριτική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας και του κόστους αυτής της μεθοδολογίας έναντι των συμβατικών/παραδοσιακών μεθόδων σχεδιασμού, θα ακολουθήσει στο πέμπτο κεφάλαιο. Πάρα ταύτα, από τα διαγράμματα και τον πίνακα που προηγήθηκαν, προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι για να είναι αποτελεσματική η προτεινόμενη μέθοδος σχεδιασμού και να μειώσει αισθητά τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό, ο αγωγός θα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να διέρχεται το κατά δύναμη κάθετα ως προς το ίχνος του ρήγματος ($\beta \rightarrow 90^\circ$).

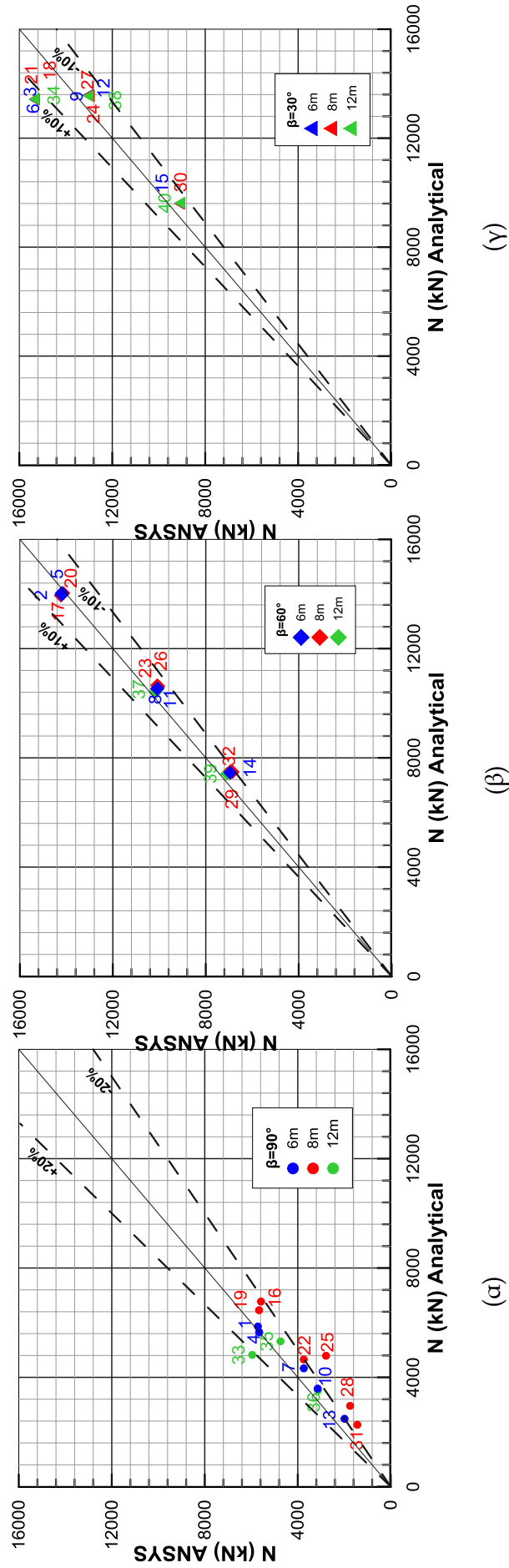
3.3.5 Εκτίμηση Εύρους Εφαρμογής Προτεινόμενων Μεθοδολογιών Σχεδιασμού (Αναλυτικής και Αριθμητικής)

Όπως είναι αναμενόμενο, η αριθμητική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της Ερευνητικής Εργασίας 8, έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει με μεγάλη ακρίβεια το εξεταζόμενο πρόβλημα και για αυτό θεωρείται ότι έχει ευρύτατο εύρος εφαρμογής. Ταυτόχρονα μπορεί να αποτελέσει βάση για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας και του εύρους εφαρμογής της αναλυτικής μεθοδολογίας, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματά της ως δεξαμενή αριθμητικών πειραμάτων με τα οποία θα συγκριθεί η αναλυτική.

Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση κατασκευάστηκαν διαγράμματα «1 προς 1» των αποτελεσμάτων των αριθμητικών και αναλυτικών επιλύσεων για κάθε μία από τις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 3.1, τα οποία αφορούν τα βασικά μεγέθη που ενδιαφέρουν τον σχεδιασμό ενός αγωγού, δηλαδή για τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη, τις αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις καθώς και τη στροφή στους κόμβους. Σκοπός είναι να επαληθευτεί η ικανότητα της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας να προβλέπει επαρκώς τα κρίσιμα μεγέθη σχεδιασμού, έτσι ώστε στο μέλλον να μπορεί να γίνει αδρή εκτίμηση της ευεργετικής συνεισφοράς των κόμβων από το αναλυτικό μοντέλο, χωρίς την πραγματοποίηση σύνθετων αριθμητικών αναλύσεων. Κάθε σημείο στα διαγράμματα συνοδεύεται από έναν αριθμό, ο οποίος αντιστοιχεί στον αριθμό της ανάλυσης του Πίνακα 3.1.

Στο Σχήμα 3.19 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» της μέγιστης αξονικής δύναμης που αναπτύσσεται στον αγωγό, για τις περιπτώσεις διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό στις (α)90°, (β)60° και (γ)30°. Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι η αξονική δύναμη προσεγγίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια, με τη διακύμανση να φτάνει μέχρι $\pm 10\%$ για γωνίες διασταύρωσης 60° και 30° και $\pm 20\%$ για γωνία διασταύρωσης 90°. Η αξονική υπολογίζεται αθροιστικά από την επιμήκυνση λόγω της συνιστώσας Δx του ρήγματος και από την επιμήκυνση λόγω της καμπύλωσης του αγωγού, η οποία όμως υπολογίζεται προσεγγιστικά με βάση τις γωνίες στροφής στους κόμβους. Το ελαφρώς αυξημένο ποσοστό σφάλματος στην περίπτωση των 90° οφείλεται στην απουσία του πρώτου όρου στον υπολογισμό της αξονικής, εφόσον η συνιστώσα Δx του ρήγματος είναι μηδενική, και κατά συνέπεια το ίδιο σφάλμα σε απόλυτη τιμή, οδηγεί σε αυξημένα σχετικά σφάλματα.

Η σωστή εκτίμηση της αξονικής δύναμης έχει ιδιαίτερη σημασία για το σωστό υπολογισμό των υπόλοιπων μεγεθών. Όταν η αναπτυσσόμενη τάση στη διατομή ξεπεράσει το όριο διαρροής σ_1 και η διατομή του αγωγού μπει στην πλαστική περιοχή, μικρές διαφοροποιήσεις στον υπολογισμό των τάσεων, οδηγούν σε μεγάλες διακυμάνσεις στις παραμορφώσεις, οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζουν το E_{cur} και κατά συνέπεια τις εκτιμώμενες καμπτικές ροπές και τέμνουσες δυνάμεις. Πιο συγκεκριμένα, αν υπερτιμηθεί ελαφρά η τάση αλλά ο αγωγός είναι στην πλαστική περιοχή, η μικρή υπερτίμηση οδηγεί σε δυσανάλογα μεγάλη υπερτίμηση της παραμόρφωσης με αποτέλεσμα να υποεκτιμάται η καμπτική ροπή και η τέμνουσα δύναμη (και το αντίστροφο). Το εν λόγω συμπέρασμα μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση των υπόλοιπων αποκλίσεων στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Σχήμα 3.19: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της αξονικής δύναμης για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις (α) 90° , (β) 60° , (γ) 30°

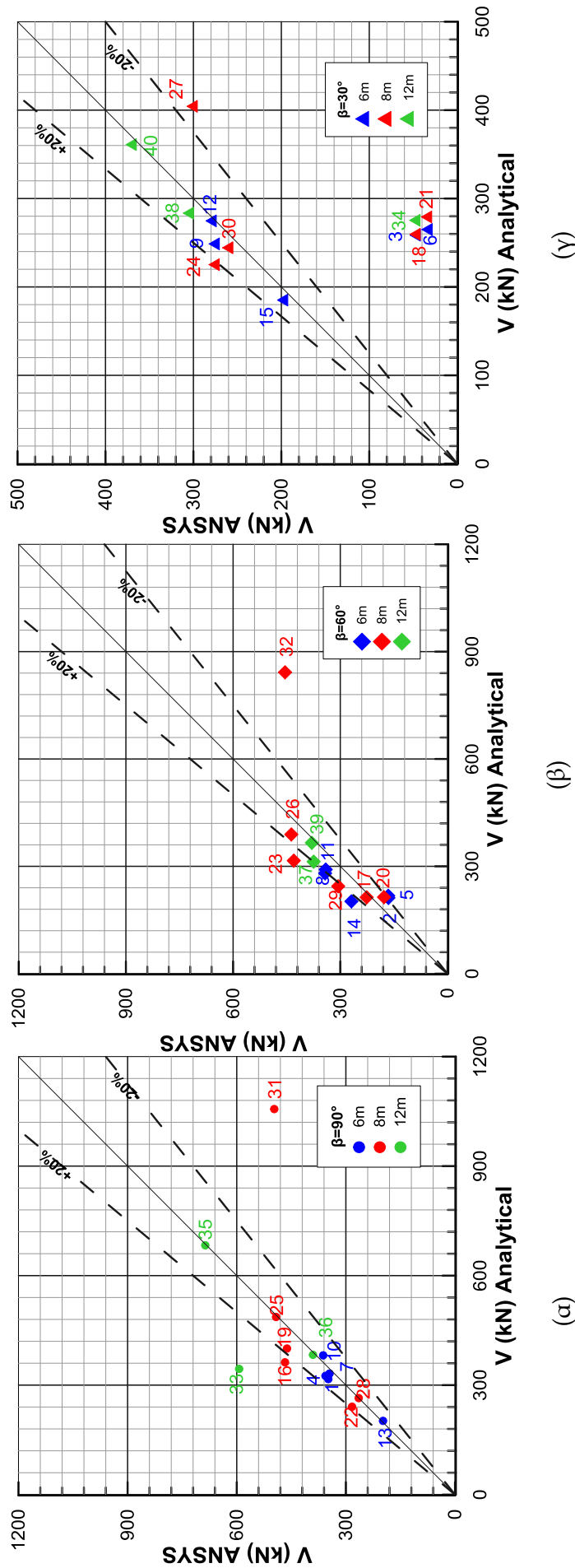
Figure 3.19: 1-1 comparison between the maximum developed axial forces for fault crossing angle equal to (a) 90° , (b) 60° , (c) 30° .

Στα Σχήματα 3.20 και 3.21 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» της τέμνουσας δύναμης και της καμπτικής ροπής για την περίπτωση διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό στις (α)90°, (β)60°, (γ)30° όπως αυτή προέκυψε από τις αριθμητικές και αναλυτικές επιλύσεις.

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

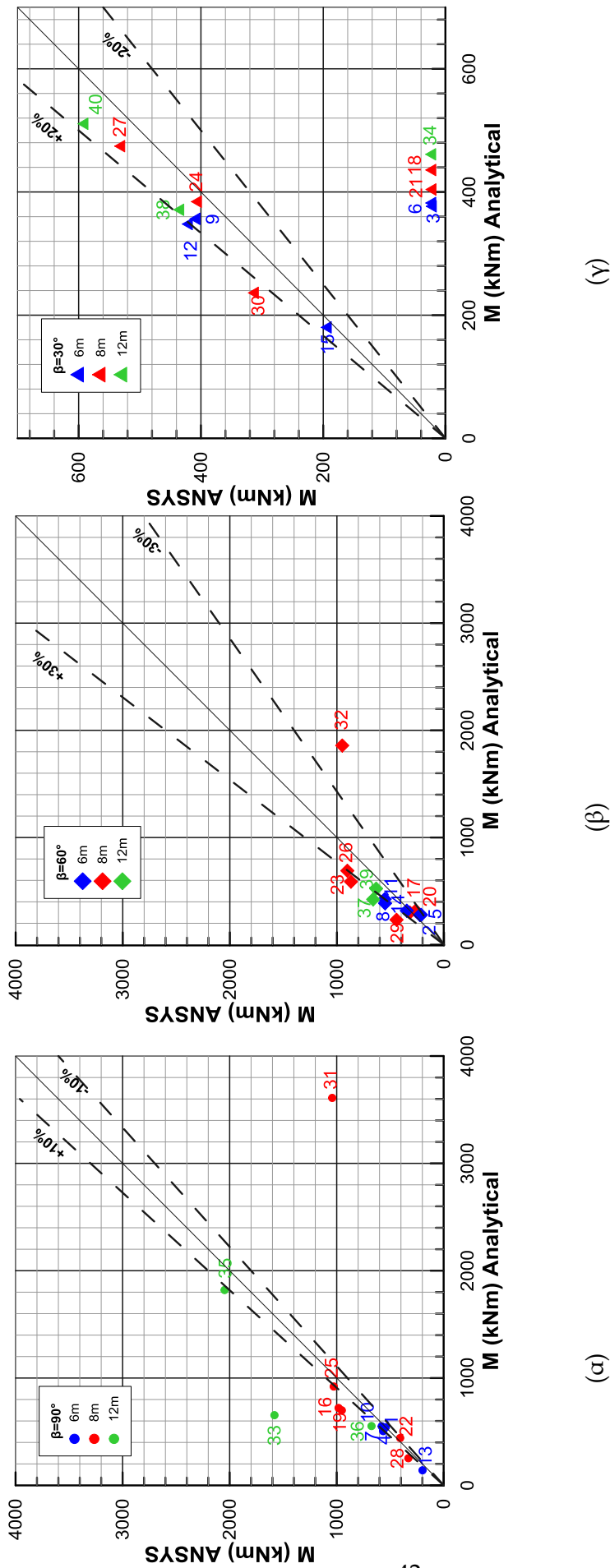
Επιπροσθέτως το σφάλμα στις προβλέψεις για τις αναλύσεις 31 και 32 (Σχήματα 3.20α/3.21α και 3.20β/3.21β αντίστοιχα) είναι μεγαλύτερο, επειδή η μετατόπιση που επιβάλλει το ρήγμα στον αγωγό είναι τόσο μικρή, που το σύνολο των μετακινήσεων πραγματοποιείται μεταξύ των δύο πλησιέστερων κόμβων στο ρήγμα, σε αντίθεση με τον παραμορφωμένο φορέα που θεωρείται στην αναλυτική μεθοδολογία (με ενεργοποίηση τουλάχιστον δύο κόμβοι από κάθε πλευρά).

Στο Σχήμα 3.22 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» της σχετικής στροφής, για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις (α)90°, (β)60°, (γ)30°. Η αναλυτική μεθοδολογία δίνει αποτελέσματα με σχετικό σφάλμα στο $\pm 20\%$, ενώ, και πάλι, οι όποιες διαφοροποιήσεις αφορούν είτε περιπτώσεις μικρών επιβαλλόμενων μετακινήσεων, είτε γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα 30°, περιπτώσεις που έχει διαπιστωθεί ότι η μεθοδολογία δίνει αποκλίσεις.



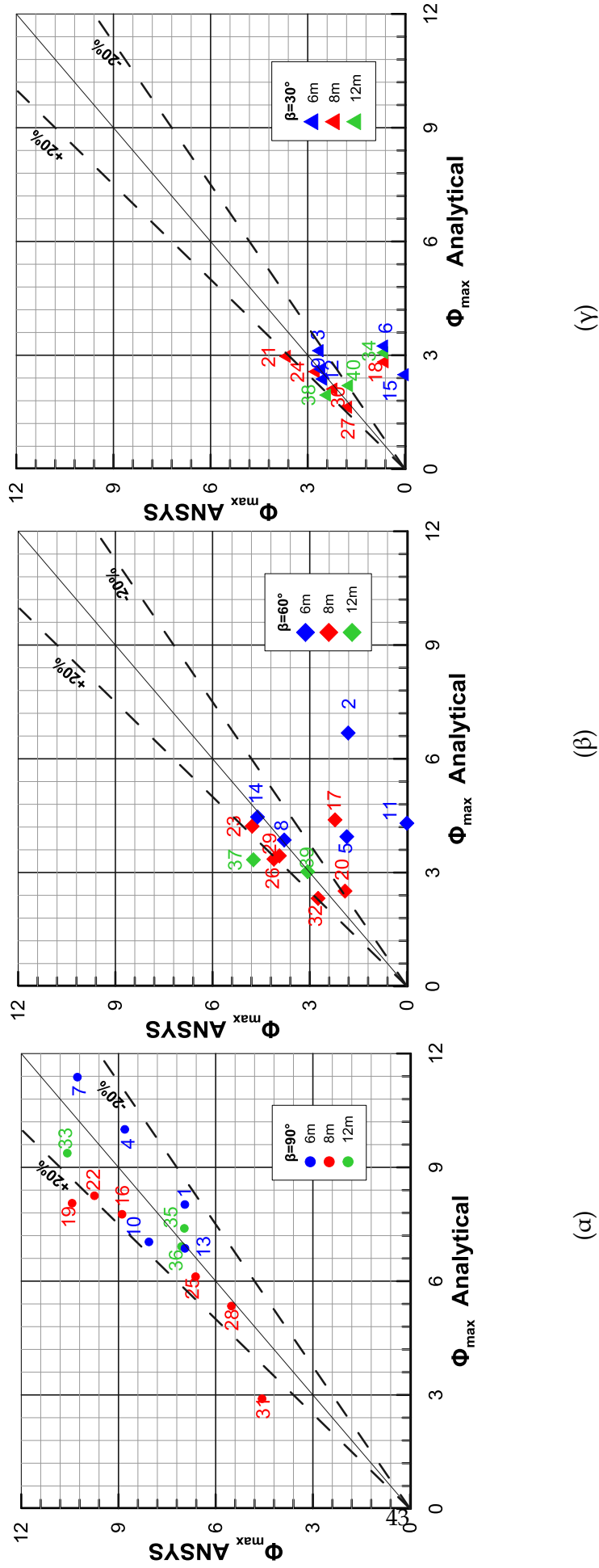
Σχήμα 3.20: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της τέμνουσας δύναμης για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις (α) 90° , (β) 60° , (γ) 30°

Figure 3.20: 1-1 comparison between the maximum developed shear forces for fault crossing angle equal to (a) 90° , (b) 60° , (c) 30° .



Σχήμα 3.21: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της ροπής για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις (α) 90°, (β) 60°, (γ) 30°

Figure 3.21: 1-1 comparison between the maximum developed moments for fault crossing angle equal to (a)90°, (b)60°, (c) 30°.



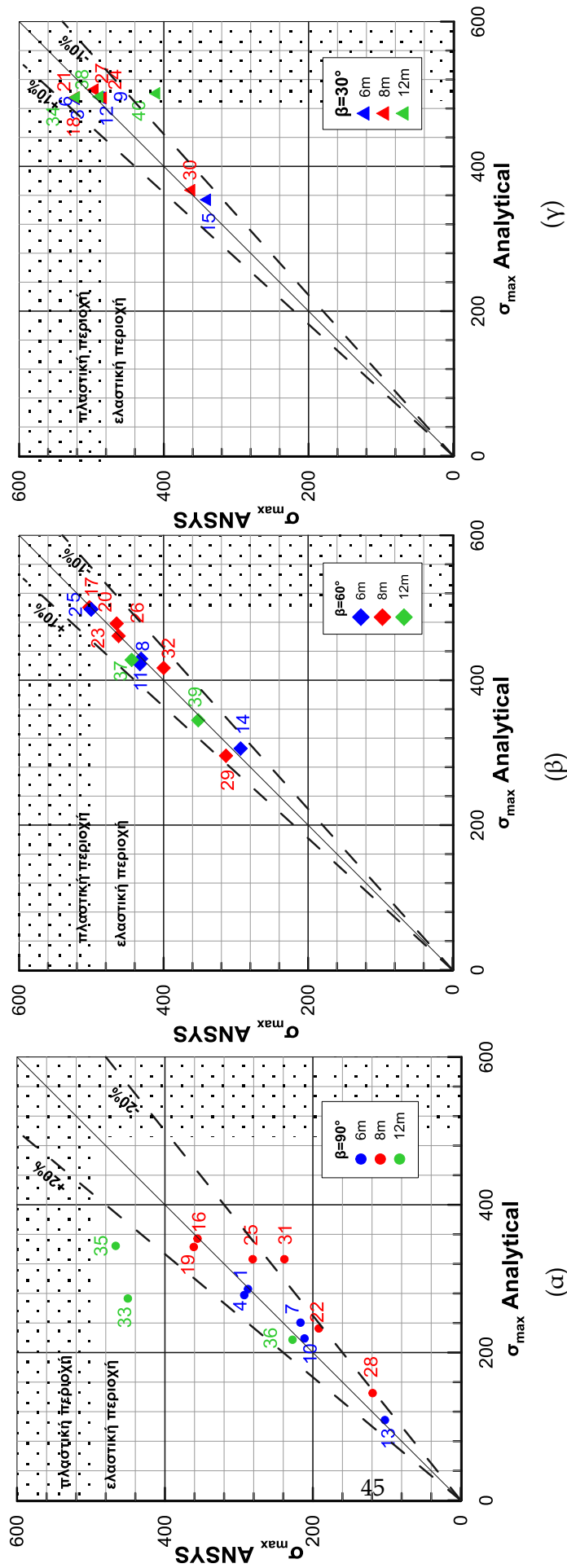
Σχήμα 3.22: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της στροφής στους εύκαμπτους κόμβους για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις (α) 90° , (β) 60° , (γ) 30°

Figure 3.22: 1-1 comparison between the maximum developed flexible joint turn for fault crossing angle equal to (a) 90° , (b) 60° , (c) 30° .

Στα Σχήματα 3.23 έως 3.26 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» για την εκτίμηση των μέγιστων και ελάχιστων αναπτυσσόμενων τάσεων και παραμορφώσεων, για τις τρεις γωνίες διασταύρωσης που εξετάστηκαν. Στα Σχήματα 3.23 και 3.24 έχει σκιαγραφηθεί η περιοχή πάνω από τη τάση διαρροής του αγωγού, ενώ αντίστοιχα στα Σχήματα 3.25 και 3.26 έχει σκιαγραφηθεί η περιοχή πάνω από το όριο του 0.50%, το οποίο κρίνεται ως επικίνδυνο για περιπτώσεις αγωγών με συγκολλήσεις.

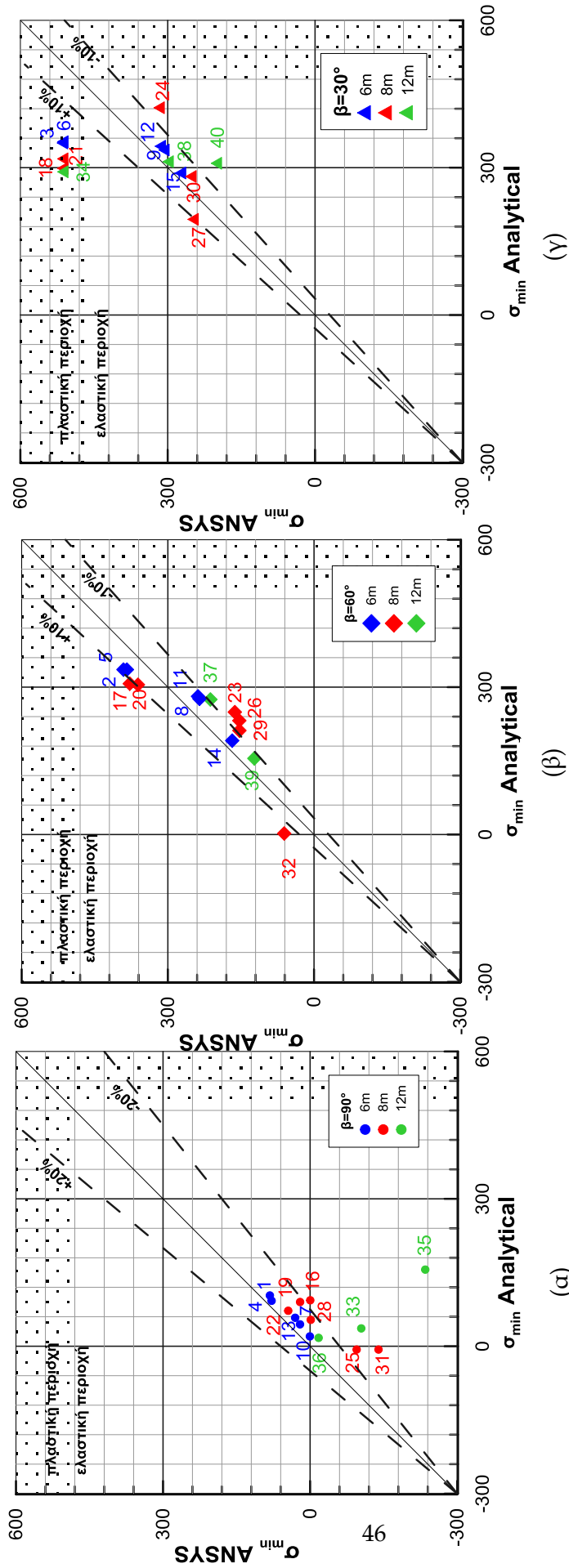
Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι το σχετικό σφάλμα της αναλυτικής μεθοδολογίας συγκριτικά με τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου είναι έως και $\pm 20\%$, για τη μεγάλη πλειοψηφία των συγκρίσεων για τις τάσεις, με μοναδικές αποκλίσεις κάποιες περιπτώσεις μικρών επιβαλλόμενων μετατοπίσεων, στις οποίες όπως έχει προαναφερθεί δεν προσεγγίζεται σωστά ο παραμορφωμένος φορέας του αγωγού.

Αντίστοιχα, το σχετικό σφάλμα για τις παραμορφώσεις έχει διακύμανση μέχρι $\pm 30\%$ για τη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων που εξετάστηκαν. Η συγκριτική αξιολόγηση των τάσεων και των παραμορφώσεων καταδεικνύει το συμπέρασμα που προαναφέρθηκε ότι, όταν ο αγωγός είναι στην πλαστική περιοχή λόγω των αξονικών δυνάμεων, μικρές διαφοροποιήσεις στην εκτίμηση των τάσεων (π.χ. αναλύσεις 3, 6, 18, 21, 34) έως και $+20\%$ μπορεί να οδηγήσει σε τεράστιες διαφοροποιήσεις στις εκτιμώμενες παραμορφώσεις ($>200\%$).



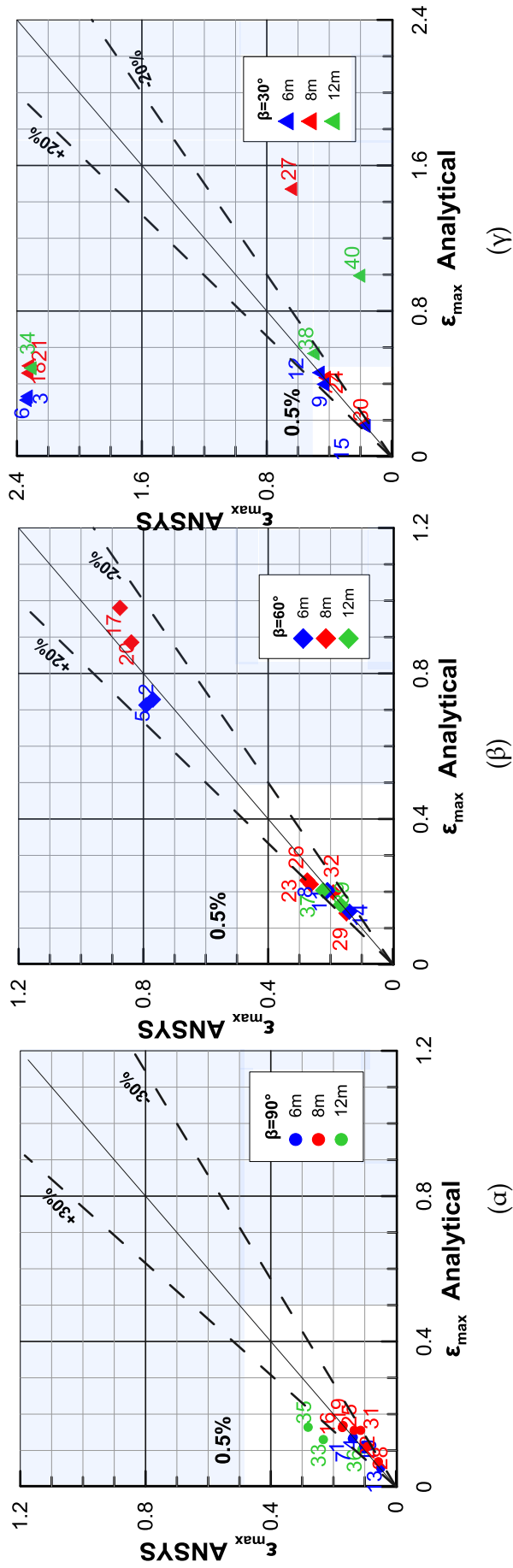
Σχήμα 3.23: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της αξονικής τάσης στον αγωγό για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις (α) 90° , (β) 60° , (γ) 30° .

Figure 3.23: 1-1 comparison between the maximum developed axial stresses for fault crossing angle equal to (a) 90° , (b) 60° , (c) 30° .



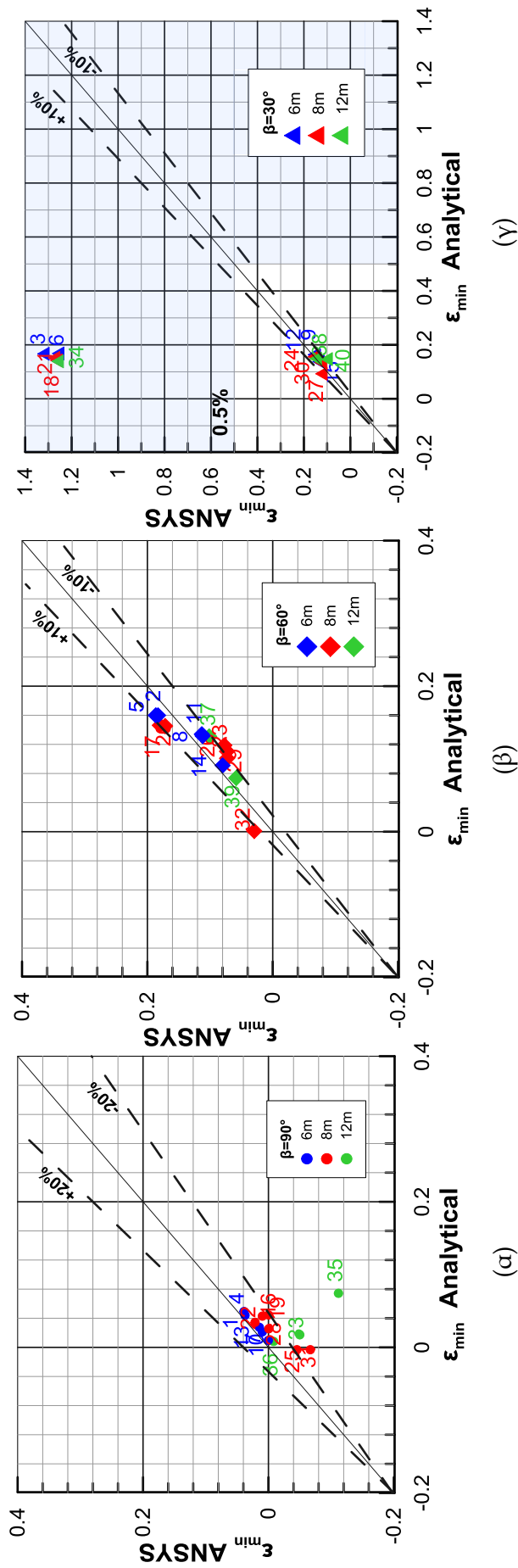
Σχήμα 3.24: Σύγκριση 1-1 για τις ελάχιστες τιμές της αξονικής τάσης στον αγωγό για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις (α) 90° , (β) 60° , (γ) 30°

Figure 3.24: 1-1 comparison between the minimum developed axial stresses for fault crossing angle equal to (a) 90° , (b) 60° , (c) 30° .



Σχήμα 3.25: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της αξονικής παραμόρφωσης για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις (α) 90°, (β) 60°, (γ) 30°

Figure 3.25: 1-1 comparison between the maximum developed axial strains for fault crossing angle equal to (a) 90°, (b) 60°, (c) 30°.



Σχήμα 3.26: Σύγκριση 1-1 για τις ελάχιστες τιμές της αξονικής παραμόρφωσης για διασταύρωση του ρήγματος με τον αγωγό στις (α) 90° , (β) 60° , (γ) 30°

Figure 3.26: 1-1 comparison between the minimum developed axial strains for fault crossing angle equal to (a) 90° , (b) 60° , (c) 30° .

3.4 Αξιολόγηση – Εύρος εφαρμογής μεθοδολογίας

Η ύπαρξη εύκαμπτων κόμβων στην ευρύτερη περιοχή που επηρεάζει η διάρρηξη του ρήγματος, διαφοροποιεί αισθητά τη συμπεριφορά του αγωγού συγκριτικά με αυτή του ευθύγραμμου συνεχούς αγωγού.

Πιο συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός με εύκαμπτους κόμβους μπορεί να μειώσει τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό έως και 86.5%, όταν διασταυρώνεται κάθετα με το ρήγμα ($\beta=90^\circ$), έως και 72.9%, όταν διασταυρώνεται με το ρήγμα με μεγάλη γωνία ($\beta\geq 60^\circ$), ενώ η επιρροή τους είναι ουσιαστικά μηδαμινή όταν διασταυρώνεται με το ρήγμα με μικρές γωνίες ($\beta<45^\circ$), οπότε και οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις οφείλονται κατά κύριο λόγο στις αξονικές τάσεις λόγω εφελκυσμού του αγωγού από το ρήγμα. Κατά συνέπεια η προτεινόμενη εναλλακτική μέθοδος σχεδιασμού μπορεί να αξιοποιηθεί για την ενίσχυση υπόγειων αγωγών σε περιπτώσεις μεγάλων εδαφικών μετατοπίσεων λόγω της διάρρηξης οριζόντιων ρηγμάτων, στο βαθμό που ο αγωγός σχεδιαστεί έτσι ώστε να διέρχεται το κατά δύναμη κάθετα ως προς το ίχνος του ρήγματος ($\beta\rightarrow 90^\circ$).

Από τις δύο προτεινόμενες μεθοδολογίας εκτίμησης της συμπεριφοράς του αγωγού με εύκαμπτους κόμβους, κρίνεται ότι η αριθμητική μεθοδολογία μπορεί με μεγάλη αξιοπιστία να αναπαραστήσει το φαινόμενο και να προβλέψει τη συμπεριφορά του αγωγού, ενώ από την εκτενή σύγκριση της αναλυτικής μεθοδολογίας με τις αριθμητικές αναλύσεις, κρίνεται ότι και η προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία προσεγγίζει ικανοποιητικά το μηχανισμό του φαινομένου και δίνει αξιόλογα αποτελέσματα για σχεδόν το σύνολο των περιπτώσεων που εξετάστηκαν. Επιπροσθέτως, μέσα από την εποπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών και αριθμητικών επιλύσεων και των σχετικών σφαλμάτων κάθε μεγέθους, καθορίστηκαν τα παρακάτω όρια εφαρμογής της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας:

- Εγκάρσια μετατόπιση ρήγματος μεγαλύτερη από δύο φορές τη διάμετρο του αγωγού ($D_r > 2D$)
- Γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα μεγαλύτερη ή ίση των 60° .

Διευκρινίζεται ότι τα προαναφερθέντα όρια δεν αποτελούν πρακτικό περιορισμό στην χρήση της αναλυτικής μεθοδολογίας, δεδομένου ότι η χρήση εύκαμπτων κόμβων μας ενδιαφέρει για περιπτώσεις μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων (>2.0-3.0 D), ενώ όταν ο αγωγός διασταυρώνεται με το ρήγμα υπό μικρή γωνία, η χρήση κόμβων δεν ενδείκνυται, εφόσον οι παραμορφώσεις στον αγωγό οφείλονται κατά κύριο λόγο από τις αξονικές μετατοπίσεις και η χρήση στροφικών κόμβων δεν απομειώνει ουσιαστικά τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις.

4

Κανονικά Ρήγματα: Συγκριτική Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

4.1 Γενικά

Σε αντιστοιχία με το προηγούμενο κεφάλαιο και προκειμένου να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου σχεδιασμού στην απομείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό λόγω της διάρρηξης ρηγμάτων ορθών ρηγμάτων, πραγματοποιήθηκαν εκτενείς παραμετρικές αναλύσεις και με τις δύο προτεινόμενες μεθοδολογίες (αριθμητική και αναλυτική). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρατίθενται αναλυτικά και σε σύγκριση μεταξύ τους προκειμένου να εκτιμηθεί το εύρος εφαρμογής της προτεινόμενης εναλλακτικής μεθόδου σχεδιασμού.

4.2 Παρουσίαση εκτελεσθέντων αναλύσεων

Για την εκτίμηση των ορίων της ευεργετικής επίδρασης των εύκαμπτων κόμβων στις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό λόγω της διάρρηξης ορθού ρήγματος, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 39 αριθμητικές αναλύσεις για αγωγό διαμέτρου 0.762m και πάχους τοιχώματος 12.5mm. Σε όλες τις περιπτώσεις τα προσομοιώματα είχαν έξι εύκαμπτους κόμβους, σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους, ενώ εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις για τη θέση του ρήγματος: (α) στη μέση μεταξύ δύο εύκαμπτων κόμβων (του 3ου και του 4^{ου}) και (β) στην άκρη, ακριβώς δίπλα σε έναν εύκαμπτο κόμβο (αμέσως μετά τον 3ο κόμβο).

Οι αναλύσεις χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες ανάλογα με το μέγεθος της απόστασης των εύκαμπτων κόμβων μεταξύ τους (6m, 8m ή 12m), ενώ πραγματοποιήθηκαν 10, 18 και 11 αναλύσεις για κάθε ομάδα αντίστοιχα. Πέρα από την απόσταση των κόμβων, οι υπόλοιπες παράμετροι που εξετάστηκαν στις αναλύσεις ήταν (α) η τιμή της γωνίας διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα ($\psi=60^\circ$, 75° και 90°) και (β) η μετακίνηση του ρήγματος (συνολική μετακίνηση ρήγματος ίση με 0.375m, 0.750m και 1.500m, ήτοι λόγος μετακίνησης/διάμετρος αγωγού $D_f/D=0.5$, 1 και 2).

Πίνακας 4.1: Βασικά χαρακτηριστικά των εκτελεσθέντων παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων για αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους

A/A	Απόσταση Κόμβων (m)	Θέση διασταύρωσης	Γωνία ψ ($^\circ$)	Μετακίνηση ρήγματος (m)	Δz (m)	Δx (m)
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΑΝΑ 6m						
1	6.0	Άκρη	60	1.500	1.300	0.750
2	6.0	Ανάμεσα	60	1.500	1.300	0.750
3	6.0	Άκρη	75	1.500	1.449	0.388
4	6.0	Ανάμεσα	75	1.500	1.449	0.388
5	6.0	Άκρη	90	1.500	1.500	0.000
6	6.0	Ανάμεσα	90	1.500	1.500	0.000
7	6.0	Άκρη	75	0.750	0.724	0.194
8	6.0	Ανάμεσα	75	0.750	0.724	0.194
9	6.0	Άκρη	75	0.375	0.362	0.097
10	6.0	Ανάμεσα	75	0.375	0.362	0.097
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΑΝΑ 8m						
11	8.0	Άκρη	60	1.500	1.300	0.750
12	8.0	Ανάμεσα	60	1.500	1.300	0.750
13	8.0	Άκρη	75	1.500	1.449	0.388
14	8.0	Ανάμεσα	75	1.500	1.449	0.388
15	8.0	Άκρη	90	1.500	1.500	0.000
16	8.0	Ανάμεσα	90	1.500	1.500	0.000
17	8.0	Άκρη	60	0.750	0.650	0.375
18	8.0	Ανάμεσα	60	0.750	0.650	0.375
19	8.0	Άκρη	75	0.750	0.724	0.194
20	8.0	Ανάμεσα	75	0.750	0.724	0.194
21	8.0	Άκρη	90	0.750	0.750	0.000
22	8.0	Ανάμεσα	90	0.750	0.750	0.000
23	8.0	Άκρη	60	0.375	0.325	0.188
24	8.0	Ανάμεσα	60	0.375	0.325	0.188
25	8.0	Άκρη	75	0.375	0.362	0.097
26	8.0	Ανάμεσα	75	0.375	0.362	0.097
27	8.0	Άκρη	90	0.375	0.375	0.000
28	8.0	Ανάμεσα	90	0.375	0.375	0.000
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΑΝΑ 12m						
29	12.0	Άκρη	60	1.500	1.300	0.750
30	12.0	Ανάμεσα	60	1.500	1.300	0.750
31	12.0	Άκρη	75	1.500	1.449	0.388
32	12.0	Ανάμεσα	75	1.500	1.449	0.388
33	12.0	Άκρη	90	1.500	1.500	0.000
34	12.0	Ανάμεσα	90	1.500	1.500	0.000
35	12.0	Άκρη	75	0.750	0.724	0.194
36	12.0	Ανάμεσα	75	0.750	0.724	0.194
37	12.0	Άκρη	90	0.375	0.375	0.000
38	12.0	Ανάμεσα	90	0.375	0.375	0.000
39	12.0	Ανάμεσα	75	0.375	0.362	0.097

Πρέπει να σημειωθεί ότι εφόσον η χρήση εύκαμπτων κόμβων προβλέπεται για περιπτώσεις μεγάλων μετακινήσεων, όπου οι συμβατικές μέθοδοι σχεδιασμού δεν επαρκούν, τα βασικά συμπεράσματα για τη μεθοδολογία θα εξαχθούν από τα αποτελέσματα για τις αυξημένες μετατοπίσεις ρήγματος (0.750m και 1.50m ήτοι 1 έως 2D), ενώ οι αναλύσεις για μετακίνηση ρήγματος ίση με 0.375m είχαν περισσότερο συμπληρωματικό χαρακτήρα. Επίσης, μεταξύ των δύο προτεινόμενων μεθόδων επίλυσης (αριθμητική και αναλυτική), η αριθμητική έχει μεγαλύτερες δυνατότητες προσομοίωσης και θεωρείται ότι τα αποτελέσματά της είναι περισσότερο ακριβή (αριθμητικά πειράματα), ενώ αντίθετα η αναλυτική μεθοδολογία είναι απλούστερη στον χειρισμό και το στήσιμο, αλλά έχει περισσότερο προσεγγιστικό χαρακτήρα λόγω των αναγκαίων παραδοχών. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά και οι τιμές των παραμέτρων της κάθε ανάλυσης συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.

Προκειμένου να μπορεί να συγκριθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας σχεδιασμού με τη χρήση εύκαμπτων κόμβων, πέρα από τις προαναφερόμενες αναλύσεις εκτελέστηκαν επιπλέον εννιά (9) αριθμητικές αναλύσεις, οι οποίες αφορούν συνεχή αγωγό χωρίς εύκαμπτο κόμβο, τα βασικά στοιχεία των οποίων στον Πίνακα 4.2. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα για τα κρίσιμα μεγέθη σχεδιασμού.

Πίνακας 4.2: Βασικά χαρακτηριστικά των εκτελεσθέντων παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων για συνεχή αγωγό και αποτελέσματα.

α/α	Γωνία ψ (°)	Μετακίνηση ρήγματος (m)	Δz (m)	Δx (m)	N (kN)	V (kN)	M (kNm)	ϵ_{\max} (%)	ϵ_{\min} (%)	σ_{\max} (kPa)	σ_{\min} (kPa)
N1	60	0.375	0.325	0.188	5129	446	1624	0.228	-0.059	447.4	-124.7
N2	60	0.750	0.650	0.375	7302	517	2002	0.498	-0.107	489.4	-223.4
N3	60	1.500	1.300	0.750	10363	481	1536	1.525	-0.114	513.7	-240.1
N4	75	0.375	0.362	0.097	3705	465	1779	0.215	-0.095	437.1	-200.9
N5	75	0.750	0.724	0.194	5330	555	2365	0.459	-0.161	486.9	-338.7
N6	75	1.500	1.449	0.388	7651	583	2342	1.442	-0.246	512.7	-456.1
N7	90	0.375	0.375	0.000	439	485	1902	0.169	-0.159	355.6	-334.0
N8	90	0.750	0.750	0.000	1219	605	2827	0.294	-0.249	469.8	-457.7
N9	90	1.500	1.500	0.000	2441	703	3351	1.096	-0.832	507.4	-501.7

4.3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών και αριθμητικών αναλύσεων

4.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων δύο τυπικών αριθμητικών αναλύσεων

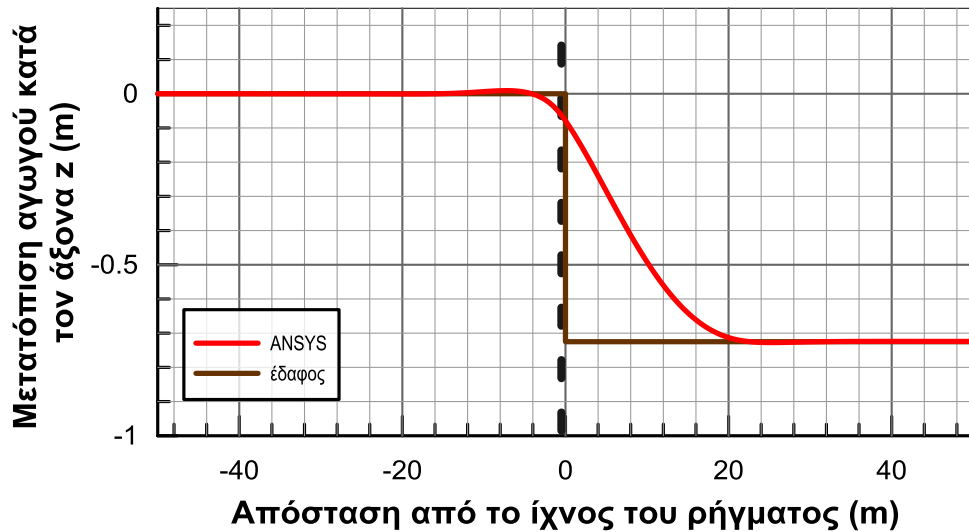
Πριν γίνει η εκτενής σύγκριση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών και αναλυτικών επιλύσεων για την εκτίμηση της ευεργετικής επιρροής της προτεινόμενης μεθόδου, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα δύο τυπικών ενδεικτικών αριθμητικών αναλύσεων, προκειμένου να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά του αγωγού με και χωρίς τη χρήση εύκαμπτων κόμβων. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι αριθμητικές αναλύσεις για τις περιπτώσεις:

- συνεχή αγωγού χωρίς εύκαμπτους κόμβους και
- αγωγού με έξι (6) εύκαμπτους κόμβους τοποθετημένους ανά 8m στην περιοχή γύρω από το ρήγμα. Το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό στη μέση μεταξύ του 3ου και 4ου κόμβου.

Και στις δύο περιπτώσεις πρόκειται για ένα αγωγό διαμέτρου $D=30''$, με πάχος τοιχώματος $t=12.5\text{mm}$ και ο οποίος διασταυρώνεται με το ίχνος του ρήγματος υπό γωνία $\psi=75^\circ$. Ο λόγος μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού είναι $Df/D=1$, δηλαδή η συνολική μετακίνηση του ρήγματος είναι ίση με 0.75m.

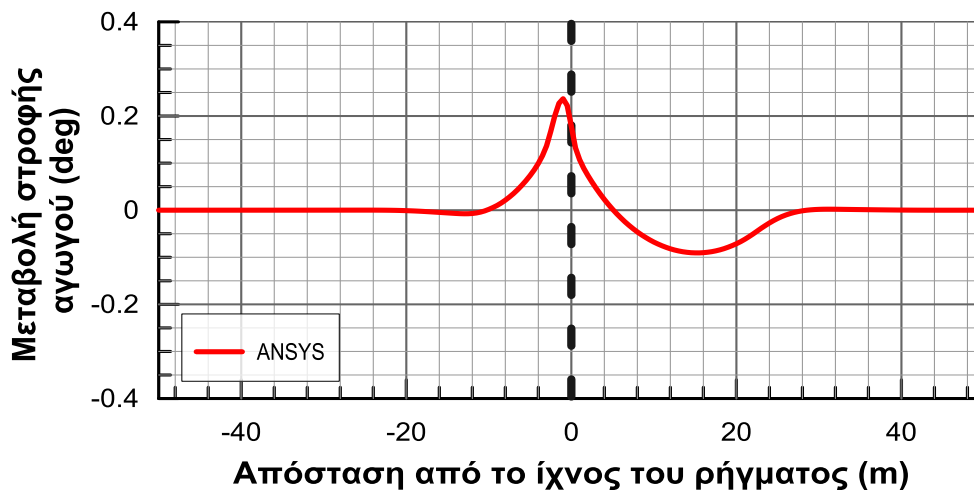
4.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων τυπικής ανάλυσης συνεχούς αγωγού

Στα Σχήματα 4.1 και 4.2 που ακολουθούν, παρουσιάζονται η μετακίνηση του αγωγού κατά την εγκάρσια οριζόντια διεύθυνση (άξονας z) και η στροφή του ως προς τον κατακόρυφο άξονα y, αντίστοιχα. Με καφέ γραμμή στο πρώτο σχήμα παρουσιάζεται η μετακίνηση του εδάφους, ενώ σε όλα τα σχήματα που ακολουθούν η θέση του ρήγματος παριστάνεται με διακεκομμένη μαύρη γραμμή.



Σχήμα 4.1: Μετατοπίσεις του αγωγού κατά την εγκάρσια κατακόρυφη διεύθυνση

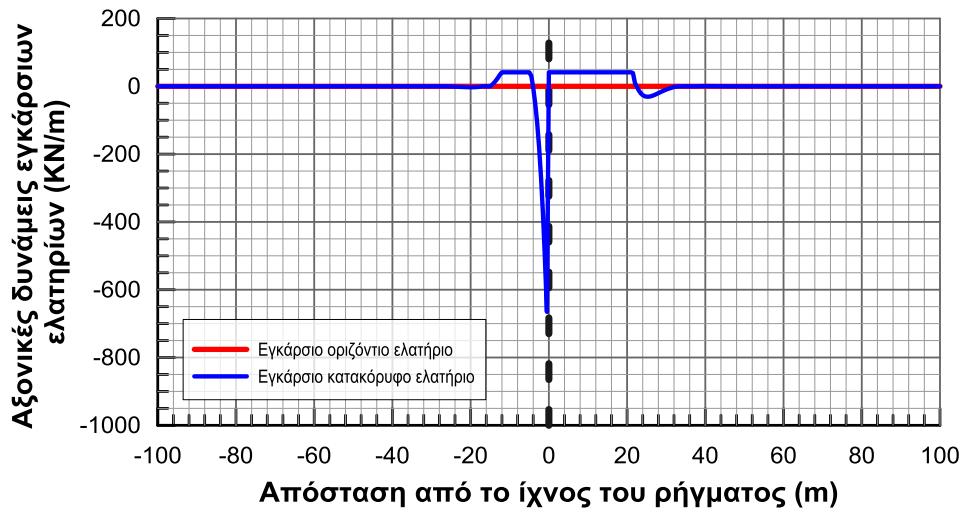
Figure 4.1: Vertical displacements along the pipeline.



Σχήμα 4.2: Σχετική στροφή του αγωγού γύρω από τον άξονα γ.

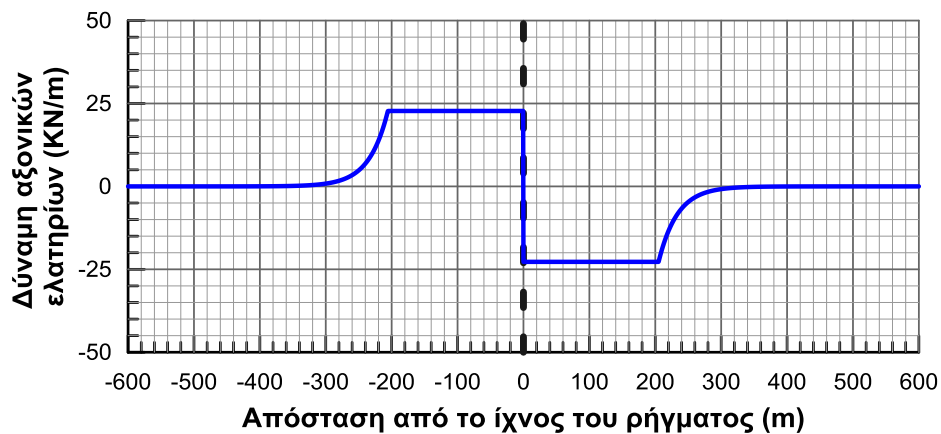
Figure 4.2: Relative turns along the pipeline.

Το μήκος καμπύλωσης του αγωγού, δηλαδή το μήκος στο οποίο ο αγωγός υφίσταται μεγάλες εγκάρσιες μετατοπίσεις και κατά συνέπεια καμπυλώνεται είναι περίπου 14m και 22m πριν και μετά το ρήγμα αντίστοιχα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων των εγκάρσιων ελατηρίων (οριζόντιων και κατακόρυφων) καθώς και των αξονικών ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού στα Σχήματα 4.3 και 4.4 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.3: Κατανομή των δυνάμεων των εγκάρσιων ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού

Figure 4.3: Vertical spring forces along the pipeline.

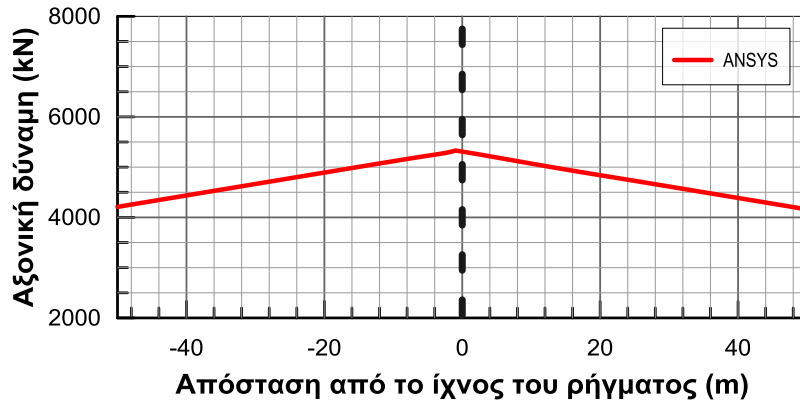


Σχήμα 4.4: Κατανομή των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού

Figure 4.4: Axial spring forces along the pipeline.

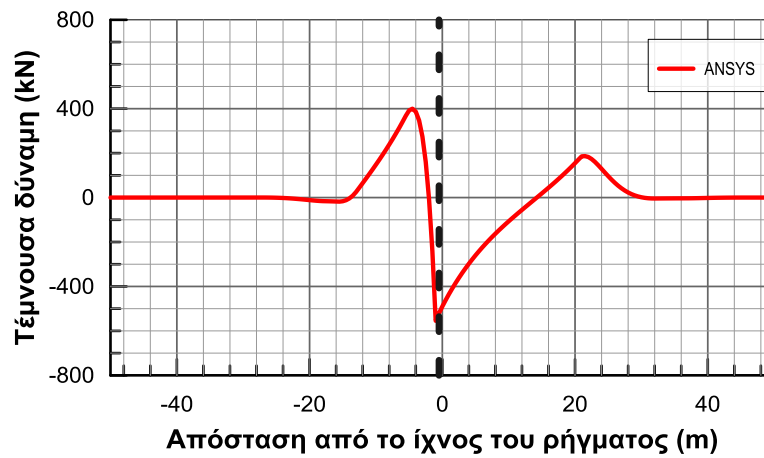
Από το Σχήμα 4.4 παρατηρείται ότι το μήκος αγκύρωσης του αγωγού, δηλαδή το μήκος μέσα στο οποίο αναπτύσσονται αξονικές τάσεις λόγω της διάρρηξης του ρήγματος οι οποίες παραλαμβάνονται από την τριβή είναι περίπου 320m εκατέρωθεν του ρήγματος.

Στα Σχήματα 4.5, 4.6 και 4.7 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα διαγράμματα των κατανομών των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στον αγωγό, και πιο συγκεκριμένα της αξονικής δύναμης, της τέμνουσας δύναμης και της καμπτικής ροπής αντίστοιχα.



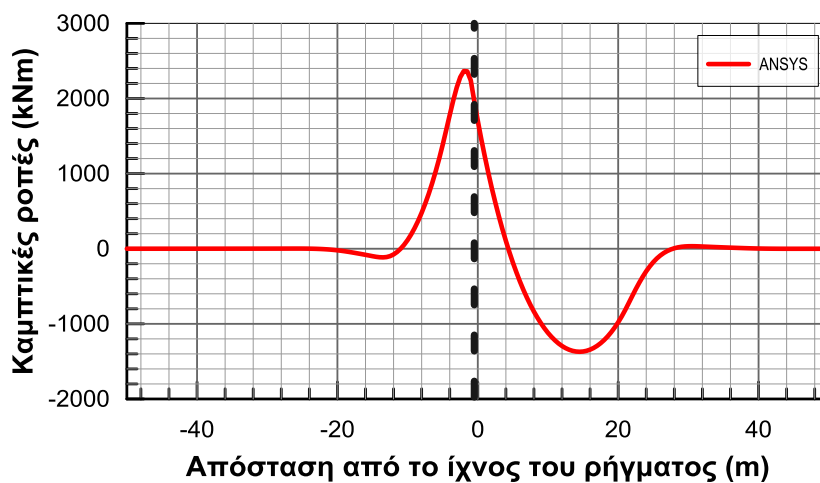
Σχήμα 4.5: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού

Figure 4.5: Axial forces along the pipeline.



Σχήμα 4.6: Κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού

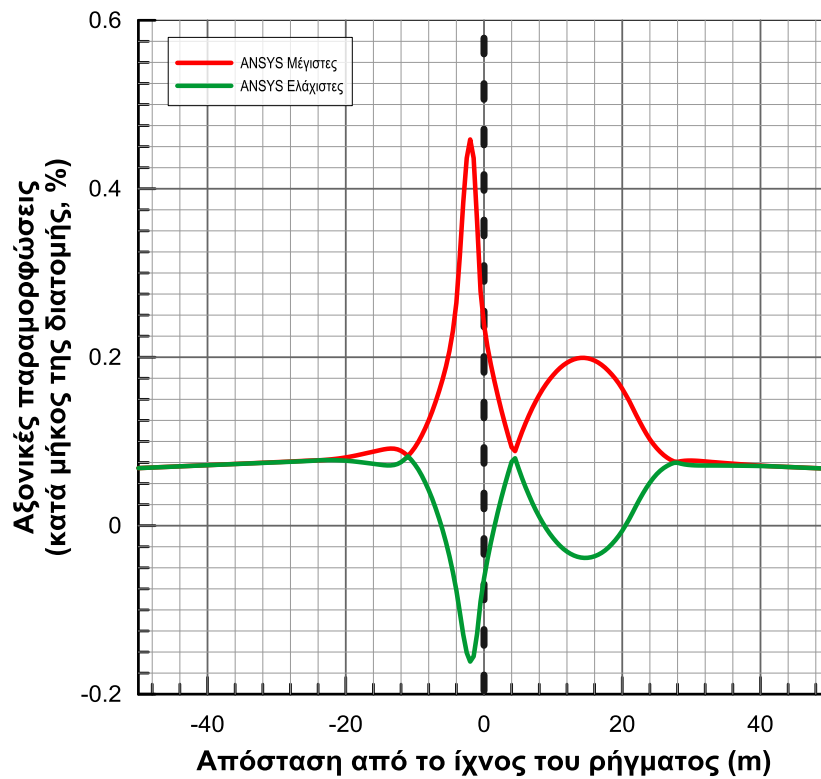
Figure 4.6: Shear forces along the pipeline.



Σχήμα 4.7: Κατανομή των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται στον αγωγό

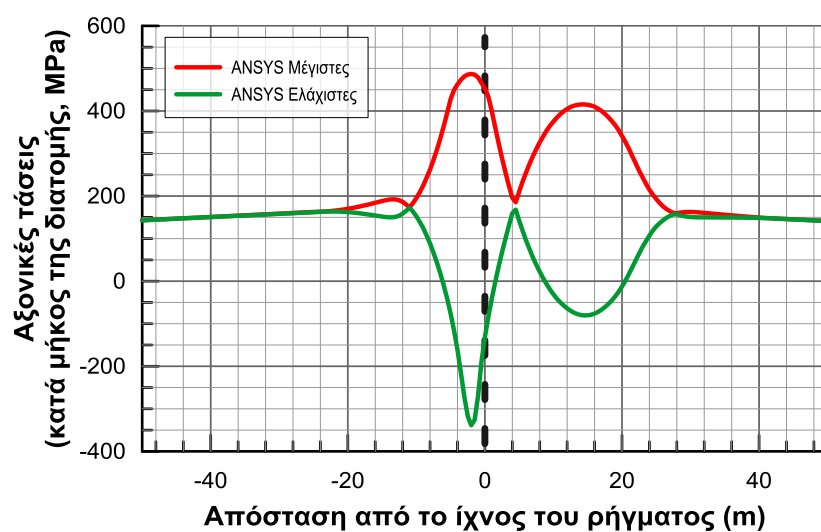
Figure 4.7: Moments along the pipeline.

Τέλος στα Σχήματα 4.8 και 4.9 απεικονίζεται η κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών παραμορφώσεων και τάσεων αντίστοιχα, που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού.



Σχήμα 4.8: Κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

Figure 4.8: Maximum and minimum axial strains along the pipeline.

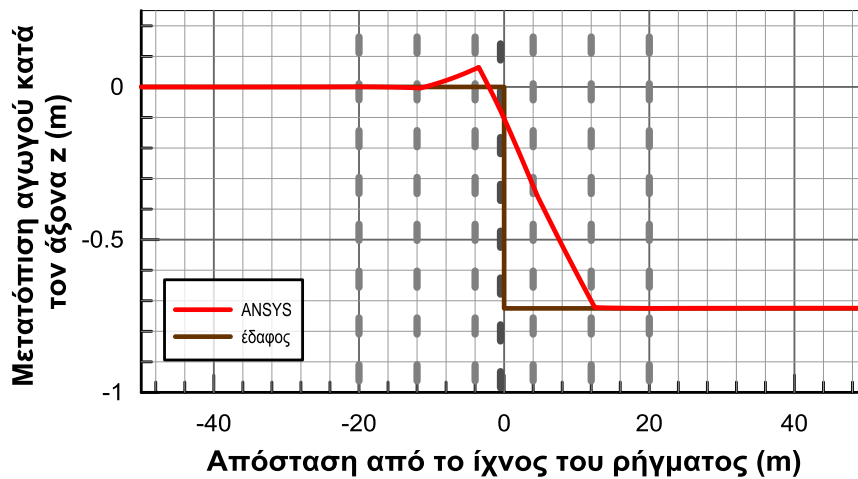


Σχήμα 4.9: Κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

Figure 4.9: Maximum and minimum axial stresses along the pipeline.

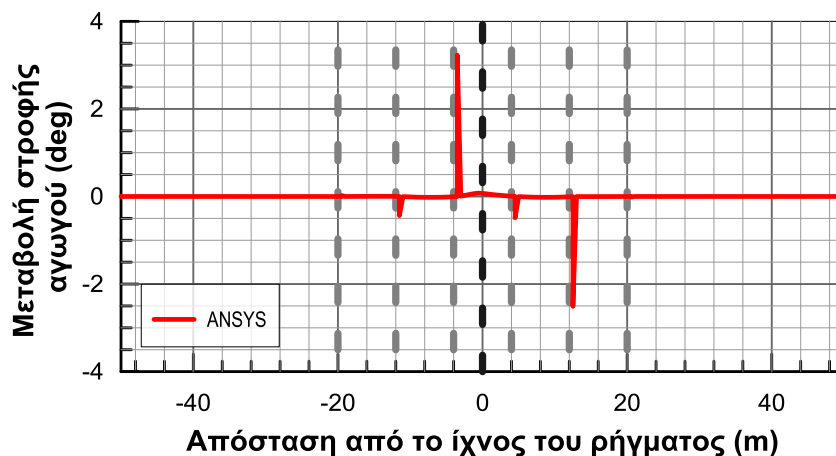
4.3.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων τυπικής ανάλυσης αγωγού με εύκαμπτους κόμβους

Όπως προαναφέρθηκε, η ανάλυση αυτή αφορά αγωγό με 6 εύκαμπτους κόμβους τοποθετημένους ανά 8m στην περιοχή γύρω από το ρήγμα, το οποίο διασταυρώνεται με τον αγωγό μεταξύ του 3^{ου} και 4^{ου} κόμβου. Στα Σχήματα 4.10 και 4.11 απεικονίζεται η μεταβολή κατά μήκος των μετατοπίσεων κατά την εγκάρσια οριζόντια διεύθυνση z και της στροφής του αγωγού γύρω από τον άξονα γ αντίστοιχα. Σε όλα τα σχήματα που ακολουθούν σημειώνεται με μαύρη διακεκομμένη γραμμή η θέση στην οποία το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό, ενώ οι θέσεις των εύκαμπτων κόμβων σημειώνονται με τις γκρι διακεκομμένες γραμμές.



Σχήμα 4.10: Μετατοπίσεις του αγωγού κατά την εγκάρσια κατακόρυφη διεύθυνση

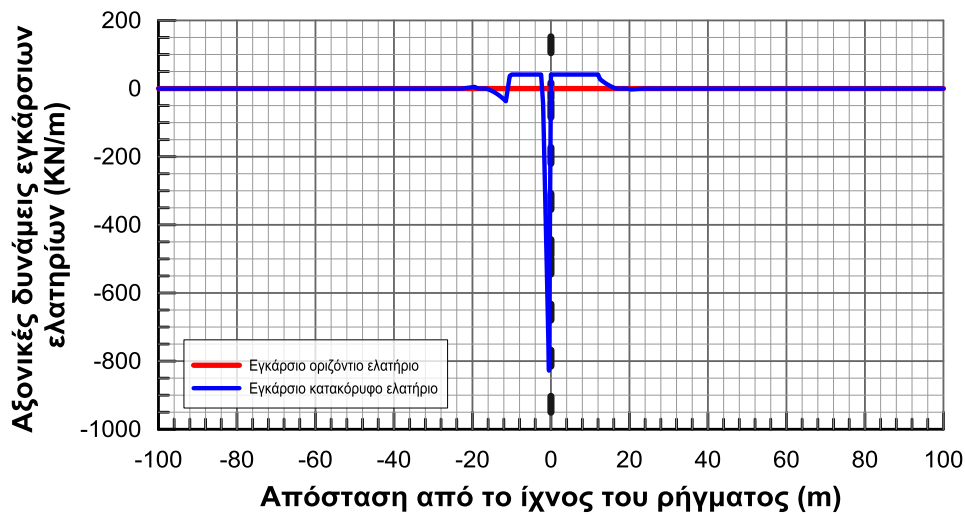
Figure 4.10: Vertical pipeline displacements along the pipeline.



Σχήμα 4.11: Σχετική στροφή του αγωγού γύρω από τον άξονα γ.

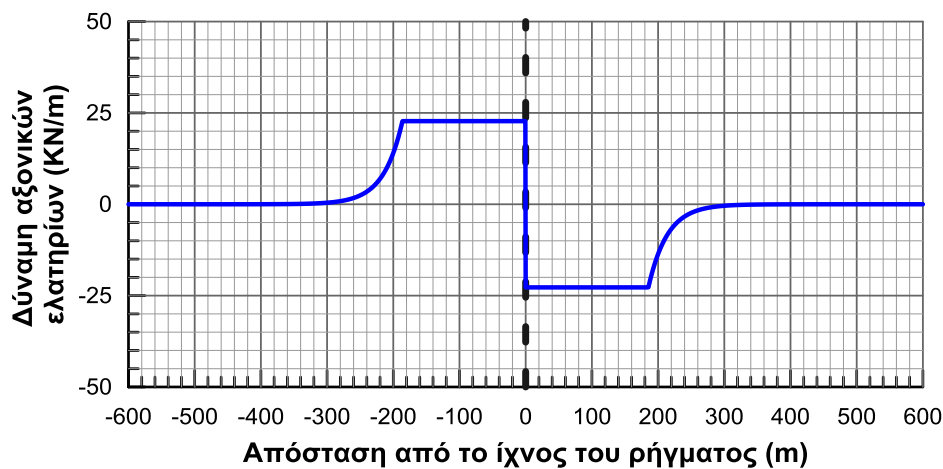
Figure 4.11: Relative turn along the pipeline.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων των εγκάρσιων ελατηρίων (οριζόντιων και κατακόρυφων) καθώς και των αξονικών ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού στα Σχήματα 4.12 και 4.13 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.12: Κατανομή των δυνάμεων των εγκάρσιων ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού

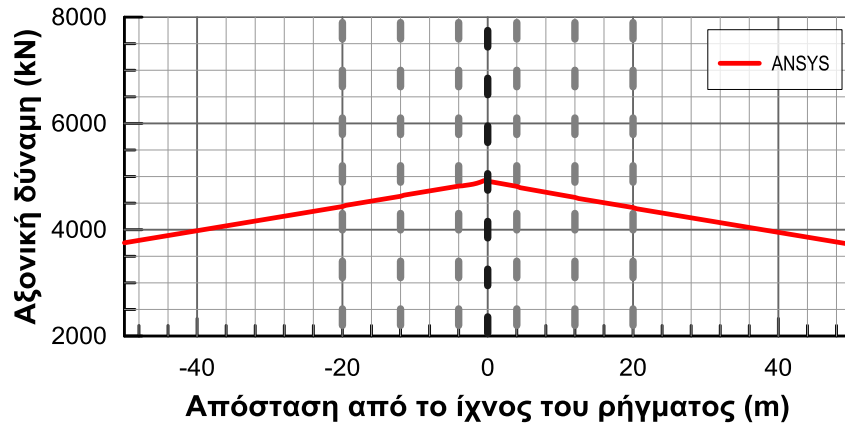
Figure 4.12: Vertical spring forces along the pipeline.



Σχήμα 4.13: Κατανομή των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού

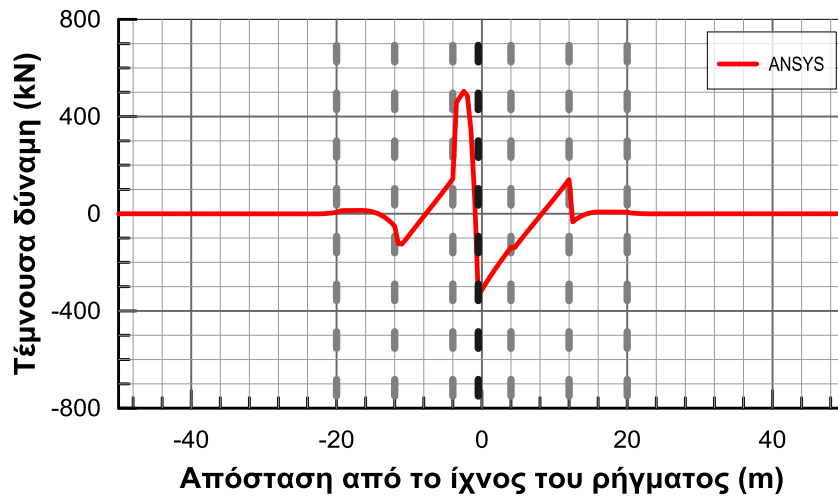
Figure 4.13: Axial spring forces along the pipeline.

Στα Σχήματα 4.14, 4.15 και 4.16 που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των κατανομών των αξονικών δυνάμεων, των τεμνουσών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού αντίστοιχα.



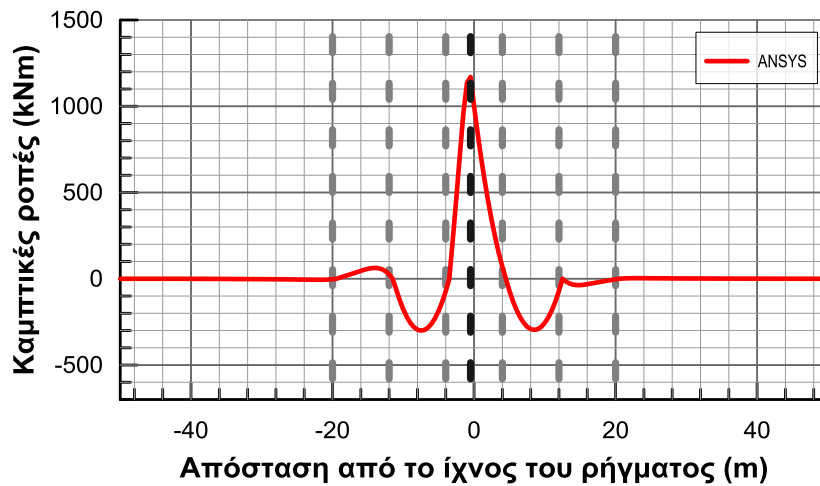
Σχήμα 4.14: Κατανομή των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού

Figure 4.14: Axial forces along the pipeline.



Σχήμα 4.15: Κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού

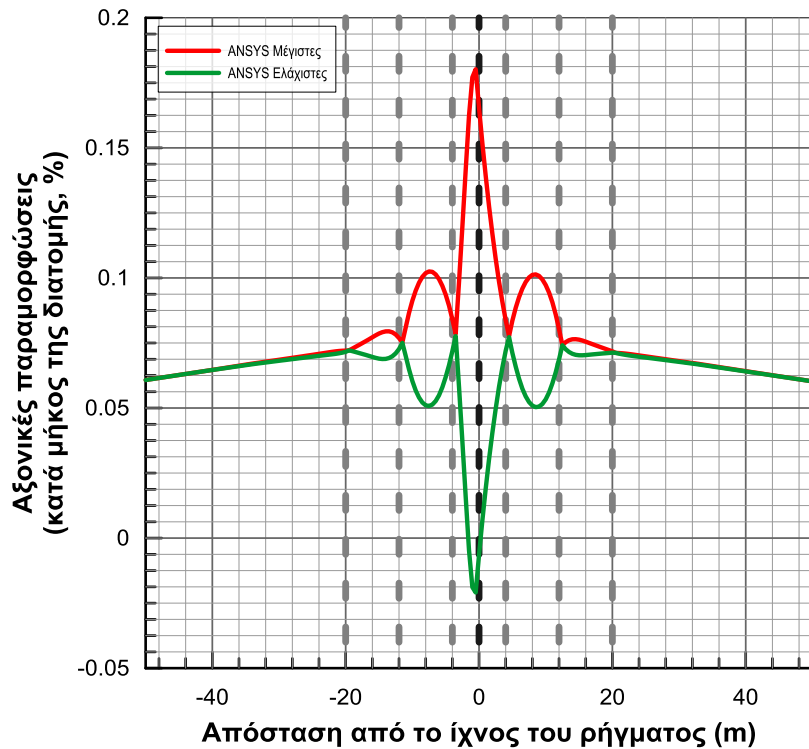
Figure 4.15: Shear forces along the pipeline.



Σχήμα 4.16: Κατανομή των καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού

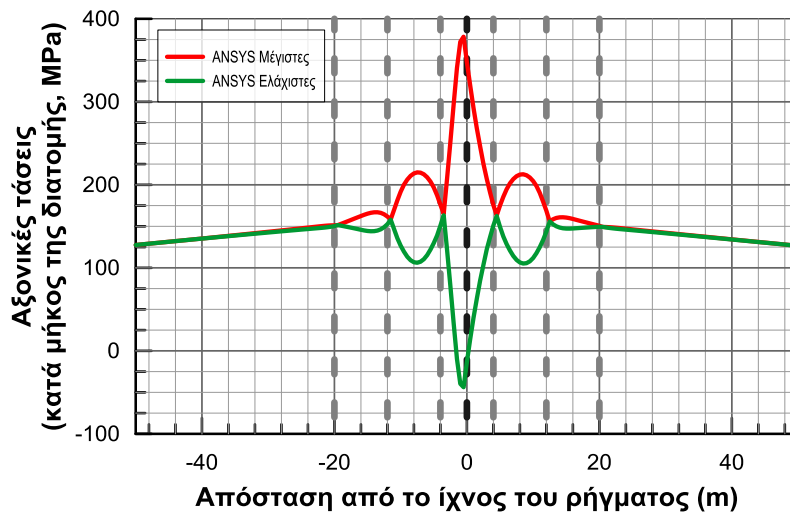
Figure 4.16: Moments along the pipeline.

Τέλος στα Σχήματα 4.17 και 4.18 απεικονίζεται η κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών παραμορφώσεων και τάσεων αντίστοιχα, που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού.



Σχήμα 4.17: Κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

Figure 4.17: Maximum and minimum axial strains along the pipeline.



Σχήμα 4.18: Κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων αξονικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού

Figure 4.18: Maximum and minimum axial stresses along the pipeline.

Τα λεπτομερή αποτελέσματα για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τους αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους παρουσιάζονται υπό μορφή συγκεντρωτικών διαγραμμάτων στο Παράρτημα Β.

Για κάθε ανάλυση παρουσιάζεται και συγκρίνεται η μεταβολή κατά μήκος του αγωγού των ακόλουθων μεγεθών:

- αξονική δύναμη
- τέμνουσα δύναμη
- καμπτική ροπή
- μετατόπιση και σχετική στροφή
- μέγιστες και ελάχιστες τάσεις
- μέγιστες και ελάχιστες παραμορφώσεις

Στην επόμενη παράγραφο γίνεται μία συνολική αποτίμηση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθόδου σχεδιασμού.

4.3.4 Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Προτεινόμενης Μεθόδου Σχεδιασμού

Από τα σχήματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο γίνεται φανερό ότι η προτεινόμενη μέθοδος σχεδιασμού με χρήση εύκαμπτων κόμβων μπορεί να απομειώσει σοβαρά τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό λόγω μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων.

Προκειμένου να γίνει μία εποπτική σύγκριση της ευεργετικής επιρροής των εύκαμπτων κόμβων, στον πίνακα που ακολουθεί συγκρίνονται οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό για την περίπτωση του συνεχή αγωγού και του αγωγού με εύκαμπτους κόμβους, αναλόγως της μετατόπισης του ρήγματος και της απόστασης μεταξύ διαδοχικών κόμβων. Σε κάθε περίπτωση παρουσιάζονται οι μέγιστες παραμορφώσεις (δυσμενέστερη περίπτωση) μεταξύ των διατάξεων που το ρήγμα πέφτει ακριβώς πάνω σε κάποιο εύκαμπτο κόμβο ή ανάμεσα σε δύο, ενώ οι τιμές εξήχθησαν από τις ακριβέστερες αριθμητικές αναλύσεις.

Πίνακας 4.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων για το βασικό μέγεθος σχεδιασμού με και χωρίς τη χρήση εύκαμπτων κόμβων.

Γωνία ψ ($^{\circ}$)	Μετακίνηση ρήγματος (m)	Συνε- χής	Κόμβοι ανά 6μ	Κόμβοι ανά 8μ	Κόμβοι ανά 12μ	Συνε- χής	Κόμβοι ανά 6μ	Κόμβοι ανά 8μ	Κόμβοι ανά 12μ
		ϵ_{\max} (%)	ϵ_{\max} (%)	ϵ_{\max} (%)	ϵ_{\max} (%)	ϵ_{\min} (%)	ϵ_{\min} (%)	ϵ_{\min} (%)	ϵ_{\min} (%)
60	0.375	0.228	-	0.099	-	-0.059	-	0.002	-
60	0.750	0.498	-	0.214	-	-0.107	-	0.008	-
60	1.500	1.525	0.435	0.810	1.533	-0.114	0.017	-0.046	-0.142
75	0.375	0.215	0.105	0.129	0.209	-0.095	0.001	-0.023	-0.102
75	0.750	0.459	0.157	0.180	0.301	-0.161	0.003	-0.021	-0.114
75	1.500	1.442	0.241	0.334	1.145	-0.246	0.004	-0.043	-0.224
90	0.375	0.169	-	0.081	0.161	-0.159	-	-0.051	-0.139
90	0.750	0.294	-	0.111	-	-0.249	-	-0.061	-
90	1.500	1.096	0.137	0.168	0.279	-0.832	-0.045	-0.076	-0.189

Από τις τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα γίνεται φανερό ότι ο σχεδιασμός με εύκαμπτους κόμβους μπορεί να μειώσει τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό έως και 87.5%, στη θεωρητική περίπτωση που το επίπεδο διάρρηξης του ρήγματος είναι κάθετο ($\psi=90^{\circ}$), ενώ η ευεργετική δράση των κόμβων μειώνεται σε 83.3% και 71.5%, για τις πιο συνήθεις περιπτώσεις ορθών ρηγμάτων με κλίση 75° και 60° αντίστοιχα.

Κατά συνέπεια η προτεινόμενη εναλλακτική μέθοδος σχεδιασμού μπορεί να αξιοποιηθεί για την ενίσχυση υπόγειων αγωγών σε περιπτώσεις μεγάλων εδαφικών

μετατοπίσεων λόγω της διάρρηξης ορθών ρηγμάτων. Η συγκριτική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας και του κόστους αυτής της μεθοδολογίας έναντι των συμβατικών/παραδοσιακών μεθόδων σχεδιασμού, θα ακολουθήσει στο πέμπτο κεφάλαιο. Πάρα ταύτα, από τα διαγράμματα και τον πίνακα που προηγήθηκαν, προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι για να είναι αποτελεσματική η προτεινόμενη μέθοδος σχεδιασμού και να μειώσει αισθητά τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό, θα πρέπει οι κόμβοι να βρίσκονται σε σχετικά μικρή απόσταση μεταξύ τους στην περιοχή γύρω από το ρήγμα και σίγουρα σε μικρότερη απόσταση από 12m.

4.3.5 Εκτίμηση Εύρους Εφαρμογής Προτεινόμενων Μεθοδολογιών Σχεδιασμού (Αναλυτικής και Αριθμητικής)

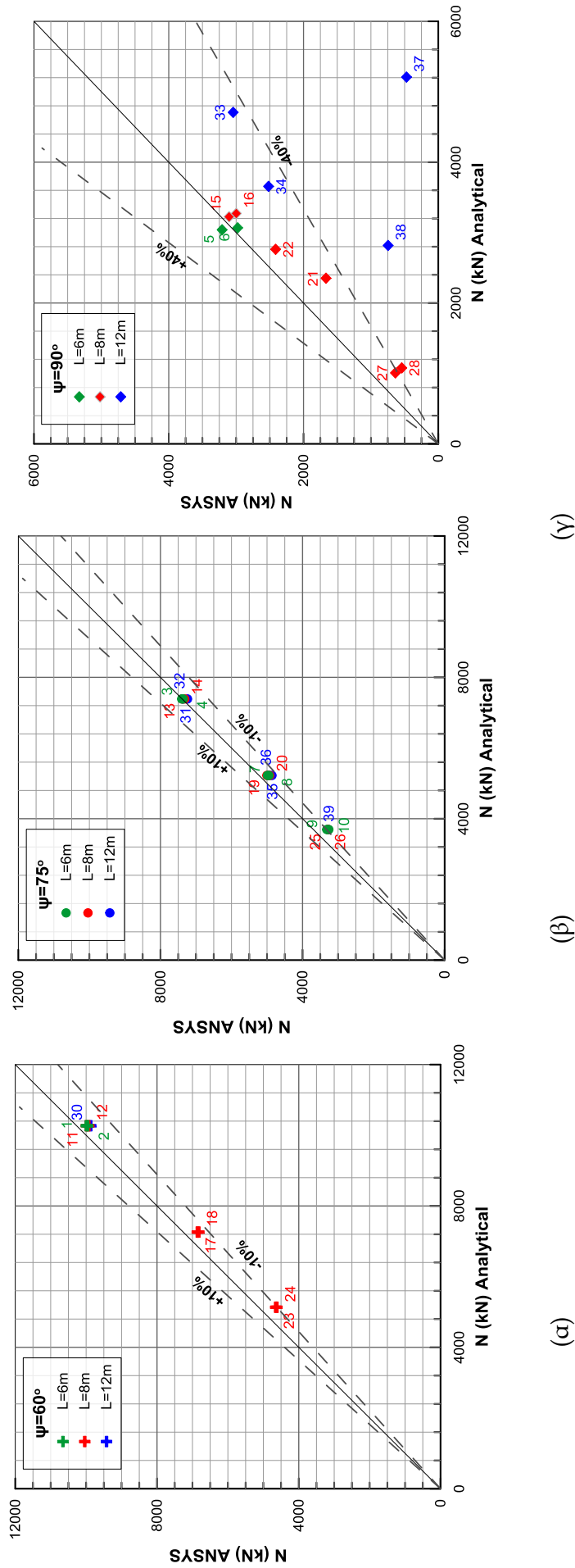
Όπως είναι αναμενόμενο, η αριθμητική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της Ερευνητικής Εργασίας 8, έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει με μεγάλη ακρίβεια το εξεταζόμενο πρόβλημα και για αυτό θεωρείται ότι έχει ευρύτατο εύρος εφαρμογής. Ταυτόχρονα μπορεί να αποτελέσει βάση για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας και του εύρους εφαρμογής της αναλυτικής μεθοδολογίας, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματά της ως δεξαμενή αριθμητικών πειραμάτων με τα οποία θα συγκριθεί η αναλυτική.

Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση κατασκευάστηκαν διαγράμματα «1 προς 1» των αποτελεσμάτων των αριθμητικών και αναλυτικών επιλύσεων για κάθε μία από τις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 4.1, τα οποία αφορούν τα βασικά μεγέθη που ενδιαφέρουν τον σχεδιασμό ενός αγωγού, δηλαδή για τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη, τις αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις καθώς και τη στροφή στους κόμβους. Σκοπός είναι να επαληθευτεί η ικανότητα της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας να προβλέπει επαρκώς τα κρίσιμα μεγέθη σχεδιασμού, έτσι ώστε στο μέλλον να μπορεί να γίνει αδρή εκτίμηση της ευεργετικής συνεισφοράς των κόμβων από το αναλυτικό μοντέλο, χωρίς την πραγματοποίηση σύνθετων αριθμητικών αναλύσεων. Κάθε σημείο στα διαγράμματα συνοδεύεται από έναν αριθμό, ο οποίος αντιστοιχεί στον αριθμό της ανάλυσης του Πίνακα 4.1.

Στο Σχήμα 4.19 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» της μέγιστης αξονικής δύναμης που αναπτύσσεται στον αγωγό, για τις περιπτώσεις διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό στις (α)60°, (β)75° και (γ)90°. Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι η αξονική δύναμη προσεγγίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια, με τη διακύμανση να φτάνει μέχρι $\pm 10\%$ για γωνίες διασταύρωσης 60° και 30° και $\pm 40\%$ για γωνία διασταύρωσης 90°. Η αξονική υπολογίζεται αθροιστικά από την επιμήκυνση λόγω της συνιστώσας Δx του ρήγματος και από την επιμήκυνση λόγω της καμπύλωσης του αγωγού, η οποία όμως υπολογίζεται προσεγγιστικά με βάση τις γωνίες στροφής στους κόμβους. Το αυξημένο ποσοστό σφάλματος στην περίπτωση των 90° οφείλεται στην απουσία του πρώτου όρου στον υπολογισμό της αξονικής, εφόσον η συνιστώσα Δx του ρήγματος είναι μηδενική, και κατά συνέπεια το ίδιο σφάλμα σε απόλυτη τιμή, οδηγεί σε αυξημένα σχετικά σφάλματα.

Επιπροσθέτως όσον αφορά τις αναλύσεις 37 και 38, η μικρή επιβαλλόμενη μετακίνηση από το ρήγμα (0.375m) σε συνδυασμό με τη μεγάλη απόσταση μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων (12m) συντελούν στη διαμόρφωση ενός παραμορφωμένου φορέα, πολύ πιο απλού από αυτόν που εκτιμάει η αναλυτική μεθοδολογία (έχουμε στροφή μόνο των δύο πλησιέστερων στο ίχνος κόμβων, και όχι τεσσάρων κόμβων όπως δέχεται το αναλυτικό προσομοίωμα), με αποτέλεσμα η αναλυτική μεθοδολογία να μην εκτιμά ικανοποιητικά την τιμή της μέγιστης αξονικής δύναμης (βλ. και την αναλυτική παράθεση αποτελεσμάτων στο Παράρτημα Β).

Η σωστή εκτίμηση της αξονικής δύναμης έχει ιδιαίτερη σημασία για το σωστό υπολογισμό των υπόλοιπων μεγεθών. Όταν η αναπτυσσόμενη τάση στη διατομή ξεπεράσει το όριο διαρροής σ_1 και η διατομή του αγωγού μπει στην πλαστική περιοχή, μικρές διαφοροποιήσεις στον υπολογισμό των τάσεων, οδηγούν σε μεγάλες διακυμάνσεις στις παραμορφώσεις, οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζουν το E_{cur} και κατά συνέπεια τις καμπτικές ροπές και τέμνουσες δυνάμεις. Έτσι, αν υπερτιμηθεί ελαφρά η τάση αλλά ο αγωγός είναι στην πλαστική περιοχή, η μικρή υπερτίμηση οδηγεί σε δυσανάλογα μεγάλη υπερτίμηση της παραμόρφωσης με αποτέλεσμα να υποεκτιμάται η καμπτική ροπή και η τέμνουσα δύναμη (και το αντίστροφο). Το εν λόγω συμπέρασμα μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση των υπόλοιπων αποκλίσεων στα διαγράμματα που ακολουθούν.

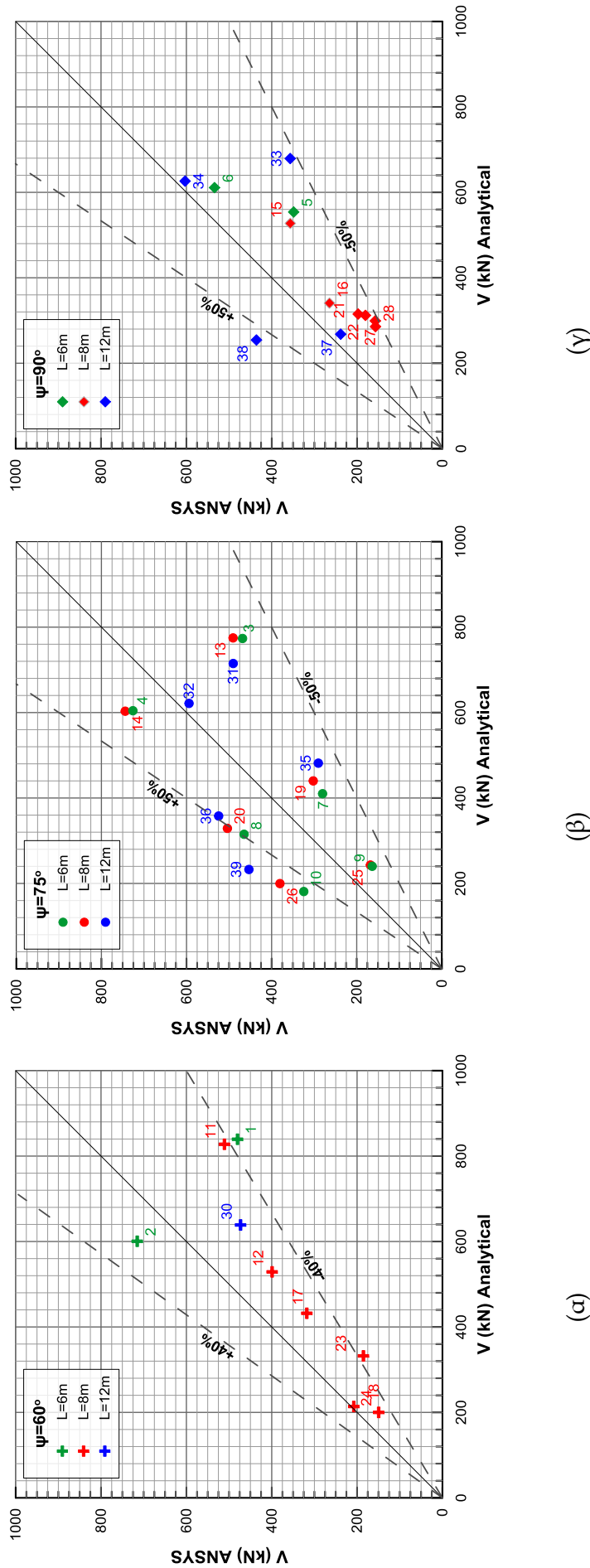


Σχήμα 4.19: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της αξονικής δύναμης για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi=$ (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° .

Figure 4.19: 1-1 comparison for the maximum values of the axial forces for the analyses with fault plane angle $\psi =$ (a) 60° , (b) 75° , (c) 90° .

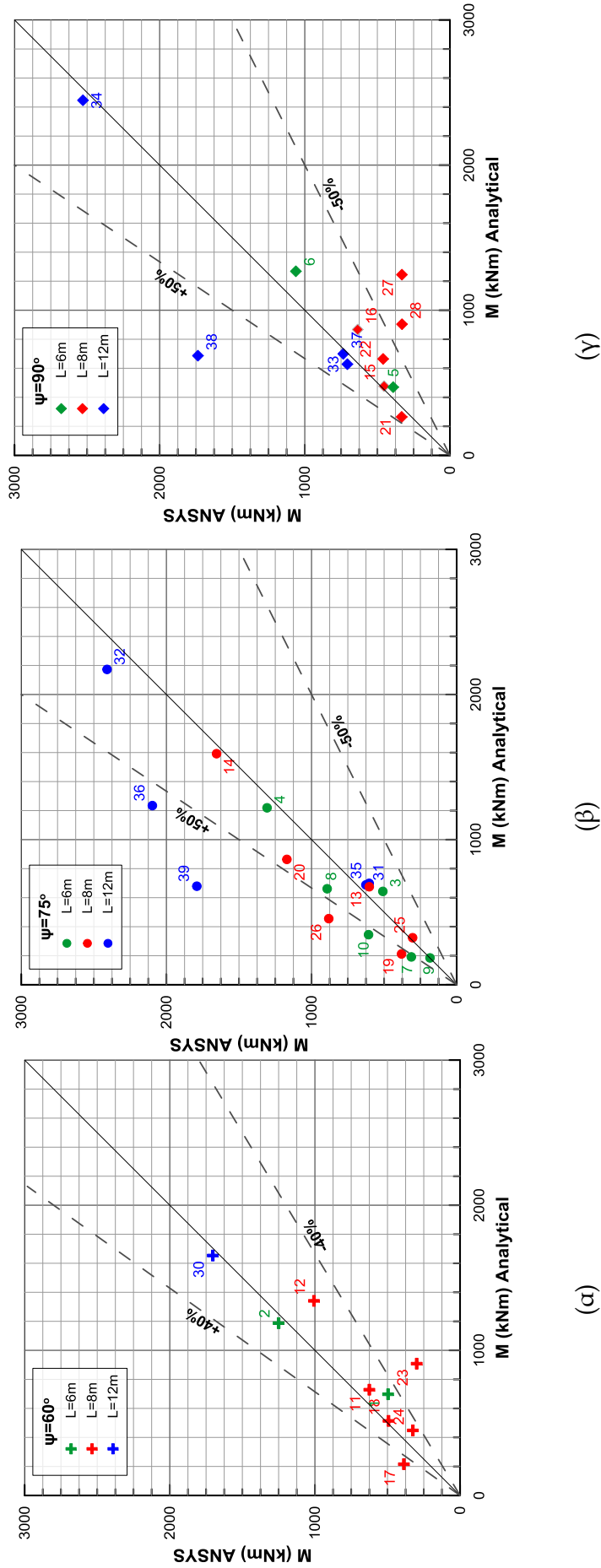
Στα Σχήματα 4.20 και 4.21 ακολουθούν τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» της τέμνουσας δύναμης και της καμπτικής ροπής αντίστοιχα για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια ψ ίση με (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° . Όσον αφορά τόσο την τέμνουσα δύναμη όσο και την καμπτική ροπή, η αναλυτική μεθοδολογία προσεγγίζει τις αριθμητικές επιλύσεις με απόκλιση έως και $\pm 50\%$ για την πλειοψηφία των περιπτώσεων που διερευνήθηκαν. Υπάρχει μικρός αριθμός αναλύσεων που παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση (αναλύσεις 10, 26, 36, 38, 39), απόκλιση που οφείλεται στην αιτία που προαναφέρθηκε πρωτίτερα για την ανάλυση 37, δηλαδή ότι η μετακίνηση του ρήγματος που επιβάλλεται στον αγωγό είναι αρκετά μικρή, με αποτέλεσμα ο πραγματικός παραμορφωμένος φορέας να απέχει από αυτόν που εκτιμήθηκε αναλυτικά. Η συγκεκριμένη αδυναμία της αναλυτικής μεθοδολογίας δεν κρίνεται ως σημαντική, εφόσον η ανάγκη χρήσης εύκαμπτων κόμβων για την απομείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων προβλέπεται μόνο για μεγάλες μετακινήσεις του ρήγματος, μεγαλύτερες του 1D.

Στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» της στροφής στους κόμβους, όπως αυτή προέκυψε από τις αριθμητικές και αναλυτικές επιλύσεις για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια ψ ίση με (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° . Σε όλες τις περιπτώσεις η αναλυτική μεθοδολογία προσεγγίζει τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων με απόκλιση έως και $\pm 50\%$, ενώ για την πλειοψηφία των περιπτώσεων δίδονται ελαφρώς συντηρητικές εκτιμήσεις.



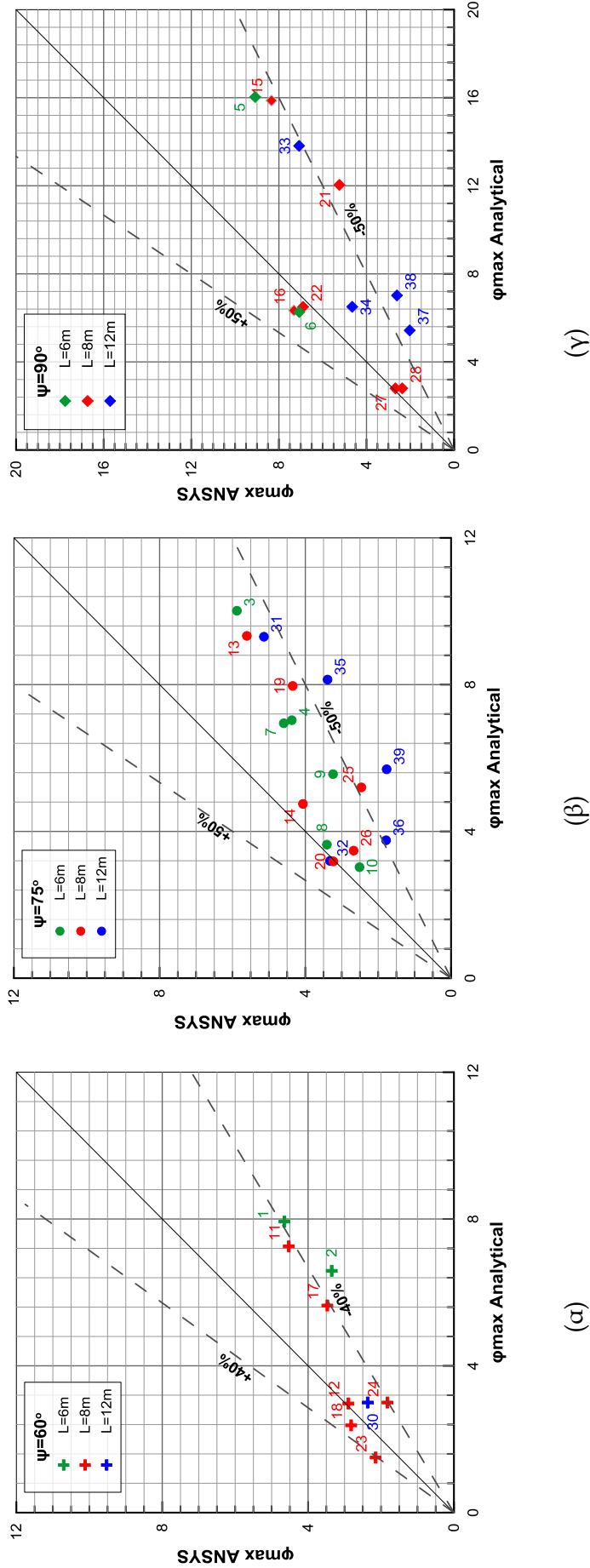
Σχήμα 4.20: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της τέμνουσας δύναμης για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi=$ (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° .

Figure 4.20: 1-1 comparison for the maximum values of the shear forces for the analyses with fault plane angle $\psi =$ (a) 60° , (b) 75° , (c) 90° .



Σχήμα 4.21: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της καμπτικής ροπής για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi=$ (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° .

Figure 4.21: 1-1 comparison for the maximum values of the moments for the analyses with fault plane angle $\psi =$ (a) 60° , (b) 75° , (c) 90° .



Σχήμα 4.22: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές της σχετικής στροφής του εύκαμπτου κόμβου για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi =$ (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° .

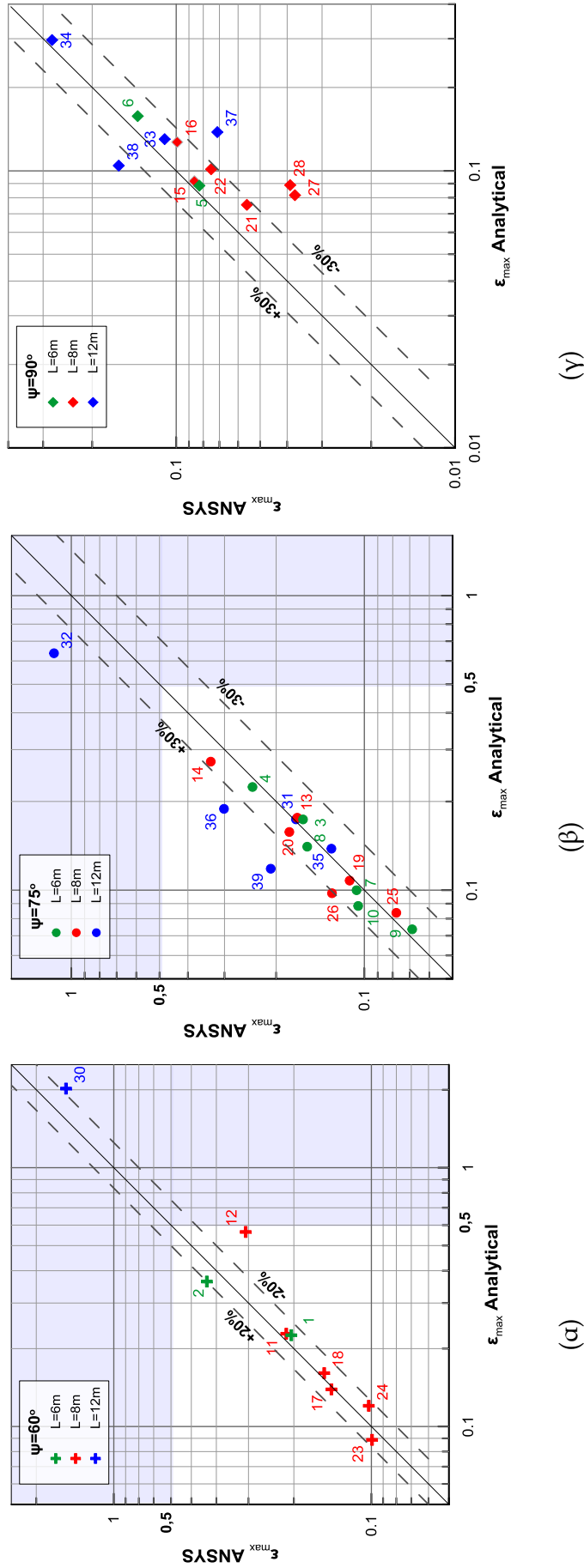
Figure 4.22: 1-1 comparison for the maximum values of the flexible joints turn for the analyses with fault plane angle $\psi =$ (a) 60° , (b) 75° , (c) 90° .

Ακολουθούν τα Σχήματα 4.23 και 4.24 στα οποία παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης «1 προς 1» των μέγιστων τιμών των αξονικών παραμορφώσεων και τάσεων αντίστοιχα, που αναπτύσσονται στον αγωγό για γωνία ψ ίση με (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° .

Όσον αφορά τις μέγιστες αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις και τάσεις, η αναλυτική μεθοδολογία παρέχει αποτελέσματα με απόκλιση έως $\pm 20\%$ και $\pm 30\%$ αντίστοιχα, για τη μεγάλη πλειοψηφία των αναλύσεων.

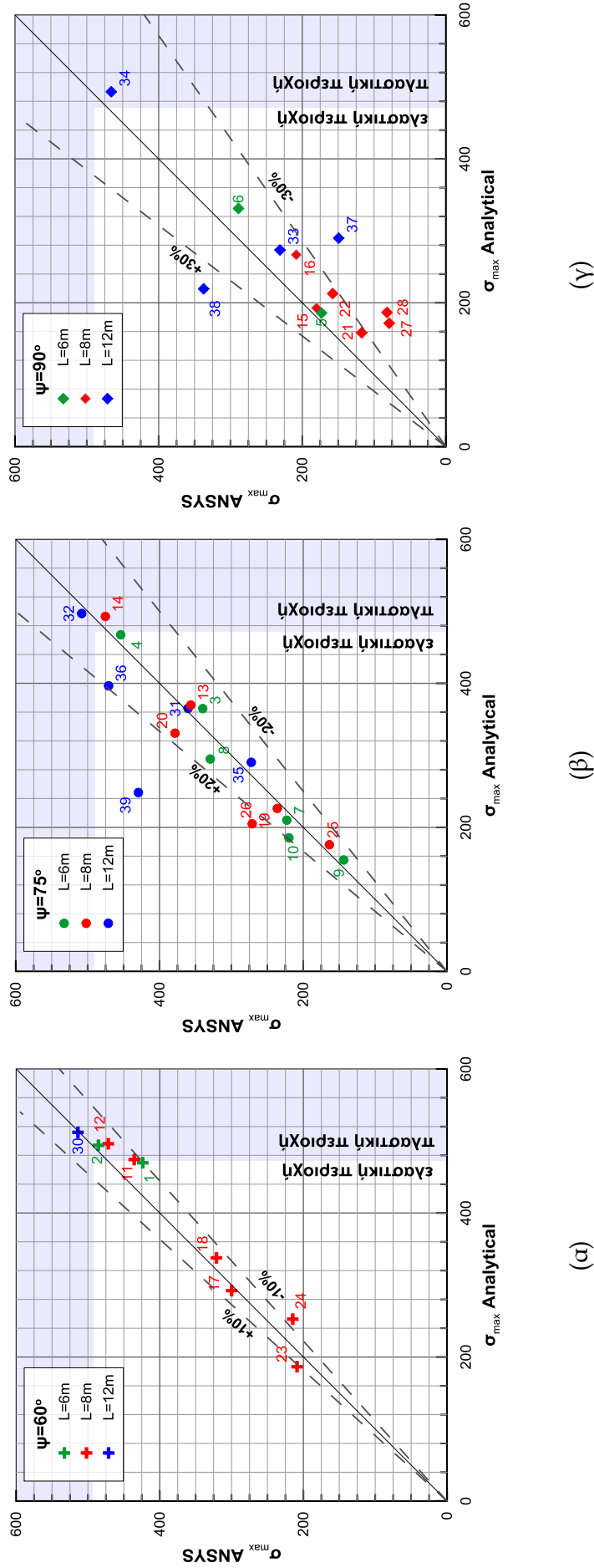
Και σε αυτή την περίπτωση η απόκλιση στην εκτίμηση των παραμορφώσεων είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε μικροδιαφοροποιήσεις στην εκτίμηση των αξονικών δυνάμεων, όταν ο αγωγός βρίσκεται στην πλαστική περιοχή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ανάλυση 32, ενώ η αναλυτική μεθοδολογία προσεγγίζει με πολύ μεγάλη ακρίβεια την τιμή της αξονικής δύναμης και της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης (απόκλιση κατά -2%), τελικά υποτιμάται κατά 44% η τιμή της μέγιστης αναπτυσσόμενης αξονικής παραμόρφωσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι, λόγω της σχετικά μεγάλης απόστασης μεταξύ των εύκαμπτων κόμβων και κατά συνέπεια της σημαντικά μειωμένης ευεργετικής επιρροής τους στα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη, ο αγωγός βρίσκεται έχει ήδη μπει στην πλαστική περιοχή (Σχήμα 4.24β) και κατά συνέπεια μικρές διαφοροποιήσεις στην εκτίμηση των εντατικών μεγεθών μεταξύ των δύο μεθοδολογιών (αριθμητική - αναλυτική) να έχουν ως επακόλουθο μεγάλες διαφοροποιήσεις στις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις (βλ. και τα σχετικά διαγράμματα της περίπτωσης 32 που παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β).

Τέλος όσον αφορά τις ελάχιστες αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις και τις ελάχιστες αναπτυσσόμενες τάσεις που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.25 και 4.26, η αναλυτική μεθοδολογία εκτιμά με μεγάλη ακρίβεια την μείωση της μέσης αξονικής τάσης και παραμόρφωσης λόγω της κάμψης και παρέχει αποτελέσματα με σχετικά μικρή απόκλιση σε απόλυτες τιμές, αλλά, ακριβώς λόγω του πολύ μικρού απόλυτου μεγέθους (περί το 0), το σχετικό σφάλμα φτάνει έως και $\pm 60\%$.



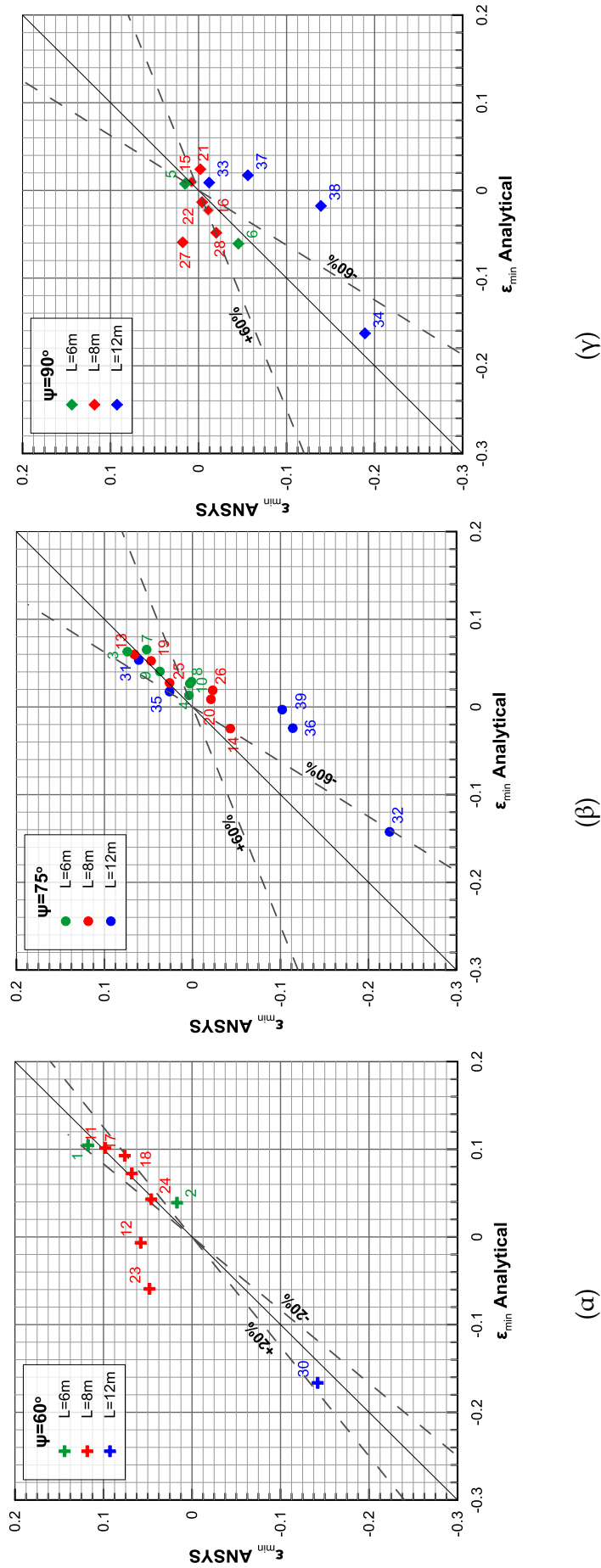
Σχήμα 4.23: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές των αξονικών παραμορφώσεων του αγωγού για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi=$ (α) 60°, (β) 75° και (γ) 90°.

Figure 4.23: 1-1 comparison for the maximum values of the axial strains for the analyses with fault plane angle $\psi =$ (a) 60°, (b) 75°, (c) 90°..



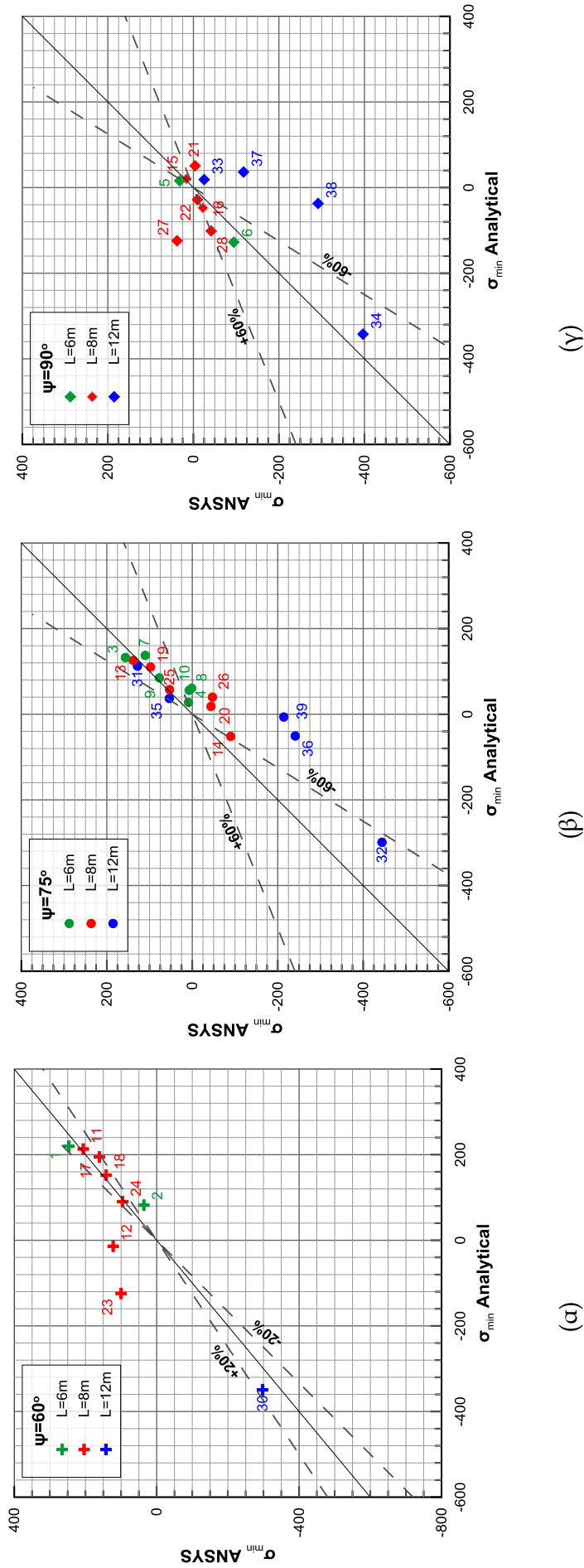
Σχήμα 4.24: Σύγκριση 1-1 για τις μέγιστες τιμές των αξονικών τάσεων του αγωγού για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi =$ (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° .

Figure 4.24: 1-1 comparison for the maximum values of the axial stresses for the analyses with fault plane angle $\psi =$ (a) 60° , (b) 75° , (c) 90° .



Σχήμα 4.25: Σύγκριση 1-1 για τις ελάχιστες τιμές των αξονικών παραμορφώσεων του αγωγού για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi = (\alpha)$ 60° , (β) 75° και (γ) 90° .

Figure 4.25: 1-1 comparison for the minimum values of the axial strains for the analyses with fault plane angle $\psi = (\alpha)$ 60° , (β) 75° , (γ) 90° .



Σχήμα 4.26: Σύγκριση 1-1 για τις ελάχιστες τιμές των αξονικών τάσεων του αγωγού για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για γωνία του επιπέδου του ρήγματος με την οριζόντια $\psi =$ (α) 60° , (β) 75° και (γ) 90° .

Figure 4.26: 1-1 comparison for the minimum values of the axial stresses for the analyses with fault plane angle $\psi =$ (a) 60° , (b) 75° , (c) 90° .

4.4 Αξιολόγηση – Εύρος εφαρμογής μεθοδολογίας

Και στην περίπτωση ρηγμάτων ορθής διάρρηξης, η ύπαρξη εύκαμπτων κόμβων στην ευρύτερη περιοχή που επηρεάζει η διάρρηξη του ρήγματος, διαφοροποιεί αισθητά τη συμπεριφορά του αγωγού συγκριτικά με αυτή του ευθύγραμμου συνεχούς αγωγού.

Από τις τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα γίνεται φανερό ότι ο σχεδιασμός με εύκαμπτους κόμβους μπορεί να μειώσει τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό έως και 87.5%, στη θεωρητική περίπτωση που το επίπεδο διάρρηξης του ρήγματος είναι κάθετο ($\psi=90^\circ$), ενώ η ευεργετική δράση των κόμβων μειώνεται σε 83.3% και 71.5%, για τις πιο συνήθεις περιπτώσεις ορθών ρηγμάτων με κλίση 75° και 60° αντίστοιχα.

Από τις δύο προτεινόμενες μεθοδολογίες εκτίμησης της συμπεριφοράς του αγωγού με εύκαμπτους κόμβους, κρίνεται ότι η αριθμητική μεθοδολογία μπορεί με μεγάλη αξιοπιστία να αναπαραστήσει το φαινόμενο και να προβλέψει τη συμπεριφορά του αγωγού, ενώ από την εκτενή σύγκριση της αναλυτικής μεθοδολογίας με τις αριθμητικές αναλύσεις, κρίνεται ότι και η προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία προσεγγίζει ικανοποιητικά το μηχανισμό του φαινομένου και δίνει αξιόλογα αποτελέσματα για σχεδόν το σύνολο των περιπτώσεων που εξετάστηκαν. Επιπροσθέτως, μέσα από την εποπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών και αριθμητικών επιλύσεων και των σχετικών σφαλμάτων κάθε μεγέθους, καθορίστηκαν τα παρακάτω όρια εφαρμογής της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας:

- Κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος μεγαλύτερη από μία φορά τη διάμετρο του αγωγού ($D_f > D$)
- Απόσταση μεταξύ διαδοχικών κόμβων μικρότερη των 12m.

Διευκρινίζεται ότι τα προαναφερθέντα όρια δεν αποτελούν πρακτικό περιορισμό στην χρήση της αναλυτικής μεθοδολογίας, δεδομένου ότι η χρήση εύκαμπτων κόμβων μας ενδιαφέρει για περιπτώσεις μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων ($>1.0 D$), ενώ όταν η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κόμβων είναι μεγάλη, οι κόμβοι δεν έχουν

την απαιτούμενη ευεργετική δράση στην απομείωση των παραμορφώσεων του αγωγού και δε συνίσταται.

5

Τεχνικό-Οικονομική Αξιολόγηση Προτεινόμενης Μεθόδου Σχεδιασμού

5.1 Εισαγωγή

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι μία οικονομοτεχνική σύγκριση μεταξύ της προτεινόμενης μεθόδου για τον σχεδιασμό αγωγών έναντι μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων λόγω διάρρηξης ενεργών τεκτονικών ρηγμάτων, με χρήση εύκαμπτων κόμβων και των «παραδοσιακών» μεθόδων σχεδιασμού. Σκοπός αυτής της σύγκρισης είναι να διαπιστωθούν τα όρια εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου, λαμβάνοντας υπόψη την αποδοτικότητα της κάθε μεθόδου, το εύρος εφαρμογής της αλλά και το κόστος εφαρμογής της.

5.2 Παραδοσιακές μέθοδοι αντιμετώπισης εδαφικών μετατοπίσεων λόγω διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων

Στο συμβατικό (παραδοσιακό) σχεδιασμό υπόγειων αγωγών, έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται διάφορες συμβατικές μέθοδοι που αποσκοπούν στην απομείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό, λόγω της διάρρηξης κάποιου διασταυρούμενου ρήγματος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των παρακάτω μηχανισμών:

1. αύξηση της αντοχής του αγωγού, το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί με την αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού ή την αναβάθμιση της αντοχής του ανοξείδωτου χάλυβα,

- II. απομείωση των επιβαλλόμενων αξονικών/εγκάρσιων τάσεων στον αγωγό από το περιβάλλον έδαφος, το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση γεωφασμάτων περιμετρικά του αγωγού ή τη χρήση ελαφρόπετρας για την πλήρωση της τάφρου, και
- III. αύξηση της δυνατότητας ελεύθερης μετακίνησης του αγωγού στην περιοχή της διάρρηξης, το οποίο για την περίπτωση υπόγειων αγωγών μπορεί να πραγματοποιηθεί με την κατασκευή ενός περιμετρικού «θυσιαζόμενου» κιβωτίου από οπλισμένο σκυρόδεμα (culvert) κατάλληλων διαστάσεων, εντός του οποίου ο αγωγός είναι ελεύθερος να κινηθεί.

Στα πλαίσια αυτής της οικονομοτεχνικής μελέτης εξετάστηκαν όλες οι προαναφερόμενες μέθοδοι και συγκρίθηκαν με τη χρήση εύκαμπτων κόμβων, με εξαίρεση τη μέθοδο περιμετρικής χρήσης γεωφασμάτων, μέθοδος που είναι πολύ οικονομική και θεωρείται ότι θα χρησιμοποιηθεί ανεξάρτητα σε κάθε περίπτωση.

Για την εκτίμηση της αποδοτικότητας της κάθε μεθόδου έγινε σταδιακή αύξηση της επιβαλλόμενης μετατόπισης του ρήγματος μέχρι να φτάσει η αναπτυσσόμενη παραμόρφωση στον αγωγό στην τιμή 0.5%, τιμή που θεωρείται οριακή. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η αναλυτική μεθοδολογία των Karamitros et al. (2011) για την αξιολόγηση των παραδοσιακών μεθόδων και η νέα αναλυτική μεθοδολογία για την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου με τους εύκαμπτους κόμβους. Για όλες τις περιπτώσεις θεωρήθηκε ως βάση της σύγκρισης ένας αγωγός με εξωτερική διάμετρο $D=0.762\text{m}$ (30"), πάχος τοιχώματος $t=12.5\text{mm}$ και ποιότητα χάλυβα API 5L Grade X65.

Αναλυτικότερα για την εκτίμηση της ευεργετικής επιρροής από την αύξηση της αντοχής του αγωγού, εξετάστηκε η σταδιακή αύξηση του πάχους από $t=12.5\text{mm}$ σε $t=16\text{mm}$ και $t=20\text{mm}$ και η αλλαγή της ποιότητας του ανοξείδωτου χάλυβα σε Grade X70. Όσον αφορά το κόστος προμήθειας του αγωγού, σύμφωνα με στοιχεία από εργοστάσιο παραγωγής, αυτό διαμορφώνεται ανάλογα με το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα και την ποιότητα του ανοξείδωτου χάλυβα όπως αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1:Κόστος προμήθειας αγωγών

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

Για την εκτίμηση της επιρροής της μεθόδου απομείωσης των επιβαλλόμενων αξονικών/εγκάρσιων τάσεων στον αγωγό από το περιβάλλον έδαφος εξετάστηκε η αντικατάσταση του υλικού πλήρωσης της τάφρου με ελαφρόπετρα, μέσω της αντικατάστασης των εδαφικών ελατηρίων με αυτά που ανταποκρίνονται στις μειωμένες γεωστατικές τάσεις λόγω του μειωμένου ειδικού βάρους, τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

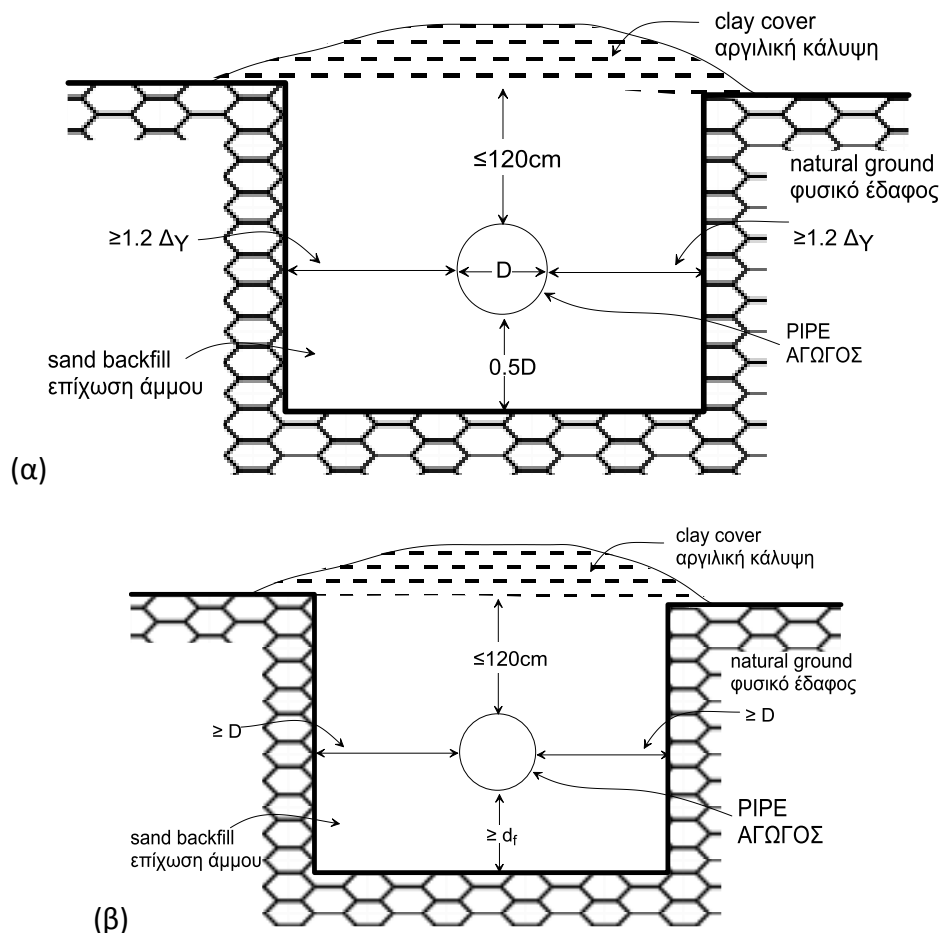
Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά ελατηρίων του εδάφους για την πλήρωση της τάφρου με ελαφρόπετρα ($\gamma = 8 \text{ kN/m}^3$)

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

Το κόστος της ελαφρόπετρας ελήφθη ίσο με 40€/m^3 , τιμή στην οποία περιλαμβάνεται η προμήθεια και μεταφορά της ελαφρόπετρας καθώς και η επίχωση του χάνδακα, κόστος το οποίο προστίθεται στο κόστος προμήθειας του απλού αγωγού (ποιότητα X65, πάχος τοιχώματος $t=12.5\text{mm}$). Για τον υπολογισμό του εμβαδού της τάφρου που θα καλυφθεί με ελαφρόπετρα χρησιμοποιήθηκαν οι διαστάσεις των Σχημάτων 5.1α και 5.1β, για την περίπτωση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης και ορθής διάρρηξης αντίστοιχα.

Τέλος, για την εκτίμηση της αύξησης της δυνατότητας ελεύθερης μετακίνησης του αγωγού στην περιοχή της διάρρηξης, εξετάστηκε η κατασκευή περιμετρικού υπόγειου κιβώτιου (culvert) όπως αυτό που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2, το οποίο

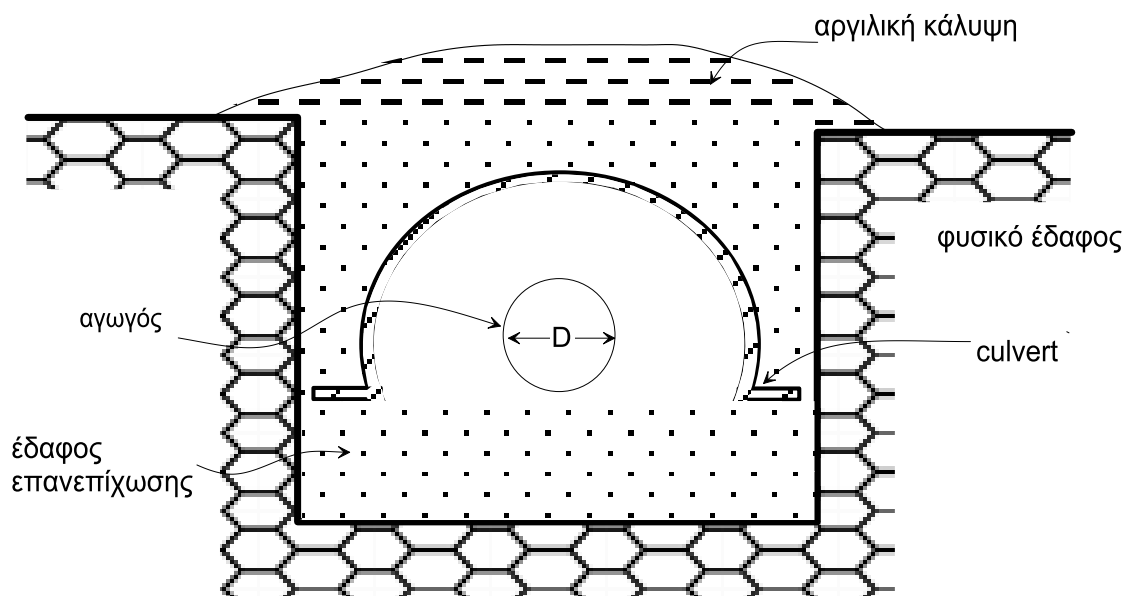
θεωρείται ότι προστατεύει πλήρως τον αγωγό από τις εγκάρσιες μετακινήσεις. Ωστόσο λόγω της αξονικής συνιστώσας Δx του ρήγματος και της καμπύλωσης του αγωγού εντός των κιβωτίων, ο αγωγός επιμηκύνεται και κατά συνέπεια αναπτύσσονται αξονικές τάσεις και παραμορφώσεις. Έτσι, για την εκτίμηση των ορίων εφαρμογής της μεθόδου, έγινε χρήση της αναλυτικής μεθοδολογίας των Karamitros et al. (2007, 2011), επιβάλλοντας μόνο την οριζόντια συνιστώσα της ασκούμενης μετακίνησης d_f κατά τον άξονα x (κατά μήκος του αγωγού), και θεωρήθηκε οριακό σημείο εφαρμογής της μεθόδου η μετακίνηση για την οποία η συγκεκριμένη συνιστώσα της προκαλεί παραμορφώσεις λόγω των αξονικών δυνάμεων ίσες με το όριο του 0.5%.



Σχήμα 5.1: Τυπική διατομή τάφρου τοποθέτησης αγωγού για την περίπτωση ρήγματος (α) οριζόντιας ολίσθησης και (β) ορθής διάρρηξης

Figure 5.1: Typical section of pipeline ditch for the case of (a) strike-slip and (b) normal fault.

Το κόστος προκατασκευής, μεταφοράς και τοποθέτησης των κυκλικών κιβωτίων (culvert) από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 15cm και ακτίνας 130cm κυμαίνεται περίπου στα 200€/m. Ωστόσο εκτός από το κόστος αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη και το κόστος υπερεκσκαφής του χάνδακα, για να είναι δυνατή η τοποθέτηση των κιβωτίων. Αν και το κόστος αυτό εξαρτάται από το υλικό εκσκαφής, ένα μέσο κόστος υπερεκσκαφής για συνήθη συνδυασμό εδαφών (έδαφος, ημίβραχος, βράχος) ανέρχεται περίπου στα 50€/m και περιλαμβάνει και τη μεταφορά και απόρριψη του εδαφικού υλικού. Οι υπερεκσκαφές αυτές είναι επιπρόσθετες των συνήθων εκσκαφών που ούτως ή άλλως γίνονται στις θέσεις των ενεργών ρηγμάτων, των οποίων το κόστος δε θα ληφθεί υπόψη, αφού είναι κοινό για όλες τις μεθόδους. Επιπρόσθετα, στα παραπάνω πρέπει να προστεθεί και το κόστος για την επανεπίχωση με διαβαθμισμένο υλικό, το οποίο κυμαίνεται περίπου στα 30€/m. Συνεπώς το συνολικό κόστος της συγκεκριμένης μεθόδου ανέρχεται στα 280€/m και αφορά ημι-κυλινδρικά κελύφη ακτίνας 130cm, μέσα στα οποία ο αγωγός μπορεί να δεχτεί μετακίνηση $\leq D$. Έτσι στην περίπτωση μεγαλύτερων επιβαλλόμενων μετακινήσεων, για να προκύψει το συνολικό κόστος της μεθόδου πολλαπλασιάστηκε το ποσό των 280€/m με το λόγο της επιβαλλόμενης μετακίνησης προς τη διάμετρο του αγωγού, d_f/D , ενώ στο ποσό αυτό προστέθηκε και το κόστος προμήθειας αγωγού εξωτερικής διαμέτρου $D=0.762m$, πάχους $t=12.5mm$ και χάλυβα API 5L Grade X65. Να σημειωθεί ότι το κόστος αυτό είναι ιδιαίτερα χαμηλό, γιατί αφορά προκατασκευασμένα κυκλικά κιβώτια και θεωρήθηκε ότι αυξάνεται γραμμικά (ευνοϊκή παραδοχή για το κόστος). Σε περιπτώσεις που δεν επαρκούν αυτά και πρέπει να κατασκευαστεί το κιβώτιο με συμβατικά μέσα (καλούπια) το κόστος εκτοξεύεται.



Σχήμα 5.2: Τυπική διατομή υπόγειου κιβωτίου (culvert) από οπλισμένο σκυρόδεμα

Figure 5.2: Typical section of concrete culvert for the protection of the pipeline.

Οι παραπάνω συμβατικές μεθοδολογίες αντιμετώπισης των εδαφικών μετατοπίσεων λόγω διάρρηξης ρήγματος συγκρίθηκαν με τη μέθοδο χρήσης εύκαμπτων κόμβων (ανά 6m ή 8m), σε ένα απλό αγωγό εξωτερικής διαμέτρου $D=0.762m$, πάχους $t=12.5mm$ και χάλυβα API 5L Grade X65. Για την περίπτωση που εξετάζεται θεωρήθηκε ότι επαρκούν επτά (7) εύκαμπτοι κόμβοι, έτσι να υπάρχουν τουλάχιστον 3 κόμβοι εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος σε κάθε περίπτωση.

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

Πρέπει να σημειωθεί, τέλος, ότι για την ανάλυση κόστους στο κεφάλαιο αυτό, θεωρήθηκε ότι γνωρίζουμε με ακρίβεια τη θέση του ρήγματος. Στην περίπτωση αβεβαιότητας στη θέση του ρήγματος, όλες οι μέθοδοι θα πρέπει να εφαρμοστούν

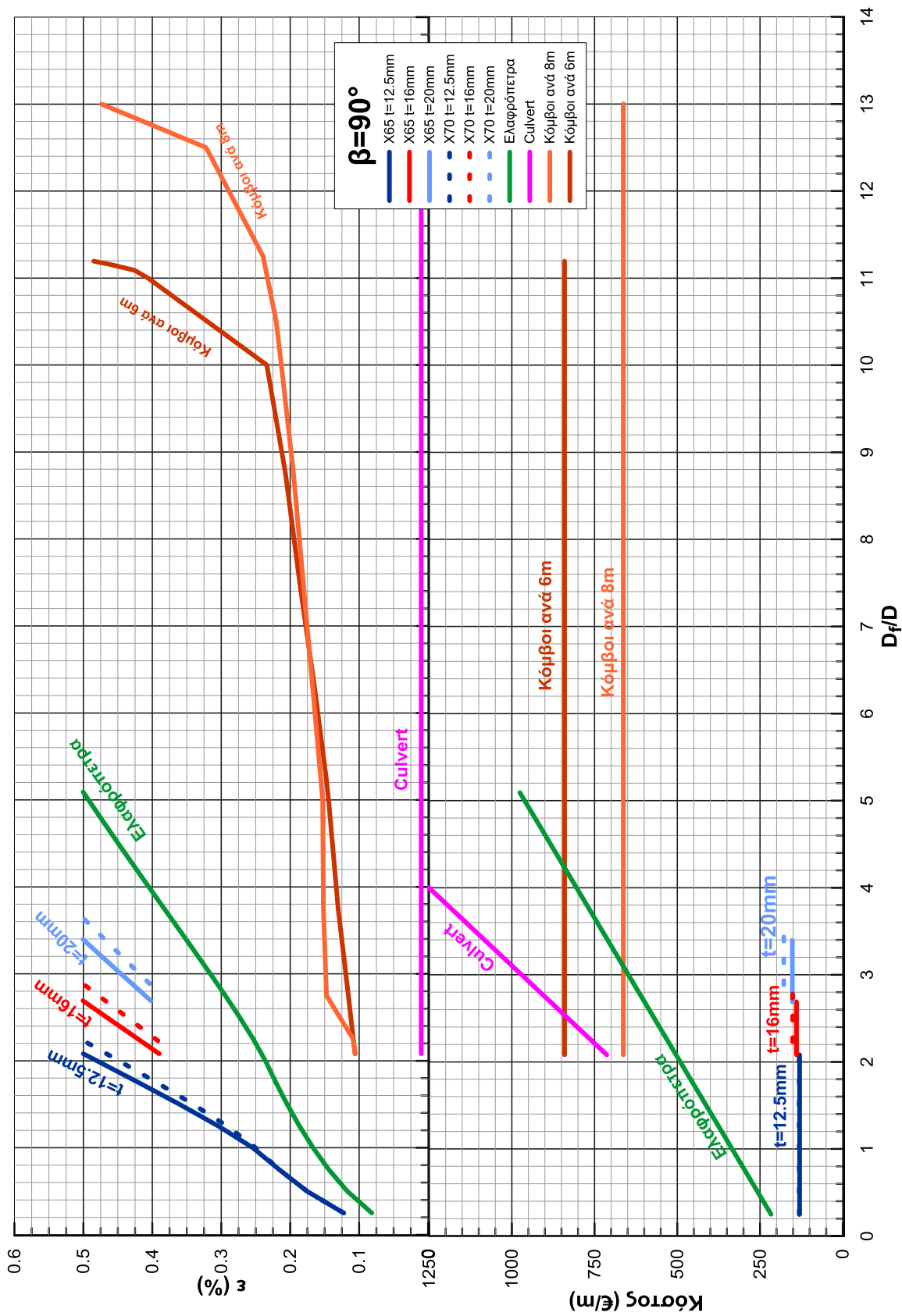
σε μεγαλύτερο μήκος, αλλά οι προκύπτουσες σχέσεις κόστους ανά μέτρο μήκους θα παραμείνουν περίπου σταθερές.

5.3 Σύγκριση μεθόδων ως προς την αποδοτικότητα και το κόστος για την περίπτωση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης

Για να συγκριθούν οι μέθοδοι αντιμετώπισης των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό, διαμορφώθηκαν διαγράμματα που παρουσιάζονται οι μέγιστες αναπτυσσόμενες αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού και το ανηγμένο κόστος του, ως προς τον λόγο της μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού, D_f/D . Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα κάθετα (γωνία 90°) και στο Σχήμα 5.4 υπό γωνία 60° .

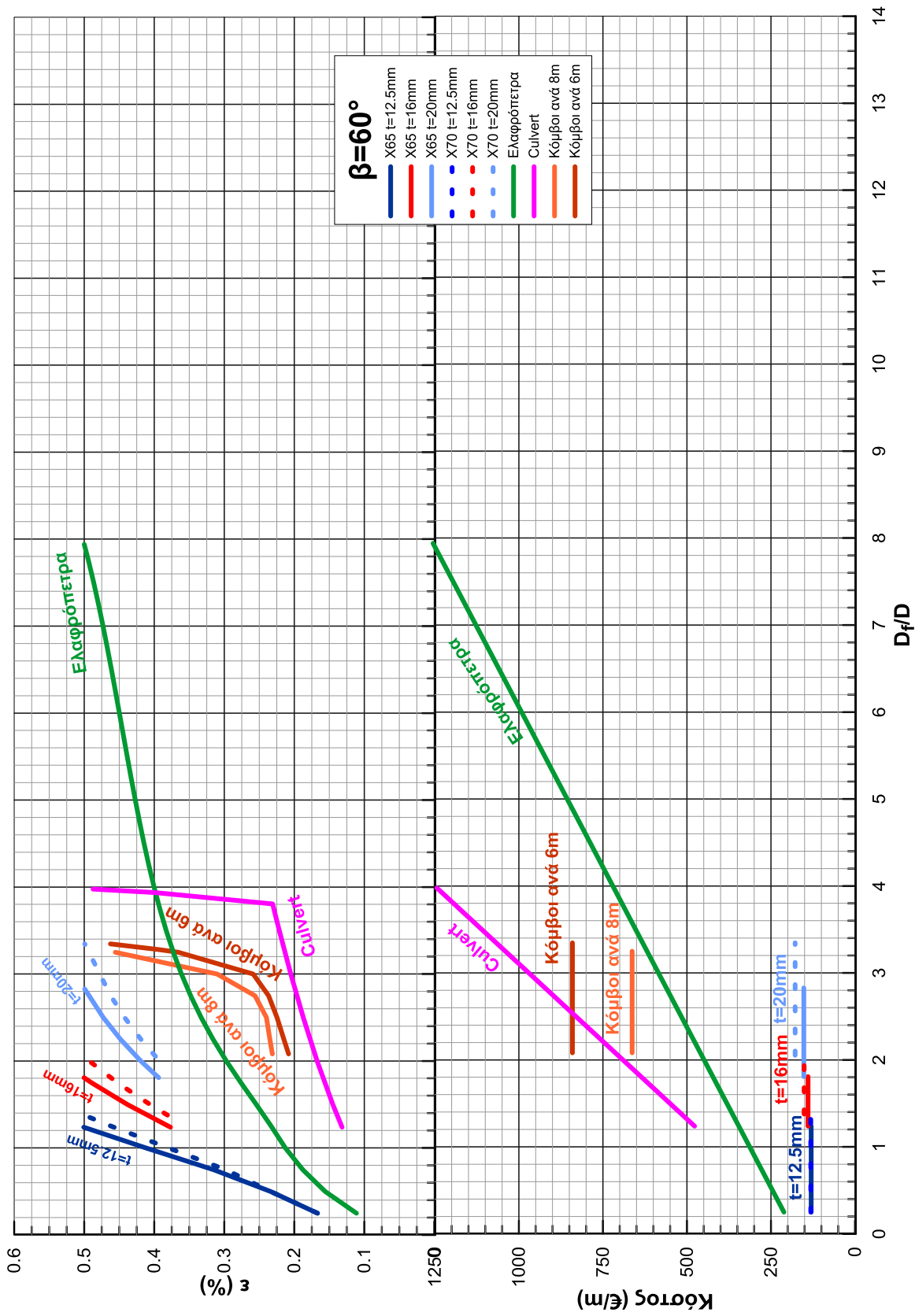
Από τα δύο σχήματα γίνεται φανερό ότι η αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού, παρόλο που πρακτικά αποτελεί τον ευκολότερο και επικρατέστερο τρόπο αντιμετώπισης των επαυξημένων παραμορφώσεων λόγω διάρρηξης ρηγμάτων, δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις μεγάλων επιβαλλόμενων μετατοπίσεων (μεγαλύτερων από $3.6D$ για διασταύρωση ρήγματος στις 90° και μεγαλύτερων του $3.35D$ για διασταύρωση ρήγματος στις 60°). Το κόστος κατασκευής του αγωγού για την περίπτωση αλλαγής του πάχους της διατομής από $t=12.5\text{mm}$ σε $t=20\text{mm}$, αυξάνεται κατά 16% για ποιότητα χάλυβα API 5L Grade X65, και 35% για ποιότητα χάλυβα API 5L Grade X70.

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



Σχήμα 5.3: Διαγράμματα μέγιστων αναπτυσσόμενων αξονικών παραμορφώσεων και κόστους συναρτήσει του λόγου της μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού για κάθε εναλλακτική μέθοδο σε γωνία διασταύρωσης ρήγματος με αγωγό στις 90°.

Figure 5.3: Diagrams of the developing axial strains and cost versus the fault offset to pipe diameter ratio, for each alternative design method, for fault crossing angle equal to 90°.



Σχήμα 5.4: Διαγράμματα μέγιστων αναπτυσσόμενων αξονικών παραμορφώσεων και κόστους συναρτήσει του λόγου της μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού για κάθε εναλλακτική μέθοδο σε γωνία διασταύρωσης ρήγματος με αγωγό στις 60°

Figure 5.4: Diagrams of the developing axial strains and cost versus the fault offset to pipe diameter ratio, for each alternative design method, for fault crossing angle equal to 60°.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.3 για γωνία διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό στις 90°, η χρήση ελαφρόπετρας για την επίχωση της τάφρου παρατηρείται να έχει μέτρια επιρροή στην απομείωση των παραμορφώσεων, καθώς προστατεύει τον αγωγό από επιβαλλόμενες μετατοπίσεις μέχρι 5D περίπου. Ωστόσο είναι δυσεύρετη σε μεγάλες ποσότητες και αποτελεί οικονομικά ακριβή λύση (σε σχέση και την απόδοση και το κόστος των εύκαμπτων κόμβων) για μέτριες μετατοπίσεις. Αντίθετα για την περίπτωση πρόσπτωσης ρήγματος με τον αγωγό στις 60°, η χρήση ελαφρόπετρας φαίνεται να είναι η λύση που επιτρέπει την παραλαβή των μέγιστων μετατοπίσεων αφού για να αστοχήσει ο αγωγός η μετακίνηση που προκαλεί το ρήγμα φτάνει μέχρι και τα 7.95D. Η διαπίστωση αυτή συμβαδίζει με το συμπέρασμα ότι όταν ο αγωγός παραλαμβάνει κατά κύριο λόγο αξονικές παραμορφώσεις λόγω της γωνίας διασταύρωσης με το ρήγμα, η ελαφρόπετρα που απομειώνει αισθητά τη τριβή μεταξύ αγωγού και εδάφους, αποτελεί πολύ αποτελεσματική μέθοδο.

Η χρήση εύκαμπτων κόμβων ανά 6m και 8m παρουσιάζει να έχει τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα (με εξαίρεση την κατασκευή περιμετρικού κιβωτίου) για την περίπτωση διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό στις 90° (Σχήμα 5.3), αφού οι επιβαλλόμενες μετακινήσεις του ρήγματος ξεπερνάνε τα 10D, ενώ το κόστος τους είναι μικρό σε σχέση με την απόδοση και το κόστος άλλων μεθόδων. Στην περίπτωση διασταύρωσης ρήγματος με αγωγό στις 60°, όταν οι κόμβοι είναι τοποθετημένοι ανά 8m και 6m η επιβαλλόμενη μετακίνηση που μπορεί να παραλάβει με ασφάλεια ο αγωγός φτάνει τα 3.25D, και τα 3.35D αντίστοιχα, ενώ το κόστος της είναι μεγαλύτερο από αυτό με χρήση ελαφρόπετρας.

Η προστασία του αγωγού από υπόγεια κιβώτια (culvert) οπλισμένου σκυροδέματος κατάλληλου πλάτους αντίστοιχου με την αναμενόμενη μετακίνηση του ρήγματος πρόκειται για μέθοδο που μπορεί να εφαρμοστεί επί της ουσίας ανεξαρτήτως μεγέθους μετατόπισης του ρήγματος, ενώ για την περίπτωση που ο αγωγός διασταυρώνεται στις 60° μπορεί να εφαρμοστεί μέχρι και για μετακίνηση ρήγματος 4D. Το κόστος της μεθόδου όμως είναι ιδιαίτερα ακριβότερο από το κόστος εφαρμογής των μεθόδων με ελαφρόπετρα ή εύκαμπτους κόμβους, ειδικά για μεγάλες μετατοπίσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι το σχετικά χαμηλό κόστος ανά

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

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

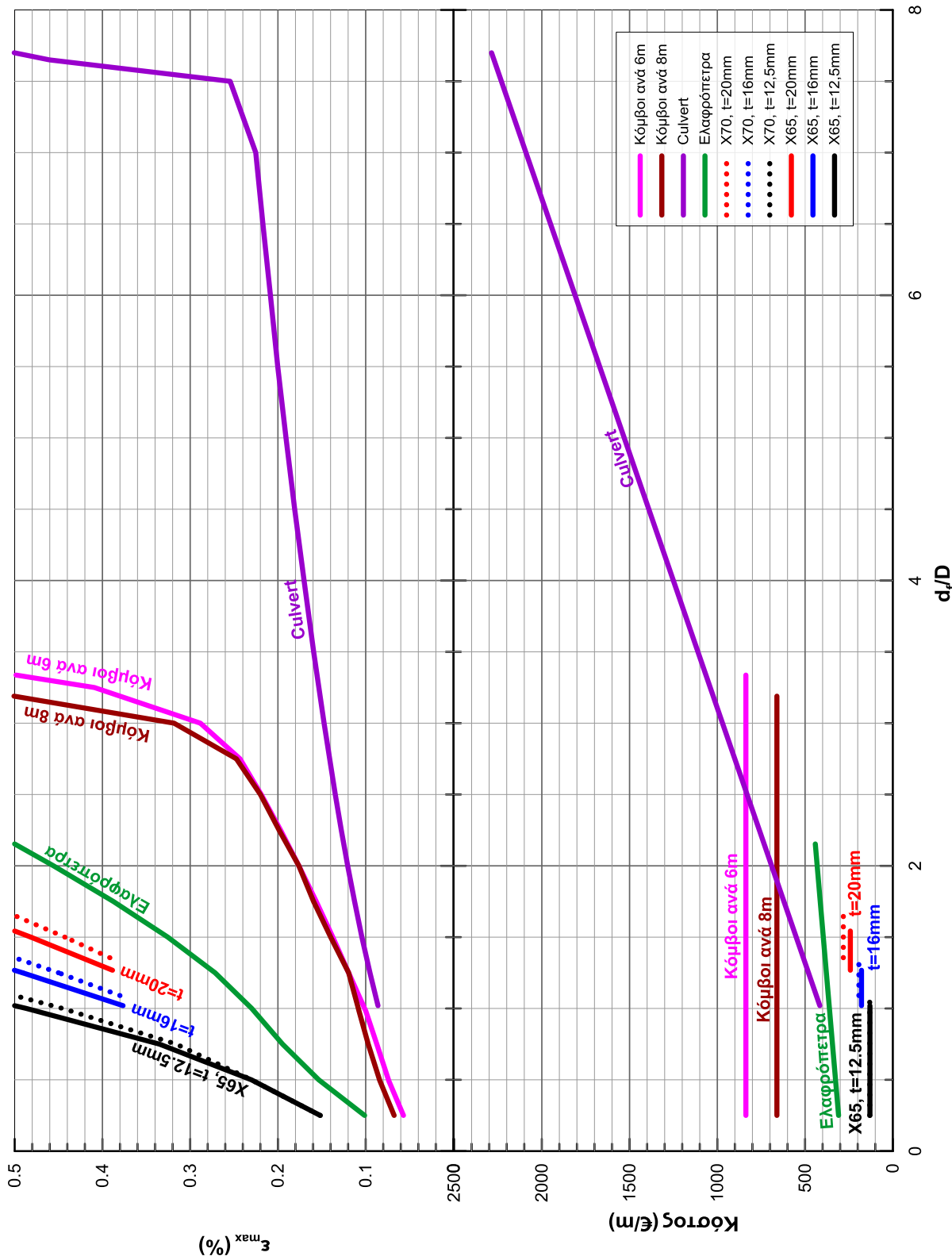
Όσον αφορά την απόδοση των εύκαμπτων κόμβων σε σχέση με το κόστος στην περίπτωση όπου η διασταύρωση ρήγματος με τον αγωγό είναι στις 60° δεν αποτελεί την βέλτιστη λύση αφού η χρήση ελαφρόπετρας μειώνει επαρκώς τις παραμορφώσεις και κοστίζει λιγότερο. Φυσικά η χρήση εύκαμπτων κόμβων αποτελεί και σε αυτή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

5.4 Σύγκριση μεθόδων ως προς την αποδοτικότητα και το κόστος για την περίπτωση ρήγματος ορθής διάρρηξης

Για την περίπτωση κανονικών ρηγμαίων στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα σύγκρισης των μέγιστων αναπτυσσόμενων αξονικών παραμορφώσεων και του ανηγμένου κόστους της κάθε μεθόδου, συναρτήσει του λόγου της μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού, d_f/D .

Και σε αυτή την περίπτωση η αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού δε μπορεί να αξιοποιηθεί στις περιπτώσεις μεγάλων επιβαλλόμενων μετατοπίσεων (μεγαλύτερων από 1.6D). Το κόστος εφαρμογής της μεθόδου αυξάνεται έως και 85% με την αύξηση του πάχους της διατομής του αγωγού από $t=12,5\text{mm}$ σε $t=20\text{mm}$, αλλά γίνεται εμφανές από το σχήμα ότι για μικρές μετατοπίσεις ($\leq 1.6D$) η αύξηση του πάχους αποτελεί την πιο συμφέρουσα λύση, καθώς όλες οι άλλες μέθοδοι παρουσιάζουν ακόμη μεγαλύτερο κόστος.

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



Σχήμα 5.5: Διαγράμματα μέγιστων αναπτυσσόμενων αξονικών παραμορφώσεων και κόστους συναρτήσει του λόγου της μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού για κάθε εναλλακτική μέθοδο ($\psi=75^\circ$).

Figure 5.5: Diagrams of the developing axial strains and cost versus the fault offset to pipe diameter ratio, for each alternative design method, for fault plane equal to 75° .

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

Η προστασία του αγωγού από υπόγεια κιβώτια (culvert) οπλισμένου σκυροδέματος κατάλληλων διαστάσεων, αντίστοιχων με την αναμενόμενη μετακίνηση του ρήγματος, πρόκειται για μέθοδο μεγάλης αποδοτικότητας, αφού όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.5 μπορεί να εφαρμοστεί και για πολύ μεγάλες μετατοπίσεις (μέχρι και 7.7D). Ωστόσο το κόστος εκτοξεύεται κατακόρυφα, γεγονός το οποίο καθιστά τη μέθοδο ιδιαίτερως αντικοινομική για μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες και για μεγάλες αναμενόμενες μετακινήσεις, όπου το μήκος του αγωγού που πρέπει να προστατευθεί ανέρχεται σε εκατοντάδες μέτρα. Επιπροσθέτως, πρέπει να σημειωθεί ότι το σχετικά χαμηλό κόστος ανά μέτρο μήκους που λήφθηκε υπόψη για τα διαγράμματα, αφορά προκατασκευασμένα κυκλικά κιβώτια και θεωρήθηκε απλή γραμμική αύξηση με το μέγεθος της μετατόπισης. Στην πραγματικότητα σε περιπτώσεις μεγάλων μετατοπίσεων το εξωτερικό περίβλημα (culvert) θα πρέπει να κατασκευαστεί με συμβατικές μεθόδους σκυροδέτησης (καλούπια) με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος. Επιπλέον, το κόστος για την απαιτούμενη υπερεκσκαφή, ώστε να τοποθετηθεί το κιβώτιο, αυξάνεται δυσανάλογα με την αύξηση της διαμέτρου του περιβλήματος.

Όσον αφορά τη χρήση εύκαμπτων κόμβων, παρατηρείται ότι αποτελεί μέτρο μεγάλης αποδοτικότητας για μεγάλες επιβαλλόμενες μόνιμες μετακινήσεις. Πιο συγκεκριμένα η χρήση εύκαμπτων κόμβων ανά 8m προστατεύει τον αγωγό από επιβαλλόμενες μετακινήσεις έως και 3.2D και αντίστοιχα ανά 6m από μετακινήσεις έως και 3.3D, έχοντας έτσι τη μεγαλύτερη ευμενή επιρροή στη μείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό από όλες τις προαναφερθέντες μεθόδους, πλην του εξωτερικού περιβλήματος (culvert). Επίσης αναφορικά με το

κόστος, η χρήση εύκαμπτων κόμβων είτε ανά 6m είτε ανά 8m αποτελεί να μεν ακριβότερη λύση από τη χρήση ελαφρόπετρας για μετατοπίσεις μέχρι 2.15D, αλλά για μεγαλύτερες μετατοπίσεις αποτελεί τη φθηνότερη και αποδοτικότερη μέθοδο, καθώς το κόστος της είναι μικρότερο της κατασκευής εξωτερικού περιβλήματος (culvert). Παράλληλα αξίζει να σημειωθεί ότι κατασκευαστικά δε χρειάζεται καμία πρόσθετη πρόβλεψη, εφόσον οι κόμβοι απλά συγκολλούνται στις προβλεπόμενες θέσεις, όπως τα υπόλοιπα τμήματα του αγωγού.

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

6

Εκτενής Περίληψη - Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας ενότητας εργασίας (ΕΕ-12), έγινε συγκριτική αποτίμηση της μεθόδου σχεδιασμού υπόγειων αγωγών έναντι μεγάλων εδαφικών μετατοπίσεων με εύκαμπτους κόμβους, προκειμένου να εκτιμηθεί η ακρίβεια που προσφέρει, το εύρος εφαρμογής της καθώς και η τεχνικό-οικονομική αποτελεσματικότητά της. Πιο συγκεκριμένα, έγινε αξιολόγηση της μεθόδου σχεδιασμού για την περίπτωση αγωγού που τέμνει ρήγμα (α) οριζόντιας ολίσθησης και (β) ορθής διάρρηξης.

Διασταύρωση με ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης. Έγινε παραμετρική αξιολόγηση της μεθόδου όσον αφορά την απόσταση μεταξύ των κόμβων L (από 6m έως 12m), το μέγεθος της διάρρηξης d_f (από 0.75m έως 3.00m), τη γωνία διασταύρωσης β του αγωγού με το ίχνος του ρήματος (από 30° έως 90°) και τη θέση διασταύρωσης ανάμεσα ή ακριβώς στη θέση ενός κόμβου.

Από την **παραμετρική διερεύνηση** διαπιστώθηκε ότι ο σχεδιασμός με εύκαμπτους κόμβους μπορεί να μειώσει δραστικά τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό και έως 86.5%, όταν διασταυρώνεται κάθετα με το ρήγμα ($\beta=90^\circ$), έως 72.9%, όταν διασταυρώνεται με το ρήγμα με μεγάλη γωνία ($\beta \geq 60^\circ$), ενώ η επιρροή τους είναι ουσιαστικά μηδαμινή όταν διασταυρώνεται με το ρήγμα με μικρές γωνίες ($\beta < 45^\circ$), οπότε και οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις οφείλονται κατά κύριο λόγο στις αξονικές τάσεις λόγω εφελκυσμού του αγωγού από το ρήγμα και όχι σε κάμψη. Κατά συνέπεια η προτεινόμενη εναλλακτική μέθοδος σχεδιασμού μπορεί να αξιοποιηθεί για την ενίσχυση υπόγειων αγωγών σε περιπτώσεις μεγάλων εδαφικών

μετατοπίσεων λόγω της διάρρηξης οριζόντιων ρηγμάτων, στο βαθμό που ο αγωγός σχεδιαστεί έτσι ώστε να διέρχεται το κατά δύναμη κάθετα ως προς το ίχνος του ρήγματος ($\beta \rightarrow 90^\circ$).

Από τις δύο προτεινόμενες μεθοδολογίες εκτίμησης της συμπεριφοράς του αγωγού με εύκαμπτους κόμβους, η αριθμητική μεθοδολογία υπερτερεί προφανώς σε ακρίβεια, αλλά απαιτεί σημαντικό χρόνο και κόστος εφαρμογής. Από την εκτενή **σύγκριση της αναλυτικής μεθοδολογίας με τις αριθμητικές αναλύσεις**, κρίνεται όμως ότι και η προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία προσεγγίζει ικανοποιητικά το μηχανισμό του φαινομένου και δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα για το σύνολο σχεδόν των περιπτώσεων που εξετάστηκαν. Επιπροσθέτως, μέσα από την εποπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών και αριθμητικών επιλύσεων και των σχετικών σφαλμάτων κάθε μεγέθους, καθορίστηκαν τα παρακάτω όρια εφαρμογής της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας:

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

Διευκρινίζεται ότι τα προαναφερθέντα όρια δε θα πρέπει να εκληφθούν ως απαγορευτικός περιορισμός στη χρήση της αναλυτικής μεθοδολογίας, δεδομένου ότι η χρήση εύκαμπτων κόμβων μας ενδιαφέρει για περιπτώσεις μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων ($> 2.5-3.0 D$), ενώ όταν ο αγωγός διασταυρώνεται με το ρήγμα υπό μικρή γωνία, η χρήση κόμβων δεν ενδείκνυται, εφόσον οι παραμορφώσεις στον αγωγό οφείλονται κατά κύριο λόγο από τις αξονικές μετατοπίσεις και η χρήση στροφικών κόμβων δεν απομειώνει ουσιαστικά τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις.

Από την **οικονομοτεχνική σύγκριση** που ακολούθησε, διαπιστώθηκαν επιπλέον τα ακόλουθα όρια για την ορθολογιστική εφαρμογή των διάφορων μεθόδων σχεδιασμού έναντι ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης που διασταυρώνονται κάθετα με τον αγωγό:

- Αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού για μικρές και μεσαίες μετατοπίσεις $d_f \leq 3.5D$.
- Χρήση εύκαμπτων κόμβων για μεγαλύτερες μετατοπίσεις $d_f > 3.5D$.
- Η χρήση περιμετρικών κιβωτίων είναι μια ασφαλής λύση αλλά δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα, αφού όσο αυξάνεται η επιβαλλόμενη μετατόπιση ρήγματος αυξάνεται υπέρογκα και το κόστος της συγκεκριμένης λύσης.

Για την περίπτωση που ο αγωγός διασταυρώνεται υπό γωνία με το ρήγμα, διαπιστώθηκε ότι η βέλτιστη λύση είναι:

- Αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού για μικρές και μεσαίες μετατοπίσεις $d_f \leq 3.3D$.
- Αντικατάσταση του εδάφους επίχωσης με ελαφρόπετρα για μεγαλύτερες μετατοπίσεις $d_f > 3.5D$.
- Η χρήση εύκαμπτων κόμβων ή η κατασκευή εξωτερικού περιβλήματος αποτελούν πιο ακριβή λύση από τη χρήση ελαφρόπετρας, αλλά αποτελούν εναλλακτικό τρόπο σχεδιασμού σε περιοχές που δεν είναι εύκολο ή οικονομικά συμφέρον να μεταφερθεί η απαραίτητη ελαφρόπετρα.

Διασταύρωση με ρήγμα ορθής διάρρηξης.— Έγινε παραμετρική αξιολόγηση της μεθόδου όσον αφορά την απόσταση μεταξύ των κόμβων L (από 6m έως 12m), το μέγεθος της διάρρηξης d_f (από 0.375m έως 1.50m), τη γωνία ψ του επιπέδου του ρήγματος (από 60° έως 90°) και τη θέση διασταύρωσης ανάμεσα ή ακριβώς στη θέση ενός κόμβου.

Από την **παραμετρική διερεύνηση** διαπιστώθηκε ότι ο σχεδιασμός με εύκαμπτους κόμβους μπορεί να μειώσει δραστικά τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό έως 87.5%, στη θεωρητική περίπτωση που το επίπεδο διάρρηξης του ρήγματος είναι κάθετο ($\psi=90^\circ$), ενώ η ευεργετική δράση των κόμβων μειώνεται σε 83.3% και 71.5%, για τις πιο συνήθεις περιπτώσεις ορθών ρηγμάτων με κλίση 75° και 60° αντίστοιχα.

Από τις δύο προτεινόμενες μεθοδολογίας εκτίμησης της συμπεριφοράς του αγωγού με εύκαμπτους κόμβους, η αριθμητική μεθοδολογία υπερτερεί προφανώς σε

ακρίβεια, αλλά απαιτεί σημαντικό χρόνο και κόστος εφαρμογής. Από την εκτενή **σύγκριση της αναλυτικής μεθοδολογίας με τις αριθμητικές αναλύσεις**, κρίνεται όμως ότι και η προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία προσεγγίζει ικανοποιητικά το μηχανισμό του φαινομένου και δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα για το σύνολο σχεδόν των περιπτώσεων που εξετάστηκαν. Επιπροσθέτως, μέσα από την εποπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών και αριθμητικών επιλύσεων και των σχετικών σφαλμάτων κάθε μεγέθους, καθορίστηκαν τα παρακάτω όρια εφαρμογής της προτεινόμενης αναλυτικής μεθοδολογίας:

- Κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος μεγαλύτερη από μία φορά τη διάμετρο του αγωγού ($D_f > D$)
- Απόσταση μεταξύ διαδοχικών κόμβων μικρότερη των 12m.

Διευκρινίζεται ότι τα προαναφερθέντα όρια δε θα πρέπει να εκληφθούν ως απαγορευτικός περιορισμός στη χρήση της αναλυτικής μεθοδολογίας, δεδομένου ότι η χρήση εύκαμπτων κόμβων μας ενδιαφέρει για περιπτώσεις μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων ($>1.0 D$), ενώ όταν η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κόμβων είναι μεγάλη, οι κόμβοι δεν έχουν την απαιτούμενη ευεργετική δράση στην απομείωση των παραμορφώσεων του αγωγού και δε συνίσταται.

Από την **οικονομοτεχνική σύγκριση** που ακολούθησε, διαπιστώθηκαν επιπλέον τα ακόλουθα όρια για την ορθολογιστική εφαρμογή των διάφορων μεθόδων σχεδιασμού έναντι κανονικών ρηγμάτων:

- Αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού για μικρές μετατοπίσεις $d_f \leq 1.5D$.
- Χρήση ελαφρόπετρας για $1.5D < d_f \leq 2.0D$.
- Χρήση εύκαμπτων κόμβων για $2.0D < d_f \leq 3.5D$.
- Για μεγάλες μετατοπίσεις $d_f > 3.3D$ συνίσταται η προστασία του αγωγού από υπόγεια κιβώτια (culvert) οπλισμένου σκυροδέματος.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

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

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

American Society of Civil Engineers -ASCE- (1984), "Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems", Committee on Gas and Liquid Fuel Pipelines, ASCE, 473p.

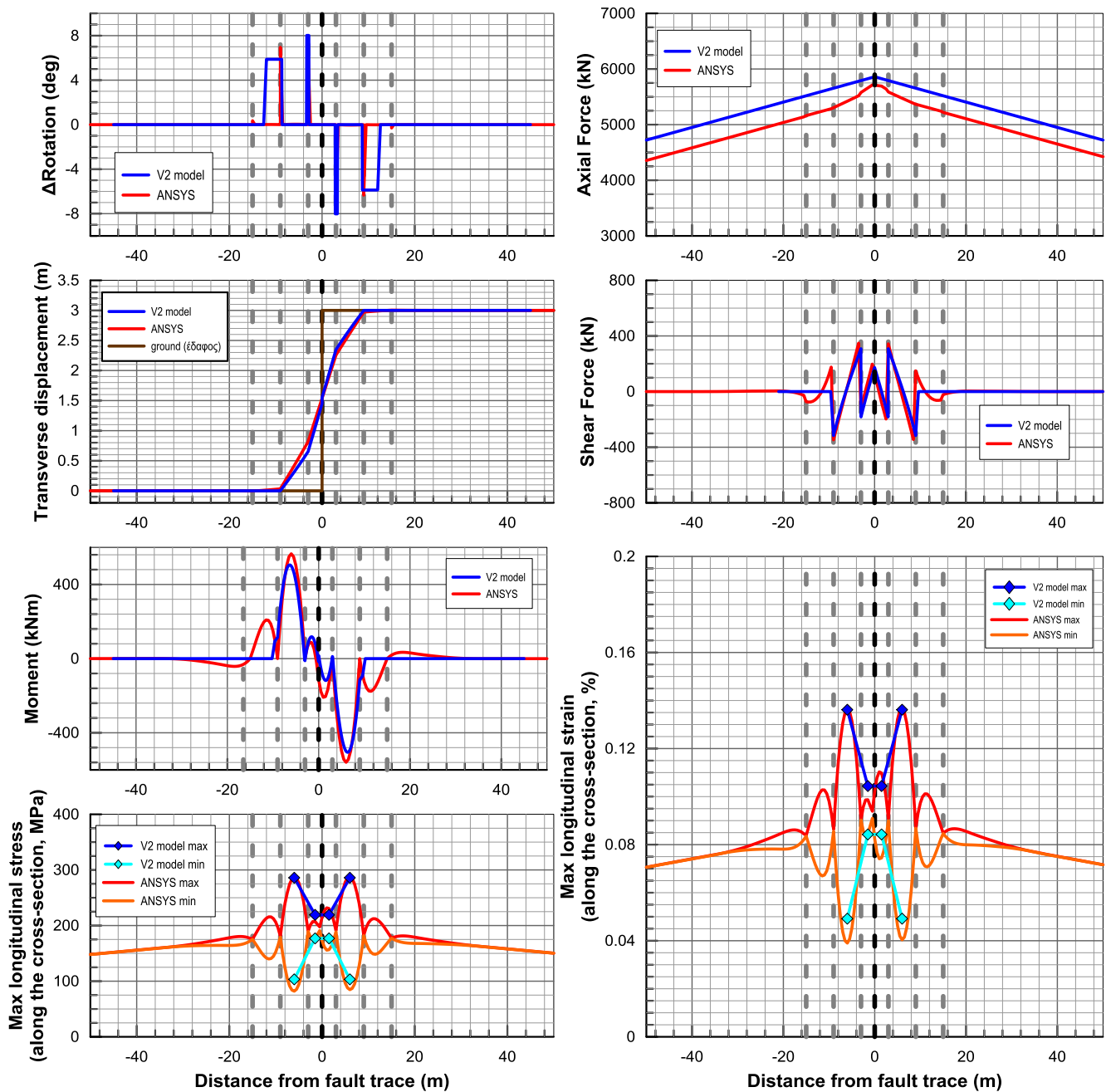
Karamitros D. K., Bouckovalas G. D. & Kouretzis G. P., (2007), "Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27, pp. 200–211.

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.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Αναλυτικές και Αριθμητικές επιλύσεις: Ρήγματα Οριζόντιας Ολίσθησης

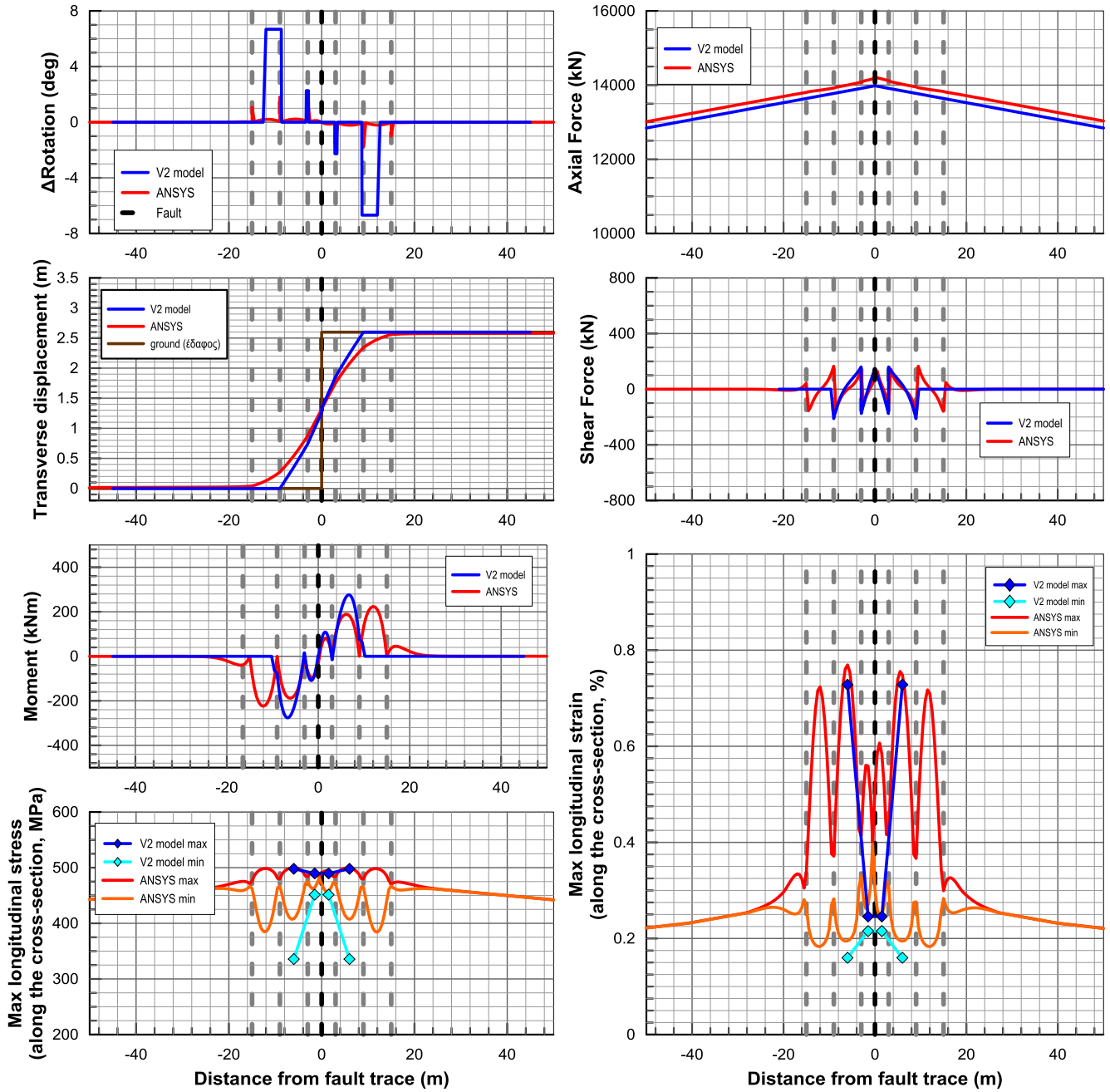
Α.1. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=3m$

$\beta=90^\circ$



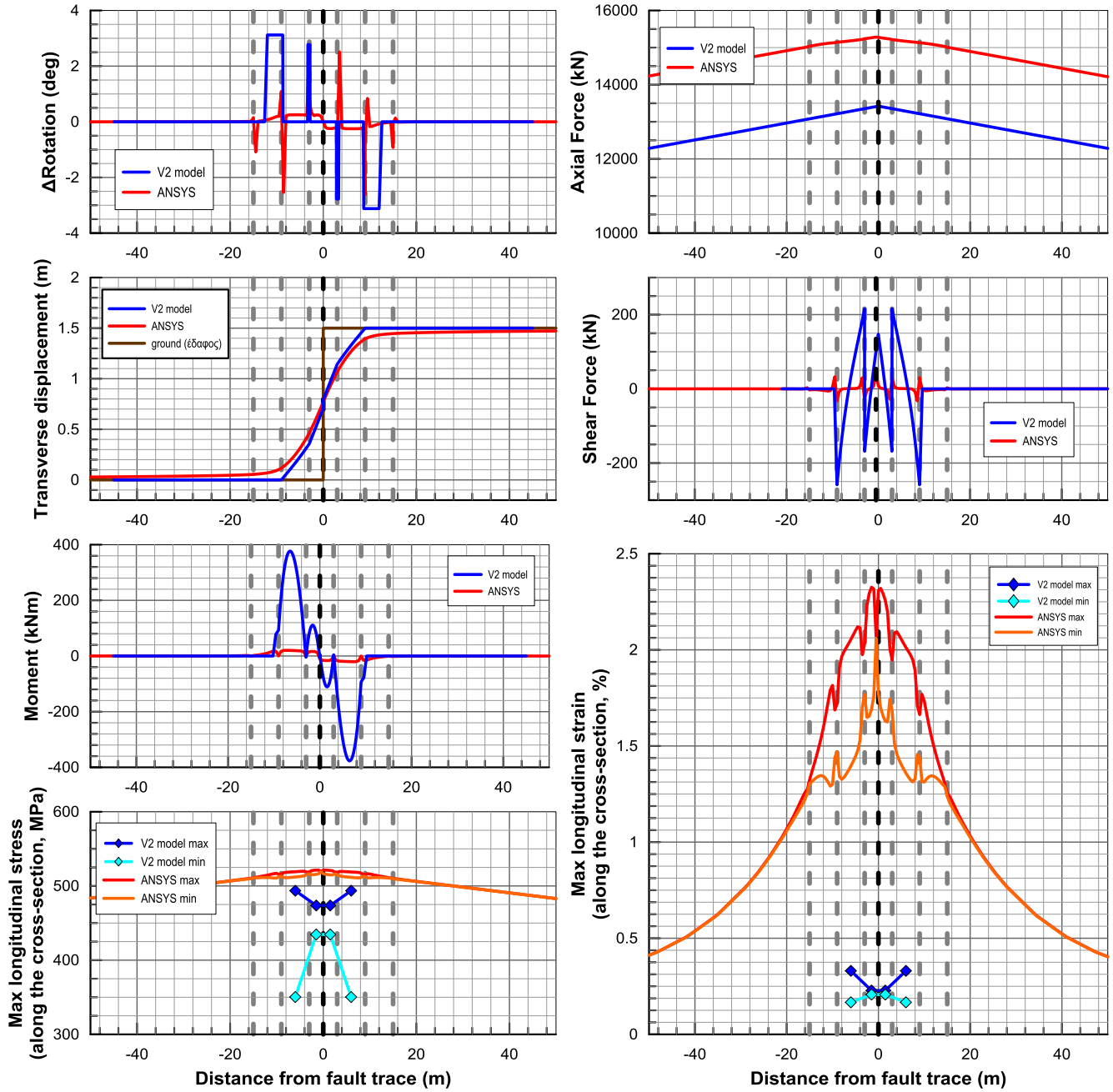
A.2. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – Df=3m

$\beta=60^\circ$



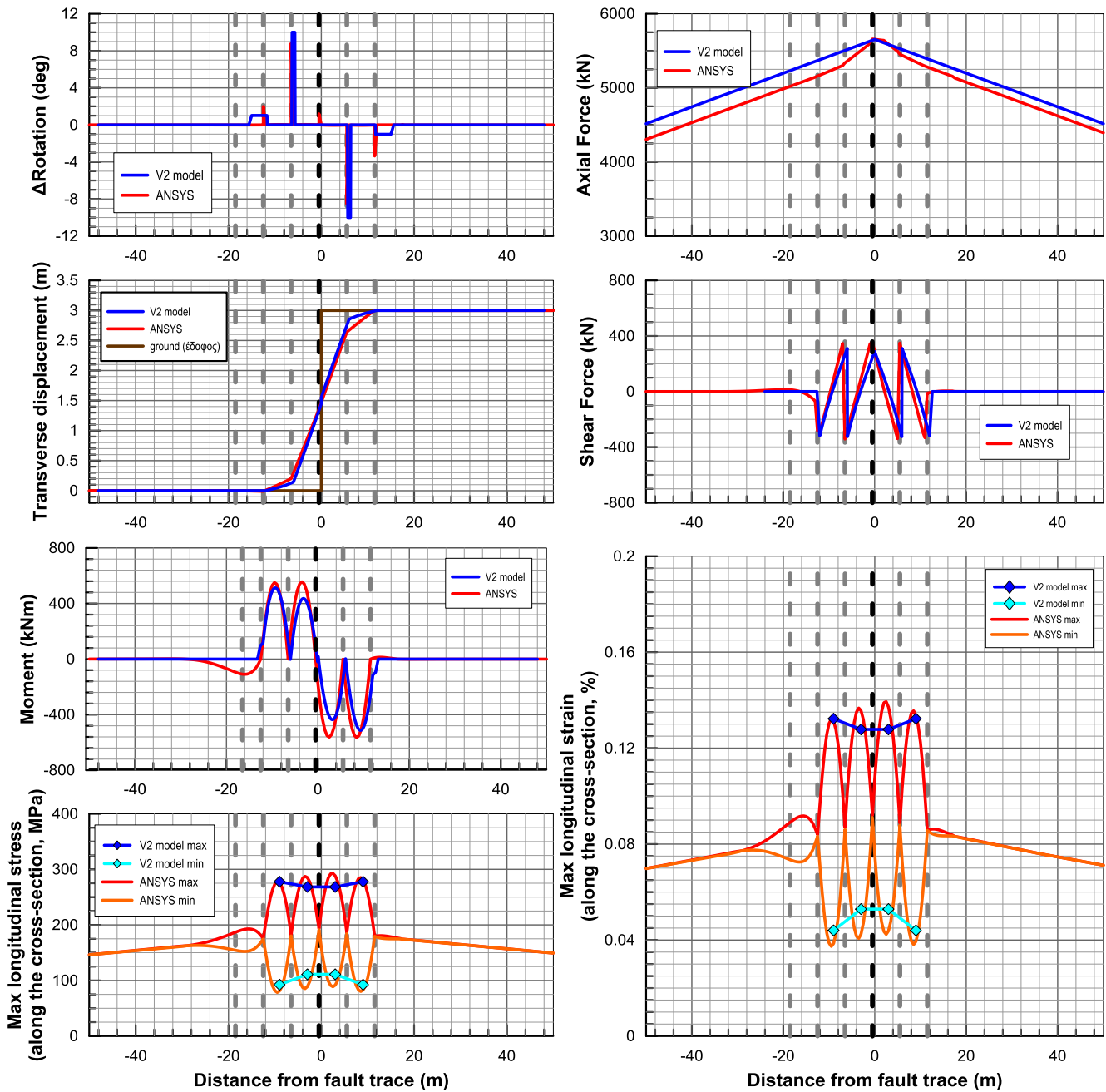
A.3. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – Df=3m

$\beta=30^\circ$



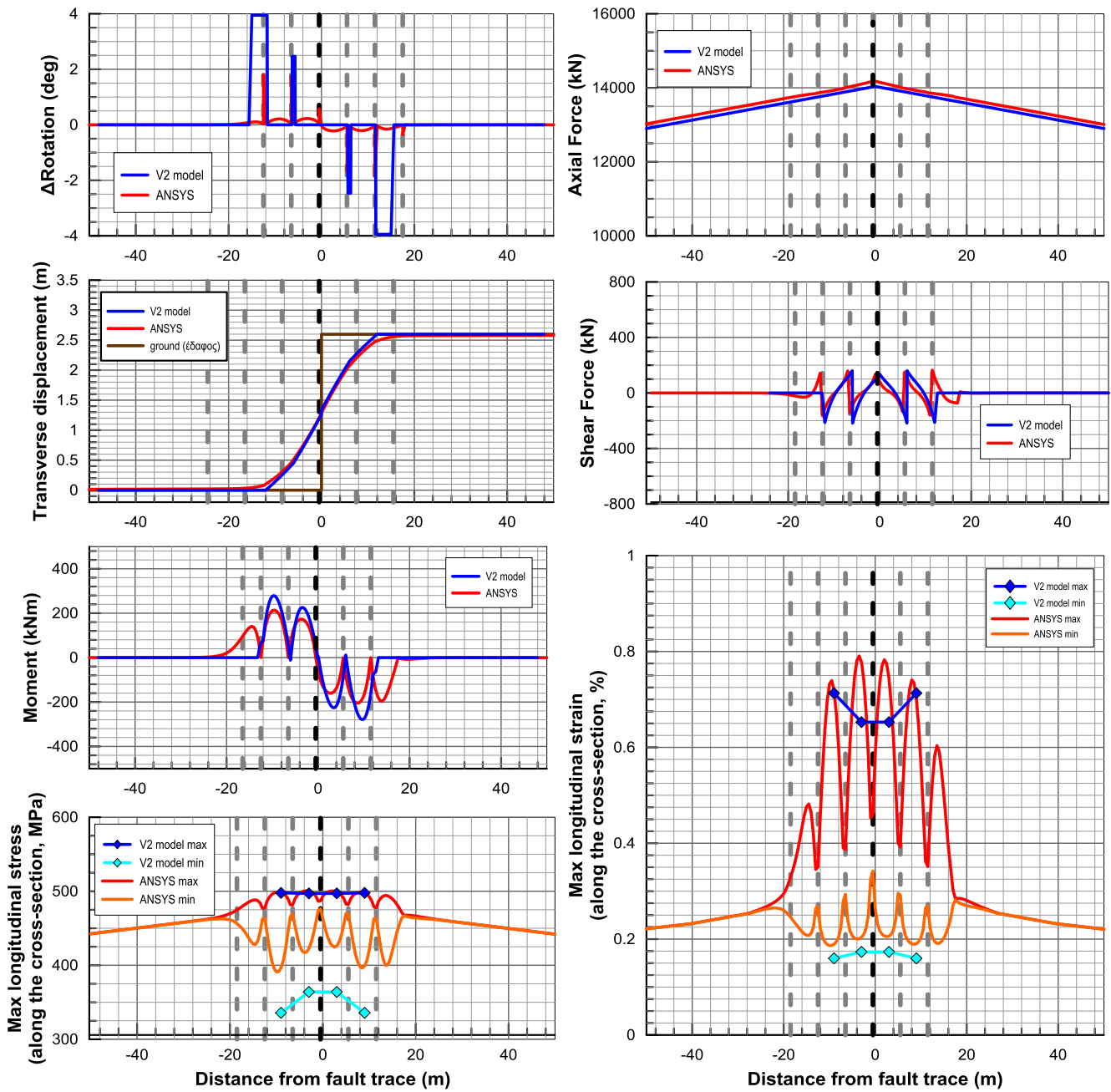
A.4. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=3m$

$\beta=90^\circ$



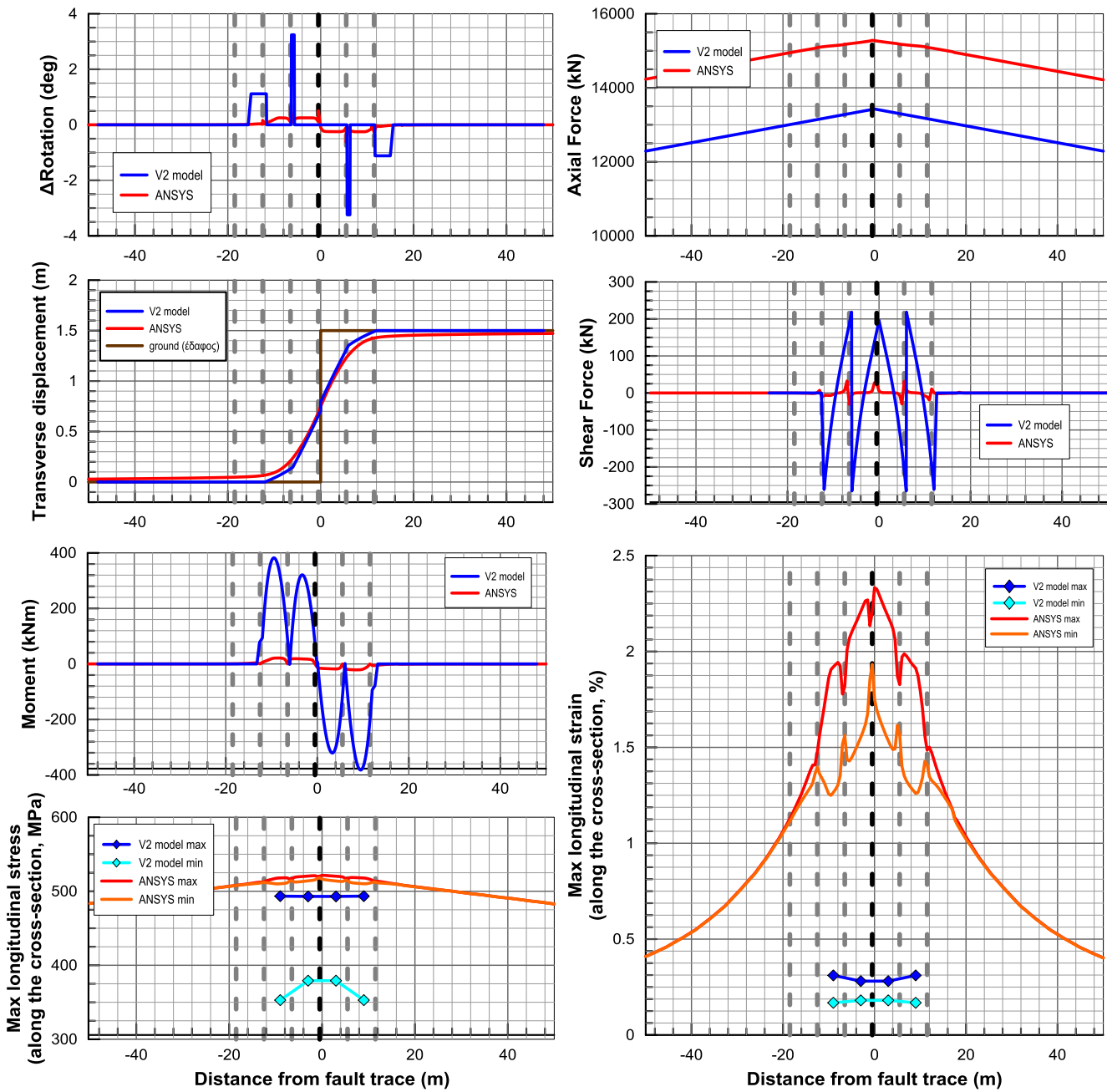
A.5. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=3m$

$\beta=60^\circ$



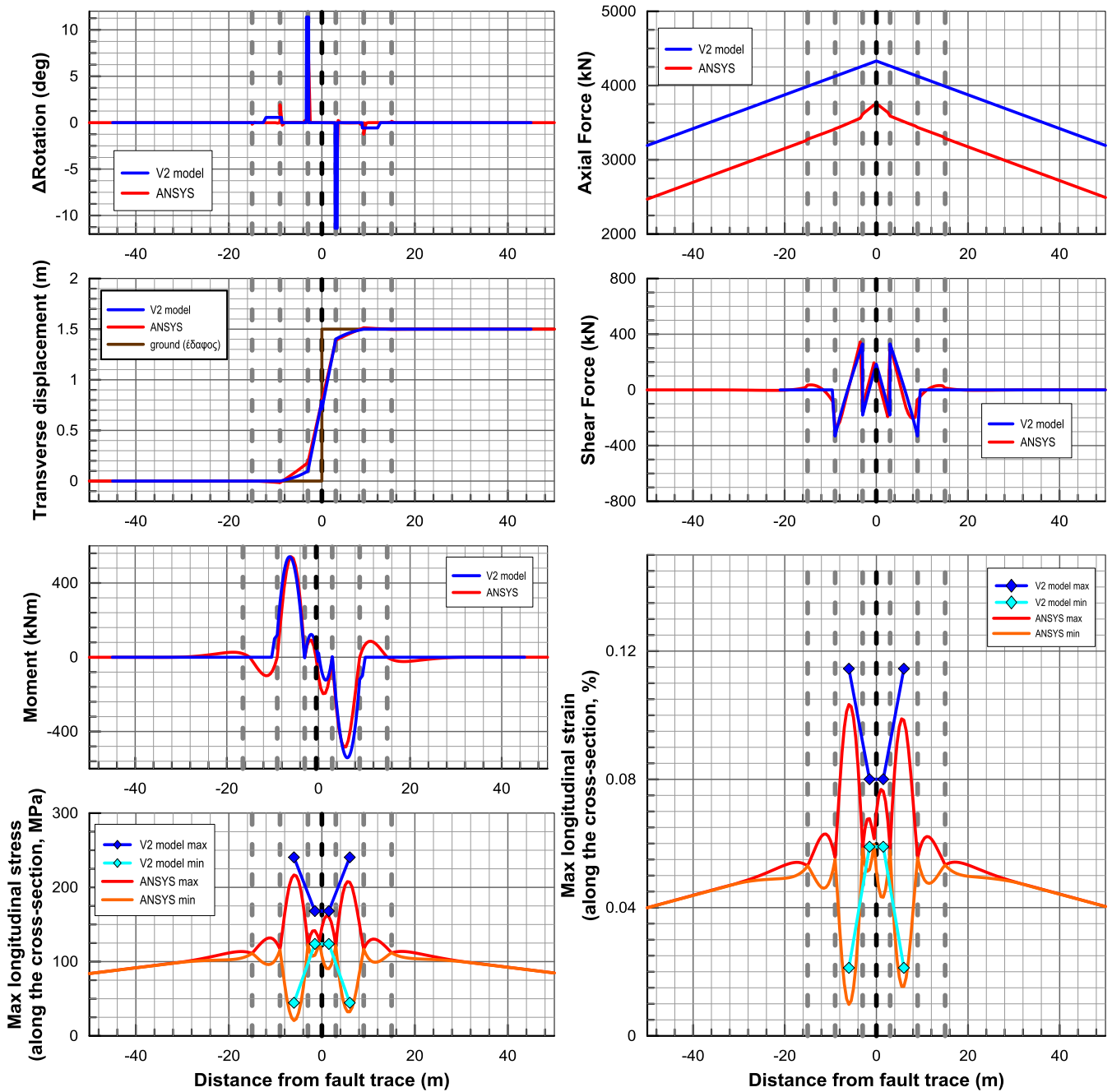
A.6. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=3m$

$\beta=30^\circ$



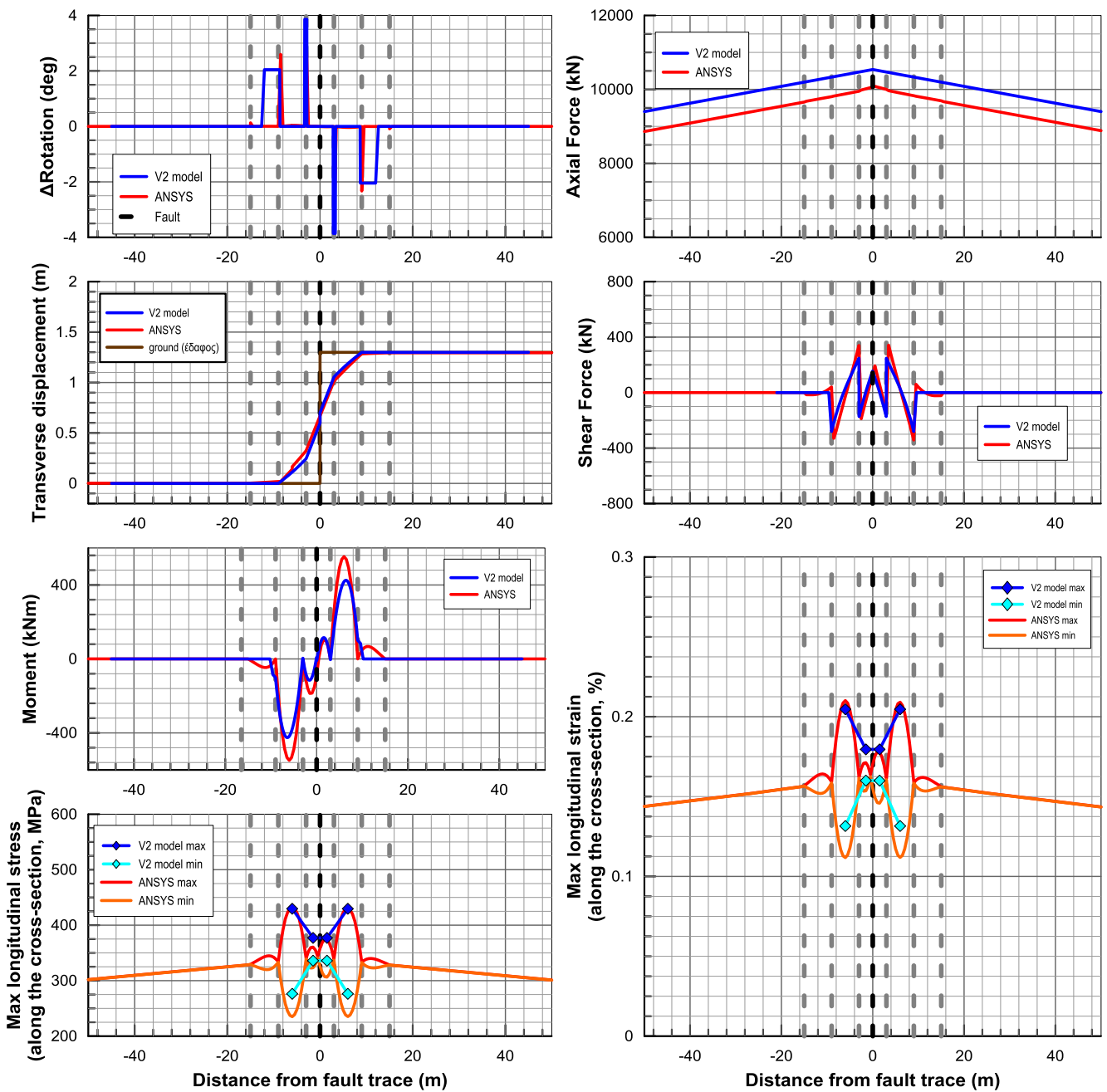
A.7. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=1.5m$

$\beta=90^\circ$



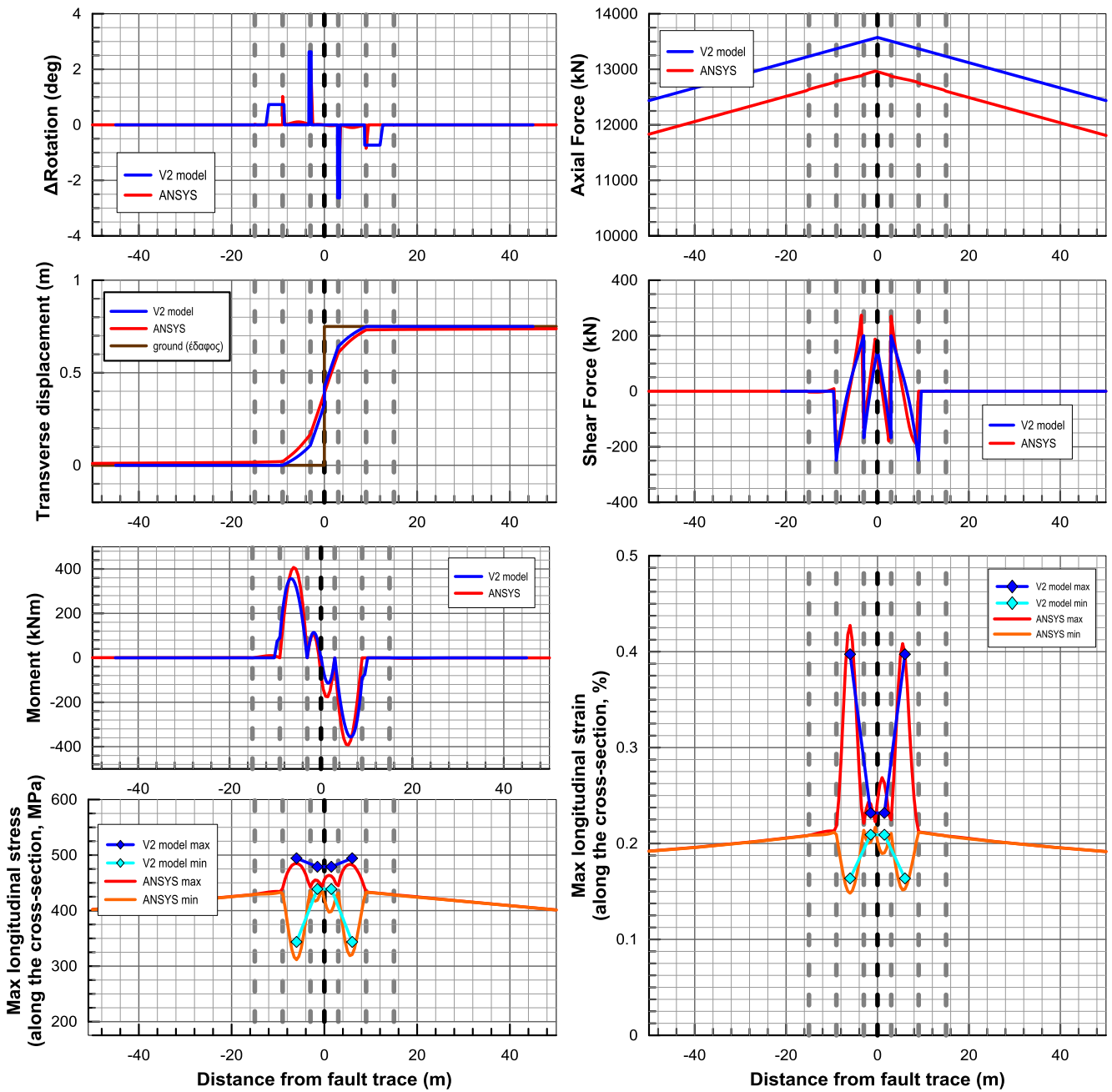
A.8. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=1.5m$

$\beta=60^\circ$



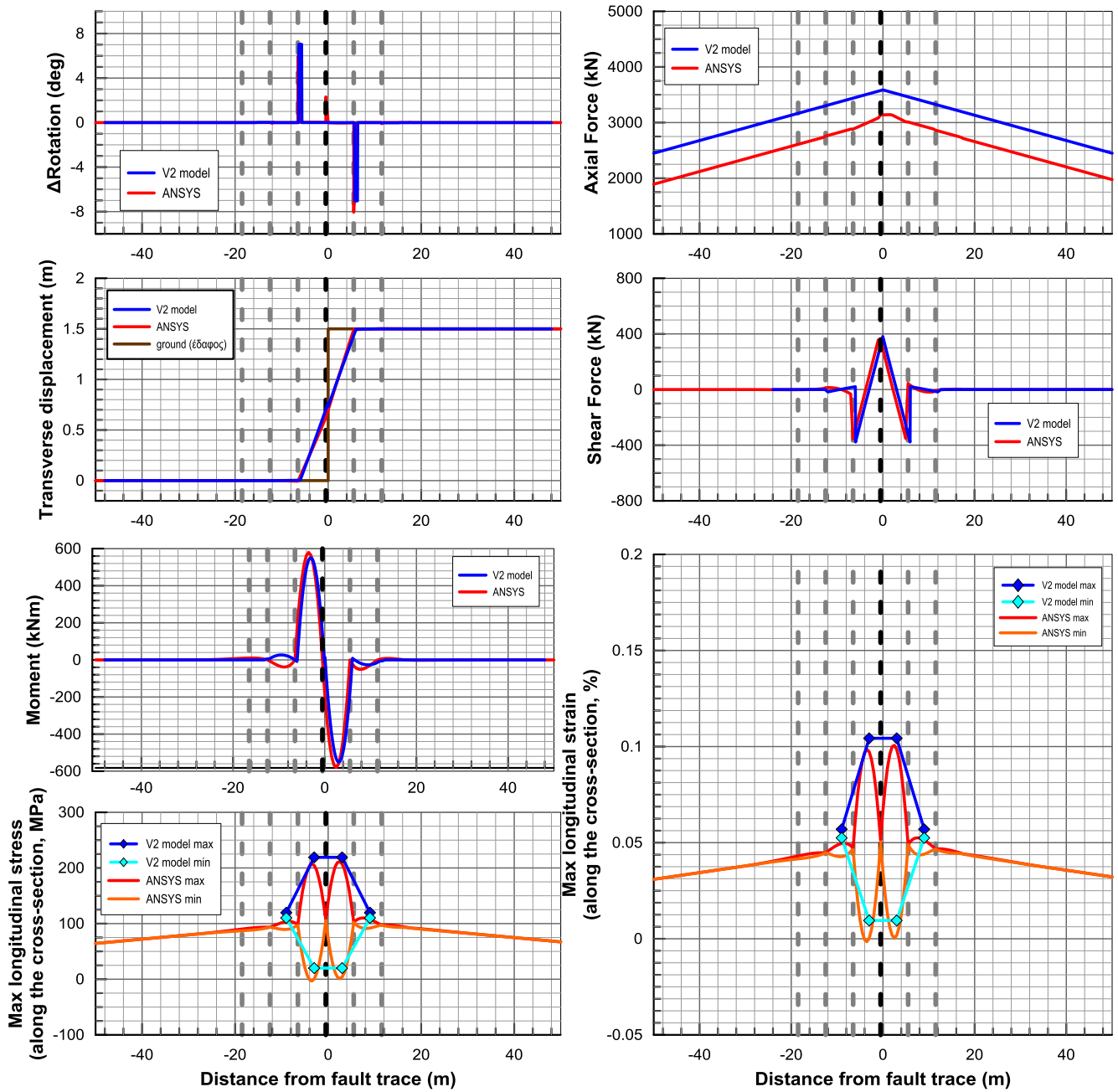
A.9. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=1.5m$

$\beta=30^\circ$



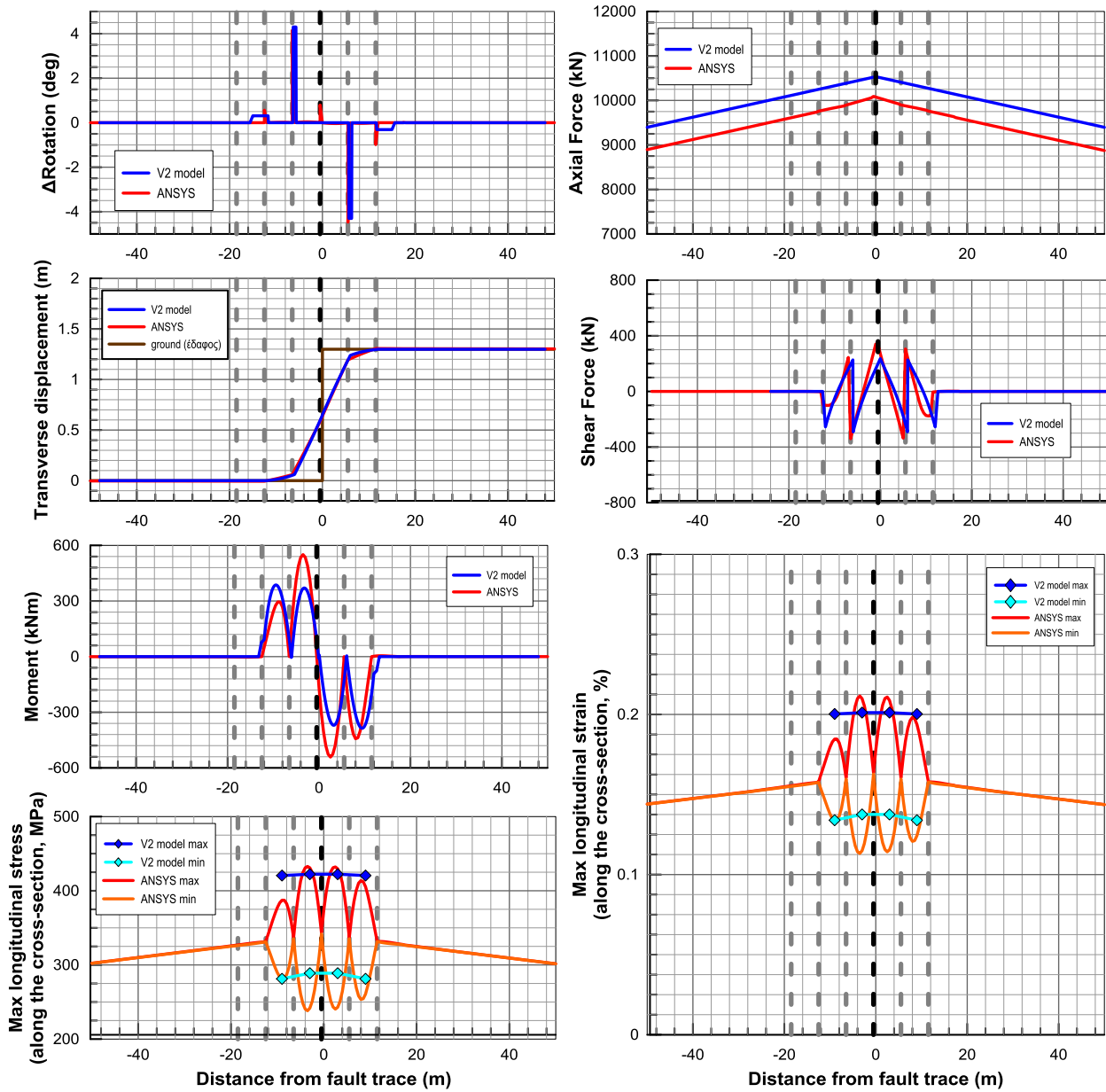
A.10. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=1,5m$

$\beta=90^\circ$



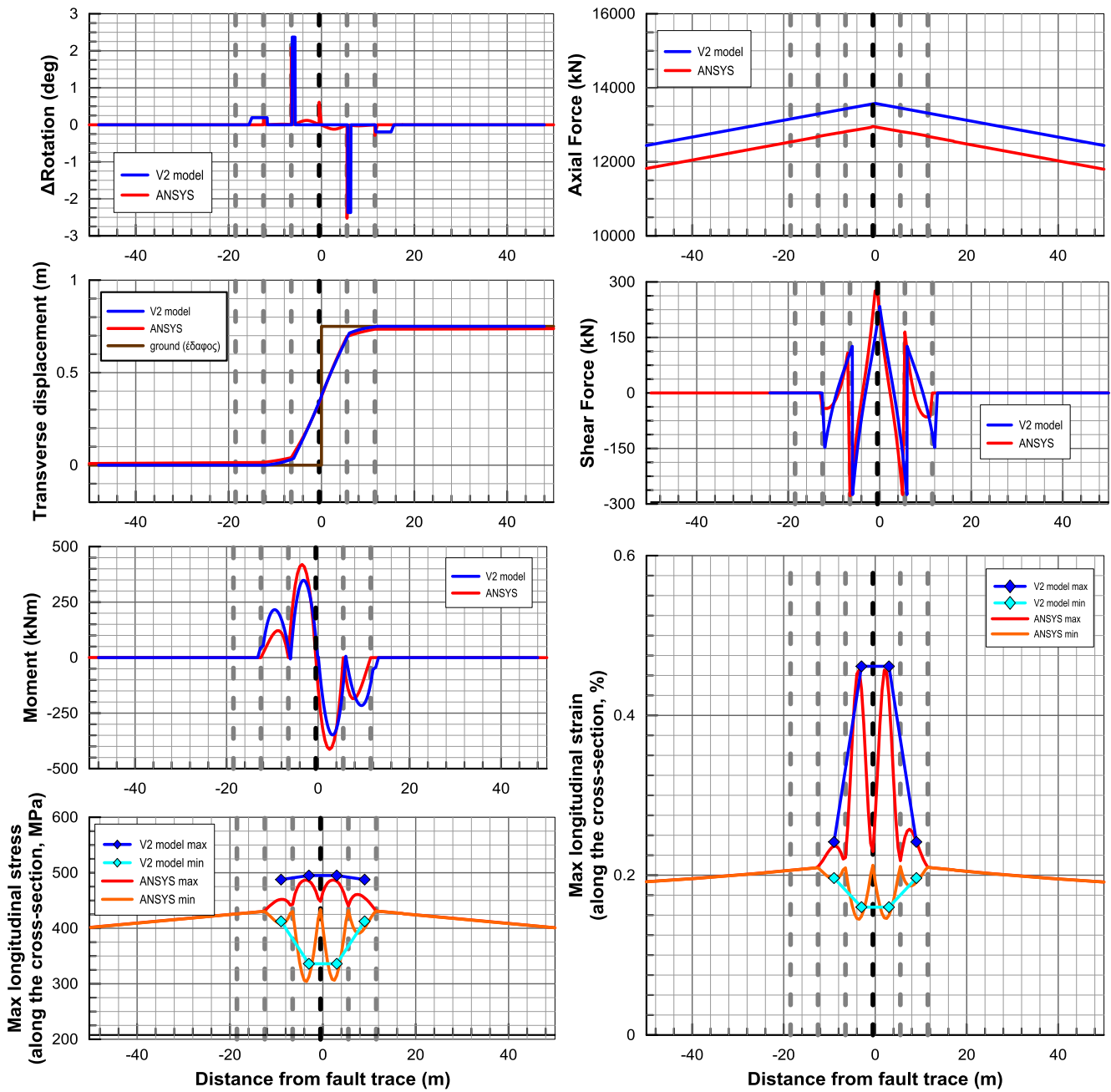
A.11. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=1,5m$

$\beta=60^\circ$



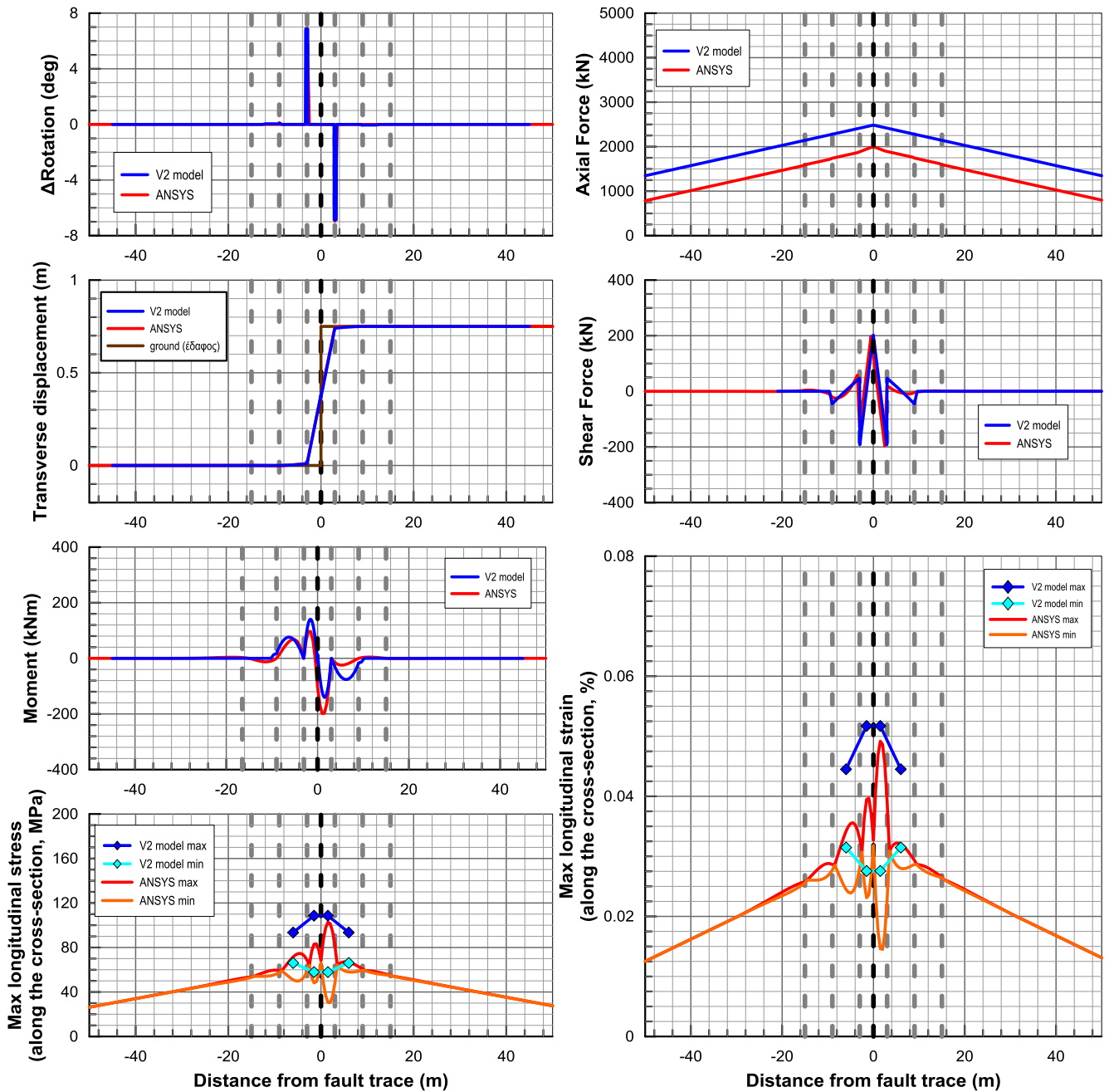
A.12. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=1,5m$

$\beta=30^\circ$



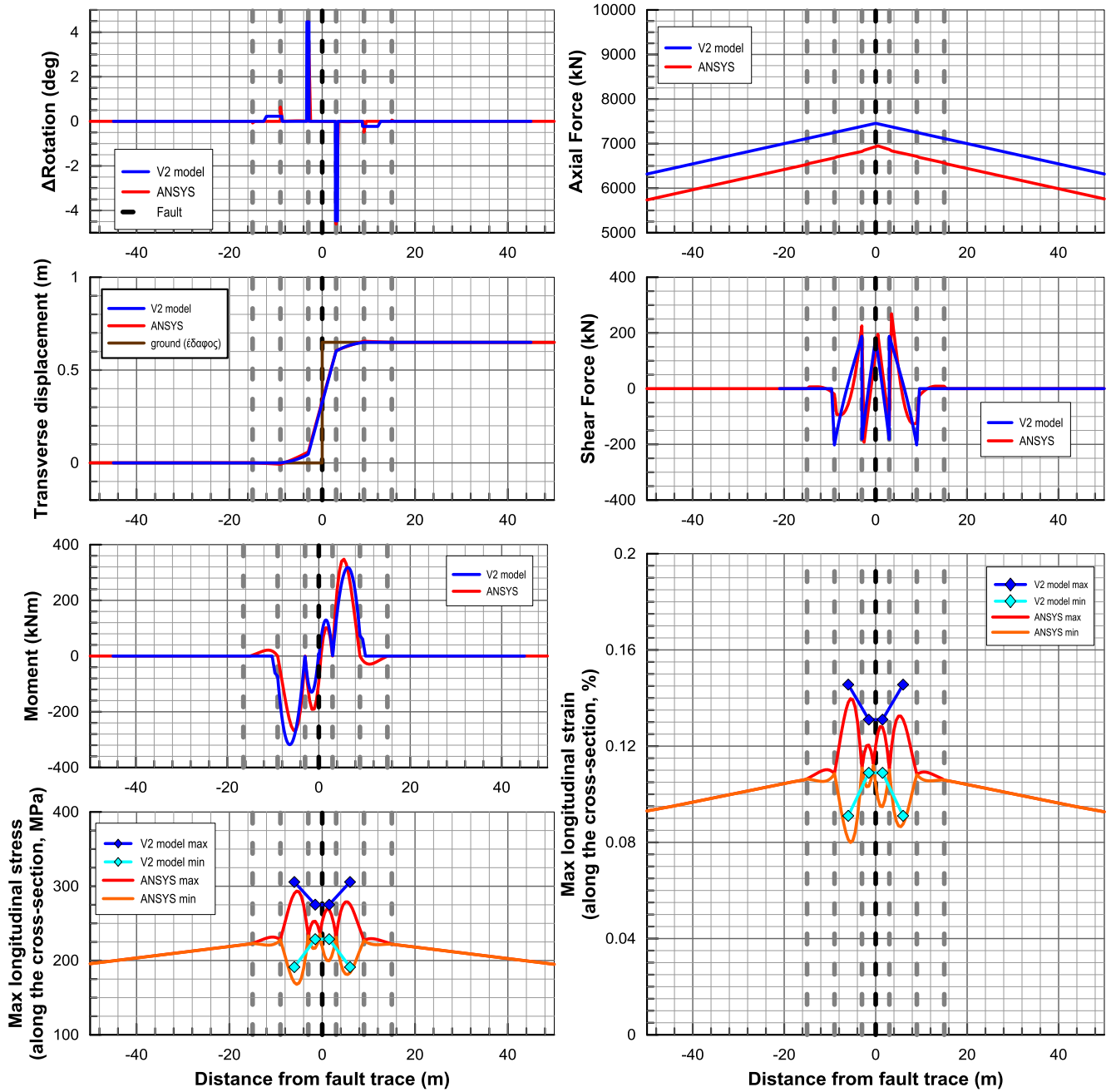
A.13. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=0.75m$

$\beta=90^\circ$



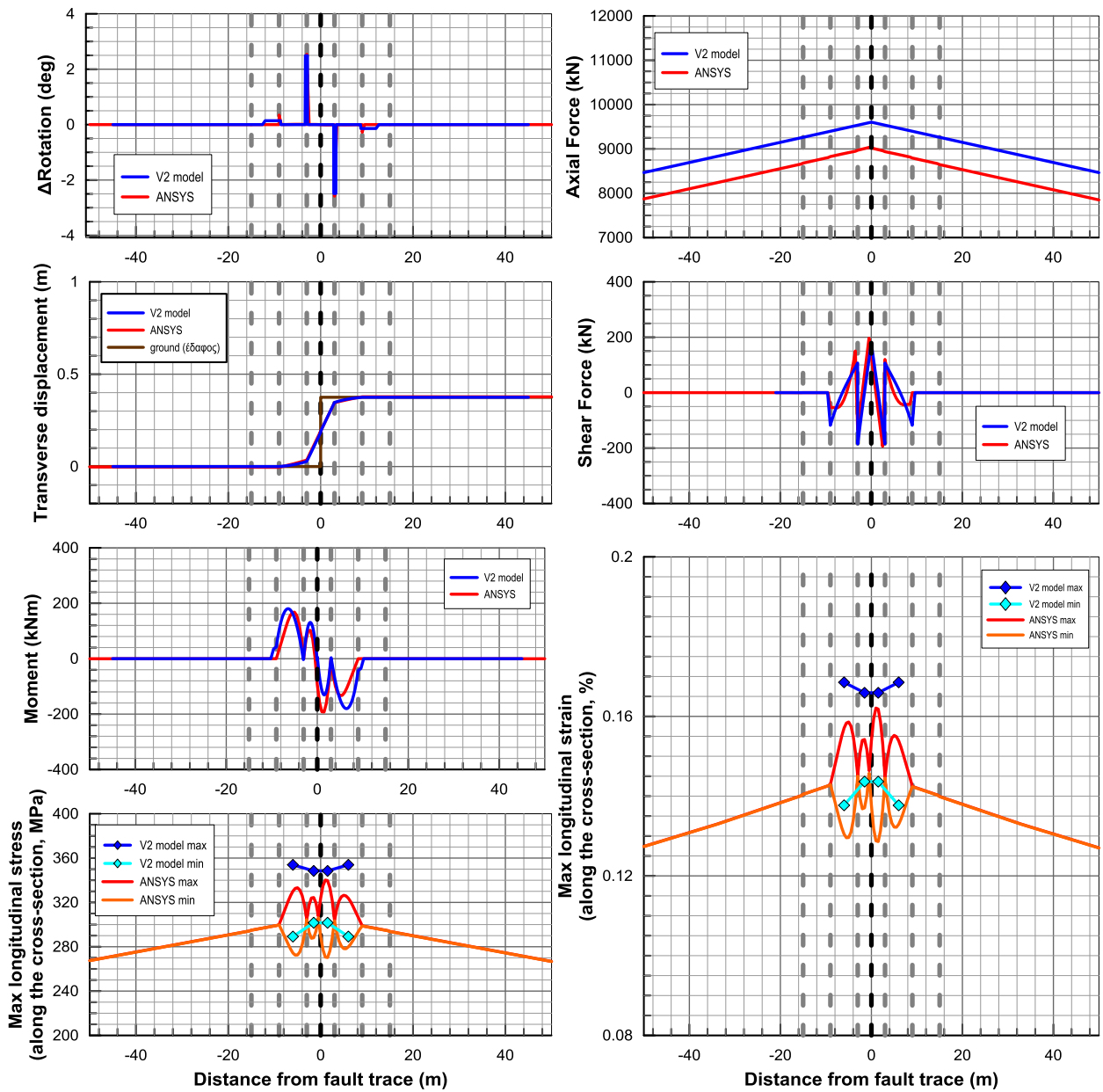
A.14. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=0.75m$

$\beta=60^\circ$



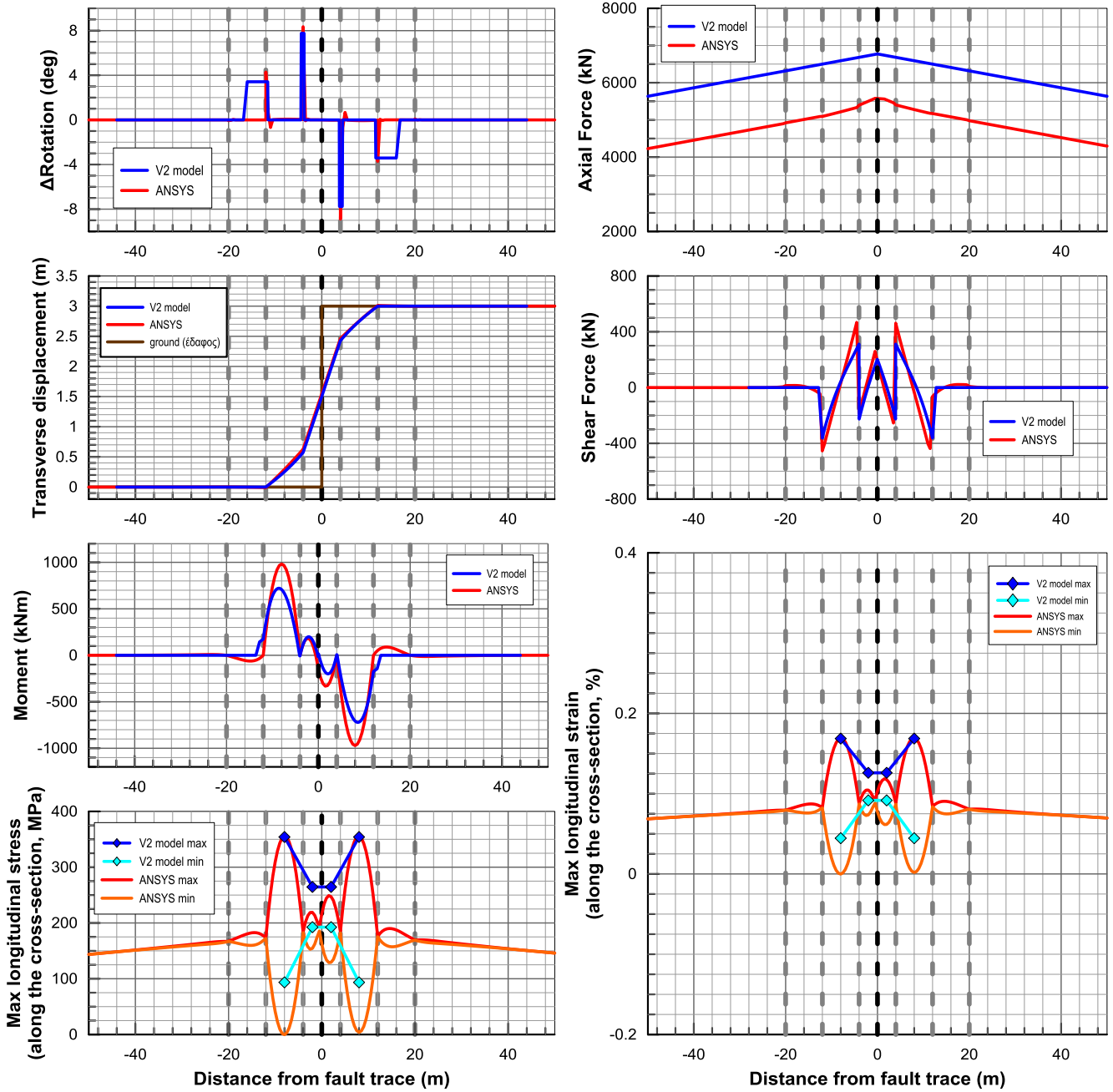
A.15. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=0.75m$

$\beta=30^\circ$



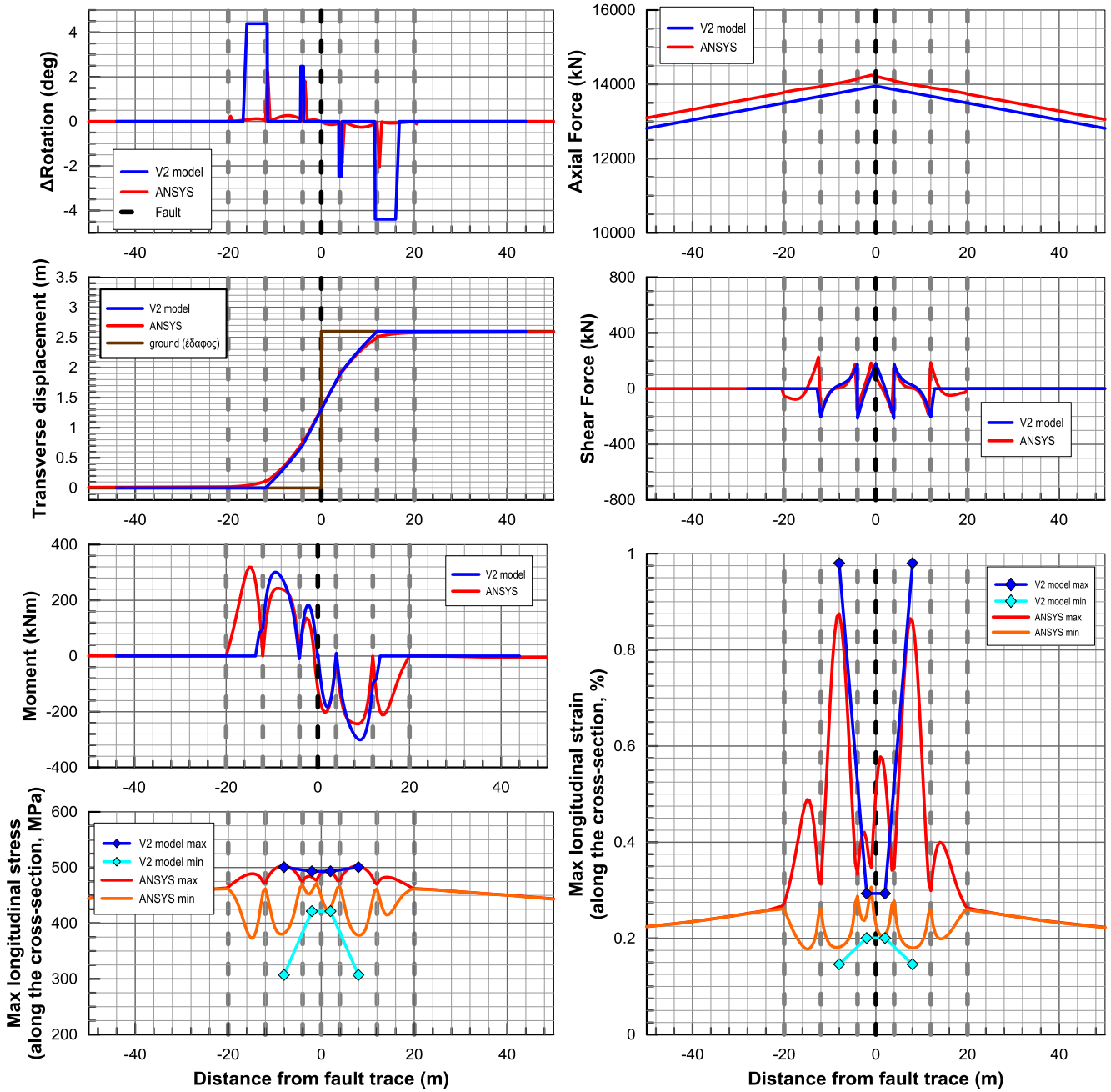
A.16. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=3m$

$\beta=90^\circ$



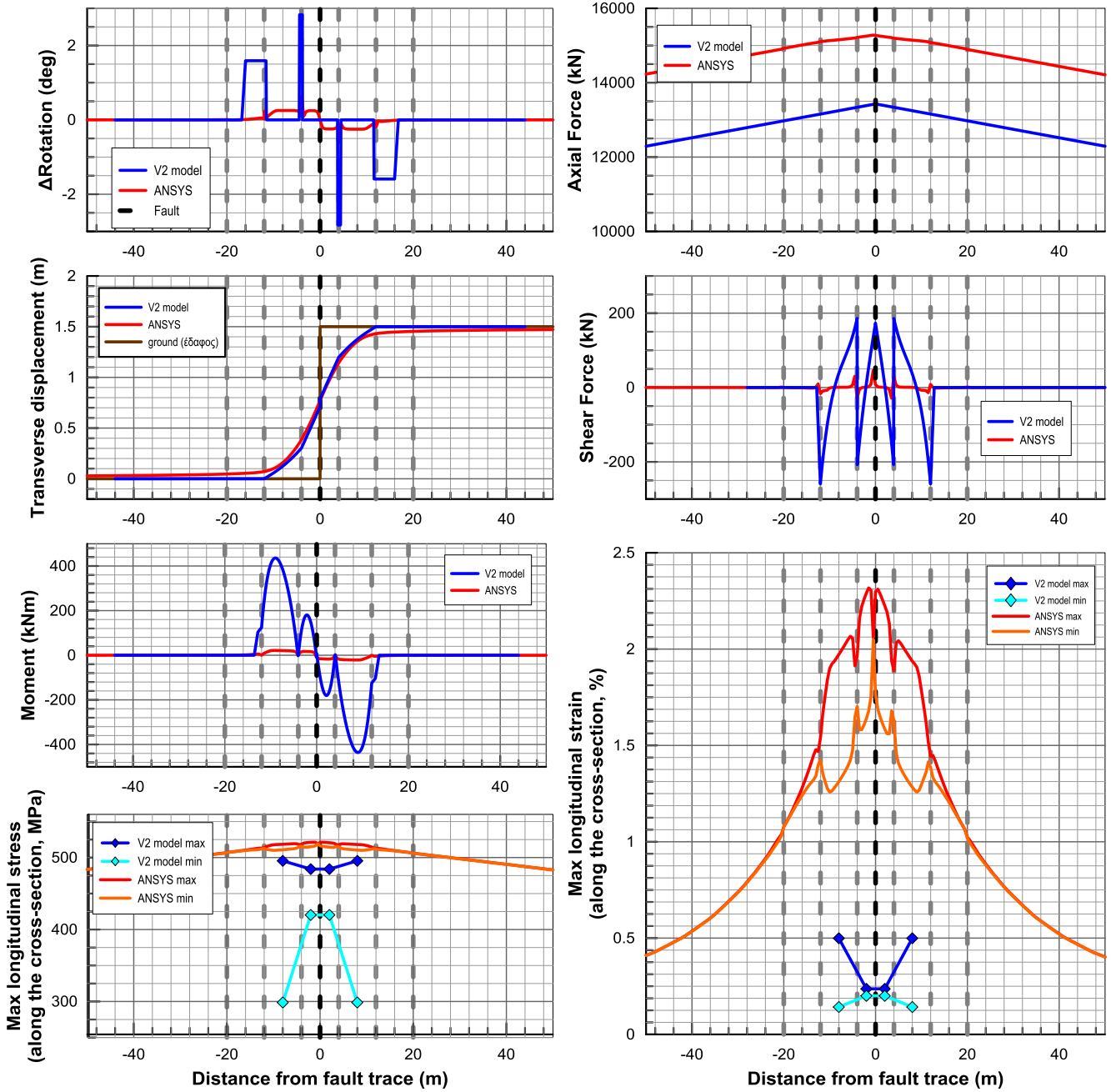
A.17. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=3m$

$\beta=60^\circ$



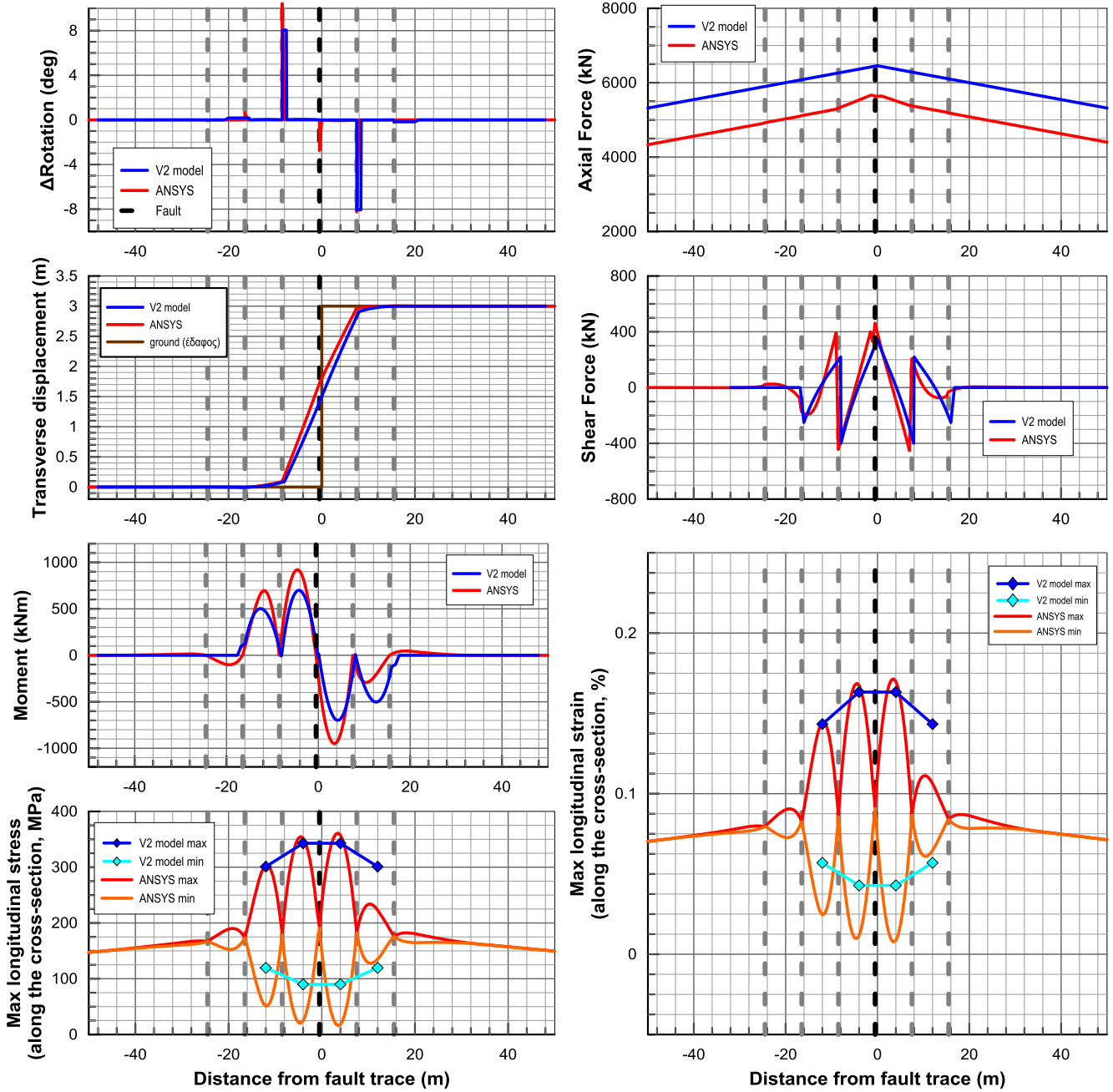
A.18. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=3m$

$\beta=30^\circ$



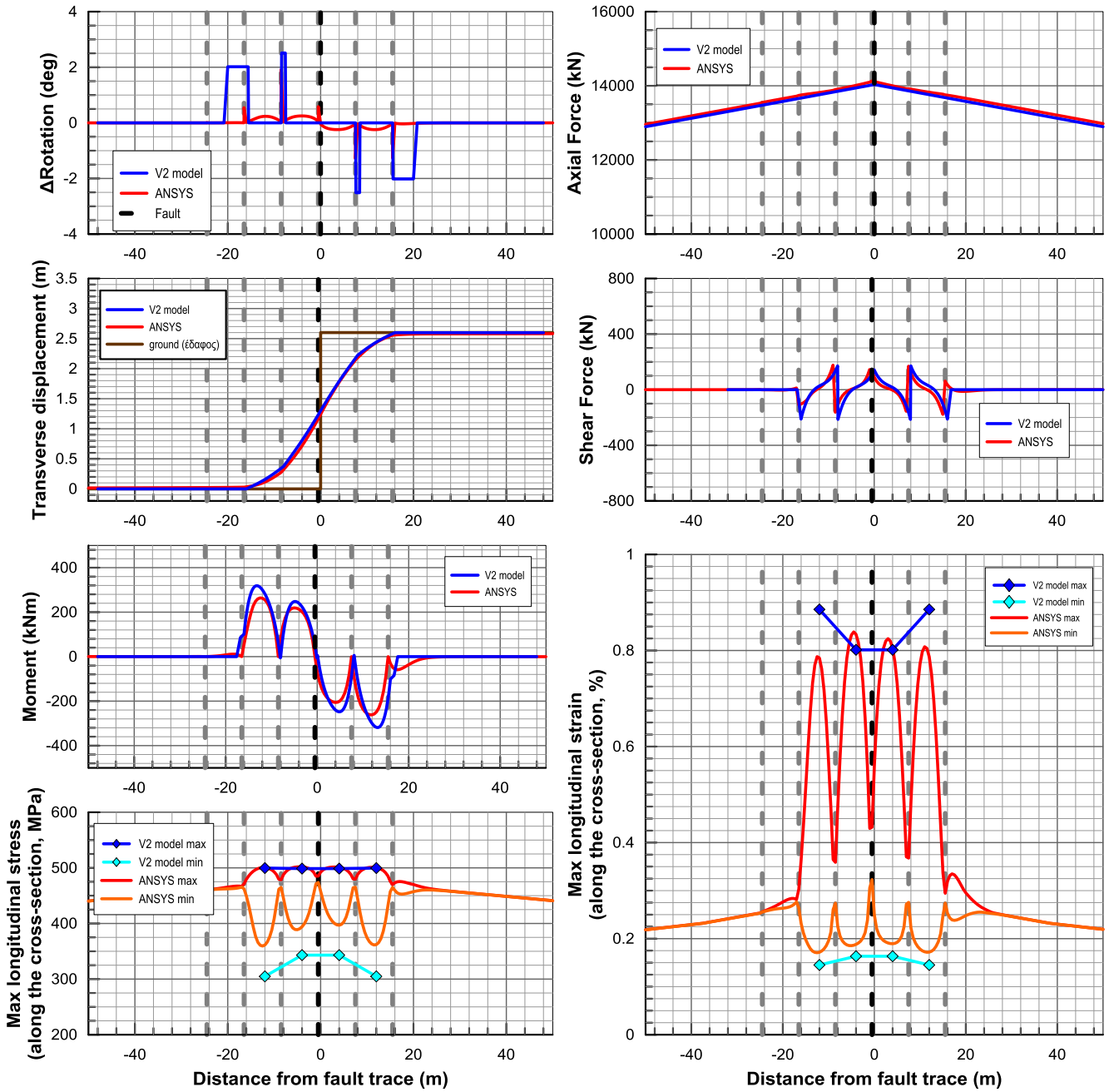
A.19. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=3m$

$\beta=90^\circ$



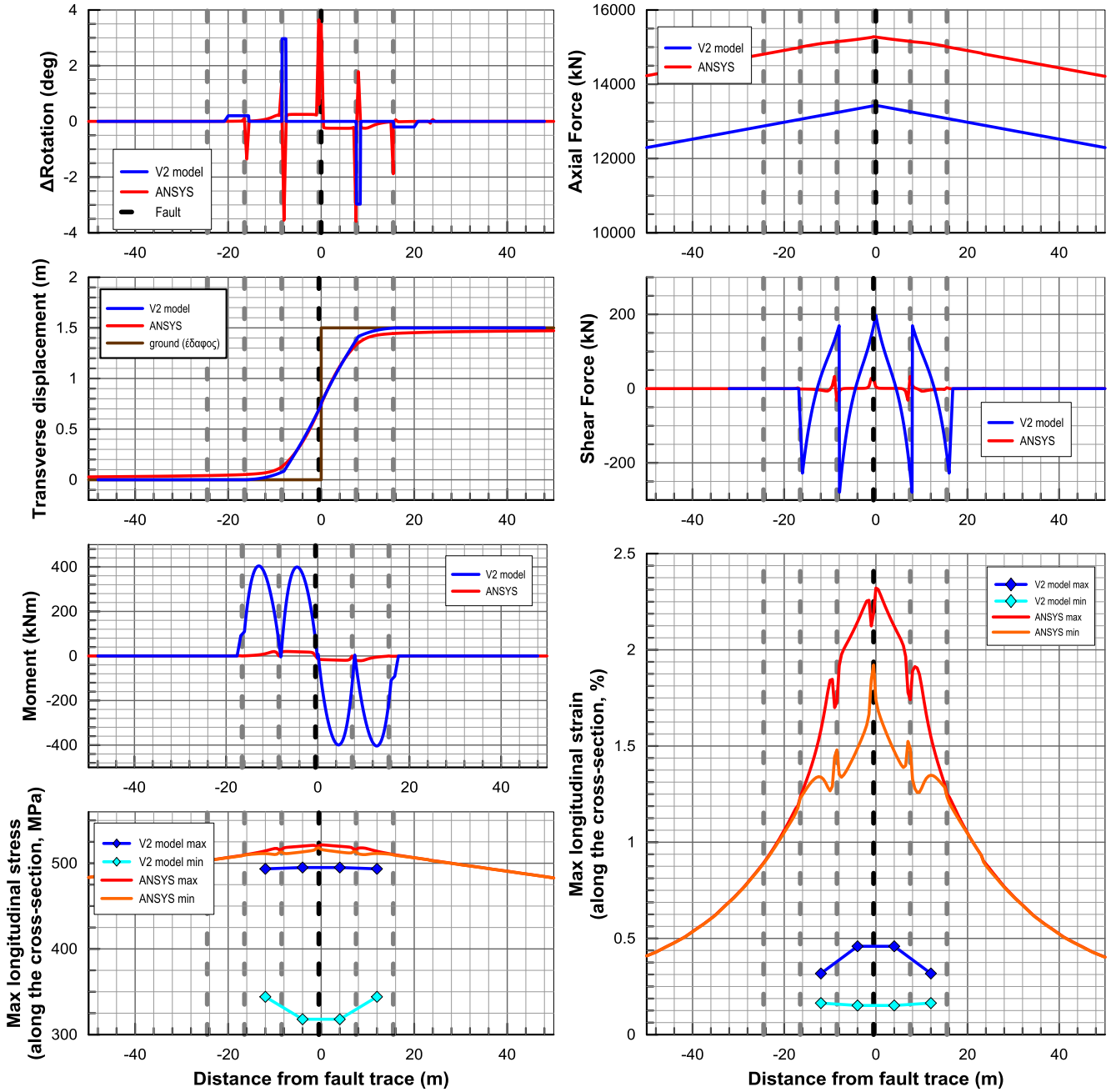
A.20. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=3m$

$\beta=60^\circ$



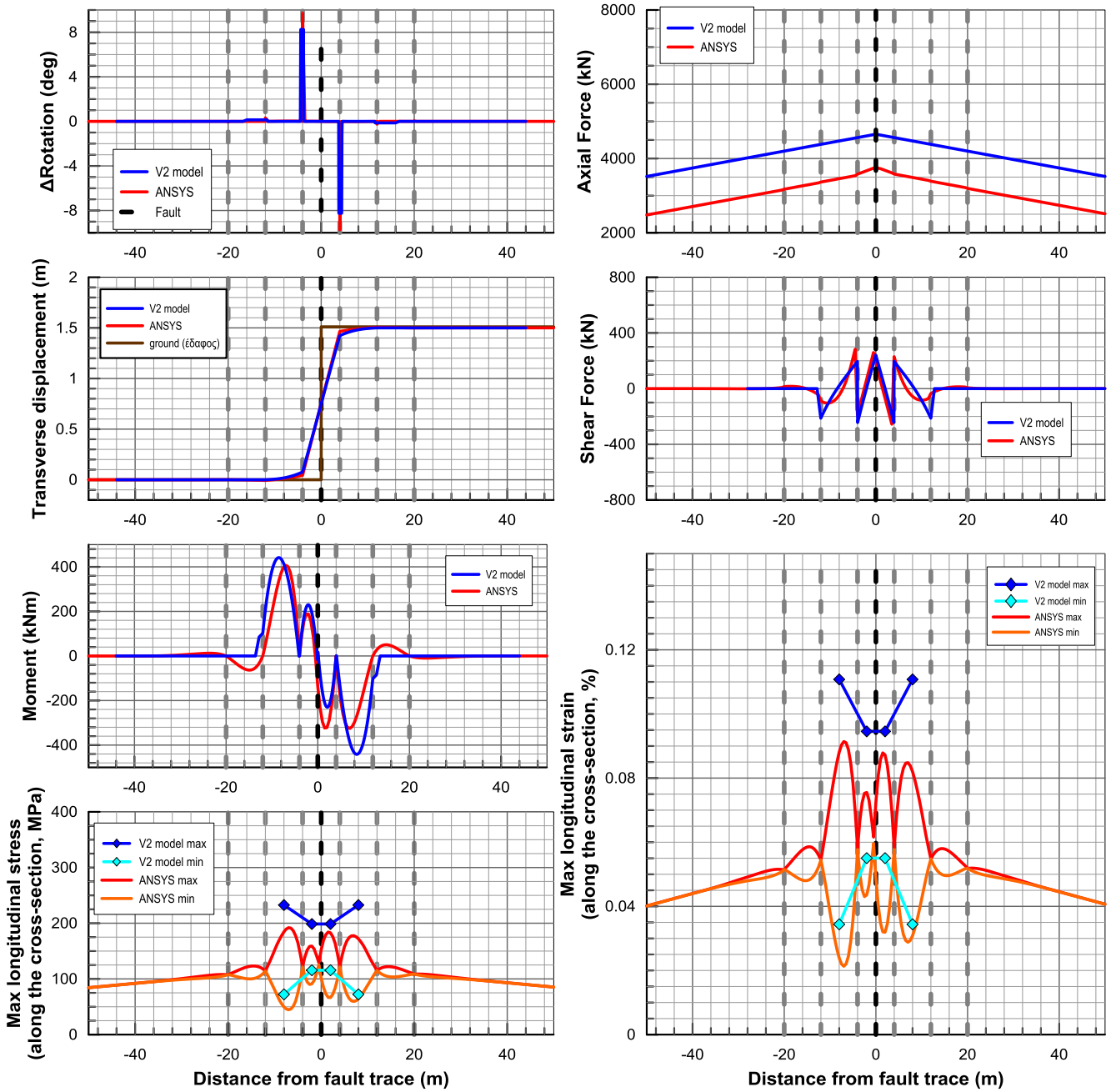
A.21. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=3m$

$\beta=30^\circ$



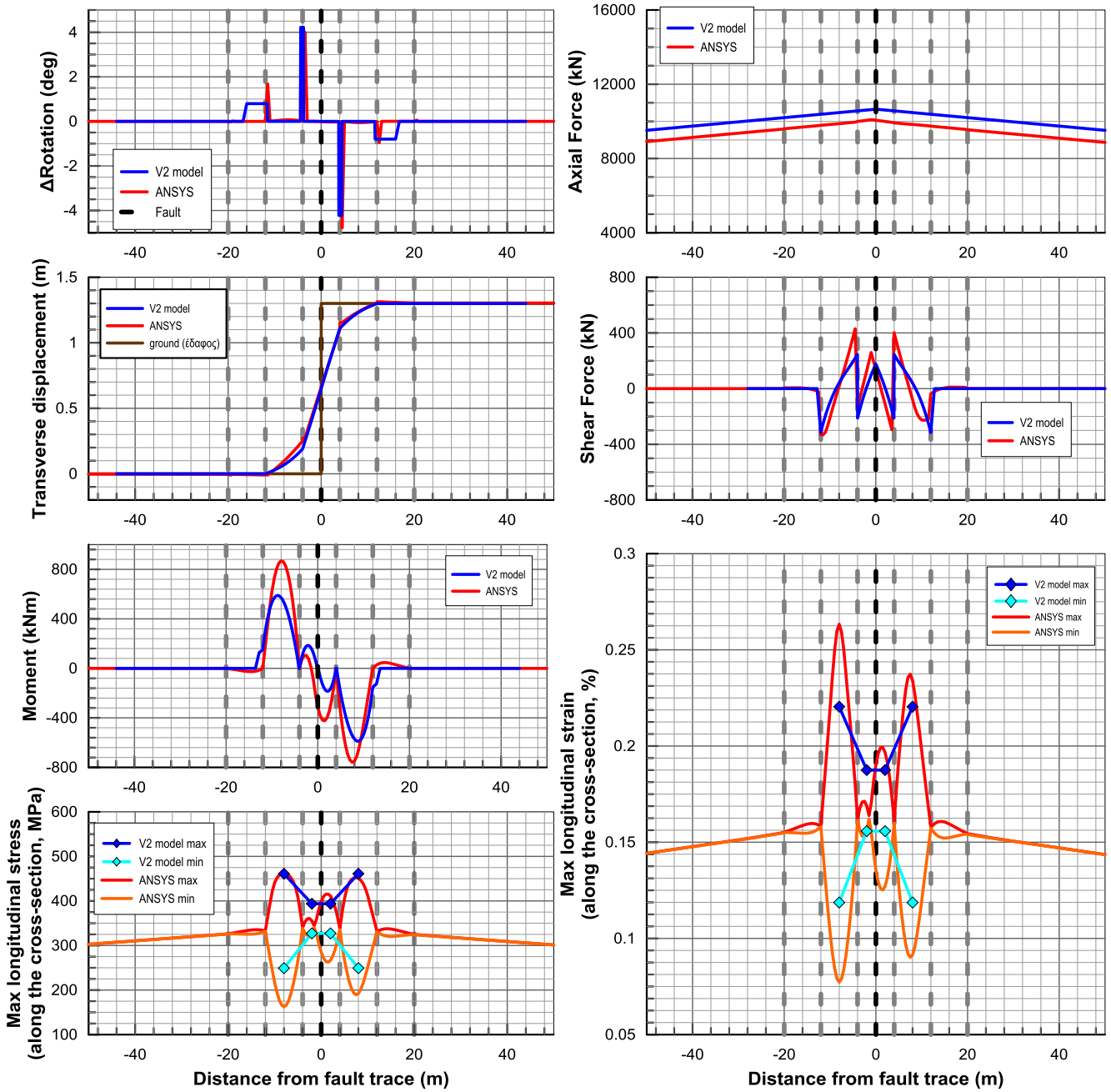
A.22. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=1,5m$

$\beta=90^\circ$



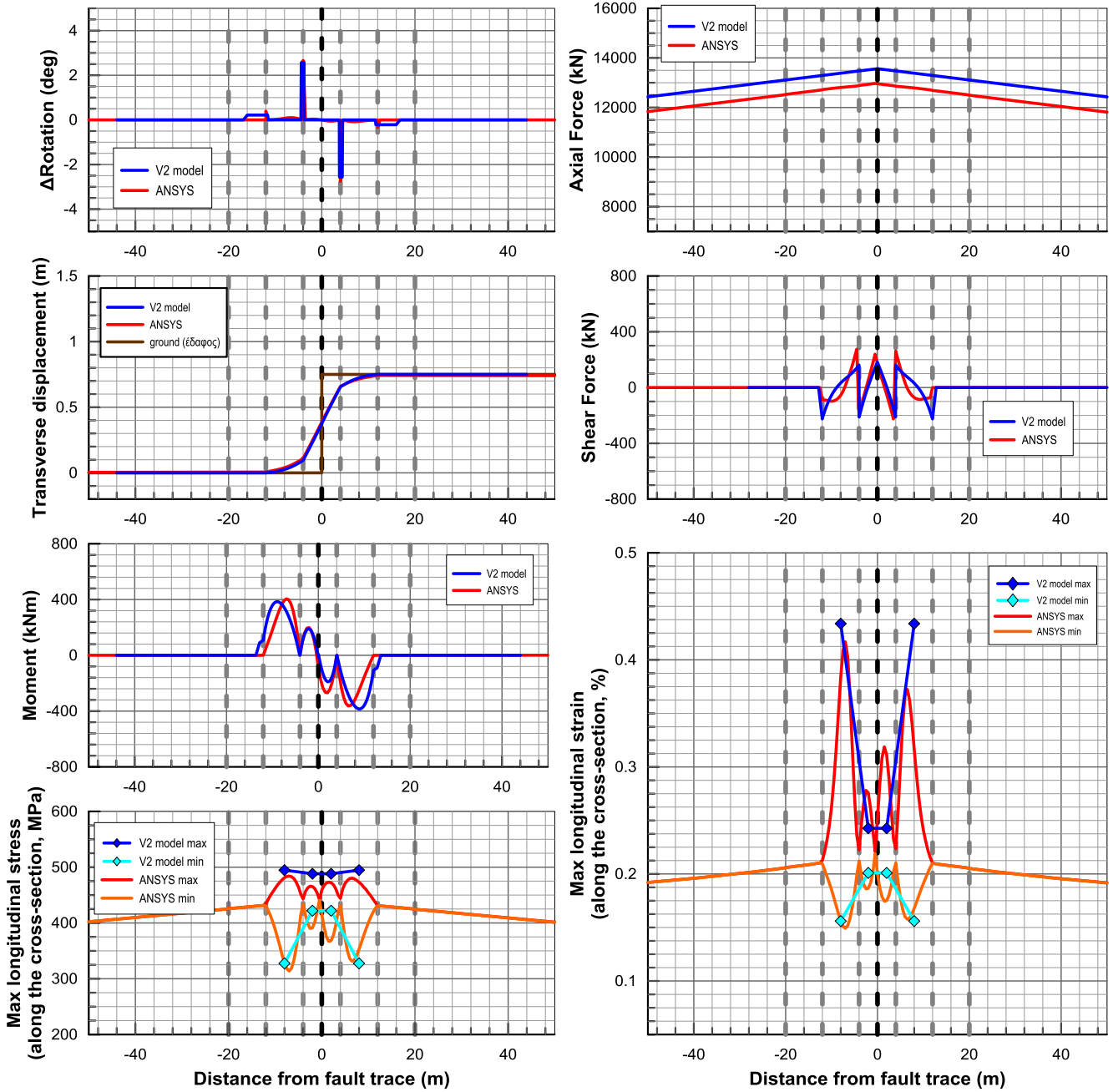
A.23. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=1,5m$

$\beta=60^\circ$



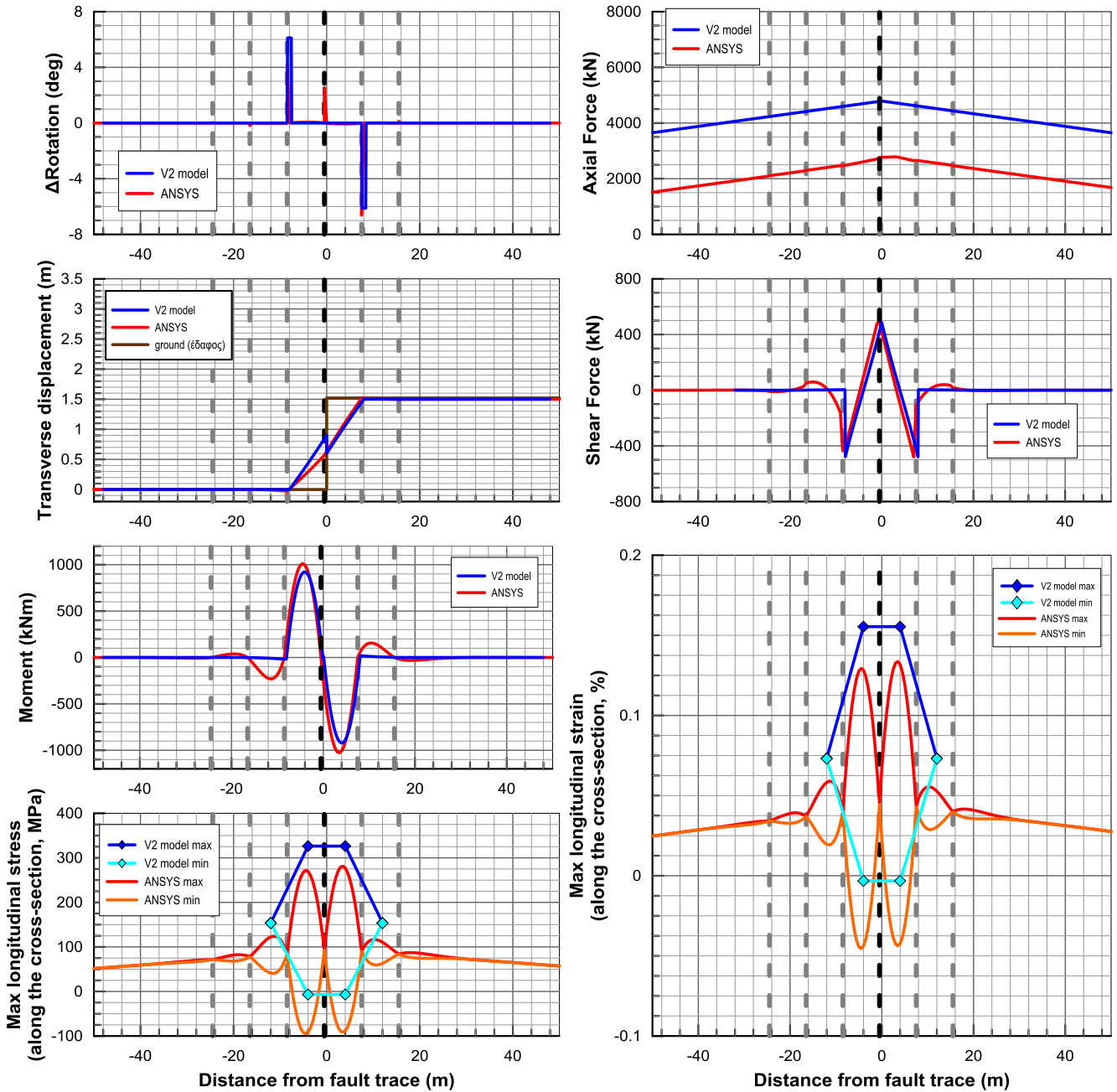
A.24. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=1,5m$

$\beta=30^\circ$



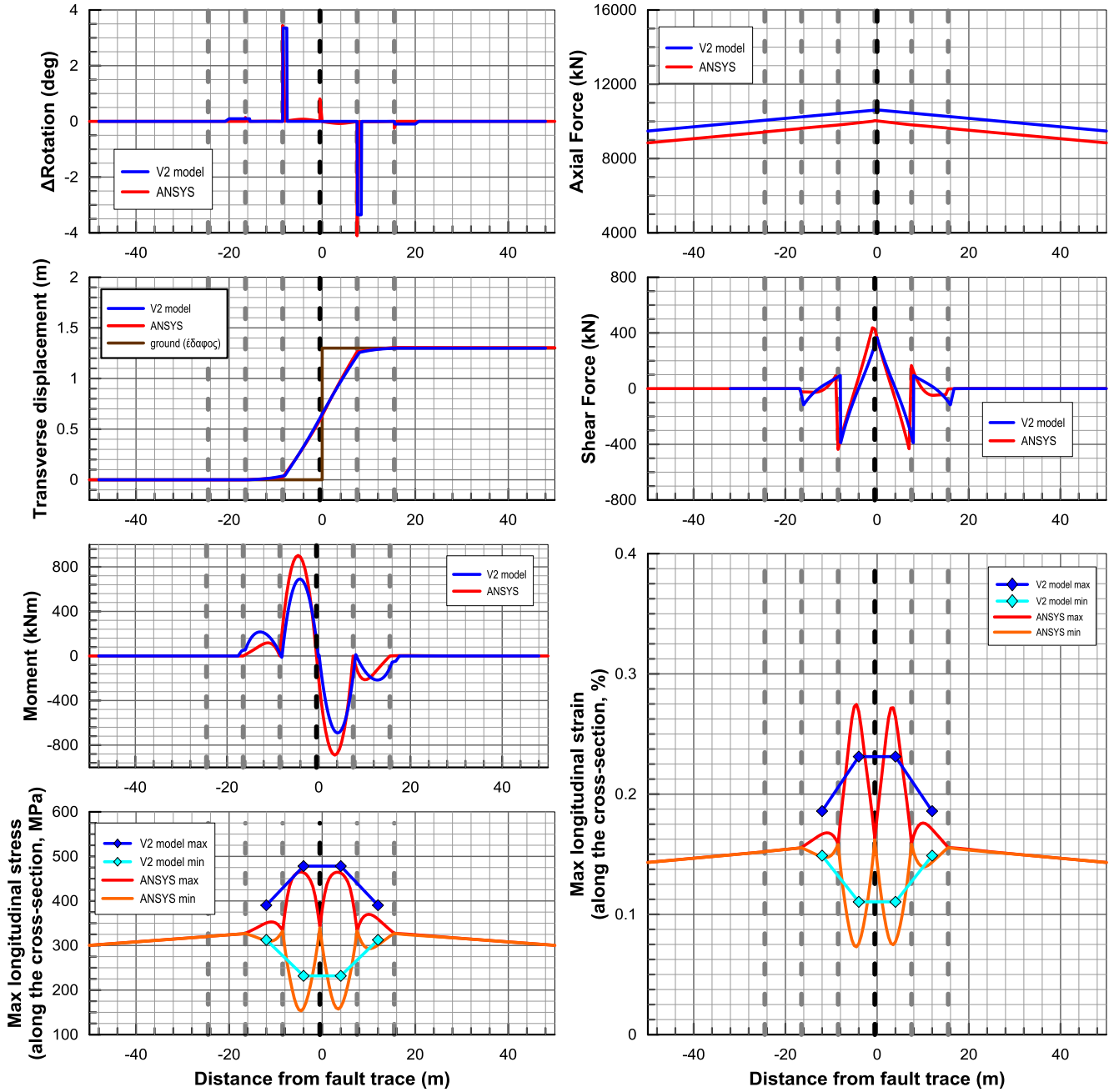
A.25. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=1,5m$

$\beta=90^\circ$



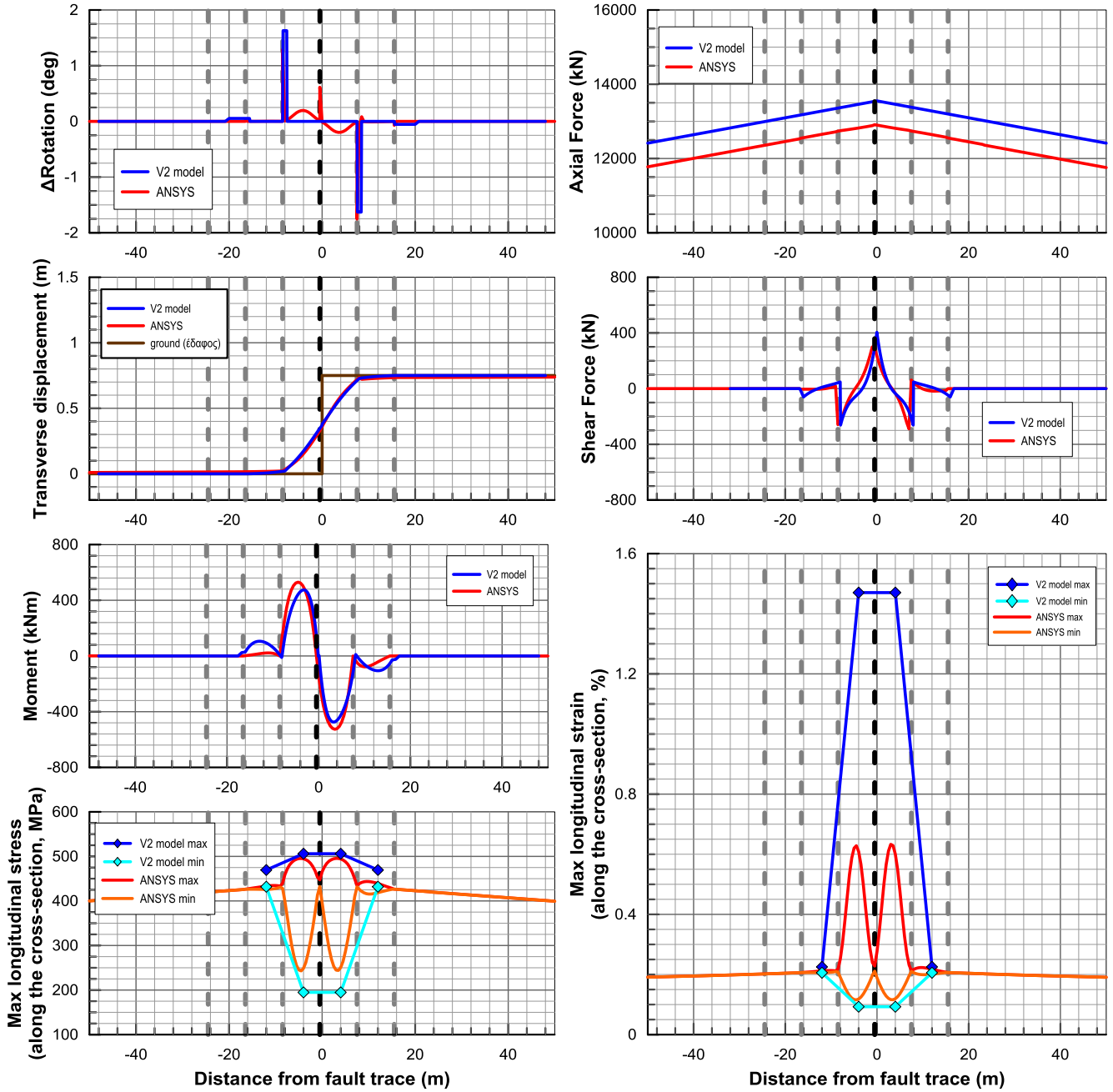
A.26. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=1,5m$

$\beta=60^\circ$



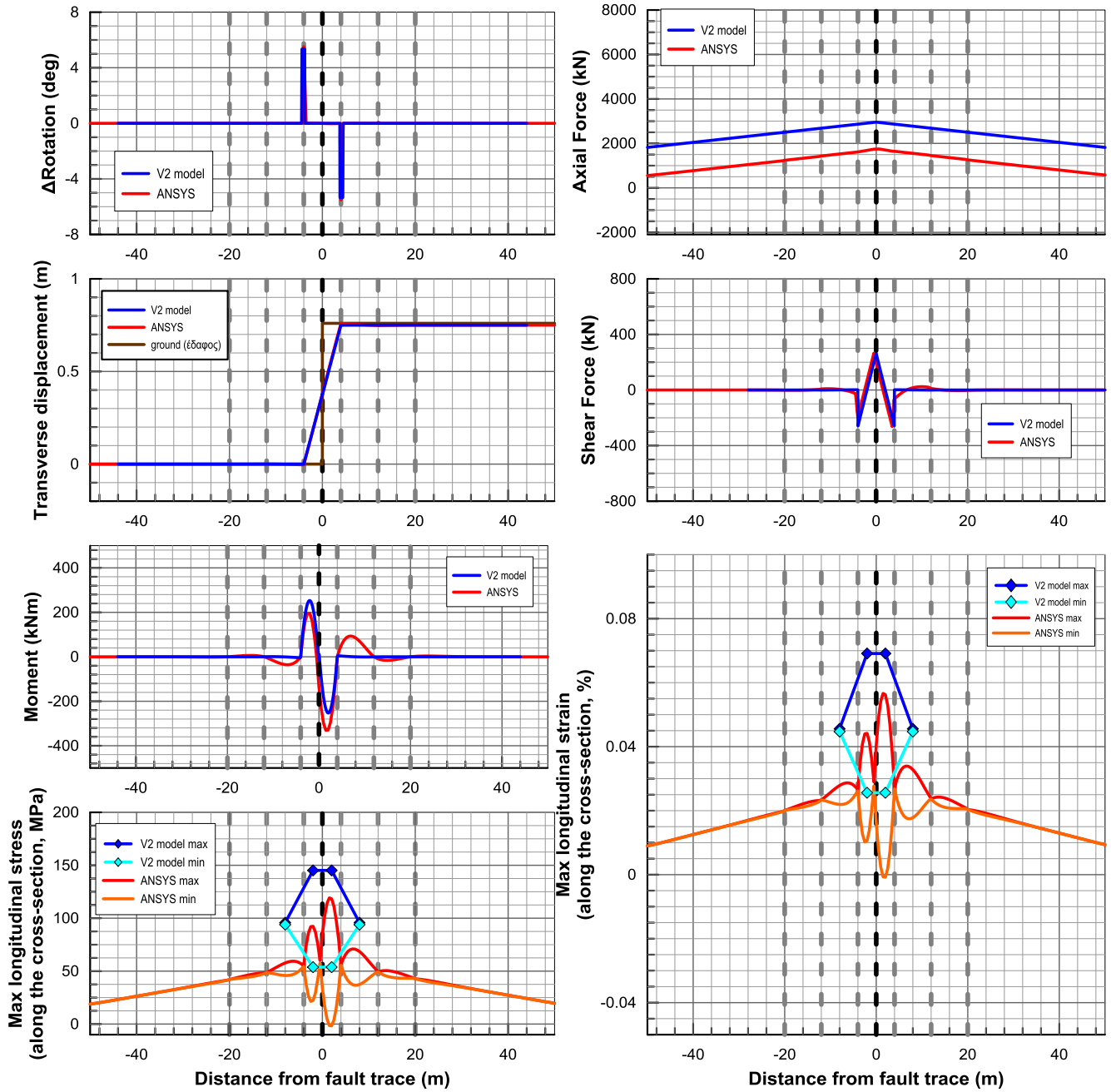
A.27. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=1,5m$

$\beta=30^\circ$



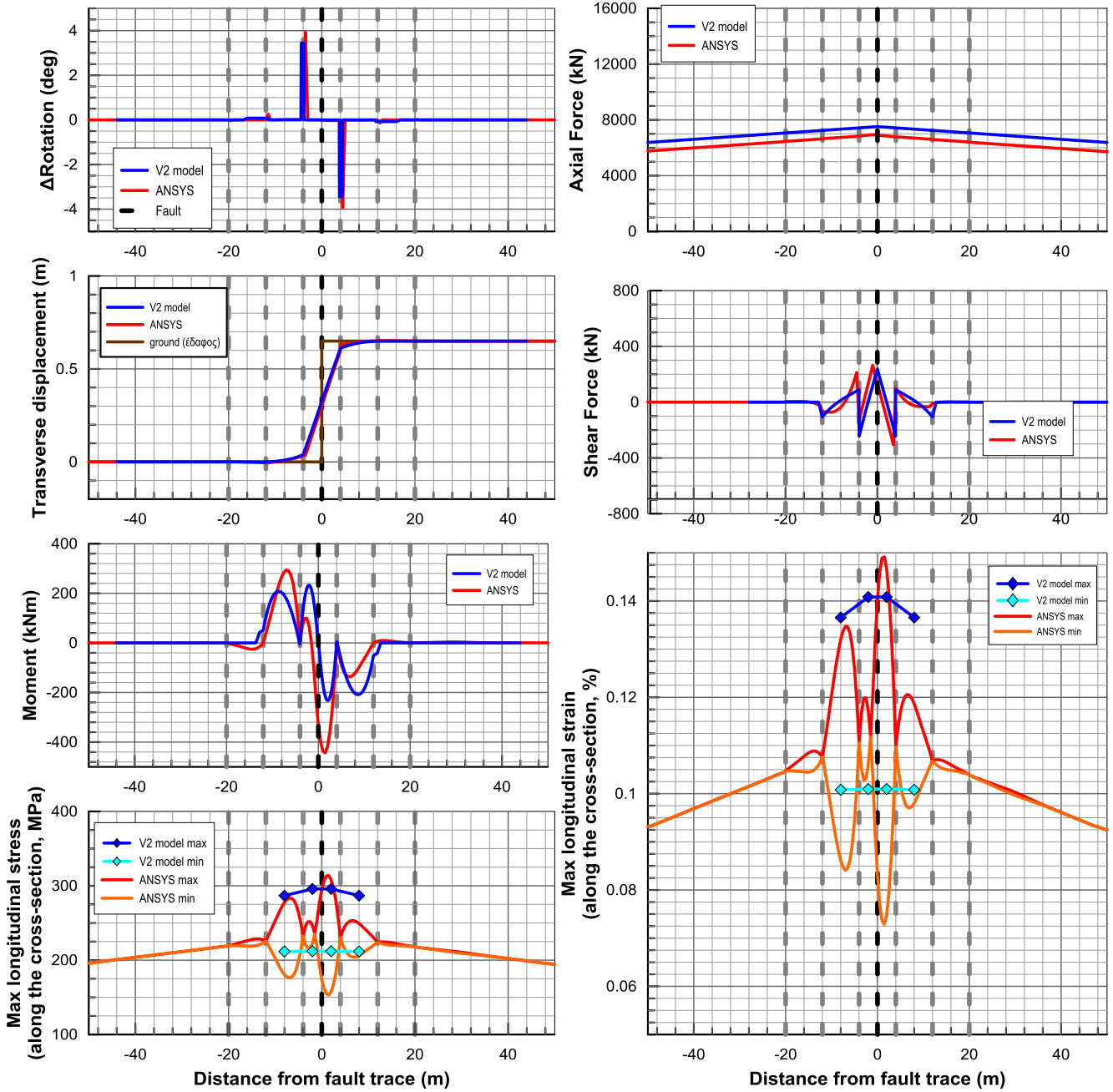
A.28. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=0,75m$

$\beta=90^\circ$



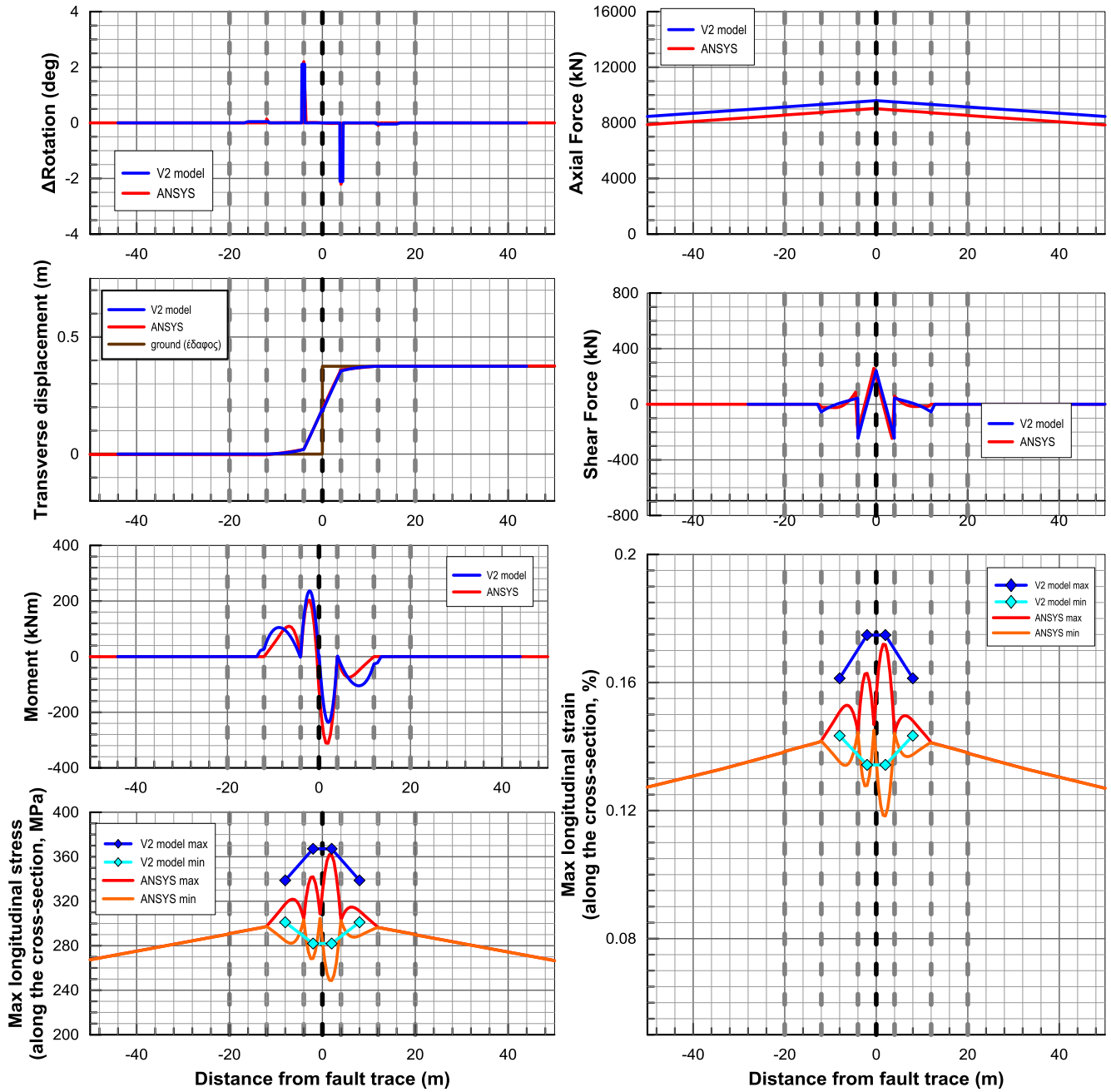
A.29. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=0,75m$

$\beta=60^\circ$



A.30. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στη μέση – $D_f=0,75m$

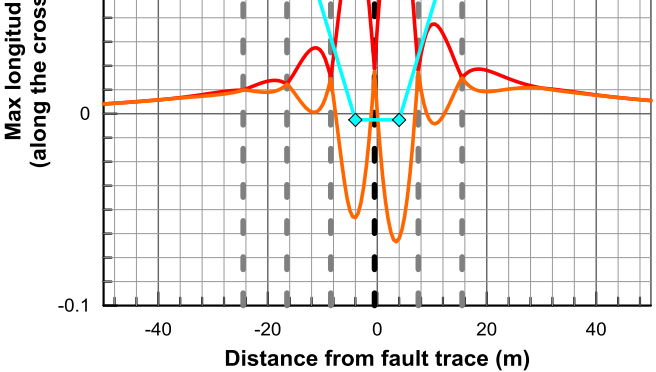
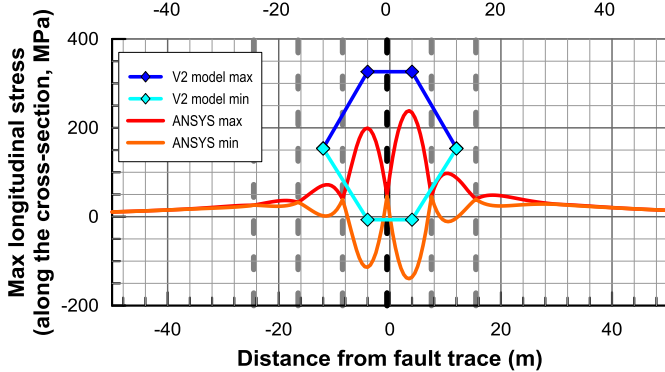
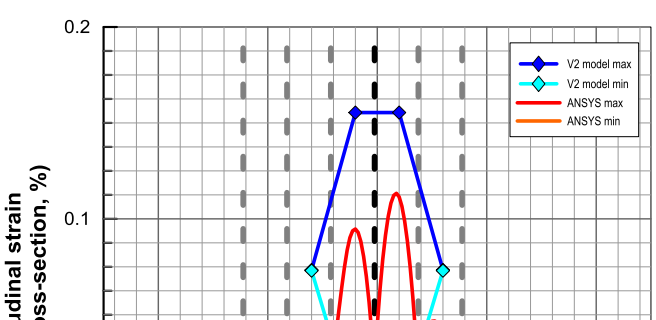
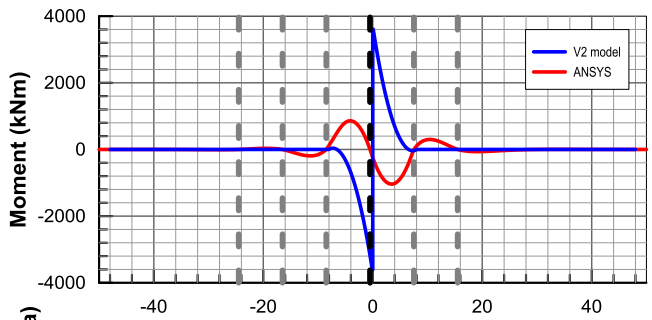
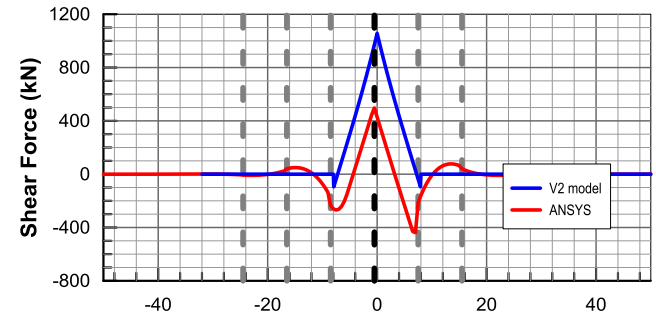
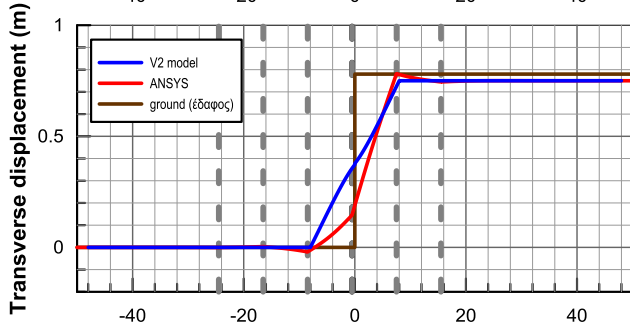
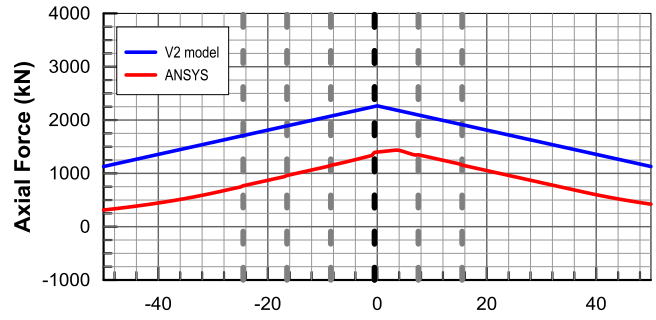
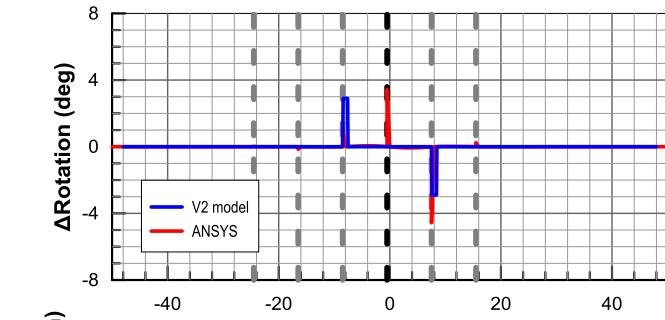
$\beta=30^\circ$



A.31. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στην άκρη –

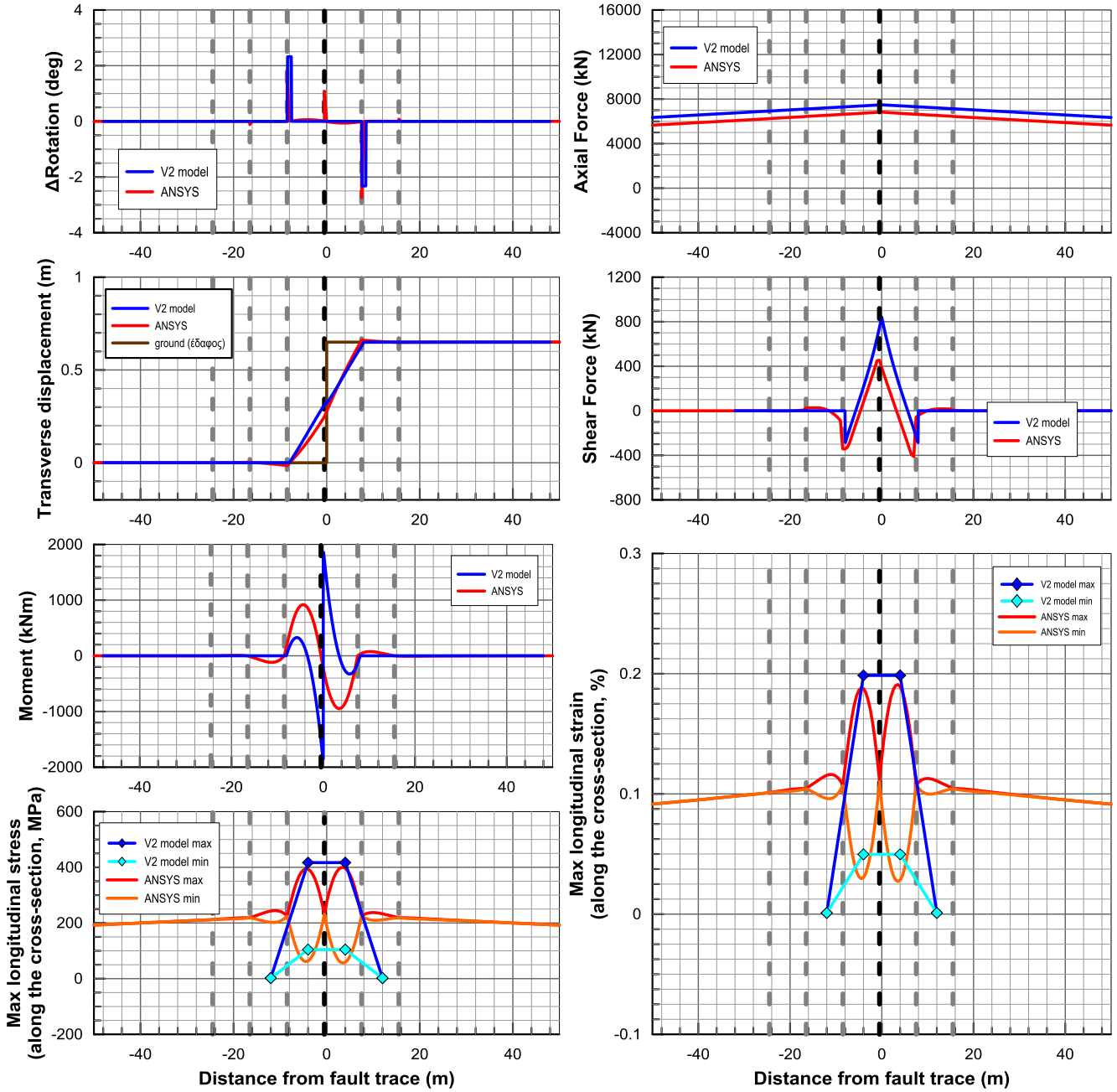
$D_f=0,75m$

$\beta=90^\circ$



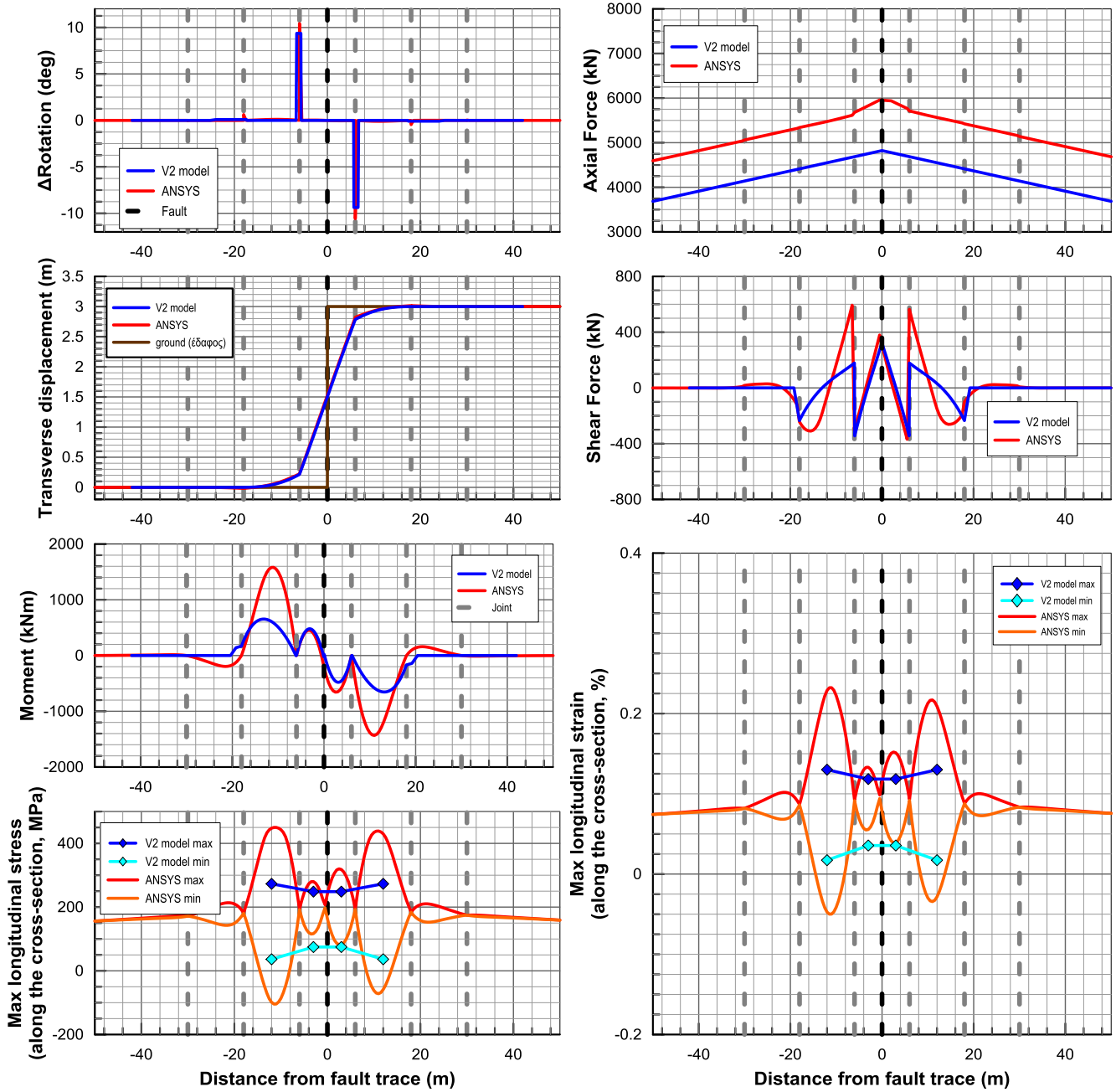
A.32. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=0,75m$

$\beta=60^\circ$



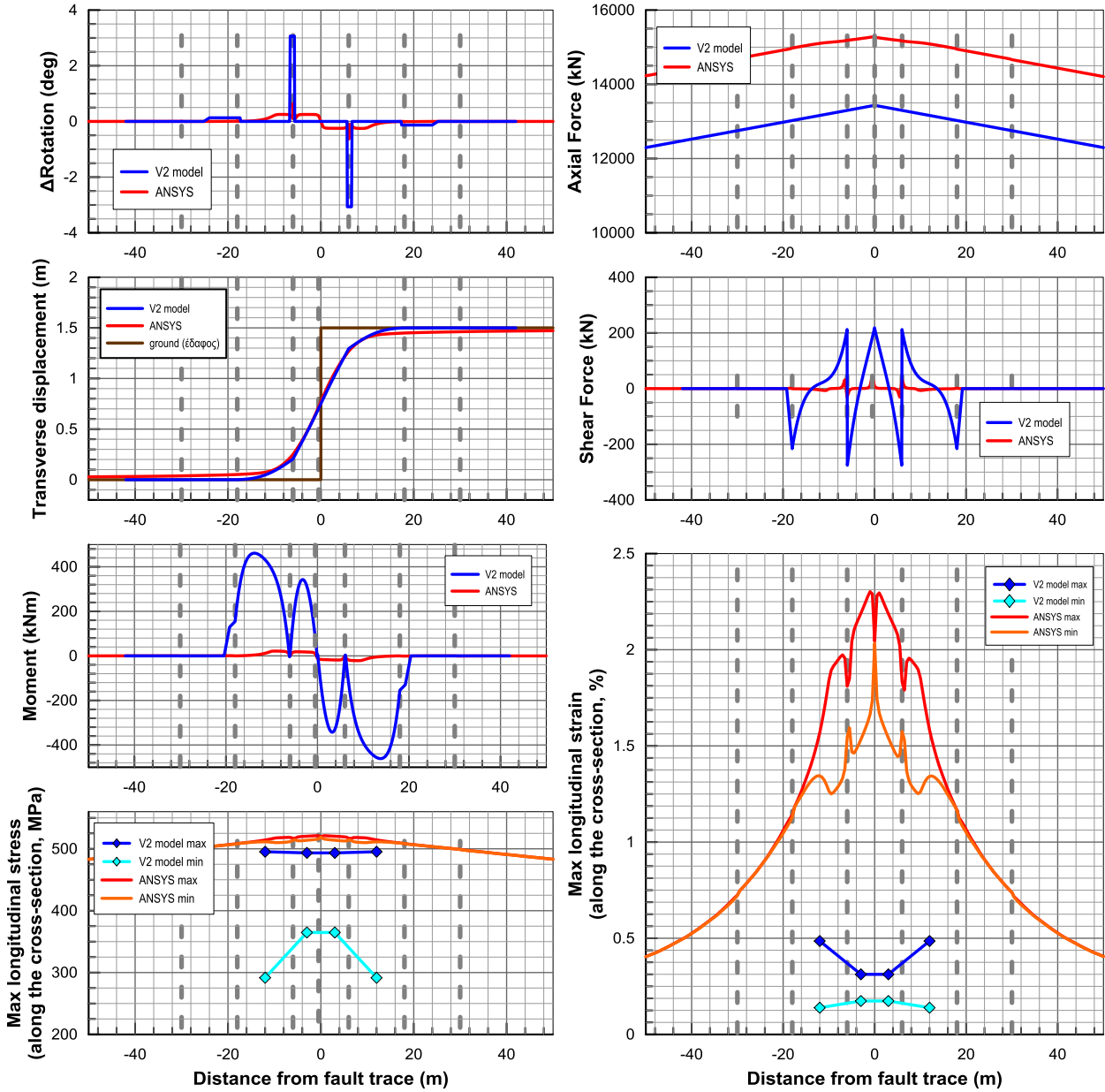
A.33. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m – Ρήγμα στην μέση – $D_f=3m$

$\beta=90^\circ$



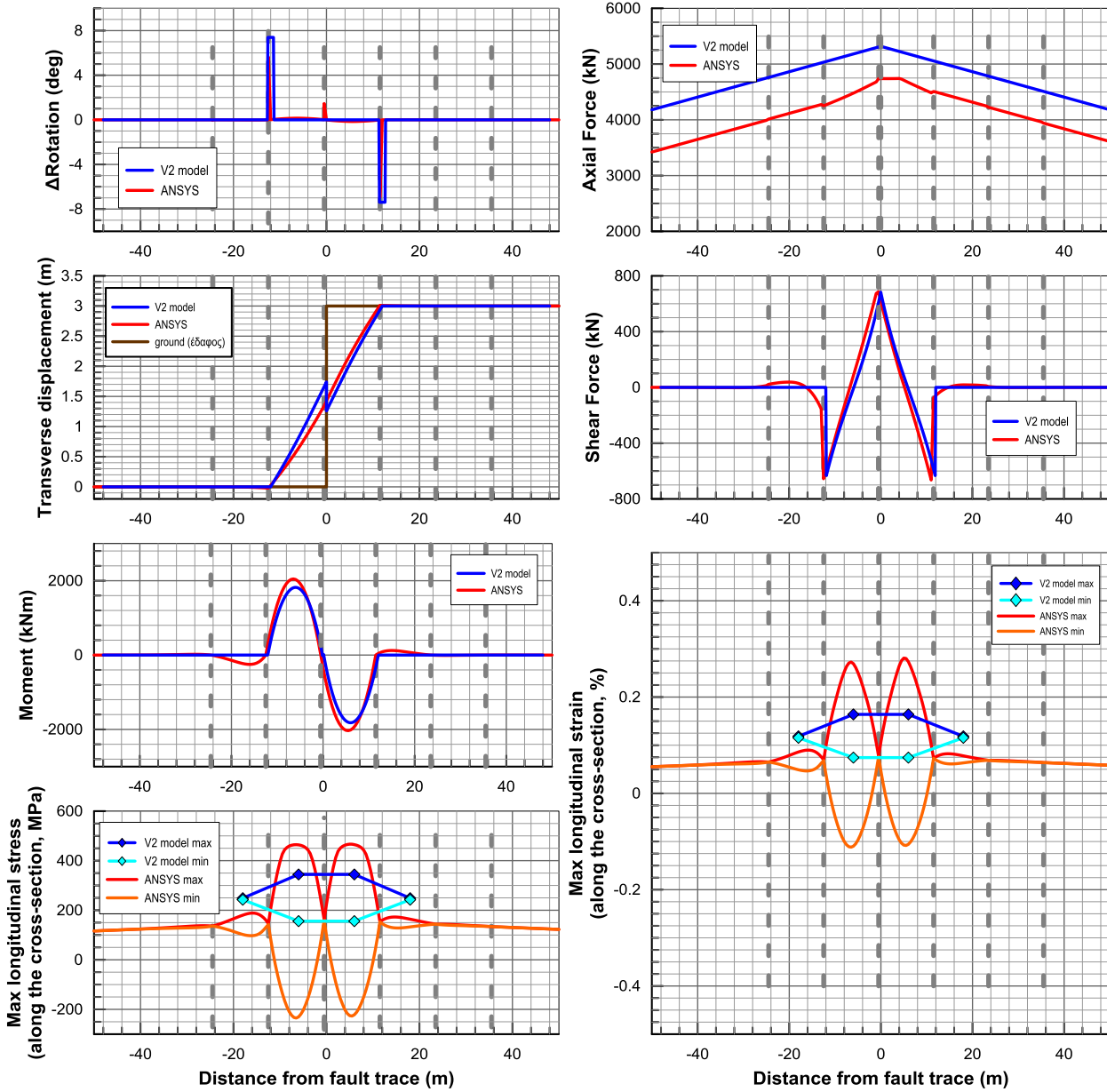
A.34. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m – Ρήγμα στην μέση – $D_f=3m$

$\beta=30^\circ$



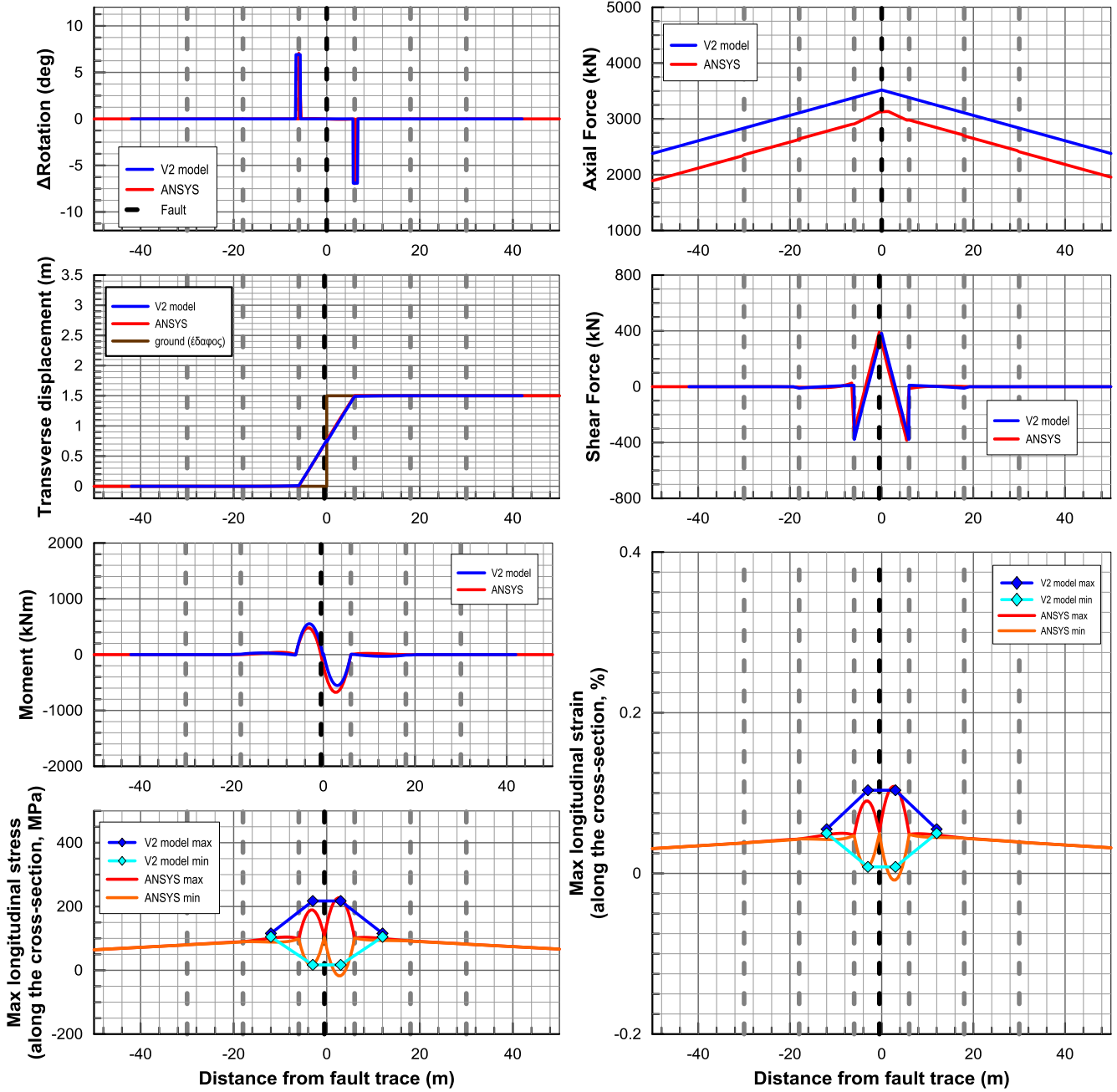
A.35. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m – Ρήγμα στην άκρη – $D_f=3m$

$\beta=90^\circ$



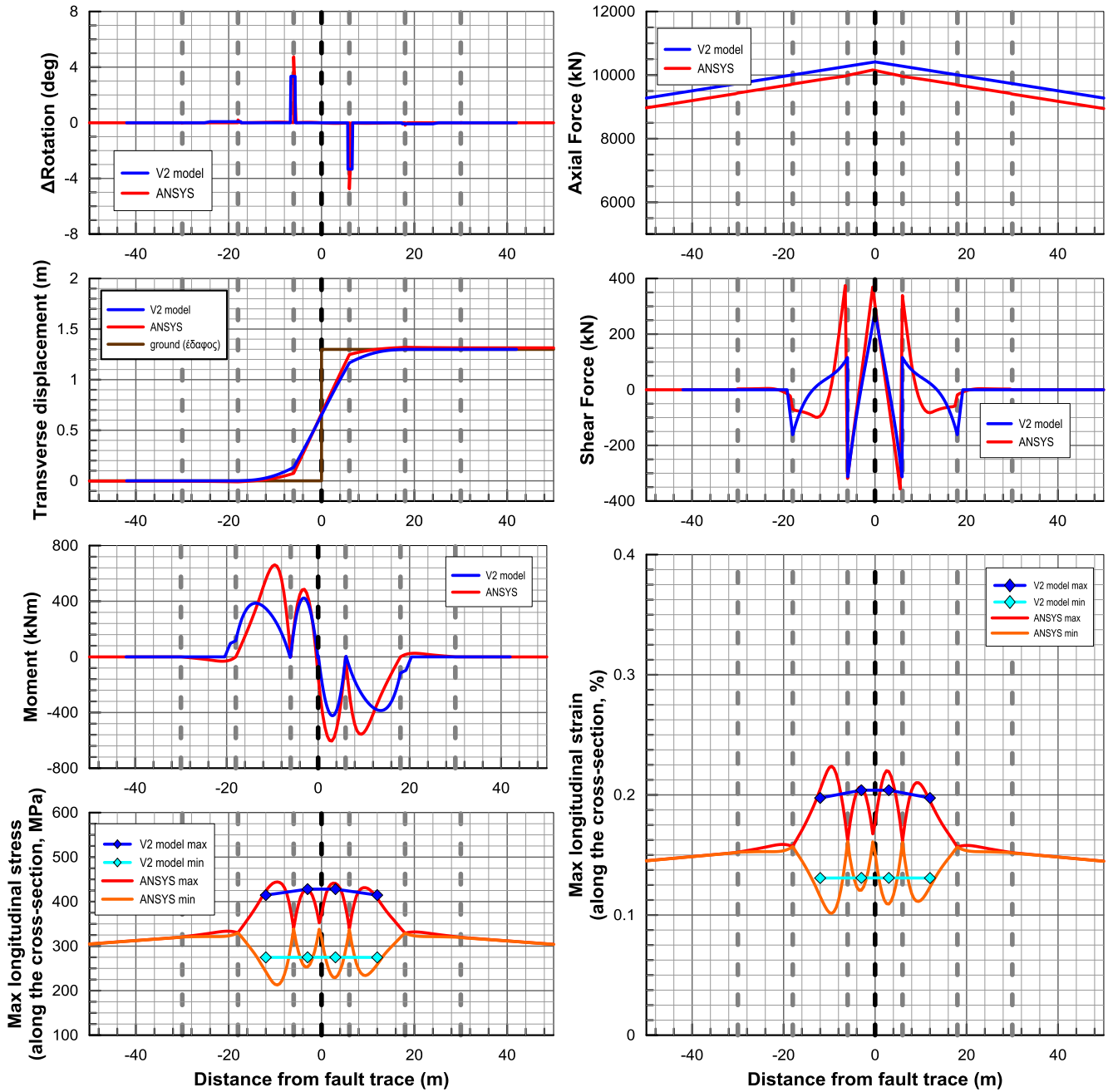
A.36. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m – Ρήγμα στην μέση – $D_f=1,5m$

$\beta=90^\circ$



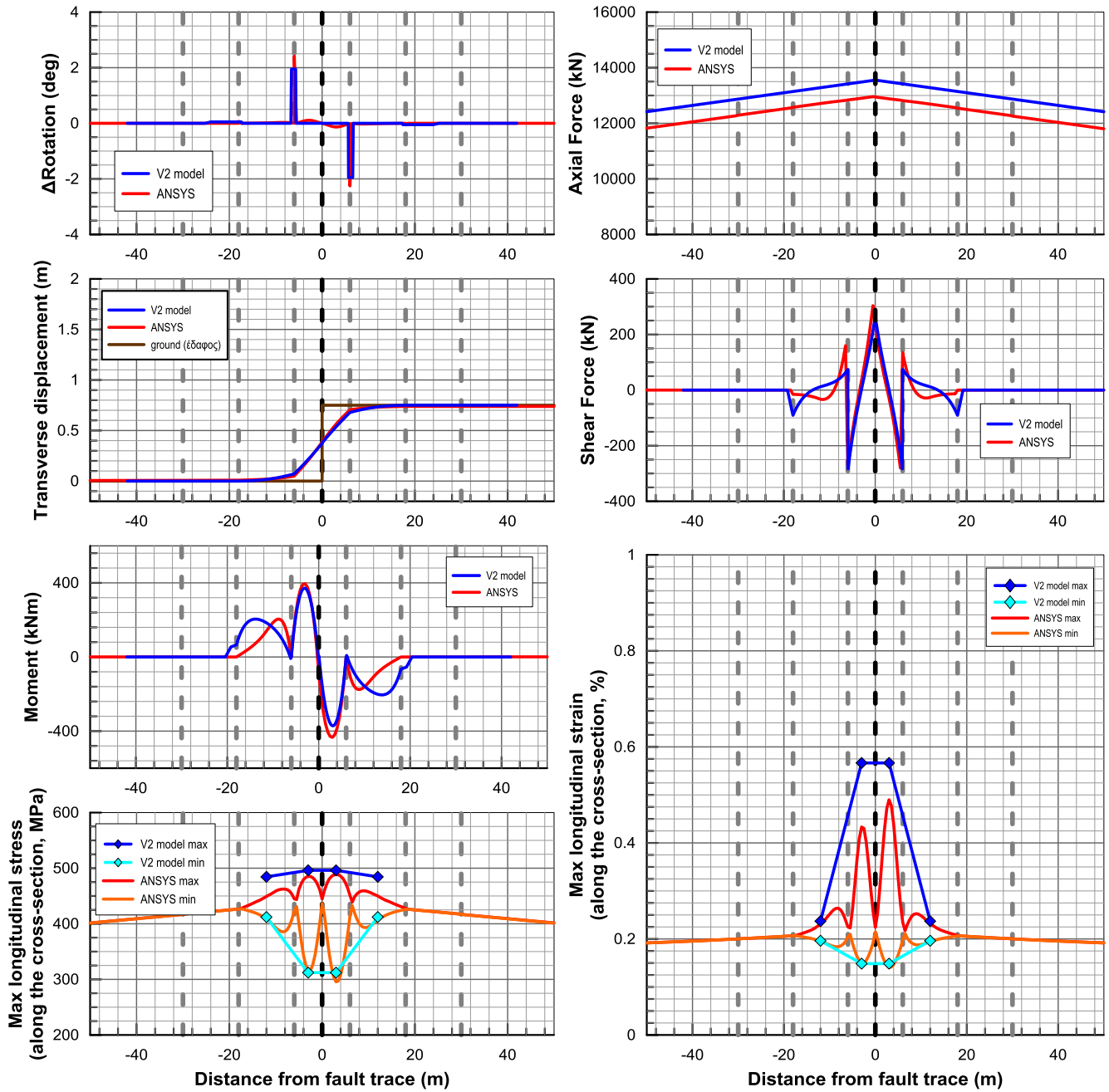
A.37. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m – Ρήγμα στην μέση – $D_f=1,5m$

$\beta=60^\circ$



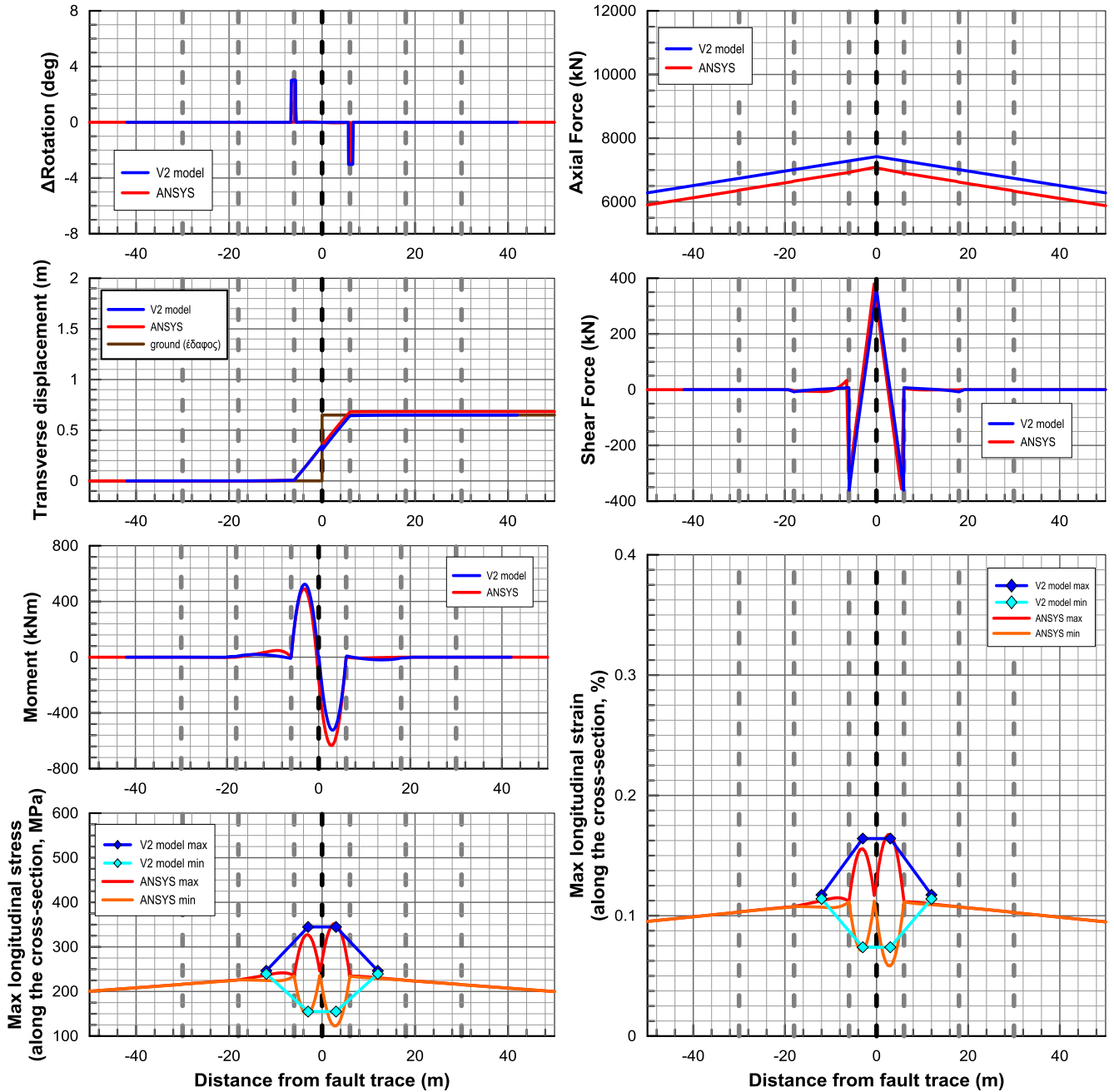
A.38. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m – Ρήγμα στην μέση – $D_f=1,5m$

$\beta=30^\circ$



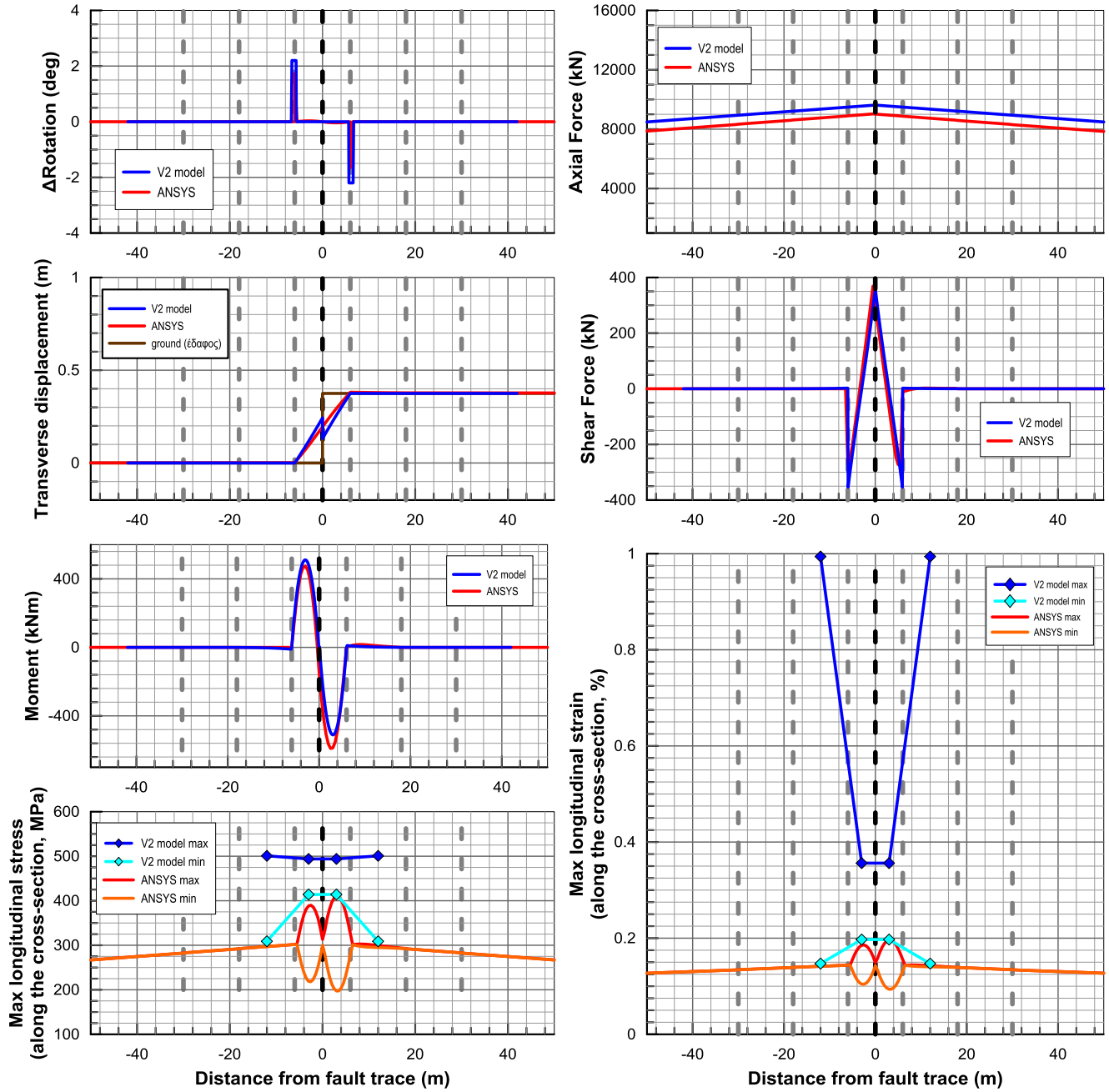
A.39. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m – Ρήγμα στην μέση – $D_f=0.75m$

$\beta=60^\circ$



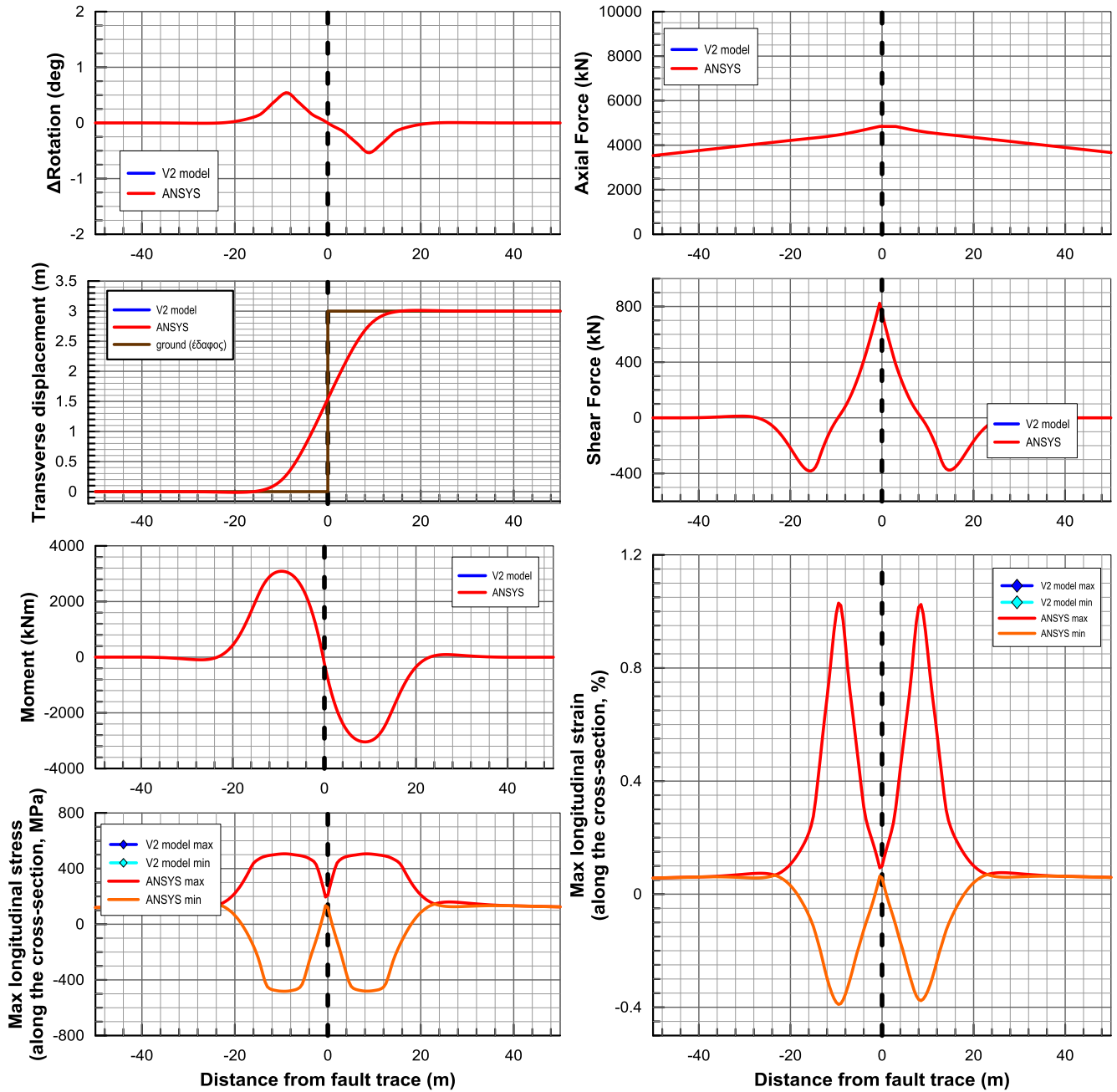
A.40. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m – Ρήγμα στην μέση – $D_f=0.75m$

$\beta=30^\circ$



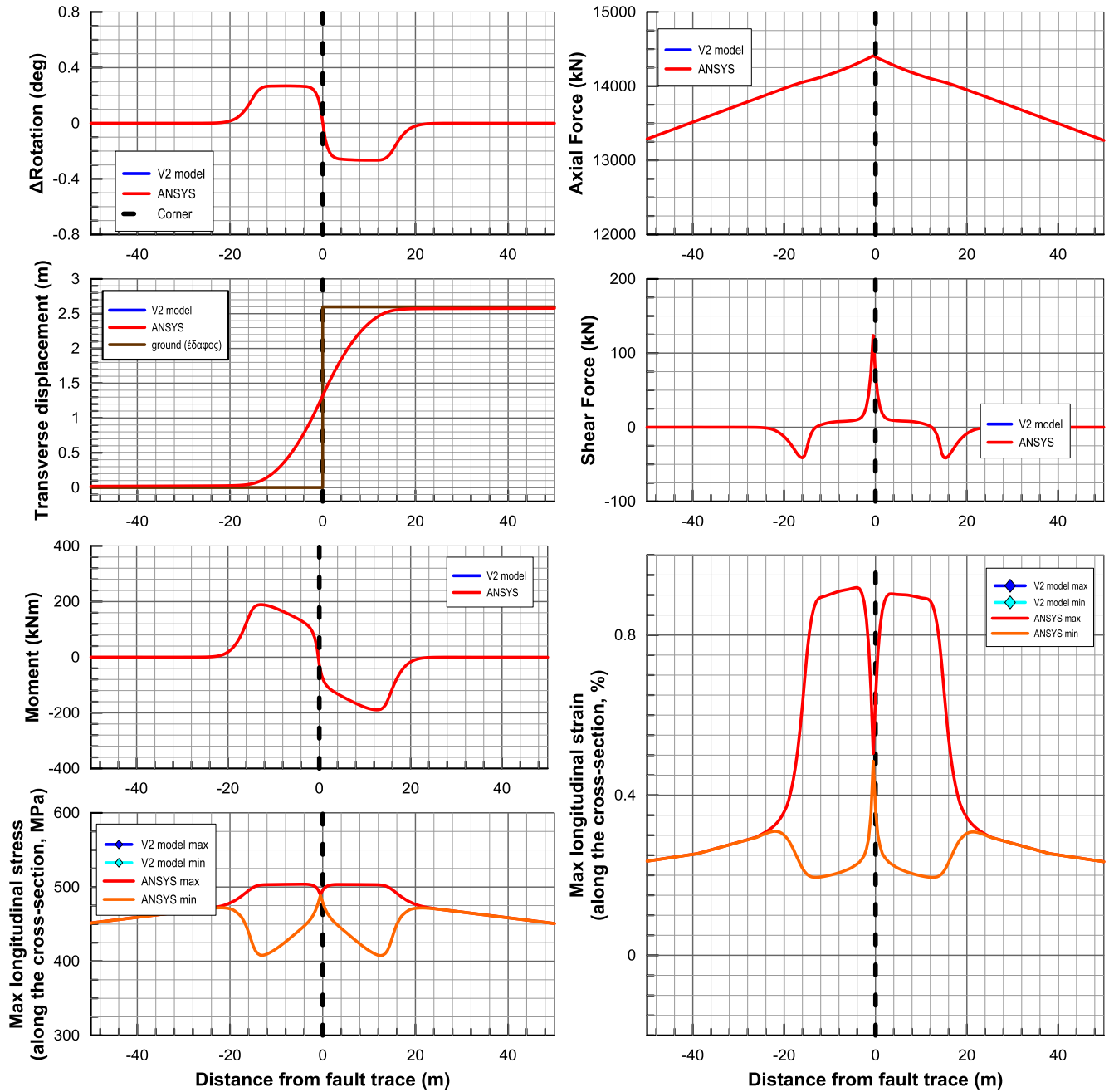
Α.Ι. Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 3\text{m}$

$\beta = 90^\circ$



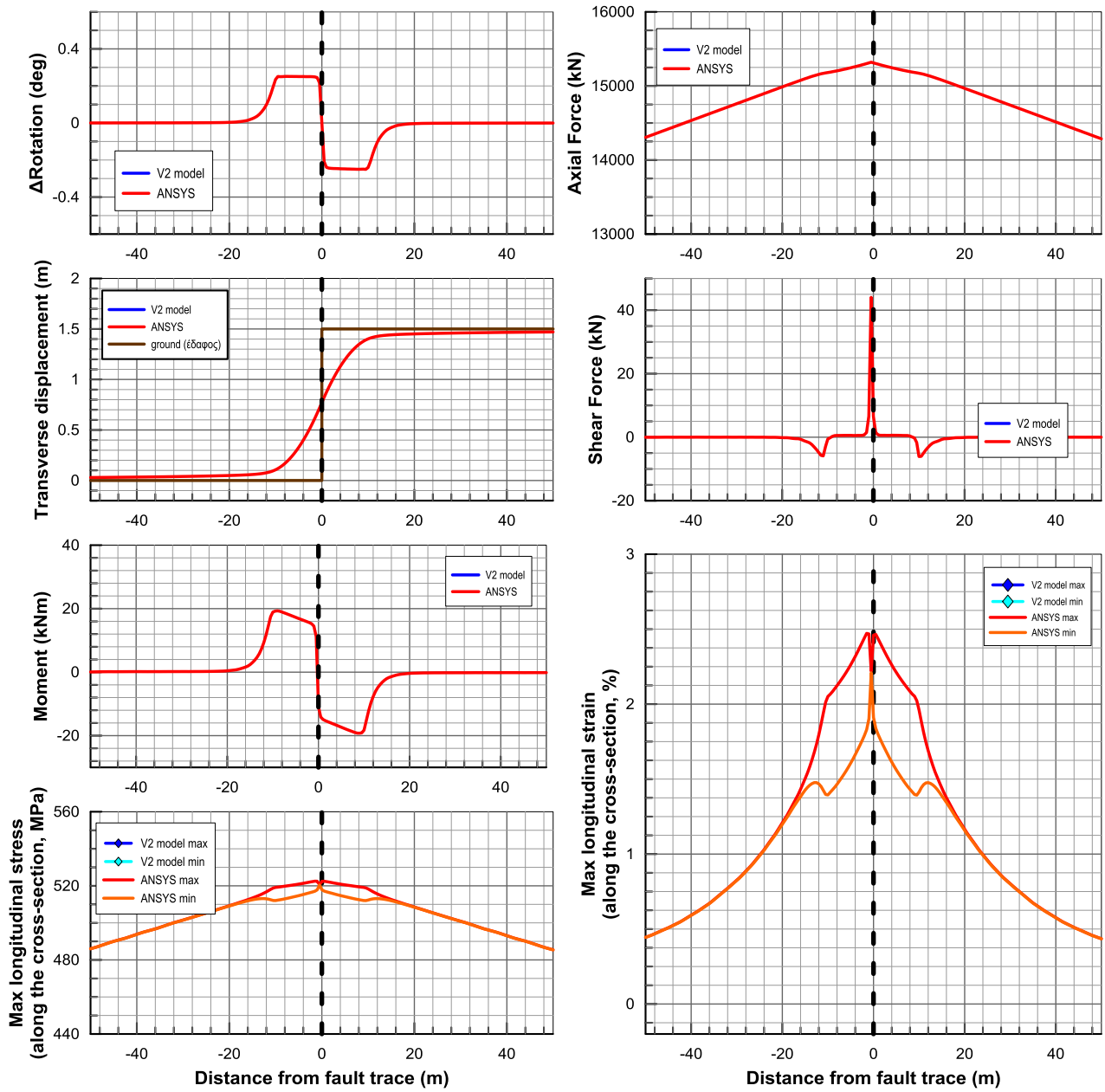
A.II. Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 3m$

$\beta = 60^\circ$



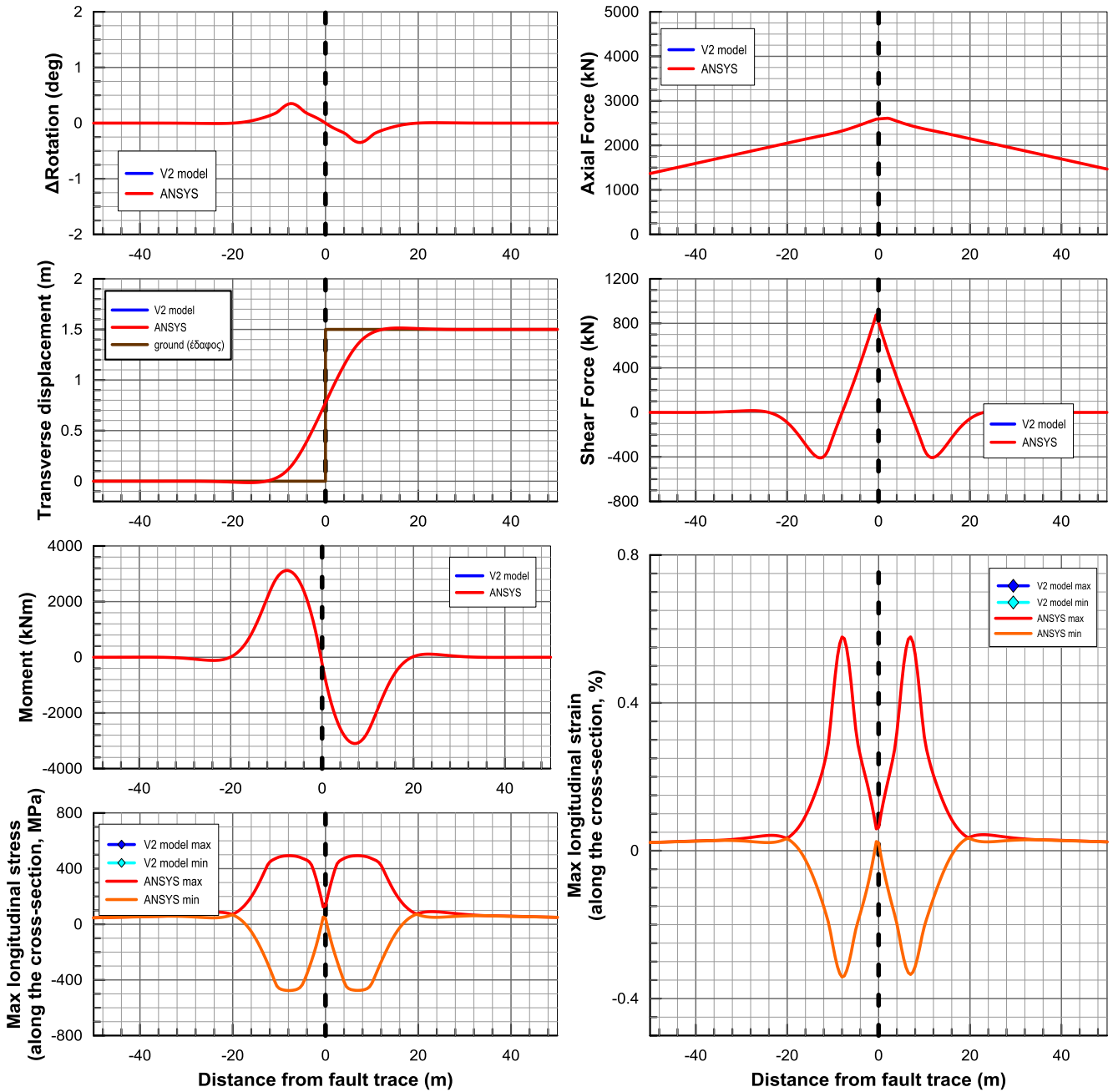
A.III. Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 3m$

$\beta = 30^\circ$



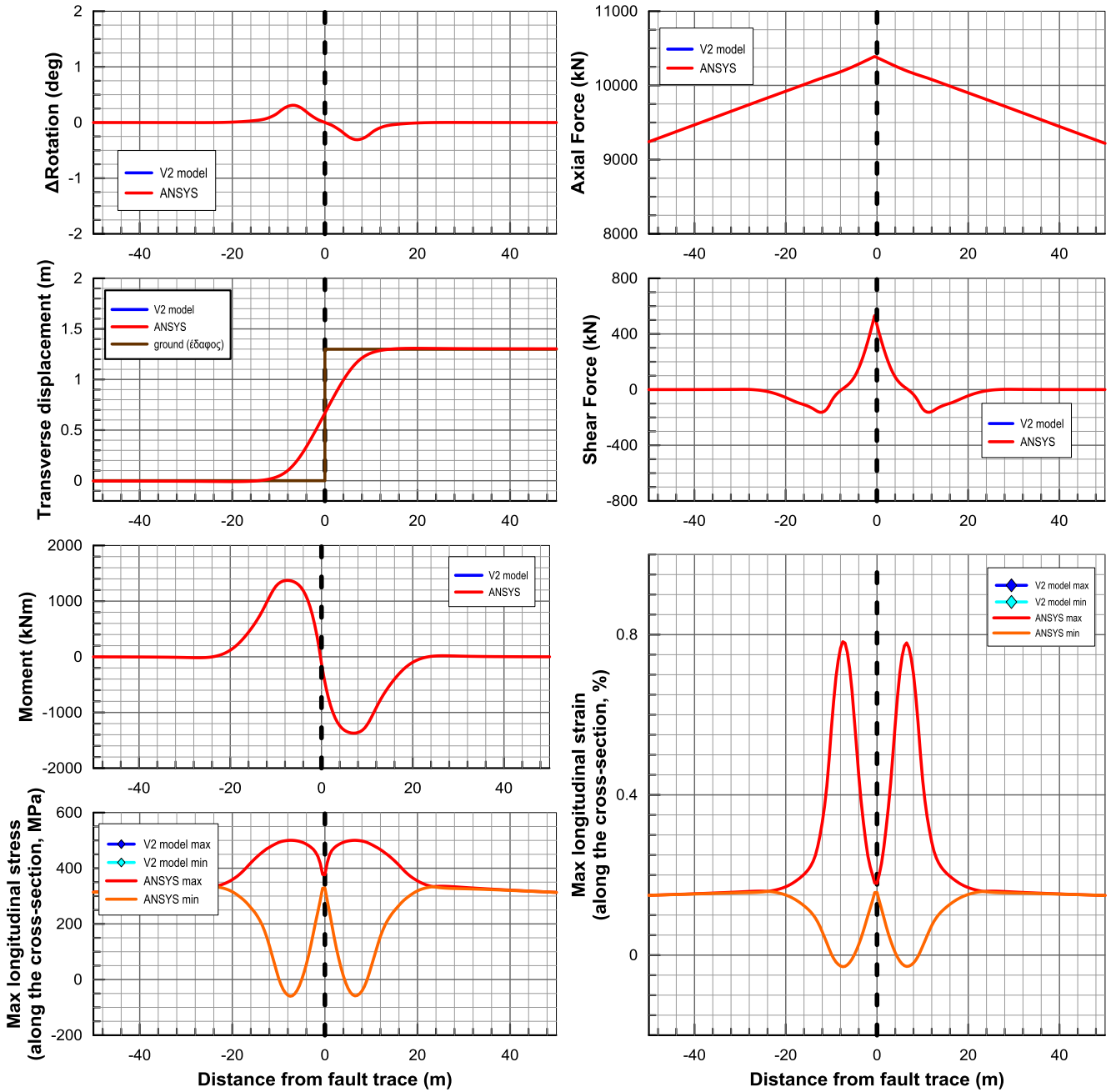
A.IV. Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 1.5m$

$\beta = 90^\circ$



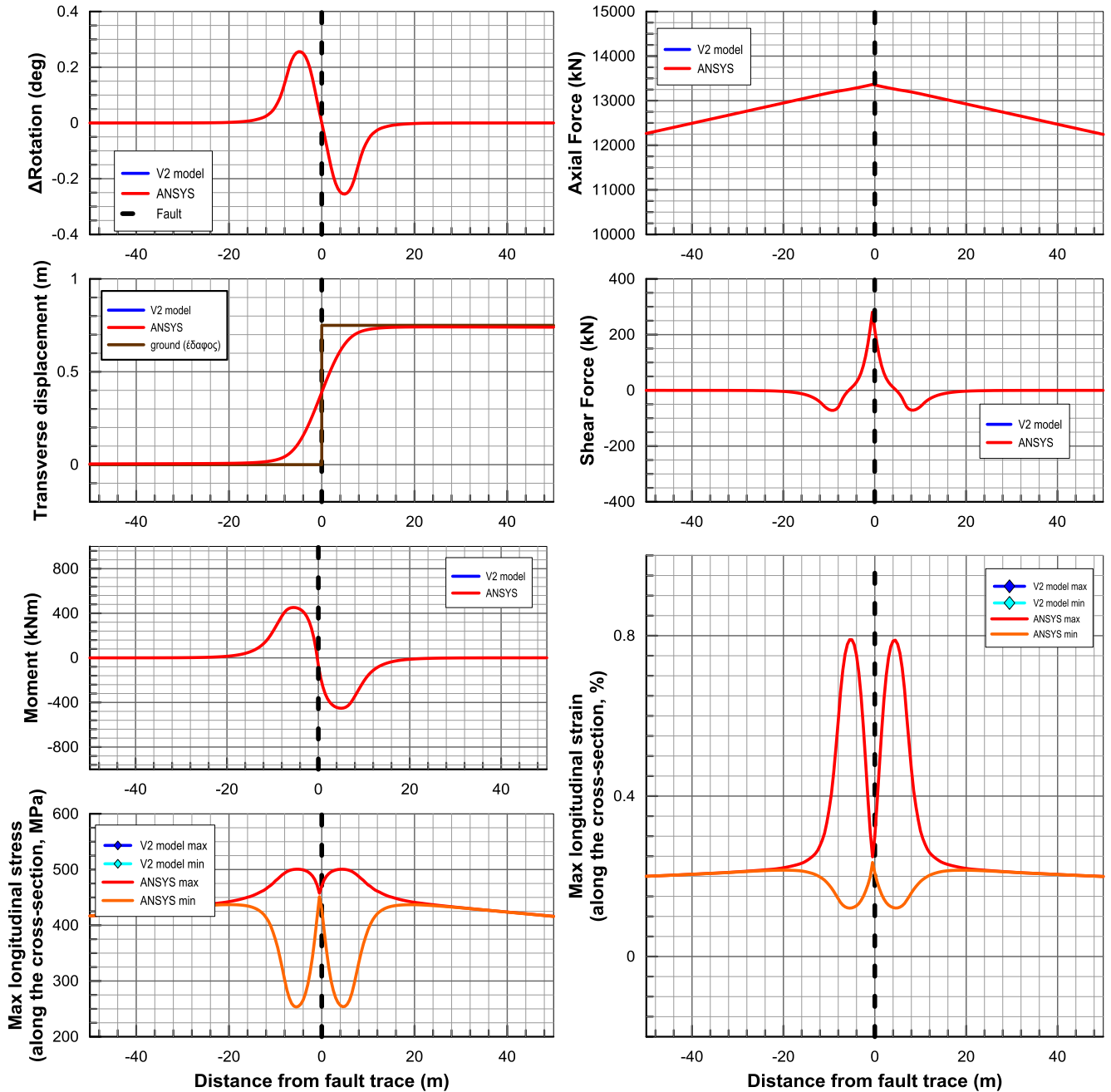
A.V. Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 1.5m$

$\beta = 60^\circ$



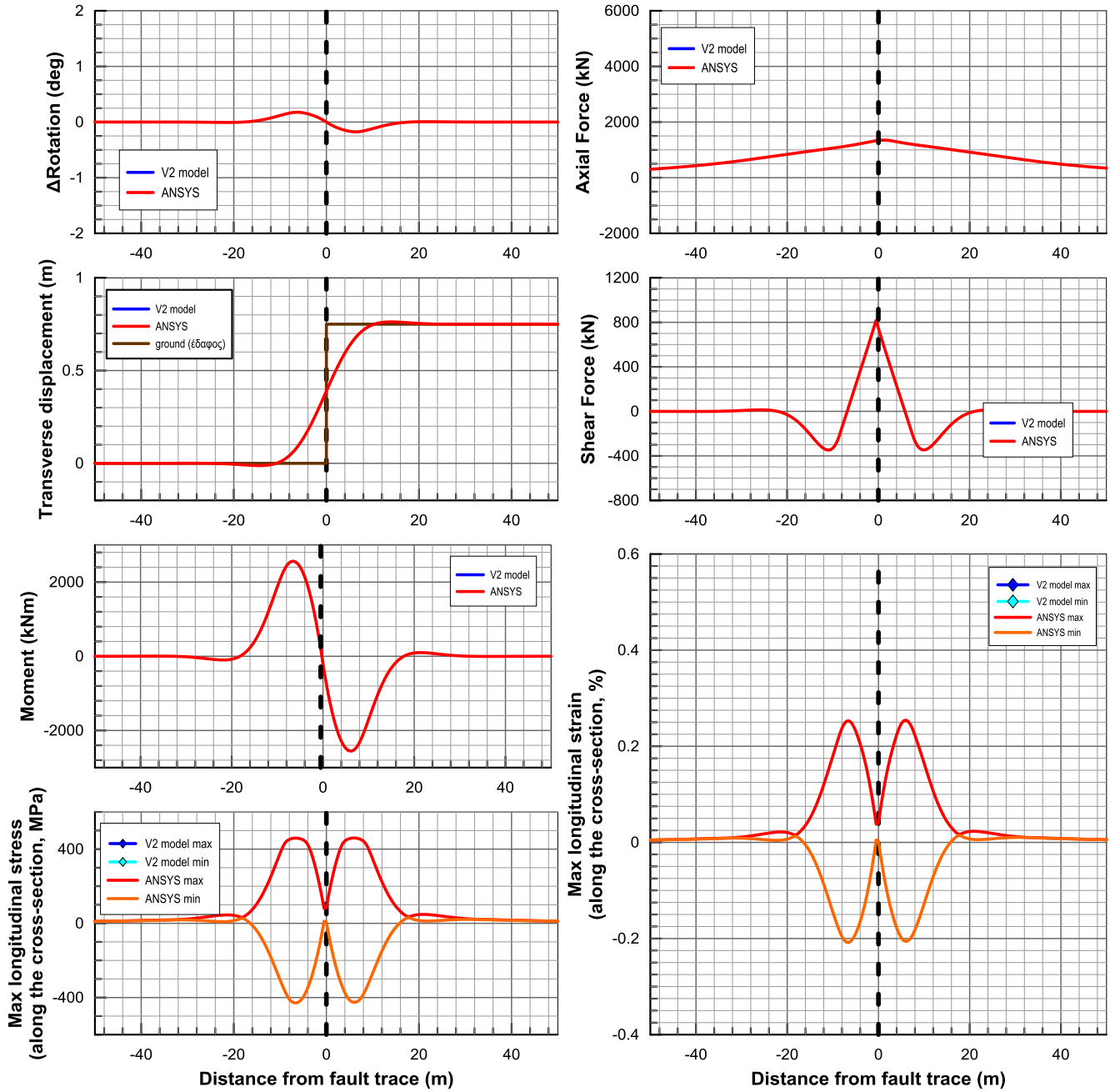
A.VI. Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 1.5m$

$\beta = 30^\circ$



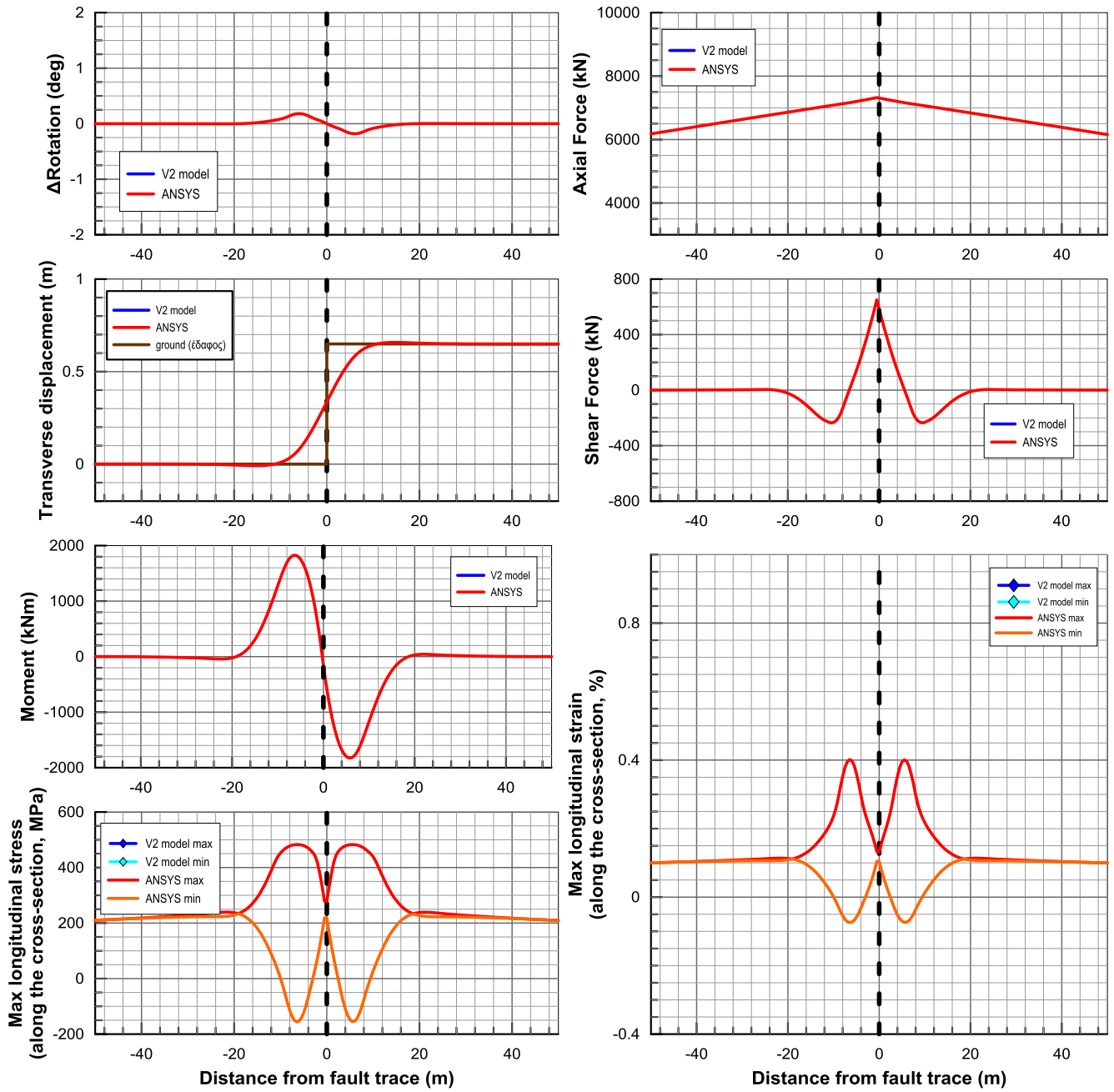
A.VII. Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 0.75m$

$\beta = 90^\circ$



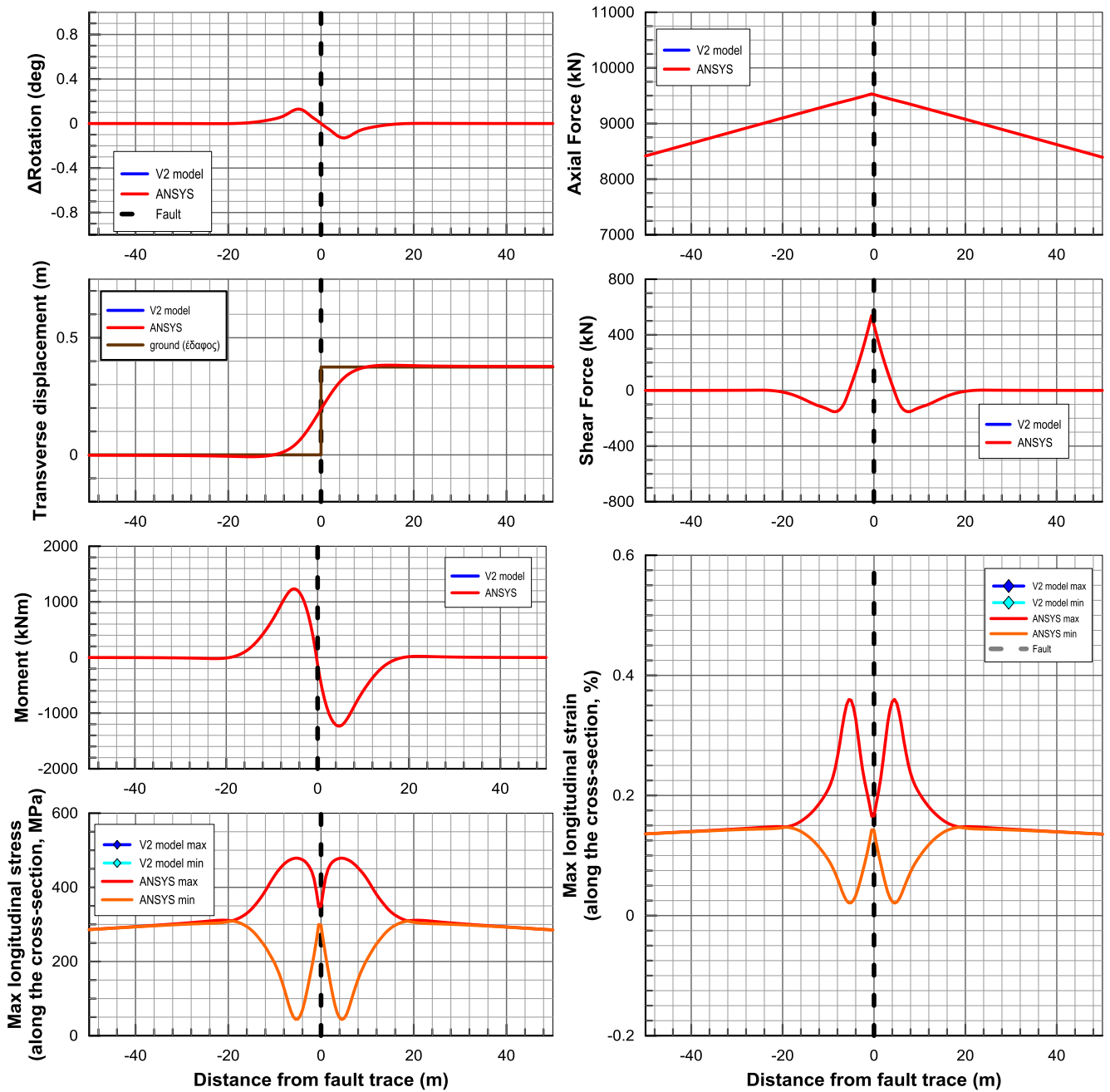
A.VIII. Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 0.75m$

$\beta = 60^\circ$



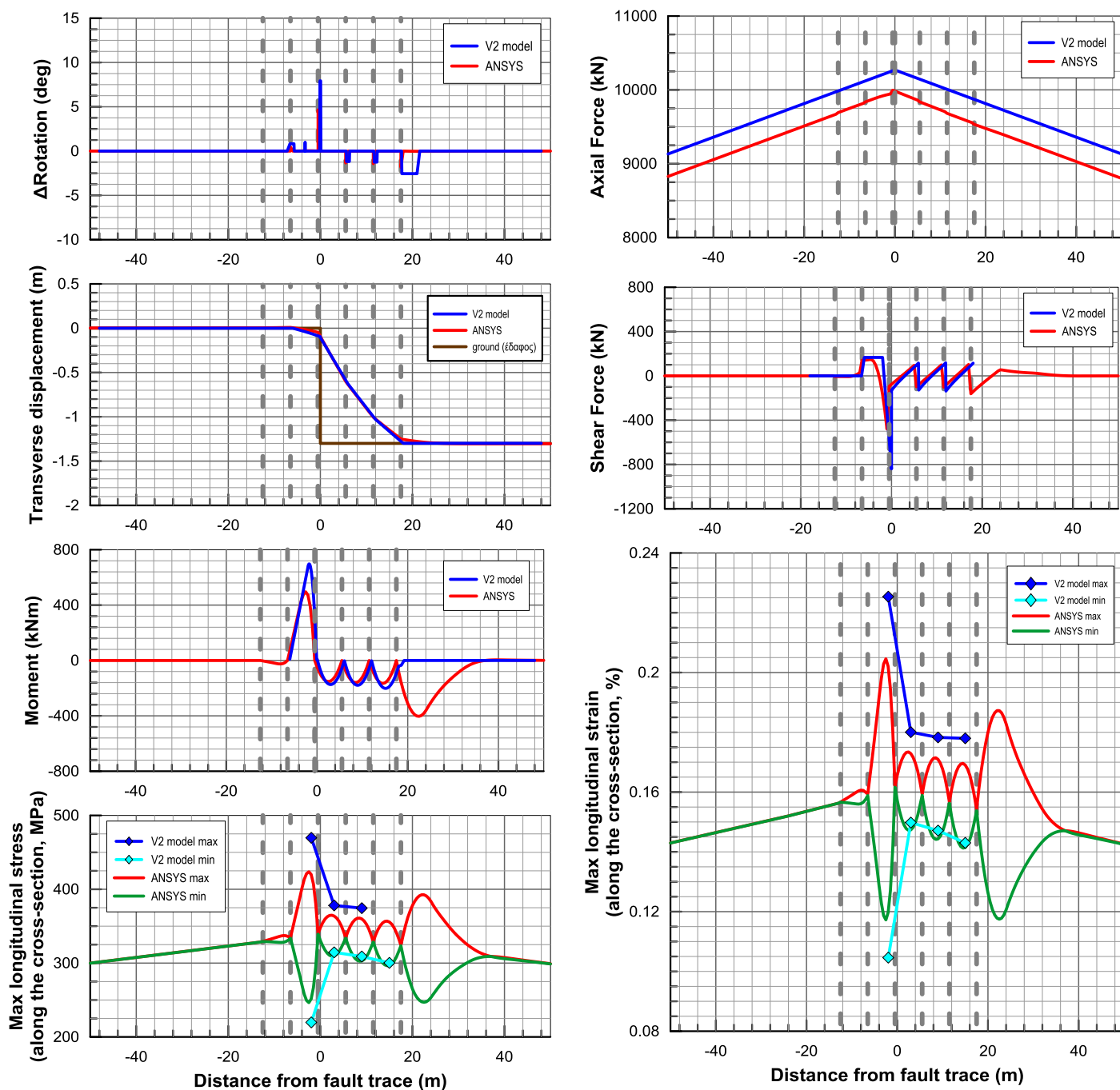
A.IX. Συνεχής Αγωγός-Ρήγμα στη μέση – $D_f = 0.75m$

$\beta = 30^\circ$

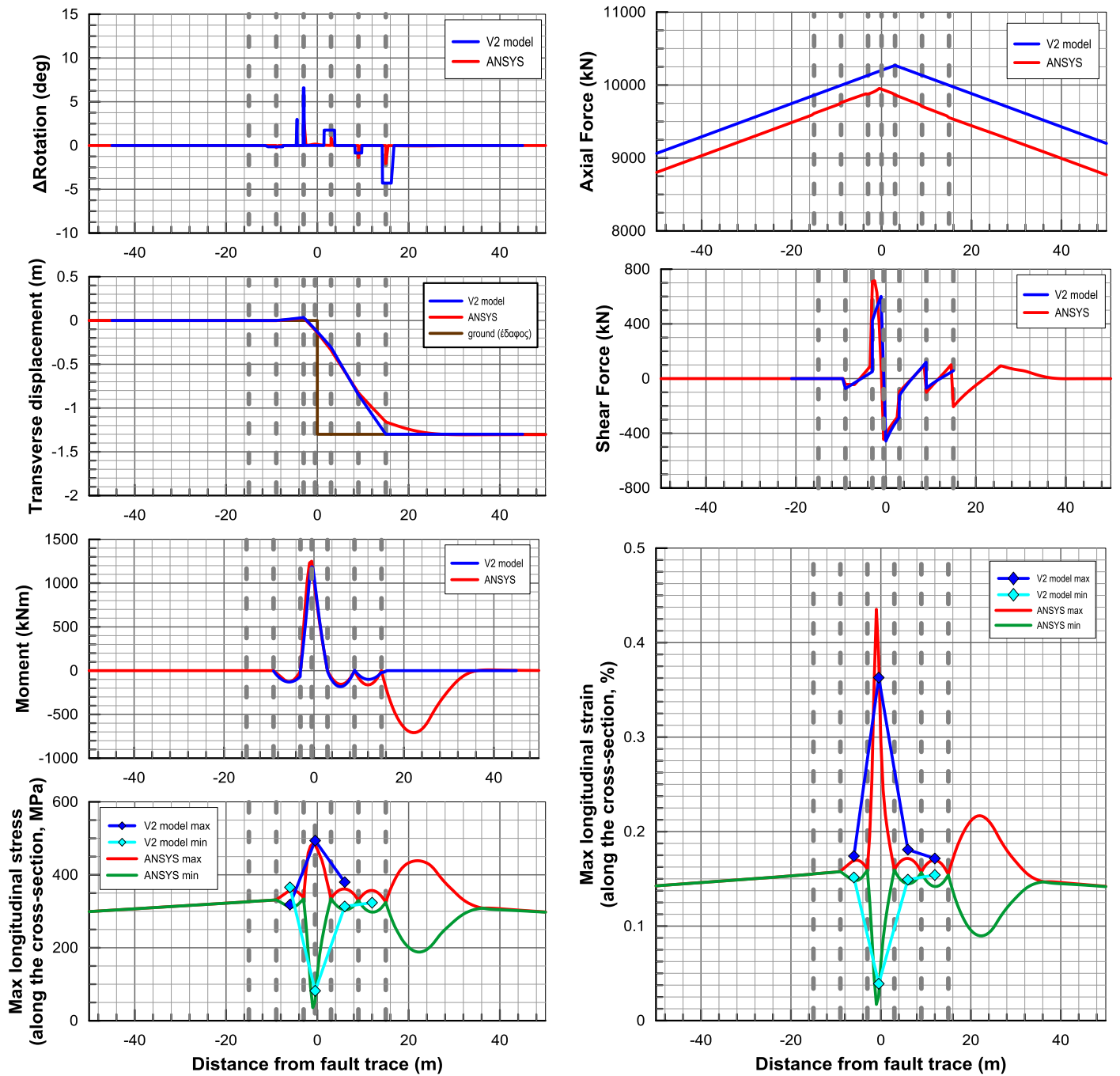


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Αναλυτικές και Αριθμητικές επιλύσεις: Ρήγματα Ορθής Διάρρηξης

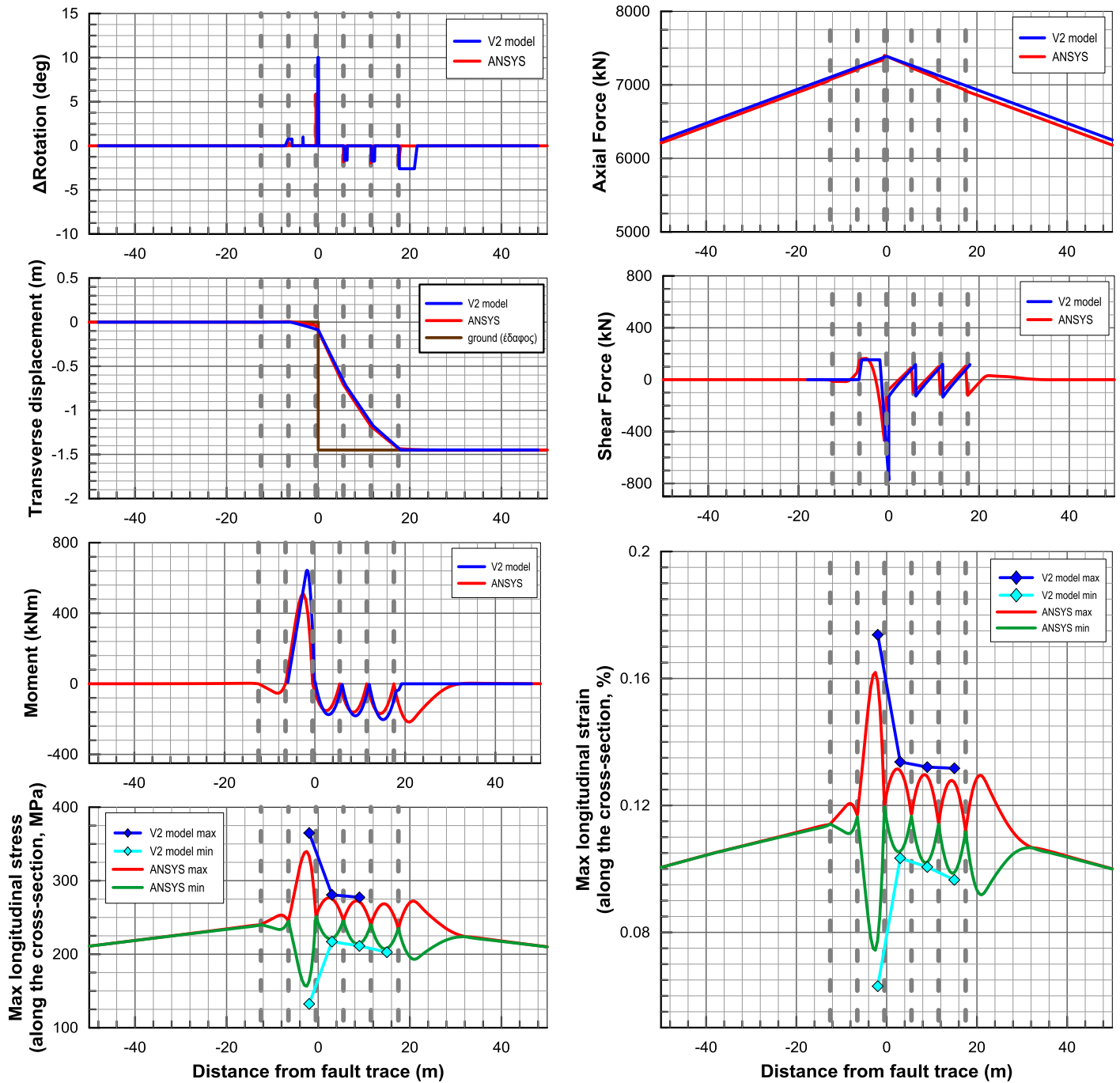
B.1. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,50m$



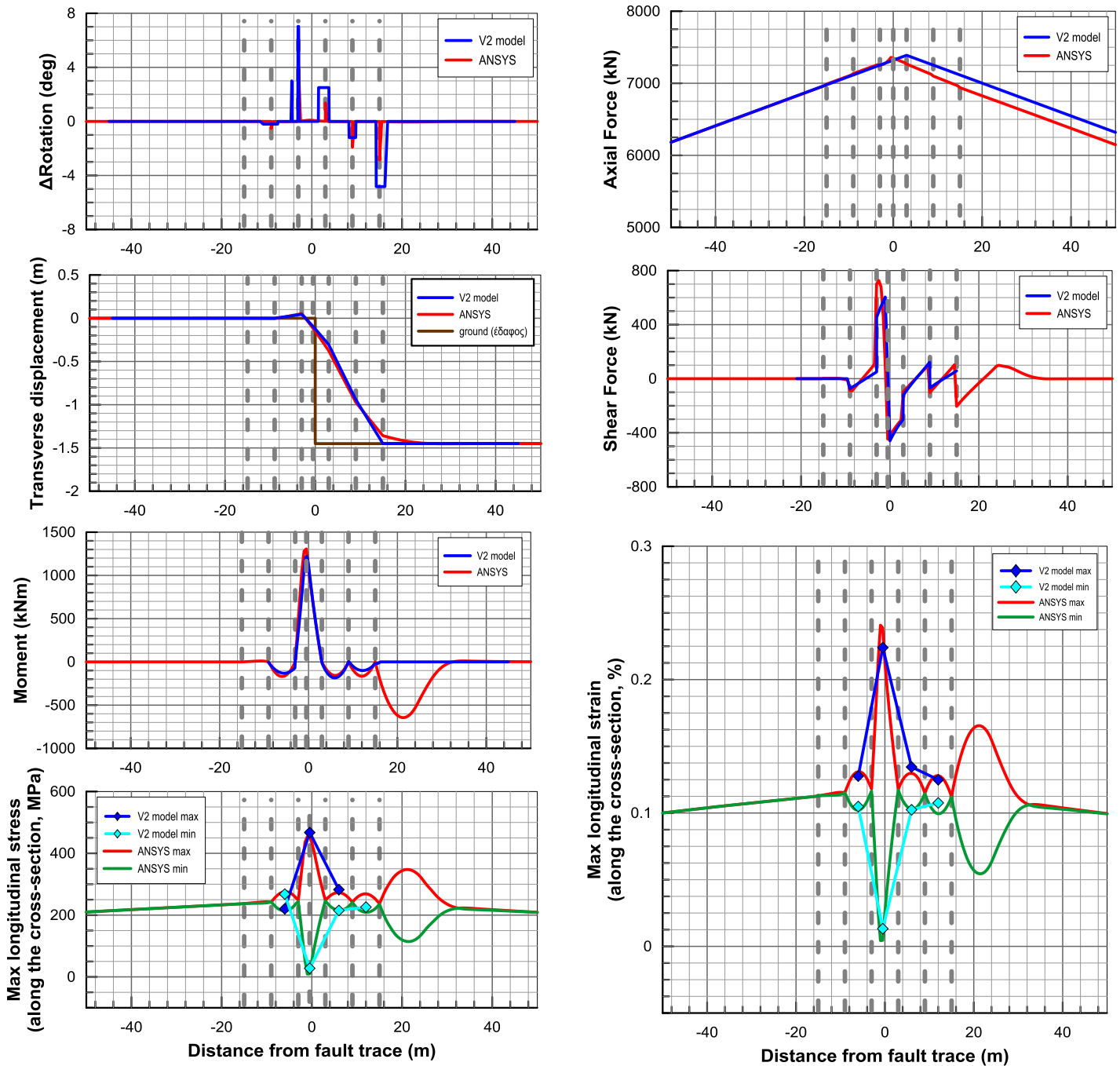
B.2. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,50m$



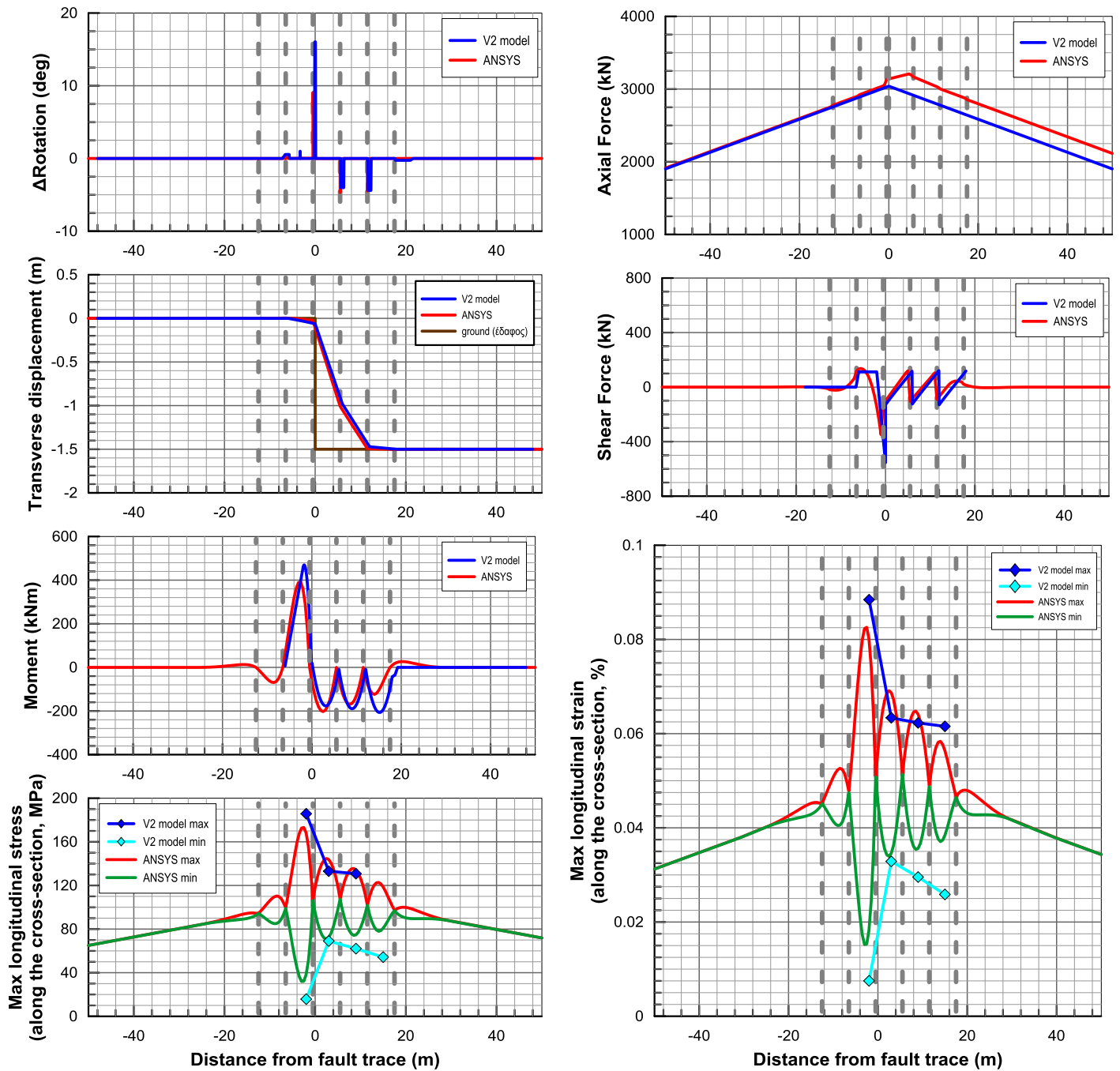
B.3. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,50m$



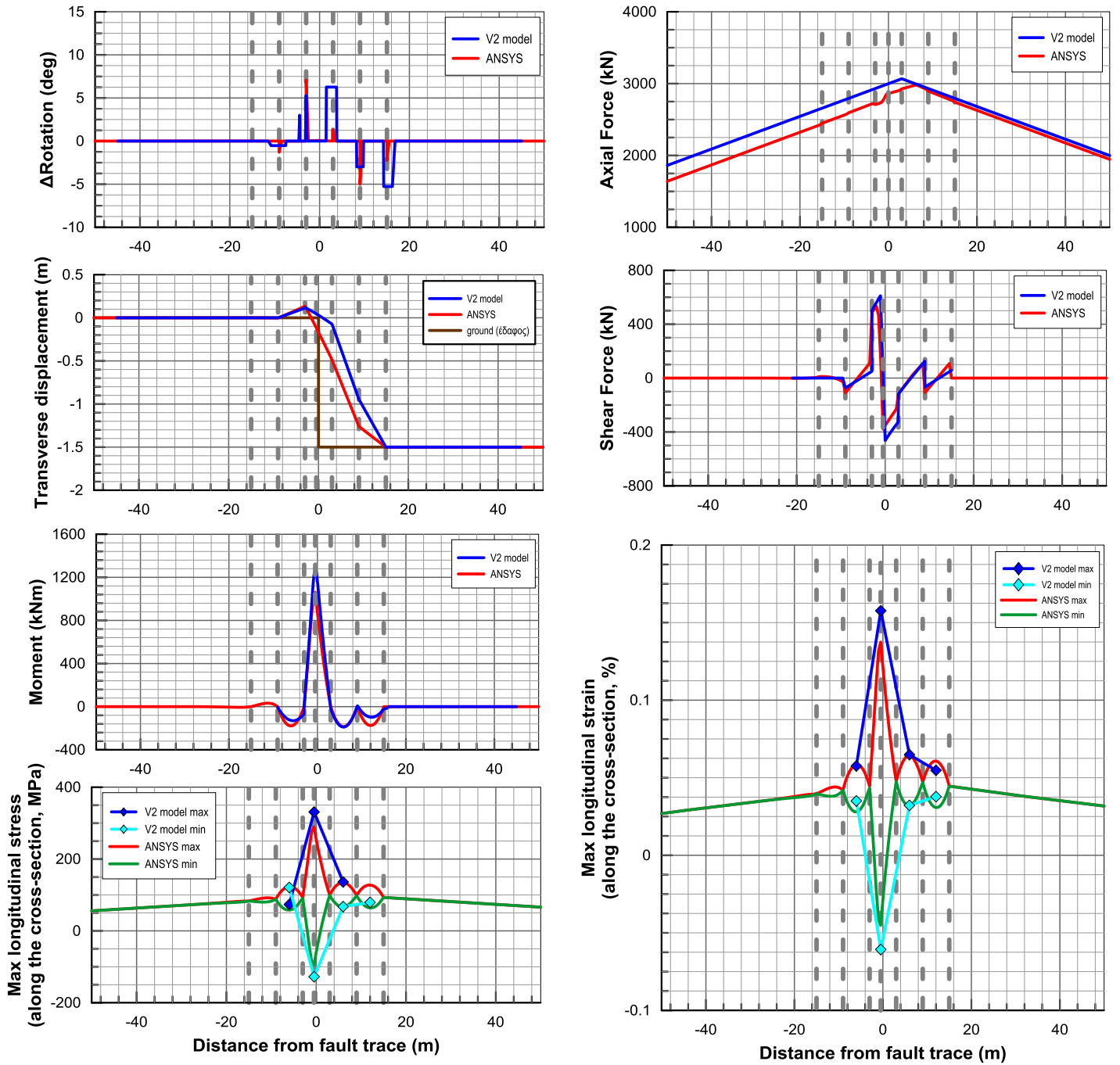
Β.4. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,50m$



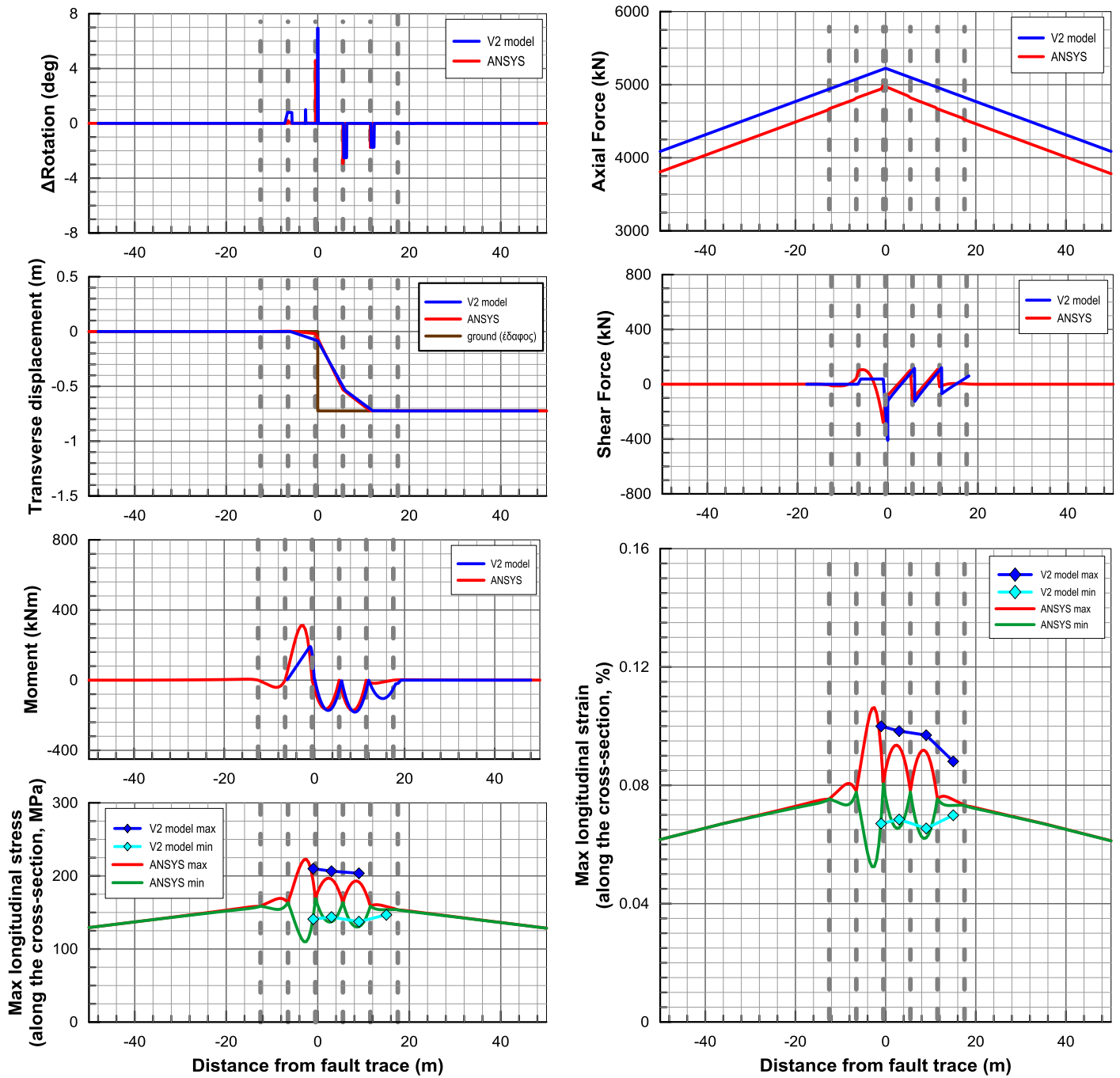
B.5. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,50m$



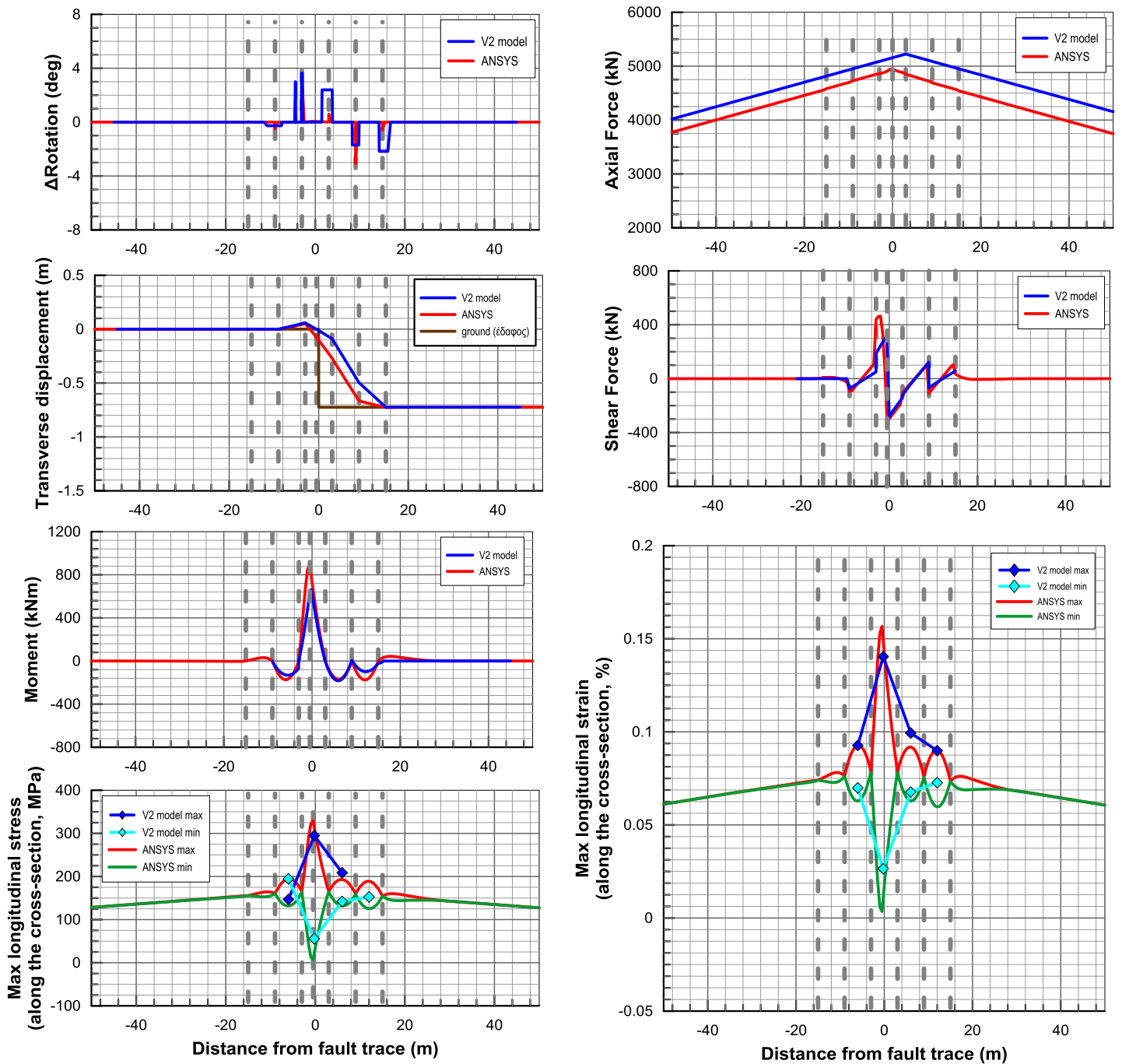
B.6. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,50m$



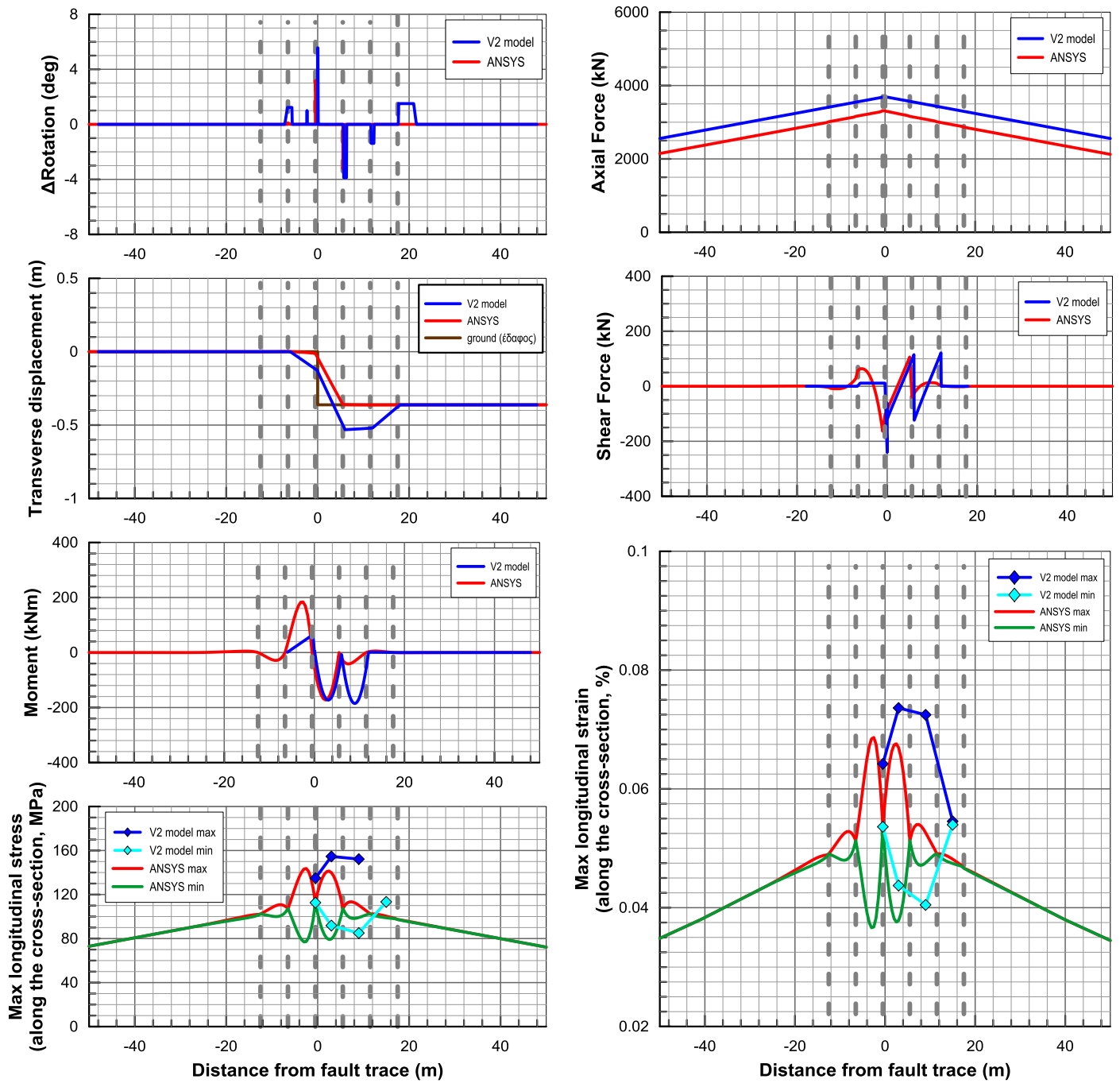
B.7. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,75m$



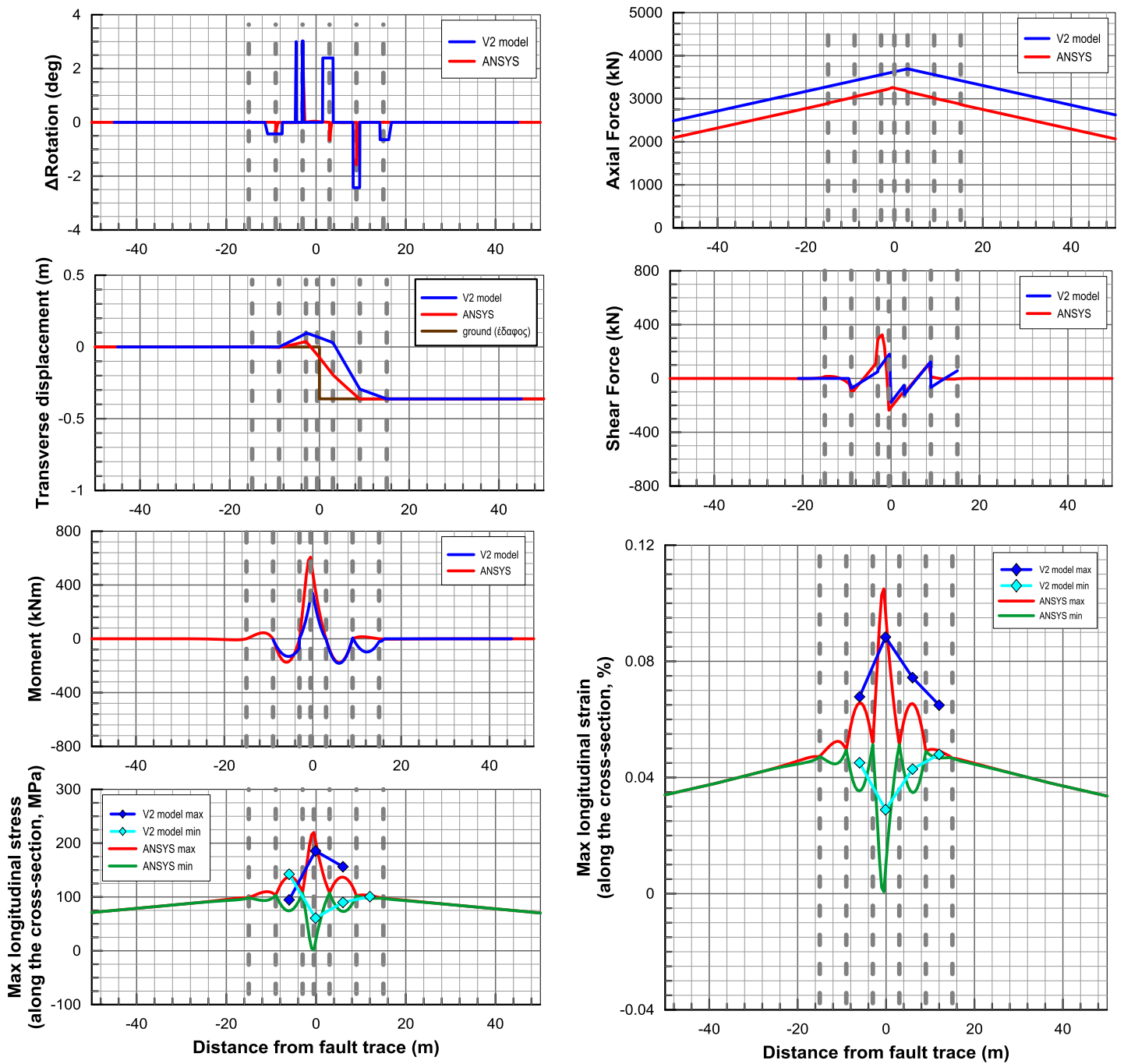
B.8. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,75m$



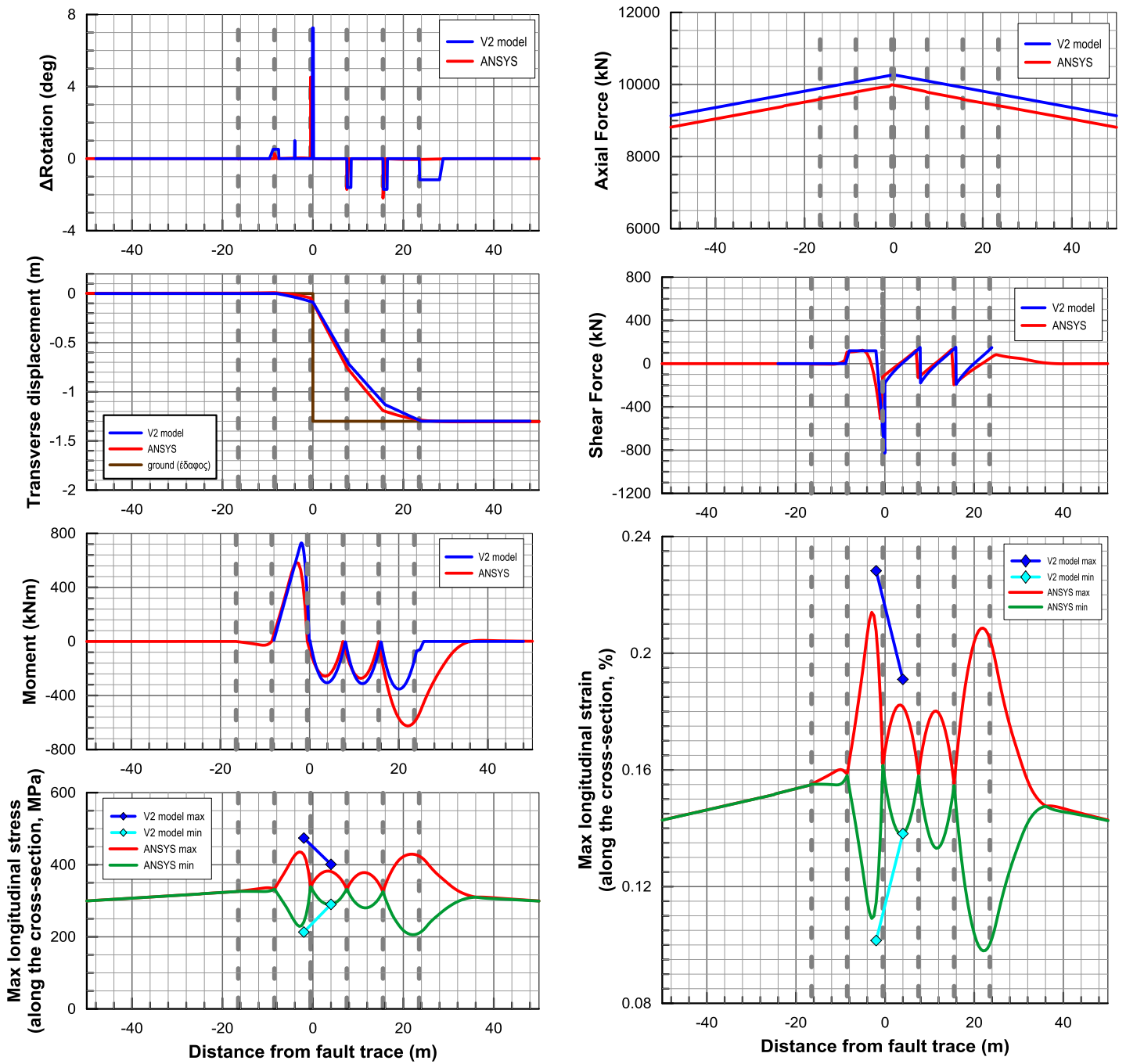
B.9. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,375m$



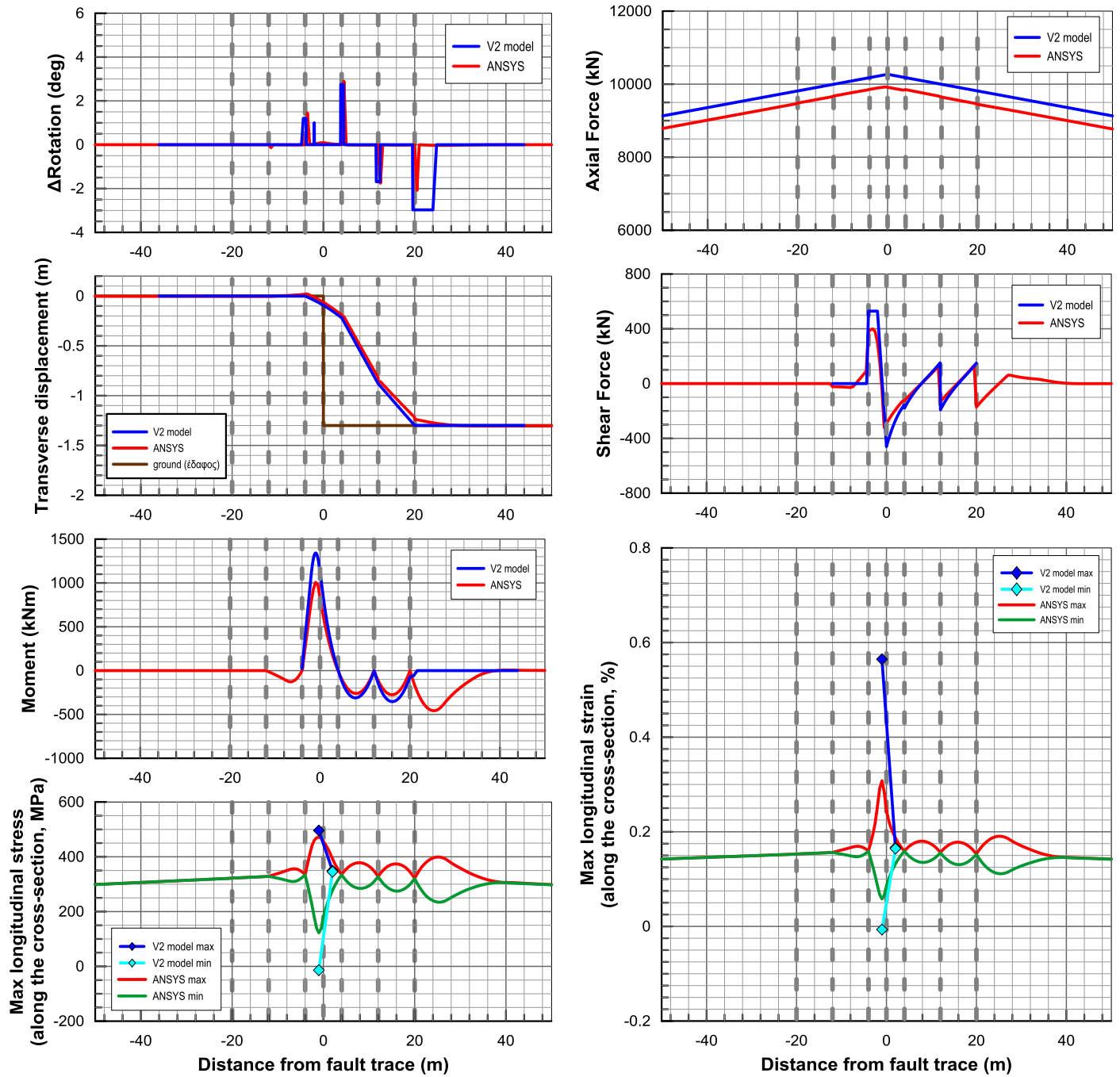
B.10. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 6m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,375m$



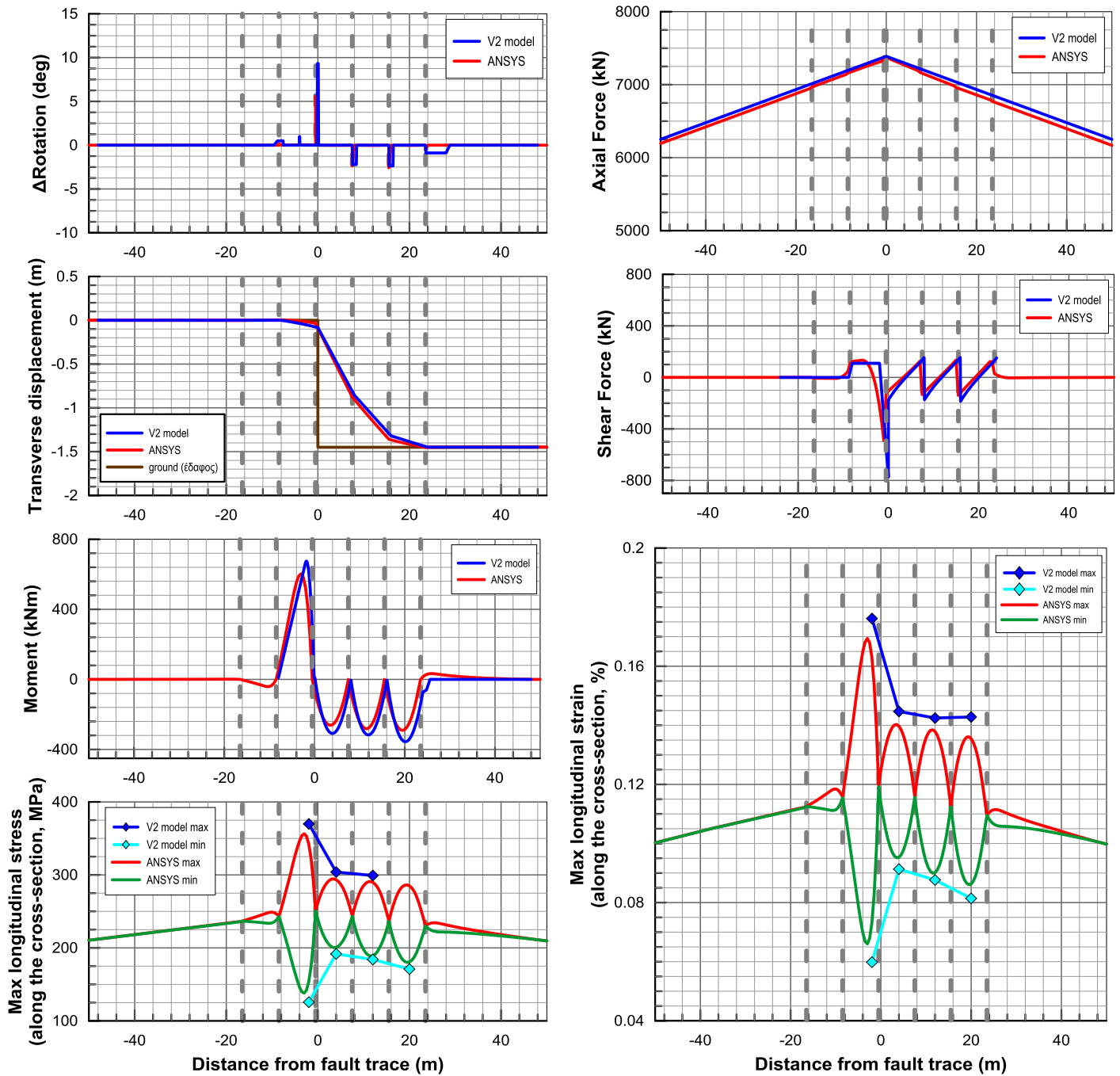
B.11. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,50m$



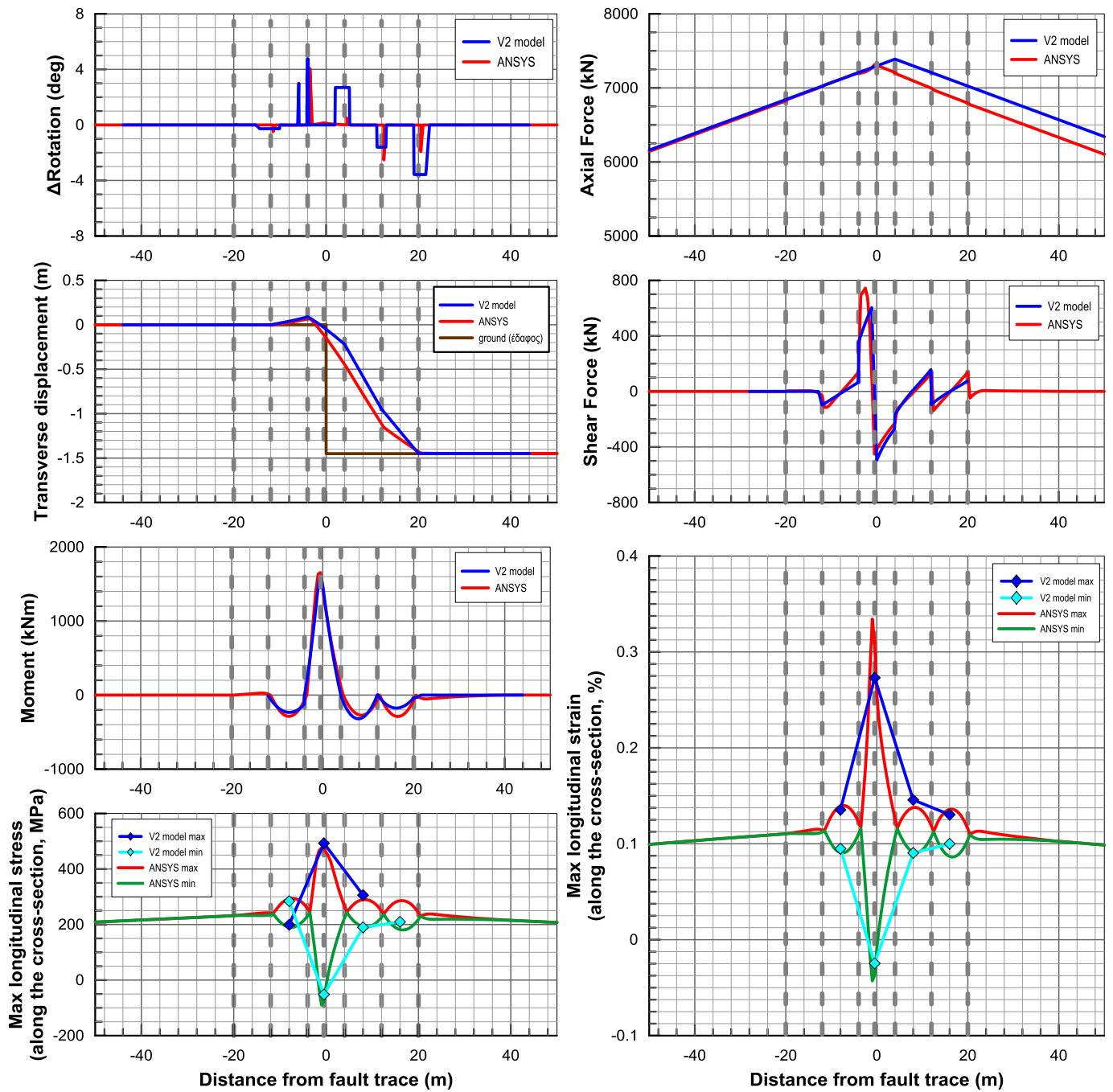
B.12. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,50m$



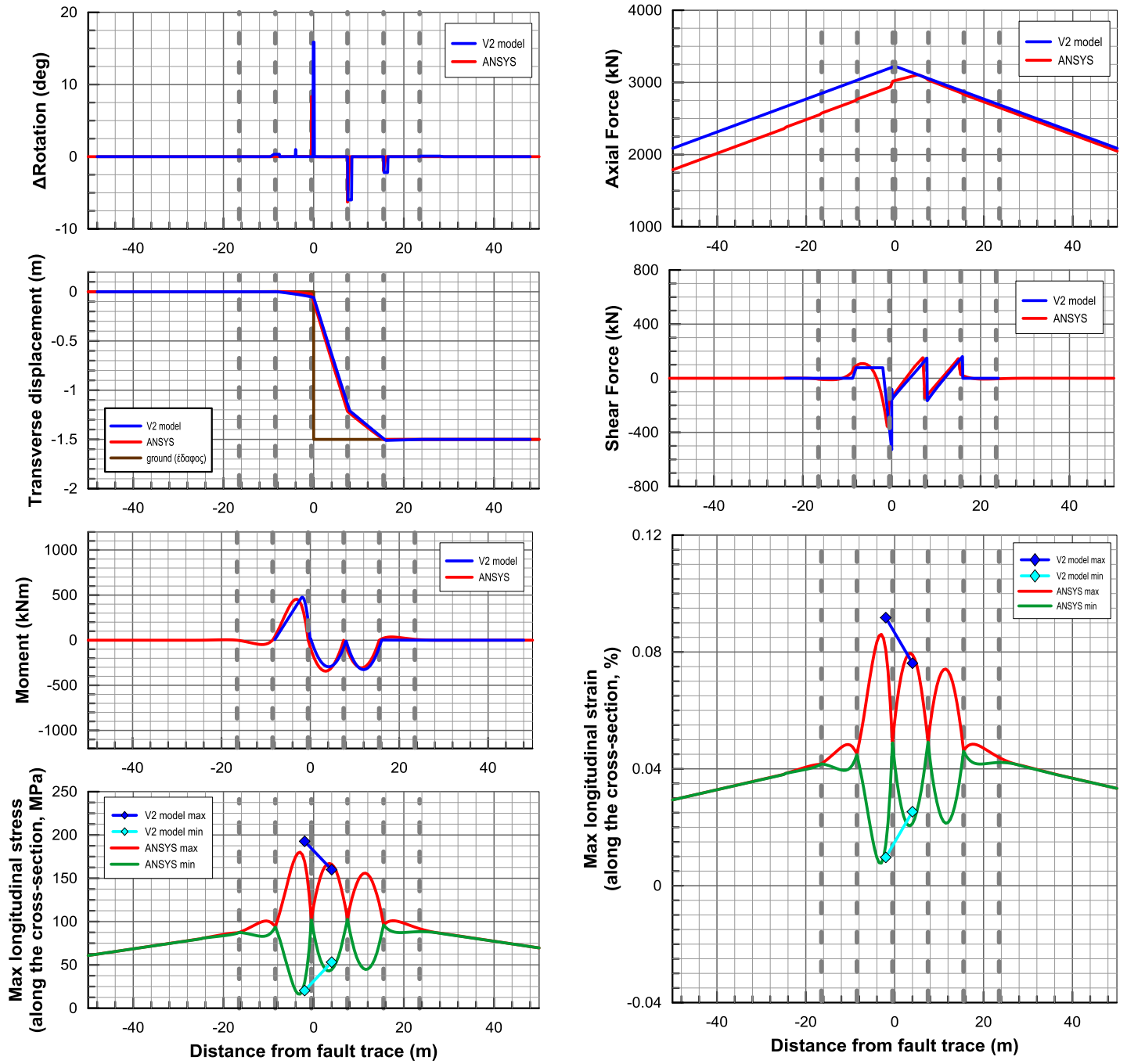
B.13. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,50m$



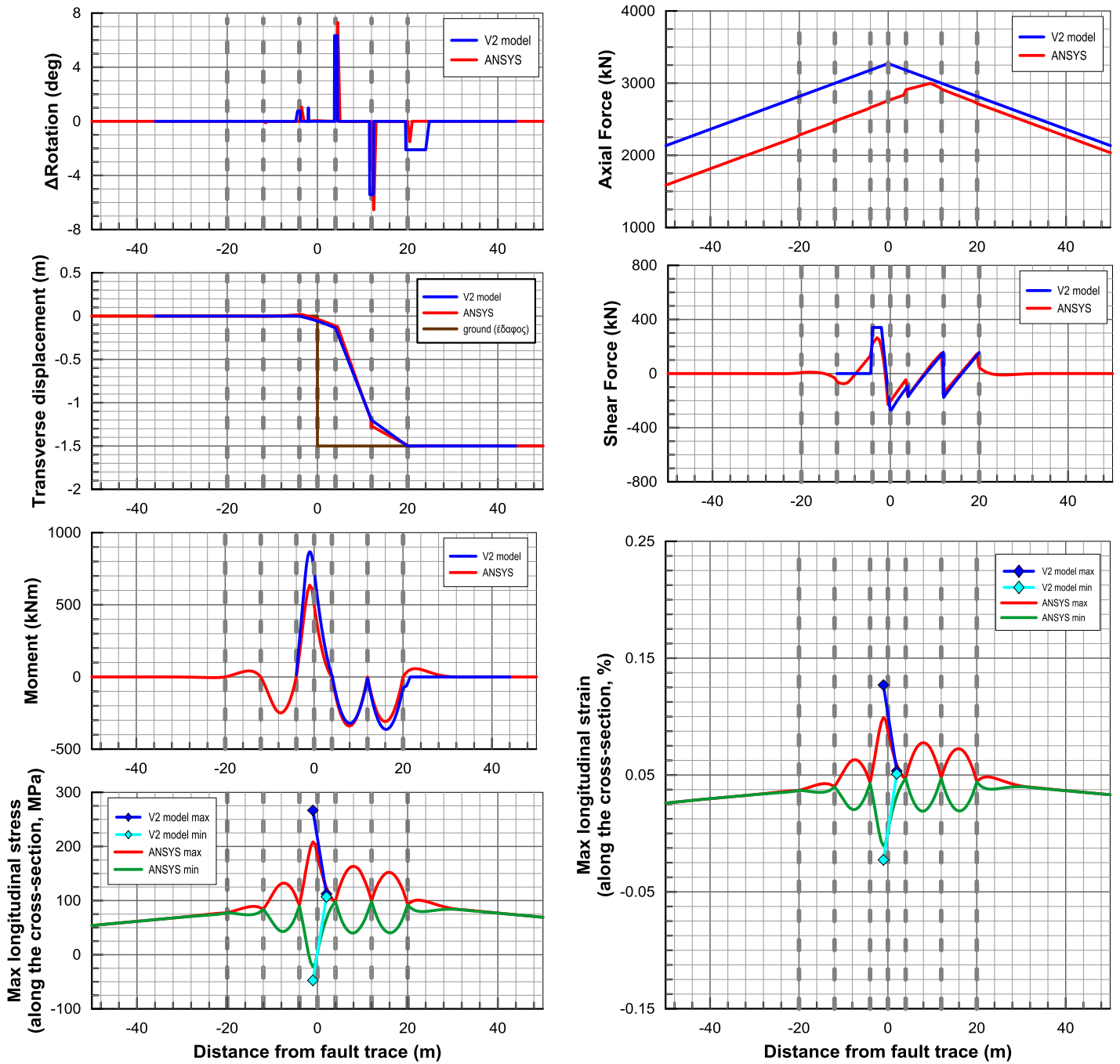
B.14. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,50m$



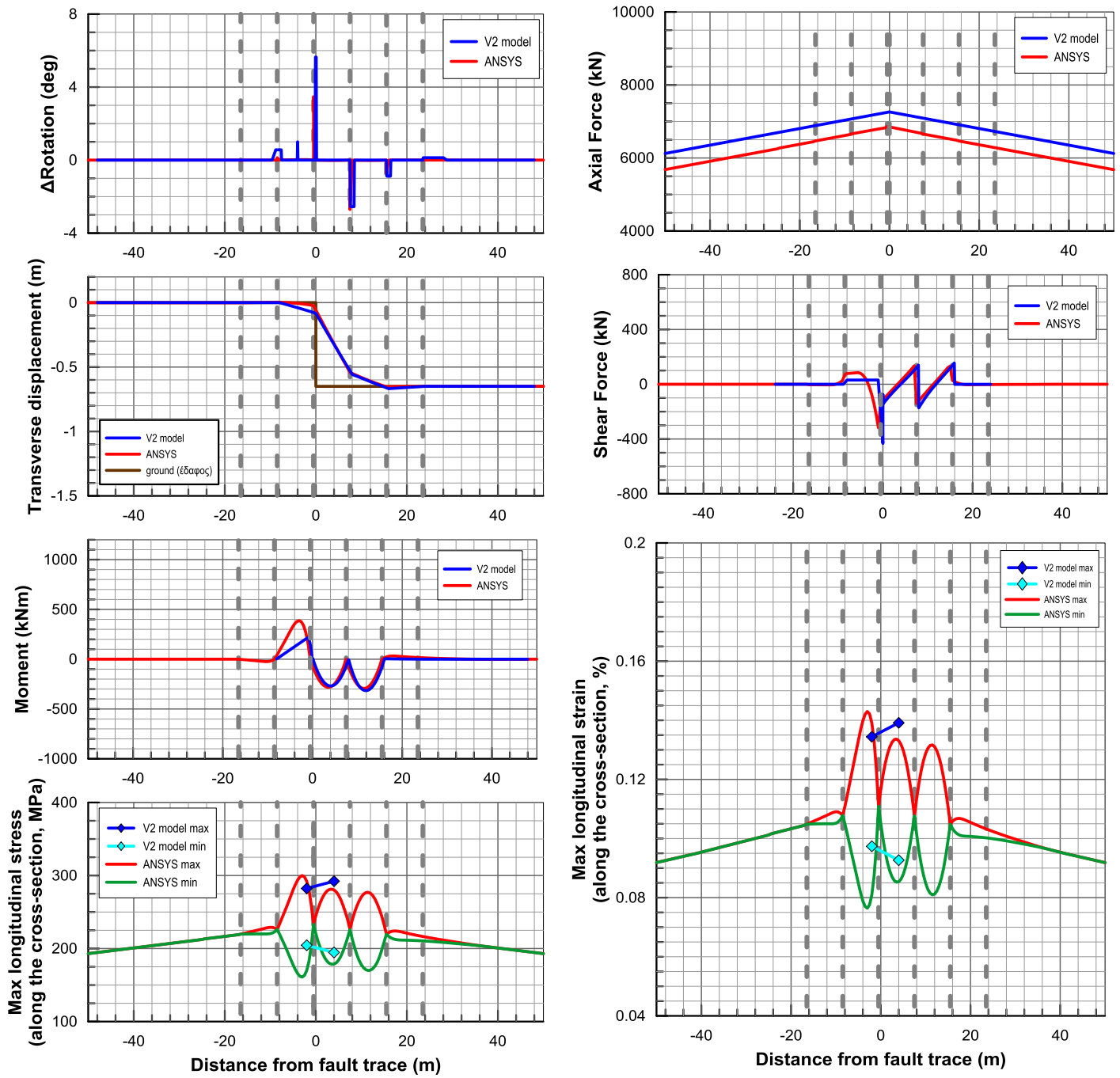
B.15. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,50m$



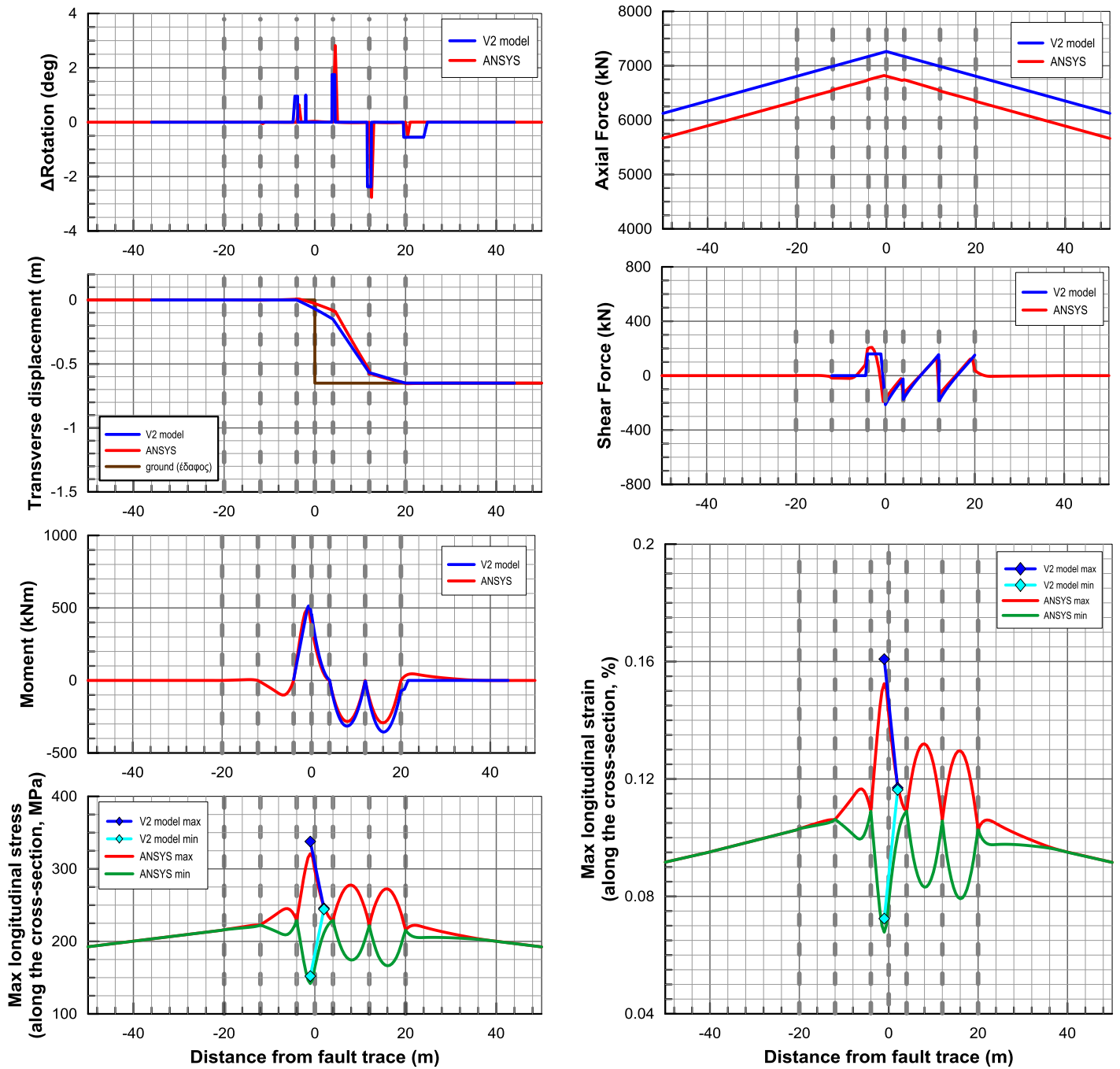
B.16. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,50m$



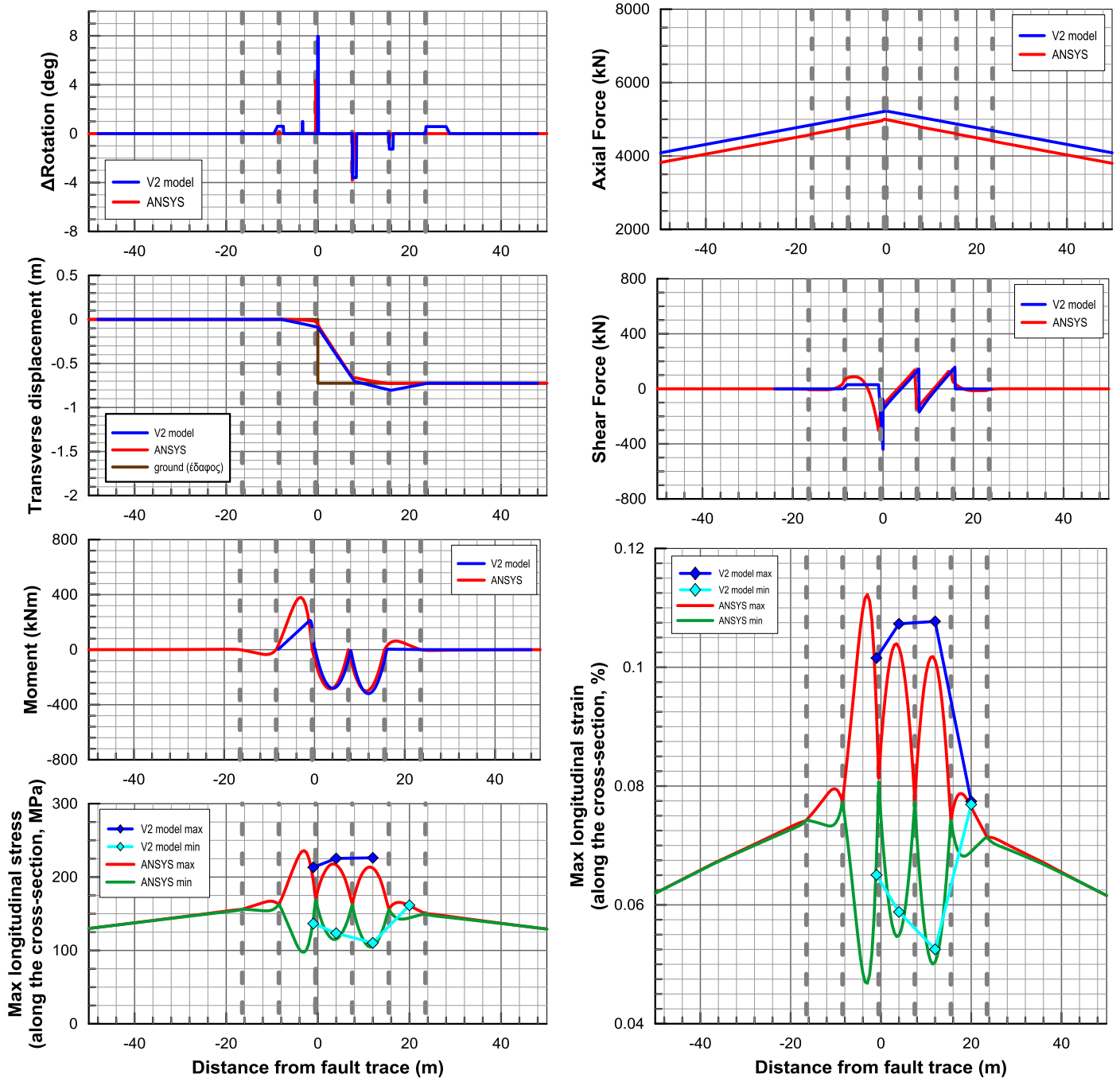
B.17. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,75m$



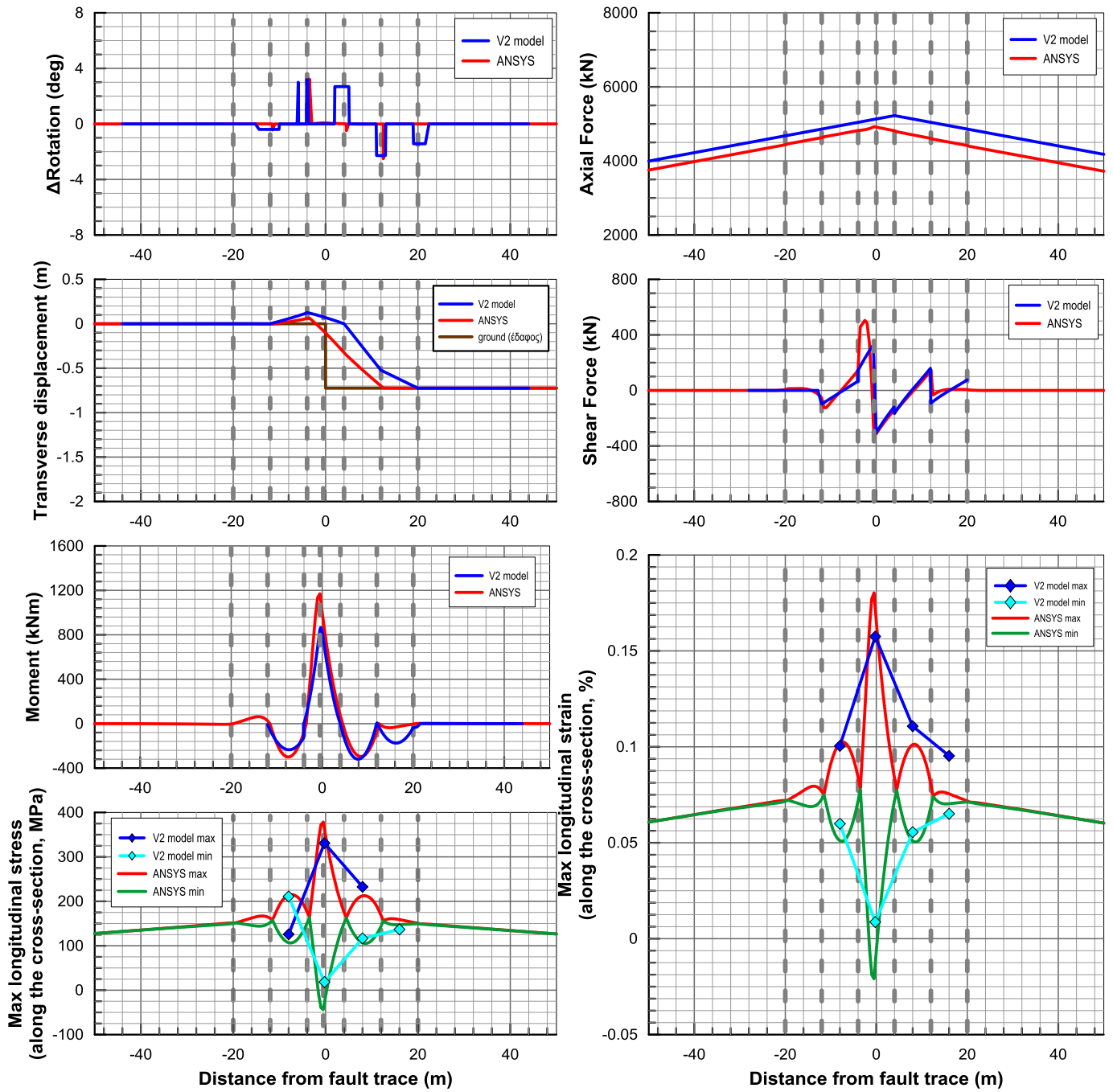
B.18. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,75m$



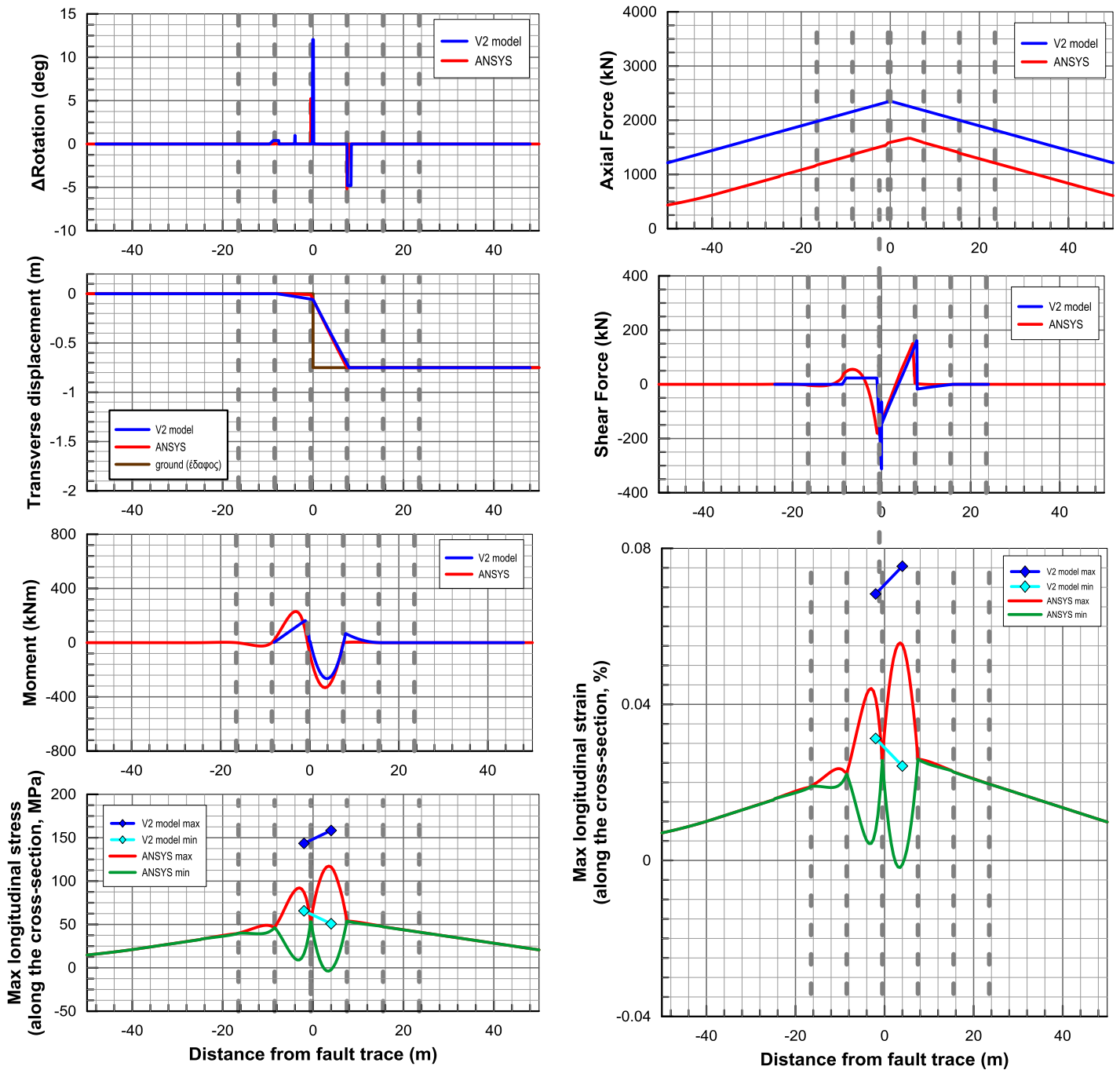
B.19. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,75m$



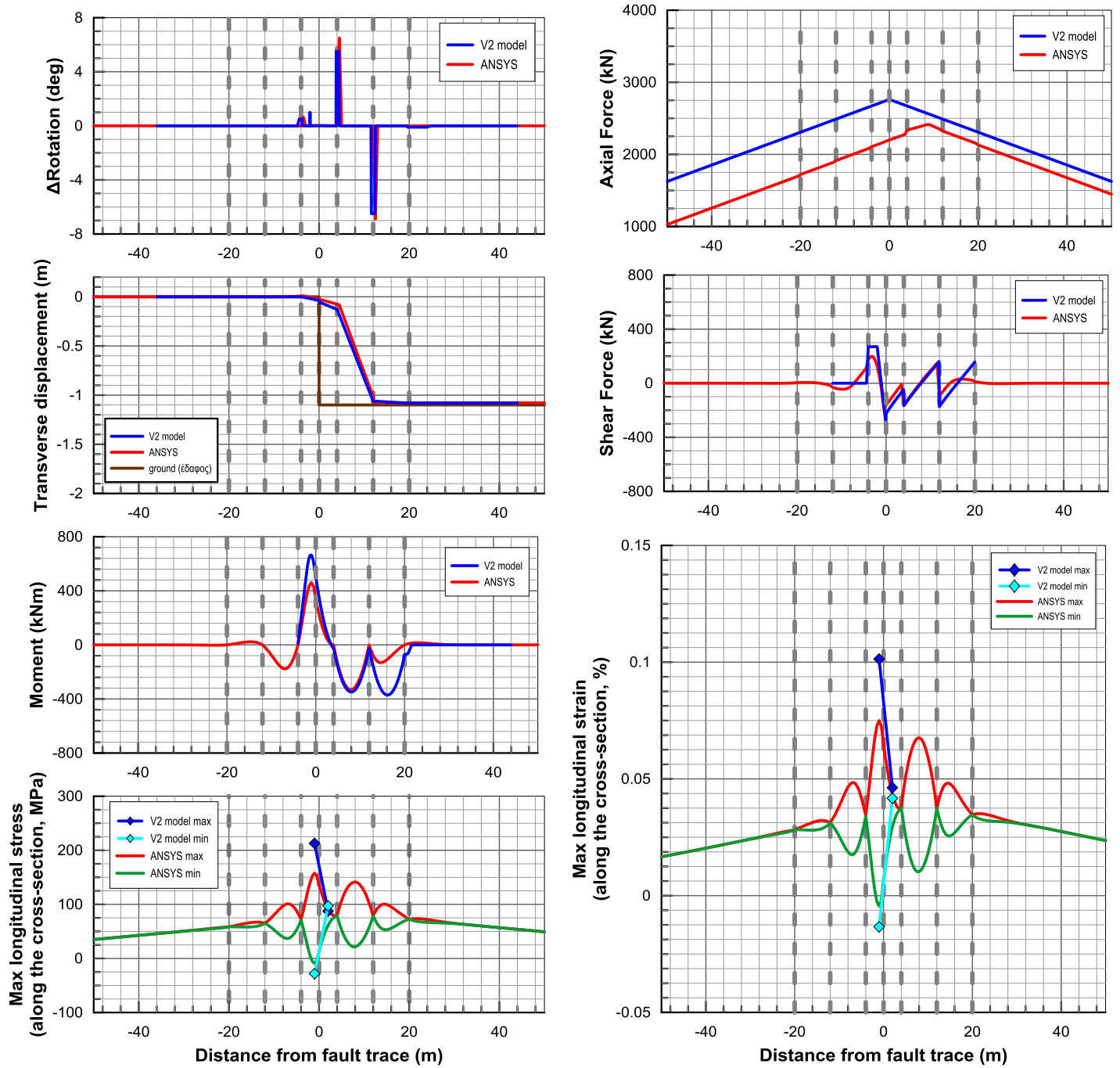
B.20. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,75m$



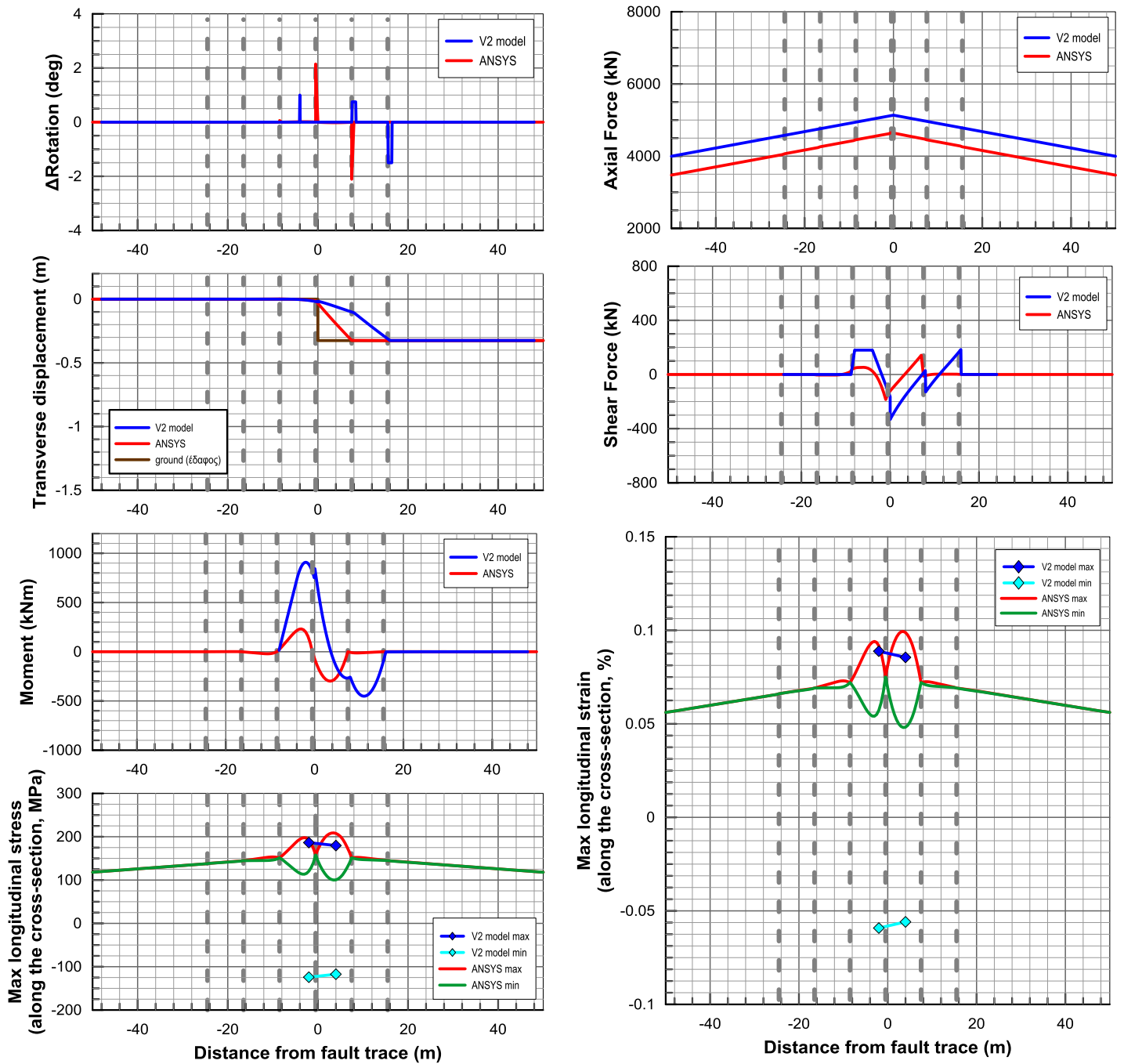
B.21. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,75m$



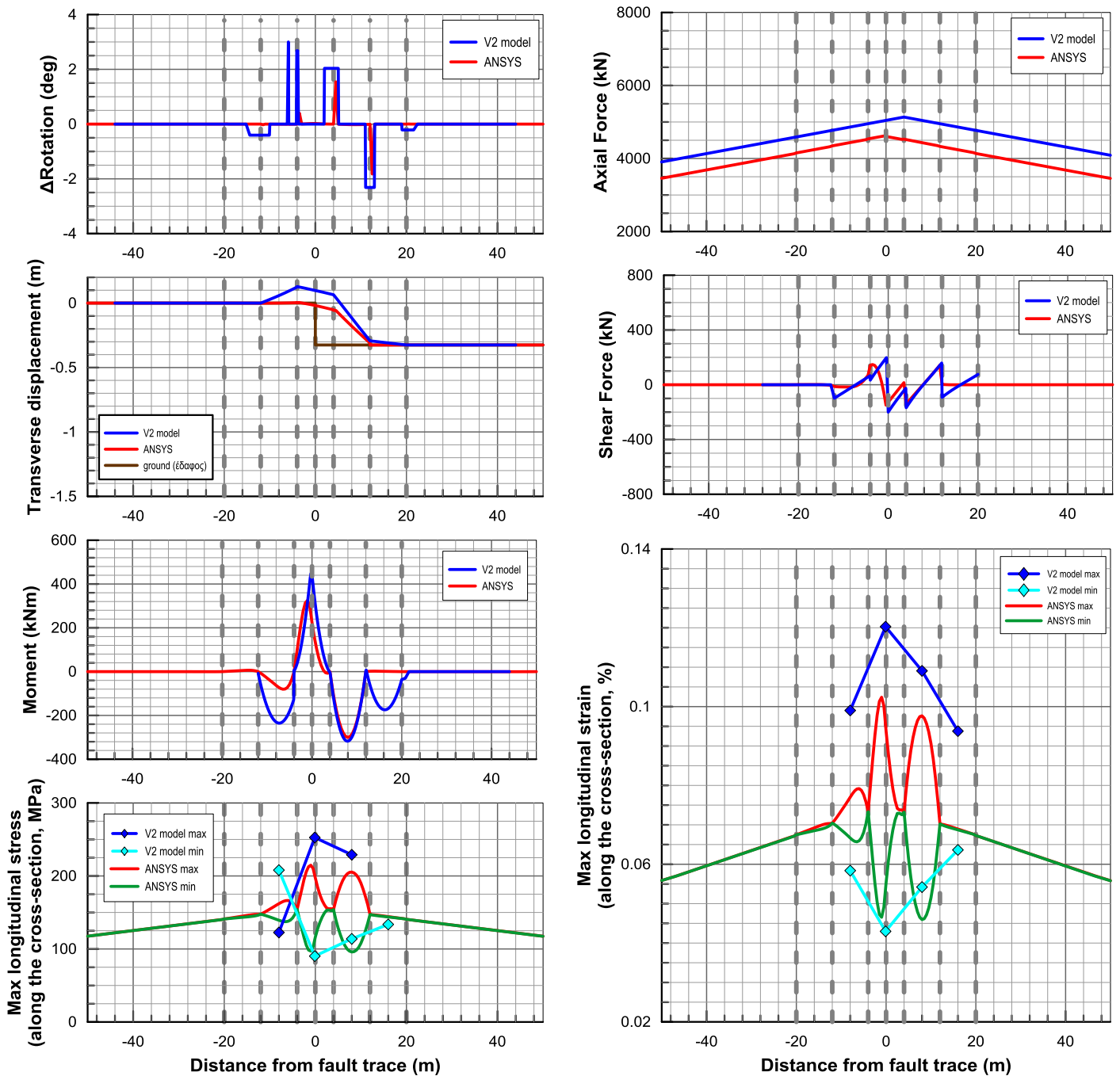
B.22. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,75m$



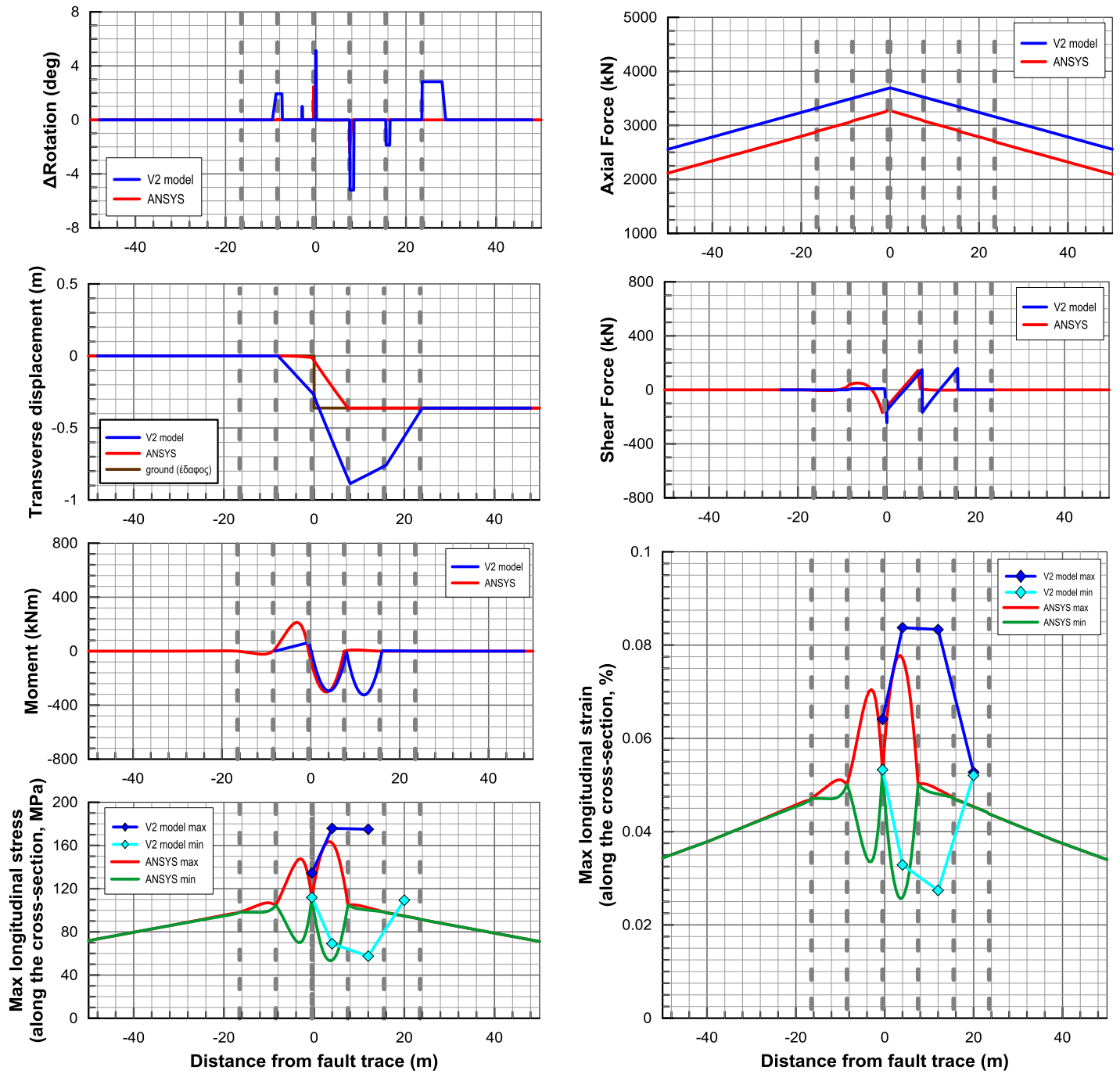
B.23. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,375m$



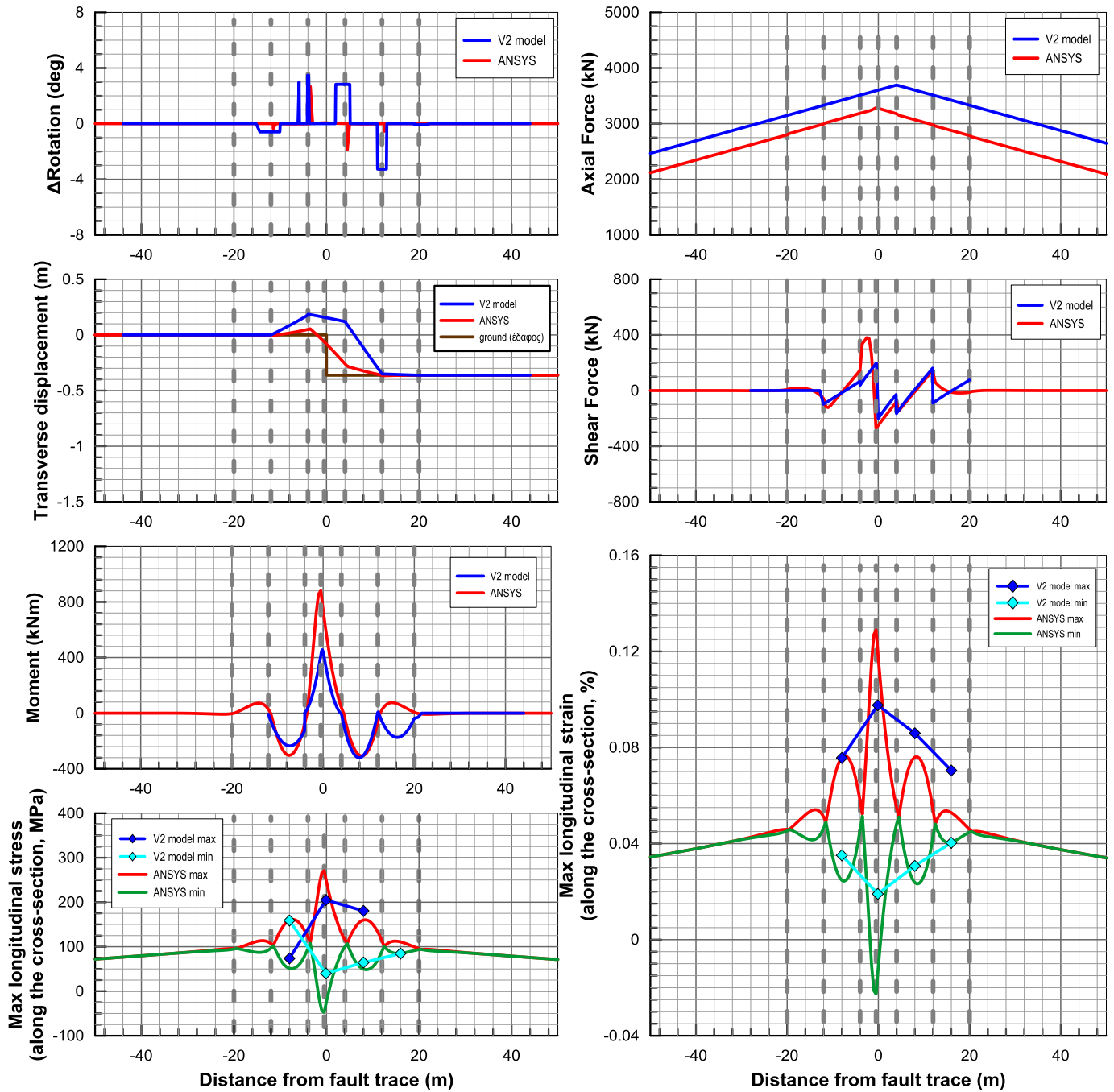
B.24. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,375m$



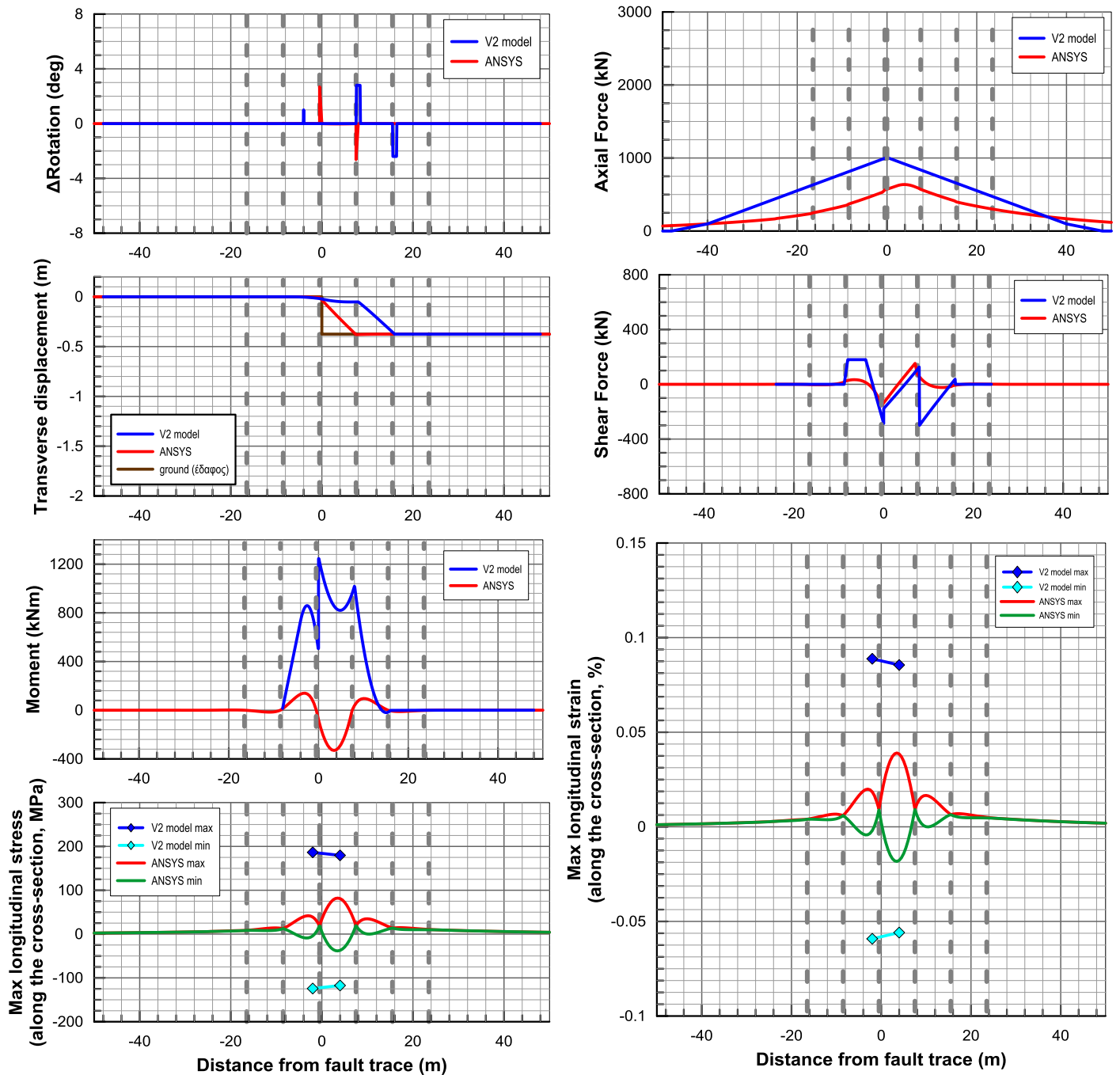
Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,375m$



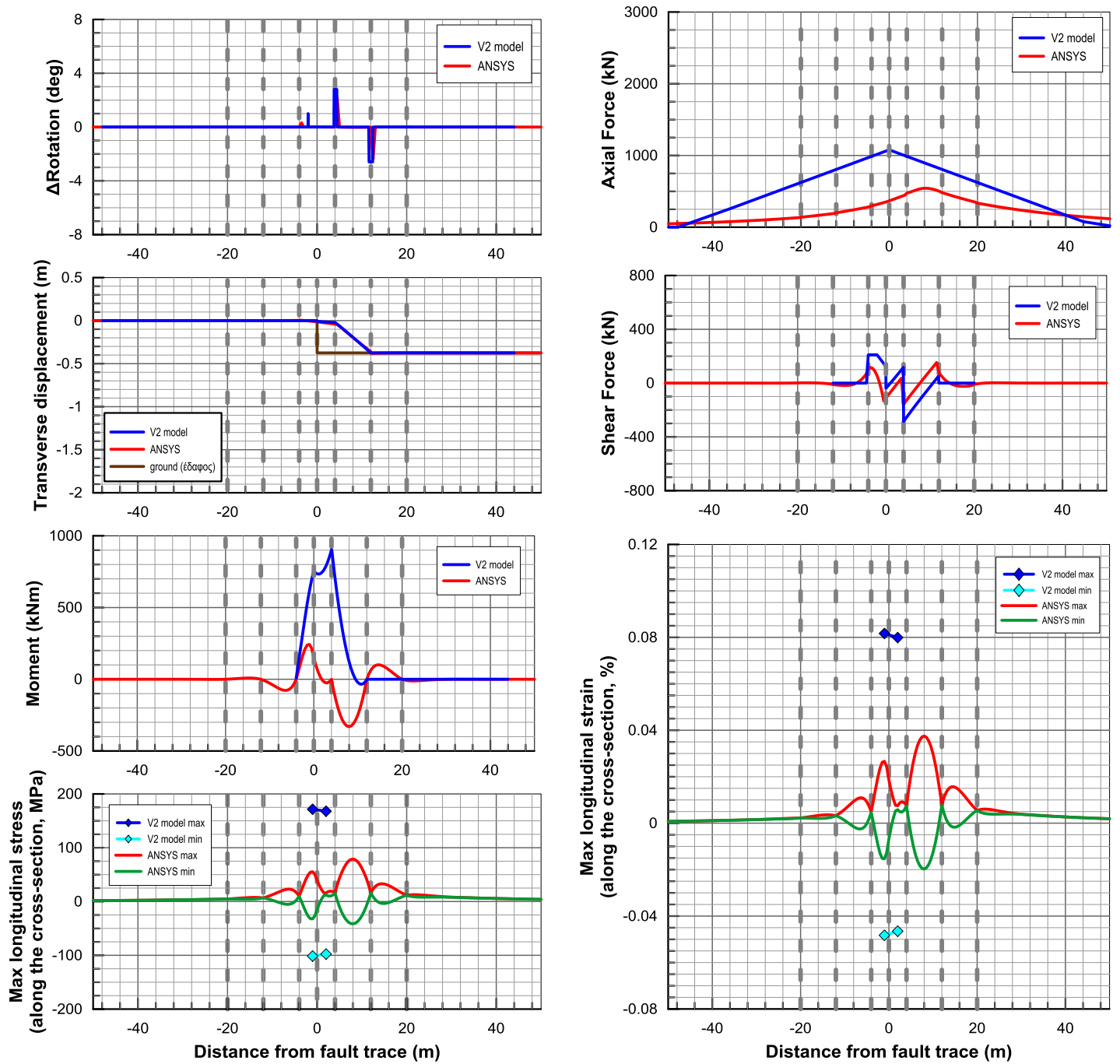
B.25. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,375m$



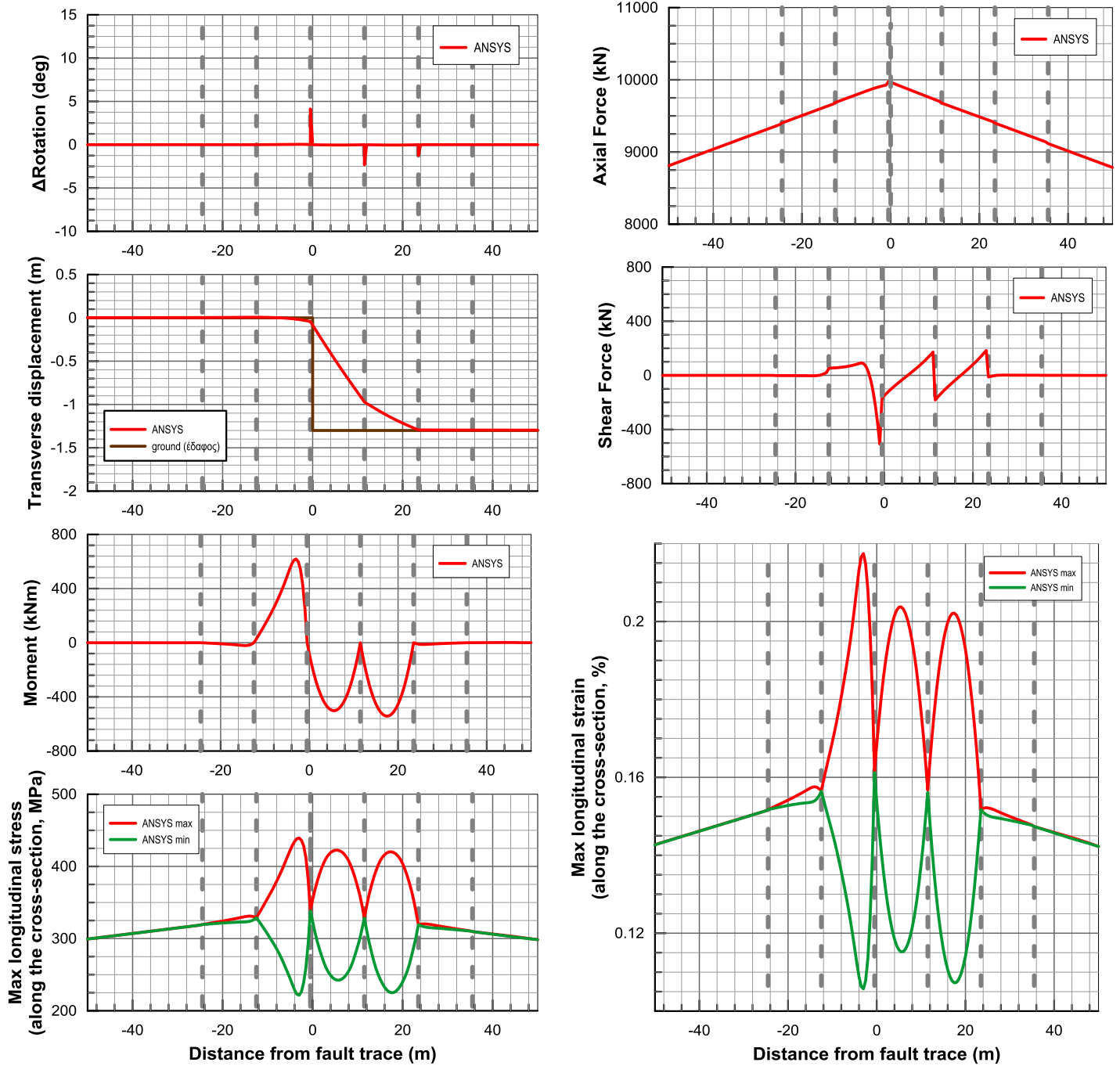
B.26. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,375m$



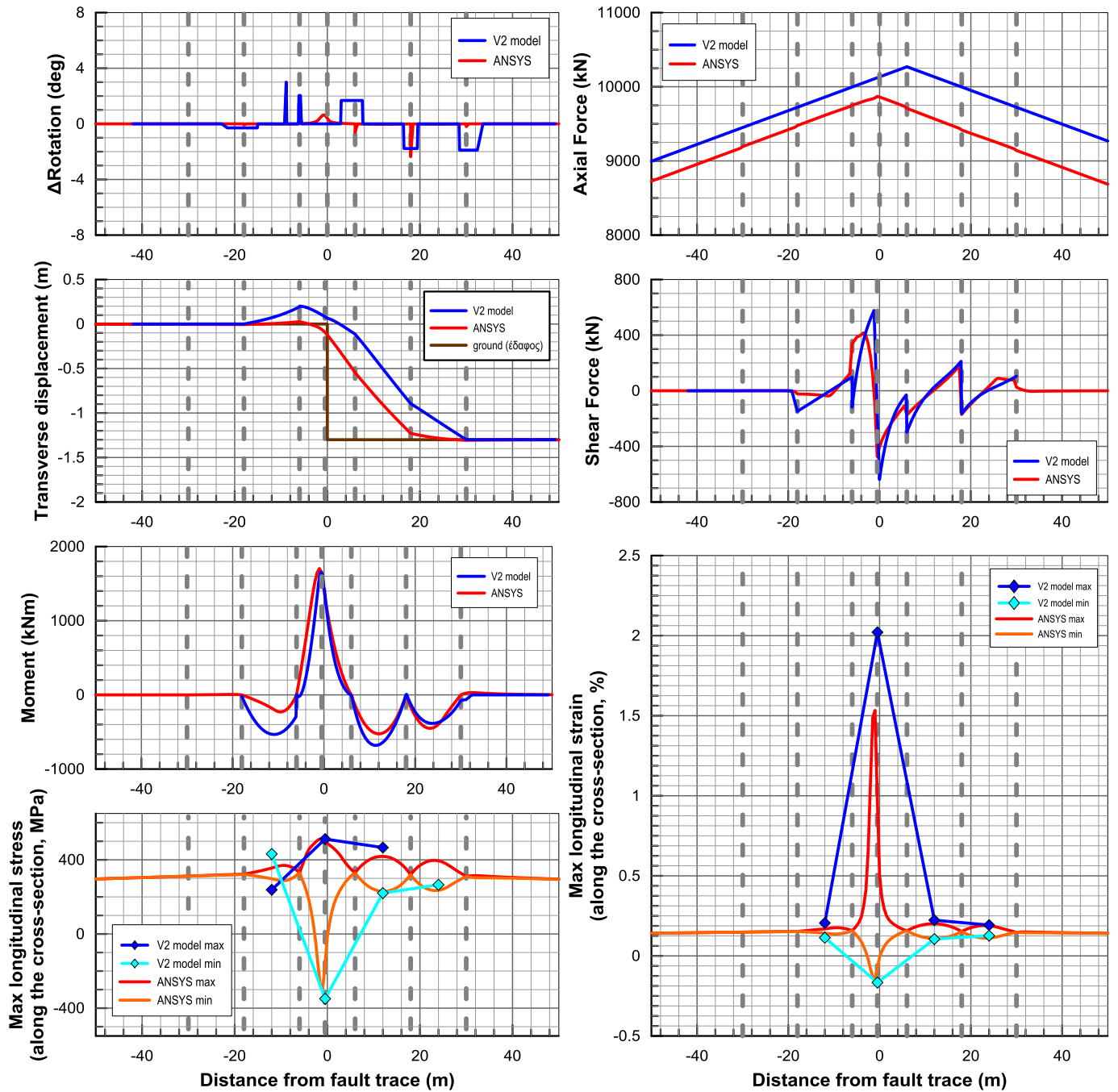
B.27. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 8m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,375m$



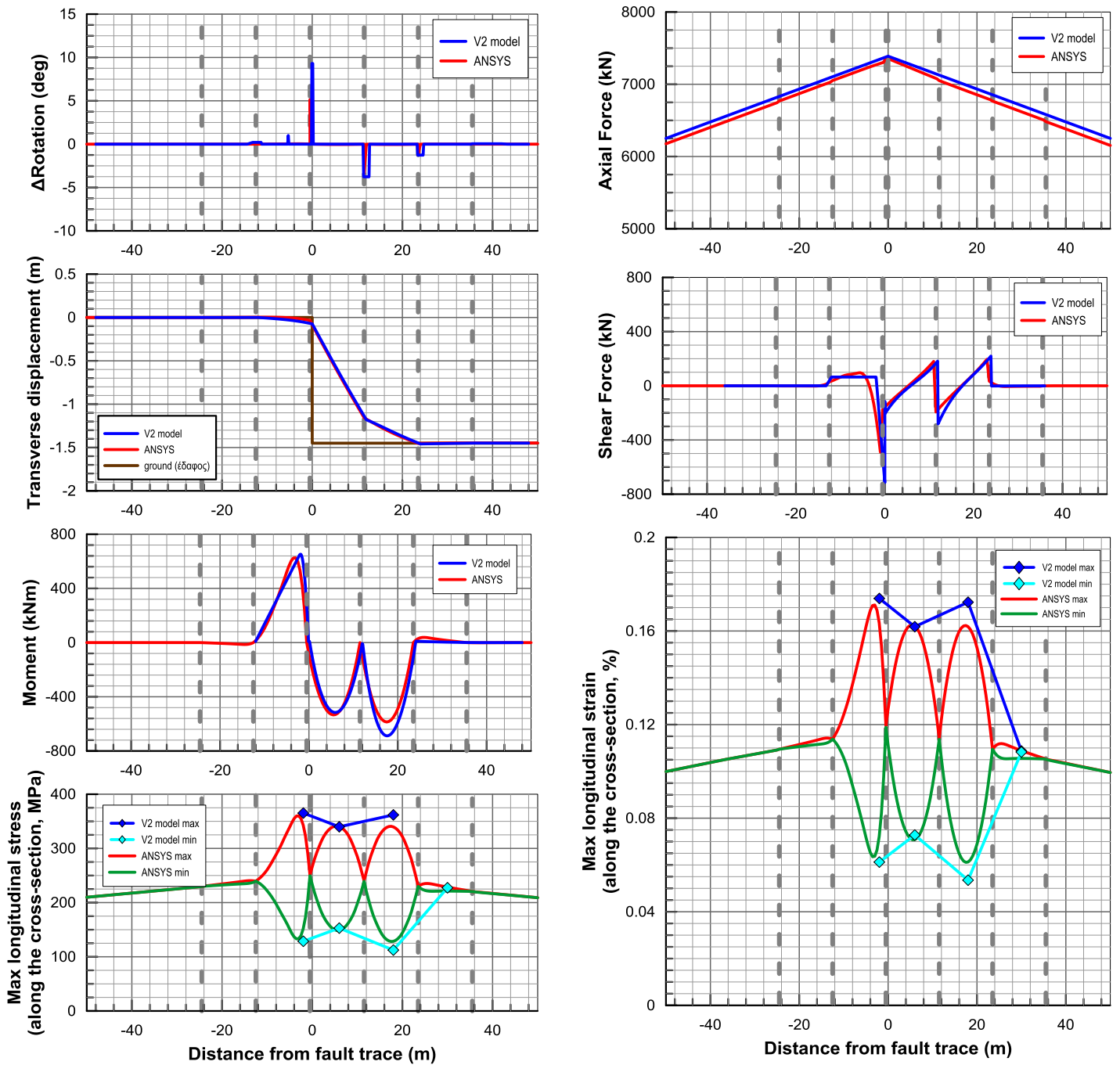
B.28. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,5m$



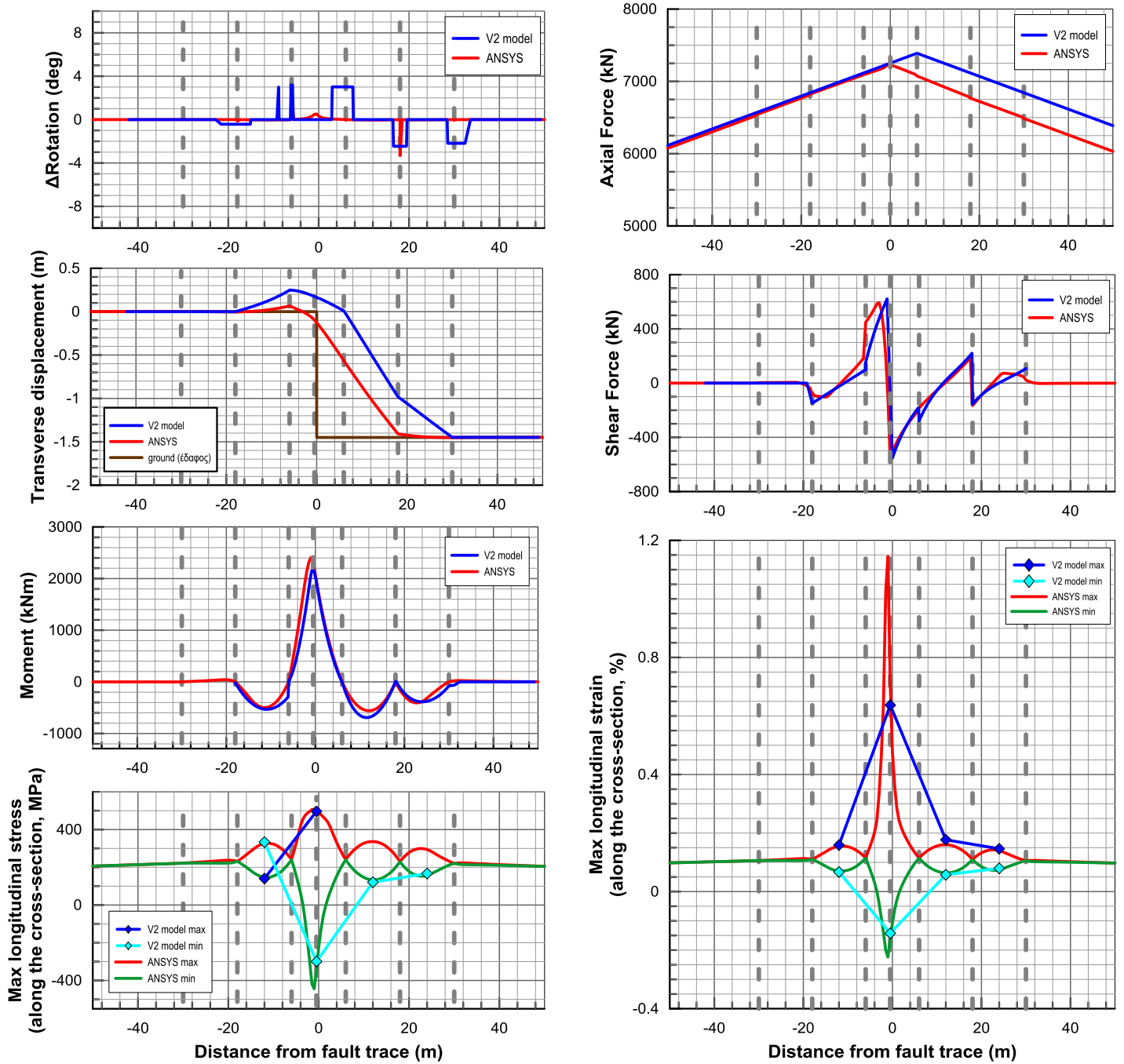
B.29. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,5m$



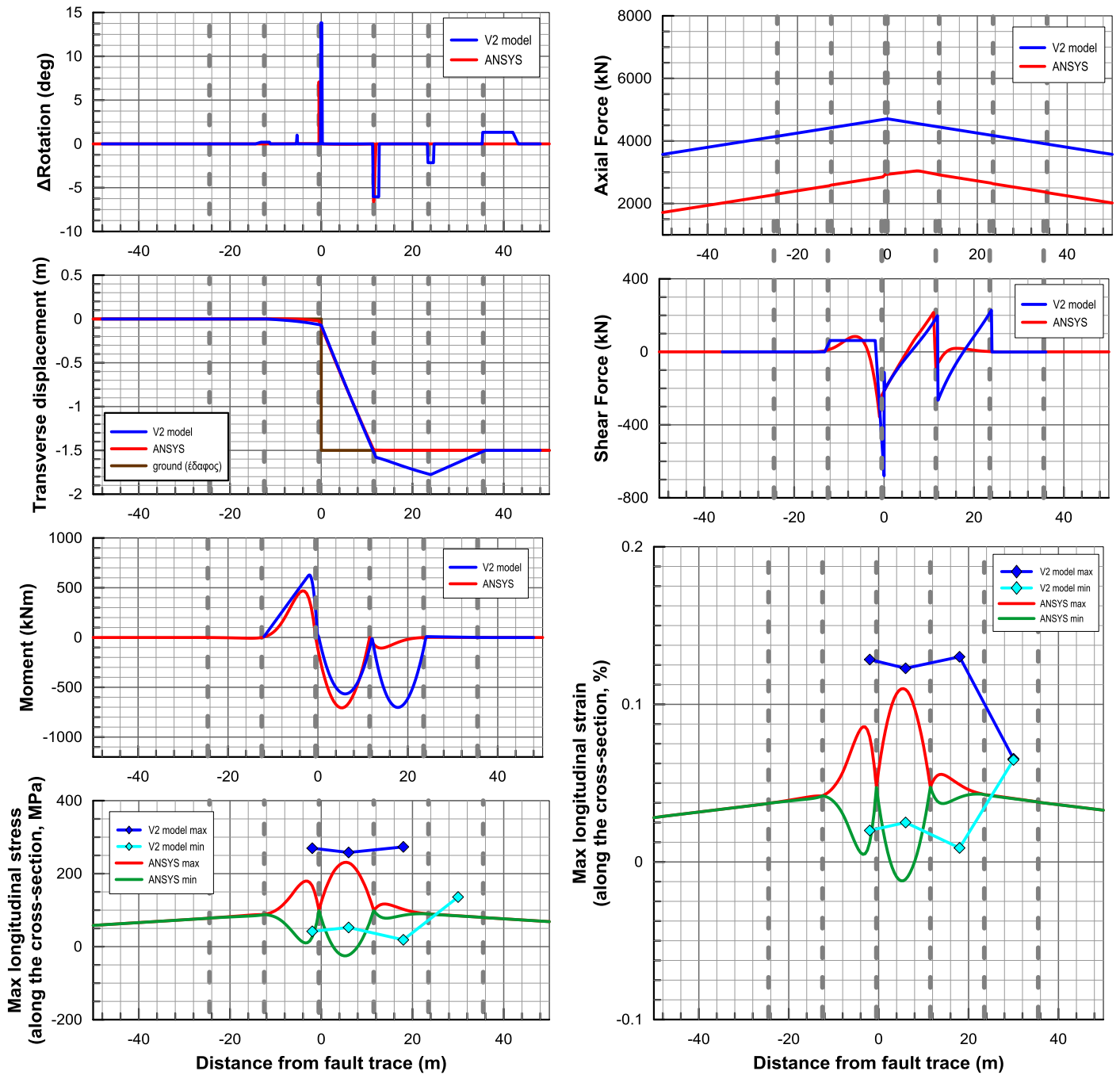
B.30. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,5m$



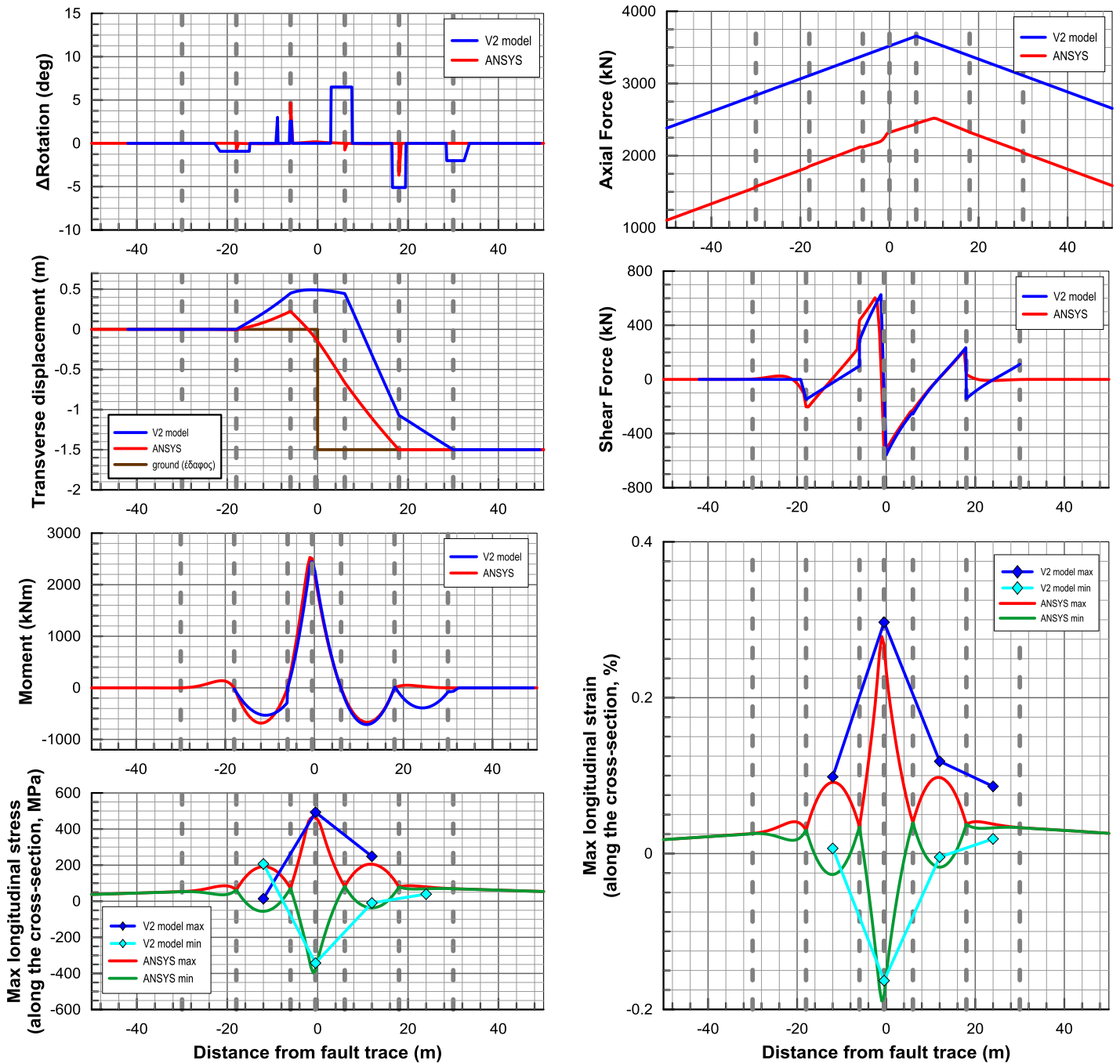
B.31. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,5m$



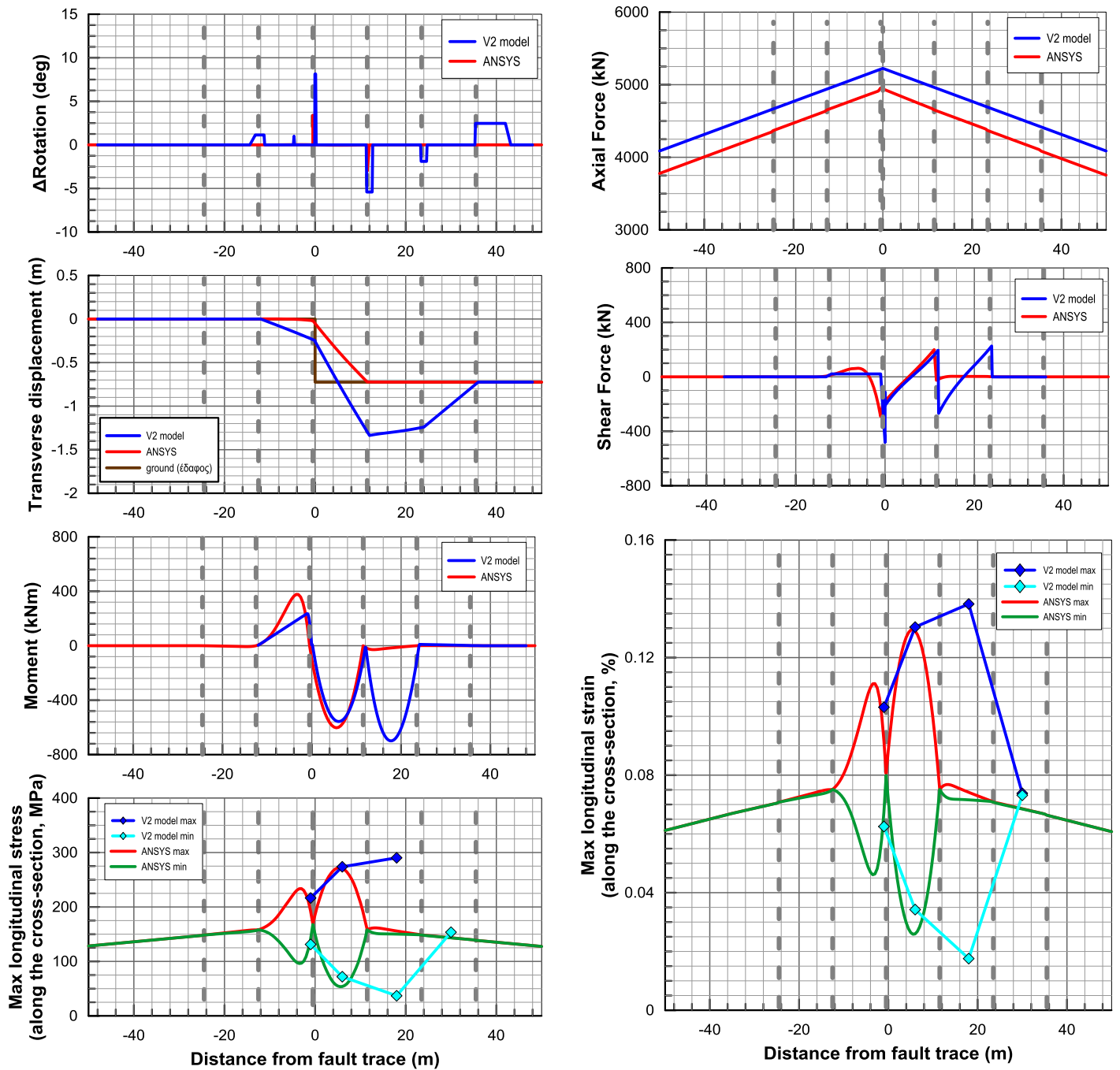
B.32. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=1,5m$



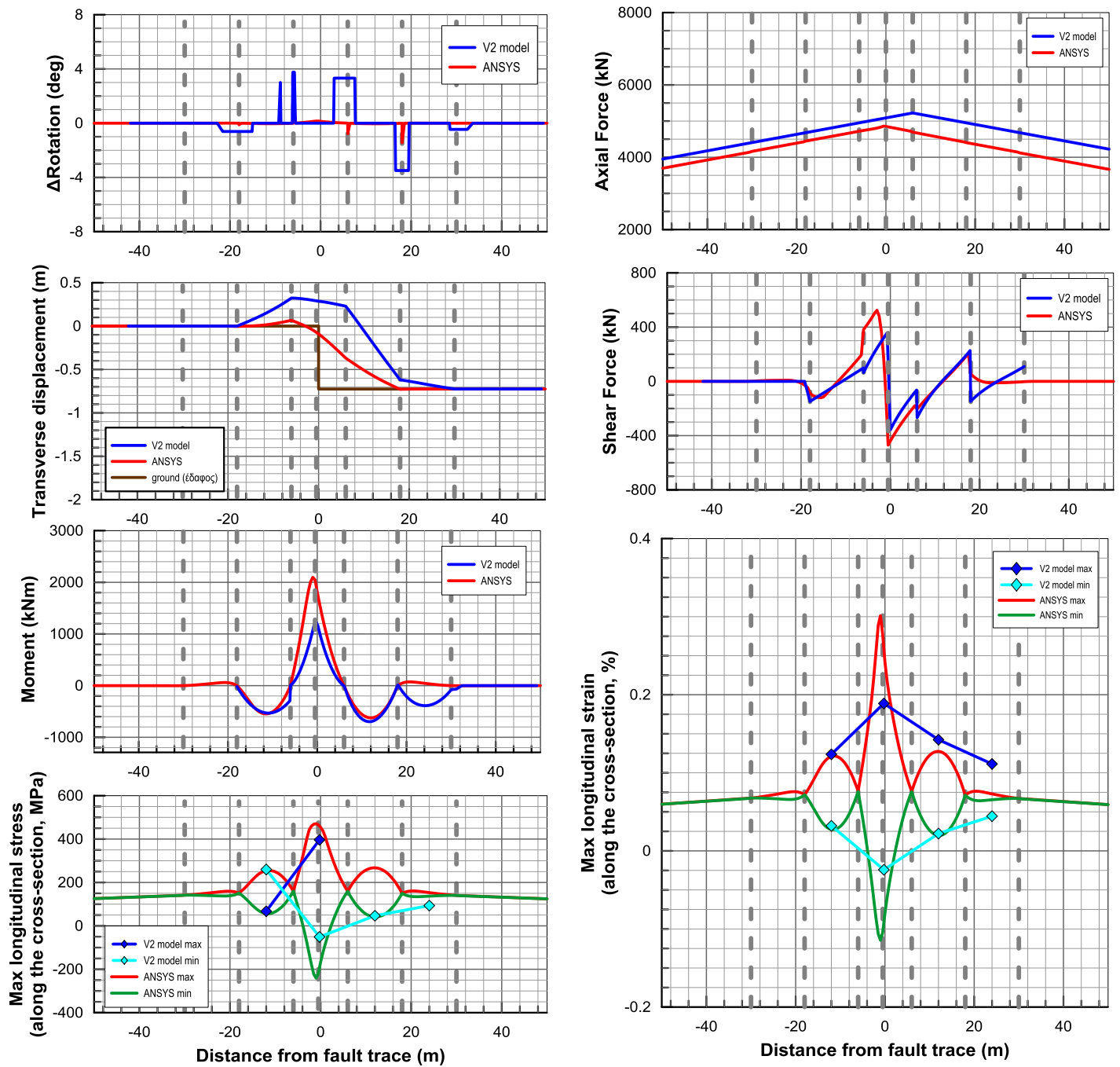
B.33. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,5m$



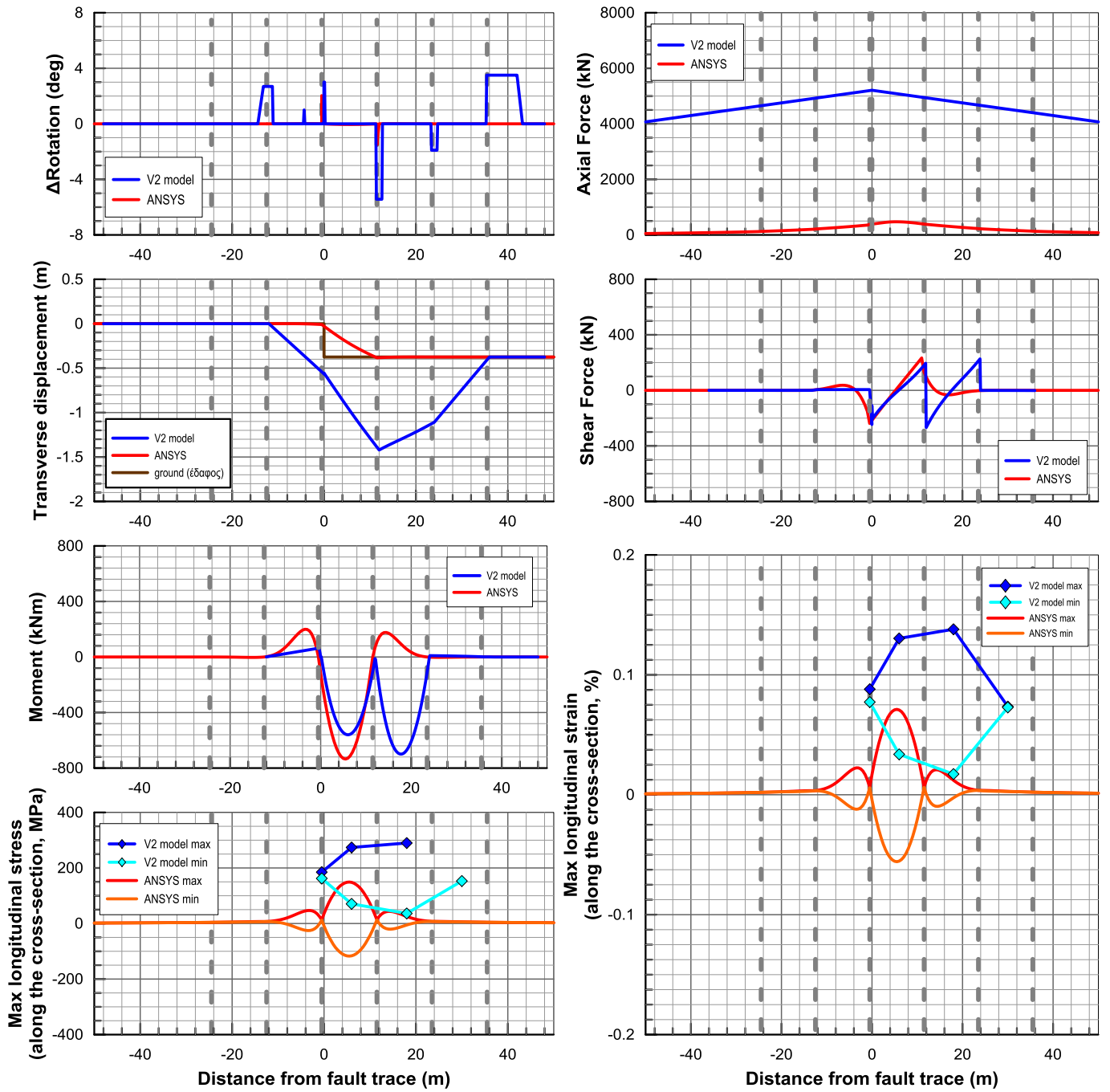
B.34. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,75m$



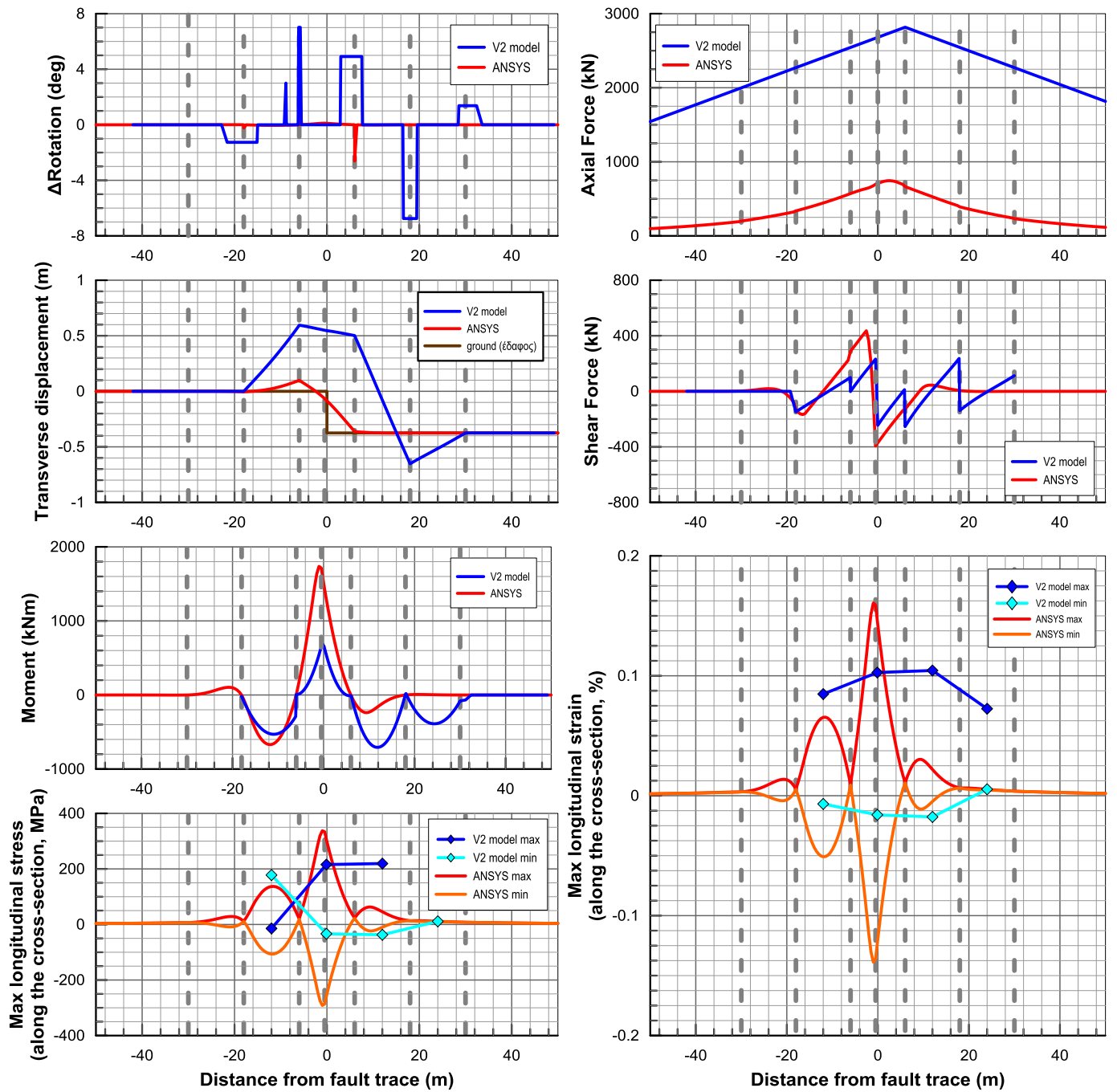
B.35. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,75m$



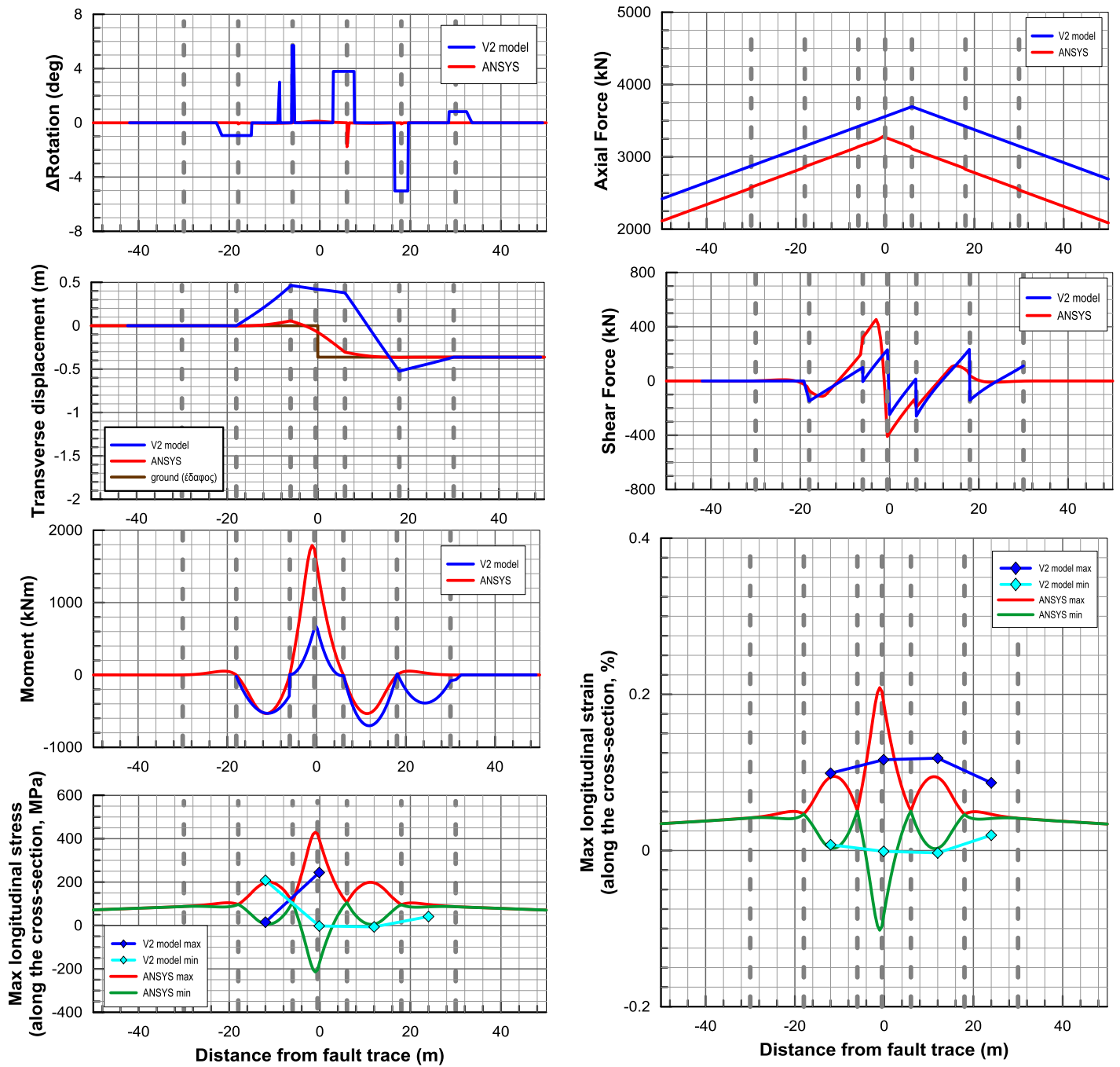
B.36. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στην άκρη, $d_f=0,375m$



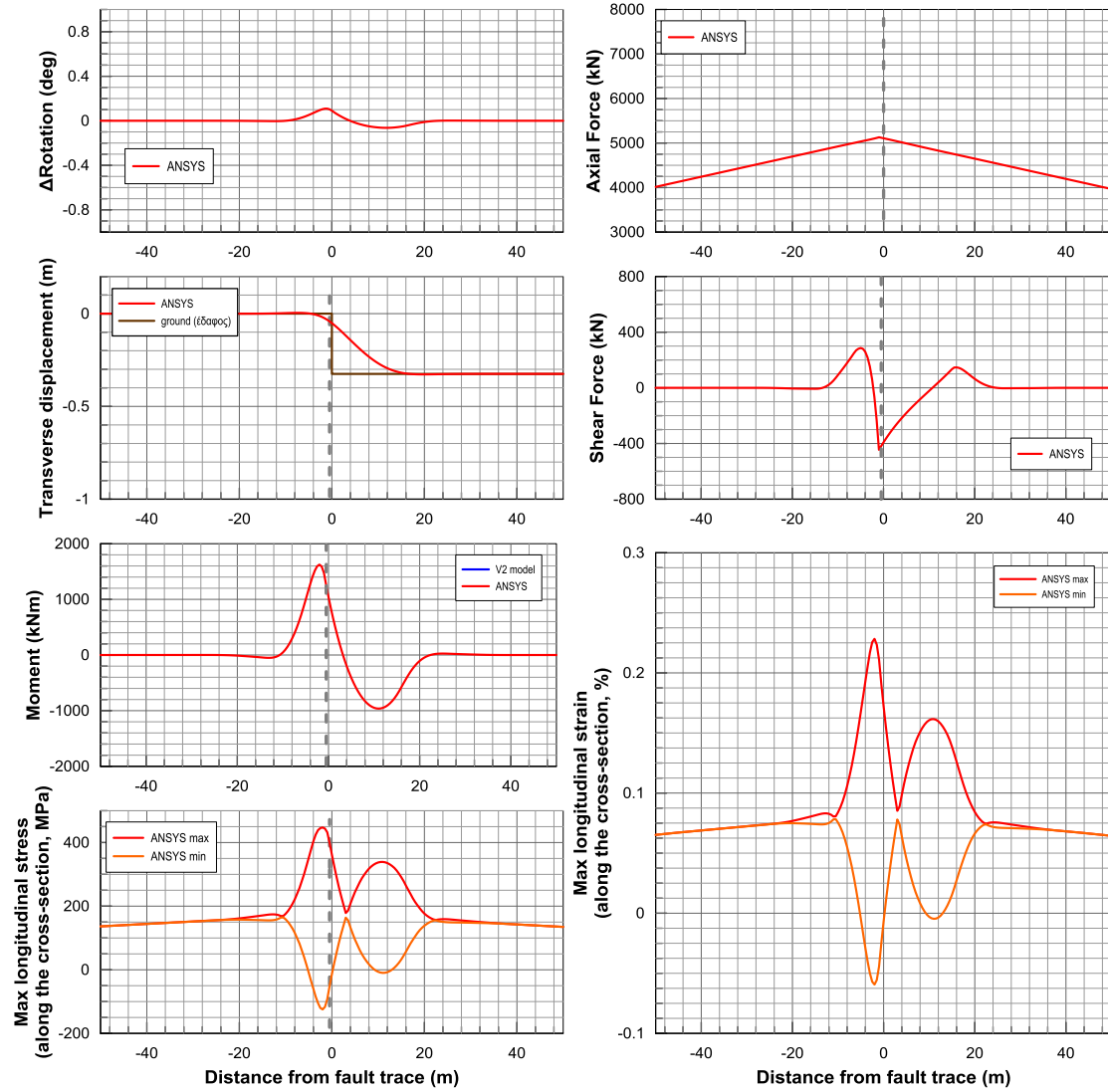
B.37. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,375m$



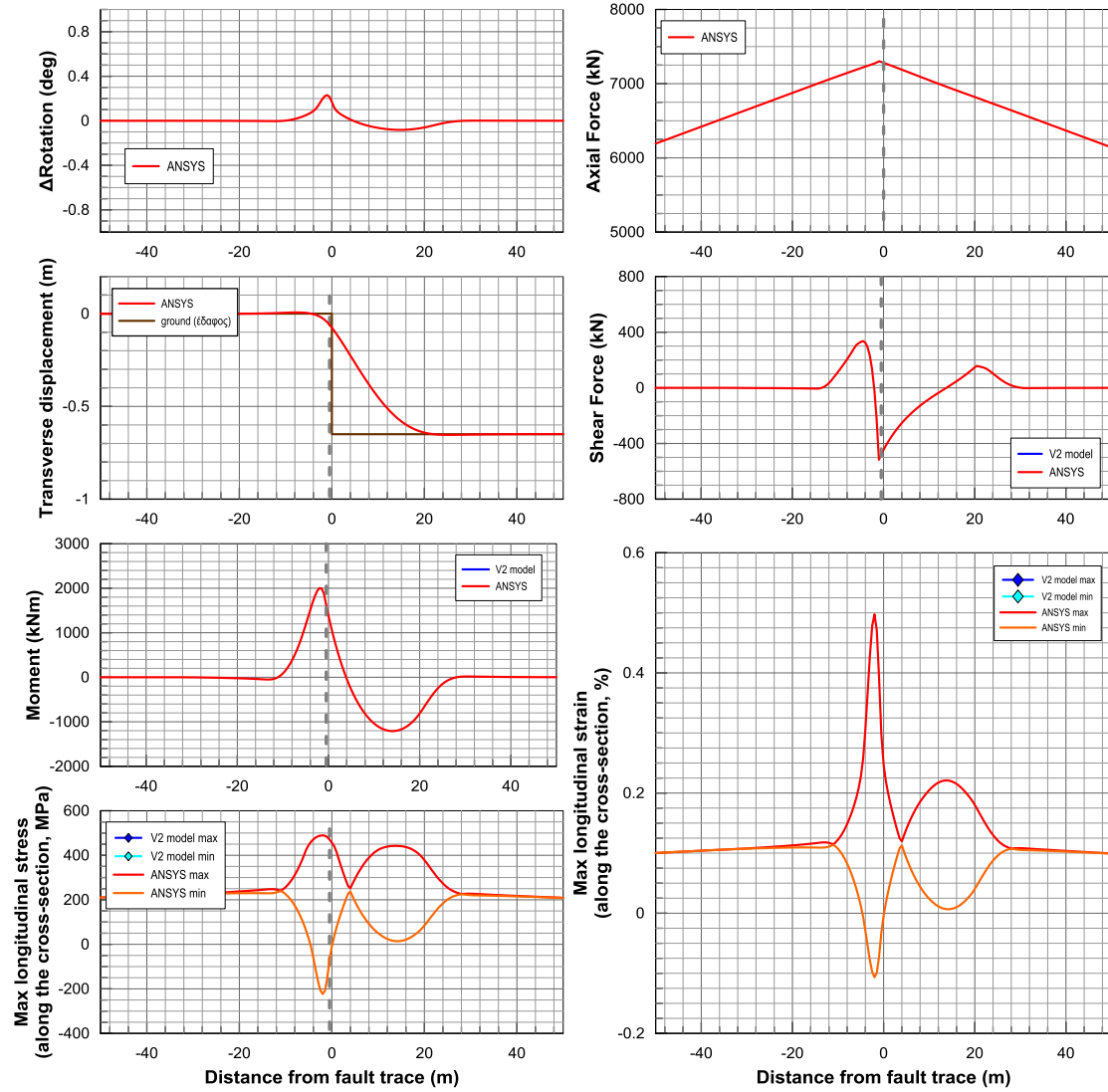
B.38. Εύκαμπτοι κόμβοι ανά 12m, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,375m$



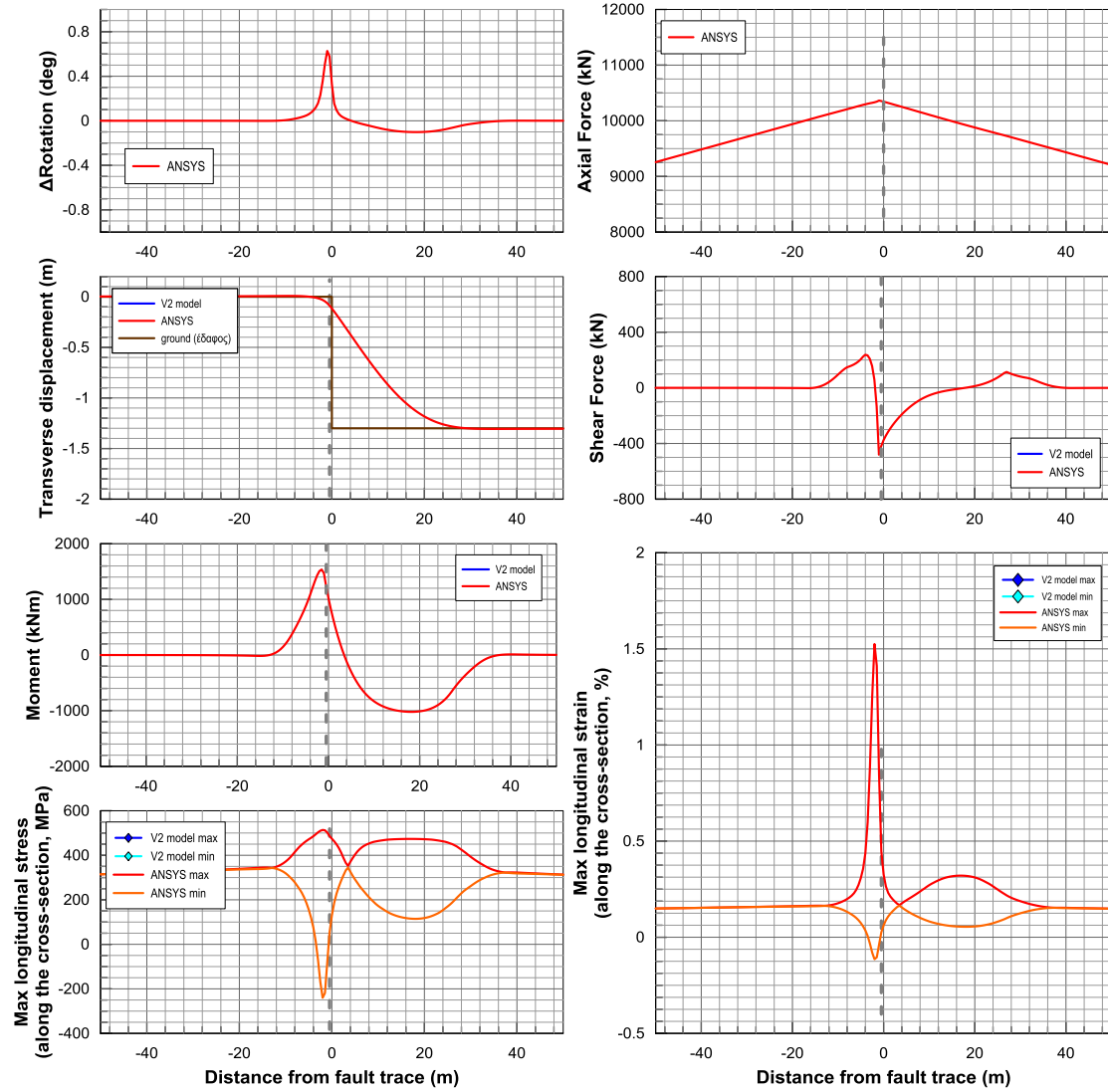
B.I. Συνεχής Αγωγός, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,375m$



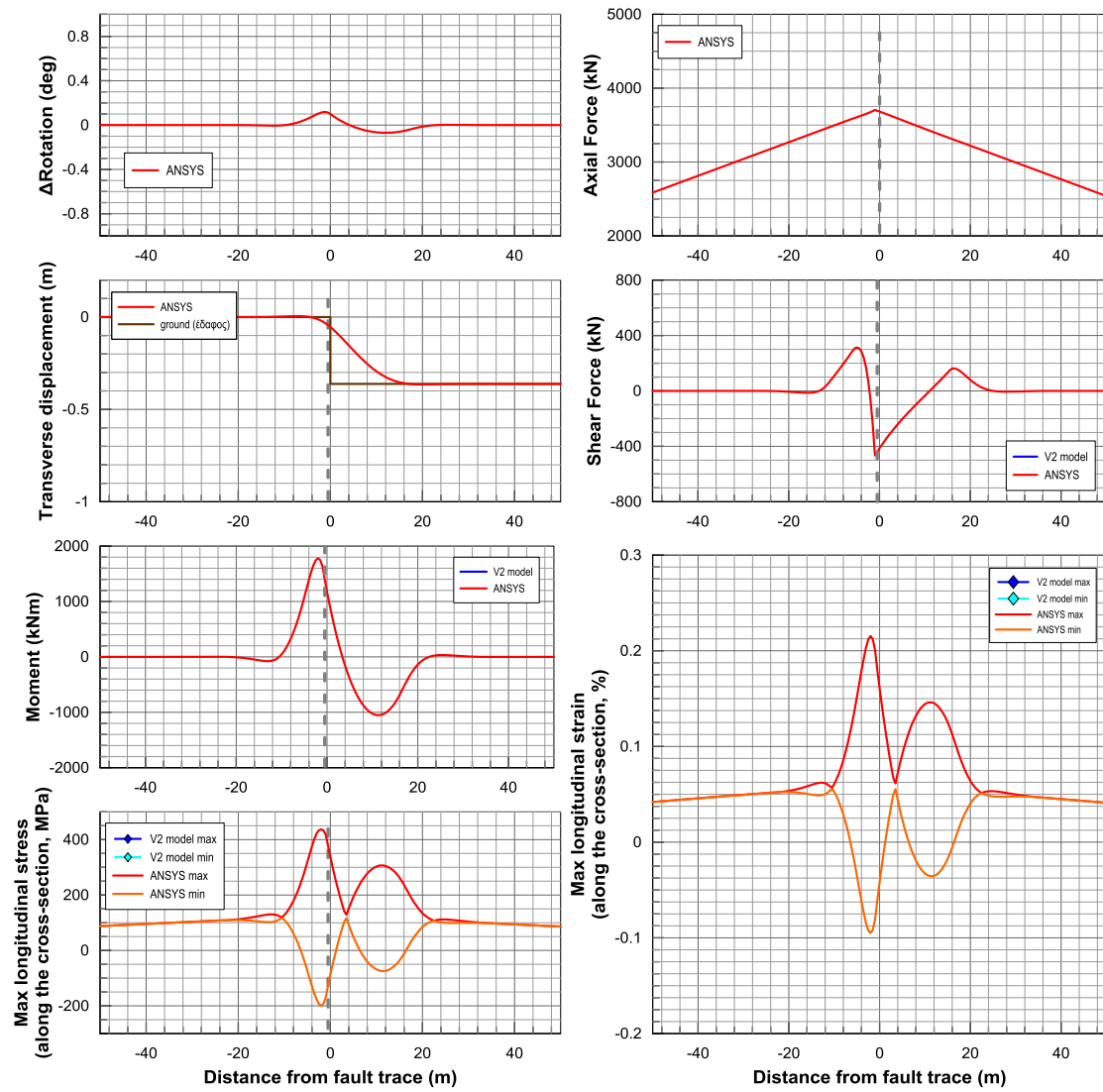
B.II. Συνεχής Αγωγός, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,750\text{m}$



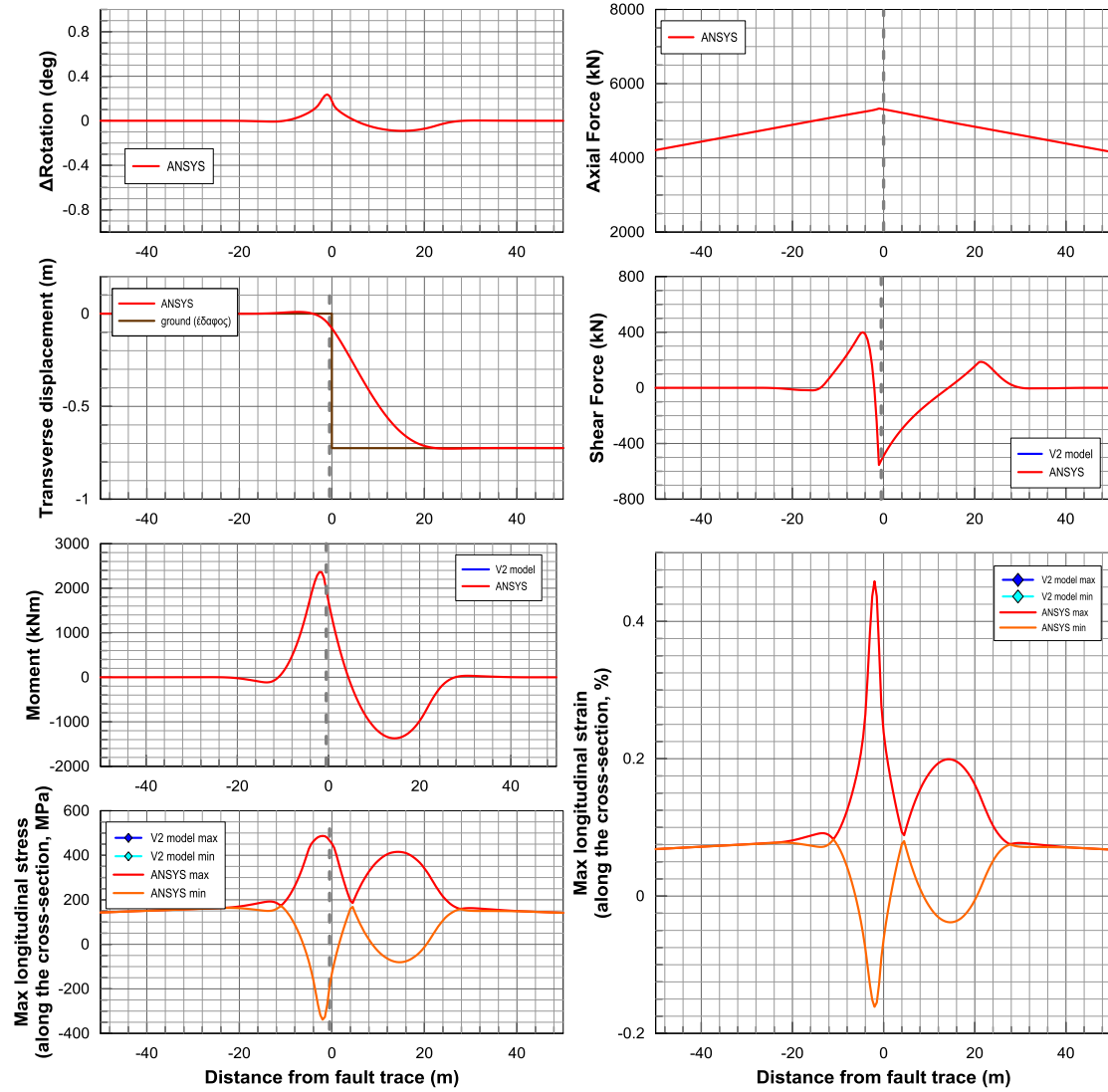
B.III. Συνεχής Αγωγός, $\psi=60^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,50\text{m}$



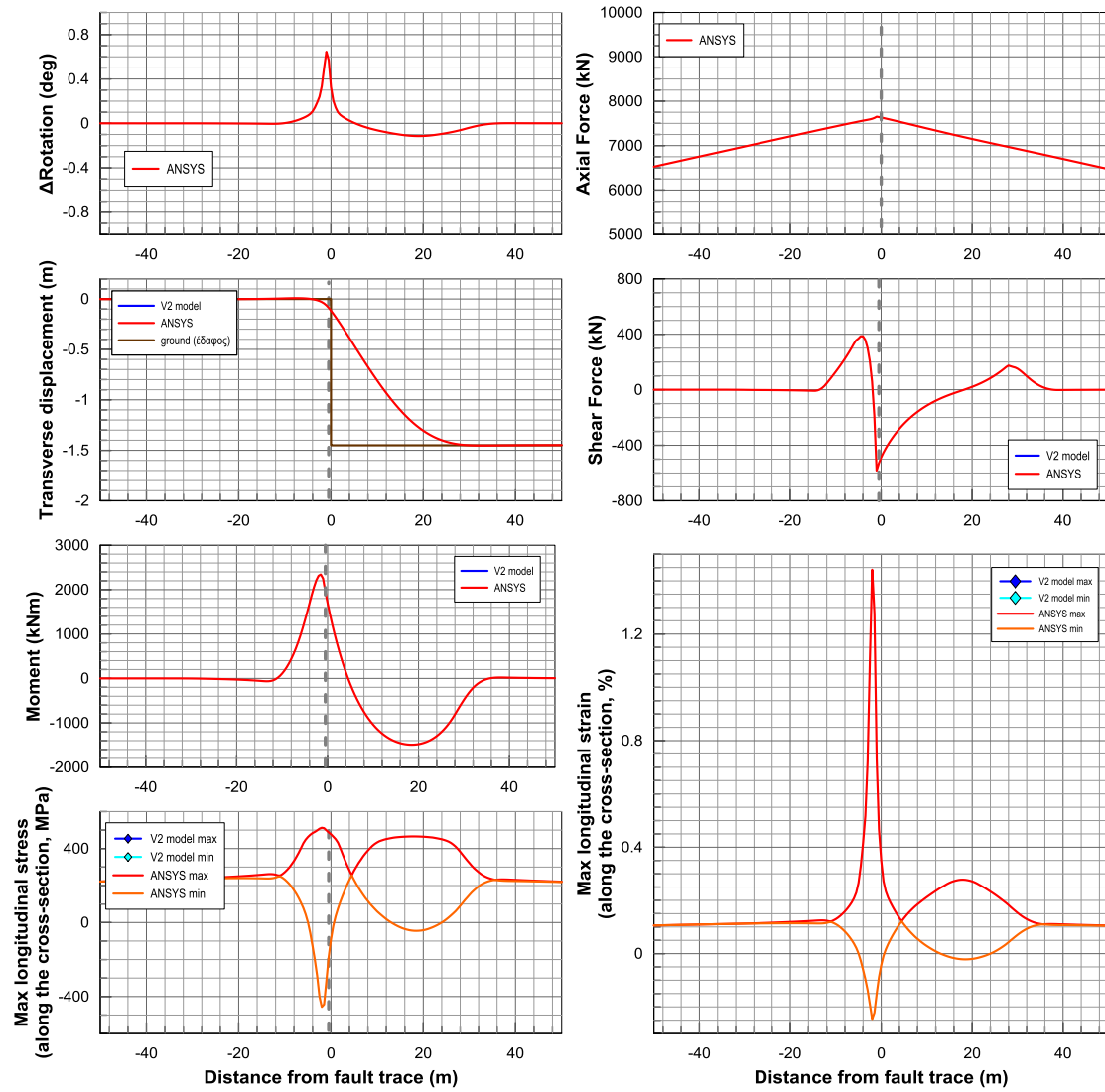
B. IV. Συνεχής Αγωγός, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,375m$



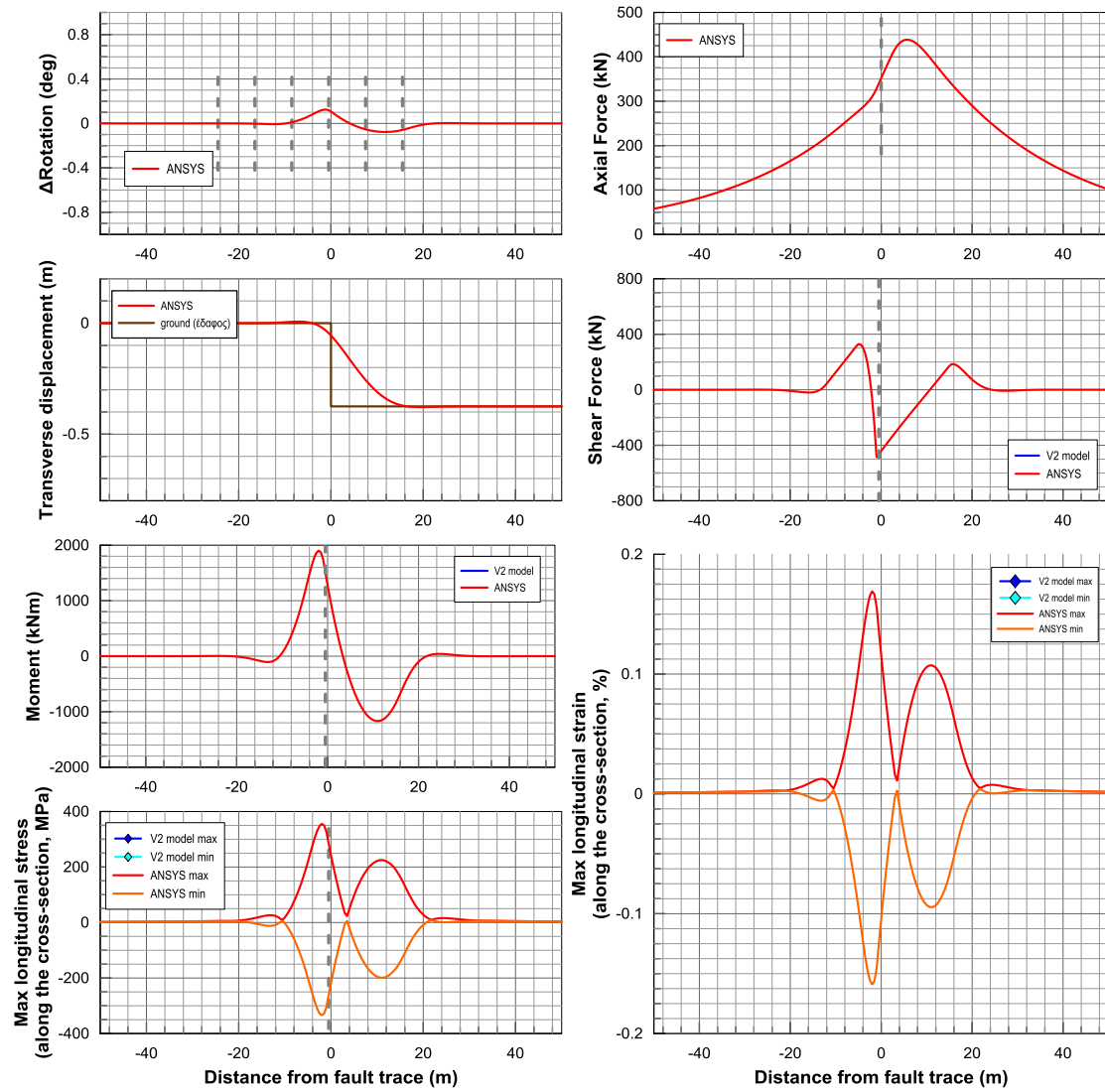
B.V. Συνεχής Αγωγός, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,750m$



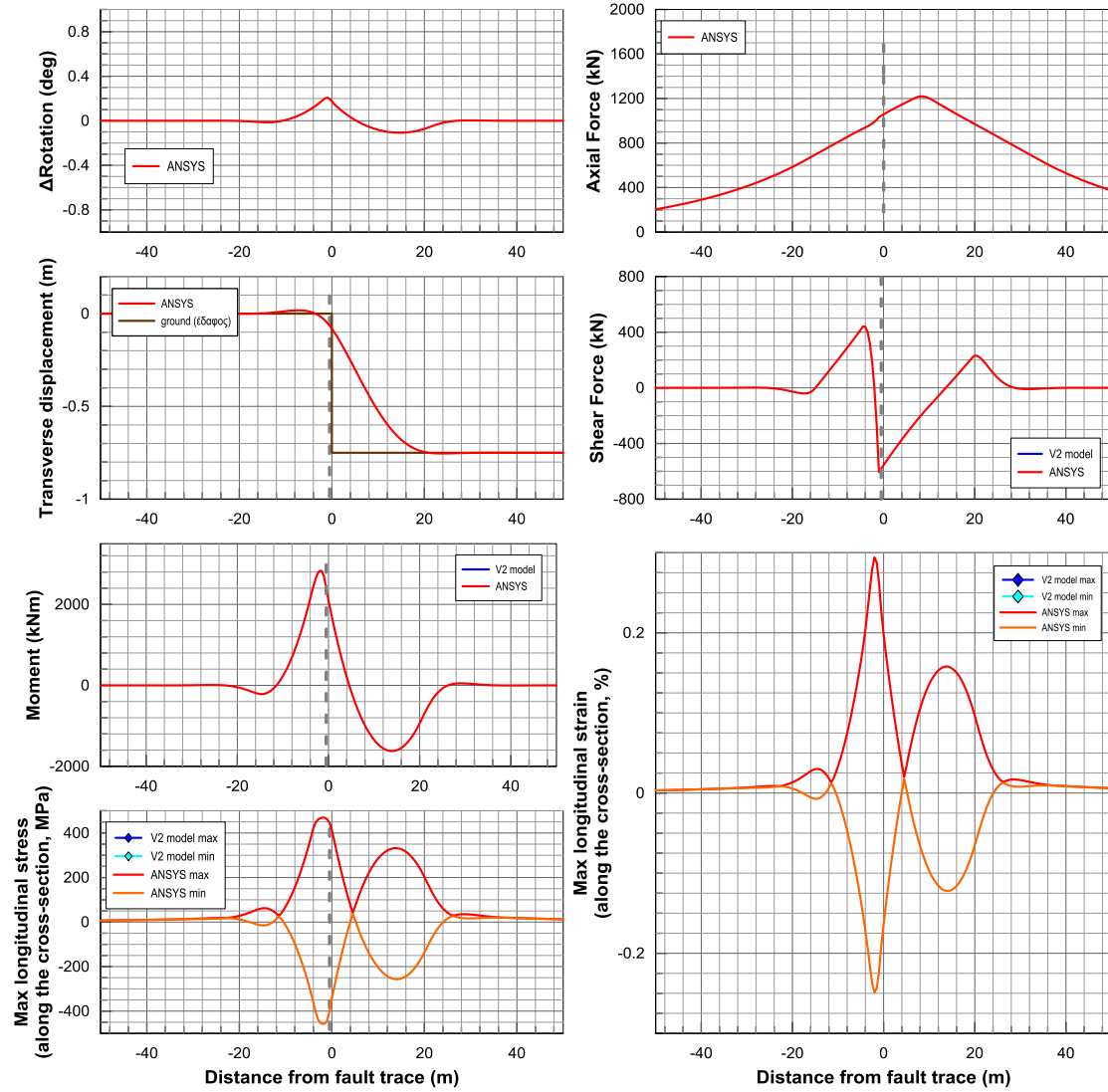
B.VI. Συνεχής Αγωγός, $\psi=75^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,500\text{m}$



B.VII. Συνεχής Αγωγός, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,375m$



B.VIII. Συνεχής Αγωγός, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=0,750\text{m}$



Β.ΙΧ. Συνεχής Αγωγός, $\psi=90^\circ$, Ρήγμα στη μέση, $d_f=1,500\text{m}$

