



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## ***Εντατική Ανάλυση Υπόγειων Καμπύλων Αγωγών Υψηλής Πίεσης***

**Αλέξανδρος-Ιωσήφ Σέφερ-Καββαδίας**

Επιβλέπων: Γεώργιος Δ. Μπουκοβάλας, Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: Ιωάννης Τσίαπας, Εντεταλμένος Διδάσκων ΕΜΠ



DIPLOMA THESIS

## ***Intensification of internal stresses and strains at the bends of high-pressure gas pipelines***

**Alexandros-Iosif Schafer-Kavvadias**

Supervisor: **George D. Bouckovalas**, Professor NTUA  
Co-Supervisor: **Ioannis Tsiapas**, Adjunct Lecturer NTUA

ΙΟΥΛΙΟΣ/JULY 2023

## Ευχαριστίες

---

Με το πέρας των προπτυχιακών μου σπουδών στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκειά τους.

Η ολοκλήρωση της Διπλωματικής αυτής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την πολύτιμη υποστήριξη του Επιβλέποντα Καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Μπουκοβάλα. Του εκφράζω ένα βαθύ ευχαριστώ για όλη τη βοήθεια που μου προσέφερε και για όλη την υποστήριξη και το ενδιαφέρον που έδειξε επανειλημμένα. Χρωστάω, επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Ιωάννη Τσιάπα, Εντεταλμένο Διδάσκοντα, για την άριστη συνεργασία που είχαμε σα πλαίσια εκπόνησης αυτής της εργασίας, τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε για να μου δώσει σημαντικά στοιχεία και εξηγήσεις πάνω στο θέμα, αλλά και για την προθυμία του και τη βοήθεια, που δε δίστασε να μου δώσει.

Τέλος, θέλω από τα βάθη της καρδιάς μου να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για την ανεκτίμητη στήριξή τους, τόσο στην παρούσα εργασία, όσο και στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Σέφερ-Καββαδίας Αλέξανδρος-Ιωσήφ

## Εκτενής Περίληψη

---

Στο πλαίσιο του αντισεισμικού σχεδιασμού λεπτότοιχων αγωγών υψηλής πίεσης για την μεταφορά υγρών/αερίων υδρογονανθράκων (φυσικού αερίου, πετρελαίου, κλπ) γίνεται έλεγχος του αγωγού έναντι των πρόσθετων τάσεων που επιβάλλονται από δύο βασικές αιτίες α) λόγω διέλευσης σεισμικών κυμάτων (seismic wave verification) και β) λόγω μόνιμων μετατοπίσεων του εδάφους (permanent ground displacement (PGD) verification). και στις δύο περιπτώσεις, βασικό πρώτο βήμα είναι φυσικά η εκτίμηση των αρχικών τάσεων και παραμορφώσεων, οι οποίες αναπτύσσονται στον αγωγό υπό συνθήκες λειτουργίας, ήτοι υπό εσωτερική πίεση  $p_0$  και θερμοκρασιακή μεταβολή  $\pm\Delta T$ , που σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, ορίζεται σε  $\Delta T = \pm 35^\circ\text{C}$ .

Για ευθύγραμμα τμήματα αγωγών οι εσωτερικές τάσεις και παραμορφώσεις μπορούν κάλλιστα να υπολογισθούν από αναλυτικές λύσεις που έχουν αναπτυχθεί για ελαστική συμπεριφορά του χάλυβα του αγωγού. Η παραδοχή της ελαστικότητας δεν είναι περιοριστική για την εφαρμογή των αναλυτικών σχέσεων, δεδομένου ότι βασική απαίτηση για τον προσδιορισμό του απαιτούμενου πάχους του αγωγού είναι οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις (axial και hoop) να μην υπερβαίνουν το όριο διαρροής (SMYS) του χάλυβα κατασκευής του αγωγού. Αντίθετα με τα ευθύγραμμα τμήματα των αγωγών, δεν κατέστη δυνατόν να εντοπιστούν στην βιβλιογραφία γενικές αναλυτικές λύσεις για καμπύλα τμήματα αγωγών, με τυχαία γωνία καμπυλότητας και ακτίνα. Έτσι, για αυτές τις περιπτώσεις, η ανάλυση των εσωτερικών τάσεων-παραμορφώσεων βασίζεται υποχρεωτικά σε αριθμητικές αναλύσεις (π.χ. Πεπερασμένων Στοιχείων) που επιβαρύνουν σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο και το κόστος της μελέτης.

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής ήταν ο καθορισμός της επίδρασης της γωνίας καμπύλωσης στην εντατική κατάσταση των καμπύλων τμημάτων χαλύβδινων υπόγειων αγωγών υψηλής πίεσης και η υιοθέτηση ενός διορθωτικού «συντελεστή καμπύλωσης» για την ποσοτική εκτίμηση της επίδρασης αυτής. Οι αναλύσεις για τον υπολογισμό των ανωτέρω έγιναν

διάφορες γωνίες καμπύλωσης, από 15 έως και 90 μοίρες. Η διακριτοποίηση των γωνιών έγινε με μικρότερο βήμα για γωνίες από 15 έως 45 μοίρες και με μεγαλύτερο για γωνίες άνω των 45 μοιρών. Επίσης, οι αναλύσεις έγιναν για hot bends με μέση ακτίνα καμπύλωσης  $R=5D$  ( $D$  είναι η διάμετρος του αγωγού), δεδομένου ότι η επίδραση της είναι πρακτικά αμελητέα για field bends ( $R=40D$ ) και για elastic bends ( $R>40D$ ).

Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτές τις αναλύσεις είναι τα ακόλουθα:

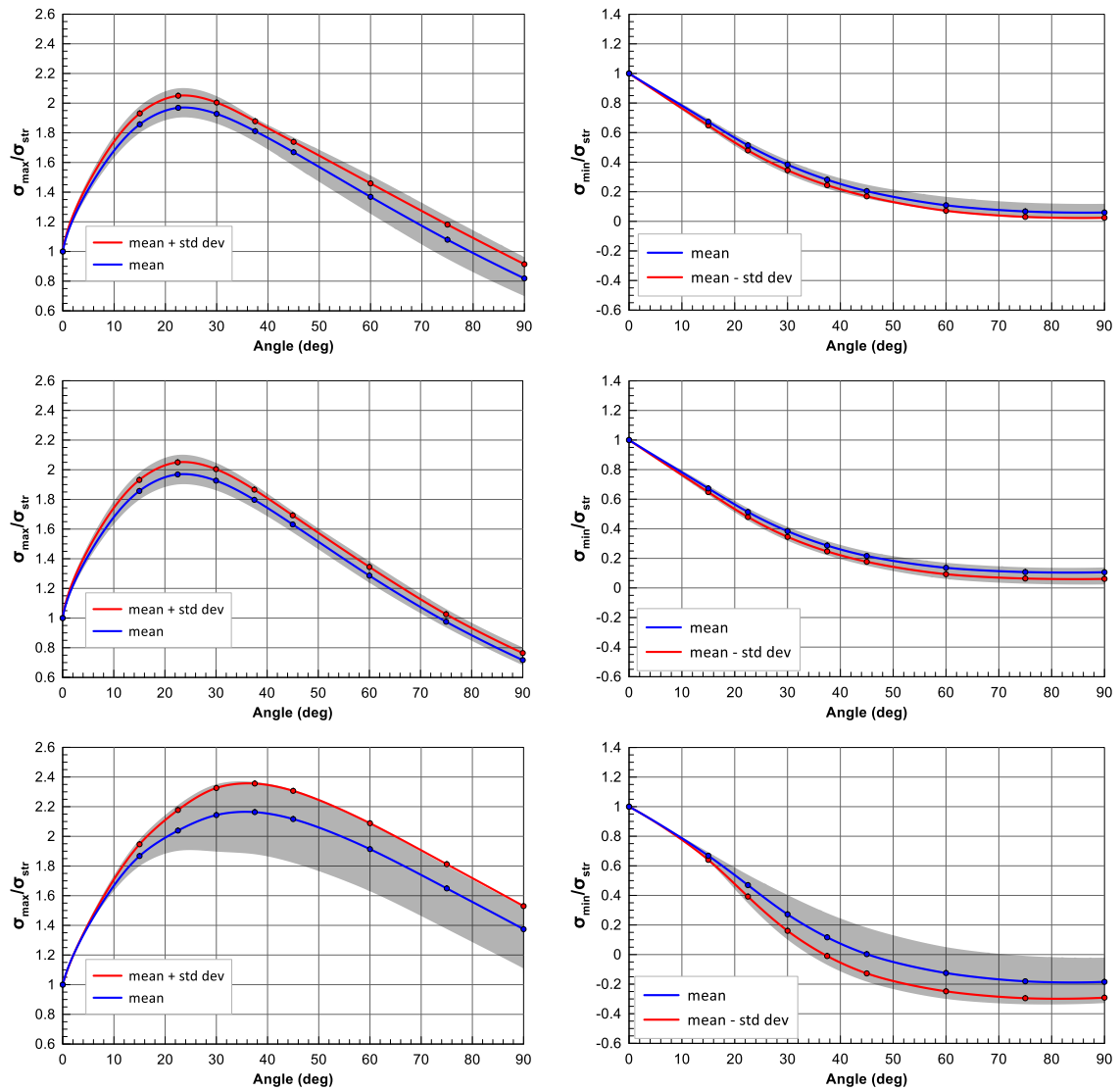
- 1) Η επίδραση του ευθύγραμμου σκέλους του αγωγού σταματάει να επηρεάζει τις τιμές των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στη καμπύλωση για τιμές μεγαλύτερες των 200m. Έτσι, επιλέχθηκε συντηρητικά μήκος ευθύγραμμου σκέλους περί τα 250m.
- 2) Η αναζήτηση μήκους του στοιχείου που δεν προκαλεί αλλοίωση των εντατικών μεγεθών της καμπύλωσης οδήγησε στην επιλογή διακριτοποίησης της καμπύλωσης σε τμήματα (στοιχεία) μήκους 0.25m.
- 3) Από τη διερεύνηση που διεξήχθη για την επίδραση των συνόρων του αγωγού επιβεβαιώθηκε το γεγονός ότι η ταυτόχρονη απελευθέρωση τόσο της οριζόντιας και εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης, όσο και της στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα στο ένα άκρο του αγωγού δεν προκαλεί καμία σημαντική αυξομείωση στις τιμές των εντατικών μεγεθών στην περιοχή της καμπύλωσης, παρά μόνο σε ένα περιορισμένο μήκος (δηλ. περί τα 100D) του ευθύγραμμου τμήματος πλησίον του ελεύθερου άκρου.
- 4) Η οποιαδήποτε αλλαγή στη γωνία καμπύλωσης του αγωγού δεν προκαλεί καμία επίδραση στις περιμετρικές τάσεις (hoop stresses) οι οποίες παραμένουν ίσες με τις αντίστοιχες τάσεις στα ευθύγραμμα τμήματα του αγωγού, πριν και μετά την καμπύλωση.

Στο **Σχήμα I** που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα όλων των παραμετρικών αναλύσεων (εύρος, μέση τιμή και μέση τιμή συν μια τυπική απόκλιση) υπό την μορφή της μεταβολής του διορθωτικού «συντελεστή καμπύλωσης»  $\sigma_{\max,\min}/\sigma_{\text{str}}$  συναρτήσει της γωνίας συμπλήρωσης. Παρατηρείται επιπλέον ότι:

- 5) Η αλλαγή της γωνίας καμπύλωσης προκαλεί εν γένει αύξηση των τάσεων της εξωτερικής ίνας του αγωγού, σε σχέση με τις αντίστοιχες τάσεις στα ευθύγραμμα τμήματα πριν και μετά την καμπύλωση. Η εν λόγω αξονική τάση διπλασιάζεται περίπου, για γωνίες καμπύλωσης μεταξύ 20° και 40°.
- 6) Αντίθετα, η αλλαγή της γωνίας καμπύλωσης προκαλεί μονοσήμαντη μείωση της αξονικής τάσης στην εσωτερική ίνα του αγωγού με μέγιστη μείωση για γωνία καμπύλωσης ίση με

90°, όπου ο διορθωτικός «συντελεστής καμπύλωσης» μπορεί να λάβει μηδενικές ή ακόμα και μικρές σχετικά αρνητικές τιμές.

- 7) Ο διορθωτικός «συντελεστής καμπύλωσης» για την εξωτερική ίνα επηρεάζεται από τις θερμοκρασιακές μεταβολές, με την μεγαλύτερη μεγέθυνση να παρουσιάζεται στην περίπτωση της αρνητικής θερμοκρασιακής μεταβολής. Οι περιπτώσεις της μηδενικής και θετικής θερμοκρασιακής μεταβολής οδηγούν περίπου στα ίδια αποτελέσματα.
- 8) Οι τιμές του διορθωτικού «συντελεστή καμπύλωσης» για την εξωτερική ίνα παρουσιάζουν μέγιστο για γωνία καμπύλωσης 22.5° για μηδενική και για θετική θερμοκρασιακή μεταβολή και για 37.5° για αρνητική θερμοκρασιακή μεταβολή. Το εύρος διασποράς των τιμών για τις πρώτες δύο πρώτες θερμοκρασιακές μεταβολές είναι παρόμοιο, ενώ για την τρίτη είναι σαφώς αυξημένο.
- 9) Τέλος, ο «συντελεστής καμπύλωσης» παρουσιάζει ελάχιστο για γωνία καμπύλωσης 90 μοίρες στην περίπτωση της εσωτερικής ίνας και για τις τρεις θερμοκρασιακές μεταβολές, με τη διαφορά ότι για την αρνητική οι τιμές του μπορεί να πάρουν και αρνητικό πρόσημο.



**Σχήμα Ι:** Συνοπτικά αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων υπό την μορφή της μεταβολής του διορθωτικού «συντελεστή καμπύλωσης»  $\sigma_{\max,\min}/\sigma_{\text{str}}$  συναρτήσει της γωνίας συμπλήρωσης

## Extended Abstract

---

Within the scope of the seismic design of thin-walled high-pressure pipelines for the transportation of carbohydrates (i.e. natural gas, petroleum, etc.) is the pipeline verification against the additional stresses subjected to it by two main causes: a) the propagation of seismic waves (seismic verification) and b) permanent soil displacement (permanent ground displacement verification). In both cases, a crucial first step is the estimation of the initial stresses and strains that are subjected to the pipeline under normal operating conditions, namely under internal pressure  $p_0$  and temperature variance  $\pm\Delta T$ , that in accordance with the Eurocode 3 standards, is defined as  $\Delta T = \pm 35^\circ\text{C}$ .

The internal stresses and strains of the straight pipeline segments can be easily calculated by analytical solutions that have been formulated for the elastic behavior of the pipe steel. The assumption of elasticity is not a constraining factor for the application of those analytical solutions, given that the main requirement for determining the necessary thickness of the pipeline is the magnitude of the generated normal stresses (axial and hoop) to not exceed the specified minimum yield strength (SMYS) of the pipe steel. Unfortunately, studying the available bibliography, it was not possible to find generalized analytical solutions for pipeline bends with a random curvature angle and radius. Hence, the analysis of the internal stresses and strains is purely reliant on numerical analyses (e.g., Finite Element Analysis) that gravely impact the required time and cost of the study.

The scope of this Diploma Thesis, was, therefore, the determination of the effect the angle of the bend curvature has on the initial conditions of curved underground high-pressure steel pipeline segments and the adoption of a correction “curvature coefficient” for the quantitative estimation of this effect. The analyses conducted for the estimation of the aforementioned parameters were performed for various curvature angles, ranging from 15 to 90 degrees. A smaller step was used for bend angles between 15 and 45 degrees, while a bigger one was used

for all other angles larger than 45 degrees. It is noteworthy that all analyses were conducted for “hot bends” with an average bend angle of  $R=5D$  (where  $D$  is the pipeline diameter), given that the curvature’s effect is practically negligible for “field bends” ( $R=40D$ ) and for “elastic bends” ( $R>40D$ ).

The main conclusions that were derived from these analyses are the followings:

- 1) The length of the straight segment stops effecting the internal stresses at the bend for segment lengths greater than 200m. Therefore, a straight segment length of 250m was conservatively chosen.
- 2) The investigation for an element length that does not affect the internal stresses and strains of the curvature led to an element size of 0.25m length.
- 3) The investigation that was conducted for the effect of the boundary conditions of the Finite Element Analysis model confirmed that the simultaneous release of the horizontal and vertical displacements as well as the vertical axis rotation at the one end of the model does not cause any noticeable effect on the internal stresses and strains values at the area of the bend, but rather at only a reduced length (i.e., around  $100D$ ) from the endcap of the model.
- 4) The bend angle has no additional effects on the hoop stresses of the pipeline, which remain equal to those for a straight segment regardless of the angle at the curvature.

In the following Figure I, a brief synopsis of the results of all the parametric analyses (range, average, average plus a standard deviation) is shown in the form of the variation of the corrective “curvature coefficient”  $\sigma_{\max,\min}/\sigma_{\text{str}}$  with the curvature angle.

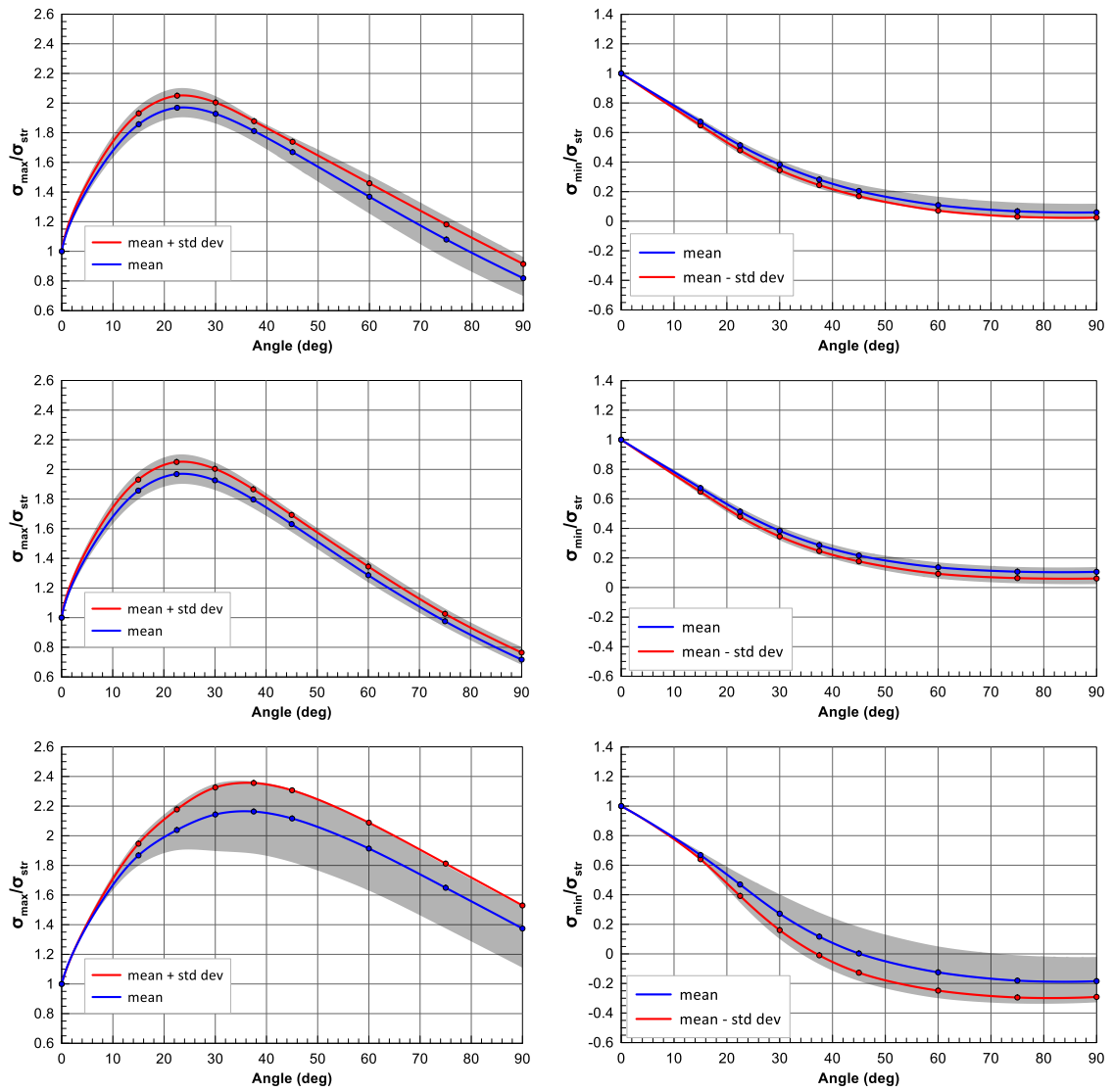
It is also noted that:

- 5) The variation of the curvature angle generally leads to an increase of the stresses of the pipeline extrados, relative to the corresponding values at the straight segments before and after the bend. The pertinent axial stress approximately doubles for curvature angles between  $20^\circ$  and  $40^\circ$ .
- 6) In contrast, the variation of the curvature angle produces an unequivocal reduction of the axial stress of the pipeline intrados, with a maximum reduction occurring for curvature angles of  $90^\circ$ , where the corrective “curvature coefficient” can obtain null or even slightly negative values.
- 7) The corrective “curvature coefficient” for the extrados is magnified by the ambient temperature differences, with the greatest magnification occurring for that of the negative



temperature difference. On the other hand, the zero and positive temperature differences affect the coefficient in a similar manner.

- 8) The corrective “curvature coefficient” values for the extrados maximize for curvature angles of  $22.5^\circ$  for the zero and positive temperature differences, and at  $37.5^\circ$  for the negative one. The dispersion range of the values for the first two temperature differences is practically identical, whereas for the negative temperature difference, it is clearly higher.
- 9) Finally, for the pipeline intrados, the corrective “curvature coefficient” reaches its minimum at a bend angle of  $90^\circ$  for all three temperature differences, with the exception that for the negative temperature differences, the values of which can also obtain a negative sign.



**Figure I:** Brief presentation of the parametric analysis results in the form of a corrective “curvature coefficient”  $\sigma_{\max,\min}/\sigma_{\text{str}}$  versus the bend angle.

## Περιεχόμενα

---

Ευχαριστίες .....	i
Εκτενής Περίληψη .....	ii
Extended Abstract .....	vi
Περιεχόμενα .....	x
<b>1 Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1 Περιγραφή του Προβλήματος .....	1
1.2 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας .....	3
1.3 Δομή Διπλωματικής .....	3
<b>2 Χαρακτηριστικά Αγωγού &amp; Επίχωσης.....</b>	<b>5</b>
2.1 Ιδιότητες Υλικού Επίχωσης .....	5
2.2 Γεωμετρικά & Μηχανικά Χαρακτηριστικά Αγωγού .....	6
2.3 Επιτρεπόμενες Τάσεις & Παραμορφώσεις Αγωγού .....	7
<b>3 Εντατική Ανάλυση Αγωγού σε Συνθήκες Λειτουργίας .....</b>	<b>10</b>
3.1 Γενικά .....	10
3.2 Μεθοδολογία Αναλύσεων .....	11
3.3 Τυπικά αποτελέσματα Αναλύσεων.....	13
3.4 Επίδραση Μήκους Ευθύγραμμου Σκέλους.....	17
3.5 Επίδραση Διακριτοποίησης .....	19
3.5 Επίδραση Συνόρων .....	21

3.6	Συμπεράσματα .....	27
<b>4</b>	<b>Επίδραση Καμπύλωσης στην Εντατική Κατάσταση του Αγωγού .....</b>	<b>28</b>
4.1	Γενικά .....	28
4.2	Επίδραση γωνίας καμπύλωσης.....	29
4.3	Επίδραση θερμοκρασιακής μεταβολής.....	31
4.4	Επίδραση λόγου διαμέτρου προς πάχος αγωγού .....	34
4.5	Επίδραση εσωτερικής πίεσης .....	38
4.6	Επίδραση πάχους επικάλυψης .....	44
4.7	Σύνοψη.....	49
<b>5</b>	<b>Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Αριθμητικών Αναλύσεων .....</b>	<b>51</b>
5.1	Εσωτερική πίεση λειτουργίας ( $p_0 \neq 0, \Delta T = 0$ ) .....	51
5.2	Θετική θερμοκρασιακή μεταβολή ( $p_0 + \Delta T$ ) .....	55
5.3	Αρνητική θερμοκρασιακή μεταβολή ( $p_0 - \Delta T$ ).....	59
5.4	Παράδειγμα Εφαρμογής.....	62
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>65</b>
6.1	Αριθμητική Προσομοίωση .....	65
6.2	Επίδραση Καμπύλωσης - Γενικά .....	66
6.3	Επίδραση Καμπύλωσης: $p_0 \neq 0, \Delta T = 0$ .....	67
6.4	Επίδραση Καμπύλωσης: $p_0 + \Delta T$ .....	68
6.5	Επίδραση Καμπύλωσης: $p_0 - \Delta T$ .....	68
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>70</b>
	<b>Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων .....</b>	<b>72</b>
A.1	Προσομοίωμα Πεπερασμένων Στοιχείων.....	72
A.2	Προσομοίωση Υλικού Κατασκευής Αγωγού .....	73
A.3	Ισοδύναμα Ελατήρια Εδάφους .....	73
A.4	Μη Γραμμικός Αλγόριθμος Επίλυσης .....	78

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

---

### 1.1 Περιγραφή του Προβλήματος

Στο πλαίσιο του αντισεισμικού σχεδιασμού λεπτότοιχων αγωγών υψηλής πίεσης για την μεταφορά υγρών/αερίων υδρογονανθράκων (φυσικού αερίου, πετρελαίου, κλπ) γίνεται έλεγχος του αγωγού έναντι των πρόσθετων τάσεων που επιβάλλονται από δύο βασικές αιτίες α) λόγω διέλευσης σεισμικών κυμάτων (seismic wave verification) και β) λόγω μόνιμων μετατοπίσεων του εδάφους (permanent ground displacement (PGD) verification) που αναπτύσσονται σε περίπτωση διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων, αστοχίας πρανών, ρευστοποίησης, κτλ. Όμως, το πρώτο βασικό βήμα για τον αντισεισμικό έλεγχο των εν λόγω αγωγών είναι φυσικά η εκτίμηση των αρχικών τάσεων και παραμορφώσεων, οι οποίες αναπτύσσονται στον αγωγό υπό συνθήκες λειτουργίας. Ήτοι, υπό εσωτερική πίεση  $p_0$  και θερμοκρασιακή μεταβολή  $\pm \Delta T$  σε σχέση με τη θερμοκρασία εγκατάστασης του αγωγού. Διευκρινίζεται ότι, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, η συνήθης χρησιμοποιούμενη θερμοκρασιακή μεταβολή ορίζεται σε  $\Delta T \pm 35^\circ\text{C}$ .

Για ευθύγραμμα τμήματα αγωγών οι εσωτερικές τάσεις και παραμορφώσεις μπορούν κάλλιστα να υπολογισθούν από αναλυτικές λύσεις που έχουν αναπτυχθεί για ελαστική συμπεριφορά του χάλυβα του αγωγού. Η παραδοχή της ελαστικότητας δεν είναι περιοριστική για την εφαρμογή των αναλυτικών σχέσεων, δεδομένου ότι βασική απαίτηση για τον προσδιορισμό του απαιτούμενου πάχους του αγωγού είναι οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις (axial και hoop) να μην υπερβαίνουν το όριο διαρροής (SMYS) του χάλυβα κατασκευής του αγωγού. Αντίθετα με τα ευθύγραμμα τμήματα των αγωγών, δεν κατέστη δυνατόν να εντοπιστούν στην βιβλιογραφία γενικές αναλυτικές λύσεις για καμπύλα τμήματα αγωγών, με τυχαία γωνία καμπυλότητας και ακτίνα. Έτσι, για αυτές τις περιπτώσεις, η ανάλυση των εσωτερικών τάσεων-παραμορφώσεων θα πρέπει να βασισθεί σε αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων Πεπερασμένων Στοιχείων,

οι οποίες να λαμβάνουν συστηματικά υπόψη την 3D γεωμετρία του αγωγού, καθώς και την αλληλεπίδραση του με το περιβάλλον έδαφος.

Δεδομένης της ευαισθησίας των καμπύλων τμημάτων δομικών στοιχείων σε αξονικές καταπονήσεις (θλίψης και εφελκυσμού), οι οποίες μπορούν ακόμη και να οδηγήσουν σε τοπικά φαινόμενα λυγισμών και εξαιρετικά μεγάλες καμπτικές τάσεις και παραμορφώσεις, η αριθμητική προσομοίωση έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις ως προς τις επιλογές του χρήστη όσο αναφορά κάποιες βασικές παραδοχές. Μεταξύ αυτών, ιδιαίτερη σημασία έχει η επιλογή:

- Των συνόρων, στα δύο άκρα του αγωγού, και πιο συγκεκριμένα του είδους του συνόρου (άρθρωση, πάκτωση, κτλ.) καθώς και της απόστασης των συνόρων από το καμπύλο τμήμα του αγωγού.
- Του μήκους των πεπερασμένων στοιχείων στα οποία θα διακριτοποιηθεί ο αγωγός, και ειδικά το καμπύλο τμήμα του στο οποίο αναμένεται συγκέντρωση εσωτερικών τάσεων και παραμορφώσεων.

Ολοκληρώνοντας αυτή την σύντομη περιγραφή του τεχνικού προβλήματος, που αποτελεί το κύριο αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, αξίζει να αναφερθεί και ένα επιπλέον ερώτημα το οποίο προκύπτει σχετικά με το γενικότερο θέμα της διαστασιολόγησης λεπτότοιχων αγωγών υψηλής πίεσης υπό συνθήκες λειτουργίας. Συγκεκριμένα, η επιλογή του κατάλληλου πάχους τοιχώματος γίνεται με βάση τις αναλυτικές σχέσεις για τις hoop τάσεις και παραμορφώσεις στα ευθύγραμμα τμήματα του αγωγού, χωρίς καμία αναφορά στις ενδεχόμενες καμπυλώσεις του. Μια πιθανή εξήγηση είναι ότι, υπό συνθήκες λειτουργίας, οι hoop τάσεις και παραμορφώσεις στα καμπύλα τμήματα του αγωγού είναι μικρότερες ή ίσες απ' ό,τι στα ευθύγραμμα τμήματα και συνεπώς συντηρητικά αγνοούνται.

Δεν είναι όμως επί του παρόντος γνωστό κατά πόσο αυτό ισχύει ή όχι. Ακόμη, όμως, και εάν ισχύει, υπάρχουν περιπτώσεις που κριτήριο σχεδιασμού αποτελούν οι αξονικές και όχι οι περιμετρικές hoop τάσεις και παραμορφώσεις. Για παράδειγμα, αυτό ισχύει σε συγκολλημένους αγωγούς με επιτόπου διενέργεια συγκολλήσεων όπου η επιτρεπόμενη παραμόρφωση των συγκολλήσεων σε εφελκυσμό είναι 0.5%, δηλαδή πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη επιτρεπόμενη παραμόρφωση του χάλυβα που είναι ίση με 2-4%, και επομένως οι αξονικές τάσεις και παραμορφώσεις είναι κρίσιμες ακόμη και εάν είναι μικρότερες από τις περιμετρικές (hoop).

## 1.2 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Κατ' επέκταση των ανωτέρω, ο σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας είναι πολλαπλός:

- Κατ' αρχήν θα γίνει διερεύνηση και βελτιστοποίηση των παραδοχών της αριθμητικής προσομοίωσης καμπύλων τμημάτων των αγωγών όσον αφορά την επίδραση των συνόρων (στα άκρα του προσομοιώματος) και της πυκνότητας της διακριτοποίησης του αγωγού σε πεπερασμένα στοιχεία.
- Θα γίνει σύγκριση των περιφερειακών (hoop) τάσεων/παραμορφώσεων σε καμπύλα και ευθύγραμμα τμήματα του αγωγού προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο ισχύει η υπόθεση που διατυπώθηκε προηγουμένως, δηλαδή ότι, υπό συνθήκες λειτουργίας, οι hoop τάσεις και παραμορφώσεις στα καμπύλα τμήματα του αγωγού είναι μικρότερες ή ίσες απ' ό,τι στα ευθύγραμμα τμήματα και συνεπώς συντηρητικά αγνοούνται.
- Η βελτιστοποιημένη μεθοδολογία αριθμητικής ανάλυσης θα χρησιμοποιηθεί για την παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης της γωνίας και της ακτίνας καμπύλωσης στις αξονικές και τις περιμετρικές (hoop) τάσεις/παραμορφώσεις σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές για ευθύγραμμα τμήματα του αγωγού. Παράλληλα, θα γίνει προσπάθεια ορισμού διορθωτικών συντελεστών για τον υπολογισμό των τάσεων/παραμορφώσεων στο καμπύλο τμήμα συναρτήσει των αντίστοιχων τάσεων/παραμορφώσεων που υπολογίζονται αναλυτικά για τα ευθύγραμμα τμήματα του αγωγού.

## 1.3 Δομή Διπλωματικής

Όπως προαναφέρθηκε, οι αναλύσεις της εντατικής κατάστασης καμπύλων αγωγών θα γίνουν παραμετρικά με τη μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων. Έτσι:

- Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται η μεθοδολογία ανάλυσης με ιδιαίτερη αναφορά στη μεθοδολογία υπολογισμού των κατανεμημένων εδαφικών ελατηρίων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους.
- Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της επίδρασης του μήκους των ευθύγραμμων τμημάτων, το μήκος διακριτοποίησης της γωνίας και των συνοριακών συνθηκών πάνω στον αγωγό και σχολιάζονται κάποια αξιοσημείωτα αποτελέσματα της ανάλυσης.
- Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της επίδρασης της γωνίας καμπύλωσης στην εντατική κατάσταση του αγωγού και σχολιάζονται κάποια αξιοσημείωτα αποτελέσματα της ανάλυσης.

- Στο κεφάλαιο 5 αξιολογούνται τα αποτελέσματα των αναλύσεων του κεφαλαίου 4, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται και αξιολογούνται η επίδραση όλων των παραγόντων στον συντελεστή καμπύλωσης της γωνίας. Επιπροσθέτως, παρουσιάζεται παράδειγμα εφαρμογής για τον καθορισμό και τη σύγκριση της διαδικασίας επίλυσης με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (Αριθμητική Ανάλυση) σε σχέση με τις Αναλυτικές Σχέσεις που πάρθηκαν από την υπάρχουσα βιβλιογραφία.
- Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της Διπλωματικής Εργασίας και αξιολογείται η μεθοδολογία και η συνολική διαδικασία που διεξήχθη για την παραγωγή των αποτελεσμάτων.



# Κεφάλαιο 2

## Χαρακτηριστικά Αγωγού & Επίχωσης

---

### 2.1 Ιδιότητες Υλικού Επίχωσης

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές κατασκευής του Έργου, ο αγωγός θα τοποθετηθεί κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, μέσα σε τάφρους ορθογωνικής ή τραπεζοειδούς διατομής. Οι ακριβείς διαστάσεις των τάφρων εξαρτώνται από την θέση κατά μήκος του αγωγού (ελεύθερο πεδίο, διασταυρώσεις οδικούς-σιδηροδρομικούς άξονες ή φυσικά-τεχνητά κανάλια, κλπ.), καθώς επίσης και από τον τύπο της επίστρωσης στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από τον αγωγό. Ωστόσο, σε όλες τις περιπτώσεις, το υλικό επίχωσης, σε άμεση επαφή με τον αγωγό, θα αποτελείται από λεπτόκοκκη άμμο λατομείου (ή άλλο αποδεδειγμένα ισοδύναμο ως προς την μηχανική συμπεριφορά κοκκώδες υλικό επίχωσης) που θα τοποθετηθεί σε χαλαρή απόθεση (χωρίς συμπίεση). Κατ' επέκταση και σύμφωνα με τα ανωτέρω, θεωρήθηκαν συντηρητικά οι ακόλουθες ιδιότητες για το υλικό επίχωσης του αγωγού:

- 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  $K_0 = 1.00$

Σύμφωνα με τις συνήθειες προδιαγραφές, το ελάχιστο πάχος επίχωσης, μεταξύ του άνω μέρους του αγωγού και της επιφάνειας του εδάφους είναι εν γένει ίσο με 1.00m, ενώ αυξάνεται σε 1.20m-1.40m κάτω από διασταυρώσεις με οδικές/σιδηροδρομικές αρτηρίες. Υπέρβαση του ελάχιστου πάχους επικάλυψης είναι επίσης πιθανή τοπικά, σε θέσεις τοπογραφικής ανομοιομορφίας στις οποίες δεν έχει προσαρμοσθεί η (ευθύγραμμη) χάραξη του αγωγού. Κατόπιν αυτού, και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι παραμορφώσεις και οι τάσεις που αναπτύσσονται λόγω των φορτίων λειτουργίας σε υπόγειους αγωγούς αυξάνονται εν γένει όσο

αυξάνεται το βάρος των υπερκείμενων γαιών, οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν συντηρητικά για ελάχιστο πάχος επίχωσης ίσο προς 1.60m.

## 2.2 Γεωμετρικά & Μηχανικά Χαρακτηριστικά Αγωγού

Στο πλαίσιο της Διπλωματικής, θεωρήθηκε ενδεικτικά ότι ο υπό μελέτη αγωγός Φ.Α. υψηλής πίεσης θα λειτουργεί υπό εσωτερική πίεση  $p=7.5\text{MPa}$  (75.0 barg), ενώ η θερμοκρασία σχεδιασμού του φυσικού αερίου θα κυμαίνεται μεταξύ  $6^{\circ}\text{C}$  και  $24^{\circ}\text{C}$ . Η ονομαστική εξωτερική διάμετρος (NPS) του αγωγού είναι 30" (76.2 cm), ενώ το ελάχιστο πάχος των τοιχωμάτων του αγωγού είναι 10.00mm και θα αυξηθεί παραμετρικά σε 10mm, 15mm και 20mm Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εν λόγω διατομής συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1

**Πίνακας 2.1:** Γεωμετρικά στοιχεία της διατομής του αγωγού για τη τον έλεγχο του αγωγού έναντι διέλευσης σεισμικών κυμάτων

<b>Εξωτερική Διάμετρος (<math>\text{m } 10^{-3}</math>)</b>	762
<b>Πάχος Τοιχώματος (<math>\text{m } 10^{-3}</math>)</b>	10.00
<b>ΕΜΒΑΔΟΝ, A (<math>\text{m}^2 10^{-6}</math>)</b>	23624.8
<b>ΡΟΠΗ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ, I (<math>\text{m}^4 10^{-6}</math>)</b>	1670.3

Ο αγωγός θα κατασκευαστεί από συγκολλητό ανθρακούχο χάλυβα EN10208-2 L450MB, αντίστοιχο με τον X65 ανθρακούχο χάλυβα σύμφωνα με τις προδιαγραφές API Spec. 5L. Επομένως, με βάση τις εν λόγω προδιαγραφές, οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα του αγωγού είναι οι ακόλουθες:

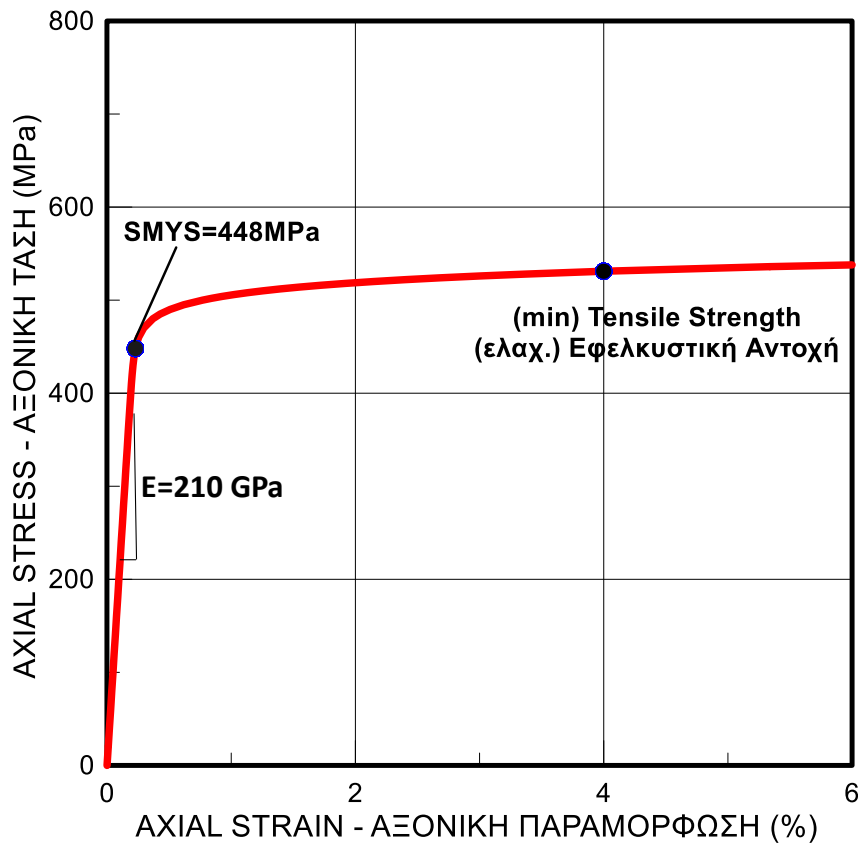
- Τάση διαρροής (SMYS) 448 MPa
- Αντοχή σε Εφελκυσμό 531 MPa
- Αρχικό Μέτρο Ελαστικότητας Young ( $E_i$ )  $210 \times 10^6$  kPa
- Λόγος Poisson ( $\nu$ ) 0.30
- Θερμικός Συντελεστής Παραμόρφωσης ( $\alpha$ )  $1.17 \times 10^{-5}$  (ανά  $^{\circ}\text{C}$ )

Οι παραπάνω παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας μπορούν να εισέλθουν στους υπολογισμούς μέσω της ακόλουθης σχέσης τάσεων – παραμορφώσεων Ramberg-Osgood (O'Rourke and Liu, 2012) :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_i} \left[ 1 + \frac{a}{r+1} \left( \frac{\sigma}{\sigma_e} \right)^r \right] \quad (2.1)$$

με  $E_i=210,000 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_e=490 \text{ MPa}$ ,  $\alpha=38.32$  και  $r=31.5$ .

Η καμπύλη Ramberg-Osgood για τον χάλυβα του αγωγού έχει σχεδιασθεί στο Σχήμα 2.1. Στις αριθμητικές αναλύσεις της εντατικής κατάστασης του αγωγού, η ανωτέρω σχέση τάσης-παραμόρφωσης έχει εισαχθεί ως μία πολύ-γραμμική προσέγγιση της Εξίσωσης 2.1, με 100 ίσα γραμμικά τμήματα για κάθε κλάδο τάσης – παραμόρφωσης, σε εφελκυσμό και σε θλίψη.



**Σχήμα 2.1:** Προσομοίωση της σχέσης τάσης – παραμόρφωσης του χάλυβα του αγωγού (X65 API Spec. 5L) με τη σχέση Ramberg-Osgood.

### 2.3 Επιτρεπόμενες Τάσεις & Παραμορφώσεις Αγωγού

**Στάθμες Επιτελεστικότητας.** Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Αντισεισμικό Κανονισμό EN 1998-1:2004 (Ε), για τον έλεγχο της επάρκειας του αγωγού έναντι σεισμικών δονήσεων θα πρέπει να ελέγχονται οι ακόλουθες οριακές συνθήκες, γνωστές και ως «στάθμες επιτελεστικότητας»:

- Στάθμη Περιορισμού Βλαβών (Damage Limitation State ή DLS), η οποία αφορά σε περιορισμένες βλάβες πέραν των οποίων παρεμποδίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του αγωγού. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο συγκεκριμένος αγωγός θα πρέπει να λειτουργεί υπό

υψηλή εσωτερική πίεση ( $p=80\text{barg}$ ), θα πρέπει να αποκλεισθεί το ενδεχόμενο ρηγματώσεων και διαρροών ακόμη και για τον σεισμό **Ασφαλούς Λειτουργίας OBE** με 70 έτη περίοδο επανάληψης.

- Στάθμη Οριακής Αντοχής (Ultimate Limit State ή ULS), η οποία αφορά σε κατάρρευση ή άλλες μορφές δομικής αστοχία οι οποίες θέτουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές. Για το παρόν έργο, αυτή η στάθμη επιτελεστικότητας θα πρέπει να ικανοποιείται για τον πλέον ισχυρό σεισμό Ασφαλούς Διακοπής Λειτουργίας SSE με 949 έτη περίοδο επανάληψης.

**Κριτήρια Επιτελεστικότητας - Σεισμός OBE.** Προκειμένου να εξασφαλισθούν οι απαιτήσεις της στάθμης Ασφαλούς Λειτουργίας (DLS), θεωρείται συντηρητικά ότι οι συνολικές τάσεις του αγωγού (σε εφελκυσμό ή θλίψη) κατά τον σεισμό OBE δεν θα πρέπει να υπερβούν κατ' απόλυτη τιμή την ελάχιστη τάση διαρροής του χάλυβα X65 **SMYS=448MPa**, ενώ οι αντίστοιχες παραμορφώσεις δεν θα πρέπει να υπερβούν κατ' απόλυτη τιμή παραμόρφωση διαρροής η οποία είναι ίση (Εξ. 2.1)  $\epsilon_v \approx \text{SMYS}/E_i = 0.21\%$ .

**Κριτήρια Επιτελεστικότητας - Σεισμός SSE.** Τα κριτήρια επιτελεστικότητας για τον σεισμό SSE έχουν την ίδια γενική μορφή όπως και για τον σεισμό OBE, με μία όμως βασική διαφορά: οι οριακές τάσεις και παραμορφώσεις του αγωγού είναι μεγαλύτερες από τα όρια ελαστικής συμπεριφοράς του χάλυβα SMYS και  $\epsilon_v = \text{SMYS}/E_i$ . Η εν λόγω αυξημένη ανοχή στην καταπόνηση οφείλεται στο γεγονός ότι η φόρτιση λόγω σεισμικών δονήσεων αποτελεί πρόβλημα «ελεγχόμενων μετατοπίσεων» και όχι «ελεγχόμενων δυνάμεων». Για τον λόγο αυτό, τα κριτήρια επιτελεστικότητας θα πρέπει να ορισθούν πρωταρχικά με αναφορά στις παραμορφώσεις και όχι στις τάσεις του αγωγού. Επιπλέον, επιτρέπεται οι παραμορφώσεις του αγωγού να ξεπεράσουν το όριο διαρροής αρκεί να μην οδηγήσουν σε εφελκυστική ή θλιπτική αστοχία και μαζική διαρροή στο περιβάλλον του περιεχόμενου (υγρού ή αέριου καυσίμου) η οποία μπορεί να απειλήσει το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση **θλιπτικής** καταπόνησης, θα πρέπει να αποτραπούν δύο πιθανές μορφές αστοχίας: ο αγωγός να υποστεί γενικευμένο λυγισμό, και να αναδυθεί στην επιφάνεια του εδάφους ως συνεχής και συμπαγής δοκός, ή να υποστεί τοπικό λυγισμό, με στρέβλωση και ρυτίδωση ως κέλυφος. Για λεπτότοιχους χαλύβδινους αγωγούς, όπως εν προκειμένω, κρίσιμη είναι η δεύτερη μορφή αστοχίας η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ρηγμάτωση του αγωγού. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές για υπόγειους αγωγούς υψηλής πίεσης ALA-ASCE (2001), η αξονική παραμόρφωση σε θλίψη που απαιτείται για την εκδήλωση τοπικού λυγισμού σε αγωγούς διαμέτρου  $D$  και πάχους τοιχώματος  $t$  υπολογίζεται (συντηρητικά για μηδενική εσωτερική πίεση) από την ακόλουθη σχέση:

$$\varepsilon_{al,c,ASCE} (\%) = 0.84 - 0.0035 \frac{D}{t} \quad (2.2)$$

Εναλλακτικά, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Αντισεισμικό Κανονισμό EC-8 (EN-1998.04), η επιτρεπόμενη θλιπτική παραμόρφωση έναντι τοπικού λυγισμού ορίζεται ως:

$$\varepsilon_{all,c,EC8} (\%) = 40.0 \frac{t}{D} \leq 1\% \quad (2.3)$$

Με εφαρμογή των ανωτέρω σχέσεων για την διάμετρο ( $D=762\text{mm}$ ) και το ελάχιστο πάχος σωλήνα ( $t=10\text{mm}$ ) του αγωγού που εξετάζεται προκύπτει ότι η επιτρεπόμενη θλιπτική παραμόρφωση είναι  $\varepsilon_{all,c} = \min(0.57\%, 0.52\%) = 0.52\%$ , ενώ η αντίστοιχη επιτρεπόμενη θλιπτική τάση η οποία προκύπτει από την σχέση R-O (Εξ. 2.1) είναι  $\sigma_{all,c} = 490.6\text{MPa}$ . Οι ανωτέρω επιτρεπόμενες θλιπτικές τάσεις και παραμορφώσεις αυξάνονται για μεγαλύτερα πάχη του αγωγού

Στην αντίθετη περίπτωση, της εφελκυστικής καταπόνησης, η βασική μορφή αστοχίας χαλύβδινων αγωγών λεπτού τοιχώματος είναι η ανάπτυξη εφελκυστικών ρωγμών κατά μήκος της περιμέτρου. Για συνήθεις περιπτώσεις (κατασκευής, επίβλεψης, κλπ) συγκολλήσεων η επιτρεπόμενη εφελκυστική παραμόρφωση ορίζεται σε  $\varepsilon_{all,t} = 0.50\%$ , όπως προτείνεται στην διεθνή βιβλιογραφία [π.χ. Mohr, 2003, Denys, 2007, DNV-OS-F101, 2012, API 1104 (Chapter 9, Appendix A)]. Σύμφωνα με την σχέση τάσης-παραμόρφωσης R-O (Εξ. 2.1), η ανωτέρω τιμή της παραμόρφωσης αντιστοιχεί σε επιτρεπόμενη εφελκυστική τάση  $\sigma_{all,t} = 489.6\text{MPa}$ .

Διευκρινίζεται ότι η τιμή της  $\varepsilon_{all}$  που υιοθετήθηκε είναι σαφώς μικρότερη από την οριακή εφελκυστική παραμόρφωση του χάλυβα του αγωγού ( $\varepsilon_{ult} = 2-4\%$ ). Η συγκεκριμένη επιλογή έγινε σκόπιμα, προκειμένου να εξασφαλισθεί η επάρκεια των συγκολλήσεων του αγωγού όχι μόνον έναντι ατελειών της ίδιας της συγκόλλησης, αλλά και έναντι φαινομένων τοπικής συγκέντρωσης τάσεων και παραμορφώσεων [π.χ. λόγω της αλλοίωσης των ιδιοτήτων του χάλυβα στην ζώνη υπερ-θέρμανσης (heat affected zone) περί την συγκόλληση] τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε τοπική εφελκυστική αστοχία (Vitali et al., 2005).

# Κεφάλαιο 3

## Εντατική Ανάλυση Αγωγού σε Συνθήκες Λειτουργίας

---

### 3.1 Γενικά

Έχοντας ορίσει, στο Κεφάλαιο 2, τα χαρακτηριστικά του αγωγού, της επίχωσης και τις ιδιότητες του υλικού αυτής, καθώς και τις επιτρεπόμενες τάσεις και παραμορφώσεις που μπορούν να αναπτυχθούν στον αγωγό, επόμενο βήμα είναι η βελτιστοποίησή των αριθμητικών αναλύσεων για τον υπολογισμό των αρχικών τάσεων και παραμορφώσεων σε συνθήκες λειτουργίας. Για τον σκοπό αυτό, στο παρόν κεφάλαιο θα διερευνηθεί η επίδραση που έχει η αλλαγή ορισμένων χαρακτηριστικών στην προσομοίωση του αγωγού πάνω στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων. Η διαδικασία θα γίνει σε ξεχωριστά στάδια, έτσι ώστε να επιτευχθεί επαρκής βελτιστοποίηση αλλά και για λόγους πλήρους κατανόησης της επίδρασης που παράγει η όποια αλλαγή στην αριθμητική προσομοίωση. Έτσι, σε κάθε στάδιο θα κρατείται η βέλτιστη λύση και με αυτή θα πραγματοποιείται η επόμενη βελτιστοποίηση.

Ο πρώτος σημαντικός παράγοντας που θα διερευνηθεί είναι η επίδραση του μήκους του ευθύγραμμου σκέλους του αγωγού πάνω στην εντατική καταπόνηση της γωνίας. Πιο συγκεκριμένα, ο σκοπός είναι να προσδιορισθεί το ελάχιστο δυνατό μήκος του ευθύγραμμου αυτού σκέλους, το οποίο δεν αλλοιώνει τις τάσεις και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στη γωνία.

Σε δεύτερη φάση, με δεδομένο το ικανοποιητικό μήκος του ευθύγραμμου σκέλους, θα διερευνηθεί η επίδραση της διακριτοποίησης σε πεπερασμένα στοιχεία της γωνίας του αγωγού στις τιμές των τάσεων και παραμορφώσεων που θα αναπτυχθούν. Με τον τρόπο αυτό θα προσδιορισθεί η μέγιστη διάσταση που κάθε πεπερασμένου στοιχείου η οποία δεν αλλοιώνει τις τάσεις και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στη γωνία.

Τέλος, σε τρίτη φάση, και με δεδομένα πλέον το μήκος των ευθύγραμμων τμημάτων του αγωγού, καθώς και το βαθμό διακριτοποίησής του, θα διερευνηθεί η όποια επίδραση των συνοριακών συνθηκών, στα δύο άκρα του αγωγού, πάνω στη γωνία. Δηλαδή, θα υπολογιστεί

αν για διάφορες δεσμεύσεις των άκρων του αγωγού, αυτές θα προκαλέσουν την ανάπτυξη επιπρόσθετων τάσεων και παραμορφώσεων στη γωνία του αγωγού.

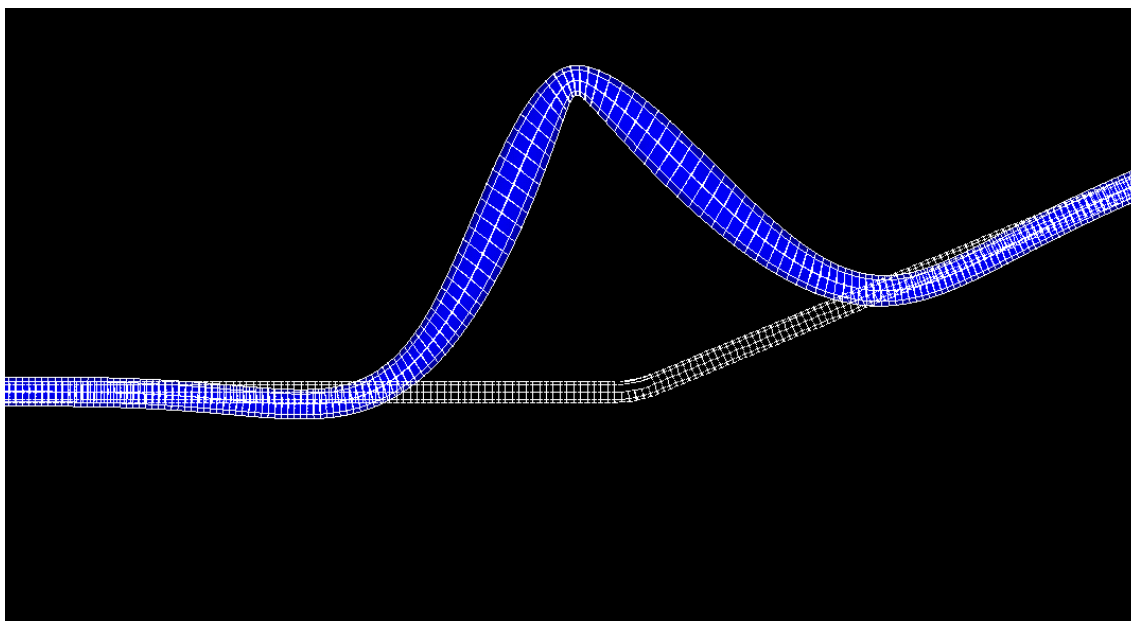
Η διερεύνηση των παραμέτρων των αριθμητικών αναλύσεων στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει για γωνία της καμπύλωσης του αγωγού ίση προς  $\theta=22.5^\circ$  ( $\theta=0^\circ$  αντιστοιχεί σε ευθύγραμμο αγωγό). Η συγκεκριμένη γωνία επελέγη με βάση την εμπειρία από προηγούμενες παρόμοιες αναλύσεις οι οποίες έχουν δείξει ότι αντιστοιχεί στην μέγιστη (περίπου) επίδραση της καμπύλωσης του αγωγού. Η βελτιστοποιημένη μεθοδολογία των αριθμητικών αναλύσεων θα χρησιμοποιηθεί στο επόμενο Κεφάλαιο 4 για την διενέργεια παραμετρικών αναλύσεων προκειμένου να εξετασθεί η επίδραση της γωνίας καμπύλωσης  $\theta$  και της αντίστοιχης ακτίνας στις τάσεις και παραμορφώσεις λειτουργίας του αγωγού.

### 3.2 Μεθοδολογία Αναλύσεων

Όπως προαναφέρθηκε, οι αρχικές τάσεις λειτουργίας σε ευθύγραμμα τμήματα και σε καμπύλες προσαρμογής γωνιών στην χάραξη του αγωγού, λόγω της μέγιστης πίεσης σχεδιασμού ( $p_0=7.5\text{MPa}$ ) και της μέγιστης θερμοκρασιακής μεταβολής  $\Delta T=\pm 35^\circ\text{C}$  (μεταξύ λειτουργίας και εγκατάστασης του αγωγού) υπολογίσθηκαν αριθμητικά, με την βοήθεια παραμετρικών αναλύσεων Πεπερασμένων Στοιχείων (Π.Σ.). Για να προσομοιωθεί παράλληλα η εντατική κατάσταση των ευθύγραμμων τμημάτων και των γωνιών, όλες οι παραμετρικές αναλύσεις Π.Σ. πραγματοποιήθηκαν για συνολικό μήκος αγωγού ίσο με 100-1000m περίπου, αποτελούμενο από δύο συμμετρικά ευθύγραμμα σκέλη συνδεδεμένα στο κέντρο με ένα κυκλικό τόξο ακτίνας  $R$  και γωνίας καμπύλωσης  $\theta=22.5^\circ$  ( $\theta=0^\circ$  αντιστοιχεί σε ευθύγραμμο αγωγό).

Σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές κατασκευής υπόγειων αγωγών υψηλής πίεσης, η προσαρμογή των γωνιών της χάραξης θα γίνει με τους ακόλουθους δύο τύπους καμπυλώσεων που χρησιμοποιούνται στην πράξη για αγωγούς με δυνατότητα εσωτερικού ελέγχου (rigable):

- Επιτόπου καμπυλώσεις (field bends), με ελάχιστη ακτίνα  $R = 40D$ .
- Θερμές καμπυλώσεις (hot bends), με ελάχιστη ακτίνα  $R = 5D$ .



**Σχήμα 3.1:** Παραμετρική ανάλυση Π.Σ. για τις αρχικές συνθήκες λειτουργίας του αγωγού – Επιτόπου Καμπύλωση (αρχική και παραμορφωμένη γεωμετρία), για  $p_o=7.5\text{MPa}$  και  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$ .

Η αριθμητική μεθοδολογία των παραμετρικών αναλύσεων Π.Σ. περιγράφεται λεπτομερώς στο Παράρτημα Α. Συνοπτικά, ο αγωγός προσομοιάζεται με 3-διάστατα στοιχεία σωλήνα με σταθερό μήκος σε ολόκληρο το μήκος του αγωγού. Το έδαφος που περιβάλλει τον αγωγό προσομοιώνεται με δύο (2) ανά κόμβο ελαστοπλαστικά ελατήρια: ένα παράλληλα στον άξονα του αγωγού και ένα στην εγκάρσια οριζόντια κατεύθυνση. Σε όλες τις αναλύσεις δεσμεύτηκε η εκτός επιπέδου (κατακόρυφη) μετατόπιση των κόμβων. Επιπλέον, για λόγους ευστάθειας των αναλύσεων, δεσμεύτηκαν μερικοί ή όλοι οι βαθμοί ελευθερίας (μετατόπισης και στροφής) στον αρχικό και τον τελικό κόμβο.

Διευκρινίζεται ότι τα αξονικά και τα εγκάρσια οριζόντια εδαφικά ελατήρια ορίζονται τόσο για εφελκυσμό όσο και για θλίψη.

**Πίνακας 3.1:** Σύνοψη χαρακτηριστικών εδαφικών ελατηρίων

<b>Αξονικά Ελατήρια</b>	Οριακή Αντίσταση $t_u$ (kN/m)	38.0
	Μετατόπιση Διαρροής $x_u$ (mm)	3.0
<b>Εγκάρσια Οριζόντια Ελατήρια</b>	Οριακή Αντίσταση $p_{u,o}$ (kN/m)	175.0
	Μετατόπιση Διαρροής $\gamma_{u,o}$ (mm)	18.4

Τα χαρακτηριστικά (οριακή αντίσταση και μετατόπιση διαρροής) των εδαφικών ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκαν στις παραμετρικές αναλύσεις Π.Σ. συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1, ενώ οι



αναλυτικές μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό τους παρουσιάζονται συνοπτικά στο Παράρτημα Α (ενότητα Α.3). Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι φορτίσεις λόγω λειτουργίας του αγωγού προκαλούν μικρές σχετικά εγκάρσιες μετατοπίσεις, θεωρήθηκε ότι οι διαστάσεις των τάφρων εγκατάστασης του αγωγού είναι επαρκείς έτσι ώστε οι ιδιότητες του περιβάλλοντος στην τάφρο φυσικού εδάφους να μην επιδρούν στην ανάπτυξη των εν λόγω μετατοπίσεων. Κατ' επέκταση, τα χαρακτηριστικά των εδαφικών ελατηρίων στον Πίνακα 3.1 δεν υπολογίσθηκαν για τις ιδιότητες του φυσικού εδάφους, αλλά για τις ιδιότητες του υλικού επίχωσης των τάφρων, που παρουσιάσθηκαν προηγουμένως, στο Κεφάλαιο 2 (ενότητα 2.1).

Τέλος διευκρινίζεται ότι, όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 (ενότητα 2.2), σύμφωνα με τον κανονισμό Eurocode 3 for Steel Structures (Part 4-3 for pipelines), όλες οι παραμετρικές αναλύσεις θα πρέπει να λάβουν υπόψη θερμοκρασιακή μεταβολή (με αναφορά στην θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την εγκατάσταση του αγωγού) ίση προς  $\Delta T = \pm 35^{\circ}\text{C}$ . Για θερμοκρασία εγκατάστασης ίση προς  $15^{\circ}\text{C}$ , συνδυασμός των ανωτέρω παραδοχών οδηγεί έμμεσα σε θερμοκρασίας λειτουργίας του αγωγού από  $-20^{\circ}\text{C}$  έως  $+50^{\circ}\text{C}$ , οι οποίες είναι συνήθεις για αγωγούς μεταφοράς υδρογονανθράκων υπό υψηλή πίεση.

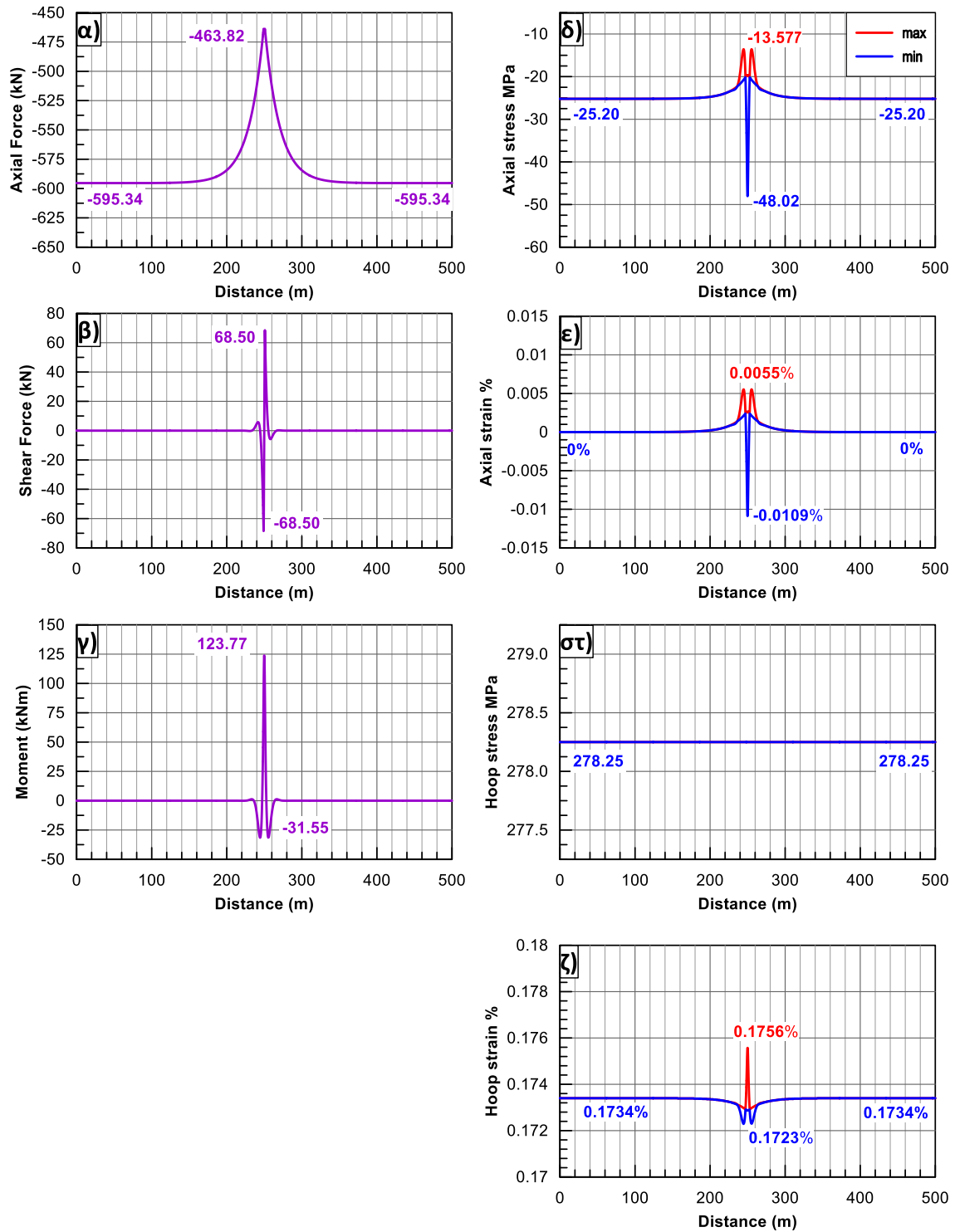
### 3.3 Τυπικά αποτελέσματα Αναλύσεων

Τα Σχήματα 3.2 και 3.3 παρουσιάζουν τυπικά αποτελέσματα από τις αριθμητικές αναλύσεις που έγιναν για γωνία καμπύλωσης  $\theta = 22.5^{\circ}$  και θερμοκρασιακή μεταβολή  $\Delta T = +35^{\circ}\text{C}$  και  $\Delta T = -35^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η μεταβολή κατά μήκος του αγωγού των εξής εντατικών μεγεθών: α) Αξονικής Δύναμης, β) Τέμνουσας Δύναμης, γ) Ροπής, δ) Αξονικής Τάσης, ε) Αξονικής Παραμόρφωσης, στ) Περιμετρικής Τάσης, ζ) Περιμετρικής Παραμόρφωσης.

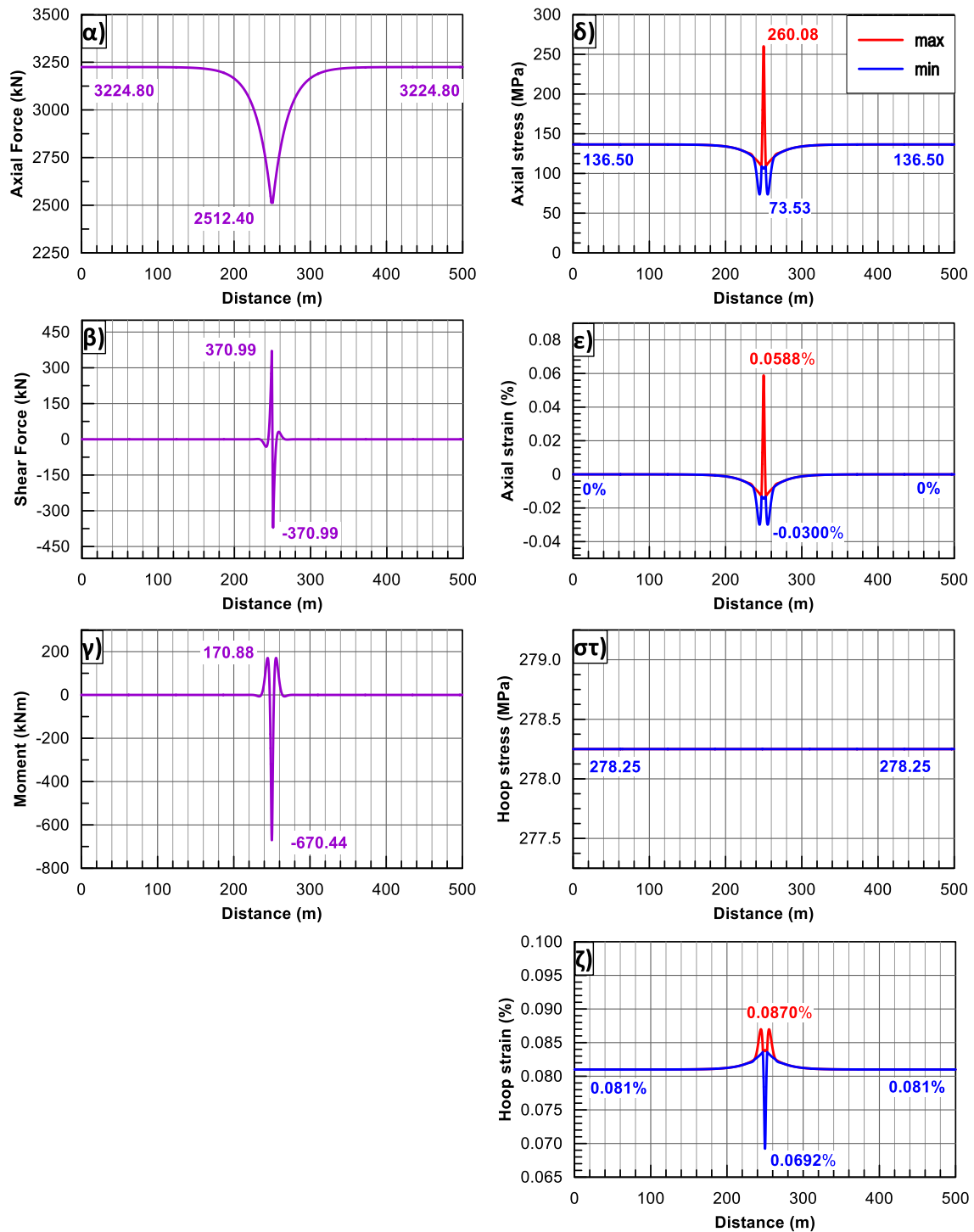
**Ευθύγραμμα Τμήματα Αγωγού.-** Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων Π.Σ. στο ανωτέρω Σχήμα, τα ευθύγραμμα τμήματα εκατέρωθεν της καμπύλης προσαρμογής υπόκεινται σε θλιπτικές αξονικές τάσεις και δυνάμεις για θετική θερμοκρασιακή μεταβολή. Οι αξονικές παραμορφώσεις, οι τέμνουσες δυνάμεις και οι καμπτικές ροπές είναι μηδενικές. Οι μέγιστες και ελάχιστες εφελκυστικές τάσεις ( $\sigma_{o,Str}$ ) και αξονικές δυνάμεις ( $S_{o,Str}$ ) αναπτύσσονται σε κάποια απόσταση από τα όρια της καμπύλωσης και παραμένουν πρακτικά σταθερές με το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος, με μικρή επίδραση της γεωμετρίας του καμπύλου τμήματος. Είναι αξιοσημείωτο ότι, λόγω της υψηλής εσωτερικής πίεσης, αναπτύσσονται πολύ μικρές θλιπτικές δυνάμεις και τάσεις, ακόμη και για τη μεγάλη επιβαλλόμενη θετική θερμοκρασιακή μεταβολή η οποία τείνει να επιμηκύνει τον αγωγό.

**Καμπύλες Προσαρμογής.-** Επικεντρώνοντας ακολούθως στην ευρύτερη περιοχή των καμπυλώσεων, παρατηρείται ότι η αξονική δύναμη μειώνεται σταδιακά από τα ευθύγραμμα

σκέλη προς την καμπύλη προσαρμογής και παίρνει την ελάχιστη (απόλυτη) τιμή στο κέντρο συμμετρίας της καμπύλωσης. Η παρατηρούμενη μείωση οφείλεται κυρίως στην ενεργοποίηση των αξονικών εδαφικών ελατηρίων (τριβής). Παράλληλα όμως, αναπτύσσονται τέμνουσες δυνάμεις και καμπτικές ροπές κατά μήκος της καμπύλωσης. Οι τέμνουσες δυνάμεις είναι αντισυμμετρικές και μηδενίζονται στο κέντρο της καμπύλωσης, ενώ οι καμπτικές ροπές είναι συμμετρικές με ένα καλά ορισμένο αρνητικό μέγιστο (εφελκυσμός της εσωτερικής ίνας - intrados) στο κέντρο της καμπύλωσης και δύο μικρότερα θετικά μέγιστα (εφελκυσμός της εξωτερικής ίνας - extrados) στην αρχή και στο τέλος της καμπύλωσης.



**Σχήμα 3.2:** Τυπικά αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων κατά μήκος του αγωγού: α) Αξονικής Δύναμης, β) Τέμνουσας Δύναμης, γ) Ροπής, δ) Αξονικής Τάσης, ε) Αξονικής Παραμόρφωσης, στ) Περιμετρικής Τάσης, ζ) Περιμετρικής Παραμόρφωσης ( $\theta=22.5^\circ$  και  $\Delta T=+35^\circ\text{C}$ ).

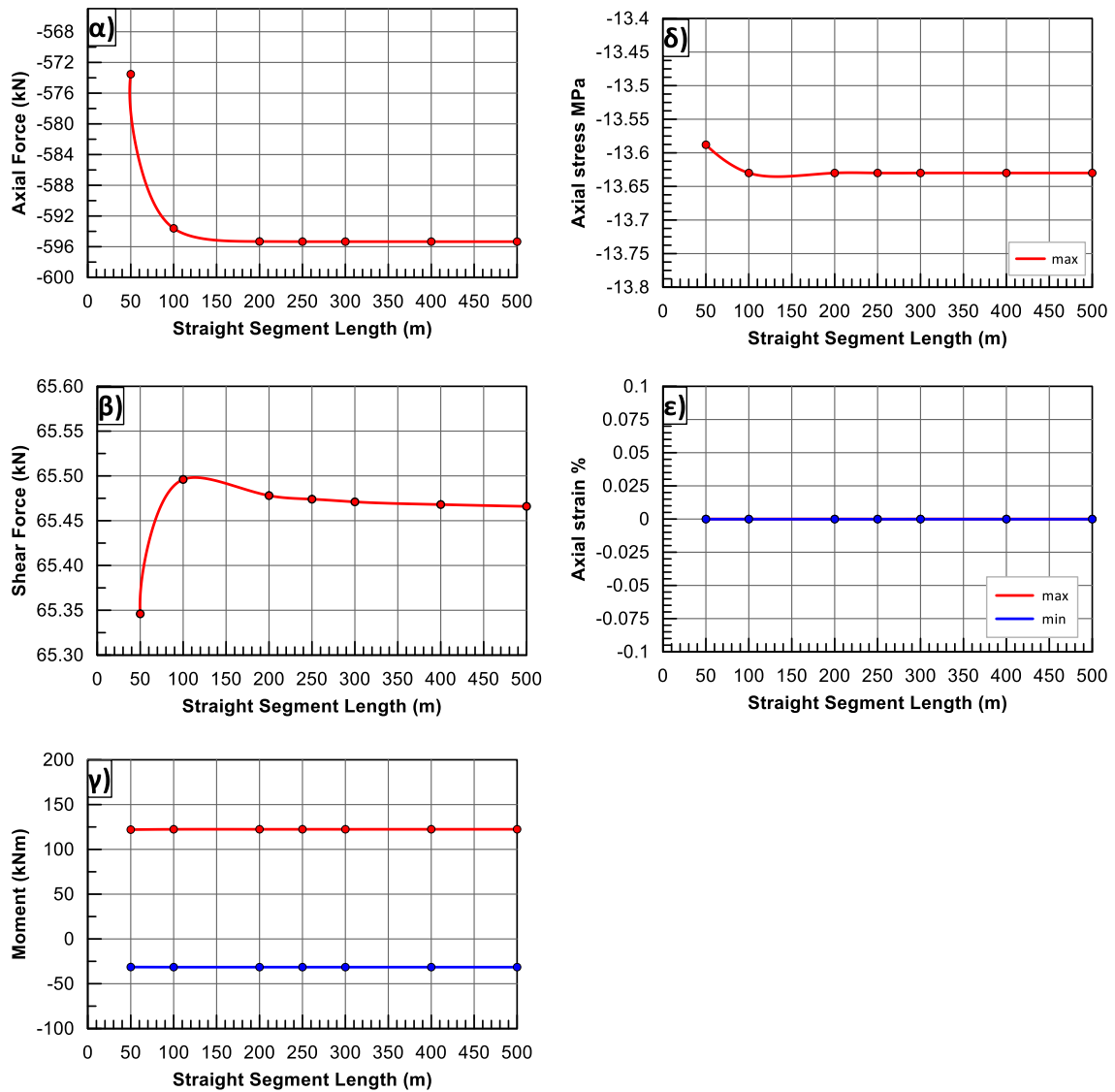


**Σχήμα 3.3:** Τυπικά αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων κατά μήκος του αγωγού: α) Αξονικής Δύναμης, β) Τέμνουσας Δύναμης, γ) Ροπής, δ) Αξονικής Τάσης, ε) Αξονικής Παραμόρφωσης, στ) Περιμετρικής Τάσης, ζ) Περιμετρικής Παραμόρφωσης ( $\theta=22.5^\circ$  και  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$ ).

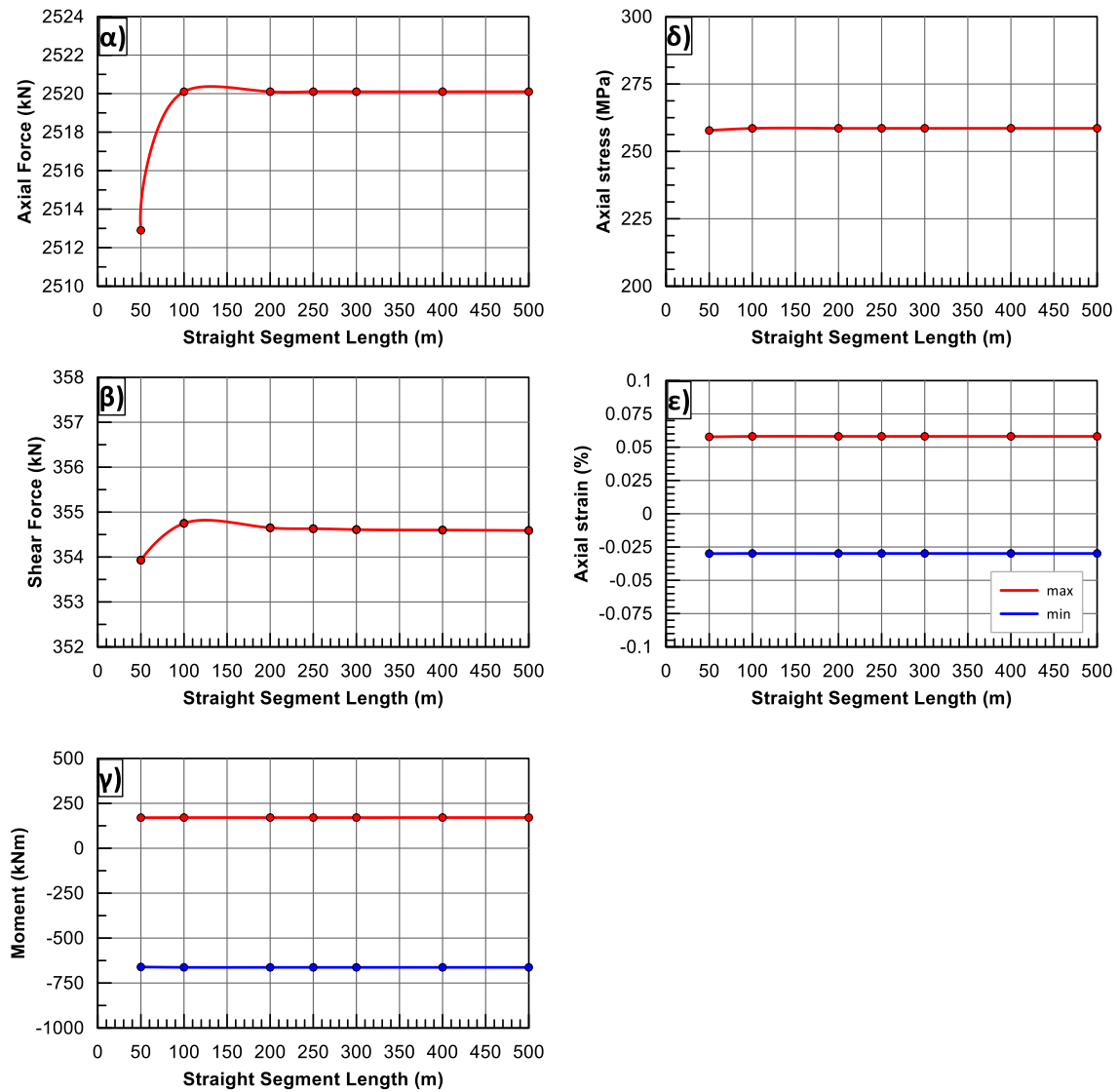
### 3.4 Επίδραση Μήκους Ευθύγραμμου Σκέλους

Το πρώτο βήμα στη διαδικασία βελτιστοποίησης των αριθμητικών αναλύσεων του αγωγού σε συνθήκες λειτουργίας είναι η εύρεση του ελάχιστου μήκους του ευθύγραμμου τμήματος του αγωγού, έτσι ώστε αυτό να μην επιδρά καθόλου στην ένταση που αναπτύσσεται στο καμπύλο τμήμα του. Είναι προφανές, ότι με την τοποθέτηση εξ' αρχής ενός πολύ μεγάλου, σε μήκος, ευθύγραμμου τμήματος θα ήταν δυνατή η αποφυγή της ανάπτυξης επιπρόσθετων εντατικών μεγεθών στη γωνία, αλλά, παράλληλα, θα ήταν και αντισυμβατικό. Συνεπώς, εξετάζοντας τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται σε αυτήν, για διάφορα μήκη του ευθύγραμμου τμήματος, μπορεί να υπολογιστεί ένα βέλτιστο ελάχιστο μήκος. Για τον σκοπό αυτό, για μήκη ευθύγραμμου τμήματος από 50m έως και 500m, υπολογίστηκαν οι μέγιστες τιμές των μεγεθών των αξονικών και τεμνουσών δυνάμεων, των ροπών, καθώς και των τάσεων και των παραμορφώσεων στη γωνία του αγωγού.

Τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων, όσον αφορά τις μέγιστες εσωτερικές δυνάμεις και τάσεις /παραμορφώσεις στο καμπύλο τμήμα του αγωγού, παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.4 και 3.5, για  $\Delta T=+35^{\circ}\text{C}$  και  $\Delta T=-35^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα, συναρτήσει του μήκους του ευθύγραμμου τμήματος που θεωρήθηκε. Παρατηρείται ότι η αύξηση του ευθύγραμμου μήκους προκαλεί προσαύξηση της αξονικής και τέμνουσας δύναμης, ενώ δεν επιδρά καθόλου στα υπόλοιπα μεγέθη. Επίσης, παρατηρείται ότι η προσαύξηση των δύο αυτών μεγεθών γίνεται μέχρι ένα μήκος ευθυγραμμίας περί τα 200m πέρα από το οποίο δεν υπάρχει καμία επίδραση. Έτσι, επιλέγεται συντηρητικά ως ελάχιστο μήκος ευθύγραμμου σκέλους του αγωγού εκείνο των 250m, έτσι ώστε να είναι εξασφαλισμένη η μη επίδραση του μήκους.



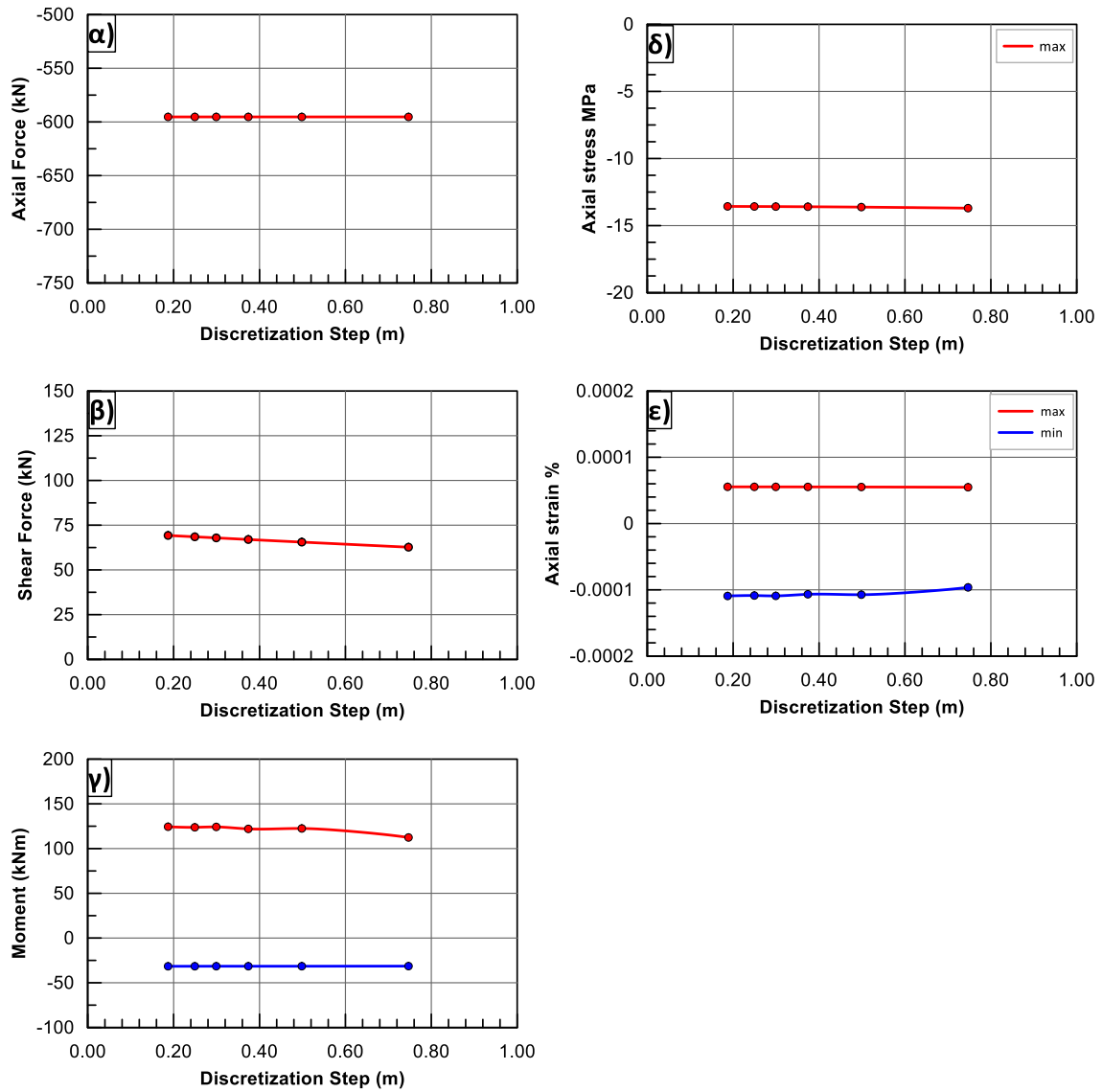
**Σχήμα 3.4:** Αποτελέσματα της επίδρασης του ευθύγραμμου μήκους στα μέγιστα εντατικά μεγέθη της καμπύλωσης: α) Αξονικής Δύναμης, β) Τέμνουσας Δύναμης, γ) Ροπής, δ) Αξονικής Τάσης, ε) Αξονικής Παραμόρφωσης ( $\theta=22.5^\circ$  και  $\Delta T=+35^\circ\text{C}$ ).



**Σχήμα 3.5:** Αποτελέσματα της επίδρασης του ευθύγραμμου μήκους στα μέγιστα εντατικά μεγέθη της καμπύλωσης: α) Αξονικής Δύναμης, β) Τέμνουσας Δύναμης, γ) Ροπής, δ) Αξονικής Τάσης, ε) Αξονικής Παραμόρφωσης ( $\theta=22.5^\circ$  και  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$ ).

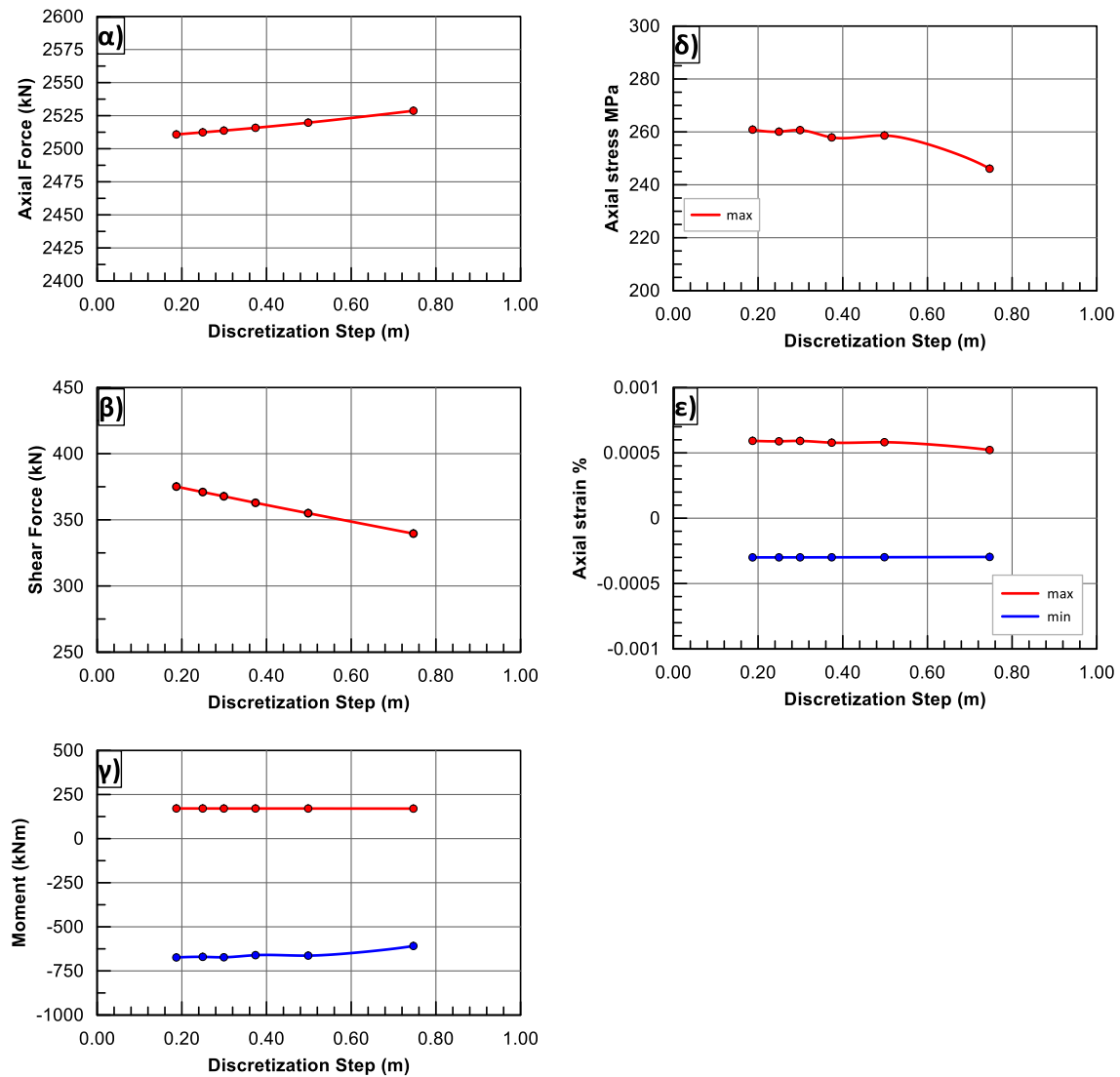
### 3.5 Επίδραση Διακριτοποίησης

Μετά την εύρεση του βέλτιστου μήκους ευθύγραμμου τμήματος, έγινε η διερεύνηση της βέλτιστης διακριτοποίησης του αγωγού με τη παραδοχή ότι το ευθύγραμμο σκέλος έχει μήκος 250m. Για τη διαδικασία αυτή, έγινε πρώτα η διακριτοποίηση της γωνίας σε 2 έως 8 καμπύλα στοιχεία γωνίας, με μήκος διακριτοποίησης από 0.747m έως 0.187m αντίστοιχα. Για τη διακριτοποίηση των ευθύγραμμων τμημάτων, χρησιμοποιήθηκαν τα μήκη διακριτοποίησης της γωνίας έτσι ώστε να υπάρχει συμβατότητα ως προς το συνολικό μήκος του αγωγού. Στα Σχήματα 3.6 και 3.7 φαίνονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης για  $\Delta T=+35^\circ\text{C}$  και  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$ , για γωνία καμπύλωσης  $\theta=22.5^\circ$ .



**Σχήμα 3.6:** Επίδραση του μήκους διακριτοποίησης στα μέγιστα εντατικά μεγέθη του καμπύλου τμήματος του αγωγού: α) Αξονικής Δύναμης, β) Τέμνουσας Δύναμης, γ) Ροπής, δ) Αξονικής Τάσης, ε) Αξονικής Παραμόρφωσης ( $\theta=22.5^\circ$  και  $\Delta T=+35^\circ\text{C}$ ).





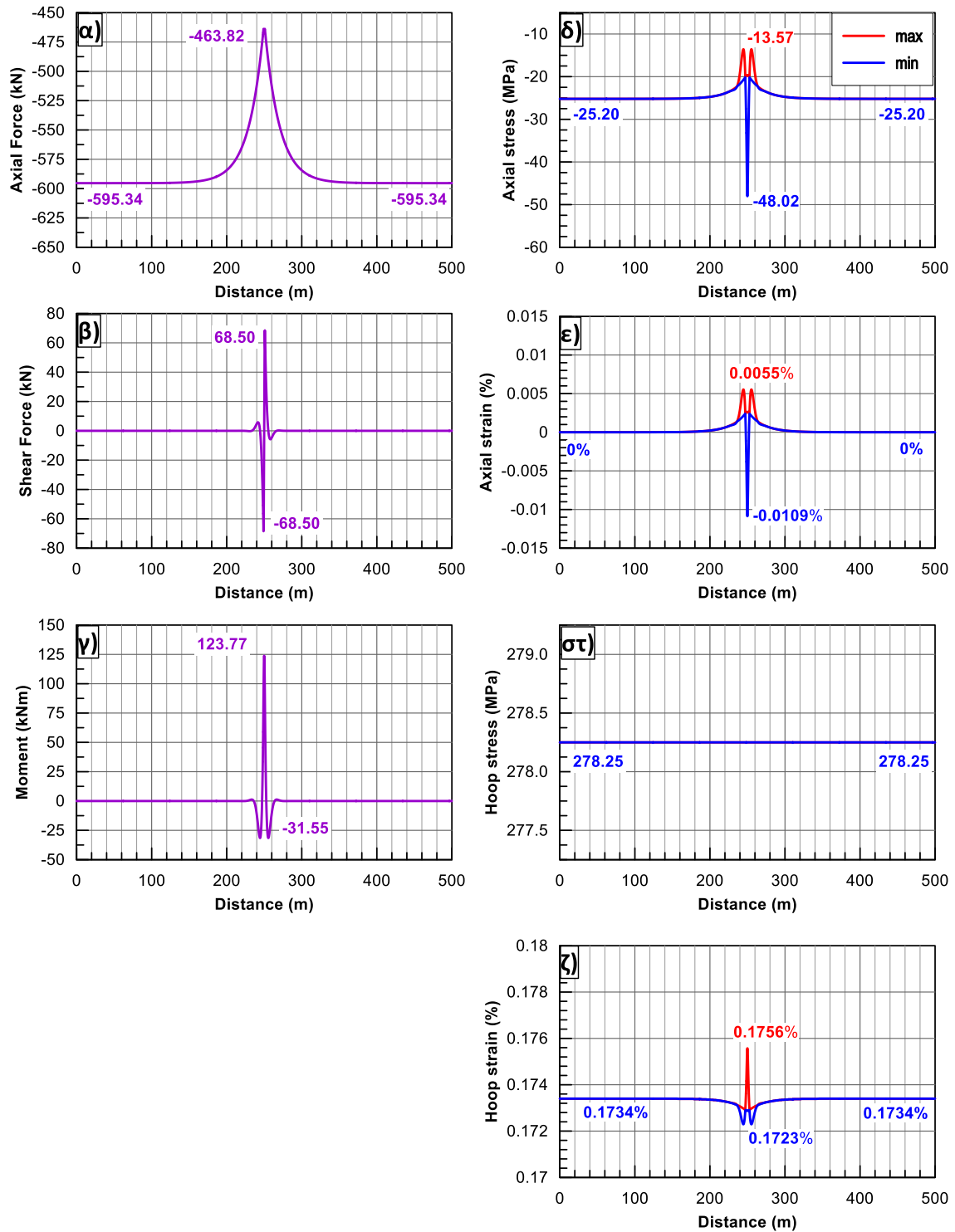
**Σχήμα 3.7:** Επίδραση του μήκους διακριτοποίησης στα μέγιστα εντατικά μεγέθη του καμπύλου τμήματος του αγωγού: α) Αξονικής Δύναμης, β) Τέμνουσας Δύναμης, γ) Ροπής, δ) Αξονικής Τάσης, ε) Αξονικής Παραμόρφωσης ( $\theta=22.5^\circ$  και  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$ ).

### 3.5 Επίδραση Συνόρων

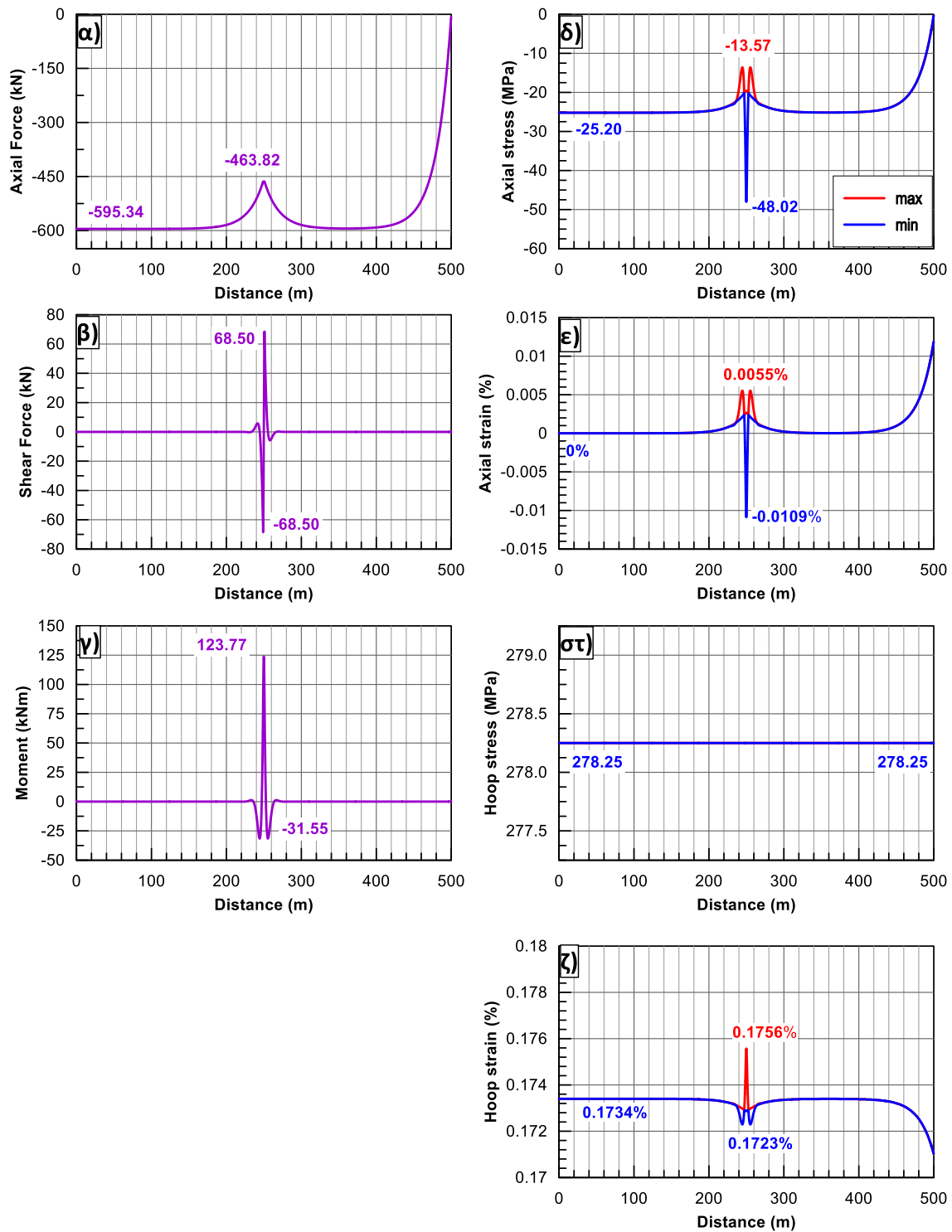
Στο τρίτο στάδιο βελτιστοποίησης της εντατικής ανάλυσης του αγωγού υπό συνθήκες λειτουργίας έγινε διερεύνηση της επίδρασης των συνοριακών συνθηκών που επιβάλλονται στα άκρα του αγωγού στη εντατική καταπόνηση του καμπυλωμένου τμήματος. Για την ανάλυση αυτή, χρησιμοποιήθηκαν το μήκος του ευθύγραμμου σκέλους, όπως αυτό καθορίστηκε από την ανάλυση της ενότητας 3.3, δηλαδή ίσο με 250m, καθώς και με ένα μήκος διακριτοποίησης των Πεπερασμένων Στοιχείων ίσο με 0.249m. Σε όλες τις έως τώρα αναλύσεις ο αγωγός ήταν δεσμευμένος για την εκτός επιπέδου κατακόρυφη μετακίνηση, ενώ έφερε πακτώσεις στα δύο του άκρα. Για τον έλεγχο της επίδρασης των συνόρων, όμως, απελευθερώθηκαν η αξονική και

η εγκάρσια μετατόπιση καθώς και η στροφή περί τον κατακόρυφο άξονα του ενός από τα δύο άκρα, ενώ η εκτός επιπέδου μετατόπιση παρέμεινε δεσμευμένη.

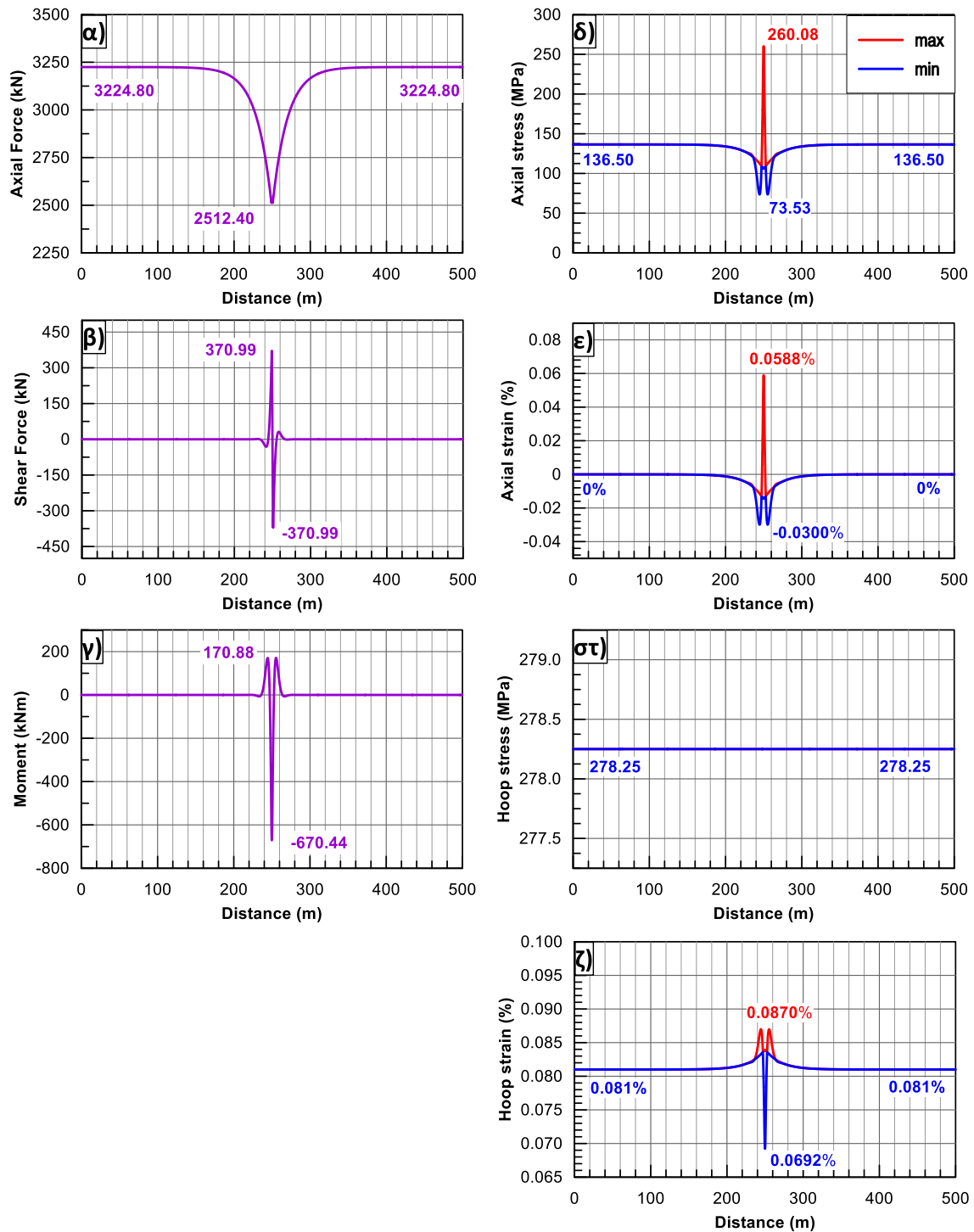
Τα λεπτομερή αποτελέσματα των αναλύσεων με πατωμένο και με απελευθερωμένο το ένα άκρο του αγωγού περιγράφονται προς σύγκριση στα Σχήματα 3.8 και 3.9 για  $\Delta T = +35^{\circ}\text{C}$  και στα Σχήματα 3.10 και 3.11 για  $\Delta T = -35^{\circ}\text{C}$ . Από την σύγκριση προκύπτει ότι η εν λόγω απελευθέρωση βαθμών ελευθερίας του ενός άκρου του αγωγού επιδρά μόνο τοπικά, στην γειτονική προς το άκρο περιοχή του ευθύγραμμου τμήματος, ενώ δεν είχε καμία επίδραση στα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στο καμπυλωμένο Τμήμα.



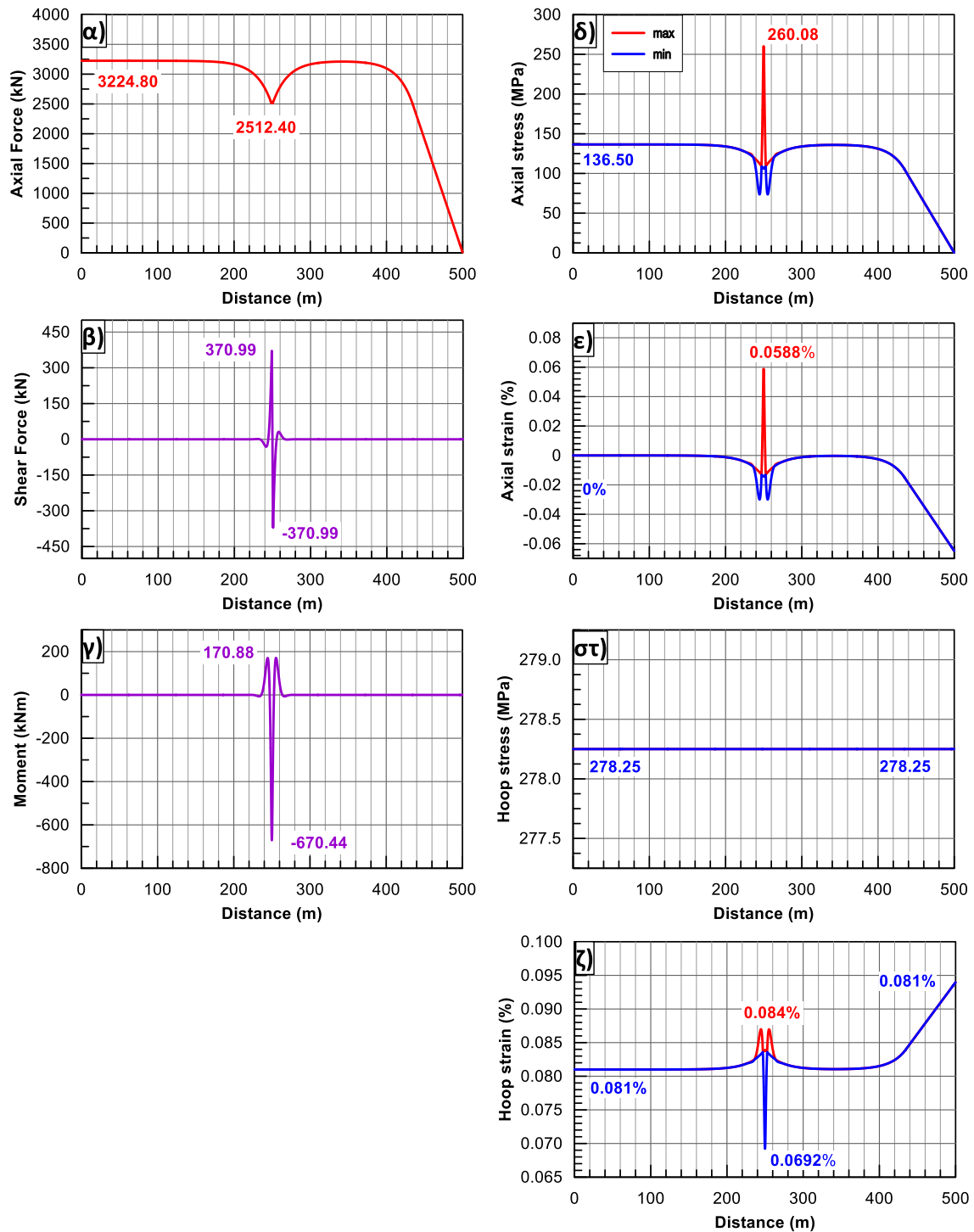
**Σχήμα 3.8:** Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων για πακτωμένο άκρο αγωγού: α) Αξονική Δύναμη, β) Τέμνουσα Δύναμη, γ) Ροπή, δ) Αξονική Τάση, ε) Αξονική Παραμόρφωση, στ) Περιμετρική Τάση, ζ) Περιμετρική Παραμόρφωση ( $\theta = 22.5^\circ$  και  $\Delta T = +35^\circ\text{C}$ ).



**Σχήμα 3.9:** Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων για ελεύθερο άκρο αγωγού: α) Αξονική Δύναμη, β) Τέμνουσα Δύναμη, γ) Ροπή, δ) Αξονική Τάση, ε) Αξονική Παραμόρφωση, στ) Περιμετρική Τάση, ζ) Περιμετρική Παραμόρφωση ( $\theta = 22.5^\circ$  και  $\Delta T = +35^\circ\text{C}$ ).



**Σχήμα 3.10:** Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων για πακτωμένο άκρο αγωγού: α) Αξονική Δύναμη, β) Τέμνουσα Δύναμη, γ) Ροπή, δ) Αξονική Τάση, ε) Αξονική Παραμόρφωση, στ) Περιμετρική Τάση, ζ) Περιμετρική Παραμόρφωση ( $\theta = 22.5^\circ$  και  $\Delta T = -35^\circ\text{C}$ ).



**Σχήμα 3.11:** Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων για ελεύθερο άκρο αγωγού: α) Αξονική Δύναμη, β) Τέμνουσα Δύναμη, γ) Ροπή, δ) Αξονική Τάση, ε) Αξονική Παραμόρφωση, στ) Περιμετρική Τάση, ζ) Περιμετρική Παραμόρφωση ( $\theta = 22.5^\circ$  και  $\Delta T = -35^\circ\text{C}$ ).

### 3.6 Συμπεράσματα

Αρχικά, ένα σημαντικό κομμάτι στη βελτιστοποίηση των αναλύσεων, κυρίως σε επίπεδο επεξεργασίας των αποτελεσμάτων των αναλύσεων και λιγότερο σε επίπεδο της ταχείας επίλυσης του προβλήματος από το πρόγραμμα, ήταν η εύρεση του βέλτιστου μήκους των ευθύγραμμων τμημάτων του αγωγού. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.4 και 3.5, η επίδραση του ευθύγραμμου σκέλους του αγωγού σταματάει να επηρεάζει τις τιμές των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στη γωνία όταν αυτό πάρει τιμές μεγαλύτερες των 200m. Συντηρητικά, επιλέχθηκε μια τιμή ευθύγραμμου σκέλους περί τα 250m, ώστε να εξασφαλιστεί το αδιάβλητο των αναλύσεων σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό, κάνοντας παράλληλα την απαραίτητη βελτιστοποίηση.

Με βάση την παραμετρική ανάλυση που έγινε για τον καθορισμό ενός βέλτιστου μήκους, για το συγκεκριμένο πρόβλημα, του ευθύγραμμου σκέλους του αγωγού, το επόμενο βήμα ήταν ο καθορισμός ενός αντίστοιχα βέλτιστου μήκους διακριτοποίησης του αγωγού σε Πεπερασμένα Στοιχεία. Σκοπός αυτής της διερεύνησης ήταν πάλι η εύρεση του μήκους του στοιχείου που δεν προκαλεί αλλοίωση των εντατικών μεγεθών της γωνίας. Πράγμα πιθανό, για αρκετά μεγάλα μήκη διακριτοποίησης, περί το 1m. Συνεπώς, η διακριτοποίηση έγινε με βήμα τα 0.25m έτσι ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος αλλοίωσης των εντατικών μεγεθών της γωνίας και παράλληλα να υπάρχει και αρκετά μεγάλη ακρίβεια στα αποτελέσματα.

Περεταίρω διερεύνηση υπήρξε για την επίδραση των συνόρων του αγωγού και πως αυτά επιδρούν και επηρεάζουν τις τιμές των εντατικών μεγεθών της γωνίας. Στα Σχήματα 3.8 και 3.11 είναι ξεκάθαρο το γεγονός ότι η ταυτόχρονη απελευθέρωση τόσο της οριζόντιας και εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης, όσο και της στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα στο ένα άκρο του αγωγού δεν προκαλεί καμία σημαντική αυξομείωση στις τιμές των εντατικών μεγεθών στην περιοχή της γωνίας, παρά μόνο σε ένα περιορισμένο μήκος (δηλ. περί τα 100D) του ευθύγραμμου τμήματος πλησίον του ελεύθερου άκρου.

# Κεφάλαιο 4

## Επίδραση Καμπύλωσης στην Εντατική Κατάσταση του Αγωγού

---

### 4.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο 2 ορίστηκαν τα χαρακτηριστικά του αγωγού, της επίχωσης και οι ιδιότητες του υλικού αυτής, καθώς και οι επιτρεπόμενες τάσεις και παραμορφώσεις που μπορούν να αναπτυχθούν στον αγωγό, ενώ στο Κεφάλαιο 3 έγινε η βελτιστοποίησή των αριθμητικών αναλύσεων για τον υπολογισμό των αρχικών τάσεων και παραμορφώσεων σε συνθήκες λειτουργίας και παράλληλα διερευνήθηκε η επίδραση που έχει η αλλαγή ορισμένων χαρακτηριστικών στην προσομοίωση του αγωγού πάνω στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων. Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η επίδραση της καμπύλωσης στην εντατική κατάσταση του αγωγού. Η διαδικασία θα γίνει σε ξεχωριστά στάδια, έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης κατανόηση του τρόπου που αυτοί επιδρούν στην εντατική κατάσταση του αγωγού και στην όποια αλλαγή της αριθμητικής προσομοίωσης.

Ο πρώτος σημαντικός παράγοντας στην επίδραση της εντατικής κατάστασης του αγωγού είναι η ίδια η γωνία καμπύλωσης. Πιο συγκεκριμένα, ο σκοπός είναι να προσδιοριστεί για ποια γωνία ή ποιες γωνίες καμπύλωσης αναπτύσσονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τάσεις στη γωνία.

Ο δεύτερος παράγοντας που θα διερευνηθεί είναι η θερμοκρασιακή μεταβολή από τη στιγμή της εγκατάστασης του αγωγού μέχρι την λειτουργία του, που σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα ορίζεται σε  $\Delta T = \pm 35$  °C.

Σαν  τρίτος παράγοντας, διερευνάται η επίδραση του λόγου της διαμέτρου προς το πάχος του αγωγού και πώς αυτός επιδρά στις τάσεις που αναπτύσσονται στη γωνία. Η διαδικασία θα εκτελεστεί και για τις τρεις θερμοκρασιακές μεταβολές ( $\Delta T = 0$  &  $\pm 35$  °C) έτσι ώστε να υπάρξει καθολική κατανόηση της επίδρασης.

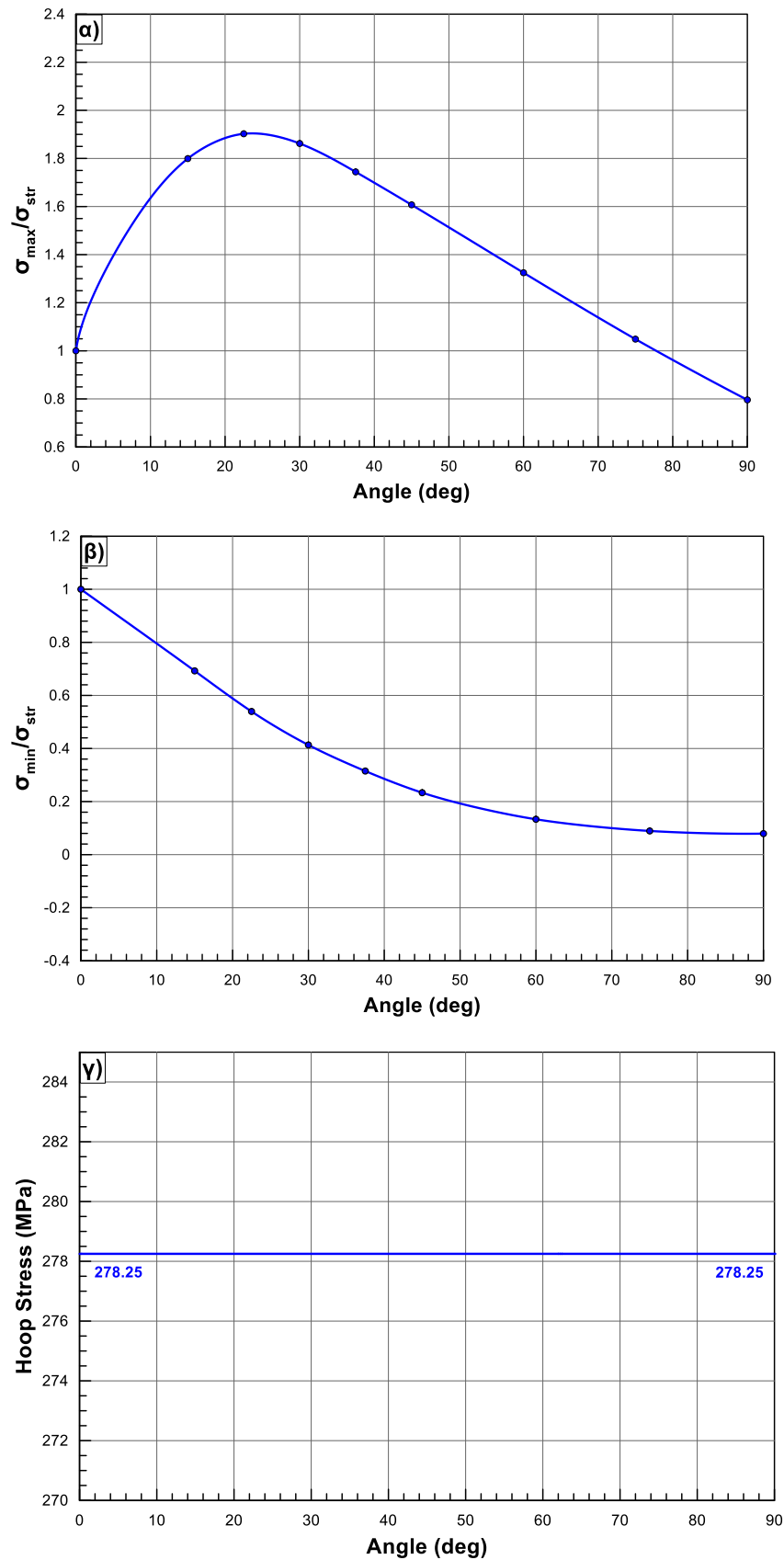
Ο τέταρτος παράγοντας είναι η επίδραση της εσωτερικής πίεσης για τις τρεις θερμοκρασίες λειτουργίας, έτσι ώστε να διερευνηθεί η επίδρασή της στις τάσεις που αναπτύσσονται στην καμπύλη.



Ενώ, ο πέμπτος και τελευταίος παράγοντας που θα διερευνηθεί είναι η επίδραση του πάχους επικάλυψης του αγωγού, λαμβάνοντας υπόψη τις θερμοκρασιακές μεταβολές, με σκοπό την συσχέτιση του πάχους επικάλυψης και των τάσεων που αναπτύσσονται στη γωνία του αγωγού.

#### **4.2 Επίδραση γωνίας καμπύλωσης**

Για το σκοπό αυτό και για σταθερές τιμές εξωτερικής θερμοκρασίας, εσωτερικής πίεσης, λόγου διαμέτρου προς πάχους αγωγού, καθώς και πάχους επικάλυψης διερευνήθηκε και παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1 καθώς και στον Πίνακα 4.1: ο λόγος των α) μέγιστων και β) ελάχιστων τάσεων που αναπτύσσονται στη γωνία του αγωγού ως προς την τάση στο ευθύγραμμο σκέλος του. Παρατηρείται ότι ο λόγος των μέγιστων τάσεων παίρνει τη μέγιστη τιμή 1.90 για γωνία καμπύλωσης περίπου ίση με  $22.5^\circ$ , ενώ για μεγαλύτερες γωνίες, φθίνει ώσπου οι μέγιστες τάσεις να απομειωθούν και να γίνουν κατά 20% μικρότερες από αυτές για το ευθύγραμμο σκέλος. Αντίθετα, όσον αφορά τις ελάχιστες τάσεις, παρατηρείται ότι αυτές φθίνουν σε σχέση με την τάση ενός ευθύγραμμου αγωγού, έως ότου αυτές να γίνουν περίπου 10% αυτών του ευθύγραμμου για γωνίες μεγαλύτερες των 75 μοιρών. Σε ότι αφορά την επίδραση των hoop stresses, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, αυτές δεν επηρεάζονται καθόλου από την επίδραση της γωνίας καμπύλωσης, αλλά ούτε και από οποιοδήποτε άλλο παράγοντα και συνεπώς δεν θα μελετηθούν περαιτέρω.



**Σχήμα 4.1:** Αποτελέσματα της επίδρασης της θερμοκρασιακής μεταβολής στις α) μεγιστες και β) ελαχιστες τιμες των τασεων κανονικοποιημένες ως προς τις τιμες στο ευθύγραμμο μελος κατά μήκος του αγωγού και γ) της επίδρασης στα hoop stresses ( $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=0^\circ\text{C}$ ).

**Πίνακας 4.1:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=0^\circ\text{C}$ 

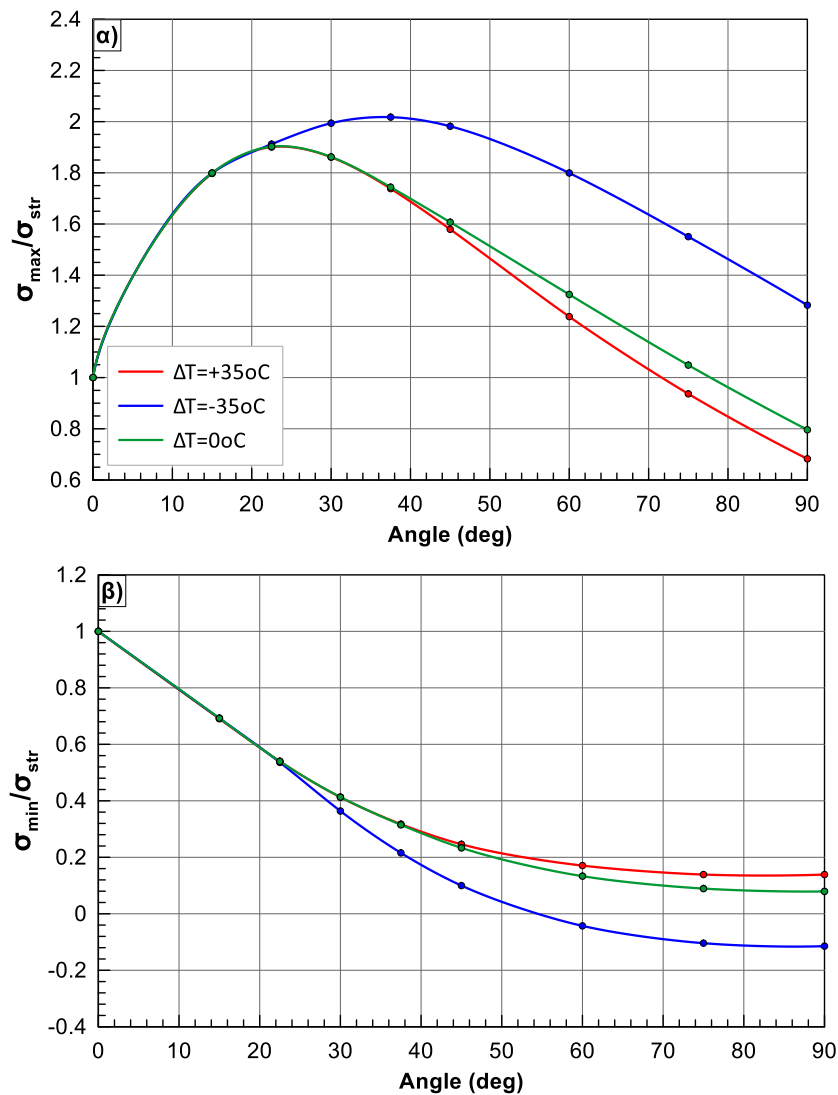
$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	83.47	83.47	83.47	1.00	1.00
15	150.18	57.80	83.47	1.80	0.69
22.5	158.80	45.03	83.47	1.90	0.54
30	155.43	34.49	83.47	1.86	0.41
37.5	145.57	26.29	83.47	1.74	0.31
45	134.14	19.48	83.47	1.61	0.23
60	110.57	11.12	83.47	1.32	0.13
75	87.53	7.45	83.47	1.05	0.09
90	66.44	6.61	83.47	0.80	0.08

### 4.3 Επίδραση θερμοκρασιακής μεταβολής

Όπως προαναφέρθηκε, η θερμοκρασία κατά την τοποθέτηση και κατά τη λειτουργία του αγωγού μπορεί να διαφέρει σημαντικά κατά την περίοδο της ζωής του αγωγού. Ο Ευρωκώδικας θέτει θερμοκρασιακές μεταβολές  $\Delta T=\pm 35^\circ\text{C}$  από την θερμοκρασία εγκατάστασης (δηλαδή  $\Delta T=0^\circ\text{C}$ ) Πέρα από την επίδραση που έχει η γωνία καμπύλωσης στις τάσεις που αναπτύσσονται στον αγωγό, όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα αυτού του κεφαλαίου, η θερμοκρασιακή μεταβολή από την αρχική αναμένεται να μεγεθύνει τις τάσεις που αναπτύσσονται όταν αυτή είναι αρνητική, και αντίστροφα να τις απομειώνει όταν εκείνη πάρει θετικές τιμές σε σχέση με τη θερμοκρασία εγκατάστασης.

Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.2α και στους Πίνακες 4.2α έως 4.2 γ, παρατηρείται ότι για  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$  (μπλε καμπύλη) ο λόγος των μεγίστων τάσεων συνεχίζει να αυξάνει όσο μεγαλώνει η γωνία καμπύλωσης, μέχρις ότου πάρει μια μέγιστη τιμή περί τις 37.5 μοίρες όπου οι μέγιστες τάσεις στη γωνία γίνουν περίπου διπλάσιες από αυτές του ευθύγραμμου σκέλους. Παράλληλα, την ίδια τάση με το Σχήμα 4.1β ακολουθεί και η καμπύλη του λόγου των ελάχιστων τάσεων προς εκείνες του ευθύγραμμου σκέλους, ακολουθώντας την ίδια αρχικά πορεία με την καμπύλη της θερμοκρασίας εγκατάστασης ( $\Delta T=0^\circ\text{C}$ ) και αποκλίνοντας από τις 22.5 μοίρες και ύστερα, παίρνοντας μικρές αρνητικές τιμές (θετικές αλγεβρικά) για γωνίες καμπύλωσης άνω των 75 μοιρών περίπου. Αντίθετα, παρατηρείται ότι για θετική θερμοκρασιακή μεταβολή  $\Delta T=+35^\circ\text{C}$  (κόκκινη καμπύλη) οι καμπύλες των λόγων των μεγίστων και ελάχιστων τάσεων ταυτίζονται με αυτές της μηδενικής θερμοκρασιακής μεταβολής έως τις 37.5 μοίρες, ώσπου να απομειωθούν ελάχιστα σε σχέση με τη θερμοκρασία εγκατάστασης. Η μηδενική θερμοκρασιακή μεταβολή  $\Delta T=0^\circ\text{C}$  (πράσινη καμπύλη) αντιστοιχεί στην επίδραση μονό της γωνίας καμπύλωσης και

παρατίθεται για λόγους διευκόλυνσης της σύγκρισης της επίδρασης της θερμοκρασιακής μεταβολής.



**Σχήμα 4.2:** Αποτελέσματα της επίδρασης της θερμοκρασιακής μεταβολής στις α) μεγιστες και β) ελαχιστες τιμες των τασεων κανονικοποιημένες ως προς τις τιμες στο ευθύγραμμο μελος κατά μήκος του αγωγού ( $p_0=7.5MPa$ ,  $t=10mm$ ).

**Πίνακας 4.2α:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=0^\circ\text{C}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	83.47	83.47	83.47	1.00	1.00
15	150.18	57.80	83.47	1.80	0.69
22.5	158.80	45.03	83.47	1.90	0.54
30	155.43	34.49	83.47	1.86	0.41
37.5	145.57	26.29	83.47	1.74	0.31
45	134.14	19.48	83.47	1.61	0.23
60	110.57	11.12	83.47	1.32	0.13
75	87.53	7.45	83.47	1.05	0.09
90	66.44	6.61	83.47	0.80	0.08

**Πίνακας 4.2β:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$

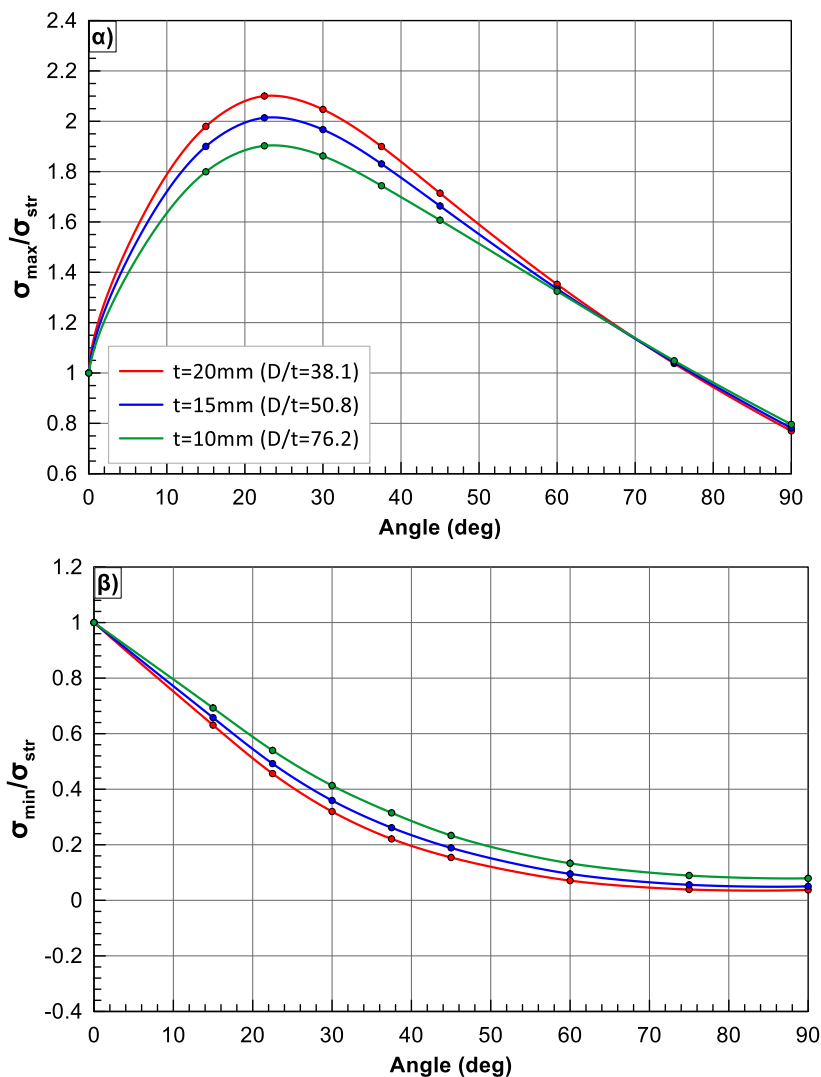
$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	169.47	169.47	169.47	1.00	1.00
15	304.89	117.34	169.47	1.80	0.69
22.5	324.05	90.82	169.47	1.91	0.54
30	337.90	61.66	169.47	1.99	0.36
37.5	341.91	36.54	169.47	2.02	0.22
45	335.86	16.92	169.47	1.98	0.10
60	304.92	-7.26	169.47	1.80	-0.04
75	262.77	-17.64	169.47	1.55	-0.10
90	217.41	-19.42	169.47	1.28	-0.11

**Πίνακας 4.2γ:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=+35^\circ\text{C}$

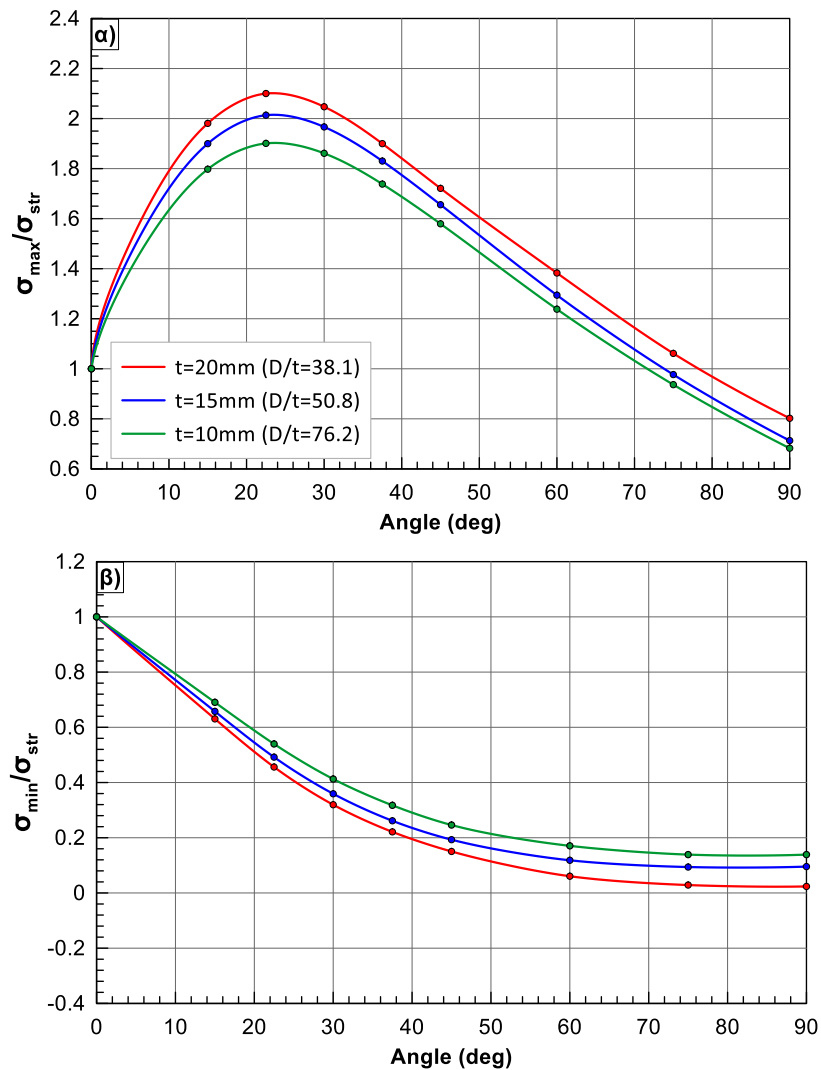
$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	-2.52	-2.52	-2.52	1.00	1.00
15	-4.53	-1.74	-2.52	1.80	0.69
22.5	-4.79	-1.36	-2.52	1.90	0.54
30	-4.69	-1.04	-2.52	1.86	0.41
37.5	-4.38	-0.80	-2.52	1.74	0.32
45	-3.98	-0.62	-2.52	1.58	0.25
60	-3.12	-0.43	-2.52	1.24	0.17
75	-2.36	-0.35	-2.52	0.94	0.14
90	-1.72	-0.35	-2.52	0.68	0.14

#### 4.4 Επίδραση λόγου διαμέτρου προς πάχος αγωγού

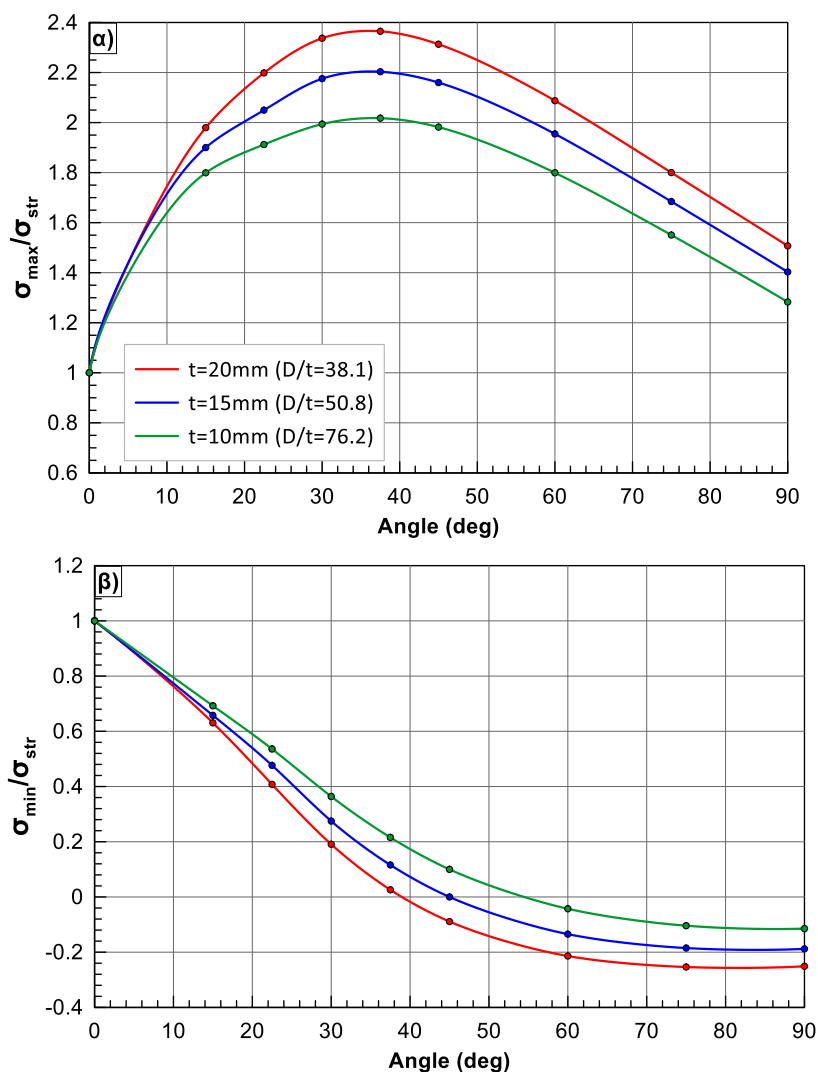
Επόμενο βήμα στη διερεύνηση των τάσεων που αναπτύσσονται στον αγωγό είναι η επίδραση του λόγου της διαμέτρου προς το πάχος του αγωγού ( $D/t$ ). Στα Σχήματα 4.3α, 4.3β και 4.3γ και στους Πίνακες 4.3α έως 4.3στ, παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει το πάχος του τοιχώματος του αγωγού τόσο οι μέγιστες όσο και οι ελάχιστες τάσεις στη καμπύλη αυξάνονται κατ' απόλυτη τιμή κατά 5%-10% και 10%-20% περίπου για  $t=15\text{mm}$  ( $D/t=50.8$ ) και  $t=20\text{mm}$  ( $D/t=38.1$ ). Οι μέγιστες μεταβολές των τάσεων παρατηρούνται για  $\Delta T=-35\text{ }^\circ\text{C}$ .



**Σχήμα 4.3α:** Αποτελέσματα της επίδρασης του λόγου διαμέτρου προς πάχος του αγωγού στις α) μέγιστες και β) ελάχιστες τιμές των τάσεων κανονικοποιημένες ως προς τις τιμές στο ευθύγραμμο μέλος κατά μήκος του αγωγού ( $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $\Delta T=0\text{ }^\circ\text{C}$ ).



**Σχήμα 4.3β:** Αποτελέσματα της επίδρασης του λόγου διαμέτρου προς πάχος του αγωγού στις α) μέγιστες και β) ελάχιστες τιμές των τάσεων κανονικοποιημένες ως προς τις τιμές στο ευθύγραμμο μέλος κατά μήκος του αγωγού ( $\rho_0=7.5MPa$ ,  $\Delta T=+35^\circ C$ ).



**Σχήμα 4.3γ:** Αποτελέσματα της επίδρασης του λόγου διαμέτρου προς πάχος του αγωγού στις α) μεγιστες και β) ελαχιστες τιμες των τασεων κανονικοποιημένες ως προς τις τιμες στο ευθύγραμμο μελος κατά μήκος του αγωγού ( $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$ ).

**Πίνακας 4.3α:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τασεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=15\text{mm}$  και  $\Delta T=0^\circ\text{C}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_{min}$ (MPa)	$\sigma_{str}$ (MPa)	$\sigma_{max}/\sigma_{str}$	$\sigma_{min}/\sigma_{str}$
0	54.90	54.90	54.90	1.00	1.00
15	104.31	36.10	54.90	1.90	0.66
22.5	110.56	27.02	54.90	2.01	0.49
30	107.98	19.73	54.90	1.97	0.36
37.5	100.50	14.35	54.90	1.83	0.26
45	91.32	10.36	54.90	1.66	0.19
60	73.25	5.22	54.90	1.33	0.10
75	57.21	3.07	54.90	1.04	0.06
90	42.90	2.76	54.90	0.78	0.05



**Πίνακας 4.3β:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=15\text{mm}$  και  $\Delta T=-35\text{ }^\circ\text{C}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	140.89	140.89	140.89	1.00	1.00
15	267.70	92.65	140.89	1.90	0.66
22.5	288.76	67.15	140.89	2.05	0.48
30	306.50	38.71	140.89	2.18	0.27
37.5	310.40	16.31	140.89	2.20	0.12
45	304.30	-0.01	140.89	2.16	0.00
60	275.38	-18.98	140.89	1.95	-0.13
75	237.31	-26.08	140.89	1.68	-0.19
90	197.64	-26.48	140.89	1.40	-0.19

**Πίνακας 4.3γ:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=15\text{mm}$  και  $\Delta T=+35\text{ }^\circ\text{C}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	-31.10	-31.10	-31.10	1.00	1.00
15	-59.08	-20.45	-31.10	1.90	0.66
22.5	-62.62	-15.30	-31.10	2.01	0.49
30	-61.16	-11.17	-31.10	1.97	0.36
37.5	-56.92	-8.13	-31.10	1.83	0.26
45	-51.49	-6.00	-31.10	1.66	0.19
60	-40.25	-3.68	-31.10	1.29	0.12
75	-30.38	-2.92	-31.10	0.98	0.09
90	-22.17	-2.97	-31.10	0.71	0.10

**Πίνακας 4.3δ:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=20\text{mm}$  και  $\Delta T=0\text{ }^\circ\text{C}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	40.61	40.61	40.61	1.00	1.00
15	80.39	25.61	40.61	1.98	0.63
22.5	85.29	18.53	40.61	2.10	0.46
30	83.13	12.98	40.61	2.05	0.32
37.5	77.15	8.98	40.61	1.90	0.22
45	69.61	6.26	40.61	1.71	0.15
60	54.91	2.88	40.61	1.35	0.07
75	42.14	1.58	40.61	1.04	0.04
90	31.27	1.52	40.61	0.77	0.04

**Πίνακας 4.3ε:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=20\text{mm}$  και  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$

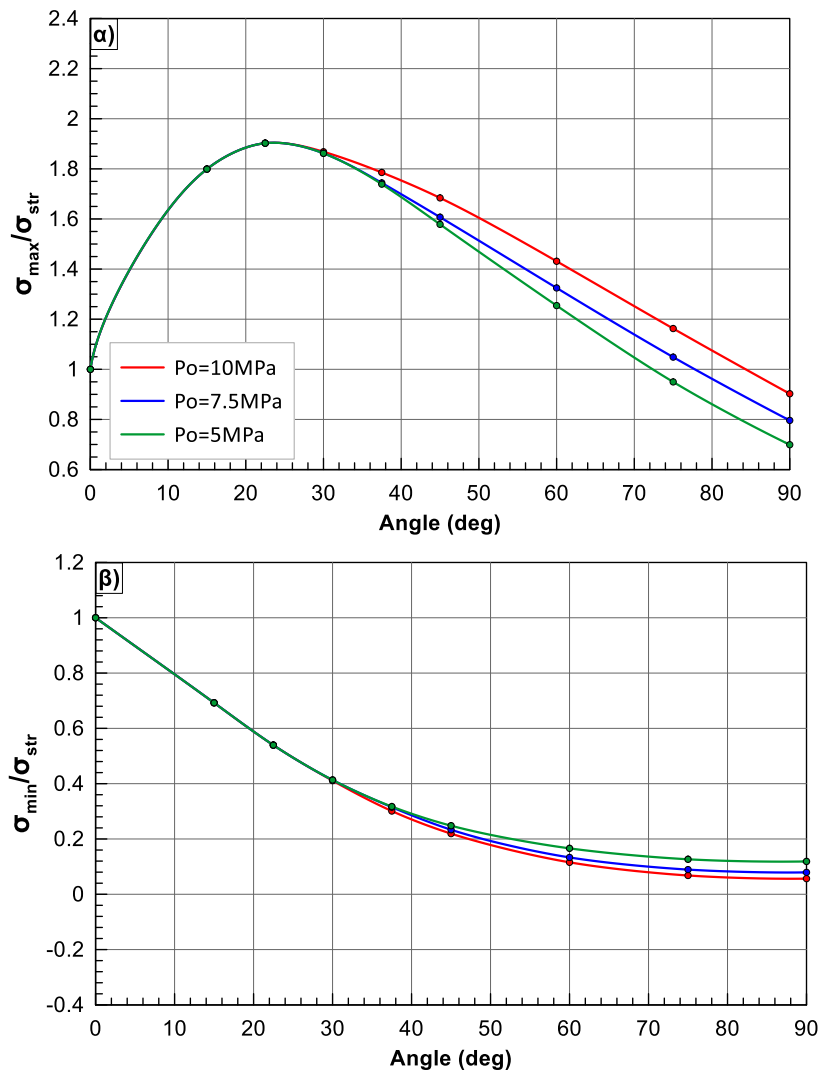
$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	126.60	126.60	126.60	1.00	1.00
15	250.60	79.82	126.60	1.98	0.63
22.5	278.31	51.61	126.60	2.20	0.41
30	295.87	24.15	126.60	2.34	0.19
37.5	299.38	3.27	126.60	2.36	0.03
45	292.81	-11.29	126.60	2.31	-0.09
60	264.26	-27.09	126.60	2.09	-0.21
75	227.89	-32.13	126.60	1.80	-0.25
90	190.79	-31.79	126.60	1.51	-0.25

**Πίνακας 4.3στ:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=20\text{mm}$  και  $\Delta T=+35^\circ\text{C}$

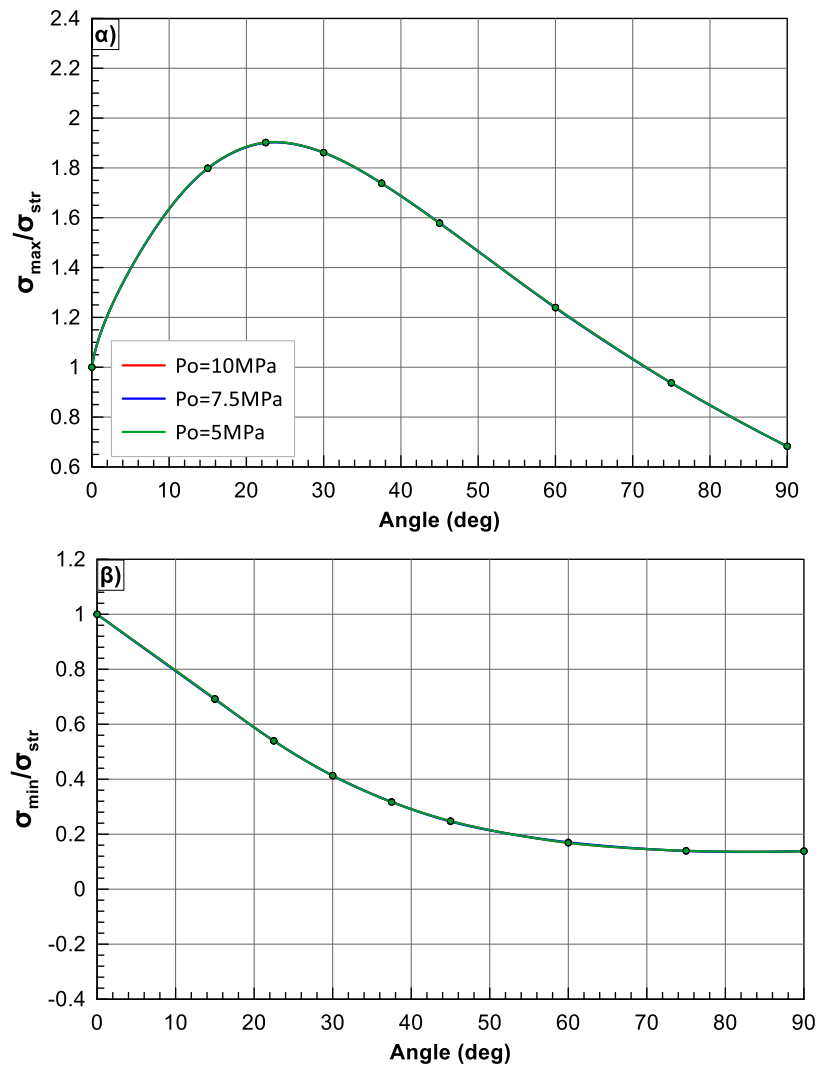
$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	-45.38	-45.38	-45.38	1.00	1.00
15	-89.89	-28.61	-45.38	1.98	0.63
22.5	-95.30	-20.70	-45.38	2.10	0.46
30	-92.90	-14.50	-45.38	2.05	0.32
37.5	-86.21	-10.04	-45.38	1.90	0.22
45	-78.10	-6.82	-45.38	1.72	0.15
60	-62.75	-2.75	-45.38	1.38	0.06
75	-48.17	-1.30	-45.38	1.06	0.03
90	-36.40	-1.07	-45.38	0.80	0.02

#### 4.5 Επίδραση εσωτερικής πίεσης

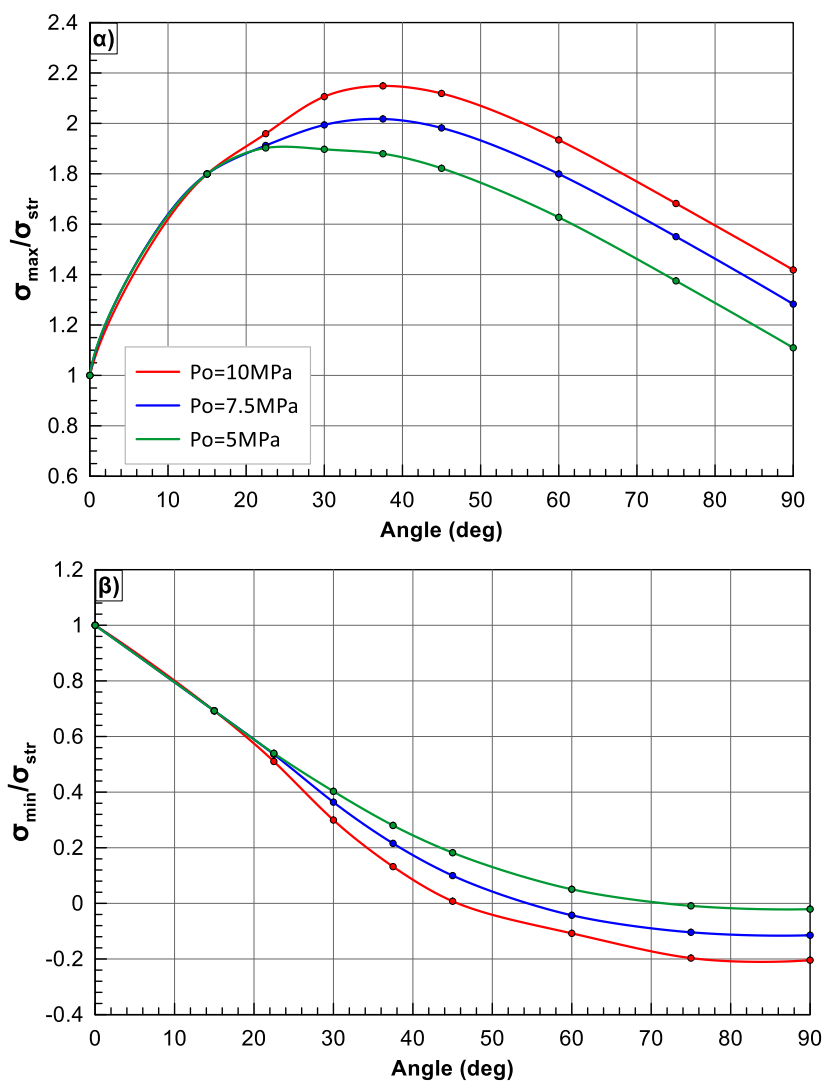
Η εσωτερική πίεση του αγωγού προκύπτει ως παράγοντας προς διερεύνηση από την υπάρχουσα βιβλιογραφία και από προηγούμενες μελέτες που έχουν διεξαχθεί για αγωγούς. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.4α, 4.4β και 4.4γ και στους Πίνακες 4.4α έως 4.4θ, η τιμή το  $p_0$  έχει μικρή μόνο επίδραση στον λόγο της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης για μηδενική θερμοκρασιακή μεταβολή  $\Delta T=0^\circ\text{C}$  για γωνίες καμπύλωσης μεγαλύτερες από 30 μοίρες περίπου. Η επίδραση αυτή μηδενίζεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4β οι τρεις καμπύλες ταυτίζονται, για  $\Delta T=+35^\circ\text{C}$  και σχεδόν διπλασιάζεται για  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$  επηρεάζοντας και γωνίες καμπύλωσης μεταξύ 20 και 30 μοιρών



**Σχήμα 4.4α:** Αποτελέσματα της επίδρασης της εσωτερικής πίεσης αγωγού στις α) μεγιστες και β) ελαχιστες τιμες των τασεων κανονικοποιημένες ως προς τις τιμες στο ευθύγραμμο μελος κατά μήκος του αγωγού ( $t=10\text{mm}$ ,  $\Delta T=0^\circ\text{C}$ ).



**Σχήμα 4.4β:** Αποτελέσματα της επίδρασης της εσωτερικής πίεσης αγωγού στις α) μεγιστες και β) ελαχιστες τιμες των τασεων κανονικοποιημένες ως προς τις τιμες στο ευθύγραμμο μελος κατά μήκος του αγωγού ( $t=10\text{mm}$ ,  $\Delta T=+35\text{ }^\circ\text{C}$ ). Παρατηρείται ότι και οι τρεις καμπύλες ταυτίζονται μεταξύ τους.



**Σχήμα 4.4γ:** Αποτελέσματα της επίδρασης της εσωτερικής πίεσης αγωγού στις α) μεγιστες και β) ελαχιστες τιμες των τασεων κανονικοποιημένες ως προς τις τιμες στο ευθύγραμμο μελος κατά μήκος του αγωγού ( $t=10\text{mm}$ ,  $\Delta T=-35\text{ }^\circ\text{C}$ ).

**Πίνακας 4.4α:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τασεων για  $p_o=5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=0\text{ }^\circ\text{C}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_{min}$ (MPa)	$\sigma_{str}$ (MPa)	$\sigma_{max}/\sigma_{str}$	$\sigma_{min}/\sigma_{str}$
0	55.65	55.65	55.65	1.00	1.00
15	100.12	38.53	55.65	1.80	0.69
22.5	105.87	30.02	55.65	1.90	0.54
30	103.62	23.00	55.65	1.86	0.41
37.5	96.77	17.65	55.65	1.74	0.32
45	87.84	13.80	55.65	1.58	0.25
60	69.80	9.24	55.65	1.25	0.17
75	52.85	7.04	55.65	0.95	0.13
90	38.90	6.61	55.65	0.70	0.12

**Πίνακας 4.4β:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=0^\circ\text{C}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	83.47	83.47	83.47	1.00	1.00
15	150.18	57.80	83.47	1.80	0.69
22.5	158.80	45.03	83.47	1.90	0.54
30	155.43	34.49	83.47	1.86	0.41
37.5	145.57	26.29	83.47	1.74	0.31
45	134.14	19.48	83.47	1.61	0.23
60	110.57	11.12	83.47	1.32	0.13
75	87.53	7.45	83.47	1.05	0.09
90	66.44	6.61	83.47	0.80	0.08

**Πίνακας 4.4γ:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=10\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=0^\circ\text{C}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	111.30	111.30	111.30	1.00	1.00
15	200.24	77.06	111.30	1.80	0.69
22.5	211.74	60.04	111.30	1.90	0.54
30	207.93	45.74	111.30	1.87	0.41
37.5	198.73	33.50	111.30	1.79	0.30
45	187.43	24.41	111.30	1.68	0.22
60	159.29	12.86	111.30	1.43	0.12
75	129.41	7.56	111.30	1.16	0.07
90	100.45	6.29	111.30	0.90	0.06

**Πίνακας 4.4δ:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	141.64	141.64	141.64	1.00	1.00
15	254.83	98.07	141.64	1.80	0.69
22.5	269.47	76.41	141.64	1.90	0.54
30	268.71	57.05	141.64	1.90	0.40
37.5	266.20	39.68	141.64	1.88	0.28
45	258.02	25.80	141.64	1.82	0.18
60	230.46	7.17	141.64	1.63	0.05
75	194.76	-1.27	141.64	1.38	-0.01
90	157.14	-2.94	141.64	1.11	-0.02

**Πίνακας 4.4ε:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=-35\text{ }^\circ\text{C}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	169.47	169.47	169.47	1.00	1.00
15	304.89	117.34	169.47	1.80	0.69
22.5	324.05	90.82	169.47	1.91	0.54
30	337.90	61.66	169.47	1.99	0.36
37.5	341.91	36.54	169.47	2.02	0.22
45	335.86	16.92	169.47	1.98	0.10
60	304.92	-7.26	169.47	1.80	-0.04
75	262.77	-17.64	169.47	1.55	-0.10
90	217.41	-19.42	169.47	1.28	-0.11

**Πίνακας 4.4στ:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=10\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=-35\text{ }^\circ\text{C}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	197.29	197.29	197.29	1.00	1.00
15	354.95	136.60	197.29	1.80	0.69
22.5	386.51	100.67	197.29	1.96	0.51
30	415.52	59.11	197.29	2.11	0.30
37.5	423.92	26.05	197.29	2.15	0.13
45	417.99	1.51	197.29	2.12	0.01
60	381.61	-21.27	197.29	1.93	-0.11
75	331.85	-38.83	197.29	1.68	-0.20
90	279.87	-40.31	197.29	1.42	-0.20

**Πίνακας 4.4ζ:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=+35\text{ }^\circ\text{C}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	-30.35	-30.35	-30.35	1.00	1.00
15	-54.59	-21.01	-30.35	1.80	0.69
22.5	-57.73	-16.37	-30.35	1.90	0.54
30	-56.50	-12.54	-30.35	1.86	0.41
37.5	-52.77	-9.62	-30.35	1.74	0.32
45	-47.90	-7.52	-30.35	1.58	0.25
60	-37.63	-5.12	-30.35	1.24	0.17
75	-28.45	-4.24	-30.35	0.94	0.14
90	-20.72	-4.20	-30.35	0.68	0.14

**Πίνακας 4.4η:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=+35\text{ }^\circ\text{C}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	-2.52	-2.52	-2.52	1.00	1.00
15	-4.53	-1.74	-2.52	1.80	0.69
22.5	-4.79	-1.36	-2.52	1.90	0.54
30	-4.69	-1.04	-2.52	1.86	0.41
37.5	-4.38	-0.80	-2.52	1.74	0.32
45	-3.98	-0.62	-2.52	1.58	0.25
60	-3.12	-0.43	-2.52	1.24	0.17
75	-2.36	-0.35	-2.52	0.94	0.14
90	-1.72	-0.35	-2.52	0.68	0.14

**Πίνακας 4.4θ:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=10\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=+35\text{ }^\circ\text{C}$

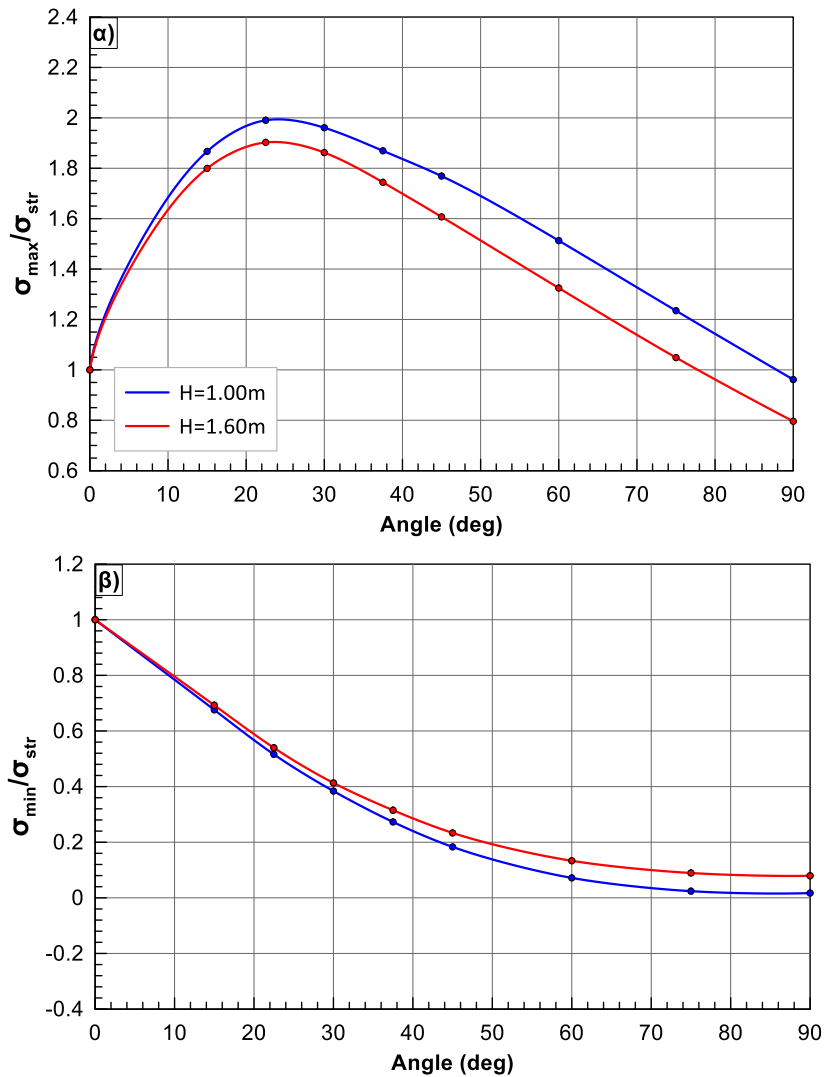
$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	25.31	25.31	25.31	1.00	1.00
15	45.53	17.52	25.31	1.80	0.69
22.5	48.14	13.65	25.31	1.90	0.54
30	47.12	10.46	25.31	1.86	0.41
37.5	44.00	8.03	25.31	1.74	0.32
45	39.94	6.27	25.31	1.58	0.25
60	31.38	4.27	25.31	1.24	0.17
75	23.72	3.53	25.31	0.94	0.14
90	17.28	3.50	25.31	0.68	0.14

#### 4.6 Επίδραση πάχους επικάλυψης

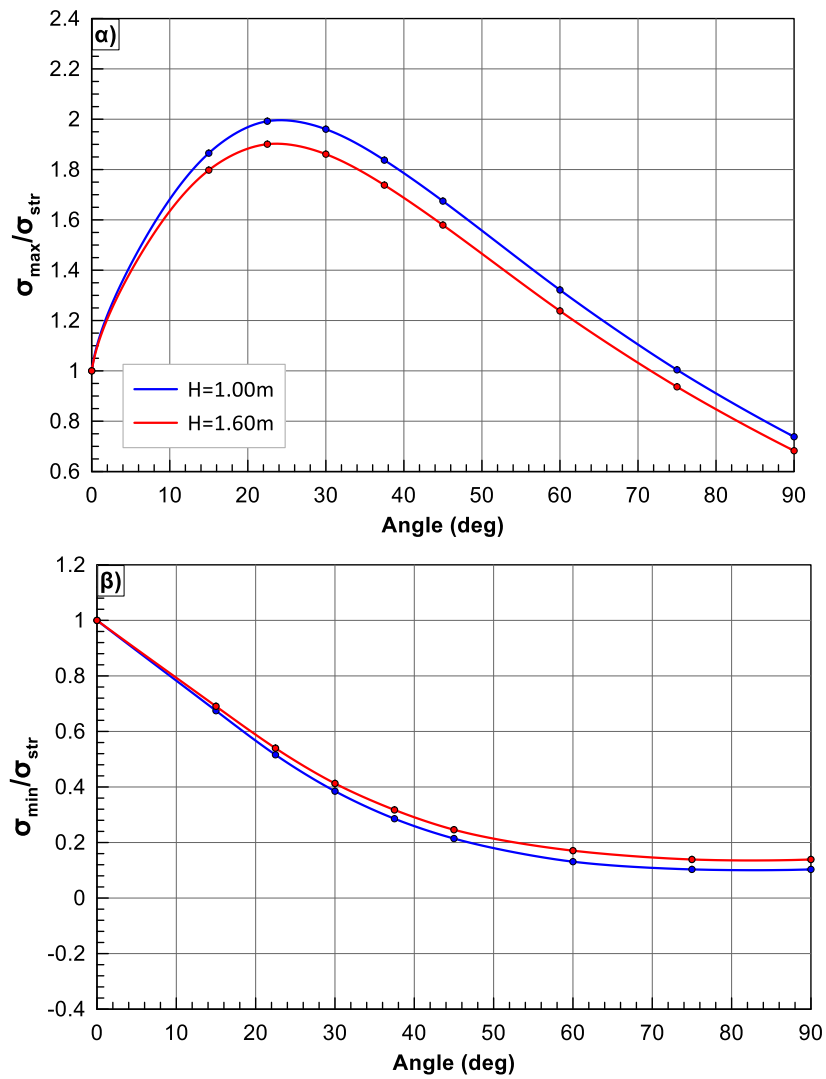
Τελευταίος παράγοντας στη διερεύνηση των τάσεων που αναπτύσσονται στη καμπύλωση του αγωγού είναι η δυσκαμψία των ελατηρίων του εδάφους, ή αλλιώς, το πάχος επικάλυψης Η του αγωγού. Ευρήματα από τη βιβλιογραφία και από προηγούμενες μελέτες, τα οποία επαληθεύονται στην παρούσα μελέτη δείχνουν ότι όσο μικρότερο το πάχος επικάλυψης του αγωγού, τόσο μεγαλύτερες οι τάσεις που αναπτύσσονται στην γωνία καμπύλωσής του. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.5α, 4.5β και 4.5γ και στους Πίνακες 4.5α έως 4.5στ, ο λόγος μεγέθυνσης των μέγιστων τάσεων αυξάνεται όσο μειώνεται το πάχος της επικάλυψης (σε 1.00m από 1.60M που θεωρήθηκε στην βασική ανάλυση), για όλες τις γωνίες καμπύλωσης. Η εν λόγω αύξηση



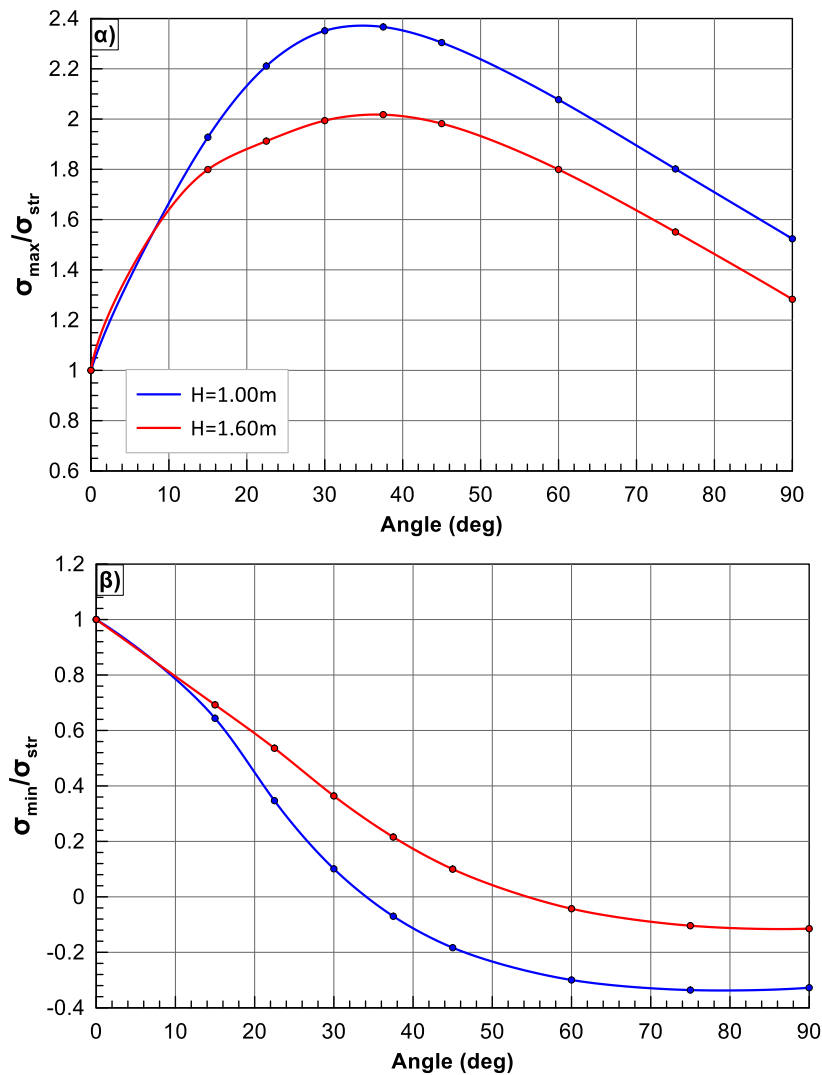
είναι μικρή (5%-10%) για μηδενική και για θετική θερμοκρασιακή μεταβολή ( $\Delta T=0^\circ \text{C}$  και  $+35^\circ \text{C}$ ) αλλά αυξάνεται σε 20% και άνω για αρνητική θερμοκρασιακή μεταβολή ( $\Delta T= -35^\circ \text{C}$ ).



**Σχήμα 4.5α:** Αποτελέσματα της επίδρασης του παχους επικάλυψης στις α) μεγαλύτερες και β) ελαχιστες τιμες των τασεων κανονικοποιημένες ως προς τις τιμες στο ευθύγραμμο μελος κατά μήκος του αγωγού ( $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $\Delta T=0^\circ \text{C}$ ).



**Σχήμα 4.5β:** Αποτελέσματα της επίδρασης του παχους επικάλυψης στις α) μέγιστες και β) ελάχιστες τιμες των τασεων κανονικοποιημένες ως προς τις τιμες στο ευθύγραμμο μελος κατά μήκος του αγωγού ( $p_0=7.5MPa$ ,  $\Delta T=+35^\circ C$ ).



**Σχήμα 4.5γ:** Αποτελέσματα της επίδρασης του παχους επικάλυψης στις α) μεγιστες και β) ελαχιστες τιμες των τασεων κανονικοποιημένες ως προς τις τιμες στο ευθύγραμμο μελος κατά μήκος του αγωγού ( $p_o=7.5\text{MPa}$ ,  $\Delta T=-35\text{ }^\circ\text{C}$ ).

**Πίνακας 4.5α:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τασεων για  $p_o=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$ ,  $\Delta T=0\text{ }^\circ\text{C}$  και  $H=1.00\text{m}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_{min}$ (MPa)	$\sigma_{str}$ (MPa)	$\sigma_{max}/\sigma_{str}$	$\sigma_{min}/\sigma_{str}$
0	83.47	83.47	83.47	1.00	1.00
15	155.81	56.42	83.47	1.87	0.68
22.5	166.14	43.06	83.47	1.99	0.52
30	163.66	32.04	83.47	1.96	0.38
37.5	156.02	22.77	83.47	1.87	0.27
45	147.65	15.28	83.47	1.77	0.18
60	126.27	5.98	83.47	1.51	0.07
75	103.06	2.00	83.47	1.23	0.02
90	80.26	1.43	83.47	0.96	0.02

**Πίνακας 4.5β:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$ ,  $\Delta T=0^\circ\text{C}$  και  $H=1.60\text{m}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	83.47	83.47	83.47	1.00	1.00
15	150.18	57.80	83.47	1.80	0.69
22.5	158.80	45.03	83.47	1.90	0.54
30	155.43	34.49	83.47	1.86	0.41
37.5	145.57	26.29	83.47	1.74	0.31
45	134.14	19.48	83.47	1.61	0.23
60	110.57	11.12	83.47	1.32	0.13
75	87.53	7.45	83.47	1.05	0.09
90	66.44	6.61	83.47	0.80	0.08

**Πίνακας 4.5γ:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$ ,  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$  και  $H=1.00\text{m}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	169.47	169.47	169.47	1.00	1.00
15	326.66	109.12	169.47	1.93	0.64
22.5	374.67	58.79	169.47	2.21	0.35
30	398.47	17.12	169.47	2.35	0.10
37.5	401.06	-11.86	169.47	2.37	-0.07
45	390.52	-31.07	169.47	2.30	-0.18
60	351.99	-50.81	169.47	2.08	-0.30
75	305.28	-56.97	169.47	1.80	-0.34
90	258.19	-55.55	169.47	1.52	-0.33

**Πίνακας 4.5δ:** Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$ ,  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$  και  $H=1.60\text{m}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	169.47	169.47	169.47	1.00	169.47
15	304.89	117.34	169.47	1.80	304.89
22.5	324.05	90.82	169.47	1.91	324.05
30	337.90	61.66	169.47	1.99	337.90
37.5	341.91	36.54	169.47	2.02	341.91
45	335.86	16.92	169.47	1.98	335.86
60	304.92	-7.26	169.47	1.80	304.92
75	262.77	-17.64	169.47	1.55	262.77
90	217.41	-19.42	169.47	1.28	217.41

Πίνακας 4.5ε: Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$ ,  $\Delta T=+35\text{ }^\circ\text{C}$  και  $H=1.00\text{m}$ 

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	-2.52	-2.52	-2.52	1.00	1.00
15	-4.70	-1.70	-2.52	0.67	1.87
22.5	-5.02	-1.30	-2.52	0.52	1.99
30	-4.94	-0.97	-2.52	0.38	1.96
37.5	-4.63	-0.72	-2.52	0.29	1.84
45	-4.22	-0.54	-2.52	0.21	1.67
60	-3.33	-0.33	-2.52	0.13	1.32
75	-2.53	-0.26	-2.52	0.10	1.00
90	-1.86	-0.26	-2.52	0.10	0.74

Πίνακας 4.5στ: Τιμές μέγιστων/ελάχιστων τάσεων για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$ ,  $\Delta T=+35\text{ }^\circ\text{C}$  και  $H=1.60\text{m}$ 

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\text{str}}$ (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$
0	-2.52	-2.52	-2.52	1.00	1.00
15	-4.53	-1.74	-2.52	1.80	0.69
22.5	-4.79	-1.36	-2.52	1.90	0.54
30	-4.69	-1.04	-2.52	1.86	0.41
37.5	-4.38	-0.80	-2.52	1.74	0.32
45	-3.98	-0.62	-2.52	1.58	0.25
60	-3.12	-0.43	-2.52	1.24	0.17
75	-2.36	-0.35	-2.52	0.94	0.14
90	-1.72	-0.35	-2.52	0.68	0.14

#### 4.7 Σύνοψη

Στα προηγούμενα κεφάλαια ορίστηκαν τα χαρακτηριστικά του αγωγού, των υλικών του, καθώς και αυτά του περιβάλλοντος εδάφους, ενώ συγχρόνως περιγράφηκαν και οι συνθήκες λειτουργίας του όσον αφορά την εσωτερική πίεση και τις αναμενόμενες θερμοκρασιακές μεταβολές. Επίσης, στο κεφάλαιο 3 έγινε βελτιστοποίηση ορισμένων παραδοχών των αριθμητικών αναλύσεων με στόχο την μείωση του χρόνου των αναλύσεων χωρίς απώλεια στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Με βάση τα όσα διερευνήθηκαν και βελτιστοποιήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, έγινε στο παρόν κεφάλαιο στοχευμένη ανάλυση των παραγόντων που μπορεί να επηρεάζουν και επιδρούν την εντατική κατάσταση στα καμπύλα τμήματα του αγωγού.

Οι πέντε παράγοντες που διερευνήθηκαν ήταν το μέγεθος της γωνίας καμπύλωσης (κοινή σε όλες τις παραμετρικές αναλύσεις), η θερμοκρασιακή μεταβολή, ο λόγος της διαμέτρου του αγωγού προς το πάχος του, η εσωτερική πίεση του αγωγού και τέλος, το πάχος επικάλυψής του από το υπερκείμενο έδαφος. Για πρακτικούς λόγους τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων παρουσιάστηκαν ως *Διορθωτικοί Συντελεστές Καμπυλότητας* (ΔΣΚ) οι οποίοι ορίστηκαν ως ο λόγος των μέγιστων και ελάχιστων τάσεων που αναπτύχθηκαν στη καμπύλωση του αγωγού προς τις αντίστοιχες τάσεις του ευθύγραμμου αγωγού, δηλαδή για γωνία καμπύλωσης ίση με 0 μοίρες.

Πρώτα διερευνήθηκε η επίδραση της ίδιας της καμπύλωσης στην εντατική κατάσταση του αγωγού (Σχήμα 4.1). Για να υπάρχει σημείο σύγκρισης για όλες τις αναλύσεις και όλους τους διάφορους παράγοντες, πάρθηκε σαν καμπύλη αναφοράς εκείνη με μηδενική θερμοκρασιακή μεταβολή (δηλαδή για θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την εγκατάσταση του αγωγού), εσωτερική πίεση 7.5MPa, πάχος τοιχώματος του αγωγού 10mm και πάχος επικάλυψης 1.60m. Με βάση αυτά, οι επόμενοι τέσσερεις παράγοντες και η επίδρασή τους ποσοτικοποιείται ευκολότερα. Ειδικά για την διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασιακής μεταβολής (Σχήμα 4.2), φαίνεται η επίδραση τις αρνητικής θερμοκρασιακής μεταβολής και η επίδρασή της στον λόγο των τάσεων. Για τους υπόλοιπους παράγοντες, παρουσιάστηκαν τα διαγράμματα για τις τρεις θερμοκρασιακές μεταβολές ( $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$  και  $+35^{\circ}\text{C}$ ) ξεχωριστά ώστε να δοθεί έμφαση στην επίδραση του ίδιου του παράγοντα και όχι στην επίδραση της θερμοκρασιακής μεταβολής, που ήδη μελετήθηκε. Τα συλλογικά συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των διαφόρων παραγόντων σχεδιασμού στους ΔΣΚ παρουσιάζονται στο ακόλουθο κεφάλαιο.

# Κεφάλαιο 5

## Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Αριθμητικών Αναλύσεων

---

Στο Κεφάλαιο 4 μελετήθηκε ξεχωριστά η επίδραση των διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν την εντατική κατάσταση στα καμπύλα τμήματα χαλύβδινων υπόγειων αγωγών υψηλής πίεσης. Η επίδραση στην ανάπτυξη των τάσεων του αγωγού παρουσιάστηκε αναλυτικά υπό διάφορα σενάρια λειτουργίας, τα οποία απαρτίζονται από μία εσωτερική μη-μηδενική πίεση και τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας: μια με μηδενική θερμοκρασιακή μεταβολή σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την εγκατάσταση του αγωγού ( $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$ ), μία για θετική θερμοκρασιακή μεταβολή ( $\Delta T=+35^{\circ}\text{C}$ ) και άλλη μία για αρνητική θερμοκρασιακή μεταβολή ( $\Delta T=-35^{\circ}\text{C}$ ).

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται συγκεντρωτική αξιολόγηση της επίδρασης όλων των παραγόντων, ξεχωριστά για κάθε ένα από τα προαναφερθέντα σενάρια λειτουργίας. Στόχος αυτής της διεργασίας είναι διατύπωση διαγραμμάτων σχεδιασμού για τον άμεσο υπολογισμό του συντελεστή ενίσχυσης των αξονικών τάσεων σε καμπύλα τμήματα των αγωγών λαμβάνοντας υπόψη τόσο την μέση τιμή ανά σενάριο λειτουργίας όσο και το εύρος διασποράς (μέσω της τυπικής απόκλισης).

### 5.1 Εσωτερική πίεση λειτουργίας ( $p_0 \neq 0$ , $\Delta T=0$ )

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται οι καμπύλες του συντελεστή ενίσχυσης συναρτήσει της γωνίας καμπύλωσης, για το πρώτο από τα προαναφερθέντα σενάρια λειτουργίας, ξεχωριστά για την εξωτερική ίνα καμπύλωσης (Σχήμα 5.1α) και για την εσωτερική ίνα καμπύλωσης (Σχήμα 5.1β) του αγωγού. Στο Σχήμα 5.2, παρουσιάζονται αντίστοιχα η μέση τιμή συν την τυπική απόκλιση του συντελεστή ενίσχυσης για την εξωτερική ίνα, η μέση τιμή μείον την τυπική απόκλιση για την εσωτερική ίνα καμπύλωσης, καθώς και το εύρος τιμών του συντελεστή ενίσχυσης που προέκυψε από την παραμετρική διερεύνηση (περιοχή με γραμμοσκίαση). Τέλος οι Πίνακες 5.1 και 5.2 παρουσιάζουν αναλυτικά τις χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή ενίσχυσης όπως αυτές προκύπτουν από τις αναλύσεις για την εξωτερική και εσωτερική ίνα του αγωγού.

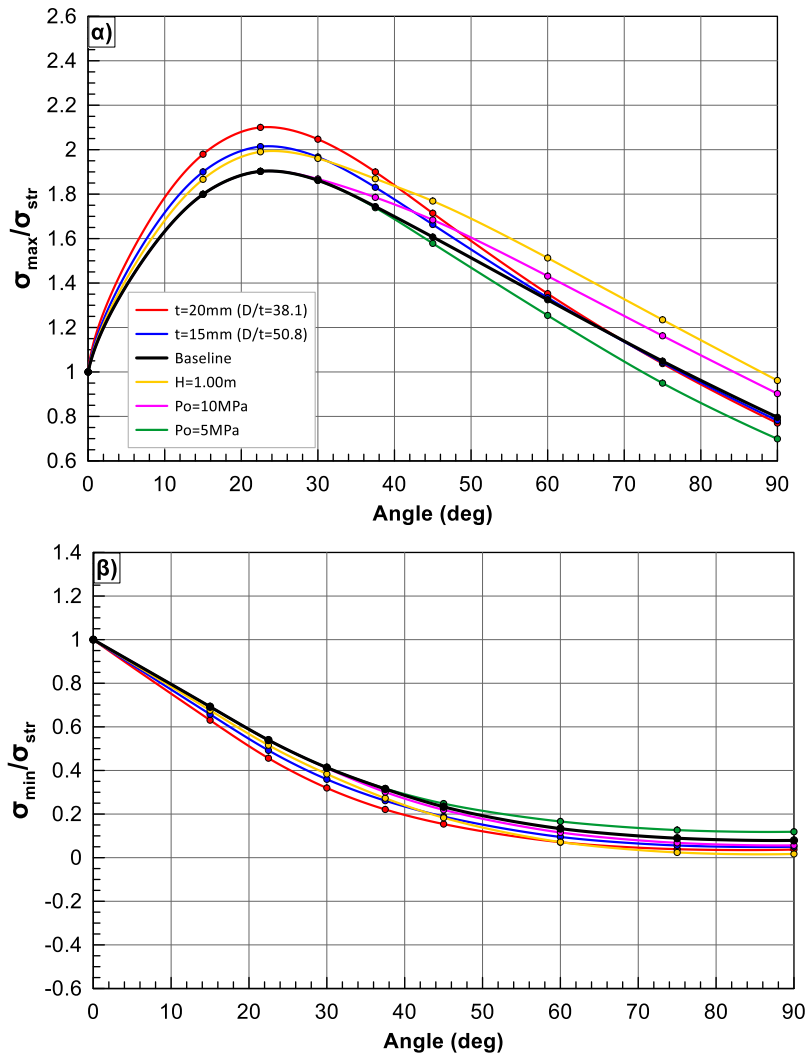
Ως καμπύλη αναφοράς στην παραπάνω παρουσίαση επιλέχθηκε εκείνη με ιδιότητες που προσεγγίζουν έναν τυπικό αγωγό, ήτοι για ένα πάχος αγωγού ίσο με  $t=10\text{mm}$  και εσωτερικής πίεσης ίσης με  $p_0=7.5\text{MPa}$ . Η καμπύλη αυτή ονομάστηκε “Baseline” και εμφανίζεται με έντονο μαύρο χρώμα στο Σχήμα 5.1.

Πιο αναλυτικά, όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.1α και 5.2α η επίδραση της καμπύλωσης στην εξωτερική ίνα του αγωγού έχει ως αποτέλεσμα οι τάσεις να λάβουν ένα εύρος μέγιστων τιμών, περί γωνία καμπύλωσης ίση με 22.5 μοίρες, από 1.9 έως 2.1 φορές εκείνων για ευθύγραμμο αγωγό. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.2α η μέση τιμή των τάσεων αγγίζει το διπλάσιο των τάσεων ενός αντίστοιχου ευθύγραμμου αγωγού, ενώ η καμπύλη της μέσης τιμής συν μιας τυπικής απόκλισης παίρνει τιμές υπερδιπλάσιες αυτού. Παρατηρείται ότι η μέση τιμή για γωνίες καμπύλωσης μεγαλύτερες από 22.5 μοίρες φθίνει σχεδόν γραμμικά έως ότου πάρει μια ελάχιστη τιμή, για γωνία ίση με 90 μοίρες, περίπου 20% μειωμένη σε σχέση με έναν ευθύγραμμο αγωγό, ενώ η καμπύλη της μέσης τιμής συν την τυπική απόκλιση ελαχιστοποιείται όταν για τις 90 μοίρες πάρει τιμές ίσες με το 90% των τάσεων ενός ευθύγραμμου σκέλους. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει, προφανώς, από την αξιολόγηση των τιμών του Πίνακα 5.1.

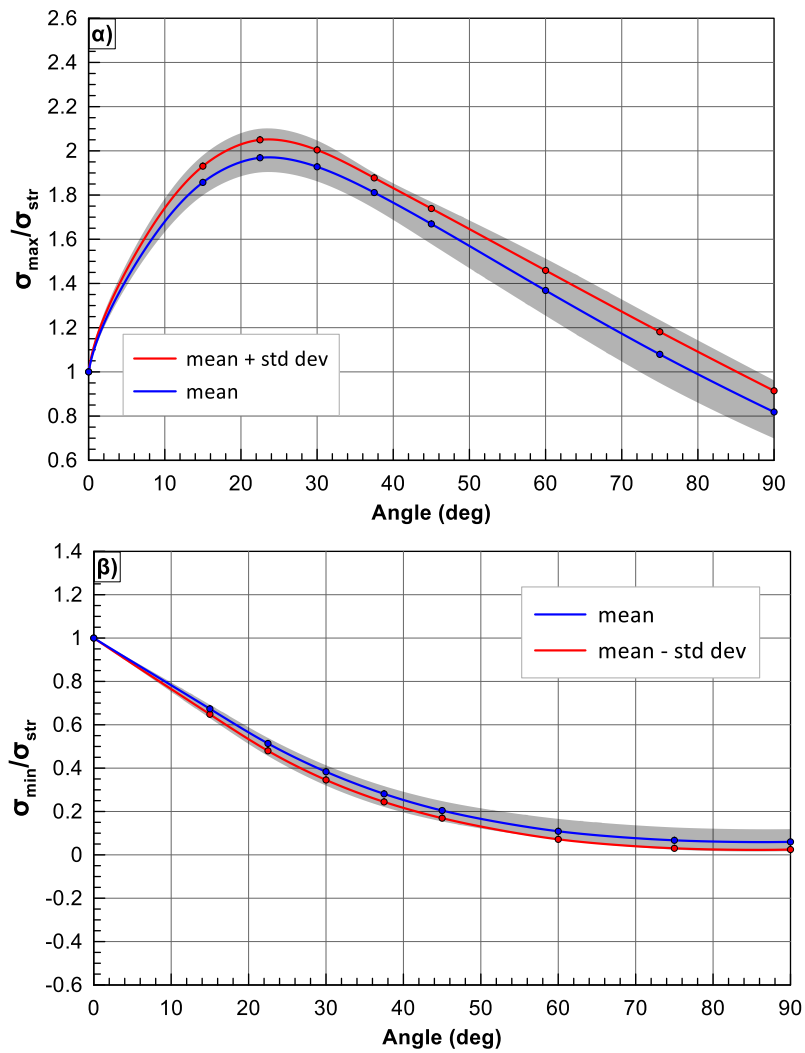
Αντίστοιχα, τα Σχήματα 5.1β και 5.2β φαίνεται η επίδραση της καμπύλωσης στην εσωτερική ίνα του αγωγού. Από τον Πίνακα 5.2, αλλά και γραφικά, παρατηρείται ότι η επίδραση της γωνίας στις τάσεις φθίνει όσο αυξάνεται η γωνία καμπύλωσης. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι τιμές των τάσεων λόγω της επίδρασης της καμπύλωσης και συγκεκριμένα η μέση τιμή και η μέση τιμή μείον την τυπική απόκλιση, μειώνονται κάτω από το 10% των τιμών ενός ευθύγραμμου σκέλους. Ειδικά η δεύτερη, τείνει να μηδενιστεί για γωνίες καμπύλωσης μεγαλύτερες των 75 μοιρών.

Τέλος, σε ότι αφορά το εύρος των τιμών του συντελεστή ενίσχυσης στην εξωτερική ίνα, παρατηρείται ότι στο Σχήμα 5.2α και στον Πίνακα 5.1, για γωνίες καμπύλωσης 15 μοιρών κυμαίνεται σε  $\pm 0.07$ , ενώ όσο η γωνία μεγαλώνει, το εύρος των τιμών μεταξύ των μεγίστων και ελαχίστων τάσεων της εξωτερικής ίνας καμπύλωσης αυξάνει. Αριθμητικά και γραφικά, προκύπτει ότι το μέγιστο εύρος τιμών που λαμβάνεται για γωνίες καμπύλωσης 90 μοιρών είναι της τάξης του  $\pm 0.10$ . Αντίθετα, το εύρος των τιμών για την εσωτερική ίνα παραμένει σχεδόν σταθερό σε σχέση με την εξωτερική. Από το Σχήμα 5.2β και τον Πίνακα 5.2 προκύπτει ότι για γωνίες καμπύλωσης 15 μοιρών το εύρος των τιμών κυμαίνεται σε  $\pm 0.03$ , ενώ για μεγαλύτερες γωνίες καμπύλωσης και μέχρι τις 90 μοίρες το εύρος παίρνει τιμές  $\pm 0.04$ .





**Σχήμα 5.1:** Αποτελέσματα της επίδρασης της γωνίας καμπύλωσης στην εξωτερική (α) και στην εσωτερική (β) ίνα του αγωγού. Οι τιμές των τάσεων είναι κανονικοποιημένες ως προς τις τιμές ενός ευθύγραμμου σκέλους αγωγού (για  $p_o=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=0^\circ\text{C}$ ).



**Σχήμα 5.2:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της επίδρασης της γωνίας καμπύλωσης στον συντελεστή ενίσχυσης των τάσεων στην εξωτερική (α) και στην εσωτερική (β) ίνα του αγωγού. Οι τιμές των τάσεων είναι κανονικοποιημένες ως προς τις τιμές ενός ευθύγραμμου σκέλους αγωγού (για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=0^\circ\text{C}$ ).

**Πίνακας 5.1:** Τιμές του συντελεστή ενίσχυσης των τάσεων της εξωτερικής ίνας της καμπύλωσης για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=0^\circ\text{C}$ 

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\min \sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\max \sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\text{mean } \sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	$\text{mean } \sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}} + \text{std dev}$
0	1.00	1.00	1.00	1.00
15	1.80	1.98	1.86	1.93
22.5	1.90	2.10	1.97	2.05
30	1.86	2.05	1.93	2.00
37.5	1.74	1.90	1.81	1.88
45	1.58	1.77	1.67	1.74
60	1.25	1.51	1.37	1.46
75	0.95	1.23	1.08	1.18
90	0.70	0.96	0.82	0.91

**Πίνακας 5.2:** Τιμές του συντελεστή ενίσχυσης των τάσεων της εσωτερικής ίνας της καμπύλωσης για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=0^\circ\text{C}$ 

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\min \sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$	$\max \sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$	$\text{mean } \sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$	$\text{mean } \sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}} - \text{std dev}$
0	1.00	1.00	1.00	1.00
15	0.63	0.69	0.67	0.65
22.5	0.46	0.54	0.51	0.48
30	0.32	0.41	0.38	0.35
37.5	0.22	0.32	0.28	0.24
45	0.15	0.25	0.20	0.17
60	0.07	0.17	0.11	0.07
75	0.02	0.13	0.07	0.03
90	0.02	0.12	0.06	0.02

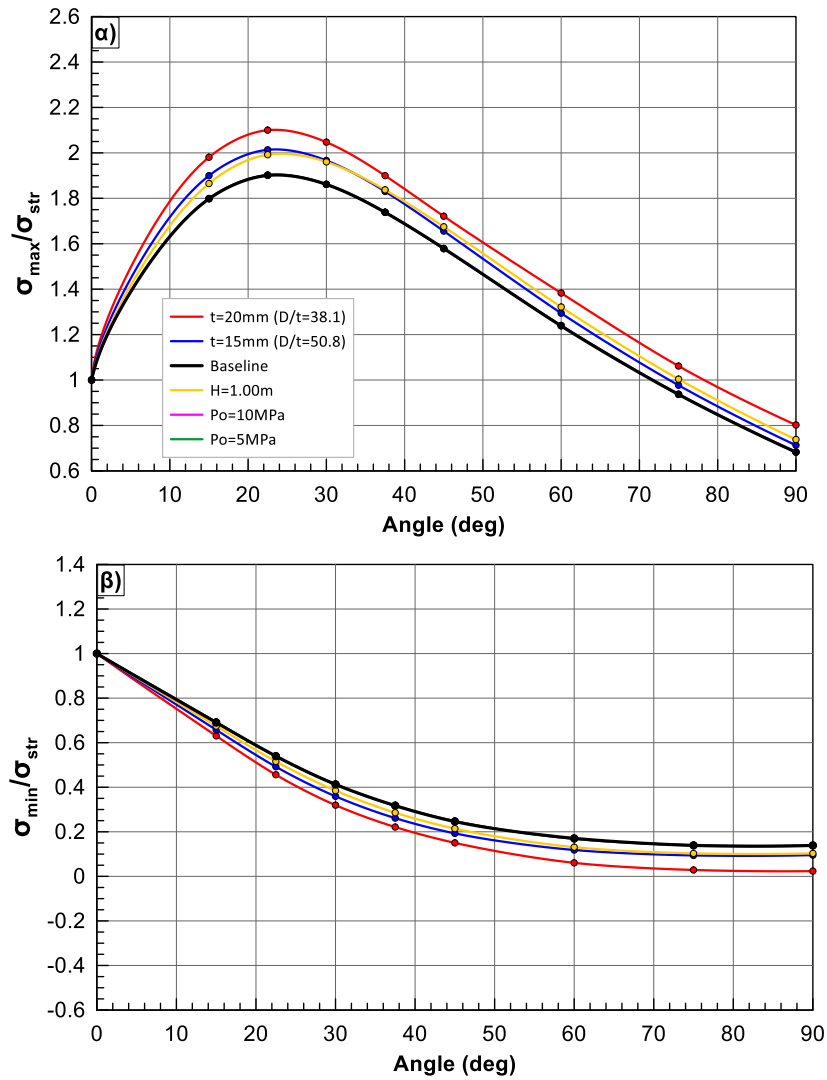
## 5.2 Θετική θερμοκρασιακή μεταβολή ( $p_0 + \Delta T$ )

Η ίδια λογική ακολουθείται και για τη θετική θερμοκρασιακή μεταβολή ( $\Delta T=+35^\circ\text{C}$ ). Στο Σχήμα 5.3, όπως και στα Σχήμα 5.1, παρουσιάζονται οι καμπύλες του διορθωτικού συντελεστή για την εξωτερική ( $\alpha$ ) και την εσωτερική ( $\beta$ ) ίνα καμπύλωσης. Σημειώνεται ότι, όπως ήδη μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 4, ανεξαρτήτως των μεταβαλλόμενων εσωτερικών πιέσεων του αγωγού, ο διορθωτικός συντελεστής (άρα και οι αντίστοιχες καμπύλες για  $p_0=5\text{MPa}$ ,  $p_0=7.5\text{MPa}$  και  $p_0=10\text{MPa}$ ) δεν παρεκκλίνουν η μία της άλλης και συνεπώς οι τρεις καμπύλες του διορθωτικού συντελεστή από την επίδραση της εσωτερικής πίεσης σχεδιαστικά ταυτίζονται.

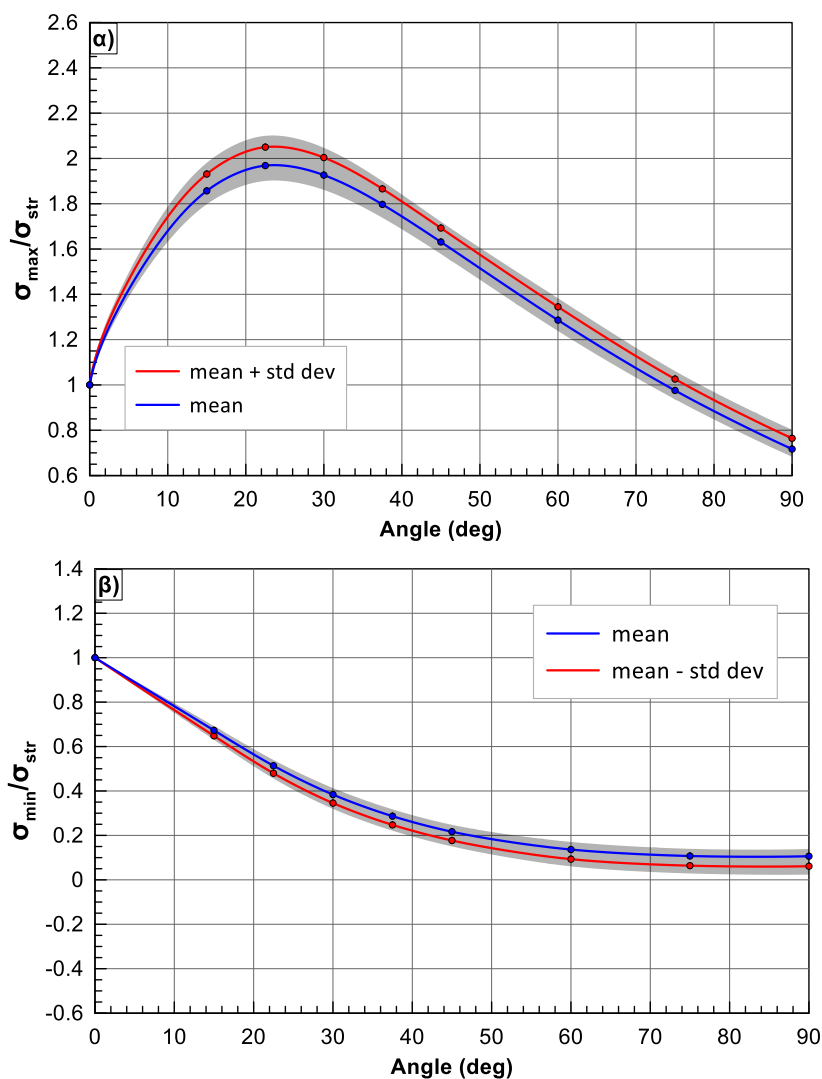
Ομοίως με το υπο-κεφάλαιο 5.1, στα Σχήματα 5.4α και 5.4β φαίνονται οι καμπύλες της μέσης τιμής και της μέσης τιμής συν μια τυπική απόκλιση για την εξωτερική ίνα καμπύλωσης ( $\alpha$ ) καθώς και της μέσης τιμής και της μέσης τιμής μείον μια τυπική απόκλιση για την εσωτερική ίνα ( $\beta$ ) του συντελεστή ενίσχυσης των τάσεων. Και στα δύο σχήματα, παρουσιάζεται γραμμοσκιασμένο και το αντίστοιχο εύρος των τιμών του συντελεστή ενίσχυσης. Οι Πίνακες 5.3 και 5.4 παρουσιάζουν τις ακριβείς τιμές των καμπυλών των Σχημάτων 5.4α και 5.4β.

Όπως και για τη μηδενική θερμοκρασιακή μεταβολή, έτσι και για την θετική οι μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται για την εξωτερική ίνα (Σχήμα 5.3α) κυμαίνονται από 1.9 έως 2.1 φορές των τάσεων ενός ευθύγραμμου αγωγού. Παράλληλα, οι τάσεις που αναπτύσσονται στην αρνητική ίνα μειώνονται ώσπου να γίνουν περίπου 15% αυτών για ευθύγραμμο σκέλος. Στο Σχήμα 5.4α παρατηρείται ότι η μέση τιμή του συντελεστή ενίσχυσης για την εξωτερική ίνα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή για 22.5deg και μετέπειτα μειώνεται ώσπου στις 90deg να λάβει τιμές τάσεων κατά 30% μειωμένες σε σχέση με έναν ευθύγραμμο αγωγό. Η καμπύλη της μέσης τιμής του συντελεστή, για την εσωτερική ίνα (Σχήμα 5.4β), μειώνεται ώσπου να γίνει το 10% του αντίστοιχου ευθύγραμμου σκέλους.

Στο Σχήμα 5.4 και στους Πίνακες 5.3 και 5.4, παρατηρείται ότι το εύρος τιμών για την εξωτερική ίνα ακολουθεί την ίδια πορεία με αυτό της μηδενικής θερμοκρασιακής μεταβολής. Με άλλα λόγια, για την εξωτερική ίνα, το εύρος κυμαίνεται σε  $\pm 0.02$  για γωνία καμπύλωσης 15 μοίρες και  $\pm 0.04$  για γωνία καμπύλωσης 90 μοίρες. Αντιθέτως, για την εσωτερική ίνα, παρατηρείται μείωση του εύρους από  $\pm 0.07$  για γωνία καμπύλωσης 15 μοίρες σε  $\pm 0.05$  για γωνία 90 μοίρες.



**Σχήμα 5.3:** Αποτελέσματα της επίδρασης της γωνίας καμπύλωσης στην εξωτερική (α) και την εσωτερική (β) ίνα καμπύλωσης του αγωγού. Οι τιμές των τάσεων είναι κανονικοποιημένες ως προς τις τιμές ενός ευθύγραμμου σκέλους αγωγού (για  $p_o=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=+35^\circ\text{C}$ ).



**Σχήμα 5.4:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της επίδρασης της γωνίας καμπύλωσης στην εξωτερική (α) και στην εσωτερική (β) ίνα καμπύλωσης του αγωγού. Οι τιμές των τάσεων είναι κανονικοποιημένες ως προς τις τιμές ενός ευθύγραμμου σκέλους αγωγού (για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=+35^\circ\text{C}$ ).

**Πίνακας 5.3:** Τιμές του συντελεστή ενίσχυσης των τάσεων της εξωτερικής ίνας της καμπύλωσης για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=+35^\circ\text{C}$

$\theta$ ( $^\circ$ )	min $\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	max $\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	mean $\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$	mean $\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}}$ +std dev
0	1.00	1.00	1.00	1.00
15	1.80	1.98	1.86	1.93
22.5	1.90	2.10	1.97	2.05
30	1.86	2.05	1.93	2.00
37.5	1.74	1.90	1.80	1.87
45	1.58	1.72	1.63	1.69
60	1.24	1.38	1.29	1.34
75	0.94	1.06	0.98	1.03
90	0.68	0.80	0.72	0.76

**Πίνακας 5.4:** Τιμές του συντελεστή ενίσχυσης των τάσεων της εσωτερικής ίνας της καμπύλωσης για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=+35^\circ\text{C}$ 

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\min \sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$	$\max \sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$	$\text{mean } \sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$	$\text{mean } \sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$ -std dev
0	1.00	1.00	1.00	1.00
15	0.63	0.69	0.67	0.65
22.5	0.46	0.54	0.51	0.48
30	0.32	0.41	0.38	0.35
37.5	0.22	0.32	0.29	0.25
45	0.15	0.25	0.22	0.18
60	0.06	0.17	0.14	0.09
75	0.03	0.14	0.11	0.06
90	0.02	0.14	0.11	0.06

### 5.3 Αρνητική θερμοκρασιακή μεταβολή ( $p_0 - \Delta T$ )

Ομοίως και για την αρνητική θερμοκρασιακή μεταβολή ( $\Delta T=-35^\circ\text{C}$ ). Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζονται οι καμπύλες για την εξωτερική ( $\alpha$ ) και την εσωτερική ( $\beta$ ) ίνα καμπύλωσης.

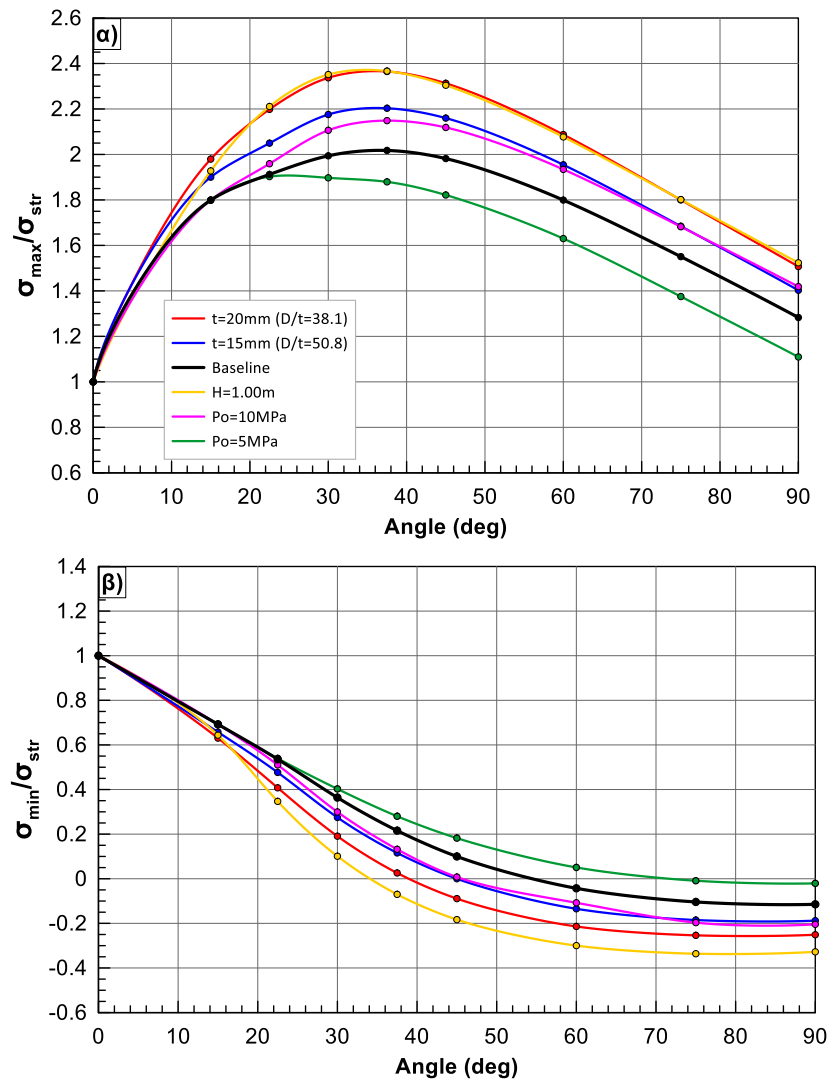
Ομοίως με το υποκεφάλαιο 5.1, στο Σχήμα 5.6 φαίνονται οι καμπύλες της μέσης τιμής και της μέσης τιμής συν μια τυπική απόκλιση για την εξωτερική ίνα καμπύλωσης ( $\alpha$ ) καθώς και της μέσης τιμής και της μέσης τιμής μείον μια τυπική απόκλιση για την εσωτερική ίνα ( $\beta$ ) του συντελεστή ενίσχυσης των τάσεων. Και στα δύο σχήματα, παρουσιάζεται γραμμοσκιασμένο και το αντίστοιχο εύρος των τιμών του συντελεστή ενίσχυσης. Οι Πίνακες 5.5 και 5.6 παρουσιάζουν τις ακριβείς τιμές των καμπυλών του Σχήματος 5.6.

Η αρνητική θερμοκρασιακή μεταβολή προκαλεί την ανάπτυξη των μεγαλύτερων τάσεων για την εξωτερική και εσωτερική ίνα. Αναλυτικότερα, για την εξωτερική ίνα, σύμφωνα με το Σχήμα 5.5α, η μέγιστη τιμή του λόγου των τάσεων αγγίζει το 2.4 για γωνία καμπύλωσης περί τις 37.5 μοίρες, ενώ το κατώτατο όριο παραμένει στο 1.9, όπως και στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις θερμοκρασιακής μεταβολής. Παρατηρείται επίσης (Σχήμα 5.5β) ότι για την εσωτερική ίνα, οι μέγιστες τιμές του λόγου παίρνουν αρνητικές τιμές σε σχέση με αυτές του ευθύγραμμου σκέλους και συγκεκριμένα από 0 έως -0.35 (στην περίπτωση αυτή το ευθύγραμμο σκέλος αναπτύσσει αλγεβρικά αρνητικές τάσεις, επομένως οι τάσεις που εμφανίζονται με αρνητικό πρόσημο στο σχήμα είναι αλγεβρικά θετικές).

Σε ότι αφορά τη μέση τιμή, στο Σχήμα 5.6α παρατηρείται ότι η μέση τιμή του συντελεστή ενίσχυσης για την εξωτερική ίνα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή κοντά στο 2.2 για 37.5deg και μετέπειτα μειώνεται ώσπου στις 90deg να γίνει 1.4 φορές η τάση ενός ευθύγραμμου αγωγού.

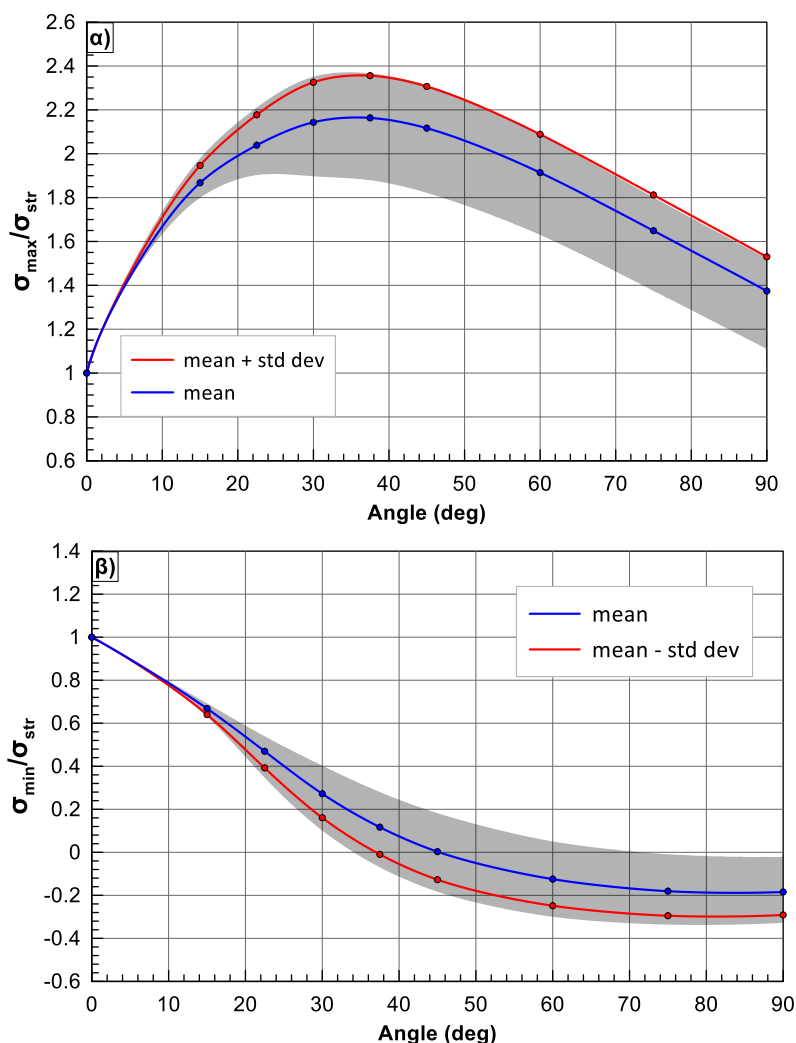
Η καμπύλη της μέσης τιμής του συντελεστή, για την εσωτερική ίνα (Σχήμα 5.6β), μειώνεται ώσπου να πάρει μια τιμή κοντά στο -0.20 του λόγου των τάσεων.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η διακύμανση του εύρους για τις δύο ίνες καμπύλωσης. Στην εξωτερική λαμβάνει τιμές κοντά στο  $\pm 0.20$  για όλες τις γωνίες άνω των 30 μοιρών (από το  $\pm 0.08$  για 15 μοίρες), ενώ στην εσωτερική από  $\pm 0.03$  για 15 μοίρες, το εύρος ξεπερνά το  $\pm 0.10$  για τις υπόλοιπες γωνίες.



**Σχήμα 5.5:** Αποτελέσματα της επίδρασης της γωνίας καμπύλωσης στην εξωτερική (α) και στην εσωτερική (β) ίνα καμπύλωσης του αγωγού. Οι τιμες των τάσεων είναι κανονικοποιημένες ως προς τις τιμες ενός ευθύγραμμου σκέλους αγωγού (για  $p_o=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$ ).





**Σχήμα 5.6:** Συγκεντρικά αποτελέσματα της επίδρασης της γωνίας καμπύλωσης στην εξωτερική ίνα (α) και στην εσωτερική ίνα (β) καμπύλωσης του αγωγού. Οι τιμές των τάσεων είναι κανονικοποιημένες ως προς τις τιμές ενός ευθύγραμμου σκέλους αγωγού (για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$ ).

**Πίνακας 5.5:** Τιμές του συντελεστή ενίσχυσης των τάσεων στην εξωτερική ίνα της καμπύλωσης για  $p_0=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$

$\theta$ (°)	min $\sigma_{max}/\sigma_{str}$	max $\sigma_{max}/\sigma_{str}$	mean $\sigma_{max}/\sigma_{str}$	mean $\sigma_{max}/\sigma_{str}$ +std dev
0	1.00	1.00	1.00	1.00
15	1.80	1.98	1.87	1.95
22.5	1.90	2.21	2.04	2.18
30	1.90	2.35	2.14	2.33
37.5	1.88	2.37	2.16	2.36
45	1.82	2.31	2.12	2.31
60	1.63	2.09	1.91	2.09
75	1.38	1.80	1.65	1.81
90	1.11	1.52	1.37	1.53

**Πίνακας 5.6:** Τιμές του συντελεστή ενίσχυσης των τάσεων στην εσωτερική ίνα της καμπύλωσης για  $p_o=7.5\text{MPa}$ ,  $t=10\text{mm}$  και  $\Delta T=-35\text{ }^\circ\text{C}$ 

$\theta$ ( $^\circ$ )	$\min \sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$	$\max \sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$	$\text{mean } \sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$	$\text{mean } \sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}}$ -std dev
0	1.00	1.00	1.00	1.00
15	0.63	0.69	0.67	0.64
22.5	0.35	0.54	0.47	0.39
30	0.10	0.40	0.27	0.16
37.5	-0.07	0.28	0.12	-0.01
45	-0.18	0.18	0.00	-0.13
60	-0.30	0.05	-0.12	-0.25
75	-0.34	-0.01	-0.18	-0.29
90	-0.33	-0.02	-0.18	-0.29

#### 5.4 Παράδειγμα Εφαρμογής

Κατά τον σχεδιασμό υπόγειων χαλύβδινων αγωγών υψηλής πίεσης ο έλεγχος κατά την φάση λειτουργίας εντοπίζεται στην μέγιστη εφελκυστική (θετική) αξονική τάση που αναπτύσσεται στην εξωτερική ίνα της καμπύλωσης και στην μέγιστη θλιπτική (αρνητική) τάση που είναι δυνατόν να αναπτυχθεί στην εσωτερική ίνα. Και αυτό γιατί τα κριτήρια αστοχίας του αγωγού υπό εφελκυσμό και υπό θλίψη είναι διαφορετικά: εφελκυστική αστοχία-διάρρηξη των συγκολλήσεων ή του αγωγού στην πρώτη περίπτωση και τοπικός λυγισμός του αγωγού στην δεύτερη.

Στο παράδειγμα που ακολουθεί θα υπολογισθούν οι ανωτέρω ακραίες τάσεις αναλυτικά, μέσω των συγκεντρωτικών διαγραμμάτων στα Σχήματα 5.1, 5.4 και 5.6 καθώς και στους αντίστοιχους Πίνακες 5.1 έως 5.6. Οι υπολογισμοί θα γίνουν για ένα τυπικό αγωγό φυσικού αερίου και υδρογόνου με διαφορετικά χαρακτηριστικά από τους αγωγούς χρησιμοποιήθηκαν στις παραμετρικές αναλύσεις, ήτοι:

- Εξωτερική διάμετρος αγωγού  $D=508\text{mm}$  (20'')
- Πάχος τοιχώματος  $t=9.6\text{mm}$
- Όριο διαρροής χάλυβα  $\text{SMYS}=450\text{ MPa}$
- Μέτρο Ελαστικότητας χάλυβα  $E=210 \times 10^6\text{ MPa}$
- Λόγος Poisson χάλυβα  $\nu=0.30$
- Συντελεστής Θερμικής Διαστολής  $\alpha=1.17 \times 10^{-5}$  (ανά  $^\circ\text{C}$ )
- Εσωτερική πίεση σχεδιασμού  $p_o=7.5\text{ MPa}$
- Θερμοκρασιακή μεταβολή  $\Delta T=-35^\circ\text{C} / +45^\circ\text{C}$

- Μέση ακτίνα καμπύλωσης  $R=5D$  (hot bend)
- Γωνία καμπύλωσης  $\theta = 15 - 90\text{deg}$

Ακολούθως θα γίνει σύγκριση με αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων που έγιναν ανεξάρτητα από την παρούσα Διπλωματική Εργασία, με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEA) για τον ίδιο αγωγό και τις συνθήκες λειτουργίας καθώς και για επίχωση με πάχος  $H_{\text{επ}}=1.60\text{m}$  πάνω από την στέψη του αγωγού, με άμμο λατομείου με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Υγρό φαινόμενο ειδικό βάρος  $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$
- Εσωτερική γωνία τριβής  $\phi=36 \text{ deg}$
- Γωνία τριβής επίχωσης-χάλυβα  $\delta=24 \text{ deg}$
- Συντ. οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $K_0=1.0$

ΒΗΜΑ 1: Υπολογισμός αξονικών τάσεων για ευθυγραμμο αγωγό

$$\sigma_{str} = \nu \frac{p_o (D - 2t)}{2t} - E \cdot a \cdot \Delta T$$

Για  $\Delta T=0$   $\sigma_{str} = 0.30 \cdot 7.5 \cdot (508 - 2 \cdot 9.6) / (2 \cdot 9.6) = 57.28 \text{ MPa}$  (εφελκυσμός)

Για  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$   $\sigma_{str} = 57.28 - 210 \cdot 10^3 \cdot 1.17 \cdot 10^{-5} \cdot (-35) = 143.3 \text{ MPa}$  (εφελκυσμός)

Για  $\Delta T=+45^\circ\text{C}$   $\sigma_{str} = 57.28 - 210 \cdot 10^3 \cdot 1.17 \cdot 10^{-5} \cdot (+45) = -53.3 \text{ MPa}$  (θλίψη)

ΒΗΜΑ 2: Υπολογισμός ακραίων (mean  $\pm$  std) αξονικών τάσεων καμπύλωσης –  $p_o=7.5\text{MPa}$ ,  $\Delta T=0$

- Εξωτερική Ίνα: maximum (mean + std)  $\sigma_{\text{max}}/\sigma_{str} = 2.05$  για  $\theta=22.5\text{deg}$  (Πίνακας 5.1)  
 $\sigma_{\text{max}} = 57.28 \cdot 2.05 = 117.42 \text{ MPa}$  (εφελκυσμός)
- Εσωτερική Ίνα: minimum (mean - std)  $\sigma_{\text{min}}/\sigma_{str} = 0.02$  για  $\theta=90.0 \text{ deg}$  (Πίνακας 5.2)  
 $\sigma_{\text{min}} = 57.28 \cdot 0.02 = 1.15 \text{ MPa}$  (εφελκυσμός)

ΒΗΜΑ 3: Υπολογισμός ακραίων (mean  $\pm$  std) αξονικών τάσεων καμπύλωσης –  $p_o=7.5\text{MPa}$ ,  $\Delta T=+45^\circ\text{C}$

- Εξωτερική Ίνα: maximum (mean + std)  $\sigma_{\text{max}}/\sigma_{str} = 2.05$  για  $\theta=22.5\text{deg}$  (Πίνακας 5.3)  
 $\sigma_{\text{min}} = -53.3 \cdot 2.05 = -109.2 \text{ MPa}$  (θλίψη)
- Εσωτερική Ίνα: minimum (mean - std)  $\sigma_{\text{min}}/\sigma_{str} = 0.06$  για  $\theta=90.0 \text{ deg}$  (Πίνακας 5.4)  
 $\sigma_{\text{max}} = -53.3 \cdot 0.06 = -3.19 \text{ MPa}$  (θλίψη)

ΒΗΜΑ 4: Υπολογισμός ακραίων (mean  $\pm$  std) αξονικών τάσεων καμπύλωσης –  $p_o=7.5\text{MPa}$ ,  $\Delta T=-35^\circ\text{C}$

- Εξωτερική Ίνα: maximum (mean + std)  $\sigma_{\max}/\sigma_{\text{str}} = 2.36$  για  $\theta=37.5\text{deg}$  (Πίνακας 5.5)  
 $\sigma_{\max} = 143.3 \cdot 2.36 = \mathbf{338.19}$  MPa (εφελκυσμός)
- Εσωτερική Ίνα: minimum (mean - std)  $\sigma_{\min}/\sigma_{\text{str}} = -0.29$  για  $\theta=90.0\text{ deg}$  (Πίνακας 5.6)  
 $\sigma_{\min} = 143.3 \cdot (-0.29) = -41.56$  MPa (θλίψη)

Με βάση τα ανωτέρω αποτελέσματα ο αγωγός θα πρέπει να ελεγχθεί έναντι εφελκυστικής αστοχίας της εξωτερικής ίνας στην καμπύλωση για αξονική τάση  $\sigma_{\max} = 312.39$  MPa και θλιπτικής αστοχίας της εξωτερικής ίνας για αξονική τάση  $\sigma_{\min} = -109.2$  MPa.

Τέλος, στον Πίνακα 5.7 οι ανωτέρω αναλυτικές τιμές των ακραίων αξονικών τάσεων συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τις αριθμητικές FEA αναλύσεις. Η συμφωνία μεταξύ των δύο αυτών ανεξάρτητων εκτιμήσεων είναι ικανοποιητική, για προκαταρκτικό τουλάχιστον σχεδιασμό του αγωγού, λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη ότι οι αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για αγωγό με διαφορετικά χαρακτηριστικά από τους αγωγούς χρησιμοποιήθηκαν στις παραμετρικές αναλύσεις. Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι σε όλες πρακτικά τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν οι αναλυτικές εκτιμήσεις είναι λίγο έως πολύ δυσμενέστερες από τις αριθμητικές FEA αναλύσεις.

**Πίνακας 5.7:** Σύνοψη και σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών FEA εκτιμήσεων των ακραίων αξονικών τάσεων στην εξωτερική και την εσωτερική ίνα του αγωγού

	Εξωτερική Ίνα		Εσωτερική Ίνα	
	Αναλυτική (mean+std)	FEA (max)	Αναλυτική (mean-std)	FEA (min)
<b>p<sub>0</sub></b>	117.42 MPa (για $\theta=22.5\text{deg}$ )	120.58 MPa (για $\theta=20.0\text{deg}$ )	1.15 MPa (για $\theta=90\text{deg}$ )	1.84 MPa (για $\theta=90\text{deg}$ )
<b>p<sub>0</sub>+45°C</b>	-109.27MPa (για $\theta=22.5\text{deg}$ )	-112.20 MPa (για $\theta=20.0\text{deg}$ )	-3.19 MPa (για $\theta=90\text{deg}$ )	-2.0 MPa (για $\theta=90\text{deg}$ )
<b>p<sub>0</sub>-35°C</b>	338.19 MPa (για $\theta=37.5\text{deg}$ )	310.40 MPa (για $\theta=45\text{deg}$ )	-41.56 MPa (για $\theta=90\text{deg}$ )	-22.0 MPa (για $\theta=90\text{deg}$ )

# Κεφάλαιο 6

## Συμπεράσματα

---

### 6.1 Αριθμητική Προσομοίωση

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής ήταν ο καθορισμός της επίδρασης της γωνίας καμπύλωσης στην εντατική κατάσταση των καμπύλων τμημάτων χαλύβδινων υπόγειων αγωγών υψηλής πίεσης και η υιοθέτηση ενός «συντελεστή καμπύλωσης» για την ποσοτική εκτίμηση της επίδρασης αυτής. Οι αναλύσεις για τον υπολογισμό των ανωτέρω έγιναν για διάφορες γωνίες καμπύλωσης, από 15 έως και 90 μοίρες, καλύπτοντας έτσι όλες τις πιθανές γωνίες καμπύλωσης που μπορεί να συναντήσει ένας αγωγός κατά μήκος της διαδρομής του. Συνεπώς, με γνώμονα προηγούμενες μελέτες και βιβλιογραφία, η διακριτοποίηση των γωνιών έγινε με μικρότερο βήμα για γωνίες από 15 έως 45 μοίρες και με μεγαλύτερο για γωνίες άνω των 45 μοιρών. Επίσης, οι αναλύσεις έγιναν για hot bends με μέση ακτίνα καμπύλωσης  $R=5D$  ( $D$  είναι η διάμετρος του αγωγού), δεδομένου ότι η επίδραση της είναι πρακτικά αμελητέα για field bends ( $R=40D$ ) και για elastic bends ( $R>400D$ ).

Λόγω της επαναληπτικής φύσεως της διαδικασίας βελτιστοποίησης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της Διπλωματικής εργασίας, χρειάστηκε ο καθορισμός ενός βέλτιστου προσομοιώματος αγωγού που θα εξασφάλιζε την επιθυμητή ακρίβεια των υπολογισμών με λογικό χρόνο ανάλυσης. Ως εκ τούτου, πραγματοποιήθηκε αρχικά παραμετρική ανάλυση για τον καθορισμό ενός βέλτιστου μήκους ευθύγραμμου τμήματος του αγωγού, εν συνεχεία του μήκους στοιχείου (διακριτοποίηση του αγωγού σε Πεπερασμένα Στοιχεία) και τέλος, των συνοριακών συνθηκών και την πιθανή επιρροή τους στις τάσεις και παραμορφώσεις.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτές τις αναλύσεις έχουν ως εξής:

- 1) Η επίδραση του ευθύγραμμου σκέλους του αγωγού σταματάει να επηρεάζει τις τιμές των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στη καμπύλωση για τιμές μεγαλύτερες των 200m. Συντηρητικά, επιλέχθηκε μήκος ευθύγραμμου σκέλους περί τα 250m, ώστε να εξασφαλιστεί το αδιάβλητο των αποτελεσμάτων των αναλύσεων σε όσο το δυνατόν

μεγαλύτερο βαθμό, κάνοντας παράλληλα την απαραίτητη βελτιστοποίηση του χρόνου εκτέλεσης των αναλύσεων.

- 2) Η αναζήτηση μήκους του στοιχείου που δεν προκαλεί αλλοίωση των εντατικών μεγεθών της καμπύλωσης, πράγμα πιθανό για αρκετά μεγάλα μήκη διακριτοποίησης περί το 1m, οδήγησε στην επιλογή διακριτοποίησης της καμπύλωσης σε τμήματα (στοιχεία) μήκους 0.25m έτσι ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος αλλοίωσης των εντατικών μεγεθών της γωνίας και παράλληλα να υπάρχει και αρκετά μεγάλη ακρίβεια στα αποτελέσματα.
- 3) Από τη διερεύνηση που διεξήχθη για την επίδραση των συνόρων του αγωγού, και πως αυτά επιδρούν και επηρεάζουν τις τιμές των εντατικών μεγεθών της γωνίας, επιβεβαιώθηκε το γεγονός ότι η ταυτόχρονη απελευθέρωση τόσο της οριζόντιας και εγκάρσιας οριζόντιας μετατόπισης, όσο και της στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα στο ένα άκρο του αγωγού δεν προκαλεί καμία σημαντική αυξομείωση στις τιμές των εντατικών μεγεθών στην περιοχή της γωνίας, παρά μόνο σε ένα περιορισμένο μήκος (δηλ. περί τα 100D) του ευθύγραμμου τμήματος πλησίον του ελεύθερου άκρου.

## 6.2 Επίδραση Καμπύλωσης - Γενικά

Έχοντας βελτιστοποιήσει το αριθμητικό προσομοίωμα του αγωγού, το επόμενο βήμα ήταν η διερεύνηση της επίδρασης της γωνίας καμπύλωσης στην εντατική κατάσταση της ίδιας της καμπύλωσης του αγωγού. Ο κύριος στόχος ήταν η επίδραση της γωνίας καμπύλωσης στις τάσεις στην περιμέτρο του αγωγού (hoop stresses), καθώς και οι αξονικές τάσεις τόσο στην εξωτερικής, όσο και στην εσωτερικής ίνας καμπύλωσης, ήταν. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

- 4) Η οποιαδήποτε αλλαγή στη γωνία καμπύλωσης του αγωγού δεν προκαλεί καμία επίδραση ή αλλαγή στις τάσεις της περιμέτρου (hoop stresses) του αγωγού, οι οποίες για όλες τις γωνίες (από 0 έως 90 μοίρες) παραμένουν σταθερές, ίσες με τις αντίστοιχες τάσεις στο ευθύγραμμο σκέλος.
- 5) Η αλλαγή της γωνίας καμπύλωσης προκαλεί αυξομείωση των τάσεων της εξωτερικής ίνας του αγωγού. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μεγιστοποίηση της αξονικής τάσης στην εξωτερική ίνα για γωνίες καμπύλωσης μεταξύ 20° και 30°.
- 6) Η αλλαγή της γωνίας καμπύλωσης προκαλεί μονοσήμαντη μείωση της αξονικής τάσης στην εσωτερική ίνα του αγωγού, με μέγιστη μείωση για γωνία καμπύλωσης ίση με 90°, όπου ο

«συντελεστής καμπύλωσης» μπορεί να λάβει μηδενικές ή ακόμα και μικρές σχετικά αρνητικές τιμές.

### 6.3 Επίδραση Καμπύλωσης: $\rho_0 \neq 0$ , $\Delta T = 0$

Όπως προαναφέρθηκε, η επίδραση της καμπύλωσης επηρεάζει τόσο την εξωτερική όσο και την εσωτερική ίνα του αγωγού, μολονότι με διαφορετικό τρόπο. Ο «συντελεστής καμπύλωσης» για τις δύο περιπτώσεις επηρεάζεται από τη μηδενική θερμοκρασιακή μεταβολή παράγοντας τα εξής συμπεράσματα:

- 7) Η επίδραση της καμπύλωσης στην εξωτερική ίνα του αγωγού έχει ως αποτέλεσμα οι τάσεις να λάβουν ένα εύρος μέγιστων τιμών, περί γωνία καμπύλωσης ίση με 22.5 μοίρες, που κυμαίνεται από 1.9 έως 2.1 φορές εκείνων για ευθύγραμμο αγωγό. Η μέση τιμή του αντίστοιχου «συντελεστή καμπύλωσης» γίνεται περίπου ίση με 2.0, ενώ η καμπύλη της μέσης τιμής συν μία τυπική απόκλιση μεγιστοποιείται με τιμή του «συντελεστή καμπύλωσης» να ξεπερνά το 2.0

Παρατηρείται ότι η μέση τιμή για γωνίες καμπύλωσης μεγαλύτερες από 22.5 μοίρες φθίνει σχεδόν γραμμικά έως ότου πάρει μια ελάχιστη τιμή, για γωνία ίση με 90°, κατά 20% περίπου μειωμένη σε σχέση με έναν ευθύγραμμο αγωγό, ενώ η καμπύλη της μέσης τιμής συν μία τυπική απόκλιση ελαχιστοποιείται όταν για τις 90 μοίρες πάρει τιμές ίσες με το 90% των τάσεων ενός ευθύγραμμου σκέλους.

Τέλος, σε ότι αφορά το εύρος των τιμών του «συντελεστή καμπύλωσης» στην εξωτερική ίνα, παρατηρείται ότι για γωνίες καμπύλωσης 15° κυμαίνεται σε  $\pm 0.07$ , ενώ όσο η γωνία μεγαλώνει, το εύρος των τιμών μεταξύ των μεγίστων και ελαχίστων τάσεων της εξωτερικής ίνας καμπύλωσης αυξάνει. Αριθμητικά και γραφικά, προκύπτει ότι το μέγιστο εύρος τιμών που λαμβάνεται για γωνίες καμπύλωσης 90° είναι της τάξης του  $\pm 0.10$ .

- 8) Η επίδραση της καμπύλωσης στην εσωτερική ίνα του αγωγού έχει ως αποτέλεσμα τη μονοσήμαντη μείωση των τάσεων αυξανόμενης της γωνίας καμπύλωσης, δηλαδή τη μείωση της τιμής του «συντελεστή καμπύλωσης». Η επίδραση αυτή σταθεροποιείται πρακτικά για γωνίες καμπύλωσης άνω των 60°. Οι τιμές του λόγου των τάσεων λόγω της επίδρασης της καμπύλωσης στη μέση τιμή και στη μέση τιμή μείον μία τυπική απόκλιση, μειώνονται κάτω από το 10% των τιμών ενός ευθύγραμμου σκέλους. Ειδικά η δεύτερη, τείνει να μηδενιστεί για γωνίες καμπύλωσης μεγαλύτερες των 75°.

Επίσης, παρατηρείται ότι το εύρος των τιμών για την εσωτερική ίνα παραμένει σχεδόν σταθερό για όλες τις γωνίες καμπύλωσης. Συγκεκριμένα, προκύπτει ότι για γωνία 15° το

εύρος των τιμών κυμαίνεται σε  $\pm 0.03$ , ενώ για μεγαλύτερες γωνίες καμπύλωσης και μέχρι τις  $90^\circ$  το εύρος παίρνει τιμές  $\pm 0.04$ .

#### 6.4 Επίδραση Καμπύλωσης: $p_o+\Delta T$

Ο «συντελεστής καμπύλωσης» για την εξωτερική και την εσωτερική ίνα του αγωγού επηρεάζεται από τη θετική θερμοκρασιακή μεταβολή ως ακολούθως:

- 9) Όπως και για τη μηδενική θερμοκρασιακή μεταβολή, έτσι και για την θετική ο λόγος των μεγίστων τάσεων που αναπτύσσονται για την εξωτερική ίνα κυμαίνονται από 1.9 έως 2.1 φορές εκείνων ενός ευθύγραμμου αγωγού. Παράλληλα, παρατηρείται ότι η μέση τιμή του «συντελεστή καμπύλωσης» για την εξωτερική ίνα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή για  $22.5^\circ$  και μετέπειτα μειώνεται ώσπου στις  $90^\circ$  να λάβει τιμές του λόγου των τάσεων κατά 30% μειωμένες σε σχέση με έναν ευθύγραμμο αγωγό.

Παρατηρείται ότι το εύρος τιμών για την εξωτερική ίνα ακολουθεί την ίδια πορεία με αυτό της μηδενικής θερμοκρασιακής μεταβολής. Με άλλα λόγια, το εύρος κυμαίνεται σε  $\pm 0.02$  για γωνία καμπύλωσης  $15^\circ$  και  $\pm 0.04$  για γωνία καμπύλωσης  $90^\circ$ .

- 10) Οι τάσεις που αναπτύσσονται στην εσωτερική ίνα μειώνονται συστηματικά ώσπου να γίνουν περίπου 15% αυτών για ευθύγραμμο σκέλος για γωνίες καμπύλωσης  $90^\circ$ . Η καμπύλη της μέσης τιμής του συντελεστή μειώνεται ώσπου να γίνει ίση με το 10% του ευθύγραμμου. Επίσης, παρατηρείται μείωση του εύρους διασποράς του «συντελεστή καμπύλωσης» από  $\pm 0.07$  για γωνία καμπύλωσης  $15^\circ$  σε  $\pm 0.05$  για γωνία  $90^\circ$ .

#### 6.5 Επίδραση Καμπύλωσης: $p_o-\Delta T$

Ο «συντελεστής καμπύλωσης» για την εξωτερική και την εσωτερική ίνα του αγωγού επηρεάζεται από τη αρνητική θερμοκρασιακή μεταβολή ως ακολούθως:

- 11) Συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, η αρνητική θερμοκρασιακή μεταβολή προκαλεί την πιο έντονη ενίσχυση των αξονικών τάσεων στην εξωτερική ίνα του αγωγού και συνεπώς την εντονότερη προσαύξηση στη μέγιστη τιμή του «συντελεστή καμπύλωσης». Πιο αναλυτικά, για την εξωτερική ίνα, η μέγιστη τιμή του συντελεστή αγγίζει το 2.4 για γωνία καμπύλωσης περί τις  $37.5^\circ$ , ενώ το κατώτατο όριο παραμένει ίσο προς 1.9, όπως και στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις θερμοκρασιακής μεταβολής. Η μέση τιμή του «συντελεστή καμπύλωσης» λαμβάνει μέγιστη τιμή περί το 2.2 για  $37.5^\circ$  και μετέπειτα μειώνεται ώσπου στις  $90^\circ$  να γίνει ίση προς 1.4. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η διακύμανση



του εύρους διασποράς του «συντελεστή καμπύλωσης» το οποίο λαμβάνει τιμές  $\pm 0.08$  για  $15^\circ$ , ενώ για όλες τις γωνίες άνω των  $30^\circ$  το εύρος διασποράς βρίσκεται πλησίον στο  $\pm 0.20$ .

- 12) Συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, η αρνητική θερμοκρασιακή μεταβολή προκαλεί πιο έντονη απομείωση των αξονικών τάσεων στην εσωτερική ίνα του αγωγού. Παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές του «συντελεστή καμπύλωσης» παίρνουν αρνητικές τιμές σε σχέση με αυτές του ευθύγραμμου σκέλους και συγκεκριμένα από 0 έως  $-0.35$  (στην περίπτωση αυτή το ευθύγραμμο σκέλος αναπτύσσει αλγεβρικά αρνητικές τάσεις, επομένως οι τάσεις που εμφανίζονται με αρνητικό πρόσημο στο σχήμα είναι αλγεβρικά θετικές). Η καμπύλη της μέσης τιμής του «συντελεστή καμπύλωσης», για την εσωτερική ίνα, μειώνεται ώσπου να πάρει μια τιμή κοντά στο  $-0.20$ . Το εύρος διασποράς του «συντελεστή καμπύλωσης» λαμβάνει τιμές από  $\pm 0.03$  για  $15^\circ$ , ενώ για τις υπόλοιπες γωνίες καμπύλωσης το εύρος ξεπερνά το  $\pm 0.10$ .

## Βιβλιογραφία

---

- ANSYS (2018), "Academic Research Mechanical, Release 19.2", ANSYS, Inc.
- API Specification 5L (2018). "Specification for line pipe", Exploration and Production Department, 46<sup>th</sup> edition, June.
- API American Petroleum Institute (2021), "Welding of Pipelines and Related Facilities", API Standard 1104, 22<sup>nd</sup> edition, July.
- ASCE (1984). "Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems", Research Report prepared by the *Committee on Gas and Liquid Fuel Pipelines* (ISBN 0-87262-428-5).
- ASCE (2001), Guidelines for the Design of Buried Steel Pipes. American Lifeline Alliance, July.
- ASCE - ALA (2005), Guidelines for the Design of Buried Steel Pipes. American Lifeline Alliance, July 2001 with addenda through February 2005.
- ASME (1969). "Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Design by Analysis", Section III and VIII, Division 2.
- ASME/ANSI (1992). "Pipeline Transportation Systems for liquid Hydrocarbons and Other Liquids", B31.4-1992 Edition.
- ASME (2015). "Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1".
- Denys, R., (2007). "Interaction between material properties, inspection accuracy and defect acceptance levels in strain based pipeline design", *Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines, NATO Advanced Research Workshop*, Springer.
- European Committee for Standardization (CEN), (2019). "Petroleum and natural gas industries — Steel pipe for pipeline transportation systems (EN ISO 3189:2019)", Brussels.
- European Committee for Standardization (CEN), (2013). "Gas Supply Systems - Pipelines for Maximum Operating Pressure over 16bar - Functional Requirements (EN 1594:2013)", Brussels.
- European Committee for Standardization (CEN), (2004). "Eurocode: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1: 2004)", Brussels.
- European Committee for Standardization (CEN), (2004). "Eurocode: Design of structures for earthquake resistance, Part 4: Design of structures for earthquake resistance, part 4: Silos, tanks and pipelines (EN 1998-4: 2004)", Brussels.

- Esquirel-Diaz, R., (1967). "Pull-out Resistance of Deeply Buried Anchors in Sand", M.S. Thesis, Duke University, Durham, North Carolina.
- Meyerhof, G.G., (1955). "Influence of Roughness of Base and Ground Water Conditions on the Ultimate Bearing capacity of Foundations", *Geotechnique*, 5, 227-242.
- Mohr, W., (2003). "Strain-Based Design of Pipelines", *Report No. 45892 GTH submitted to US Department of Interior, Mineral Management Service-US Department of Transportation, Research and Special Programs Administration*.
- O'Rourke M.J. and X. Liu (1999). "Response of buried pipelines subject to earthquake effects", *Monograph Series MCEER*, University at Buffalo, U.S.A., 250 pages.
- Ramberg, W. and Osgood, W.R. (1943). "Description of stress-strain curve by three parameters", Technical Note 902, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington D.C.
- Singhal, A.C., (1980). "Strength Characteristics of Buried Jointed Pipelines", report to the Engineering Foundation and ASCE, Grant No. RC-A-77-6A.
- Trautmann, C.H. and O'Rourke, T.D., (1983). "Load-Displacement Characteristics of Pipe Affected by Permanent Earthquake Ground Movements", *International Symposium on Lifeline Earthquake Engineering*, Portland, Oregon, ASME, PVP-77, 254-262.
- Trautmann, C.H. and O'Rourke, T.D., (1985a). "Uplift Force-Displacement Response of Buried Pipe", *Journal of Geotechnical Engineering*, 111 (9), 1061-1076.
- Trautmann, C.H. and O'Rourke, T.D., (1985b). "Lateral Force-Displacement Response of Buried Pipe", *Journal of Geotechnical Engineering*, 111 (9), 1077-1092.
- Vitali, L., Bartolini, L., Askeim, D., Reek, R. and Levond, E., (2005). "Hot Pipi II Project Experimental Test and FE Analyses", *24<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, June, Halkidiki, Greece.

# Παράρτημα **A**

## Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων

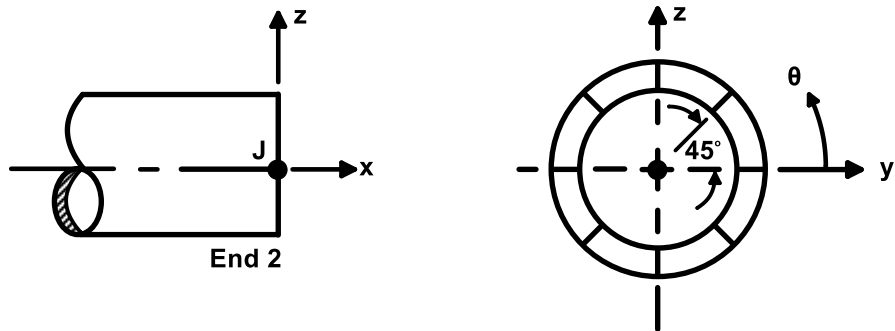
---

### A.1 Προσομοίωμα Πεπερασμένων Στοιχείων

Η ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων του αγωγού λαμβάνει υπόψη μεγάλες μετατοπίσεις, υπό την έννοια ότι στην επαναληπτική διαδικασία επίλυσης οι εξισώσεις ισορροπίας ικανοποιούνται στην τρέχουσα παραμορφωμένη κατάσταση. Επιπλέον, λαμβάνει υπόψη την ελαστοπλαστική συμπεριφορά του χάλυβα, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2. Είναι επομένως μη γραμμική, τόσο από άποψη γεωμετρίας όσο και από άποψη υλικού.

Η συμπεριφορά του αγωγού προσομοιώνεται με ισοπαραμετρικά τρισδιάστατα στοιχεία σωλήνα 2-κόμβων, τα οποία έχουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός κοίλου σωλήνα, με τις διαστάσεις της εξεταζόμενης εκάστοτε διατομής του αγωγού. Σε σχέση με τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα στοιχεία δοκού, τα εν λόγω στοιχεία σωλήνα δίνουν την πρόσθετη δυνατότητα απ'ευθείας εφαρμογής εσωτερικής πίεσης, παράλληλα προς την εξωτερικά επιβαλλόμενη φόρτιση.

Στην περίμετρο του σωλήνα ορίζονται οκτώ (8) σημεία ολοκλήρωσης (integration points), που παρουσιάζονται στο Σχήμα A.1 (ο άξονας  $z$  ταυτίζεται με την κατακόρυφο). Οι τάσεις σε κάθε διατομή υπολογίζονται σε αυτά τα σημεία, λαμβάνοντας υπόψη τη συνεισφορά των αξονικών δυνάμεων, των καμπτικών ροπών και της εσωτερικής πίεσης του σωλήνα. Η ύπαρξη οκτώ (8) σημείων ολοκλήρωσης επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό τάσεων και παραμορφώσεων ακόμη και στην περιοχή των μεγάλων παραμορφώσεων, όταν τμήμα της διατομής του αγωγού έχει διαρρεύσει.



**Σχήμα Α.1:** Σημεία ολοκλήρωσης στη διατομή των στοιχείων σωλήνα

### A.2 Προσομοίωση Υλικού Κατασκευής Αγωγού

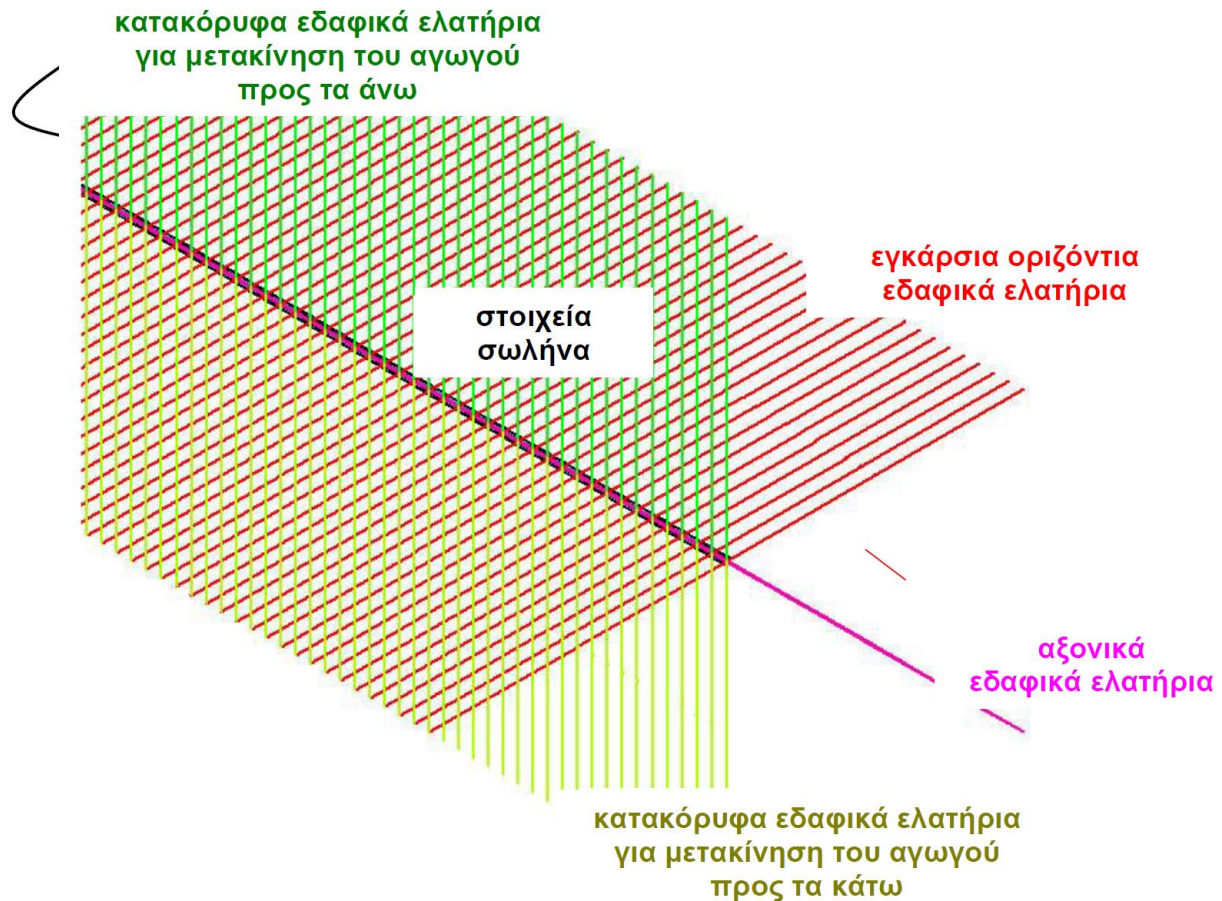
Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του χάλυβα εισάγεται στο προσομοίωμα ως μια πολυγραμμική καμπύλη βασισμένη στην μαθηματική σχέση Ramberg-Osgood (Κεφ. 2). Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν 100 γραμμικά τμήματα για κάθε έναν από τους δύο κλάδους του νόμου του υλικού, σε εφελκυσμό και σε θλίψη. Ο λόγος του Poisson έχει ληφθεί ίσος προς 0.30.

### A.3 Ισοδύναμα Ελατήρια Εδάφους.

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

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

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



**Σχήμα Α.2:** Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους-αγωγού με ελαστοπλαστικά ελατήρια

### Αξονικά ελατήρια

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

$$t_u = \frac{\pi D}{2} \gamma \cdot H \cdot (1 + K_0) \tan \delta \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (\text{A.1})$$

όπου:

$K_0$  = συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών

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

$D$  = εξωτερική διάμετρος αγωγού

$\gamma$  = υπό άνωση ειδικό βάρος επίχωσης

$\delta$  = γωνία τριβής μεταξύ αγωγού και επίχωσης

Ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας του αγωγού, η γωνία τριβής  $\delta$  είναι ίση με το  $50 \pm 100\%$  της γωνίας τριβής  $\varphi$  της επίχωσης. Σε αυτήν την μελέτη χρησιμοποιείται τιμή γωνίας  $\delta=2/3\varphi$  (λεία επιφάνεια αγωγού).

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

#### Εγκάρσια οριζόντια ελατήρια:

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

Για τα μη συνεκτικά εδάφη, η σχέση μεταξύ της δύναμης  $p$  ανά μονάδα μήκους του αγωγού και της οριζόντιας μετατόπισης  $y$ , εκφράζεται από μια υπερβολική σχέση της μορφής [Trautmann and O'Rourke, 1985a]:

$$p = \frac{y}{A + B \cdot y} \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (\text{A.2})$$

όπου:

$$A = 0.15 \gamma_u / \rho_u \quad (\text{A.3})$$

$$B = 0.85 / \rho_u \quad (\text{A.4})$$

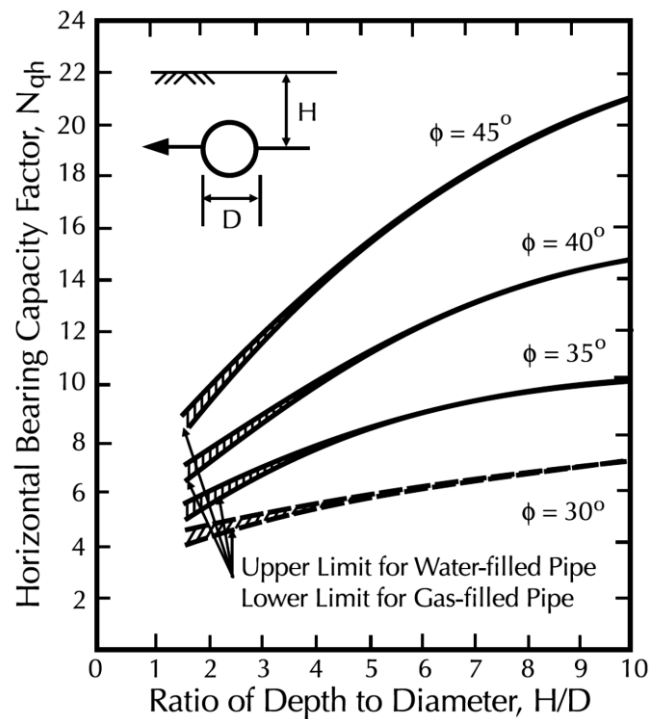
$$\rho_u = \gamma H N_{qh} D \quad (\text{A.5})$$

$N_{qh}$  = συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας που υπολογίζεται συντηρητικά από το Σχήμα Γ.3 [Trautman and O'Rourke, 1983a].

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

0.02 έως 0.03 (H+D/2) για πυκνή άμμο

Αποδεικνύεται ότι, στην περίπτωση προσάρτησης μιας διγραμμικής ελαστοπλαστικής σχέσης στην Εξ. Γ.2 για  $\rho=0.5\rho_u$ , οι προηγούμενες τιμές του  $\gamma_u$  θα πρέπει να πολλαπλασιασθούν επί 0.26.



**Σχήμα Α.3:** Συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας (Trautmann and O'Rourke, 1983)

Εγκάρσια κατακόρυφα ελατήρια (προς τα κάτω)

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

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

$$q_u = \gamma \cdot H \cdot N_q \cdot D + 0.5 \cdot \gamma \cdot D^2 \cdot N_\gamma \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (A.6)$$

όπου:

$N_q, N_\gamma =$  συντελεστές φέρουσας ικανότητας για λωριδωτά θεμέλια που φορτίζονται κατακόρυφα προς τα κάτω-υπολογίζονται από το Σχήμα Α.4 συναρτήσει της γωνίας τριβής  $\phi$  (Meyerhof, 1955),

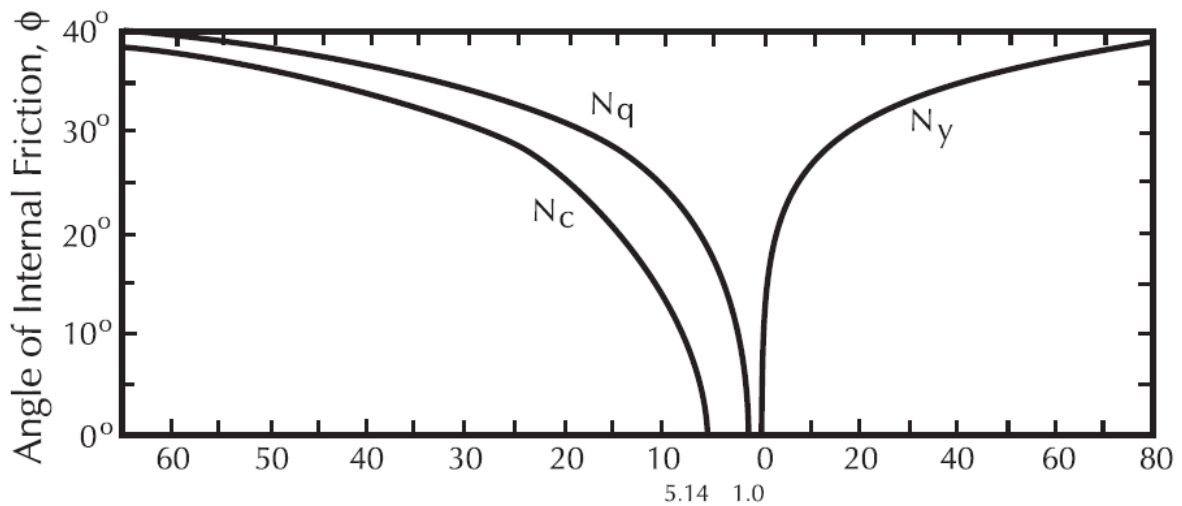
$\gamma =$  υπό άνωση ειδικό βάρος επίχωσης



$H=$  βάθος επίχωσης του άξονα του αγωγού

$D=$  διάμετρος του αγωγού

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



**Σχήμα Α.4:** Συντελεστές κατακόρυφης (προς τα κάτω) φέρουσας ικανότητας, προτεινόμενοι από τον Meyerhof (1955).

#### Εγκάρσια κατακόρυφα ελατήρια (προς τα άνω)

Με βάση δοκιμές που εκτελέστηκαν σε αγωγούς θαμμένους σε ξηρή ομοιόμορφη άμμο, έχειδειχθεί ότι ισχύει η ακόλουθη υπερβολική σχέση μεταξύ της δύναμης  $q$  και της κατακόρυφης προς τα άνω μετατόπισης  $z$  [Trautmann and O'Rourke 1985b]:

$$q = \frac{z}{A + B \cdot z} \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (\text{A.7})$$

όπου:

$$A = 0.07 z_u / q_u \quad (\text{A.8})$$

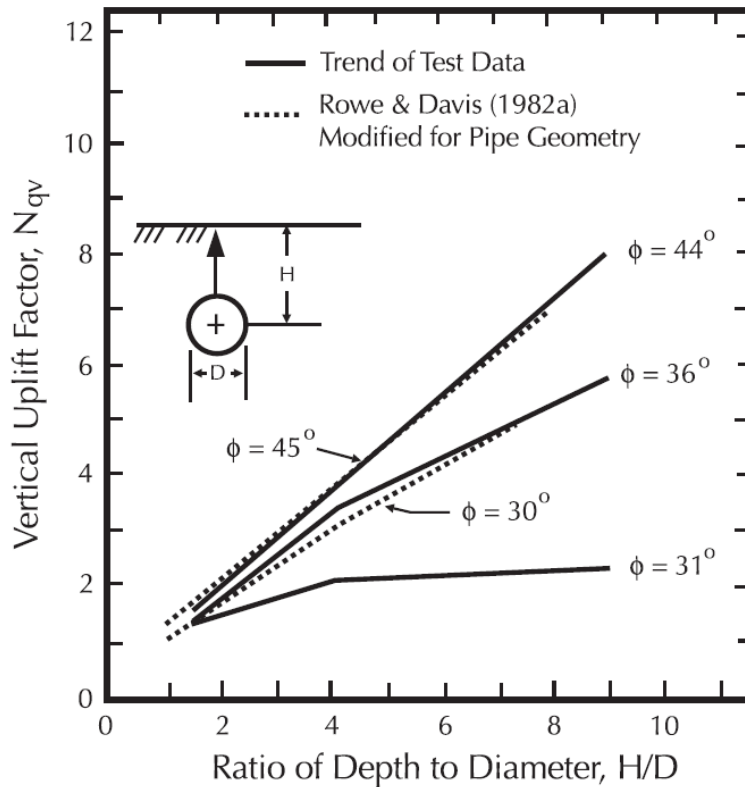
$$B = 0.93 / q_u \quad (\text{A.9})$$

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

$$q_u = \gamma \cdot H \cdot N_{qv} \cdot D \quad (\text{A.10})$$

όπου ο συντελεστής κατακόρυφης ανύψωσης  $N_{qv}$  δίνεται στο Σχήμα Α.5 ως συνάρτηση του λόγου του βάθους του άξονα του αγωγού προς τη διάμετρο  $H/D$  και της γωνίας τριβής της επίχωσης  $\phi$ .

Με βάση τις δοκιμές πεδίου [Esquivel-Diaz, 1967, Trautman and O'Rourke 1983a], η τιμή της προς τα άνω μετατόπισης που απαιτείται για έναρξη της διαρροής είναι  $z_{u,up} = (0.010 \div 0.015)H$ , για πυκνές έως χαλαρές άμμους αντίστοιχα. Όταν στην Εξ. Α.7 προσαρμόζεται μια διγραμμική ελαστοπλαστική έκφραση για  $q=0.50q_u$ , το  $z_{u,up}$  θα πρέπει να πολλαπλασιασθεί επί 0.13 περίπου.



**Σχήμα Α.5:** Συντελεστής κατακόρυφης (προς τα άνω) φέρουσας ικανότητας (ASCE 1984).

#### A.4 Μη Γραμμικός Αλγόριθμος Επίλυσης

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

όπου:

$[K]$  = μητρώο δυσκαμψίας

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

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

Στην περίπτωση που το μητρώο δυσκαμψίας [K] αποτελεί συνάρτηση των αγνώστων τιμών των βαθμών ελευθερίας, ή των παραγώγων αυτών, τότε η Εξίσωση Α.11 είναι μη γραμμική. Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την επίλυση τέτοιων μη γραμμικών εξισώσεων είναι η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson, η οποία συνοψίζεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$[K_i^T] \{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F_i^{nr}\} \quad (\text{A.12})$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\} \quad (\text{A.13})$$

όπου:

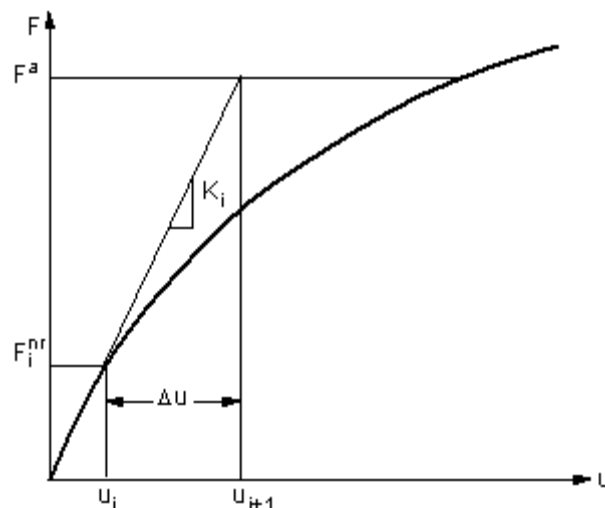
$[K_i^T]$  = εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας

i = δείκτης που υποδηλώνει την τρέχουσα επανάληψη

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

Σε κάθε επανάληψη, τα  $[K_i^T]$  και  $\{F_i^{nr}\}$  υπολογίζονται συναρτήσει των τιμών του  $\{u_i\}$ . Έτσι, το δεξί τμήμα της Εξίσωσης Γ.12 είναι ουσιαστικά το διάνυσμα των απομένοντων εκτός-ισορροπίας φορτίων. Αποτελεί, δηλαδή, μέτρο της «απόκλισης» από την τελική λύση.

Μια επανάληψη της μεθόδου Newton-Raphson παριστάνεται γραφικά στο Σχήμα Α.6, για ένα προσομοίωμα με ένα μόνο βαθμό ελευθερίας.

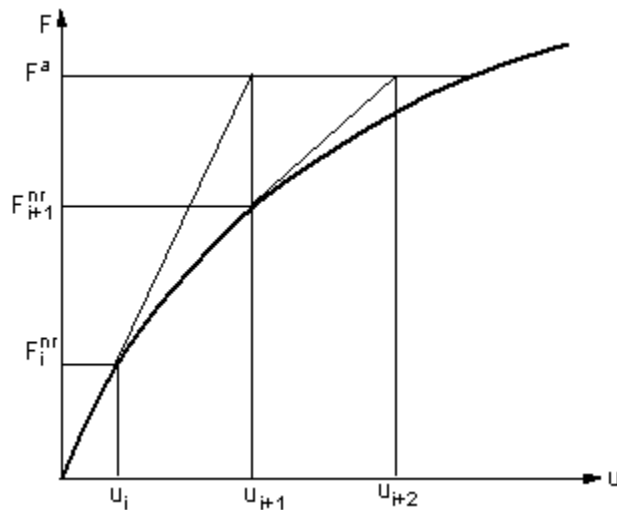


**Σχήμα Α.6:** Επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson – μία επανάληψη.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα Α.7, για να επιτευχθεί σύγκλιση απαιτούνται περισσότερες από μία επαναλήψεις Newton-Raphson. Έτσι, ο αλγόριθμος επίλυσης είναι ο εξής:

- i. Υποθέτουμε τις αρχικές τιμές του διανύσματος  $\{u_0\}$ . Συνήθως, το  $\{u_0\}$  λαμβάνει τη λύση της προηγούμενης επανάληψης, ενώ για την πρώτη επανάληψη θεωρείται:  $\{u_0\} = 0$
- ii. Υπολογίζουμε το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας  $[K_i^T]$  και τις επικόμβιες δράσεις  $\{F_i^{nr}\}$  για την τρέχουσα κατάσταση  $\{u_i\}$ .
- iii. Υπολογίζουμε το διάνυσμα  $\{\Delta u_i\}$  από την εξίσωση Α.12.
- iv. Προσθέτουμε το  $\{\Delta u_i\}$  στο  $\{u_i\}$  για να υπολογίσουμε τις μετατοπίσεις στην επόμενη κατάσταση  $\{u_{i+1}\}$  (Εξίσωση Α.13).
- v. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα ii-iv έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση.

Στο Σχήμα Α.7 φαίνεται η επόμενη επανάληψη (i+1) του παραδείγματος του Σχήματος Α.6. Οι ακόλουθες επαναλήψεις θα πραγματοποιηθούν με αντίστοιχο τρόπο.



**Σχήμα Α.7:** Επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson – η επόμενη επανάληψη.

Η λύση που λαμβάνεται στο τέλος της επαναληπτικής διαδικασίας αντιστοιχεί σε ένα φορτίο  $\{F^a\}$ . Έτσι, η τελική λύση θα είναι σε ισορροπία, με το διάνυσμα των επικόμβιων φορτίων  $\{F_i^{nr}\}$ , που υπολογίζονται από τις εσωτερικές τάσεις στην τρέχουσα κατάσταση, να είναι ίσο με το διάνυσμα των

εξωτερικά επιβαλλόμενων επικόμβιων  $\{F^a\}$  (ή τουλάχιστον, εντός των ορίων ανοχής). Αντίθετα, καμία από τις ενδιάμεσες λύσεις δε βρίσκεται σε ισορροπία.

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

$$[K_{n,i}^T] = \{\Delta u_i\} - \{F_n^a\} - \{F_{n,i}^{nr}\} \quad (\text{A.14})$$

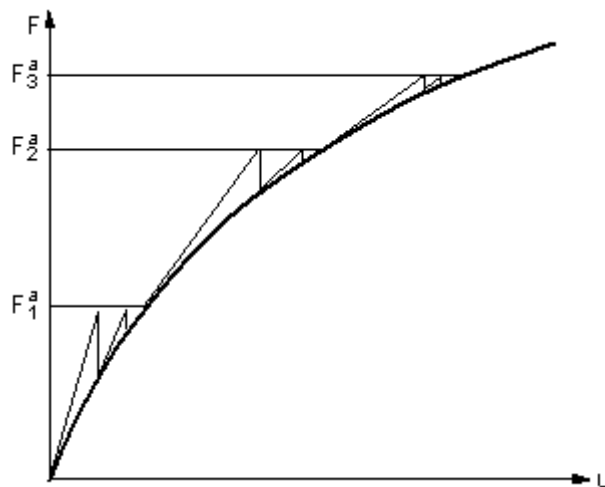
όπου:

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

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

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

Ο παραπάνω αλγόριθμος ονομάζεται επαυξητική μέθοδος Newton-Raphson, παριστάνεται γραφικά στο Σχήμα Α.8, και είναι αυτός που συνήθως χρησιμοποιείται για αριθμητικές αναλύσεις αγωγών σε διασταυρώσεις με ενεργά ρήγματα.



**Σχήμα Α.8:** Επαυξητική μέθοδος Newton-Raphson.