ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΣΕ ΔΟΜΙΚΕΣ ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ

Αφροδίτη Τζανέτου

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2021

© 2021 Αφροδίτη Τζανέτου

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Σπύρος Καραμάνος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Κωνσταντίνος Παπαδημητρίου Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Άννα Ζερβάκη Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό (Ε.ΔΙ.Π), Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Σπύρο Καραμάνο για την πολύτιμη καθοδήγησή του καθώς και για την βοήθεια και τις συμβουλές του, προκειμένου να ξεπεράσω τις δυσκολίες που συνάντησα κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και τους υποψήφιους διδάκτορες του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, Κωνσταντίνο Αντωνίου και Χρήστο Προσγολίτη καθώς και την Γιαννούλα Χατζοπούλου για την υποστήριξη και την πρόθυμη βοήθειά τους στην εκμάθηση και κατανόηση βασικών εντολών στο λογισμικό ABAQUS.

Οφείλω επίσης ένα ευχαριστώ στους συναδέλφους και συνεργάτες μου κατά την διάρκεια της πρακτικής μου άσκησης στην εταιρία BETA CAE Systems, για τις συμβουλές και τις περαιτέρω γνώσεις που με την βοήθειά τους απέκτησα στο αντικείμενο των προσομοιώσεων πεπερασμένων στοιχείων.

Ευχαριστώ ακόμη, τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας Καθηγητές κα. Άννα Ζερβάκη και κ. Κωνσταντίνο Παπαδημητρίου καθώς και το σύνολο των καθηγητών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσαν κατά τα χρόνια της φοίτησής μου στο τμήμα.

Τέλος, δεν θα παρέλειπα να ευχαριστήσω τους φίλους, συμφοιτητές και όλους όσους με βοήθησαν και με στήριξαν κατά την διάρκεια των απαιτητικών αλλά σίγουρα όμορφων φοιτητικών μου χρόνων. Το μεγαλύτερο ευχαριστώ, το οφείλω στην μητέρα μου Ζωή και την αδερφή μου Ελευθερία, για την υπομονή τους, την αγάπη, την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που πάντα μου δείχνουν και βαθύτατα εκτιμώ. Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στην οικογένειά μου.

Αφροδίτη Τζανέτου
Μάρτιος, 2021

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΣΕ ΔΟΜΙΚΕΣ ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ

Αφροδίτη Τζανέτου

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2021

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Σπύρος Καραμάνος,
Καθηγητής Υπολογιστικών Μεθόδων-Πεπερασμένων Στοιχείων των Κατασκευών

Περίληψη

Τα καμπύλα τμήματα σωλήνων χρησιμοποιούνται ευρέως στα συστήματα σωληνώσεων βιομηχανικών εγκαταστάσεων και σταθμών παραγωγής ενέργειας. Λόγω της γεωμετρίας τους, η μηχανική τους συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από σημαντικά μεγαλύτερη ευκαμψία σε σύγκριση με τα ευθύγραμμα τμήματα σωλήνων. Συνεπώς, όταν υπόκεινται σε έντονες κυκλικές συνθήκες φόρτισης (π.χ. σεισμικές φορτίσεις) παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερες τάσεις και παραμορφώσεις, οι οποίες ενδέχεται να οδηγήσουν στην αστοχία τους.

Το κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η αριθμητική μελέτη της δομικής συμπεριφοράς των καμπύλων τμημάτων σωληνώσεων υπό πίεση, τα οποία υπόκεινται σε έντονη κυκλική κάμψη εντός του επιπέδου τους. Χρησιμοποιώντας αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, στις οποίες λαμβάνονται υπόψιν οι μη γραμμικότητες στη γεωμετρία της κατασκευής και στις ιδιότητες του υλικού, εξετάζονται καμπύλα τμήματα διαμέτρου 2 ιντσών, με λόγο διαμέτρου προς πάχους (D/t) ίσο με 15. Για τις προσομοιώσεις, αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα, ένα στο οποίο χρησιμοποιούνται στοιχεία κελύφους (shell elements) και ένα αντίστοιχο με στοιχεία στερεού (solid elements).

Στόχος είναι ο εντοπισμός της κρίσιμης περιοχής για αστοχία των καμπύλων τμημάτων, μέσω των αριθμητικών αναλύσεων, καθώς και η μελέτη της απόκρισής τους υπό διάφορα μεγέθη κυκλικής φόρτισης και εσωτερικής πίεσης. Η περιγραφή των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνει χώρα και έπειτα, τα αποτελέσματα των αναλύσεων εξετάζονται και συγκρίνονται ώστε να γίνει η διεξαγωγή των συμπερασμάτων.

Λέξεις- κλειδιά: καμπύλα τμήματα σωληνώσεων, σωλήνες υπό πίεση, κυκλική φόρτιση, κάμψη εντός επιπέδου, ολιγοκυκλική κόπωση

MECHANICAL BEHAVIOR OF PRESSURIZED STEEL PIPE ELBOWS UNDER STRONG CYCLIC LOADING

Afroditi Tzanetou

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2021

Supervisor: Dr. Spyros Karamanos
Professor of Numerical Methods - Finite Elements - Structural Mechanics

Abstract

Steel pipe elbows are widely used in piping systems of industrial plants or power stations. Because of their geometry, their mechanical response is more flexible in comparison with straight pipe segments. Thus, when subjected to excessive cyclic loading conditions (e.g. earthquakes) they exhibit significantly higher stresses and strains, which may lead to the failure of the component.

The main object of this study is to numerically investigate the structural behavior of pressurized steel pipe elbows subjected to severe cyclic in plane bending conditions. Using finite element models which take into account geometrical and material non-linearities, the examination of 2 inch pipe elbows whose ratio of diameter- to-thickness (D/t) is equal to 15, takes place. Two different finite element models are developed for the simulations, one using shell elements and one using solid elements.

Aim of the study is to numerically identify the critical location for failure of pipe bends and also to examine their mechanical response under various cyclic loading ranges and internal pressure levels. The finite element modeling procedure is presented and then the results of the simulations are evaluated and compared in order to come to conclusions.

Key- words: steel pipe bends, pressurized pipes, cyclic loading, in- plane bending, low- cycle fatigue

Πίνακας Περιεχομένων

1.Εισαγωγή 1
1.1 Περιγραφή του φυσικού προβλήματος 1
1.2. Γεωμετρία και χαρακτηριστικά των καμπύλων τμημάτων βιομηχανικών σωληνώσεων 2
2. Επισκόπηση της δομικής συμπεριφοράς του καμπύλου τμήματος 5
3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση 7
4. Σκοπός της παρούσας εργασίας 13
5. Προσομοίωση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων 14
5.1 Περιγραφή προβλήματος 14
5.2 Γεωμετρία και μηχανικές ιδιότητες υλικού 16
5.3 Συνδεσμολογία και κινηματικοί περιορισμοί 19
5.4 Διακριτοποίηση χρόνου ανάλυσης 20
5.5 Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση 21
5.6 Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων 23
6. Αποτελέσματα αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων 28
6.1 Επισκόπηση αποτελεσμάτων 28
6.2 Εντοπισμός κρίσιμης περιοχής για αστοχία 30
6.3 Επιρροή του πλάτους μετατόπισης στην απόκριση του καμπύλου σωλήνα 44
6.3.1 Δυνάμεις αντίδρασης 44
6.3.2 Τοπικές παραμορφώσεις στον καμπύλο σωλήνα 45
6.3.3 Παραμόρφωση της διατομής 49
6.4 Επιρροή της εσωτερικής πίεσης στην απόκριση του καμπύλου σωλήνα 55
6.4.1 Δυνάμεις αντίδρασης 55
6.4.2 Τοπικές παραμορφώσεις στον καμπύλο σωλήνα 56
6.4.3 Παραμόρφωση της διατομής 59
7. Υπολογισμός της αντοχής σε κόπωση 65
8. Προεργασία σχεδιασμού πειραμάτων 68
9. Συμπεράσματα και προτάσεις 74
Βιβλιογραφία 76

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Τυπικές βιομηχανικές σωληνώσεις με καμπύλα τμήματα 1

Εικόνα 1.2: Γεωμετρία τυπικού καμπύλου τμήματος βιομηχανικής σωλήνωσης 3

Εικόνα 2.1: Απόκριση καμπύλου τμήματος σε: (a) κλεινουσες καμπτικές ροπές, (b) ανοίγουσες καμπτικές ροπές, (c) κάμψη εκτός επιπέδου 6

Εικόνα 3.1: Κάμψη εντός επιπέδου σωλήνων διαμέτρου 8 ιντσών: (a) πειραματικός εξοπλισμός, (b) μοντέλο προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων [8], [9] 8

Εικόνα 3.2: Πειραματική δοκιμή καμπύλου σωλήνα 8 ιντσών υπό κάμψη: (a) αστοχία καμπύλου τμήματος, (b) σχηματισμός ρωγμής, (c) οβαλοποίηση της διατομής του καμπύλου τμήματος [8], [9] 10

Εικόνα 3.3: Εντοπισμός μικρορωγμών στην εσωτερική πλευρά του flank του καμπύλου τμήματος: (a) Μακροσκοπική εξέταση εγκάρσιας διατομής καμπύλου σωλήνα, (b)Μικροδομή εσωτερικής επιφάνειας [10] 12

Εικόνα 5.1: Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων: (a) μοντέλο με στοιχεία κελύφους, (b) μοντέλο με στοιχεία στερεού 14

Εικόνα 5.2: Συνοριακές συνθήκες και κυκλική φόρτιση 22

Εικόνα 5.3: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο με στοιχεία κελύφους 24

Εικόνα 5.4: Λεπτομέρια πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων σε μοντέλο με στοιχεία κελύφους, περιοχή καμπύλου τμήματος 25

Εικόνα 5.5: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο με στοιχεία στερεού 26

Εικόνα 5.6: Λεπτομέρια πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων σε μοντέλο με στοιχεία στερεού, περιοχή καμπύλου τμήματος 27

Εικόνα 6.1: Κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στον καμπύλο σωλήνα , στην:(a) εξωτερική και (b) εσωτερική πλευρά της περιοχής flank, Ανάλυση 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) 31

Εικόνα 6.2: Κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στον καμπύλο σωλήνα , στην:(a) εξωτερική και (b) εσωτερική πλευρά της περιοχής flank, Ανάλυση 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) 32

Εικόνα 6.3: Κατανομή περιφερειακών παραμορφώσεων υπό ανοίγουσες καμπτικές ροπές: (a) συνολική διάταξη, (b) τομή στην μεσαία διατομή του καμπύλου τμήματος, Ανάλυση 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) 34

Εικόνα 6.4: Κατανομή περιφερειακών παραμορφώσεων υπό κλείνουσες καμπτικές ροπές: (a) συνολική διάταξη, (b) τομή στην μεσαία διατομή του καμπύλου τμήματος, Ανάλυση 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) 35

Εικόνα 6.5: Κατανομή περιφερειακών παραμορφώσεων υπό ανοίγουσες καμπτικές ροπές: (a) συνολική διάταξη, (b) τομή στην μεσαία διατομή του καμπύλου τμήματος, Ανάλυση 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) 37

Εικόνα 6.6: Κατανομή περιφερειακών παραμορφώσεων υπό κλείνουσες καμπτικές ροπές: (a) συνολική διάταξη, (b) τομή στην μεσαία διατομή του καμπύλου τμήματος, Ανάλυση 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) 38

Εικόνα 6.7: Κατανομή περιφερειακών παραμορφώσεων κοντά στην μεσαία διατομή του καμπύλου σωλήνα 40

Εικόνα 6.8: Κατανομή διαμήκων παραμορφώσεων, υπό: (a) ανοίγουσες, (b) κλείνουσες καμπτικές ροπές, Ανάλυση 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) 42

Εικόνα 6.9: Κατανομή διαμήκων παραμορφώσεων, υπό: (a) ανοίγουσες, (b) κλείνουσες καμπτικές ροπές, Ανάλυση 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) 43

Εικόνα 6.10: Παραμόρφωση της μεσαίας διατομής του καμπύλου σωλήνα, υπό: (a) ανοίγουσες και (b) κλείνουσες καμπτικές ροπές, σε σχέση με το (c) αρχικό σχήμα της διατομής, Ανάλυση 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) 49

Εικόνα 6.11: Παραμόρφωση της μεσαίας διατομής του καμπύλου σωλήνα, υπό: (a) ανοίγουσες και (b) κλείνουσες καμπτικές ροπές, σε σχέση με το (c) αρχικό σχήμα της διατομής, Ανάλυση 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) 50

Εικόνα 8.1: Μηχανολογικά σχέδια για τα «καπάκια» της πειραματικής διάταξης, κλίμακα 1:2 69

Εικόνα 8.2: Μηχανολογικά σχέδια για τις αρθρώσεις της πειραματικής διάταξης, κλίμακα 1:2 70

Εικόνα 8.3: Σύνδεση μεταξύ «καπακιού» και άρθρωσης, κλίμακα 1:2 71

Εικόνα 8.4: Συνολική πειραματική διάταξη, σχηματική απεικόνιση 72

Εικόνα 8.5: Πειραματικός εξοπλισμός, σχηματική απεικόνιση [6] 73

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 5.1: Καμπύλη τάσης- παραμόρφωσης μονοαξονικού εφελκυσμού 18

Σχήμα 5.2: Καμπύλες τάσης- παραμόρφωσης για κυκλικές φορτίσεις, με σταθερό πλάτος παραμόρφωσης ±1%, 2% και ±3% 18

Σχήμα 5.3: Καμπύλη τάσης- παραμόρφωσης για κυκλική φορτίση με σταθερό πλάτος τάσης ± 400 MPa 19

Σχήμα 5.4: Επιβαλλόμενη μετατόπιση σε σχέση με τον χρόνο της προσομοίωσης, για πλάτος ΔL= ±30 mm 21

Σχήμα 6.1: Ανάπτυξη ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στη εξωτερική και εσωτερική πλευρά της περιοχής flank, Ανάλυση 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) 33

Σχήμα 6.2: Ανάπτυξη ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στη εξωτερική και εσωτερική πλευρά της περιοχής flank, Ανάλυση 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) 33

Σχήμα 6.3: Ανάπτυξη περιφερειακής παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στη εξωτερική και εσωτερική πλευρά της περιοχής flank, Ανάλυση 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) 36

Σχήμα 6.4: Ανάπτυξη περιφερειακής παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στη εξωτερική και εσωτερική πλευρά της περιοχής flank, Ανάλυση 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) 39

Σχήμα 6.5: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης, για τις Αναλύσεις 1 (κελύφους, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) 44

Σχήμα 6.6: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης, για τις Αναλύσεις 7 (στερεού, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) 45

Σχήμα 6.7: Ανάπτυξη περιφερειακής παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στην εσωτερική πλευρά του flank, για τις Αναλύσεις 1 (κελύφους, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) 46

Σχήμα 6.8: Ανάπτυξη περιφερειακής παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στην εσωτερική πλευρά του flank, για τις Αναλύσεις 7 (στερεού, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) 46

Σχήμα 6.9: Ανάπτυξη διαμήκους παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στην εξωτερική πλευρά της περιοχής intrados, για τις Αναλύσεις 1 (κελύφους, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) 47

Σχήμα 6.10: Ανάπτυξη διαμήκους παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στην εξωτερική πλευρά της περιοχής intrados, για τις Αναλύσεις 7 (στερεού, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) 47

Σχήμα 6.11: Ανάπτυξη της οβαλοποίησης της μεσαίας διατομής του καμπύλου σωλήνα με τους κύκλους φόρτισης, για τις Αναλύσεις 1 (κελύφους, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) 51

Σχήμα 6.12: Ανάπτυξη της οβαλοποίησης της μεσαίας διατομής του καμπύλου σωλήνα με τους κύκλους φόρτισης, για τις Αναλύσεις 7 (στερεού, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) 51

Σχήμα 6.13: Σχήμα οβαλοποιημένης διατομής υπό κλείνουσες καμπτικές ροπές σε σχέση με το αρχικό σχήμα, για τις Αναλύσεις 1 (κελύφους, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0)..... 52

Εικόνα 6.14: Σχήμα οβαλοποιημένης διατομής υπό ανοίγουσες καμπτικές ροπές σε σχέση με το αρχικό σχήμα, για τις Αναλύσεις 1 (κελύφους, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) 53

Σχήμα 6.15: Σχήμα οβαλοποιημένης διατομής υπό κλείνουσες καμπτικές ροπές σε σχέση με το αρχικό σχήμα, για τις Αναλύσεις 7 (στερεού, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0)..... 53

Σχήμα 6.16: Σχήμα οβαλοποιημένης διατομής υπό ανοίγουσες καμπτικές ροπές σε σχέση με το αρχικό σχήμα, για τις Αναλύσεις 7 (στερεού, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0)..... 54

Σχήμα 6.17: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης, για τις Αναλύσεις 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) και 6 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)..... 55

Σχήμα 6.18: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης, για τις Αναλύσεις 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) και 12 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa) 56

Σχήμα 6.19: Ανάπτυξη περιφερειακής παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στην εσωτερική πλευρά του flank, για τις Αναλύσεις4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0), 5 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 13 MPa) και 6 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa) 57

Σχήμα 6.20: Ανάπτυξη περιφερειακής παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στην εσωτερική πλευρά του flank, για τις Αναλύσεις 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0), 11 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 13 MPa) και 12 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa) 57

Σχήμα 6.21: Ανάπτυξη διαμήκους παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στην εξωτερική πλευρά της περιοχής intrados, για τις Αναλύσεις4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0), 5 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 13 MPa) και 6 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)..... 58

Σχήμα 6.22: Ανάπτυξη διαμήκους παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στην εξωτερική πλευρά της περιοχής intrados, για τις Αναλύσεις 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0), 11 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 13 MPa) και 12 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)..... 59

Σχήμα 6.23: Ανάπτυξη της οβαλοποίησης της μεσαίας διατομής του καμπύλου σωλήνα με τους κύκλους φόρτισης, για τις Αναλύσεις 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) και 6 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)..... 60

Σχήμα 6.24: Ανάπτυξη της οβαλοποίησης της μεσαίας διατομής του καμπύλου σωλήνα με τους κύκλους φόρτισης, για τις Αναλύσεις 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) και 12 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)..... 60

Σχήμα 6.25: Σχήμα οβαλοποιημένης διατομής υπό κλείνουσες καμπτικές ροπές σε σχέση με το αρχικό σχήμα, για τις Αναλύσεις 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) και 6 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa) 61

Σχήμα 6.26: Σχήμα οβαλοποιημένης διατομής υπό ανοίγουσες καμπτικές ροπές σε σχέση με το αρχικό σχήμα, για τις Αναλύσεις 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) και 6 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa) 62

Σχήμα 6.27: Σχήμα οβαλοποιημένης διατομής υπό κλείνουσες καμπτικές ροπές σε σχέση με το αρχικό σχήμα, για τις Αναλύσεις 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) και 12 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa) 62

Σχήμα 6.28: Σχήμα οβαλοποιημένης διατομής υπό ανοίγουσες καμπτικές ροπές σε σχέση με το αρχικό σχήμα, για τις Αναλύσεις 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) και 12 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa) 63

Σχήμα 6.29: Μέγιστη οβαλοποίηση, όπως προκύπτει από τις Αναλύσεις με στοιχεία κελύφους 64

Σχήμα 6.30: Μέγιστη οβαλοποίηση, όπως προκύπτει από τις Αναλύσεις με στοιχεία στερεού. 64

Σχήμα 7.1: Καμπύλη κόπωσης, όπως προκύπει από πειραματικά αποτελέσματα [8] 66

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Μετρήσεις παραμορφώσεων σε καμπύλο σωλήνα 8 ιντσών υπό κυκλική κάμψη [8], [9] 9

Πίνακας 5.1: Παράμετροι μοντέλου μη γραμμικής κινηματικής κράτυνσης 17

Πίνακας 5.2: Παραμετρική μελέτη, πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο με στοιχεία κελύφους 23

Πίνακας 5.3: Παραμετρική μελέτη, πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο με στοιχεία στερεού 25

Πίνακας 6.1: Περιγραφή αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων 28

Πίνακας 6.2: Μετρήσεις εύρους περιφερειακής και διαμήκους παραμόρφωσης σε διάφορες περιοχές του καμπύλου σωλήνα 29

Πίνακας 6.3: Μετρήσεις μέγιστης δύναμης αντίδρασης και μέγιστης οβαλοποίησης της μεσαίας διατομής του καμπύλου τμήματος 29

Πίνακας 7.1: Υπολογισμοί για την αντοχή σε κόπωση, με βάση εμπειρικές σχέσεις 66

1.Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του φυσικού προβλήματος

Τα καμπύλα τμήματα σωλήνων συναντώνται πολύ συχνά σε συστήματα σωληνώσεων, καθώς αποτελούν εξαρτήματα τα οποία χρησιμοποιούνται για να αλλάξουν την κατεύθυνση της ροής του μεταφερόμενου από τους σωλήνες ρευστού. Τα «elbows», όπως συχνά τα τμήματα αυτά αναφέρονται, έχουν πλήθος εφαρμογών στα συστήματα σωληνώσεων του βιομηχανικού χώρου, ενώ χρησιμοποιούνται ευρέως σε αγωγούς μεταφοράς πετρελαίου ή φυσικού αερίου, σε χημικές βιομηχανίες, σταθμούς παραγωγής ενέργειας και πυρηνικούς σταθμούς. Για τις παραπάνω εφαρμογές, τα εξαρτήματα αυτά προορίζονται συχνά για την μεταφορά υγρών και αερίων καυσίμων ή βιομηχανικών υγρών, τα οποία βρίσκονται σε υψηλές θερμοκρασίες και επίπεδα πίεσης.

Εικόνα 1.1: Τυπικές βιομηχανικές σωληνώσεις με καμπύλα τμήματα

Βασικό χαρακτηριστικό της μηχανικής τους συμπεριφοράς ,είναι η σημαντική ευκαμψία που παρουσιάζουν, σε σύγκριση με ευθύγραμμα τμήματα ενός σωλήνα του ιδίου υλικού και γεωμετρικών χαρακτηριστικών [1]. Λόγω αυτής τους της ευκαμψίας, μπορούν να παραλάβουν τις θερμικές διαστολές στην λειτουργία της σωλήνωσης, αποφεύγοντας έτσι την επιβολή θλιπτικών φορτίων σε αυτήν, ενώ έχουν την ικανότητα να απορροφούν άλλα εξωτερικά επιβαλλόμενα φορτία.

Όμως, η ιδιαίτερη ευκαμψία τους έχει ώς συνέπεια να αναπτύσσουν σημαντικά υψηλότερες τάσεις και παραμορφώσεις σε σχέση με τους ευθύγραμμους σωλήνες, όταν υπόκειται σε ισχυρές φορτίσεις. Χαρακτηριστική είναι τότε η έντονη

παραμόρφωση που παρουσιάζει η διατομή τους, καθώς το σχήμα της αποκλίνει από το αρχικά κυκλικό. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται συχνά και ως οβαλοποίηση της διατομής (“cross sectional ovalization”).

Έντονες φορτίσεις στα συστήματα σωληνώσεων είναι πιθανό να προκληθούν από μια «απότομη» διακοπή ή εκκίνηση λειτουργίας της εγκατάστασης (shutdown/ startup operations), ενώ στην περίπτωση σεισμικών φαινομένων οι φορτίσεις αυτές είναι ιδιαίτερα ισχυρές. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι μεταλλικοί σωλήνες ενδέχεται να υποβληθούν σε κυκλικά δομικά φορτία μεγάλου πλάτους, τα οποία συνεπάγονται σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις του υλικού και οβαλοποίηση της διατομής των εύκαμπτων καμπύλων τμημάτων.

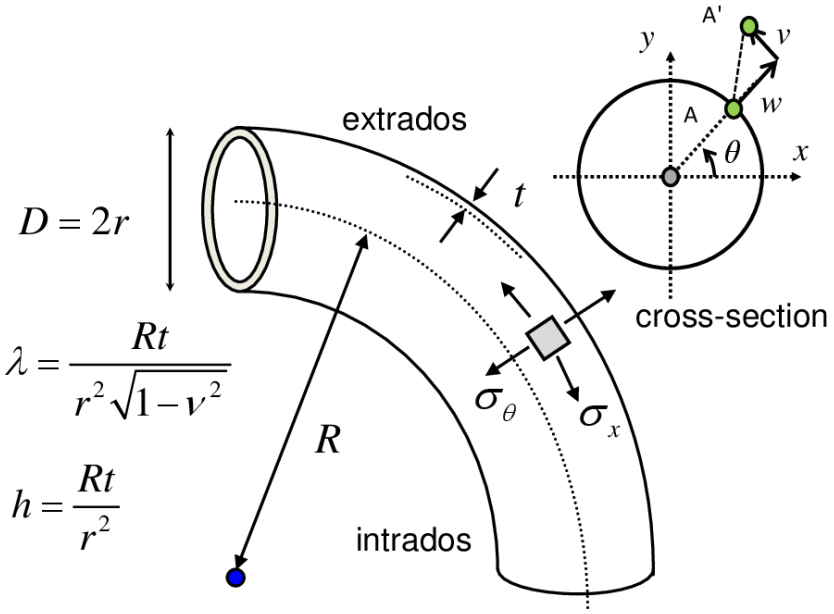
Οι παραμορφώσεις αυτές συσσωρεύονται σε κάθε κύκλο φόρτισης και ακολουθεί η εμφάνιση ρηγματώσεων κατά την διεύθυνση του πάχους του τοιχώματος του καμπύλου σωληνωτού τμήματος. Η τελευταία, μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια του περιεχομένου που μεταφέρει το σύστημα σωληνώσεων και κατά συνέπεια στην αστοχία αυτού.

Συνεπώς, κρίνεται αναγκαία η λεπτομερής ανάλυση και έρευνα της μηχανικής τους συμπεριφοράς των καμπύλων τμημάτων σωληνώσεων, προκειμένου να διασφαλιστεί η δομική ακεραιότητα αυτών, και ολόκληρης της κατασκευής, σε περιπτώσεις ισχυρών κυκλικών φορτίσεων.

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό τον εντοπισμό της κρίσιμης περιοχής για αστοχία των καμπύλων σωλήνων με λόγο D/t=15, καθώς και την πρόβλεψη των τοπικών παραμορφώσεων, μέσω υπολογιστικής μελέτης. Η υπλογιστική μελέτη αυτή γίνεται στα πλαίσια προεργασίας σχεδιασμού σειράς πειραματικών δοκιμών, τα οποία προτείνεται να διεξαχθούν για την μελέτη του προβλήματος.

1.2. Γεωμετρία και χαρακτηριστικά των καμπύλων τμημάτων βιομηχανικών σωληνώσεων

Ένα τυπικό καμπύλο σωληνωτό τμήμα 90 μοιρών, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στα συστήματα σωληνώσεων, παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.2. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της γεωμετρίας του είναι η εξωτερική του διάμετρος D, το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα t και η ακτίνα καμπυλότητας αυτού R. Επίσης, η γεωμετρία συχνά εκφράζεται μέσω των αδιάστατων παραμέτρων λ ή h, ο ορισμός των οποίων φαίνεται στην ίδια Εικόνα. Η παράμετρος λ προκύπτει από αναλυτικές λύσεις ανάλυσης τάσεων σε καμπύλα σωληνωτά τμήματα οι οποίες λαμβάνουν υπόψιν τους την εσωτερική πίεση, ενώ η παράμετρος h χρησιμοποιείται συχνά στα πρότυπα σχεδιασμού.



Εικόνα 1.2: Γεωμετρία τυπικού καμπύλου τμήματος βιομηχανικής σωλήνωσης

Στην βιβλιογραφία, χρησιμοποιείται συγκεκριμένη ονοματολογία για τις διάφορες περιοχές του καμπύλου σωλήνα. Η «εξωτερική» ή «άνω» περιοχή του καμπύλου σωλήνα ονομάζεται “extrados” ενώ η «εσωτερική» ή «κάτω» περιοχή της γεωμετρίας του ονομάζεται “intrados”. Η πλαϊνή επιφάνεια του καμπύλου σωλήνα ονομάζεται “flank” ενώ συχνά συναντάται και ως “crown”. Στην συνέχεια της εργασίας αυτής θα χρησιμοποιείται η ονοματολογία αυτή για την αναφορά στις διάφορες περιοχές του καμπύλου τμήματος.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η μηχανική συμπεριφορά καμπύλων σωλήνων οι οποίοι ακολουθούν τον αμερικάνικο κανονισμό ASME B16.9. Το πρότυπο αυτό περιλαμβάνει προδιαγραφές για σωληνωτά εξαρτήματα που συγκολλώνται σε βιομηχανικά συστήματα σωληνώσεων, μεταξύ αυτών και τα καμπύλα τμήματα σωλήνων. Συγκεκριμένα, καλύπτονται τα κεφάλαια των συνολικών διαστάσεων, των ανοχών, των επιτρεπτών επιπέδων πίεσης και των μεθόδων δοκιμής, για τα προδιαγεγραμμένα καμπύλα τμήματα σωλήνων με διάμετρο που κυμαίνεται από 0.5 έως 48 ίντσες. Επίσης, τα καμπύλα τμήματα στα οποία αναφέρεται, χαρακτηρίζονται από μικρή σχετικά ακτίνα καμπυλότητας R σε σχέση με την διάμετρο του σωλήνα D, με τον λόγο R/D να είναι ίσος με 1 για τους καμπύλους σωλήνες «μικρής ακτίνας» (“short radius” bends) ή 1.5 για τους καμπύλους σωλήνες «μεγάλης ακτίνας» (“long radius” bends). Σημειώνεται πως παρόμοιες διαστάσεις καμπύλου σωλήνα καθορίζονται και από το σχετικό ευρωπαϊκό πρότυπο EN 10253-1.

Όσον αφορά την διαδικασία κατασκευής τους, τα καμπύλα σωληνωτά τμήματα προκύπτουν συνήθως από ευθύγραμμα τμήματα σωλήνων τα οποία υπόκεινται σε κάμψη σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας (induction bending). Η

κατεργασία του σωλήνα σε υψηλές θερμοκρασίες λαμβάνει χώρα προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία παραμενουσών τάσεων σε αυτόν. Σύνηθεις τέτοιες διαδικασίες είναι η μέθοδος "Mandrel", η μέθοδος εξώθησης (extrusion method) και η μέθοδος θερμής μορφοποίησης (hot forming method). Σε κάθε περίπτωση ο ευθύγραμμος σωλήνας αρχικά κόβεται στο κατάλληλο μήκος, θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες και έπειτα κάμπτεται με την βοήθεια καλουπιών. Σε επόμενο στάδιο, το καμπύλο τμήμα που έχει κατασκευαστεί υπόκειται σε θερμικές και επιφανειακές κατεργασίες, πρίν υποβληθεί σε οπτικό και διαστασιολογικό έλεγχο.

Ο αμερικάνικος κανονισμός ASME B16.49 καλύπτει τα κεφάλαια του σχεδιασμού, του υλικού, της διαδικασίας κατασκευής, των απαιτούμενων δοκιμών, της σήμανσης και επιθεώρησης για τα καμπύλα τμήματα σωλήνων χάλυβα, τα οποία έχουν κατασκευαστεί έπειτα από διαδικασία κάμψης (induction bending).

Αξίζει εδώ να σημειωθεί, πως σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει συχνά κατά την κατασκευή των καμπύλων σωλήνων μέσω των μεθόδων κάμψης, είναι οι μεταβολές στο πάχος του τοιχώματος του καμπύλου σωλήνα. Η διάσταση που αναγράφεται στις προδιαγραφές αναφέρεται στο ελάχιστο πάχος που έχει το τοίχωμα του σωλήνα, ενώ στην πραγματικότητα, μετρώντας το πάχος σε διάφορα σημεία κατά την διεύθυνση του μήκους του, είναι πολύ πιθανόν να προκύψουν μεγαλύτερες τιμές. Έτσι, εφόσον το πραγματικό πάχος του καμπύλου σωλήνα προκύπτει μεγαλύτερο από αυτό που αναγράφεται στις προδιαγραφές, δημιουργούνται «δυσκολίες» κατά την συγκόλληση του με τον, αντίστοιχων διαστάσεων και προδιαγραφών, ευθύγραμμο σωλήνα. Το σημείο αυτό χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά την διαδικασία και της συγκόλλησης.

2. Επισκόπηση της δομικής συμπεριφοράς του καμπύλου τμήματος

Στην περίπτωση ακραίων συνθηκών φόρτισης, η δομική απόκριση των καμπύλων σωλήνων χαρακτηρίζεται από μια διαξονική κατάσταση τάσης- παραμόρφωσης στο τοίχωμα του σωλήνα. Συγκεκριμένα, τάσεις και παραμορφώσεις αναπτύσσονται κατά την διεύθυνση της περιφέρειας του σωλήνα και κατά την διεύθυνση του μήκους του (Εικόνα 1.2). Η κατάσταση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του καμπύλου τμήματος με τρόπο διαφορετικό από εκείνον που αναμένεται σε αντίστοιχους ευθύγραμμους σωλήνες, όπως αναφέρει ο Karamanos [1].

Ακραίες συνθήκες φόρτισης μπορεί να προκληθούν από ένα έντονο σεισμικό φαινόμενο. Τότε, τα καμπύλα τμήματα υπόκεινται σε ισχυρά κυκλικά δομικά φορτία τα οποία σχετίζονται με παραμορφώσεις του υλικού πέρα από την ελαστική περιοχή. Μάλιστα, όπως επισημαίνεται και στην βιβλιογραφία, οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον καμπύλο σωλήνα κατά την περιφερειακή του διεύθυνση προκύπτουν μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που αναπτύσσονται κατά την διαμήκη διεύθυνσή του.

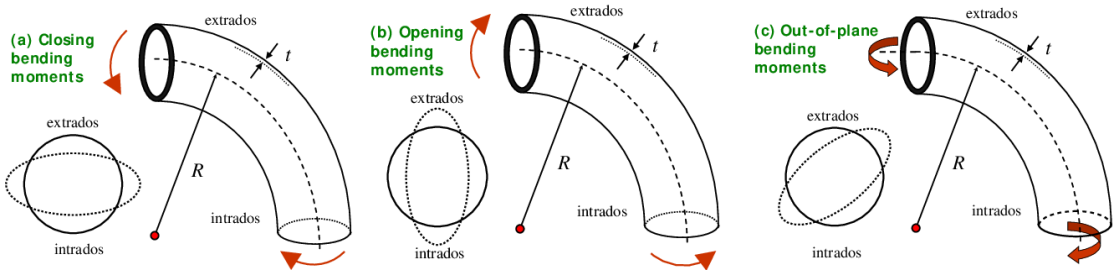
Υπό αυτές τις κυκλικές συνθήκες φόρτισης, ο καμπύλος σωλήνας ενδέχεται να παρουσιάσει σημαντική συσσώρευση πλαστικής παραμόρφωσης. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως “ratcheting” και είναι πιθανό να οδηγήσει τελικά στην αστοχία του εξαρτήματος.

Η αστοχία συμβαίνει στην περιοχή ολιγοκυκλικής κόπωσης του υλικού εφόσον αυτός υφίσταται ισχυρές φορτίσεις και σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις. Η ολιγοκυκλική κόπωση στην οποία το καμπύλο τμήμα υποβάλλεται, ευνοεί την δημιουργία ρωγμών κατά το πάχος του τοιχώματός του. Όταν η ρωγμή διαπεράσει το τοίχωμα (through- thickness cracking), τότε συμβαίνει απώλεια περιεχομένου του σωλήνα και το σύστημα σωληνώσεων αστοχεί. Η ανάπτυξη της ρωγμής, όπως παρακάτω θα αναλυθεί, συμβαίνει στην περιοχή flank του καμπύλου σωλήνα, η οποία χαρακτηρίζεται ως η κρίσιμη περιοχή για αστοχία.

Επίσης, υπό ισχυρές καταπονήσεις, ο καμπύλος σωλήνας παρουσιάζει σημαντική παραμόρφωση της διατομής του (ovalization), το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από τα μεγέθη της επιβαλλόμενης κυκλικής φόρτισης και εσωτερικής πίεσης. Από πειραματικές μελέτες, έχει παρατηρηθεί πως η μεσαία διατομή του καμπύλου σωλήνα είναι αυτή που εμφανίζει την μέγιστη οβαλοποίηση.

Σημειώνεται εδώ πως σε πειραματικές διαδικασίες προσομοίωσης των σεισμικών φορτίσεων, η φόρτιση συνήθως επιβάλλεται με την μορφή μετατόπισης σταθερού η σταδιακά αυξανόμενου πλάτους. Η μετατόπιση αυτή, εφαρμόζεται

στην πειραματική διάταξη και, αναλόγως τον τρόπο εφαρμογής της, έχει σκοπό να προκαλέσει κάμψη του καμπύλου σωλήνα «εντός επιπέδου» (in- plane bending) ή κάμψη του «εκτός επιπέδου» (out- of – plane bending). Συνέπεια της κάμψης του καμπύλου τμήματος είναι η παραμόρφωση της διατομής του.



Εικόνα 2.1: Απόκριση καμπύλου τμήματος σε: (a) κλεινουσες καμπτικές ροπές, (b) ανοίγουσες καμπτικές ροπές, (c) κάμψη εκτός επιπέδου

Στην παρούσα εργασία μελετάται η μηχανική συμπεριφορά του καμπύλου τμήματος σε κάμψη εντός επιπέδου. Για την περίπτωση αυτή, οι καμπτικές ροπές οι οποίες εφαρμόζονται στον καμπύλο σωλήνα χαρακτηρίζονται ως «κλείνουσες» εάν επιβάλλονται σε αυτόν όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1.a (closing bending moments) ή «ανοίγουσες» εάν επιβάλλονται όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1.b (opening bending moments).

Για κάμψη εντός επιπέδου, για κλείνουσες ή ανοίγουσες καμπτικές ροπές, η διατομή του καμπύλου σωλήνα οβαλοποείται αποκτώντας σχήμα συμμετρικό ως προς το επίπεδο της κάμψης. Το σχήμα της οβαλοποιημένης διατομής υπό ανοίγουσες καμπτικές ροπές προκύπτει «αντίστροφο» από το αντίστοιχο που προκύπτει υπό κλείνουσες ροπές. Για τον λόγο αυτό, η απόκριση υπό τις πρώτες αναφέρεται συχνά ως «αντίστροφη οβαλοποίηση», ενώ έχει παρατηρηθεί πως επηρεάζει σημαντικά την μηχανική συμπεριφορά του καμπύλου τμήματος.

Εξετάζοντας τα παραπάνω, θα μπορούσε να γίνει ο ισχυρισμός πως η μηχανική συμπεριφορά των καμπύλων σωλήνων υπό τις αναφερόμενες συνθήκες φόρτισης, χαρακτηρίζεται ιδιαίτερα «περίπλοκη». Λαμβάνοντας υπόψιν και τον κρίσιμο ρόλο που κατέχουν στα συστήματα βιομηχανικών σωληνώσεων, γίνεται αντιληπτή η ανάγκη διερεύνησης και μελέτης της απόκρισής τους.

3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

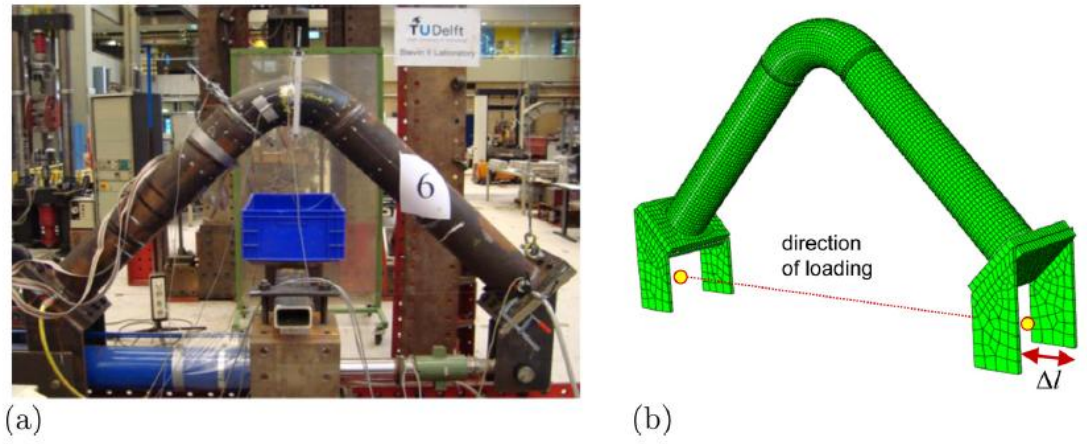
Υπάρχει πλήθος πειραματικών εργασιών που έχει αφιερωθεί στην μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των καμπύλων τμημάτων βιομηχανικών σωληνώσεων όταν αυτά υπόκεινται σε δομικά κυκλικά φορτία και εσωτερική πίεση. Οι μελέτες αυτές συχνά υποστηρίζονται από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, ενώ στόχος πολλών αποτελεί η βελτίωση του αντισεισμικού σχεδιασμού μέσω της αξιολόγησης των σχετικών διατάξεων προτύπων σχεδιασμού. Συχνά γίνεται νύξη στον αμερικάνικο κανονισμό ASME B31, ο οποίος αποτελείται από μια σειρά προτύπων για το σχεδιασμό και την κατασκευή των βιομηχανικών συστημάτων σωληνώσεων και αγωγών υπό πίεση, ή στον αντίστοιχο ευρωπαϊκό κανονισμό EN 13480-3.

Μερικές σημαντικές εργασίες παρατίθενται, όπως αυτή του Fujiwaka et al. [2], στην οποία διεξήχθησαν πειράματα σε καμπύλα σωληνωτά τμήματα ώστε να μελετηθεί η διάρκεια ζωής τους σε κόπωση υπό ισχυρές κυκλικές φορτίσεις. Ο Chattopadhyay et al. [3] προτείνει σε εργασία του εμπειρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής σε κάμψη των καμπύλων σωλήνων, υπό εσωτερική πίεση και κάμψη εντός επιπέδου. Ο Yahiaoui et al [4] σε πειραματική εργασία του ερευνά το φαινόμενο του ratcheting σε καμπύλα τμήματα μικρής ακτίνας (short- radius), υπό σταθερή εσωτερική πίεση και συνθήκες κάμψης εντός επιπέδου, με κυκλικές φορτίσεις αυξανόμενου πλάτους οι οποίες προσομοιώνουν σεισμικά φαινόμενα. Σε εργασία του, ο Moreton et al. [5] επικεντρώνεται στην αναλυτική πρόβλεψη του ratcheting ως προς τον ρυθμό αύξησής του με τους επιβαλλόμενους κύκλους φόρτισης και ως προς την απαιτούμενη καμπτική ροπή ώστε το φαινόμενο αυτό να εμφανιστεί στο υλικό των σωλήνων. Ο Takahashi et al. [6] διεξήγαγε πειράματα ολιγοκυκλικής κόπωσης με φορτία κάμψης εντός επιπέδου σε καμπύλους σωλήνες, οι οποίοι χαρακτηρίζονταν τοπικά από μειωμένο πάχος τοιχώματος λόγω διάβρωσης που είχαν προηγουμένως υποστεί. Στην εργασία του ο Hassan et al. [7], αναλύει αποτελέσματα πειραμάτων ολιγοκυκλικής κόπωσης σε καμπύλα τμήματα προκειμένου να μελετήσει το φαινόμενο του ratcheting. Σε σειρά δημοσιεύσεών του, ο Karamanos. [1] μελετά την μηχανική συμπεριφορά και τους μηχανισμούς αστοχίας των καμπύλων σωλήνων υπό συνθήκες κάμψης εντός ή εκτός επιπέδου, για μονοτονικές και κυκλικές συνθήκες φόρτισης.

Επίσης σημαντικές εργασίες είναι αυτές του Varelis et. al [8],[9] , στις οποίες έλαβε χώρα σειρά πειραμάτων προκειμένου να μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά ων καμπύλων σωληνωτών τμημάτων υπό συνθήκες κυκλικής κάμψης εντός επιπέδου, με ή χωρίς την επιβολή εσωτερικής πίεσης. Οι εργασίες αυτές υποστηρίζονται αριθμητικά από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Το πρόβλημα που μελετάται στις δημοσιεύσεις αυτές παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με το πρόβλημα που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, ως προς τις συνθήκες φόρτισης,

τις συνοριακές συνθήκες και τις παραμέτρους που εξετάζονται. Για αυτόν τον λόγο, κρίνεται σκόπιμη μία σύντομη περιγραφή του προβλήματος το οποίο διερευνάται στις δύο αυτές δημοσιεύσεις, καθώς και των συμπερασμάτων που προκύπτουν από τα πειράματα και τις αναλύσεις που έλαβαν χώρα.

Στα πλαίσια των άνω εργασιών, διεξήχθη σειρά πειραμάτων για καμπύλους μεταλλικούς σωλήνες 90 μοιρών, «μεγάλης ακτίνας» με εξωτερική διάμετρο D= 219.1 mm και πάχος τοιχώματος t=8.18 mm. Ο καμπύλος σωλήνας συγκολλάται στα άκρα του με δύο ευθύγραμμα τμήματα σωλήνα ιδίας διαμέτρου και πάχους. Το υλικό των σωλήνων είναι χάλυβας P355N, και ακολουθεί το πρότυπο EN10216. Τα ευθύγραμμα τμήμα συνδέονται με την σειρά τους με στηρίξεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1.a.



Εικόνα 3.1: Κάμψη εντός επιπέδου σωλήνων διαμέτρου 8 ιντσών: (a) πειραματικός εξοπλισμός, (b) μοντέλο προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων [8], [9]

Η πειραματική διάταξη προσομοιώθηκε και υπολογιστικά χρησιμοποιώντας κατάλληλο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (Εικόνα 3.1.b).

Η φόρτιση εφαρμόζεται με την μορφή κυκλικής μετατόπισης πλάτους ±Δl στην μία στήριξη, προκειμένου στον καμπύλο σωλήνα να ασκείται κυκλική κάμψη εντός επιπέδου υπό εναλλασσόμενες κλείνουσες και ανοίγουσες ροπές. Στις περισσότερες πειραματικές δοκιμές εφαρμόστηκε σταθερό πλάτος μετατόπισης, με μέγεθος που κυμαίνεται από ±25 mm έως ± 300 mm, ενώ διεξήχθη και μία δοκιμή αυξανόμενου πλάτους μετατόπισης (Πίνακας 3.1).

Πριν την διεξαγωγή των δοκιμών, οι σωλήνες ήταν γεμάτοι με νερό, ώστε να μελετηθεί η επίδραση της εσωτερικής πίεσης στην μηχανική τους συμπεριφορά. Αρχικά εξετάστηκε η περίπτωση πολύ χαμηλής πίεσης, μικρότερης από το 0.5% της πίεσης διαρροής των σωλήνων. Η πίεση αυτή διατηρήθηκε σταθερή καθ' όλη την διάρκεια της δοκιμής. Η επιβολή της είχε σκοπό τη χρήση της ως «δείκτη αστοχίας», όταν η ρωγμή διαπεράσει το πάχος του τοιχώματος (Εικόνα 3.2.a), ενώ το μέγεθός της παρουσιάζει αμελητέα επιρροή στην μηχανική συμπεριφορά του καμπύλου

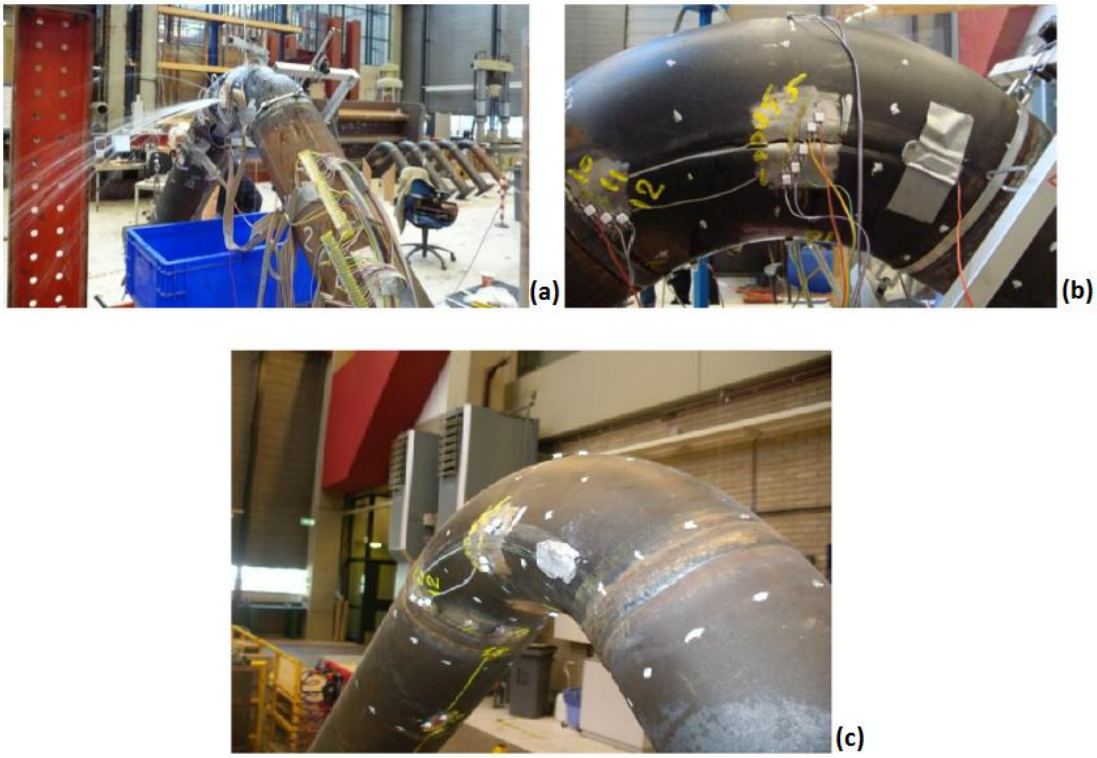
τμήματος. Έπειτα, διεξήχθησαν πειράματα σε σωλήνες οι οποίοι υποβάλλονταν σε εσωτερική πίεση ίση με το 12%, 26% ή 45% της πίεσης διαρροής, τιμές που αντιστοιχούν για τους σωλήνες που μελετήθηκαν σε πίεση 3.2 MPa, 7 MPa και 12 MPa αντίστοιχα.

Test no.	Δl (mm)	Number of cycles, N_f	Pressure, P (MPa)	$\Delta\varepsilon_{H,exp}$ (%)	$\Delta\varepsilon_H$ (%)	$\Delta\varepsilon_L$ (%)
1	±25	13,160	0.0	0.33	0.33	0.04
2	±70	444	0.0	1.23	1.25	0.14
3	±100	171	0.0	—	1.59	0.14
4	±150	61	0.0	2.61	2.55	0.16
5	±200	28	0.0	—	2.77	0.16
6	±250	17	0.0	3.84	3.75	0.18
7	±300	10	0.0	4.02	4.03	0.30
8	Increasing amplitude	16	0.0		N/a	
9	±200	26	3.2	3.01	2.89	0.23
10	±300	10	3.2	—	2.39	0.97
11	±200	27	7.0	—	2.69	0.39
12	±300	10	7.0	1.94	2.25	0.98
13	±200	22	12.0	—	0.63	1.49

Πίνακας 3.1: Μετρήσεις παραμορφώσεων σε καμπύλο σωλήνα 8 ιντσών υπό κυκλική κάμψη [8], [9]

Κατά την διάρκεια των δοκιμών αυτών, χρησιμοποιήθηκαν μηκυνσιόμετρα (strain gauges) τα οποία τοποθετήθηκαν στην περιοχή του flank που είναι η κρίσιμη για αστοχία. Σκοπός ήταν η μέτρηση του εύρους των περιφερειακών παραμορφώσεων, οι οποίες σύμφωνα με την βιβλιογραφία ευθύνονται για τον σχηματισμό της ρωγμής στην περιοχή αυτή. Οι μετρήσεις αυτές αναγράφονται στην πέμπτη στήλη του Πίνακα 3.1. Η τιμή του εύρους της περιφερειακής παραμόρφωσης στην περιοχή flank μετρήθηκε και υπολογιστικά, όπως επίσης και η τιμή του εύρους της αντίστοιχης διαμήκους παραμόρφωσης. Οι τιμές αυτές αναγράφονται στην έκτη και έβδομη στήλη του ιδίου Πίνακα.

Επιπλέον, μετρήθηκε η αλλαγή της διαμέτρου της μεσαίας διατομής του καμπύλου σωλήνα κατά την διεύθυνση που ορίζεται μεταξύ των δύο πλαϊνών του περιοχών (flank- to- flank direction), μέσω ειδικών συσκευών- πλαισίων που τοποθετήθηκαν εκεί.



Εικόνα 3.2: Πειραματική δοκιμή καμπύλου σωλήνα 8 ιντσών υπό κάμψη: (a) αστοχία καμπύλου τμήματος, (b) σχηματισμός ρωγμής, (c) οβαλοποίηση της διατομής του καμπύλου τμήματος [8], [9]

Όσον αφορά την αριθμητική προσομοίωση της πλαστικής συμπεριφοράς του υλικού σε κυκλικές καταπονήσεις, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο μη γραμμικό μοντέλο, το οποίο αποτελεί συνδυασμό ισοτροπικής και κινηματικής κράτυνσης. Το μοντέλο αυτό, επιλέχθηκε έναντι άλλων «απλούστερων» (π.χ. μοντέλο γραμμικής κινηματικής κράτυνσης), καθώς είναι ικανό να περιγράψει με μεγαλύτερη ακρίβεια το φαινόμενο Bauschinger υπό συνθήκες κυκλικής φόρτισης, όπου υπάρχει αλλαγή στην κατεύθυνση των επιβαλλόμενων φορτίων. Περισσότερες πληροφορίες για το μοντέλο αυτό της κράτυνσης, είναι διαθέσιμες στις σχετικές εργασίες. Είναι σημαντικό εδώ να σημειωθεί, η πρωταρχική σημασία που έχει η επιλογή κατάλληλου μοντέλου πλαστικότητας στις εφαρμογές αυτές καθώς, προκειμένου τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων να είναι αξιόπιστα, θα πρέπει αυτό να περιγράφει με ακρίβεια την απόκριση του μεταλλικού υλικού σε συνθήκες κυκλικής φόρτισης και ιδιαίτερα, να «προβλέπει» το φαινόμενο του ratcheting. Ο ισχυρισμός αυτός επισημαίνεται συχνά στην βιβλιογραφία, ενώ η περιγραφή ενός μοντέλου αυτών των χαρακτηριστικών αποτελεί αντικείμενο έρευνας πολλών μελετητών.

Κάνοντας μια επισκόπηση στα πειραματικά αποτελέσματα των άνω εργασιών, προκύπτει πως σε κάθε δοκιμή, με ή χωρίς εσωτερική πίεση, η αστοχία συνέβη με την μορφή ρωγμής η οποία εμφανίστηκε στην περιοχή flank του καμπύλου σωλήνα, κοντά στην μεσαία διατομή του. Η ρωγμή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2.b, ακολουθεί την διεύθυνση κατά το μήκος του καμπύλου τμήματος, γεγονός που υποδεικνύει ότι έχει σχηματιστεί λόγω των εκτεταμένων περιφερειακών

παραμορφώσεων που αναπτύσσονται τοπικά στην περιοχή αυτή. Οι σημαντικές αυτές περιφερειακές παραμορφώσεις συνδέονται με την οβαλοποίηση της διατομής που επίσης λαμβάνει χώρα (Εικόνα 3.2.c).

Συνεπώς, η περιοχή του flank χαρακτηρίζεται ως η κρίσιμη για αστοχία, όπως επιβεβαιώνεται και από άλλες πειραματικές και υπολογιστικές εργασίες. Σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις αλλά και τις προσομοιώσεις, στην περιοχή αυτή αναπτύσσονται οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις. Επίσης προκύπτει πως σε κάθε περίπτωση, στην περιοχή αυτή οι περιφερειακές παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες διαμήκεις παραμορφώσεις, γεγονός που δικαιολογεί και την κατεύθυνση της ρωγμής.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών, προκύπτει ακόμα το συμπέρασμα πως ισχυρότερες καταπονήσεις, δηλαδή με μεγαλύτερο πλάτος μετατόπισης, οδηγούν σε μείωση των κύκλων ζωής του σωλήνα. Επίσης, συνεπάγονται αύξηση του εύρους των παραμορφώσεων στην κρίσιμη περιοχή αστοχίας.

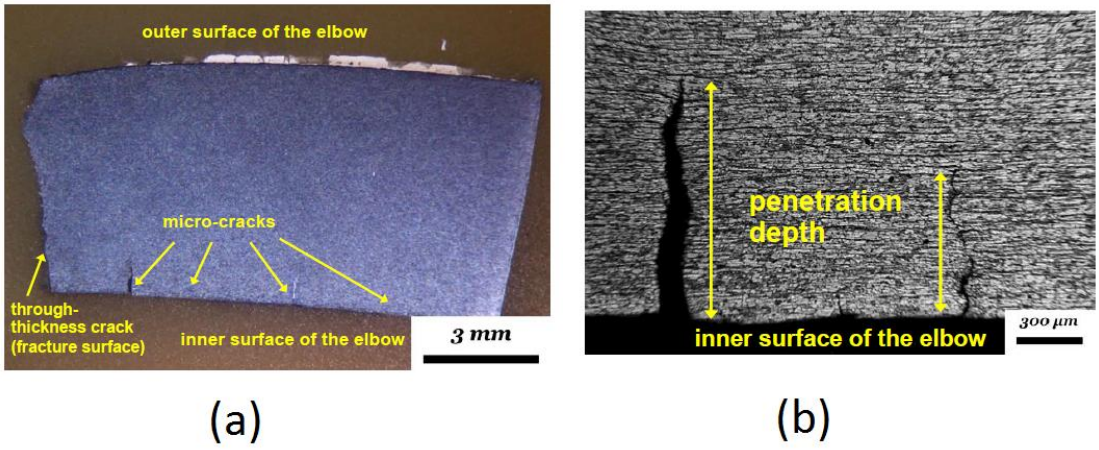
Όσον αφορά την επιβολή εσωτερικής πίεσης στους σωλήνες, από τα άνω πειράματα και προσομοιώσεις προκύπτει πως η αύξηση της εσωτερικής πίεσης οδηγεί σε μείωση του εύρους των περιφερειακών παραμορφώσεων και αύξηση του εύρους των διαμήκων παραμορφώσεων στην κρίσιμη περιοχή.

Επίσης, οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα πως ο ρυθμός αύξησης της συσσώρευσης της πλαστικής παραμόρφωσης (ratcheting) στην κρίσιμη περιοχή, αυξάνεται με την επιβολή εσωτερικής πίεσης. Αντίθετα, η διατομή παρουσιάζει μικρότερη οβαλοποίηση υπό συνθήκες εσωτερικής πίεσης σε σχέση με αυτήν που παρουσιάζει όταν οι σωλήνες δεν βρίσκονται υπό πίεση.

Τέλος, προτού το Κεφάλαιο αυτό ολοκρηρωθεί, είναι σημαντικό να γίνει αναφορά στην πρόσφατη εργασία του του Karvelas et al. [10], η οποία αφορά την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς βιομηχανικών σωληνώσεων υπό ισχυρές κυκλικές φορτίσεις. Για τους σκοπούς της έρευνάς αυτής, έγιναν πειραματικές δοκιμές οι οποίες υποστηρίχθηκαν από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, ενώ έλαβαν χώρα και μεταλλογραφικές παρατηρήσεις στην κρίσιμη περιοχή αστοχίας.

Σύμφωνα με την εργασία αυτή, οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις συγκεντρώνονται στην εσωτερική πλευρά της περιοχής flank και η ρωγμή κάνει την «εκκίνησή» της στην πλευρά αυτή. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με τις μεταλλογραφικές παρατηρήσεις που διεξήχθησαν, εντοπίστηκαν μικρορωγμές στην εσωτερική πλευρά της περιοχής flank του καμπύλου τμήματος (Εικόνα 3.3), οδηγώντας στο συμπέρασμα πως η ρωγμή η οποία ευθύνεται για την αστοχία ξεκινά να αναπτύσσεται στην περιοχή αυτή. Η ρωγμή αναπτύσσεται κατά το πάχος του

τοιχώματος, προς την εξωτερική πλευρά του flank και όταν το μέγεθός της γίνει κρίσιμο, διαπερνά το πάχος του σωλήνα.



Εικόνα 3.3: Εντοπισμός μικροραγμών στην εσωτερική πλευρά του flank του καμπύλου τμήματος: (a) Μακροσκοπική εξέταση εγκάρσιας διατομής καμπύλου σωλήνα, (b)Μικροδομή εσωτερικής επιφάνειας [10]

Συνεπώς, σύμφωνα με την ίδια δημοσίευση, η ολιγοκυκλική κόπωση η οποία οδηγεί στην εμφάνιση της ρωγμής στο καμπύλο τμήμα, σε συνδυασμό με την συσσώρευση πλαστικών παραμορφώσεων στην ίδια περιοχή αυτού, είναι οι κύριοι μηχανισμοί που οδηγούν στην αστοχία του εξαρτήματος.

Τα συμπεράσματα των εργασιών που αναλύθηκαν παραπάνω, επιβεβαιώνονται και από άλλες πειραματικές εργασίες. Τα πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα των εργασιών αυτών καθώς και τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουν, θα χρησιμοποιηθούν ως «μέτρο σύγκρισης» για την παρούσα εργασία, προκειμένου να εξεταστεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων της.

4. Σκοπός της παρούσας εργασίας

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται μέσω υπολογιστικής μελέτης η μηχανική συμπεριφορά των καμπύλων τμημάτων βιομηχανικών σωληνώσεων υπό δομικά κυκλικά φορτία και εσωτερική πίεση. Η αριθμητική μελέτη λαμβάνει χώρα με την βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου ABAQUS, ενώ περιλαμβάνει μη γραμμικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων τα οποία χρησιμοποιούνται ώστε να προσομοιωθεί με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια η ελαστοπλαστική συμπεριφορά των σωλήνων που εξετάζονται.

Συγκεκριμένα, στην εργασία χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, ένα μοντέλο στο όποιο χρησιμοιούνται στοιχεία κελύφους (shell elements) για την προσομοίωση διάταξης σωληνώσεων και ένα στο οποίο η ίδια διάταξη έχει προσομοιωθεί με στοιχεία στερεού (solid elements). Σε κάθε περίπτωση, στην διάταξη σωληνώσεων, η οποία αποτελείται από δύο ευθύγραμμους σωλήνες που ενώνονται με ένα καμπύλο τμήμα σωλήνα, ασκείται κυκλική μετατόπιση σταθερού πλάτους. Η φόρτιση αυτή εφαρμόζεται στην διάταξη με τέτοιο τρόπο ώστε στο καμπύλο τμήμα να επιβάλλεται κυκλική κάμψη εντός επιπέδου. Εξετάζεται επίσης η περίπτωση στην οποία το σύστημα σωληνώσεων υπόκειται ταυτόχρονα και σε εσωτερική πίεση σταθερού επιπέδου.

Το παραπάνω πρόβλημα εξετάζεται για διάφορες τιμές επιβαλλόμενου πλάτους μετατόπισης και εσωτερικής πίεσης.

Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά γίνεται ο εντοπισμός της κρίσιμης περιοχής της αστοχίας όπως προβλέπεται από τις προσομοιώσεις και έπειτα, μελετάται η επίδραση των μεγεθών του επιβαλλόμενου πλάτους μετατόπισης και της εσωτερικής πίεσης στα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα εξετάζονται ως προς τα φορτία, τις τοπικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον καμπύλο σωλήνα και την οβαλοποίηση της μεσαίας διατομής του. Παράλληλα γίνεται σχολιασμός των διαφοροποιήσεων που παρατηρούνται μεταξύ των αποτελεσμάτων των αναλύσεων μοντέλου κελύφους και στερεού.

Ακολουθεί υπολογισμός των κύκλων ζωής σε κόπωση από εμπειρικές σχέσεις, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων.

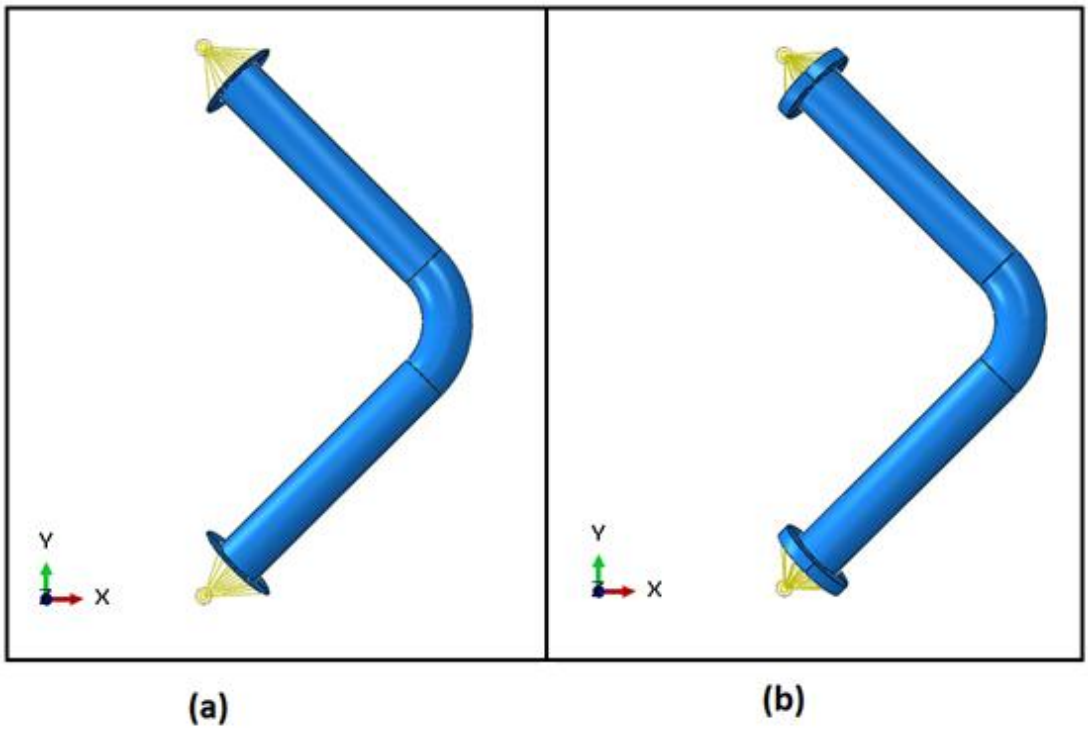
Τέλος, περιγράφεται διαδικασία πειραμάτων όπως προτείνεται να διεξαχθεί για την μελέτη του παρόντος προβλήματος και συνοψίζονται τα αποτελέσματα της υπολογιστικής εργασίας.

5. Προσομοίωση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

5.1 Περιγραφή προβλήματος

Προκειμένου να μελετηθεί το πρόβλημα της κάμψης εντός επιπέδου σε καμπύλο σωληνωτό τμήμα, έγινε προσομοίωση κατάλληλης διάταξης σωληνώσεων σε λογισμικό ABAQUS.

Η διάταξη αποτελείται από καμπύλο σωληνωτό τμήμα 90 μοιρών, διαμέτρου D= 60.3 mm και πάχους t= 3.91 mm (D/t= 15.4), το οποίο ενώνεται στα άκρα του με δύο ευθύγραμμους σωλήνες κατάλληλου μήκους. Στα ελεύθερα άκρα τους, οι ευθύγραμμοι σωλήνες ενώνονται με κυκλικές πλάκες οι οποίες χρησιμοποιούνται ως «καπάκια» για το σύστημα σωληνώσεων, προκειμένου να εφαρμοστεί εσωτερική πίεση σε αυτό.



Εικόνα 5.1: Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων: (a) μοντέλο με στοιχεία κελύφους, (b) μοντέλο με στοιχεία στερεού

Η διάταξη έχει την μορφή που φαίνεται στις Εικόνες 5.1.a και b. Επιβάλλονται κατάλληλες συνοριακές συνθήκες ώστε το άνω άκρο της διάταξης να παραμένει ακίνητο ανώ το κάτω άκρο μετακινείται, καθώς ασκείται σε αυτό κυκλική μετατόπιση σταθερού πλάτους. Όταν η επιβολή της μετατόπισης γίνεται προς την θετική κατεύθυνση του Y- άξονα , όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, ο

καμπύλος σωλήνας υφίσταται κλείνουσες καμπτικές ροπές, ενώ όταν επιβάλλεται προς την αντίθετη κατεύθυνση ο σωλήνας υπόκειται σε ανοίγουσες καμπτικές ροπές. Η φόρτιση αυτή συνεπάγεται κυκλική κάμψη εντός επιπέδου για το καμπύλο τμήμα.

Αρχικά, για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο οποίο όλα τα μέρη της διάταξης προσομοιώθηκαν με στοιχεία κελύφους (Εικόνα 5.1.a). Αυτή είναι μια συνήθης προσέγγιση για την μοντελοποίηση σωληνώσεων, καθώς η γεωμετρία τους «επιτρέπει» την χρήση τέτοιων στοιχείων. Η επιλογή στοιχείων κελύφους αποτελεί μια «απλοποίηση» του προβλήματος, αφού η προσομοίωση περιλαμβάνει λιγότερα στοιχεία από αυτά που περιλαμβάνει μια αντίστοιχη προσομοίωση με στοιχεία στερεού. Συνεπώς, αυτό οδηγεί και σε μικρότερο υπολογιστικό κόστος.

Με βάση την θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων, η χρήση των στοιχείων κελύφους προτείνεται σε περιπτώσεις στις οποίες η μία διάσταση της γεωμετρίας (συνήθως η διάσταση του πάχους) είναι σημαντικά μικρότερη των άλλων, ενώ παράλληλα οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στην διάσταση αυτή μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Σύμφωνα με τον οδηγό προσομοιώσεων που προσφέρει το λογισμικό ABAQUS, μια κατασκευή της οποίας το πάχος είναι μικρότερο του 1/10 μιας χαρακτηριστικής διάστασης της κατασκευής, μπορεί να προσομοιωθεί με στοιχεία κελύφους. Για την περίπτωση των σωλήνων, ως χαρακτηριστική διάσταση λαμβάνεται η εξωτερική διάμετρός τους και για το παρόν πρόβλημα η ανισοτική σχέση αυτή ισχύει.

Παρόλα αυτά, οι σωλήνες του προβλήματος μπορούν να χαρακτηριστούν σωλήνες με παχύ κέλυφος καθώς ο λόγος της διαμέτρου τους προς πάχος τοιχώματός τους D/t ισούται με 15.4, τιμή μικρότερη της τιμής 20. Η τελευταία χρησιμοποιείται συχνά στην βιβλιογραφία ώς «όριο» προκειμένου να χαρακτηριστεί ένας σωλήνας ως λεπτότοιχος ($D/t>20$) ή σωλήνας με παχύ κέλυφος ($D/t<20$).

Για τον λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμη η ανάπτυξη και ενός δεύτερου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, στο οποίο οι σωλήνες και οι πλάκες προσομοιώνονται με στοιχεία στερεού (Εικόνα 5.1.b).

Τα δύο μοντέλα αποτελούνται από τα ίδια χαρακτηριστικά γεωμετρίας και υλικού, συνοριακών συνθηκών και φόρτισης. Παρακάτω τα μοντέλα κελύφους και στερεού περιγράφονται παράλληλα, ενώ σε επόμενο κεφάλαιο γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

5.2 Γεωμετρία και μηχανικές ιδιότητες υλικού

Σε λογισμικό ABAQUS, σχεδιάστηκε καμπύλο σωληνωτό τμήμα 90 μοιρών με διάμετρο 60.3 mm και πάχος 3.91 mm, καθώς και ευθύγραμμο τμήμα σωλήνα ιδίας διαμέτρου και πάχους, με μήκος 300 mm. Επίσης έγινε σχεδιασμός κυκλικής πλάκας διαμέτρου 100 mm και πάχους 15 mm. Τα άνω μέρη σχεδιάστηκαν στο λογισμικό ως τρισδιάστατα, παραμορφώσιμα σώματα.

Για την προσομοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των μεταλλικών σωλήνων, χρησιμοποιήθηκε υλικό το οποίο περιγράφεται από μία ελαστική και πλαστική συμπεριφορά. Το ίδιο υλικό χρησιμοποιήθηκε και για τις κυκλικές πλάκες.

Για την γραμμική ελαστική περιοχή, εισήχθησαν στο λογισμικό οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας E=210 GPa και του λόγου Poisson v=0.3. Η περιγραφή της πλαστικής περιοχής μπορεί να χαρακτηριστεί κάπως πιο «περίπλοκη» διαδικασία, προκειμένου να επιτευχθεί μία ικανοποιητική ακρίβεια στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του υλικού σε κυκλικές καταπονήσεις, όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 3. Για αυτόν τον λόγο αξίζει να γίνει μια σύντομη αναφορά στην διαδικασία που ακολουθείται σε αυτήν την εργασία, σε μία προσπάθεια να εξεταστεί και να κατανοηθεί καλύτερα η απόκρισή του υλικού υπό τις συνθήκες αυτές.

Στην εργασία χρησιμοποιήθηκε αρχικά μοντέλο γραμμικής κινηματικής κράτυνσης, ως μία πρώτη προσέγγιση της πλαστικής συμπεριφοράς του υλικού υπό κυκλικά φορτία. Σε ένα τέτοιο μοντέλο, η πλαστική περιοχή περιγράφεται από έναν σταθερό ρυθμό κράτυνσης. Για τον λόγο αυτό, χαρακτηρίζεται συχνά ως ένα «απλό» μοντέλο κράτυνσης το οποίο συνίσταται, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, να επιλέγεται σε περιπτώσεις όπου τα μεγέθη των παραμορφώσεων είναι σχετικά μικρά. Η γραμμική πλαστική περιοχή που το χαρακτηρίζει, δεν αντιπροσωπεύει την πραγματική συμπεριφορά ενός μεταλλικού υλικού, ενώ ένα τέτοιο μοντέλο δεν είναι ικανό να προσομοιώσει την συσσώρευση πλαστικής παραμόρφωσης η οποία λαμβάνει χώρα με την αύξηση των κύκλων φόρτισης.

Για προβλήματα ισχυρών κυκλικών καταπονήσεων στα οποία εμφανίζονται σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις, η συμπεριφορά του υλικού μπορεί να προσομοιωθεί καλύτερα από ένα μη γραμμικό μοντέλο κινηματικής κράτυνσης. Ένα τέτοιο μοντέλο έχει επίσης την ικανότητα να προβλέπει το φαινόμενο ratcheting.

Συνεπώς, στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε μοντέλο μη γραμμικής κινηματικής κράτυνσης για την περιγραφή της πλαστικότητας του υλικού. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται σε εργασία του Chaboche και η περιγραφή του στο ABAQUS έλαβε χώρα με την εισαγωγή των παραμέτρων όπως συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1.

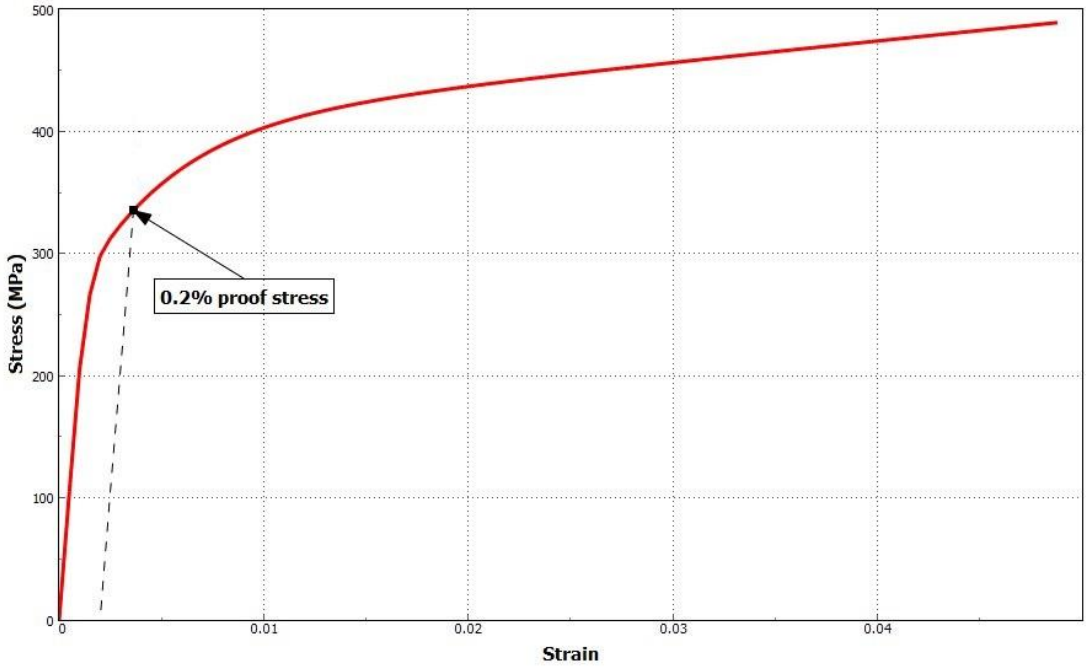
Non-Linear Kinematic Hardening model		
C1	490863	MPa
γ1	5415.77	-
C2	28820	MPa
γ2	241.63	-
C3	1956	MPa
γ3	3	-
σ0	194.33	MPa

Πίνακας 5.1: Παράμετροι μοντέλου μη γραμμικής κινηματικής κράτυνσης

Οι παράμετροι C και γ αφορούν το υλικό και προκύπτουν έπειτα από σειρά πειραμάτων κυκλικής φόρτισης που έχουν διεξαχθεί σε αυτό, ενώ με σ_0 συμβολίζεται το όριο αναλογίας του υλικού.

Ξεχωριστή μελέτη έλαβε χώρα για τον προσδιορισμό του καταστατικού νόμου του υλικού που περιγράφεται από τις άνω παραμέτρους. Η μελέτη αυτή αφορά προσομοίωση ενός στοιχειώδους τμήματος του υλικού ώστε να μελετηθεί ο καταστατικός νόμος σε σημείο. Στο στοιχειώδες τμήμα αυτό εφαρμόστηκε φόρτιση μονοαξονικού εφελκυσμού καθώς και κυκλική φόρτιση (μονοαξονικός εφελκυσμός-θλίψη).

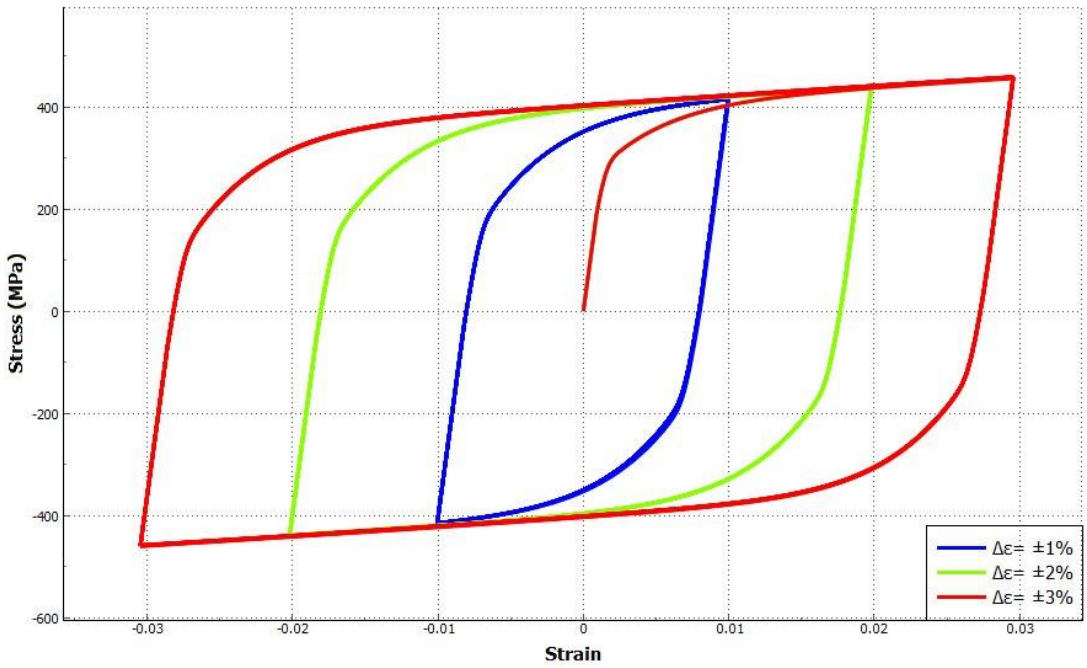
Η καμπύλη τάση- παραμόρφωσης μονοαξονικού εφελκυσμού όπως προκύπτει από την υπολογιστική αυτή μελέτη, φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Στο πρόβλημα αυτό, ως όριο διαρροής σ_y του υλικού λαμβάνεται η τιμή της τάσης η οποία αντιστοιχεί σε μόνιμη παραμόρφωση 0.2%. Η τιμή αυτή υπολογίζεται από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, χρησιμοποιώντας βοηθητική ευθεία γραμμή παράλληλη στην ελαστική γραμμή, για μόνιμη παραμόρφωση ίση με 0.002.



Σχήμα 5.1: Καμπύλη τάσης- παραμόρφωσης μονοαξονικού εφελκυσμού

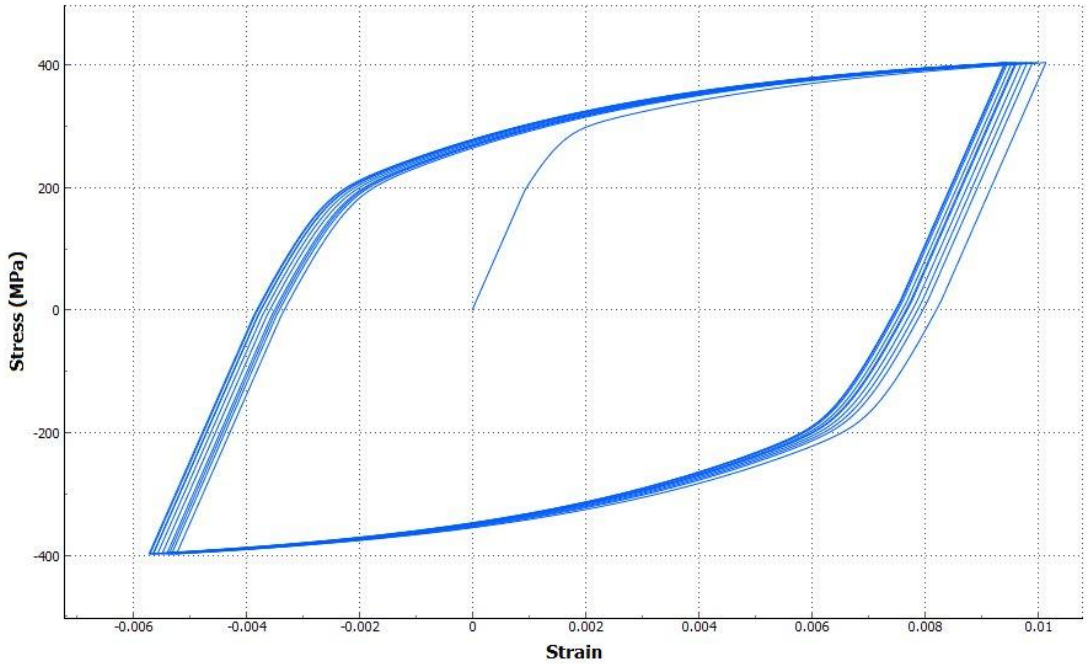
Το σημείο τομής των δύο γραμμών δίνει την τιμή του ορίου διαρροής σ_y = 335MPa.

Όσον αφορά την απόκριση του υλικού σε κυκλική φόρτιση, στο Σχήμα 5.2 φαίνεται η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης για δοκιμές όπου η φόρτιση έγινε με την μορφή μετατόπισης σταθερού μεγέθους, ώστε να επιτευχθεί παραμόρφωση σταθερού πλάτους Δε (strain- controlled). Η δοκιμές αυτές αφορούν πλάτη παραμορφώσεων ±1%, ±2% και ±3%.



Σχήμα 5.2: Καμπύλες τάσης- παραμόρφωσης για κυκλικές φορτίσεις, με σταθερό πλάτος παραμόρφωσης ±1%, 2% και ±3%

Η απόκριση του υλικού σε κυκλική φόρτιση όπου εφαρμόζεται σταθερό πλάτος τάσης Δσ= ± 400 MPa (stress-controlled), φαίνεται στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Καμπύλη τάσης- παραμόρφωσης για κυκλική φορτίση με σταθερό πλάτος τάσης ± 400 MPa

Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί πως στα μοντέλα κελύφους χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ολοκλήρωσης κατά Gauss (Gauss quadrature) για τον υπολογισμό των σημείων ολοκλήρωσης (integration points). Συγκεκριμένα, κατά τη διεύθυνση του πάχους χρησιμοποιήθηκαν 5 σημεία ολοκλήρωσης. Η επιλογή αυτή έγινε για όλα τα μέρη της συνδεσμολογίας (σωλήνες και κυκλική πλάκα) στο μοντέλο κελύφους. Η μέθοδος Gauss χρησιμοποιείται επίσης στα μοντέλα στερεού για τον υπολογισμό των σημείων ολοκλήρωσης.

5.3 Συνδεσμολογία και κινηματικοί περιορισμοί

Η συνδεσμολογία αποτελείται από την διάταξη σωλήνων και τις κυκλικές πλάκες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1. Ο καμπύλος σωλήνας έχει ενωθεί στα άκρα του με δύο ευθύγραμμα τμήματα σωλήνα, των οποίων τα ελεύθερα άκρα ενώνονται με την σειρά τους με δύο κυκλικές πλάκες. Η «ένωση» αυτή μεταξύ του καμπύλου τμήματος και των δύο ευθύγραμμων σωλήνων, καθώς και αυτή μεταξύ των ευθύγραμμων σωλήνων και των πλακών, αφορά σε πραγματικές συνθήκες την συγκόλληση τους. Για την προσομοίωση αυτής της αλληλεπίδρασης μεταξύ των μερών της συνδεσμολογίας, χρησιμοποιείται κατάλληλος κινηματικός περιορισμός τύπου *TIE, όπως προσφέρεται από το λογισμικό ABAQUS.

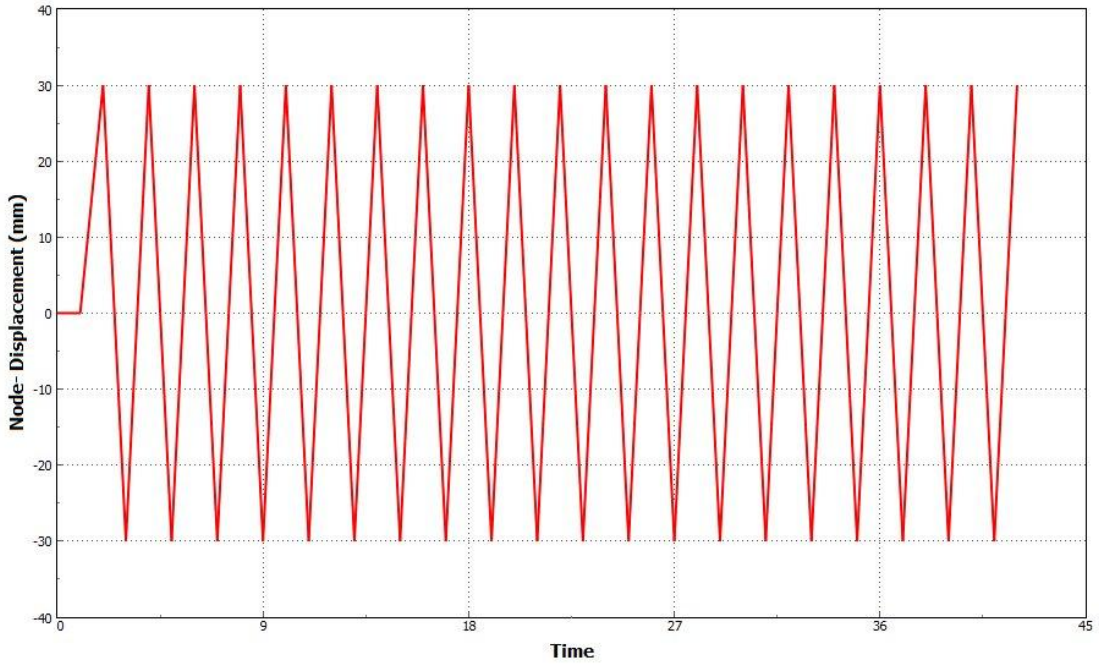
Στα μοντέλα προσομοίωσης εισάγονται δύο «εικονικοί» κόμβοι αναφοράς (Reference Points) προκειμένου να εφαρμοστούν σε αυτούς οι συνοριακές συνθήκες και η κυκλική φόρτιση αντίστοιχα. Οι κόμβοι αναφοράς δεν ανήκουν στις πλάκες ή στους σωλήνες, αλλά συνδέονται με τις κυκλικές πλάκες με κινηματικό περιορισμό τύπου *COUPLING. Η εντολή αυτή εξαναγκάζει όλους τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων των κυκλικών πλακών να κινούνται σύμφωνα με την κίνηση του κόμβου αναφοράς με τον οποίο είναι συνδεδεμένοι. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται παράλληλα η προσομοίωση άκαμπτων και απαραμόρφωτων πλακών.

5.4 Διακριτοποίηση χρόνου ανάλυσης

Σε μια πειραματική διαδικασία, η διάταξη των σωληνώσεων θα γεμίζονταν αρχικά με νερό σε πίεση η οποία θα διατηρούταν σταθερή για τον υπόλοιπο χρόνο της δοκιμής, μέχρι να επέλθει αστοχία. Έπειτα, την εφαρμογής της πίεσης θα ακολουθούσε η επιβολή της κυκλικής φόρτισης.

Για την προσομοίωση της διαδικασίας αυτής στο λογισμικό ABAQUS, χρησιμοποιήθηκε σειρά «βημάτων» τύπου “static- general step”. Στο πρώτο βήμα, γίνεται η επιβολή της εσωτερικής πίεσης, η οποία στο τέλος του ιδίου βήματος έχει φτάσει στο επιθυμητό μέγεθος. Τα επόμενα βήματα της προσομοίωσης αφορούν την επιβολή της κυκλικής μετατόπισης. Σε όλα τα βήματα αυτά, δηλαδή σε όλον τον χρόνο της ανάλυσης, το μέγεθος της εσωτερικής πίεσης παραμένει σταθερό.

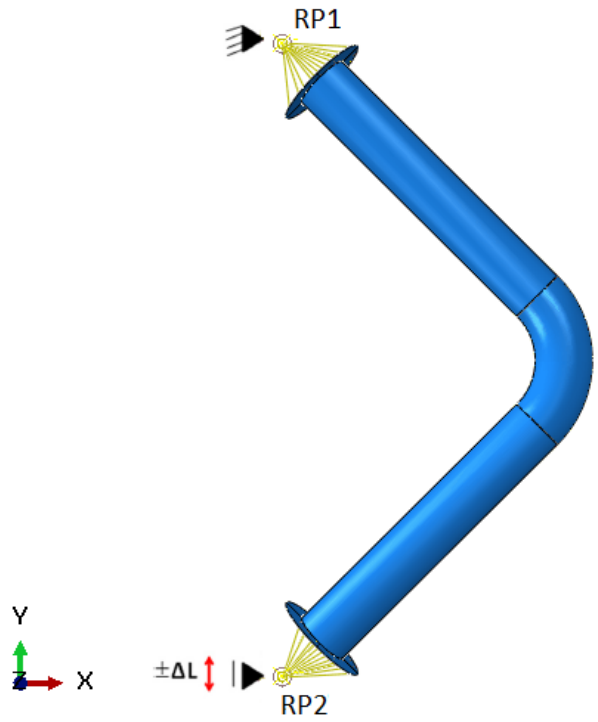
Συνολικά, η ανάλυση αποτελείται από 42 βήματα, με το πρώτο να αφορά την επιβολή εσωτερικής πίεσης, όπως παραπάνω αναφέρθηκε. Στο δεύτερο βήμα γίνεται η πρώτη φόρτιση, με την μορφή μετατόπισης που επιβάλλεται στον κάτω κόμβο αναφοράς, όπως θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο. Τα υπόλοιπα 40 βήματα προσομοιώνουν 20 κύκλους φόρτισης, καθώς σε κάθε βήμα λαμβάνει χώρα επιβολή μετατόπισης ίδιου μεγέθους αλλά αντίθετης φοράς από αυτήν που επιβλήθηκε στο προηγούμενο βήμα. Στο Σχήμα 5.4 περιγράφεται η μεταβολή της μετατόπισης σε σχέση με τον χρόνο της προσομοίωσης για πλάτος μετατόπισης ±30 mm, όπως εφαρμόζεται στον κάτω κόμβο αναφοράς. Σημειώνεται εδώ πώς κάθε βήμα της προσομοίωσης επιλέχθηκε να έχει διάρκεια 1 second.



Σχήμα 5.4: Επιβαλλόμενη μετατόπιση σε σχέση με τον χρόνο της προσομοίωσης, για πλάτος ΔL= ±30 mm

5.5 Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση

Οι συνοριακές συνθήκες επιβάλλονται στους κόμβους αναφοράς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2. Η εικόνα αυτή αφορά το μοντέλο κελύφους, όμως οι ίδιες συνοριακές συνθήκες εφαρμόζονται και στο μοντέλο στερεού. Οι κόμβοι αναφοράς συνδέονται με τις κυκλικές πλάκες μέσω κατάλληλων κινηματικών περιορισμών, όπως περιγράφεται σε προηγούμενη παράγραφο, με συνέπεια η επιβαλλόμενη μετατόπιση να μεταφέρεται στους κόμβους των τελευταίων.



Εικόνα 5.2: Συνοριακές συνθήκες και κυκλική φόρτιση

Στον άνω κόμβο αφοράς, ο οποίος σημειώνεται στην Εικόνα ως "RP1", επιβάλλονται κατάλληλες συνοριακές συνθήκες ώστε να παραμένει ακίνητος καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης και ελεύθερος μόνο σε περιστροφή γύρω από τον Z- άξονα. Ο κάτω κόμβος αναφοράς "RP2", είναι ελεύθερος σε μετακίνηση κατά τον Y- άξονα και ελεύθερος να περιστραφεί κατά τον Z- άξονα.

Η κυκλική φόρτιση επιβάλλεται στην συνδεσμολογία στον κάτω κόμβο αναφοράς "RP2", με την μορφή μετατόπισης σταθερού πλάτους ±ΔL. Στην παρούσα εργασία μελετώνται οι περιπτώσεις πλάτους μετατόπισης ±20 mm και ±30 mm.

Στο πρόβλημα επίσης μελετάται η επίδραση που έχει η επιβολή εσωτερικής πίεσης στην απόκριση του καμπύλου τμήματος. Η πίεση εφαρμόζεται ομοιόμορφα στην εσωτερική επιφάνεια των σωλήνων καθώς και στις κυκλικές πλάκες, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως «καπάκια» της συνδεσμολογίας. Προκειμένου η εσωτερική πίεση να επιδρά στην μηχανική συμπεριφορά του σωλήνα, πρέπει να μέγεθός της να είναι «συγκρίσιμο» με την πίεση διαρροής του σωλήνα. Η πίεση διαρροής των σωλήνων p_y υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$p_y = \frac{2\sigma_y t}{D} \tag{5.1}$$

Για διάμετρο D=60.3 mm, πάχος t=3.91 mm και όριο διαρροής σ_y = 335Mpa, η πίεση διαρροής παίρνει την τιμή p_y = 43 MPa. Στην εργασία αυτή θα εξεταστεί η απόκριση του καμπύλου τμήματος όταν η διάταξη σωληνώσεων δεν βρίσκεται υπό πίεση, καθώς και οι περιπτώσεις εσωτερικής πίεσης ίσης με το 30% και 60% της πίεσης διαρροής. Οι δύο τελευταίες περιπτώσεις αφορούν τιμές 13 MPa και 26 MPa, αντίστοιχα.

5.6 Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

Ο ορισμός κατάλληλου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ζήτημα κρίσιμης σημασίας για το μοντέλο της προσομοίωσης. Η επιλογή του τύπου στοιχείου και της πυκνότητας πλέγματος μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αριθμητικά αποτελέσματα των αναλύσεων. Για αυτό τον λόγο, διεξήχθη παραμετρική μελέτη, σε μια προσπάθεια να επιλεγεί για κάθε μοντέλο ο κατάλληλος τύπος στοιχείου καθώς και ο «βέλτιστος» αριθμός αυτών.

Για το μοντέλο κελύφους έγιναν αναλύσεις με γραμμικά στοιχεία μειωμένης ή μη ολοκλήρωσης S4R και S4, καθώς και με μη γραμμικά στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης S8R και S8R5. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για δύο διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος. Οι πυκνότητες πλέγματος αυτές περιγράφονται στον Πίνακα 5.2 ως πλέγμα A και B. Στον Πίνακα αυτό φαίνεται ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιούνται ανά σωλήνα (ευθύγραμμο και καμπύλο τμήμα) και ανά κατεύθυνση αυτού (περιφερειακή και διαμήκης), ενώ στις δύο τελευταίες στήλες του Πίνακα αναγράφεται ο συνολικός αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην διάταξη σωλήνων και στο καμπύλο τμήμα αντίστοιχα. Σημειώνεται εδώ πως στις κυκλικές πλάκες χρησιμοποιήθηκε αρκετά αραιό πλέγμα και, καθώς αποτελούν «βοηθητικά» μέρη της συνδεσμολογίας, η προσομοίωσή τους δεν κατέχει κρίσιμο ρόλο για την μελέτη του προβλήματος της εργασίας.

Mesh	Straight Pipe- Hoop Direction	Straight Pipe- Axial Direction	Elbow- Hoop Direction	Elbow- Axial Direction	Total number of elements	Number of elements in Elbow
A	22	75	22	75	8096	1496
B	30	45	30	30	9000	3600

Πίνακας 5.2: Παραμετρική μελέτη, πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο με στοιχεία κελύφους

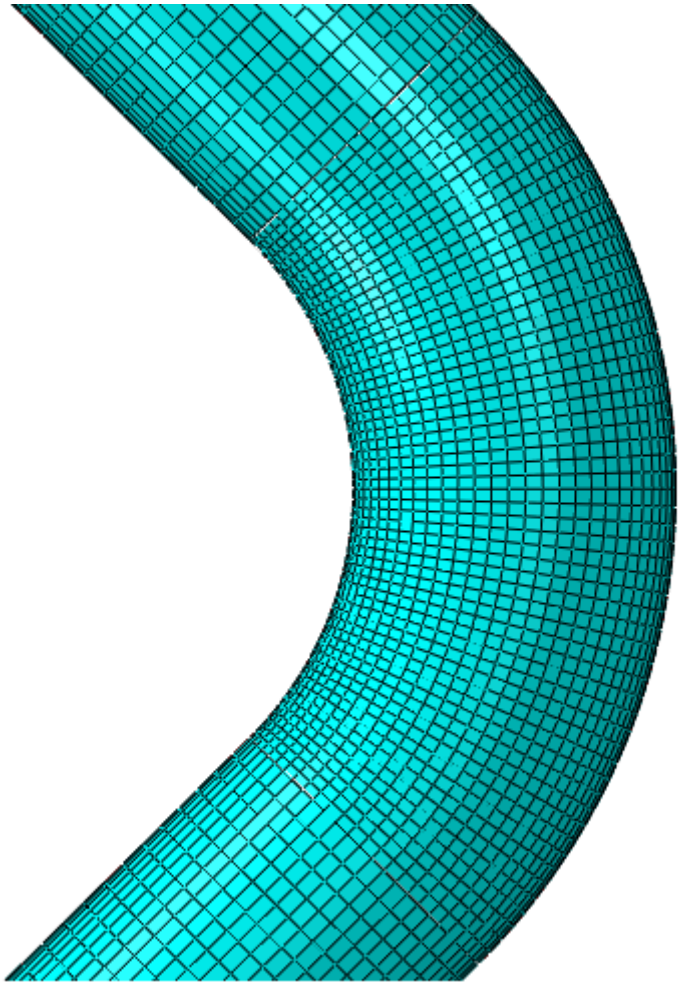
Συγκρίνοντας τις δύο πυκνότητες πλέγματος με βάση τον ανωτέρω Πίνακα, προκύπτει πως στο πλέγμα B τα στοιχεία στον καμπύλο σωλήνα είναι σε αριθμό πάνω από τα διπλάσια από αυτά του πλέγματος A (στήλη 7), ενώ ο συνολικός αριθμός των στοιχείων τους δεν παρουσιάζει την ίδια διαφορά (στήλη 6).

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα (φορτία, παραμορφώσεις, οβαλοποιημένη διατομή) των αναλύσεων οι οποίες προσομοιώθηκαν με βάση τα παραπάνω, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ αυτών για αναλύσεις με διαφορετικό τύπο στοιχείου και δεδομένη πυκνότητα πλέγματος. Έπειτα όμως από πιο λεπτομερείς παρατηρήσεις, τα μη γραμμικά στοιχεία δεν θεωρήθηκαν κατάλληλα για την περιγραφή του προβλήματος και συνεπώς «απορρίφθηκαν».

Η επιλογή της πυκνότητας πλέγματος αφορά σε κάθε περίπτωση την ακρίβεια των αποτελεσμάτων έναντι του υπολογιστικού κόστους. Συγκρίνοντας αποτελέσματα αναλύσεων με διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος για δεδομένο τύπο στοιχείου, παρατηρήθηκε πως οι αναλύσεις με πλέγμα Β δίνουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις στις περιοχές του καμπύλου σωλήνα από τις αντίστοιχες που προκύπτουν με πλέγμα Α. Επίσης ο χρόνος προσομοίωσης για αναλύσεις με πλέγμα Β μετρήθηκε ελάχιστα μεγαλύτερος από τον χρόνο της αντίστοιχης προσομοίωσης με πλέγμα Α.

Τελικά, για την προσομοίωση του μοντέλου κελύφους επιλέχθηκε το πυκνότερο πλέγμα Β, με γραμμικά στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης S4R. Το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιείται για το μοντέλο αυτό παρουσιάζεται στις Εικόνες 5.3 και 5.4.

Εικόνα 5.3: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο με στοιχεία κελύφους



Εικόνα 5.4: Λεπτομέρια πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων σε μοντέλο με στοιχεία κελύφους, περιοχή καμπύλου τμήματος

Αντίστοιχη μελέτη έλαβε χώρα και για το μοντέλου στερεού. Σε αυτήν την περίπτωση έγιναν αναλύσεις με γραμμικά στοιχεία μειωμένης ή μη ολοκλήρωσης C3D8R και C3D8, καθώς και με μη-γραμμικά στοιχεία C3D20R και C3D20. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τρεις διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος, οι οποίες περιγράφονται στον Πίνακα 5.3 ως πλέγμα C,D και E. Στην περίπτωση των μοντέλων στερεού χρειάζεται να επιλεγεί και ο αριθμός στοιχείων και κατά την διεύθυνση του πάχους των σωλήνων, ενώ η επιλογή αυτή κρίνεται ιδιαίτερα κρίσιμη για την προσομοίωση του καμπύλου σωλήνα προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι ακριβή .

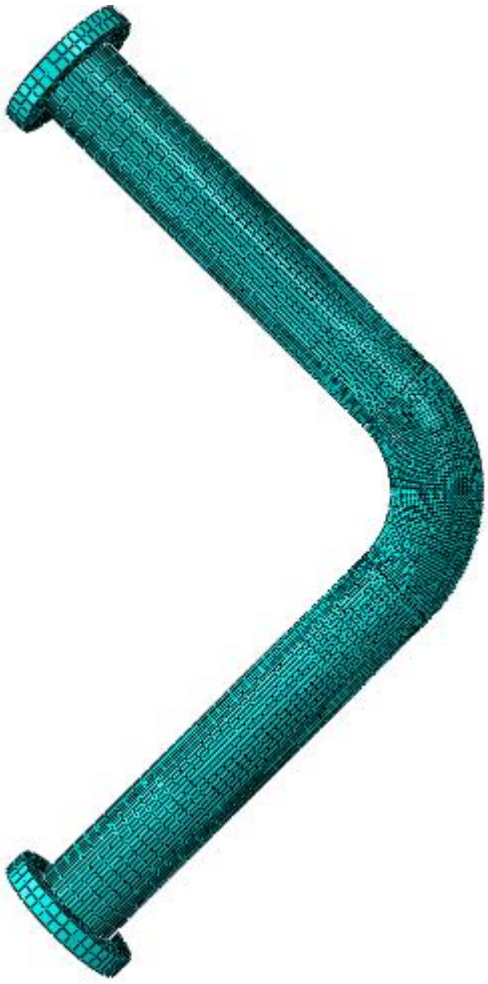
Mesh	Straight Pipe- Hoop Direction	Straight Pipe- Axial Direction	Straight Pipe- Thickness Direction	Elbow- Hoop Direction	Elbow- Axial Direction	Elbow- Thickness Direction	Total number of elements	Number of elements in Elbow
C	22	75	3	22	75	5	27720	7920
D	30	45	3	30	30	5	34200	18000
E	30	45	3	30	30	8	45000	28800

Πίνακας 5.3: Παραμετρική μελέτη, πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο με στοιχεία στερεού

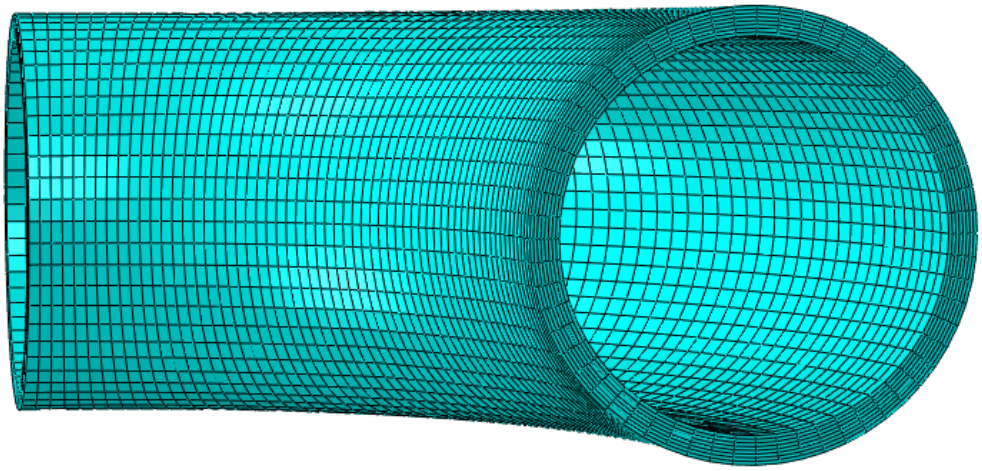
Παρατηρώντας τους Πίνακες 5.2 και 5.3, θα μπορούσε να γίνει ο ισχυρισμός πως το πλέγμα C για μοντέλα στερεού είναι «ανάλογο» του πλέγματος A για μοντέλα κελύφους. Αντίστοιχα, οι πυκνότητες πλέγματος D,E είναι «ανάλογες» της πυκνότητα πλέγματος B. Η διαφορά των πλεγμάτων D και E, βρίσκεται στον αριθμό των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του πάχους του καμπύλου σωλήνα.

Σε αυτήν την περίπτωση, ο ιδιαίτερα μεγάλος χρόνος προσομοίωσης των αναλύσεων με στοιχεία C3D20R και C3D20, οδήγησε σε άμεση απόρριψη αυτών. Η επιλογή της πυκνότητας πλέγματος C επίσης δεν προτιμήθηκε καθώς θεωρήθηκε λιγότερο ακριβής.

Τελικά, για τα μοντέλα στερεού επιλέχθηκε να γίνει χρήση στοιχείων τύπου C3D8R με πυκνότητα πλέγματος E, η οποία χαρακτηρίζεται από οχτώ στοιχεία κατά το πάχος του καμπύλου σωλήνα. Το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιείται για το μοντέλο αυτό παρουσιάζεται στις Εικόνες 5.5 και 5.6.



Εικόνα 5.5: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο με στοιχεία στερεού



Εικόνα 5.6: Λεπτομέρια πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων σε μοντέλο με στοιχεία στερεού, περιοχή καμπύλου τμήματος

Συνοψίζοντας, στα μοντέλα κελύφους και στερεού κρίθηκε κατάλληλη η επιλογή γραμμικών στοιχείων μειωμένης ολοκλήρωσης, με το πλέγμα που εφαρμόζεται να είναι ιδιαίτερα πυκνό στην περιοχή του καμπύλου σωλήνα. Για την περιοχή αυτή, στα μοντέλα κελύφους χρησιμοποιούνται 30 στοιχεία κατά την περιφερειακή διεύθυνση και 30 στοιχεία κατά την διαμήκη διεύθυνση. Στα μοντέλα στερεού ο καμπύλος σωλήνας περιγράφεται από 30 στοιχεία κατά την περιφερειακή διεύθυνση, 30 στοιχεία κατά την διαμήκη διεύθυνση και 8 στοιχεία κατά την διεύθυνση του πάχους του.

Η παραπάνω επιλογή προέκυψε από παρατηρήσεις στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, έπειτα από παραμετρική μελέτη που έλαβε χώρα. Σημειώνεται εδώ πως σε περίπτωση που υπήρχαν διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα, θα μπορούσε να γίνει η επιλογή κατάλληλου τύπου στοιχείου και πυκνότητας πλέγματος ώστε τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων να προσεγγίζουν τις πειραματικές μετρήσεις.

6. Αποτελέσματα αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

6.1 Επισκόπηση αποτελεσμάτων

Προτού γίνει η εξέταση των αποτελεσμάτων όπως προέκυψαν από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, κρίνεται χρήσιμη η παρουσίαση των σημαντικότερων μετρήσεων που έλαβαν χώρα, σε συγκεντρωτικούς πίνακες. Στις παρακάτω παραγράφους γίνεται αναλυτικότερος σχολιασμός των μεγεθών αυτών προκειμένου να γίνει η διεξαγωγή των συμπερασμάτων ενώ προτείνεται στον αναγνώστη να ανατρέχει στην παρούσα παράγραφο προκειμένου να εξετάσει τα ποσοτικά μεγέθη των αποτελεσμάτων.

Συνολικά έλαβαν χώρα δώδεκα αναλύσεις για την μελέτη του προβλήματος, όπως περιγράφονται στον Πίνακα 6.1. Οι αναλύσεις 1 έως 6 αφορούν μοντέλα κελύφους και οι αναλύσεις 7 έως 12 μοντέλα στερεού. Οι παράμετροι αυτών σχετίζονται με το μέγεθος της επιβαλλόμενης μετατόπισης πλάτους ±ΔL (mm) και της εσωτερικής πίεσης P (MPa).

Analysis	Model	Displacement range, ΔL (mm)	Pressure, P (MPa)
1	Shell	±20	0
2	Shell	±20	13
3	Shell	±20	26
4	Shell	±30	0
5	Shell	±30	13
6	Shell	±30	26
7	Solid	±20	0
8	Solid	±20	13
9	Solid	±20	26
10	Solid	±30	0
11	Solid	±30	13
12	Solid	±30	26

Πίνακας 6.1: Περιγραφή αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

Ο Πίνακας 6.2 αφορά μετρήσεις του εύρους της περιφερειακής παραμόρφωσης $\Delta\varepsilon_H$ και της διαμήκους παραμόρφωσης $\Delta\varepsilon_L$, οι οποίες έλαβαν χώρα κατά τον τελευταίο κύκλο φόρτισης. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν στην εσωτερική πλευρά της περιοχής flank του καμπύλου σωλήνα (flank inner surface), ενώ μετρήθηκε το εύρος της περιφερειακής παραμόρφωσης και στην εξωτερική πλευρά του flank (flank outer surface) καθώς και το εύρος της διαμήκους παραμόρφωσης στην εξωτερική πλευρά της περιοχής intrados του καμπύλου τμήματος (intrados outer surface). Στην τελευταία στήλη του πίνακα συγκεντρώνονται οι μετρήσεις του εύρους της περιφερειακής παραμόρφωσης στην εσωτερική πλευρά της περιοχής intrados

(intrados inner surface). Στις περιοχές αυτές, όπως αργότερα θα εξεταστεί, εμφανίζονται οι σημαντικότερες παραμορφώσεις. Σημειώνεται εδώ, πως οι μετρήσεις των παραμορφώσεων πραγματοποιήθηκαν στο σημείο ολοκλήρωσης του εκάστοτε στοιχείου.

Analysis	$\Delta\varepsilon_H$% at flank inner face	$\Delta\varepsilon_L$% at flank inner face	$\Delta\varepsilon_H$% at flank outer face	$\Delta\varepsilon_L$% at intrados outer face	$\Delta\varepsilon_H$% at intrados inner face
1	3.7	0.009	2.6	1.6	1.8
2	3.3	0.06	2.2	1.6	1.6
3	2.6	0.14	1.6	1.6	1.6
4	7.6	0.16	5.6	2.9	2.7
5	6.3	0.11	4.2	2.6	2.4
6	3.4	0.32	2.1	2.3	2.5
7	3.5	0.18	1.8	1.6	1.5
8	2.8	0.27	1.4	1.7	1.3
9	2.2	0.35	1.2	1.7	1.2
10	5.9	0.20	3.0	2.7	2.5
11	4.2	0.43	2.1	2.8	2.1
12	3.0	0.62	1.3	2.8	1.8

Πίνακας 6.2: Μετρήσεις εύρους περιφερειακής και διαμήκους παραμόρφωσης σε διάφορες περιοχές του καμπύλου σωλήνα

Τέλος, στον Πίνακα 6.3 συγκεντρώνονται οι μέγιστες τιμές της δύναμης αντίδρασης και της οβαλοποίησης όπως μετρούνται σε κάθε ανάλυση.

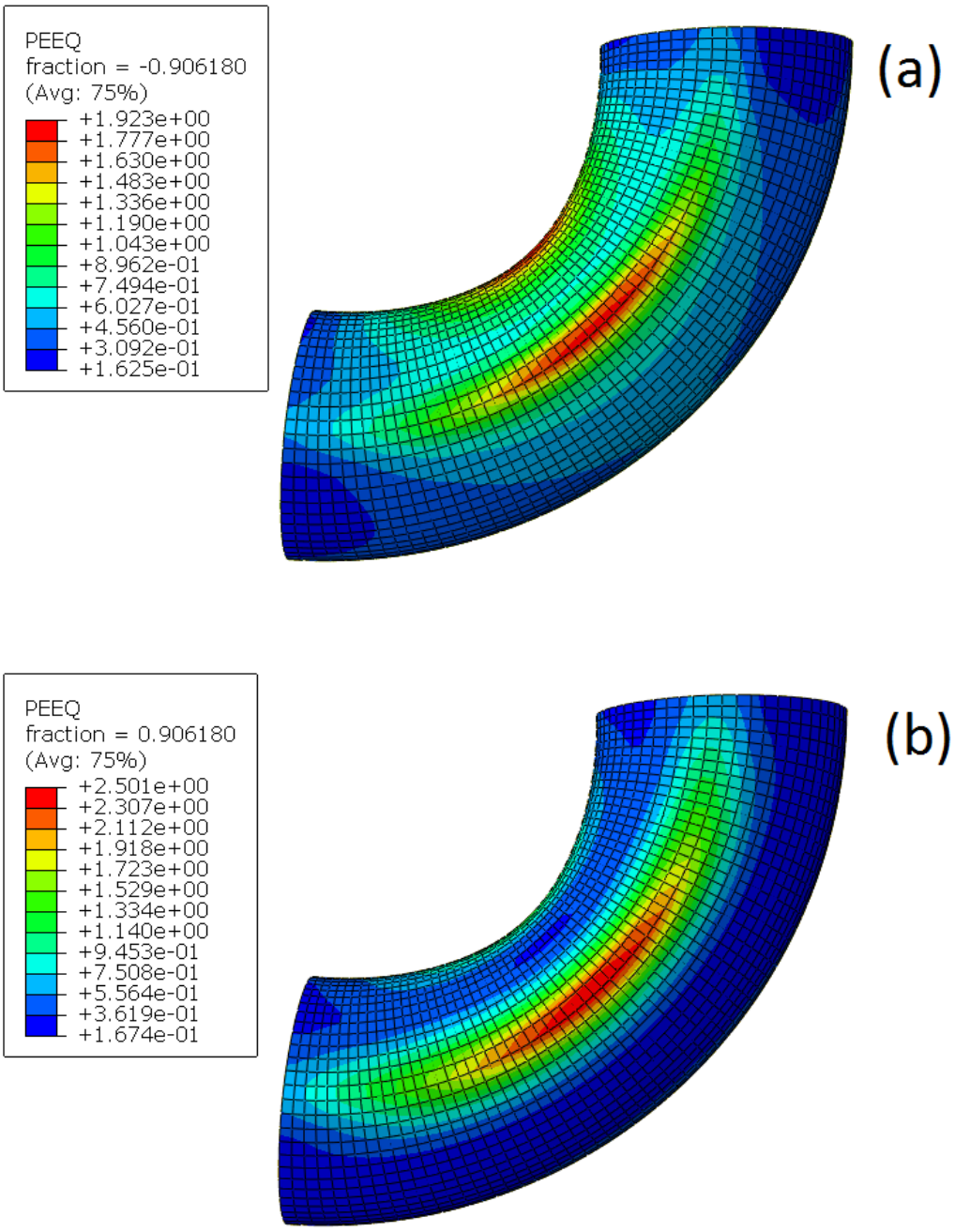
Analysis	Maximum Reaction Force (N)	Maximum Ovalization %
1	9869	6.3
2	11405	6.7
3	13346	5.9
4	10231	11.3
5	12048	10.3
6	15104	8.4
7	9878	5.6
8	11353	5.8
9	13122	5.3
10	10228	9.7
11	12080	9.1
12	14952	7.7

Πίνακας 6.3: Μετρήσεις μέγιστης δύναμης αντίδρασης και μέγιστης οβαλοποίησης της μεσαίας διατομής του καμπύλου τμήματος

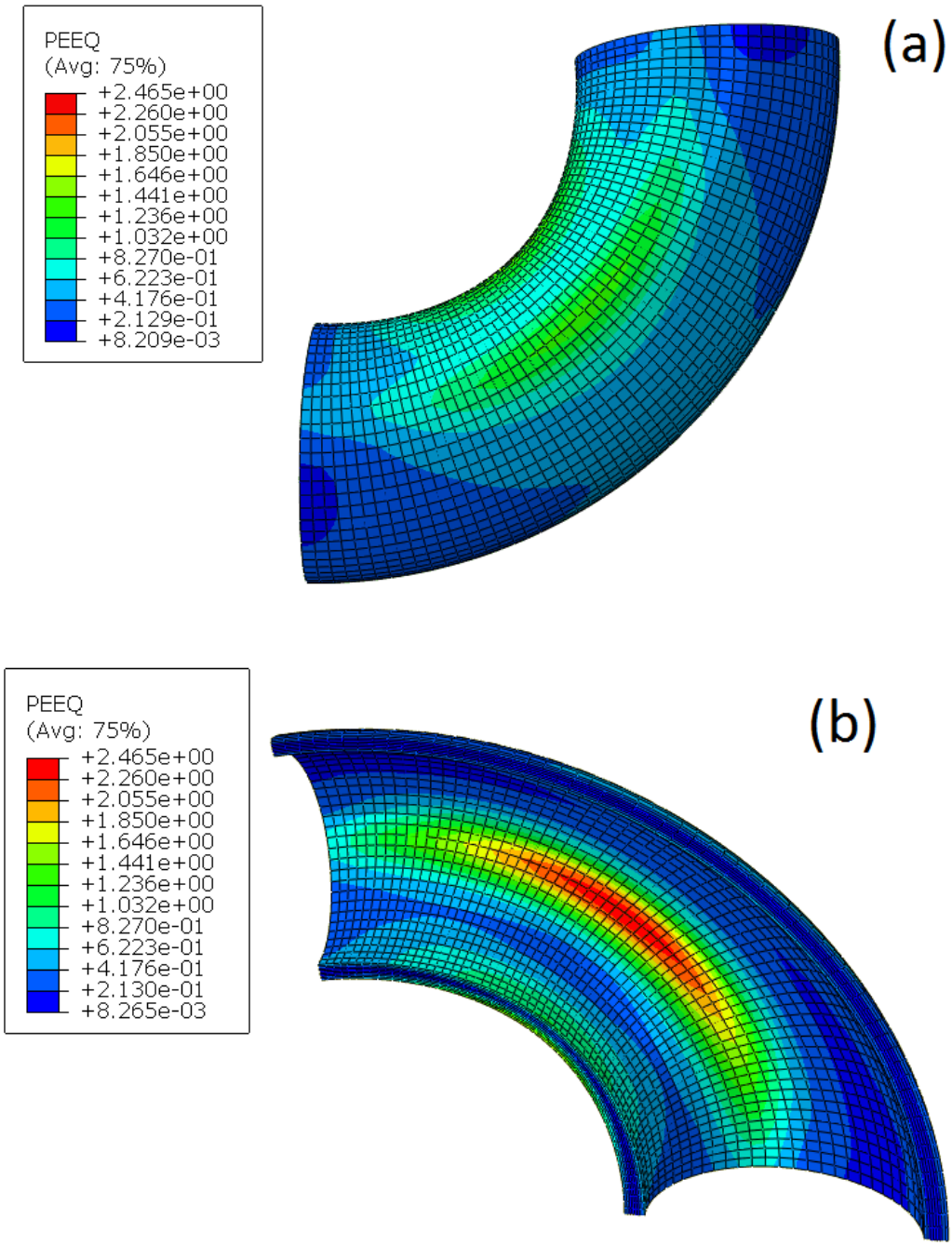
6.2 Εντοπισμός κρίσιμης περιοχής για αστοχία

Αρχικά, είναι σημαντικό να εξεταστεί αν τα αριθμητικά μοντέλα είναι ικανά να προβλέψουν την περιοχή αστοχίας. Η αστοχία, όπως επισημαίνεται από την βιβλιογραφία, λαμβάνει χώρα λόγω ολικοκυκλικής κόπωσης η οποία συνεπάγεται συσσώρευση πλαστικών παραμορφώσεων στον καμπύλο σωλήνα και σε οβαλοποίηση της διατομής του. Στην περιοχή όπου γίνεται η μεγαλύτερη συσσώρευση πλαστικών παραμορφώσεων σχηματίζεται ρωγμή η οποία τελικά οδηγεί στην αστοχία του εξαρτήματος.

Σύμφωνα με τις αναλύσεις μοντέλων κελύφους και στερεού, η περιοχή όπου εμφανίζεται η μέγιστη πλαστική παραμόρφωση στον καμπύλο σωλήνα είναι η περιοχή flank και συγκεκριμένα η εσωτερική του πλευρά. Πιο αναλυτικά, εξετάζοντας τα αποτελέσματα, μπορεί να παρατηρηθεί πως στην εσωτερική πλευρά του flank αναπτύσσονται μεγαλύτερες πλαστικές παραμορφώσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες στην εξωτερική πλευρά (Εικόνες 6.1, 6.2).

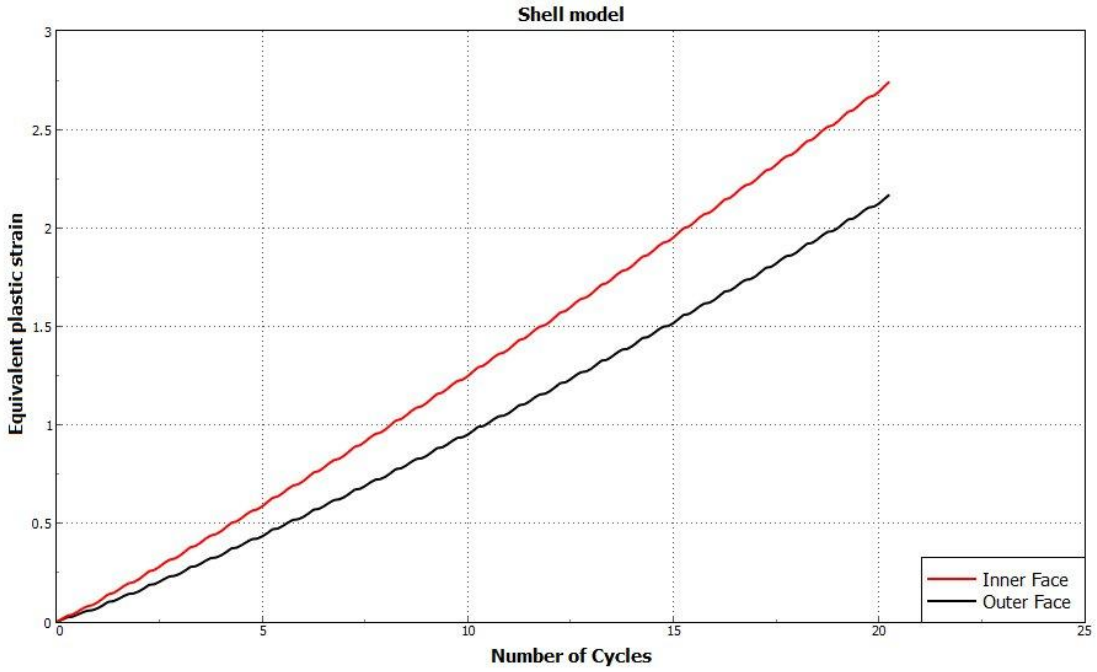


Εικόνα 6.1: Κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στον καμπύλο σωλήνα , στην:(a) εξωτερική και (b) εσωτερική πλευρά της περιοχής flank, Ανάλυση 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0)

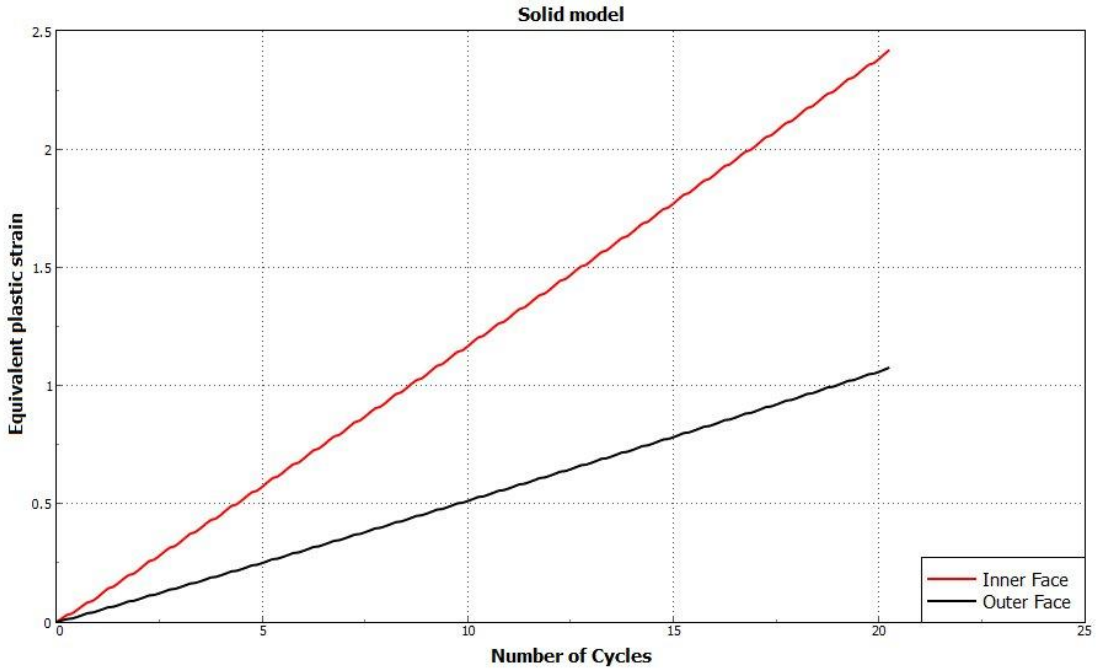


Εικόνα 6.2: Κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στον καμπύλο σωλήνα , στην:(a) εξωτερική και (b) εσωτερική πλευρά της περιοχής flank, Ανάλυση 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0)

Οι αριθμητικές αναλύσεις της παρούσας εργασίας, προβλέπουν την συσσώρευση των πλαστικών παραμορφώσεων με τους κύκλους φόρτισης, ενώ στα Σχήματα 6.1 και 6.2 επιβεβαιώνεται ποσοτικά πως στην εσωτερική πλευρά του flank οι παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες.



Σχήμα 6.1: Ανάπτυξη ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στη εξωτερική και εσωτερική πλευρά της περιοχής flank, Ανάλυση 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0)

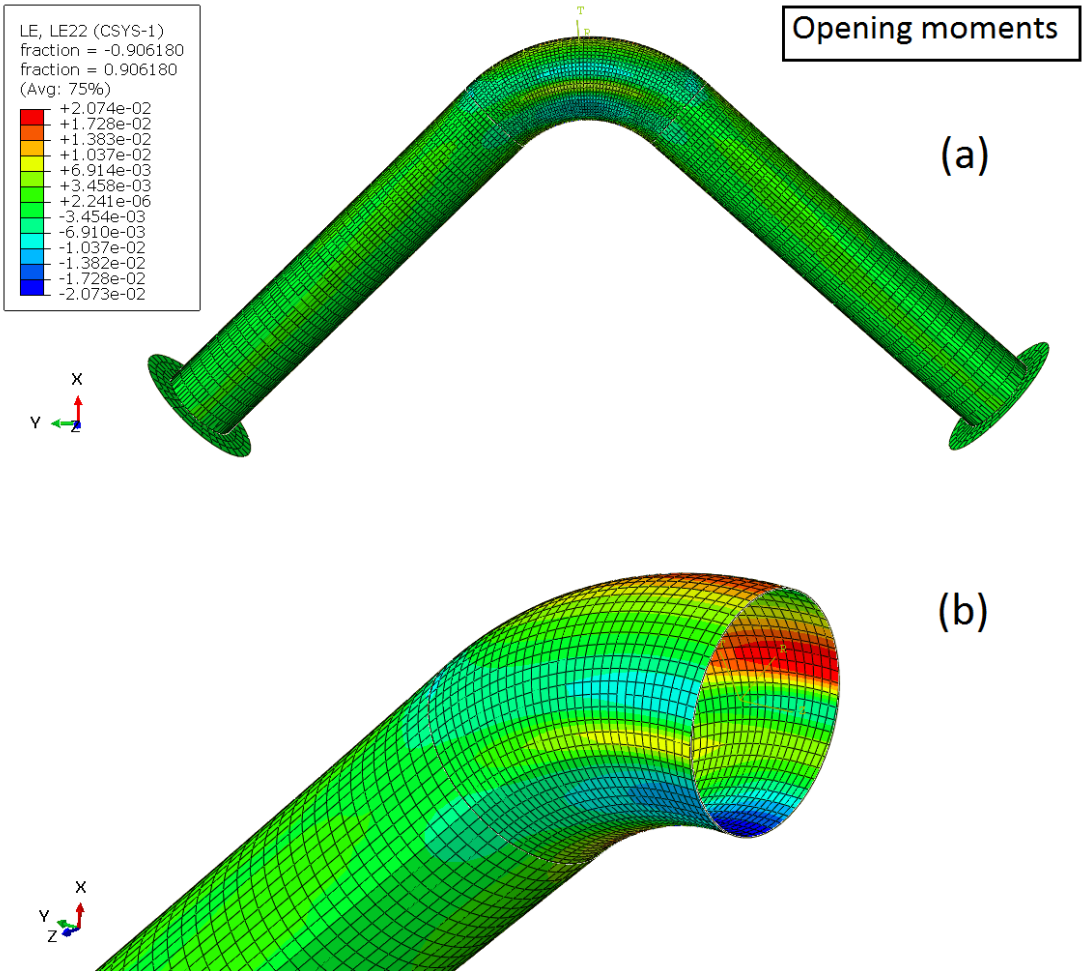


Σχήμα 6.2: Ανάπτυξη ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στη εξωτερική και εσωτερική πλευρά της περιοχής flank, Ανάλυση 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0)

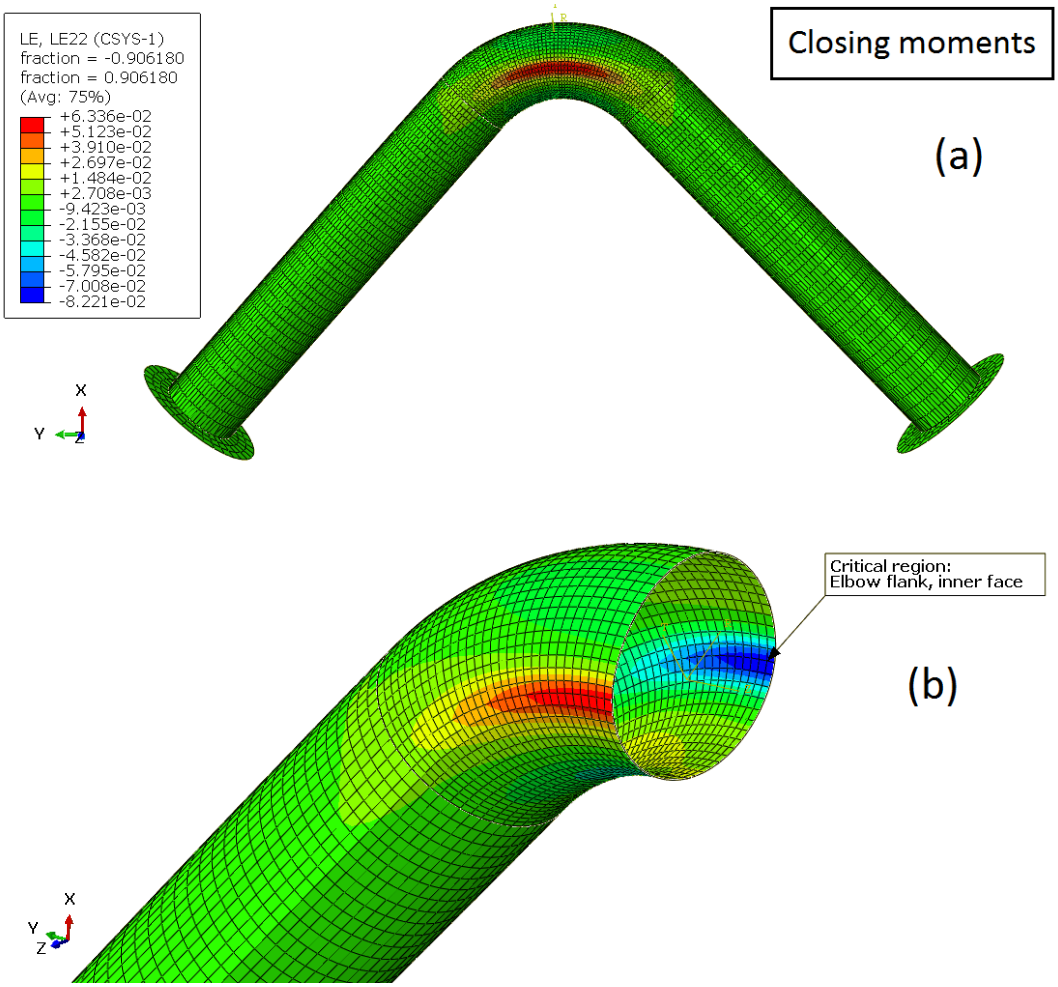
Λαμβάνοντας υπόψιν την βιβλιογραφία, οι σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις στην περιοχή του flank αφορούν παραμορφώσεις κατά την περιφερειακή διεύθυνση του σωλήνα, οι οποίες στην περιοχή flank αποκτούν τις μέγιστες τιμές

τους. Για αυτόν τον λόγο, παρακάτω εξετάζεται η κατανομή των περιφερειακών παραμορφώσεων, όπως προκύπτει από τις διάφορες αριθμητικές αναλύσεις.

Στις Εικόνες 6.3 και 6.4, φαίνεται η απόκριση του σωλήνα ως προς τις περιφερειακές παραμορφώσεις, όπως προκύπτει από ανάλυση με στοιχεία κελύφους. Η πρώτη εικόνα αφορά την απόκριση υπό ανοίγουσες καμπτικές ροπές ενώ η δεύτερη υπό κλείνουσες καμπτικές ροπές. Οι Εικόνες 6.3.b και 6.4.b αφορούν τομή του σωλήνα στην μεσαία διατομή του καμπύλου τμήματος.



Εικόνα 6.3: Κατανομή περιφερειακών παραμορφώσεων υπό ανοίγουσες καμπτικές ροπές: (a) συνολική διάταξη, (b) τομή στην μεσαία διατομή του καμπύλου τμήματος, Ανάλυση 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0)

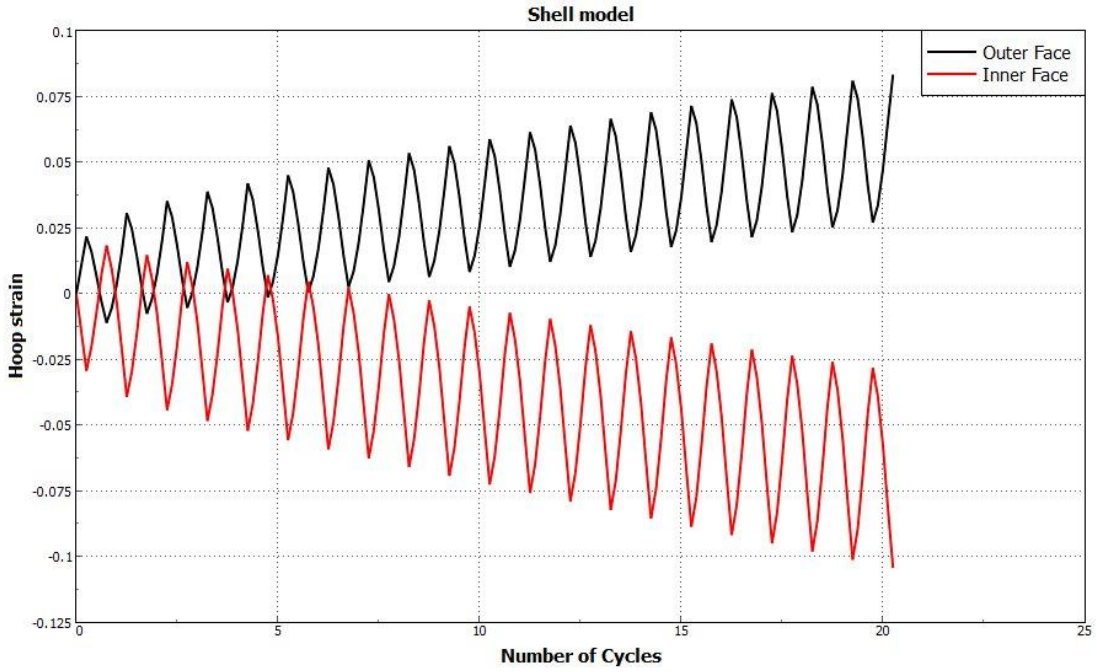


Εικόνα 6.4: Κατανομή περιφερειακών παραμορφώσεων υπό κλείνουσες καμπτικές ροπές: (a) συνολική διάταξη, (b) τομή στην μεσαία διατομή του καμπύλου τμήματος, Ανάλυση 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0)

Όπως φαίνεται από τις εικόνες, υπό ανοίγουσες καμπτικές ροπές η εξωτερική πλευρά του flank του καμπύλου σωλήνα υφίσταται θλίψη ενώ η εσωτερική πλευρά υφίσταται εφελκυσμό. Αντίθετα συμβαίνει όταν ο σωλήνας υπόκειται σε κλείνουσες καμπτικές ροπές.

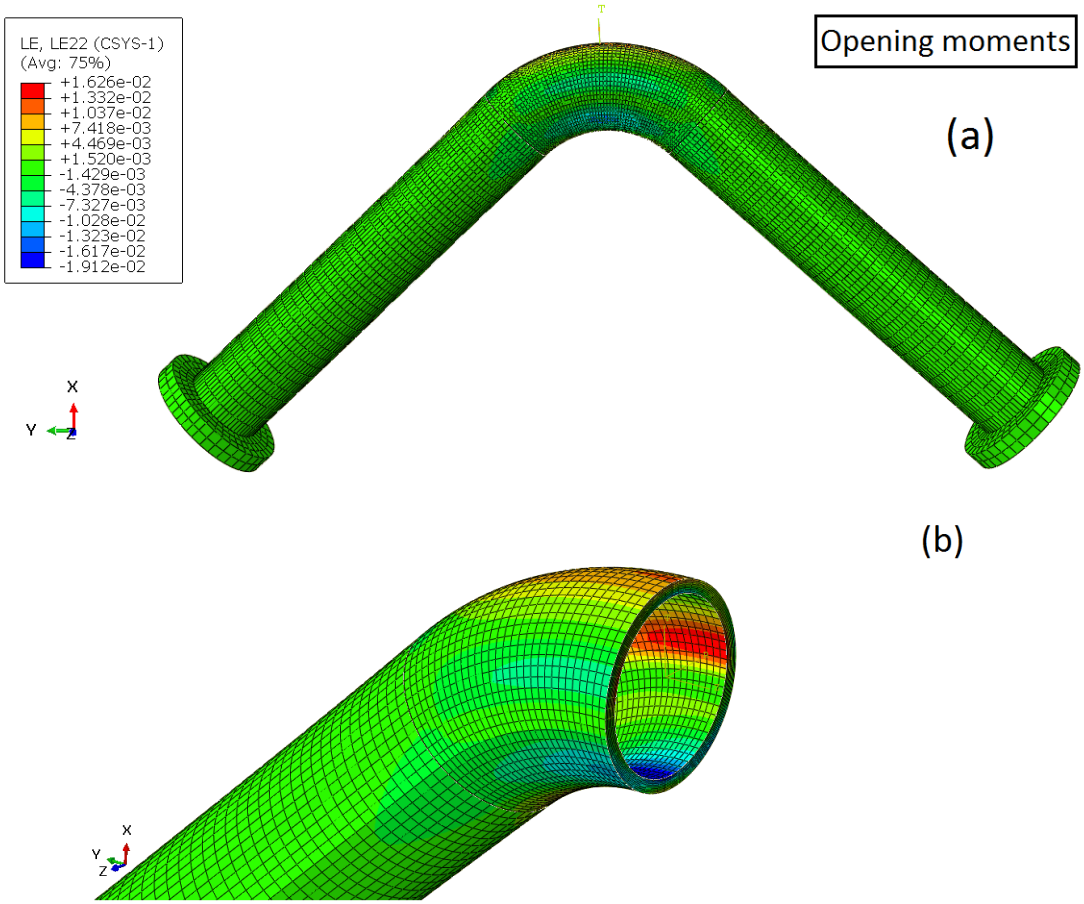
Κυρίως, μπορεί να παρατηρηθεί πως, πράγματι, οι περιφερειακές παραμορφώσεις αποκτούν τις σημαντικότερες τιμές τους στην περιοχή flank. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί και την διαμήκη κατεύθυνση της ρωγμής στην περιοχή του flank, όπως επιβεβαιώνεται από τις πειραματικές εργασίες της βιβλιογραφίας.

Μελετώντας την μεταβολή των περιφερειακών παραμορφώσεων με τους κύκλους φόρτισης για την εξωτερική και εσωτερική πλευρά του flank (Σχήμα 6.3), παρατηρείται πως το εύρος της περιφερειακής παραμόρφωσης στην εσωτερική πλευρά είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της εξωτερικής.

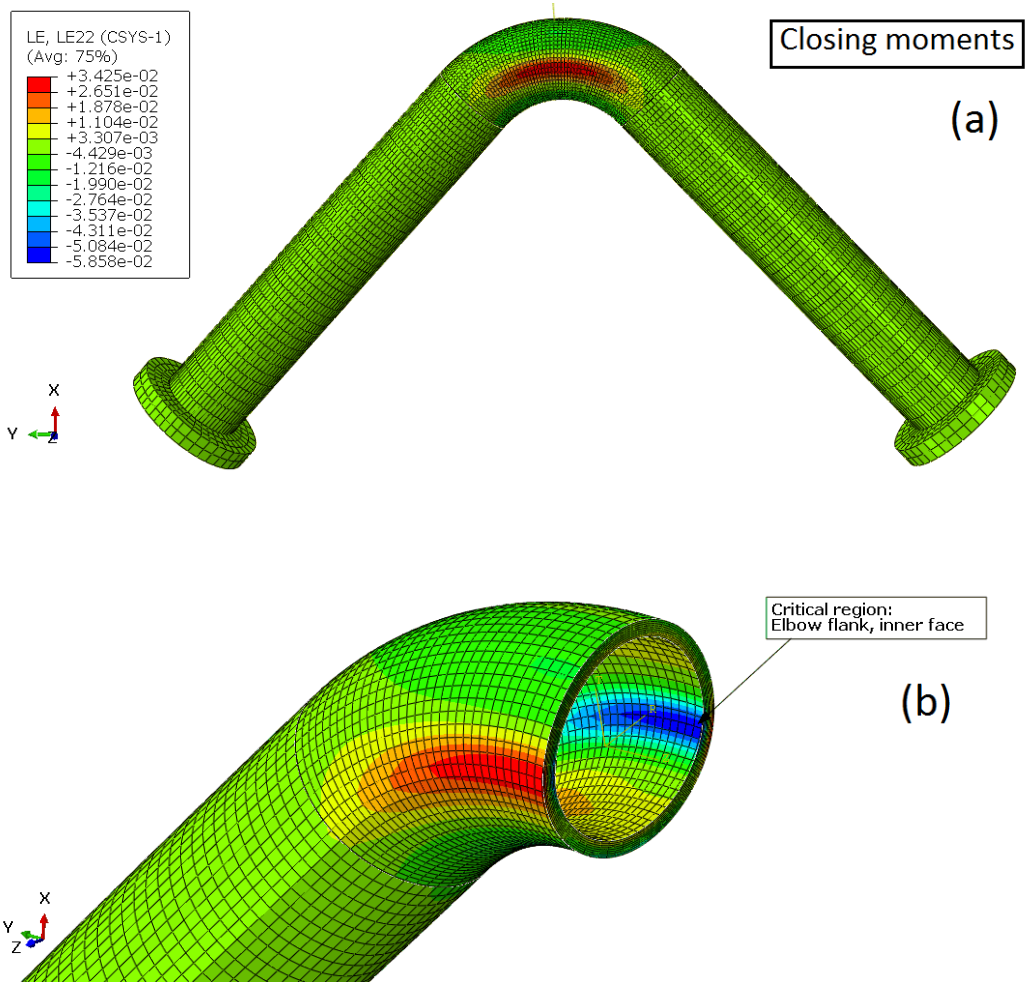


Σχήμα 6.3: Ανάπτυξη περιφερειακής παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στη εξωτερική και εσωτερική πλευρά της περιοχής flank, Ανάλυση 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0)

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις με στοιχεία στερεού συμφωνούν με αυτά των αναλύσεων κελύφους. Όπως φαίνεται στις Εικόνες 6.5 και 6.6, οι περιφερειακές παραμορφώσεις αποκτούν τις μέγιστες τιμές τους στην περιοχή flank.

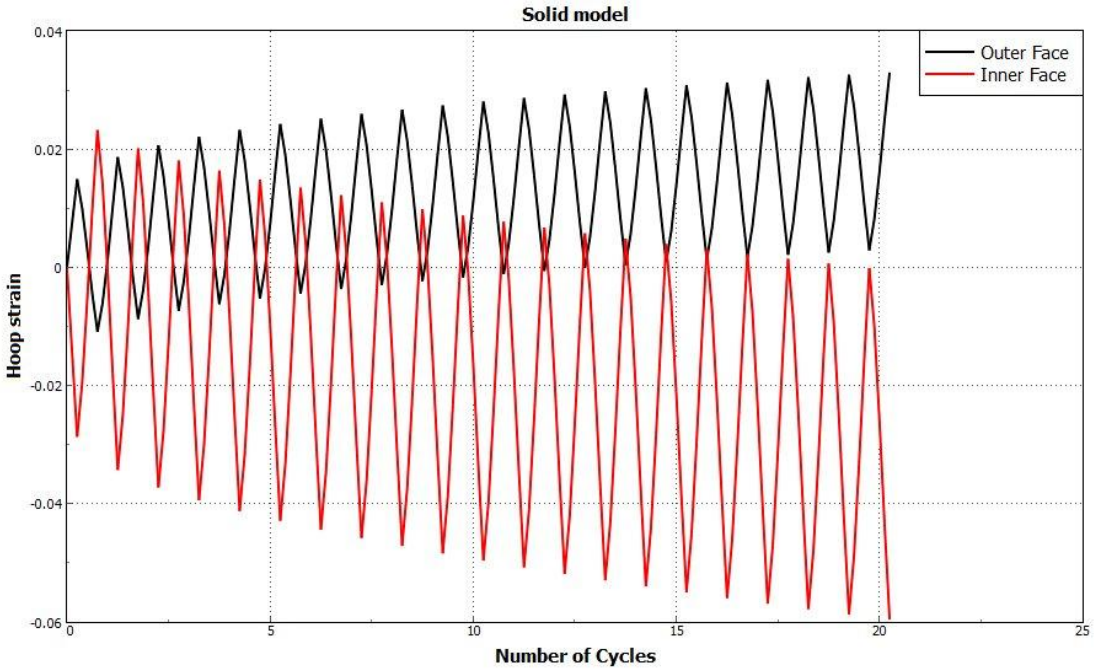


Εικόνα 6.5: Κατανομή περιφερειακών παραμορφώσεων υπό ανοίγουσες καμπτικές ροπές: (a) συνολική διάταξη, (b) τομή στην μεσαία διατομή του καμπύλου τμήματος, Ανάλυση 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0)



Εικόνα 6.6: Κατανομή περιφερειακών παραμορφώσεων υπό κλείνουσες καμπτικές ροπές: (a) συνολική διάταξη, (b) τομή στην μεσαία διατομή του καμπύλου τμήματος, Ανάλυση 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0)

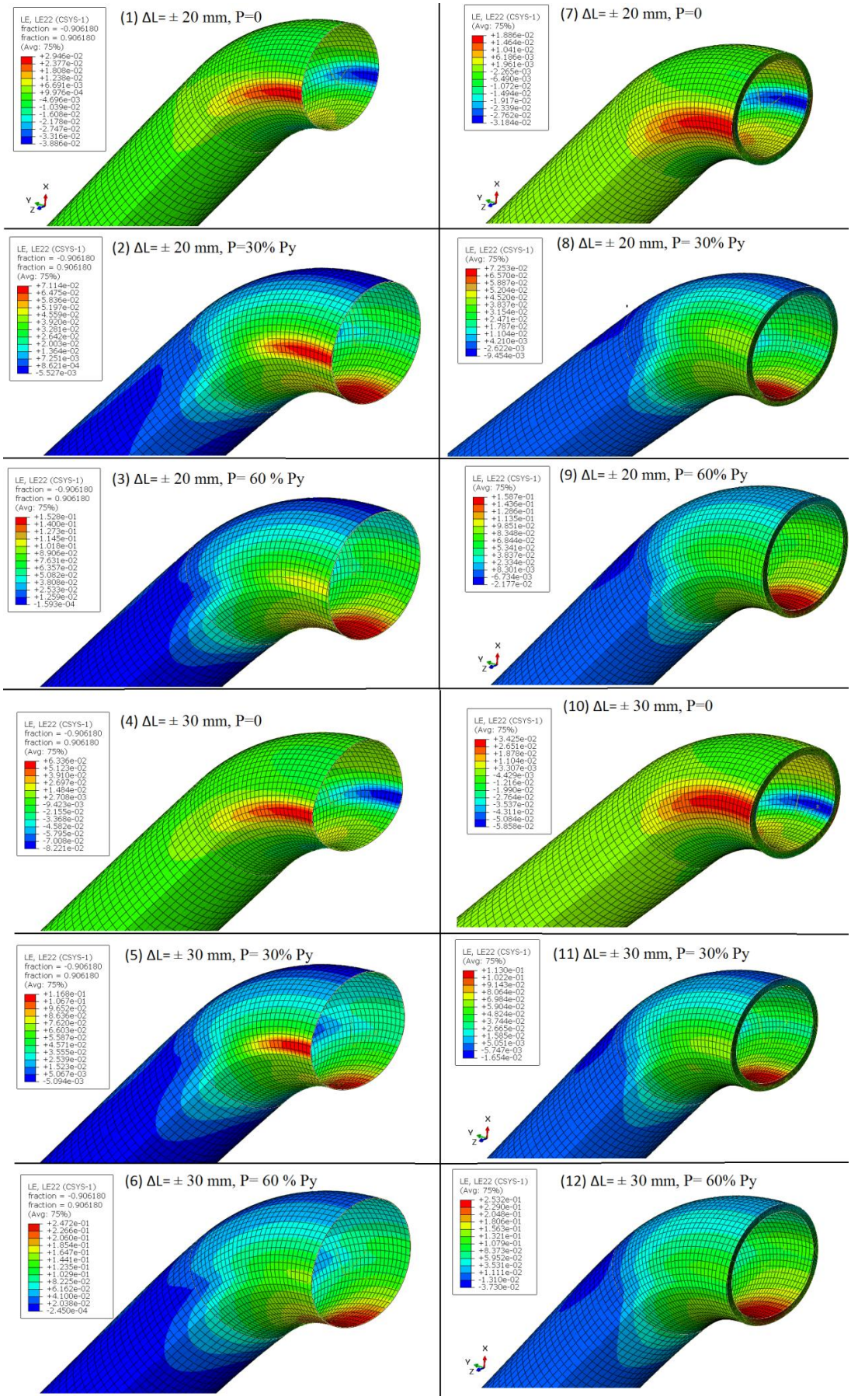
Το εύρος των περιφερειακών παραμορφώσεων στην εσωτερική πλευρά του flank, προκύπτει, και για τις αναλύσεις στερεού, μεγαλύτερο από το αντίστοιχο στην εξωτερική (Σχήμα 6.4)



Σχήμα 6.4: Ανάπτυξη περιφερειακής παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στη εξωτερική και εσωτερική πλευρά της περιοχής flank, Ανάλυση 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0)

Συνεπώς, από τα άνω αποτελέσματα επιβεβαιώνεται πως η κρίσιμη περιοχή για αστοχία είναι η εσωτερική πλευρά του flank του καμπύλου τμήματος. Παρόλα αυτά, από τα Σχήματα 6.3 και 6.4, μπορεί να παρατηρηθεί πως το εύρος της περιφερειακής παραμόρφωσης στην εξωτερική πλευρά είναι εξίσου σημαντικό. Τα συμπεράσματα αυτά προκύπτουν από τα αποτελέσματα κάθε ανάλυσης. Οι αντίστοιχες μετρήσεις είναι διαθέσιμες στην δεύτερη και τέταρτη στήλη του Πίνακα 6.2.

Παρακάτω (Εικόνα 6.7) παρατίθενται τα αποτελέσματα για την κατανομή των περιφερειακών παραμορφώσεων όπως προκύπτουν από το σύνολο των αναλύσεων. Η εστίαση γίνεται στην κρίσιμη περιοχή αστοχίας του flank.

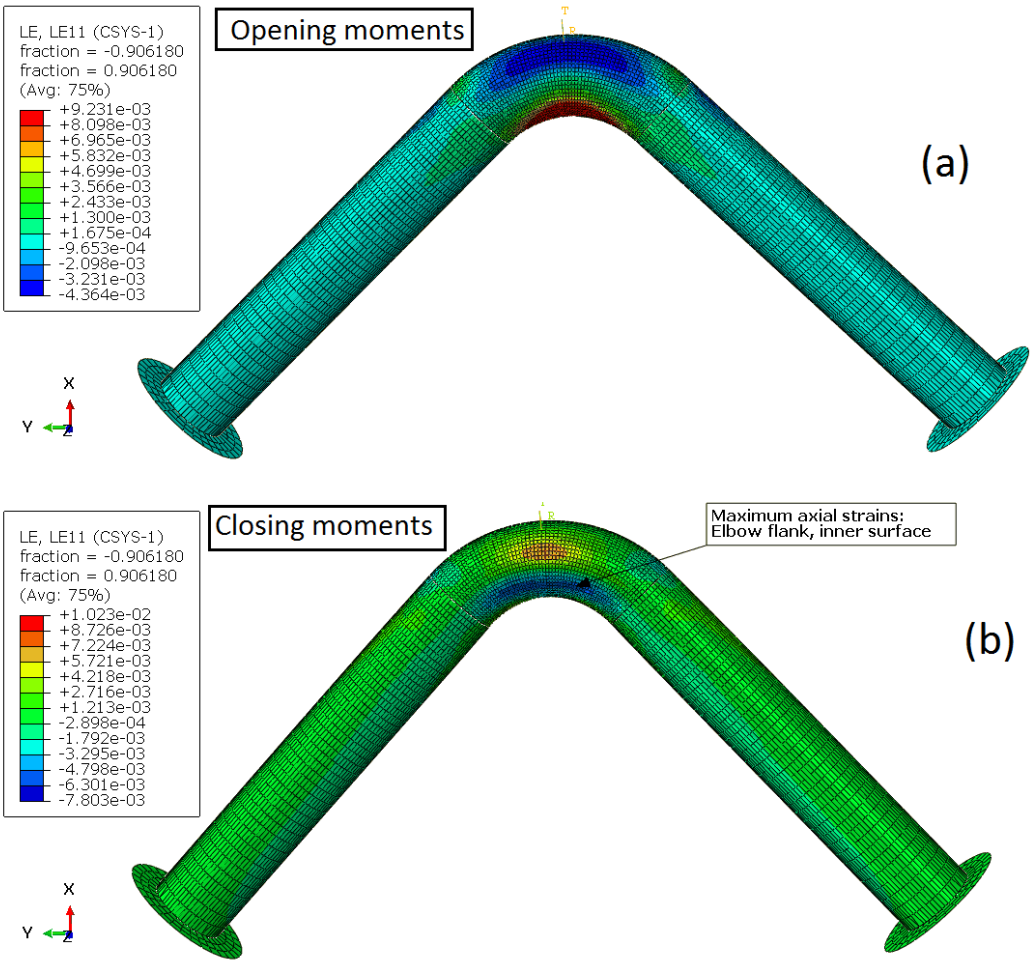


Εικόνα 6.7: Κατανομή περιφερειακών παραμορφώσεων κοντά στην μεσαία διατομή του καμπύλου σωλήνα

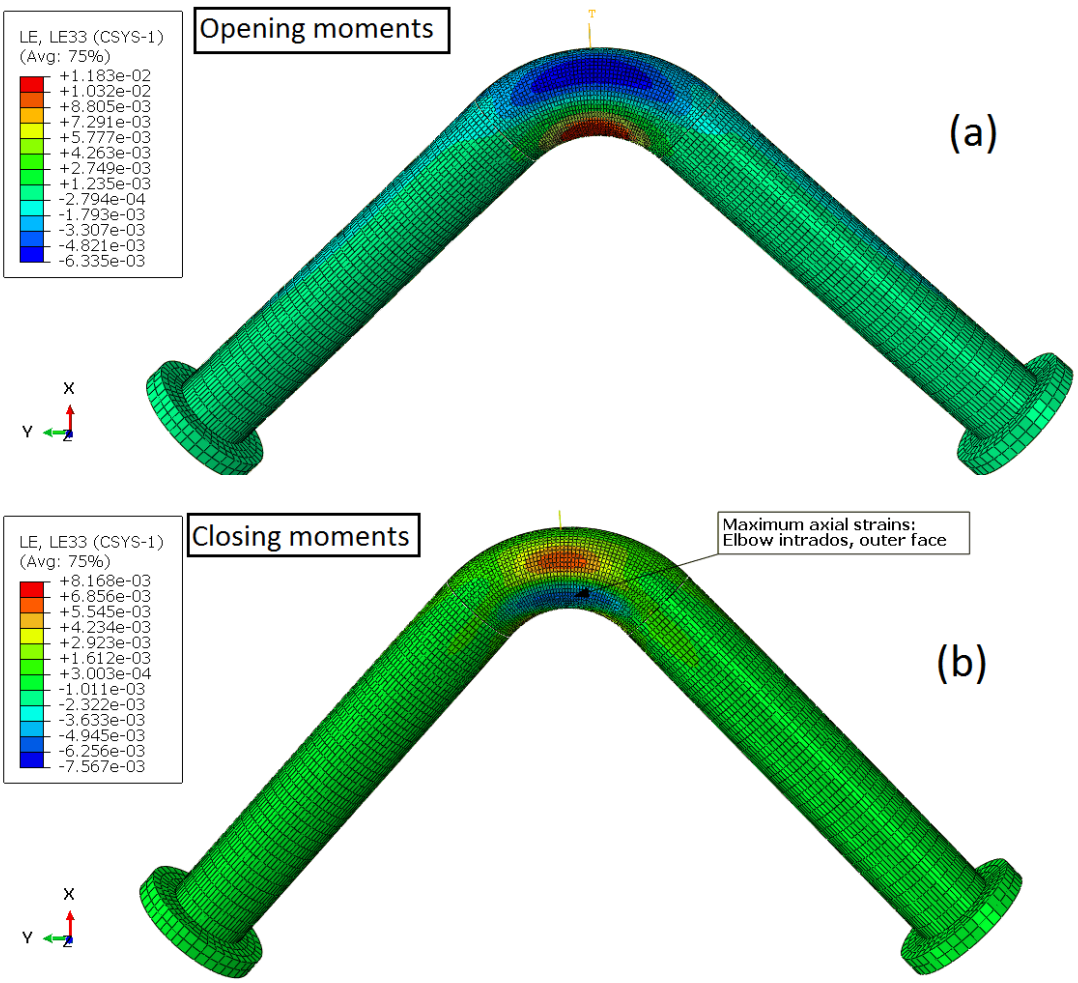
Παρατηρείται πως για τις αναλύσεις στις οποίες η διάταξη σωλήνων βρίσκεται υπό πίεση, υπολογίζεται σημαντική περιφερειακή παραμόρφωση στην εσωτερική πλευρά της περιοχής intrados του καμπύλου τμήματος. Για αυτόν τον λόγο έγιναν μετρήσεις του εύρους της περιφερειακής παραμόρφωσης στην περιοχή αυτή, οι οποίες σημειώνονται στην τελευταία στήλη του Πίνακα 6.2. Εξετάζοντάς τες, μπορεί να παρατηρηθεί πως προκύπτουν πάντοτε μικρότερες των αντίστοιχων στην εσωτερική πλευρά του flank (δεύτερη στήλη του ιδίου Πίνακα), όμως το μέγεθός τους είναι επίσης σημαντικό. Μπορεί συνεπώς να γίνει ο ισχυρισμός πως η επιβολή της εσωτερικής πίεσης δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα για το ποιά είναι η κρίσιμη περιοχή αστοχίας, καθώς αυτή είναι σε κάθε περίπτωση η περιοχή του flank.

Τέλος, η διαμήκης παραμόρφωση μετράται σε κάθε ανάλυση μικρότερη της περιφερειακής στις περιοχές του καμπύλου τμήματος, όπως επισημαίνεται και από την βιβλιογραφία. Για την κρίσιμη περιοχή αστοχίας, οι μετρήσεις αυτές συνοψίζονται στην τρίτη στήλη του Πίνακα 6.2. Συνεπώς για την αστοχία, «ευθύνονται» τα σημαντικά μεγέθη των περιφερειακών παραμορφώσεων στην κρίσιμη περιοχή.

Η περιοχή στην οποία εντοπίζονται οι μέγιστες τιμές των διαμήκων παραμορφώσεων είναι, σύμφωνα με τις αριθμητικές αναλύσεις, η περιοχή intrados και συγκεκριμένα η εξωτερική πλευρά αυτής. Οι Εικόνες 6.8 και 6.9 αφορούν αποτελέσματα αναλύσεων κελύφους και στερεού ως προς τις διαμήκεις παραμορφώσεις.



Εικόνα 6.8: Κατανομή διαμήκων παραμορφώσεων, υπό: (a) ανοίγουσες, (b) κλείνουσες καμπτικές ροπές, Ανάλυση 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0)



Εικόνα 6.9: Κατανομή διαμήκων παραμορφώσεων, υπό: (a) ανοίγουσες, (b) κλείνουσες καμπτικές ροπές, Ανάλυση 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0)

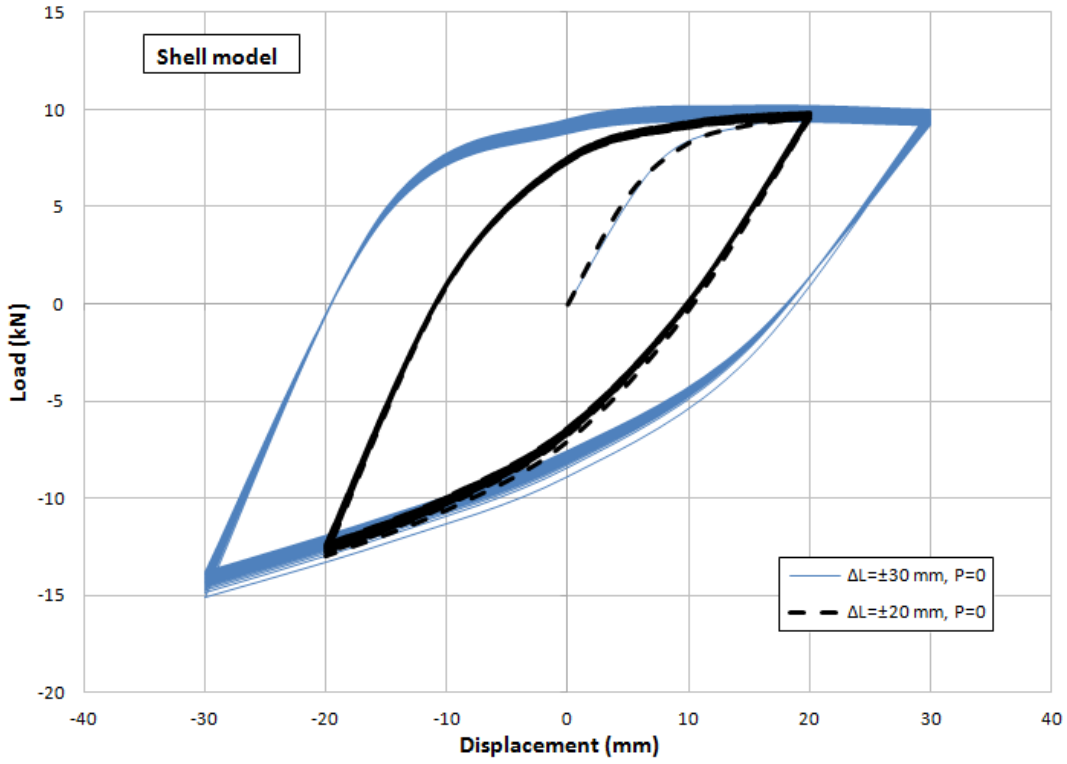
Οι μετρήσεις του εύρους της διαμήκους παραμόρφωσης για το σύνολο των αναλύσεων, συγκεντρώνονται στην πέμπτη στήλη του Πίνακα 6.2. Τα μεγέθη της, αν και μικρότερα των περιφερειακών, δεν είναι αμελητέα καθώς, όπως μελετάται σε επόμενη παράγραφο, αποκτούν μεγαλύτερο μέγεθος με την επιβολή της εσωτερικής πίεσης.

6.3 Επιρροή του πλάτους μετατόπισης στην απόκριση του καμπύλου σωλήνα

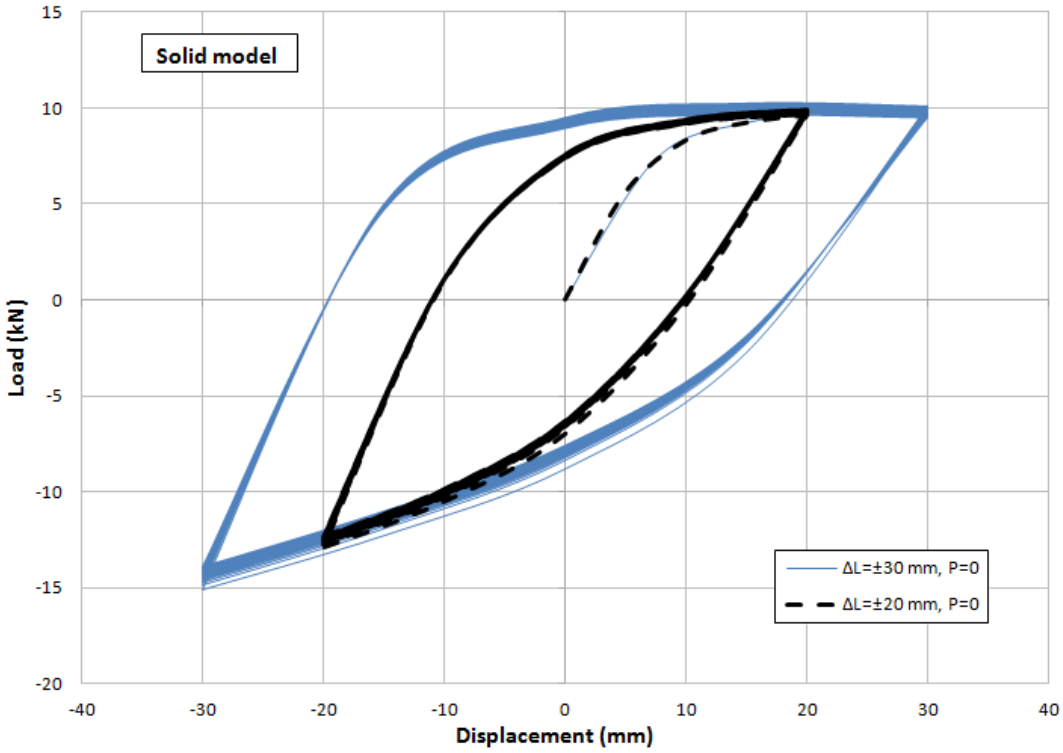
Στο παρούσα παράγραφο εξετάζεται επιρροή που έχει το μέγεθος της επιβαλλόμενης μετατόπισης στα αποτελέσματα. Τα παρακάτω αποτελέσματα αφορούν την περίπτωση στην οποία οι σωλήνες καταπονούνται με κυκλική φόρτιση πλάτους ±20 mm και ±30 mm, χωρίς να επιβάλλεται σε αυτούς εσωτερική πίεση.

6.3.1 Δυνάμεις αντίδρασης

Η επιβολή της μετατόπισης στον κάτω κόμβο αναφοράς έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη φορτίου σε αυτόν, το οποίο λαμβάνεται ως δύναμη αντίδρασης (Reaction Force). Στην παράγραφο αυτή εξετάζονται οι καμπύλες φορτίου- μετατόπισης όπως προκύπτουν από τις αριθμητικές αναλύσεις μοντέλων κελύφους και στερεού, για τα δύο μεγέθη των επιβαλλόμενων μετατοπίσεων (Σχήμα 6.5 και 6.6)



Σχήμα 6.5: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης, για τις Αναλύσεις 1 (κελύφους, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0)



Σχήμα 6.6: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης, για τις Αναλύσεις 7 (στερεού, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0)

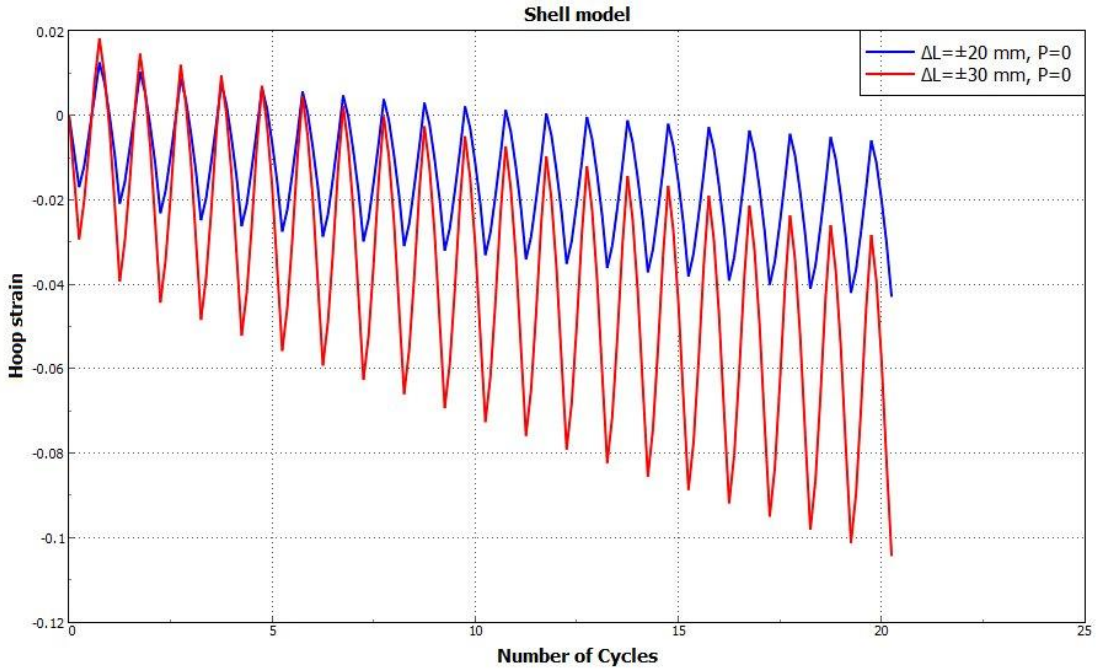
Αρχικά είναι σημαντικό να σημειωθεί πως ο βρόγχος φορτίου- μετατόπισης μικραίνει με τους κύκλους φόρτισης και έπειτα σταθεροποιείται. Αυτό ισοδυναμεί με «υποβάθμιση» του υλικού, ή αλλιώς «εξασθένισή» του καθώς η αντοχή του μειώνεται. Το αποτέλεσμα αυτό αφορά κάθε ανάλυση που έλαβε χώρα.

Με βάση τα άνω σχήματα και τις τιμές των μεγίστων δυνάμεων αντίδρασης για τις αναλύσεις αυτές (Πίνακας 6.3), φαίνεται πως η δύναμη αντίδρασης παρουσιάζει αύξηση, με την αύξηση του επιβαλλόμενου πλάτους μετατόπισης. Ο βρόγχος για την περίπτωση πλάτους ±30 mm, είναι σημαντικά μεγαλύτερος του αντίστοιχου για πλάτος ±20 mm, υποδηλώνοντας σημαντικότερες πλαστικές παρα-μορφώσεις στην πρώτη περίπτωση.

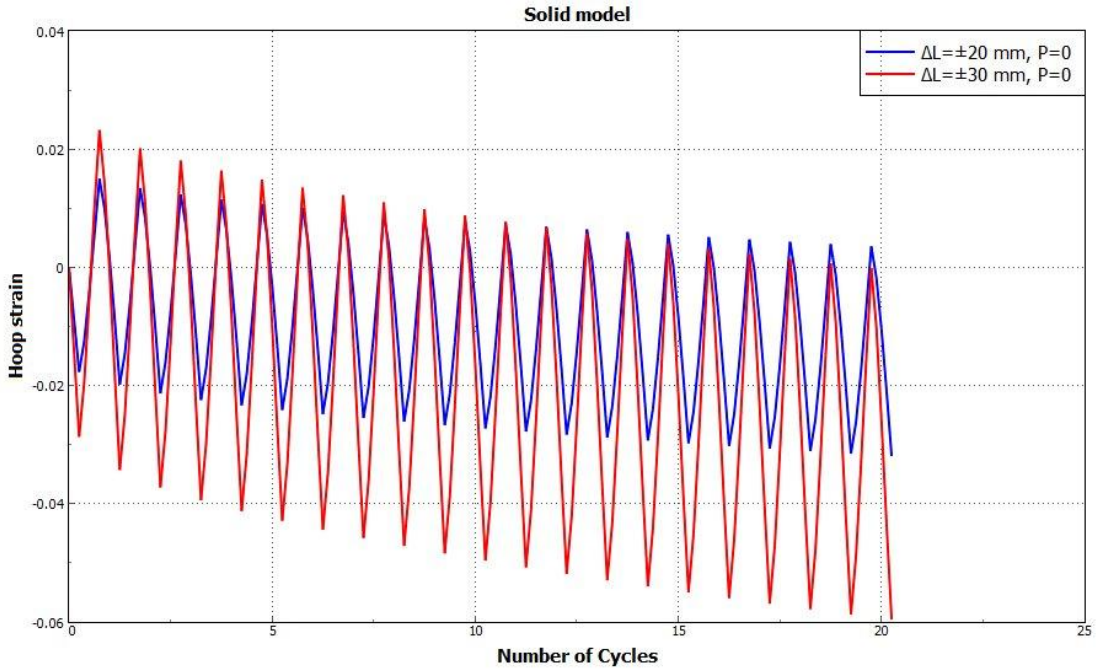
Ακόμη, μπορεί να γίνει η παρατήρηση πως τα αποτελέσματα των αναλύσεων κελύφους και στερεού παρουσιάζουν ικανοποιητική σύγκλιση.

6.3.2 Τοπικές παραμορφώσεις στον καμπύλο σωλήνα

Εξετάζοντας τις περιφερειακές παραμορφώσεις, οι μέγιστες τιμές τους εμφανίζονται στην εσωτερική πλευρά της περιοχής flank του καμπύλου τμήματος, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Στα Σχήματα 6.7 και 6.8 φαίνεται η μεταβολή αυτών με τους κύκλους φόρτισης, όπως μετράται στην κρίσιμη περιοχή.



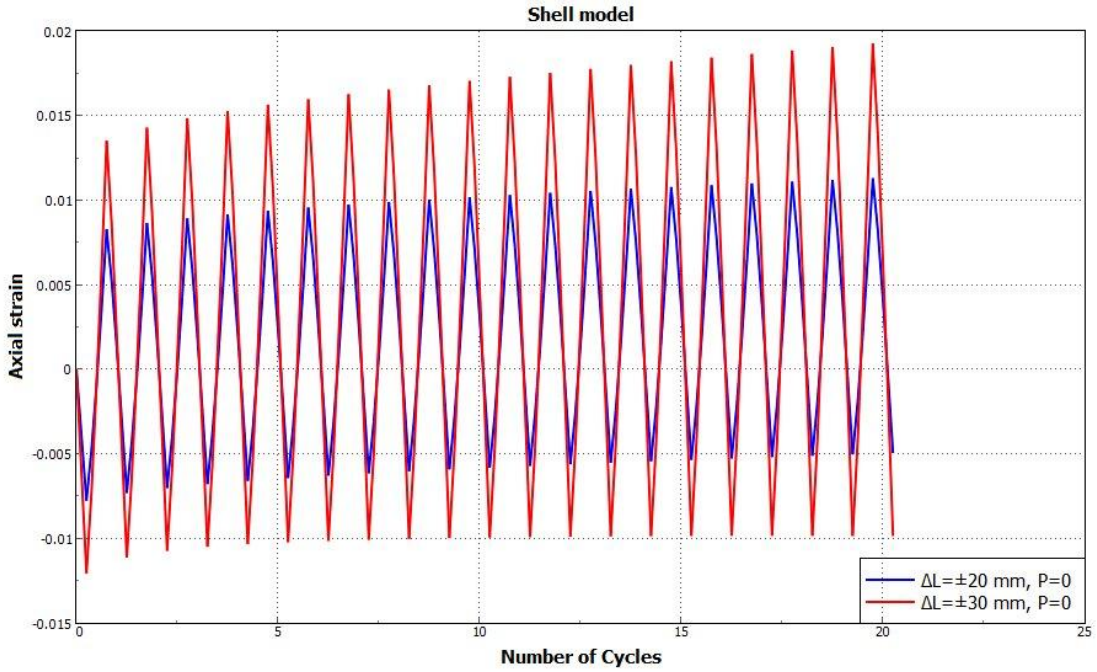
Σχήμα 6.7: Ανάπτυξη περιφερειακής παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στην εσωτερική πλευρά του flank, για τις Αναλύσεις 1 (κελύφους, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0)



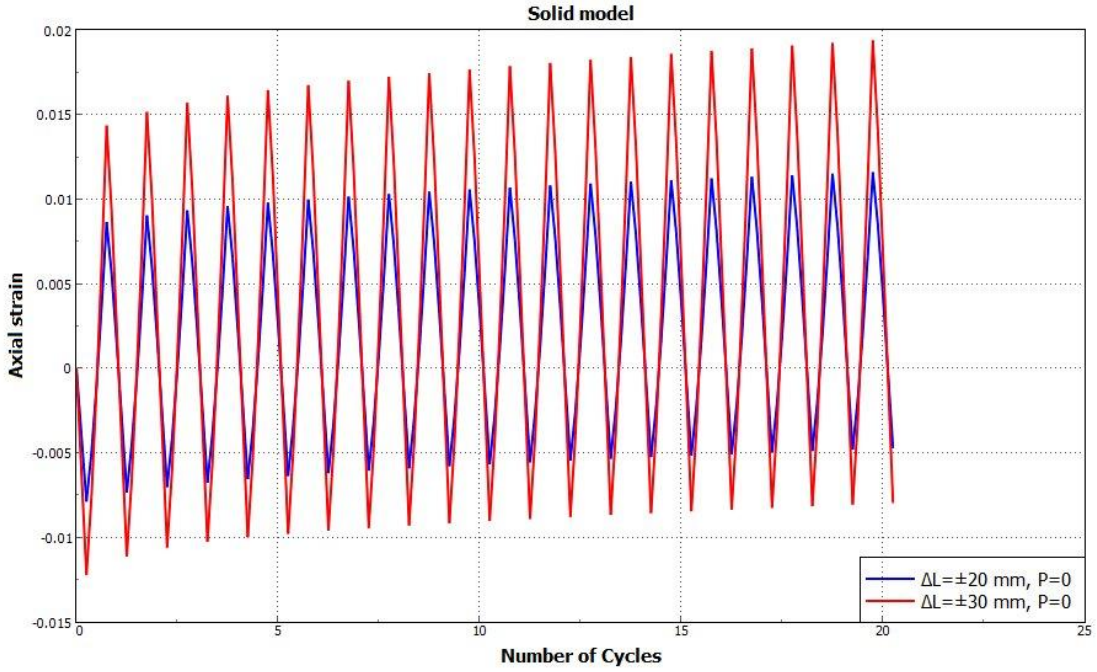
Σχήμα 6.8: Ανάπτυξη περιφερειακής παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στην εσωτερική πλευρά του flank, για τις Αναλύσεις 7 (στερεού, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0)

Είναι φανερό από τα διαγράμματα, πως η αύξηση του επιβαλλόμενου πλάτους μετατόπισης οδηγεί σε σημαντικά αυξημένο εύρος περιφερειακών παραμορφώσεων, όπως επιβεβαιώνεται και στην δεύτερη στήλη του Πίνακα 6.2.

Όσον αφορά τις διαμήκεις παραμορφώσεις, τα Σχήματα 6.9 και 6.10 αφορούν την μεταβολή του μεγέθους αυτών με τους κύκλους φόρτισης Η μέτρηση έγινε στην εξωτερική πλευρά της περιοχής intrados, όπου οι διαμήκεις παραμορφώσεις αποκτούν τις μέγιστες τιμές τους.



Σχήμα 6.9: Ανάπτυξη διαμήκους παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στην εξωτερική πλευρά της περιοχής intrados, για τις Αναλύσεις 1 (κελύφους, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0)



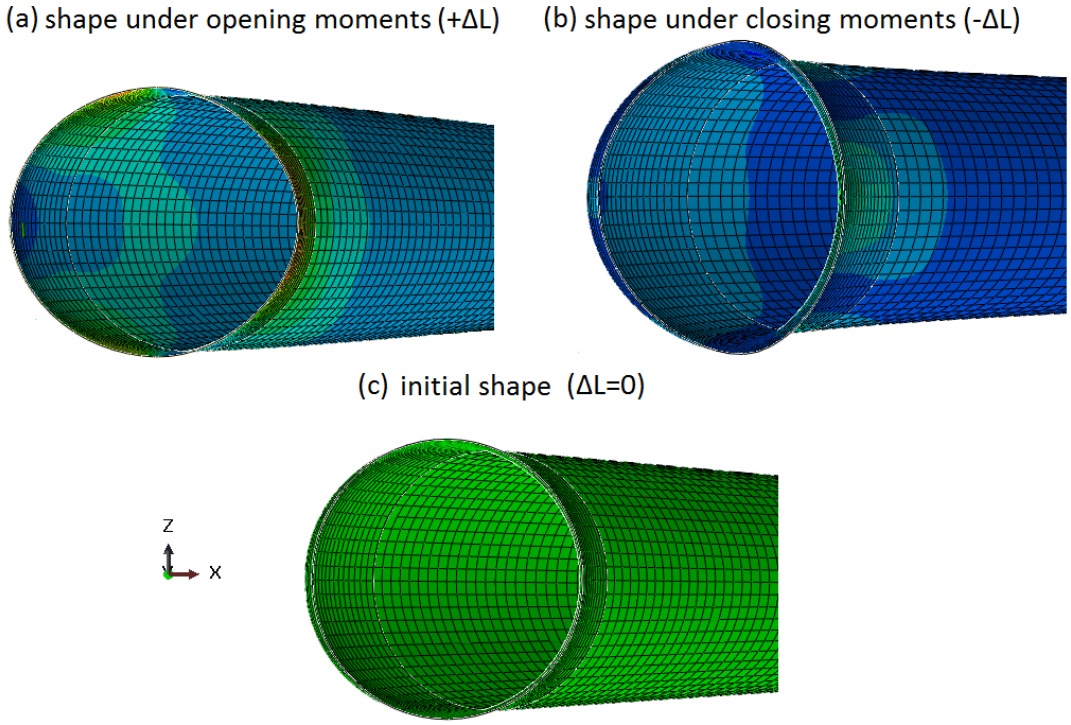
Σχήμα 6.10: Ανάπτυξη διαμήκους παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στην εξωτερική πλευρά της περιοχής intrados, για τις Αναλύσεις 7 (στερεού, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0)

Από τα διαγράμματα, μπορεί να παρατηρηθεί αύξηση του εύρους των διαμήκων παραμορφώσεων με την επιβολή μετατόπισης μεγαλύτερου πλάτους, όπως επιβεβαιώνεται και από την πέμπτη στήλη του Πίνακα 6.2.

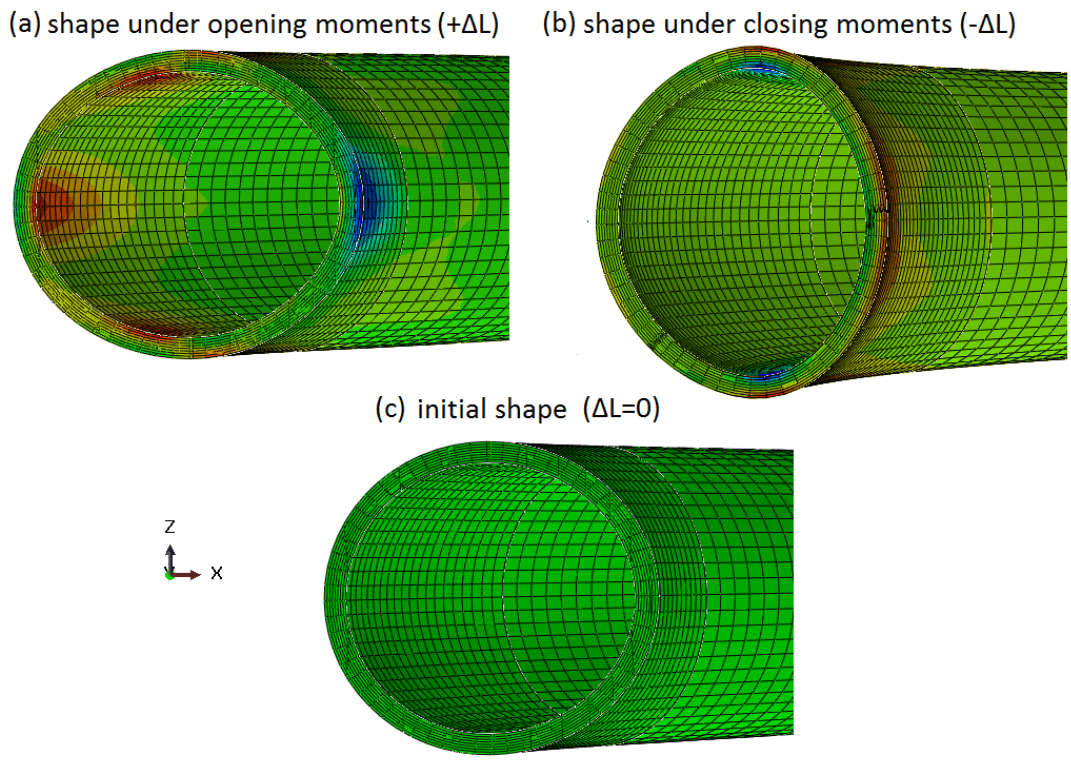
Τέλος, όσον αφορά τα αποτελέσματα των τοπικών παραμορφώσεων, παρατηρείται πως οι αναλύσεις κελύφους και στερεού δεν απέχουν σημαντικά για τις τιμές του εύρους της διαμήκους παραμόρφωσης, ενώ στην περίπτωση του εύρους της περιφερειακής παραμόρφωσης οι τιμές δεν συγκλίνουν τόσο ικανοποιητικά.

6.3.3 Παραμόρφωση της διατομής

Το τμήμα αυτό της εργασίας, αφορά την εξέταση της μεσαίας διατομής του καμπύλου σωλήνα ως προς την παραμόρφωση της, η οποία είναι συνέπεια της κυκλικής κάμψης που αυτός υφίσταται. Όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 3, το σχήμα της οβαλοποιημένης διατομής είναι διαφορετικό όταν ο καμπύλος σωλήνας υπόκειται σε ανοίγουσες ή κλείνουσες καμπτικές ροπές (Εικόνες 6.10 και 6.11).



Εικόνα 6.10: Παραμόρφωση της μεσαίας διατομής του καμπύλου σωλήνα, υπό: (a) ανοίγουσες και (b) κλείνουσες καμπτικές ροπές, σε σχέση με το (c) αρχικό σχήμα της διατομής, Ανάλυση 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0)



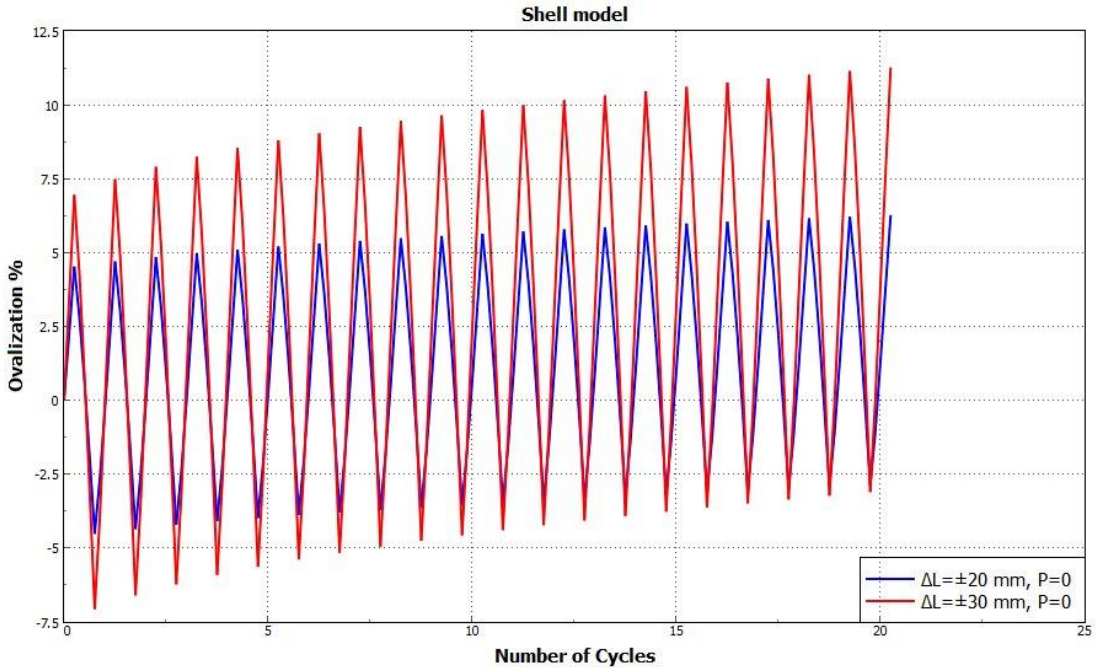
Εικόνα 6.11: Παραμόρφωση της μεσαίας διατομής του καμπύλου σωλήνα, υπό: (a) ανοίγουσες και (b) κλείνουσες καμπτικές ροπές, σε σχέση με το (c) αρχικό σχήμα της διατομής, Ανάλυση 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0)

Στην παρούσα εργασία, η οβαλοποίηση της διατομής, δηλαδή η απόκλιση του σχήματός της από το αρχικά κυκλικό, υπολογίζεται από την σχέση:

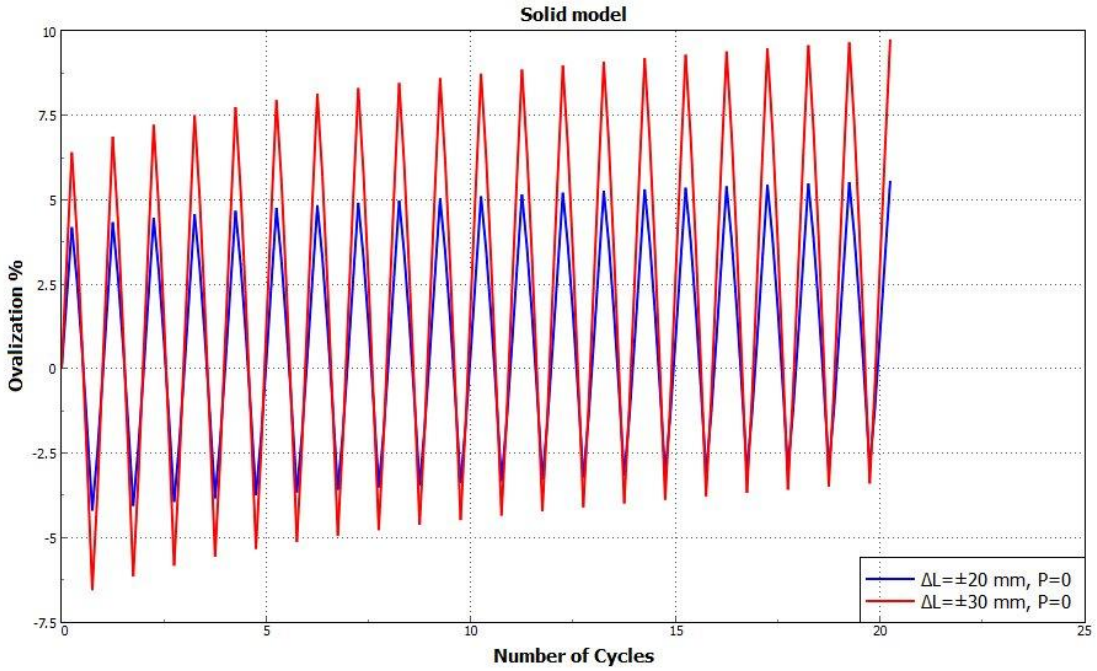
$$Ovalization\ \% = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \times 100 \qquad (6.1)$$

Με D_{max} συμβολίζεται η μέγιστη διάμετρος της οβαλοποιημένης διατομής και με D_{min} η ελάχιστη διάμετρος αυτής.

Τα παρακάτω διαγράμματα αφορούν την μεταβολή του μεγέθους της οβαλοποίησης με την αύξηση των κύκλων φόρτισης (Σχήμα 6.11 και 6.12).



Σχήμα 6.11: Ανάπτυξη της οβαλοποίησης της μεσαίας διατομής του καμπύλου σωλήνα με τους κύκλους φόρτισης, για τις Αναλύσεις 1 (κελύφους, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0)

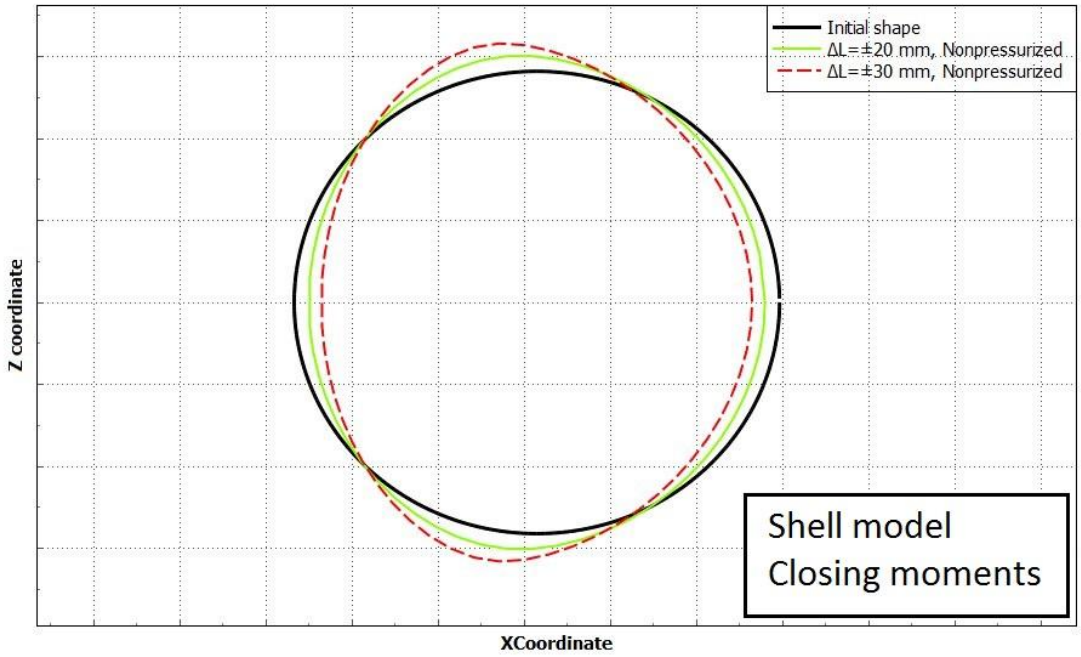


Σχήμα 6.12: Ανάπτυξη της οβαλοποίησης της μεσαίας διατομής του καμπύλου σωλήνα με τους κύκλους φόρτισης, για τις Αναλύσεις 7 (στερεού, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0)

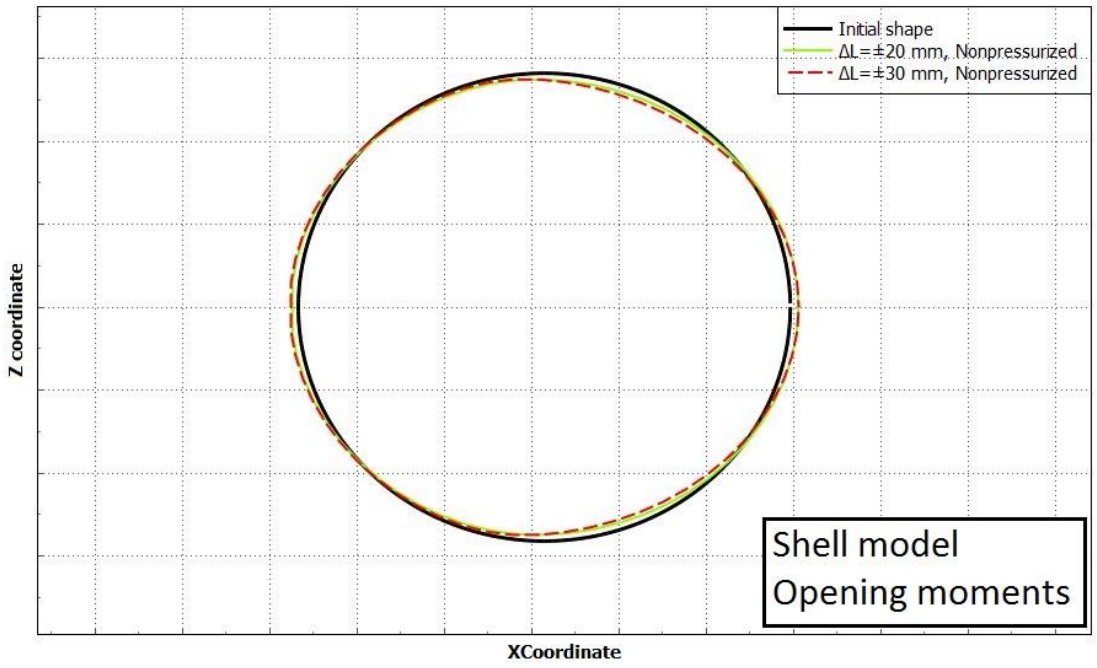
Αρχικά, είναι σημαντική η παρατήρηση πως σε κάθε περίπτωση, το μέγεθος της οβαλοποίησης αυξάνεται με τους κύκλους φόρτισης, δηλαδή το σχήμα της διατομής παραμορφώνεται περισσότερο απο κύκλο σε κύκλο.

Η επιβολή μεγαλύτερου πλάτους μετατόπισης οδηγεί σε περισσότερο παραμορφωμένη διατομή, όπως είναι φανερό από τα άνω διαγράμματα. Επίσης σχολιάζεται πως οι αναλύσεις κελύφους δίνουν σχετικά μεγαλύτερα μεγέθη οβλοποίησης από αυτά που προκύπτουν από τις αναλύσεις με στοιχεία στερεού.

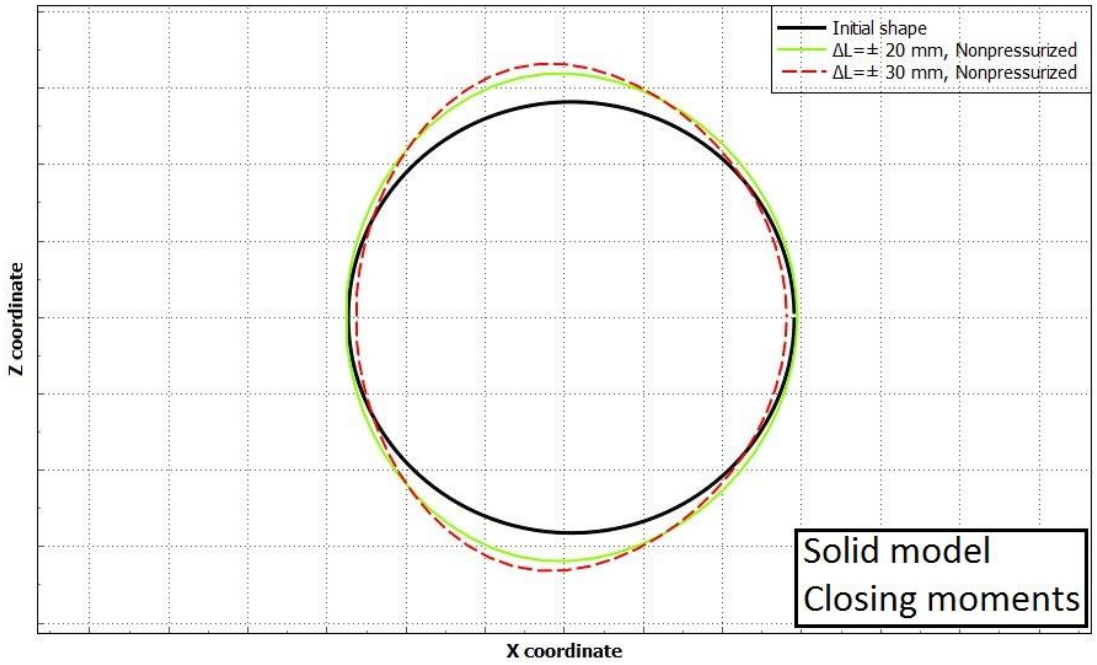
Στα Σχήματα 6.13 έως 6.16, φαίνεται το παραμορφωμένο σχήμα της διατομής στο επίπεδο XZ για τον τελευταίο κύκλο φόρτισης, όπως προκύπτει από τις αναλύσεις κελύφους και στερεού που εξετάζονται στην παρούσα παράγραφο. Σημειώνεται πως για τα Σχήματα που αφορούν τις αναλύσεις στερεού, η απεικόνιση της οβαλοποιημένης διατομής αφορά την εξωτερική διάμετρο του σωλήνα.



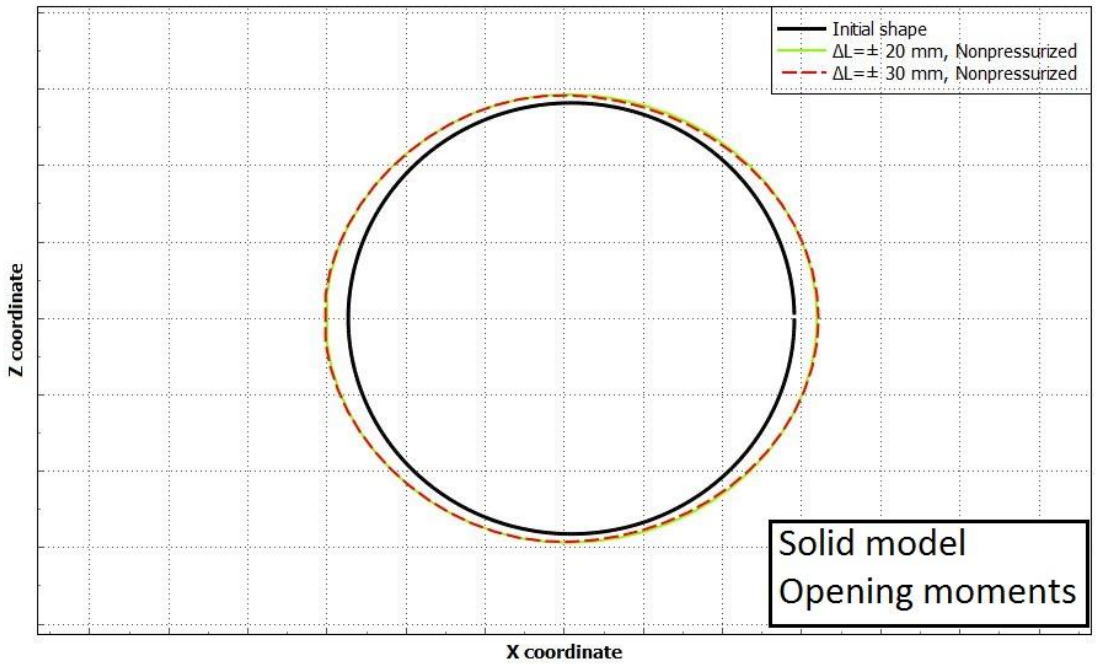
Σχήμα 6.13: Σχήμα οβαλοποιημένης διατομής υπό κλείνουσες καμπτικές ροπές σε σχέση με το αρχικό σχήμα, για τις Αναλύσεις 1 (κελύφους, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0)



Εικόνα 6.14: Σχήμα οβαλοποιημένης διατομής υπό ανοίγουσες καμπτικές ροπές σε σχέση με το αρχικό σχήμα, για τις Αναλύσεις 1 (κελύφους, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0)



Σχήμα 6.15: Σχήμα οβαλοποιημένης διατομής υπό κλείνουσες καμπτικές ροπές σε σχέση με το αρχικό σχήμα, για τις Αναλύσεις 7 (στερεού, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0)



Σχήμα 6.16: Σχήμα οβαλοποιημένης διατομής υπό ανοίγουσες καμπτικές ροπές σε σχέση με το αρχικό σχήμα, για τις Αναλύσεις 7 (στερεού, ΔL=± 20 mm, P= 0) και 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0)

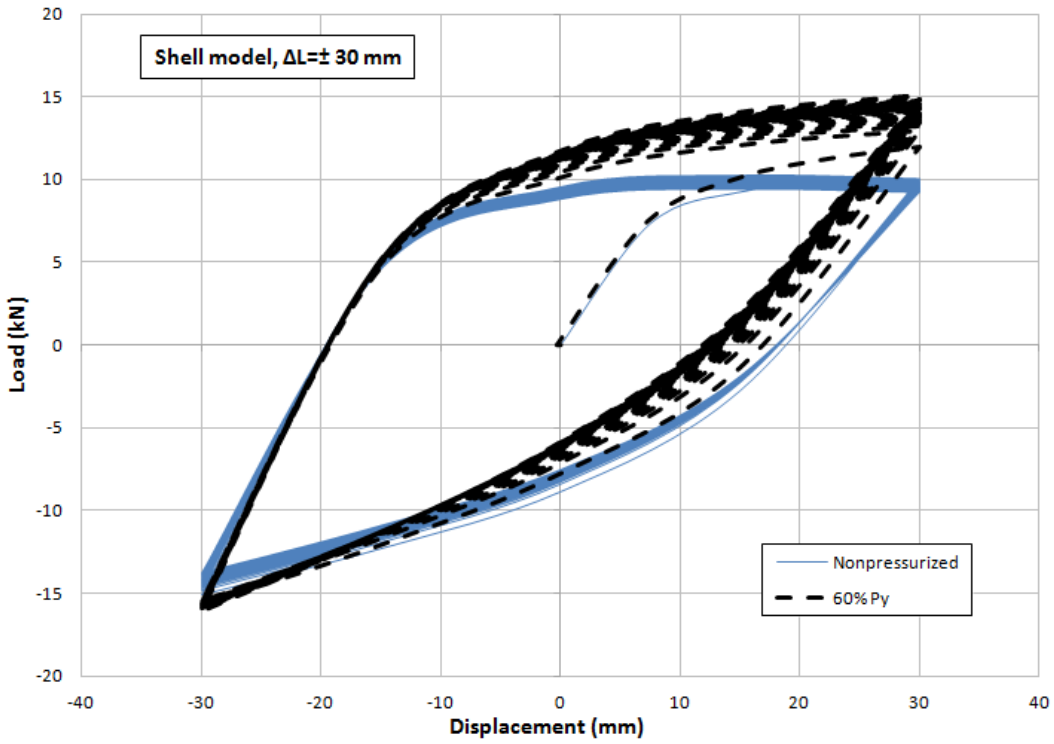
Από τα παραπάνω σχήματα, παρατηρείται πως πράγματι στις αναλύσεις με μεγαλύτερο πλάτος μετατόπισης ±30 mm το σχήμα της διατομής αποκλίνει περισσότερο από το αρχικά κυκλικό, σε σχέση με το αντίστοιχο για πλάτος μετατόπισης ±20 mm. Η παραμόρφωση μάλιστα φαίνεται να είναι πιο έντονη υπό κλείνουσες καμπτικές ροπές, ενώ παράλληλα για αυτήν την περίπτωση η διατομή δεν παρουσιάζει συμμετρία.

6.4 Επιρροή της εσωτερικής πίεσης στην απόκριση του καμπύλου σωλήνα

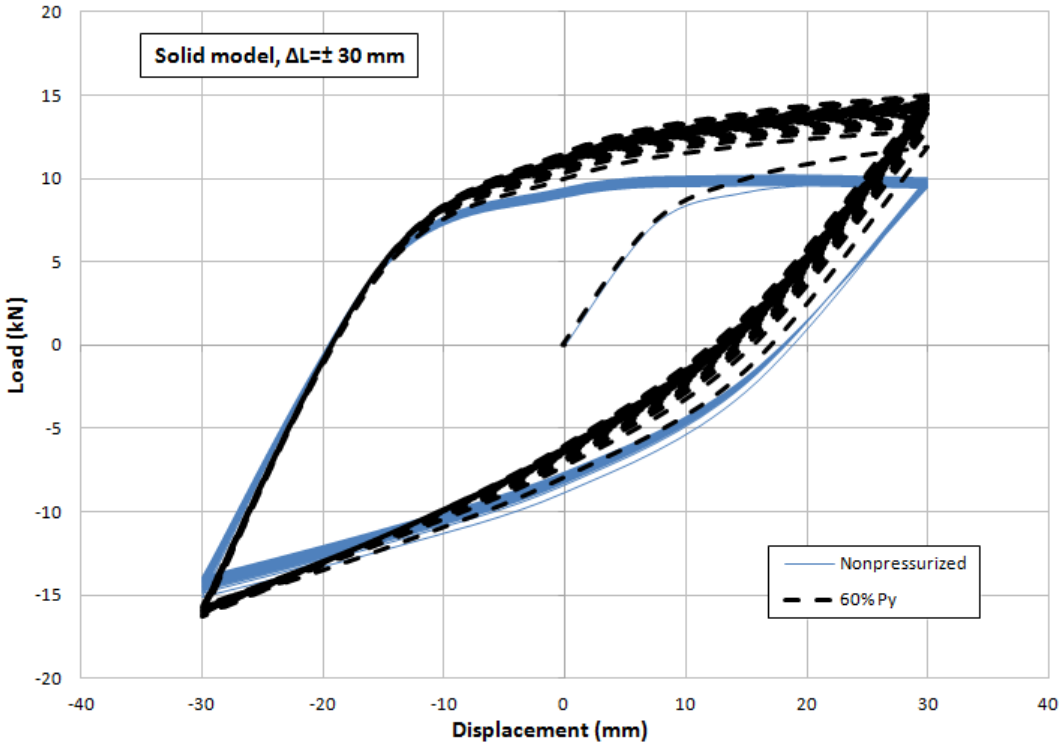
Στο παρούσα παράγραφο εξετάζεται επιρροή που έχει το μέγεθος της επιβαλλόμενης εσωτερικής πίεσης στα αποτελέσματα. Τα παρακάτω αποτελέσματα αφορούν την περίπτωση που οποία οι σωλήνες καταπονούνται με κυκλική φόρτιση πλάτους ±30 mm, για τα διάφορα επίπεδα πίεσης που μελετώνται στην εργασία αυτή.

6.4.1 Δυνάμεις αντίδρασης

Στα Σχήματα 6.17 και 6.18 γίνεται σύγκριση μεταξύ των καμπυλών φορτίου-μετατόπισης, για την περίπτωση μηδενικής εσωτερικής πίεσης και της μέγιστης επιβαλλόμενης πίεσης.



Σχήμα 6.17: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης, για τις Αναλύσεις 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) και 6 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)

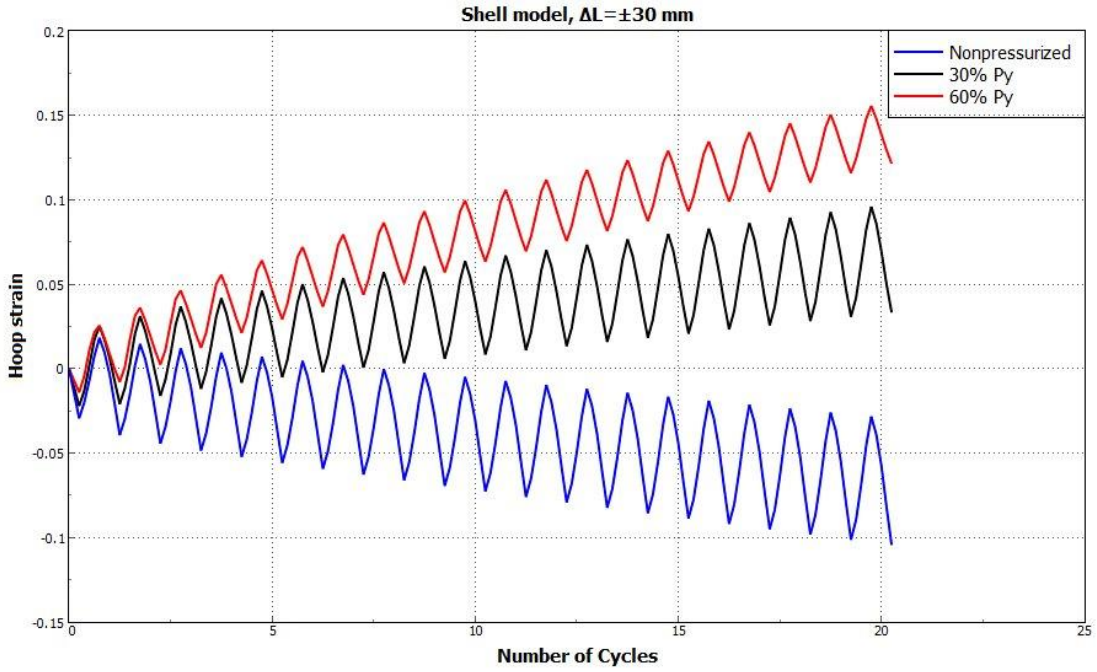


Σχήμα 6.18: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης, για τις Αναλύσεις 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) και 12 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)

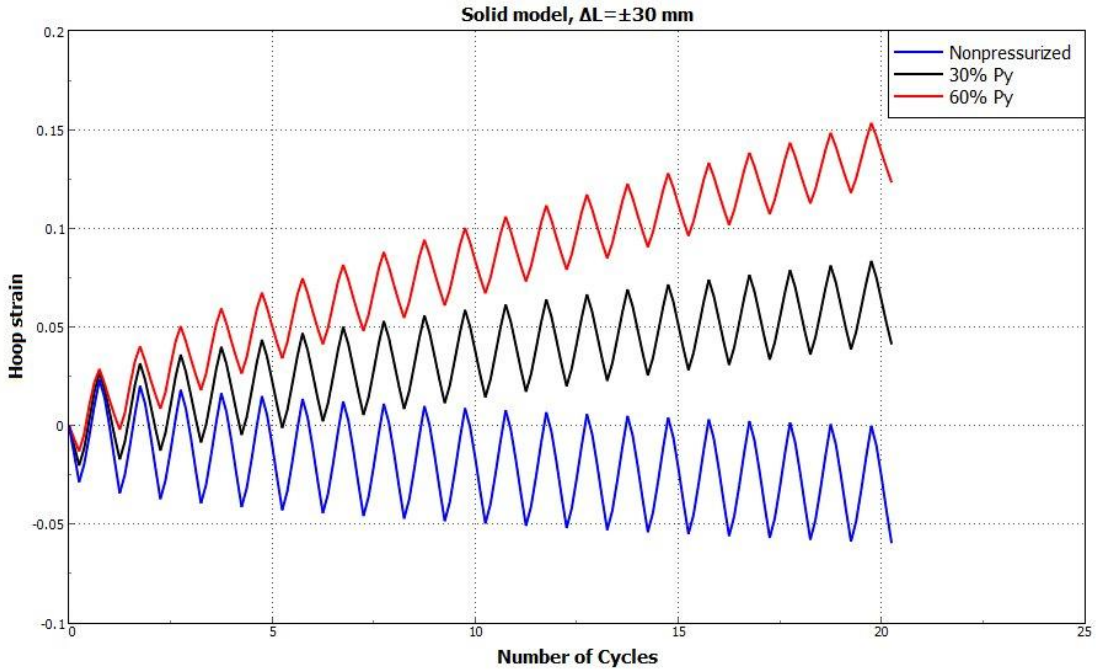
Στην περίπτωση αυτή, η αύξηση της εσωτερικής πίεσης οδηγεί στην ανάπτυξη σημαντικά μεγαλύτερων φορτίων, όπως μπορεί να επιβεβαιωθεί και στον Πίνακα 6.3. Επίσης, τα αποτελέσματα των αναλύσεων κελύφους και στερεού δεν δείχνουν να απέχουν σημαντικά.

6.4.2 Τοπικές παραμορφώσεις στον καμπύλο σωλήνα

Η μεταβολή της περιφερειακής παραμόρφωσης σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης όπως προκύπτει από τις αναλύσεις που εξετάζονται, φαίνεται στα Σχήματα 6.19 και 6.20, για αναλύσεις κελύφους και στερεού. Τα διαγράμματα αφορούν μετρήσεις στην εσωτερική πλευρά του flank.



Σχήμα 6.19: Ανάπτυξη περιφερειακής παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στην εσωτερική πλευρά του flank, για τις Αναλύσεις4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0), 5 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 13 MPa) και 6 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)

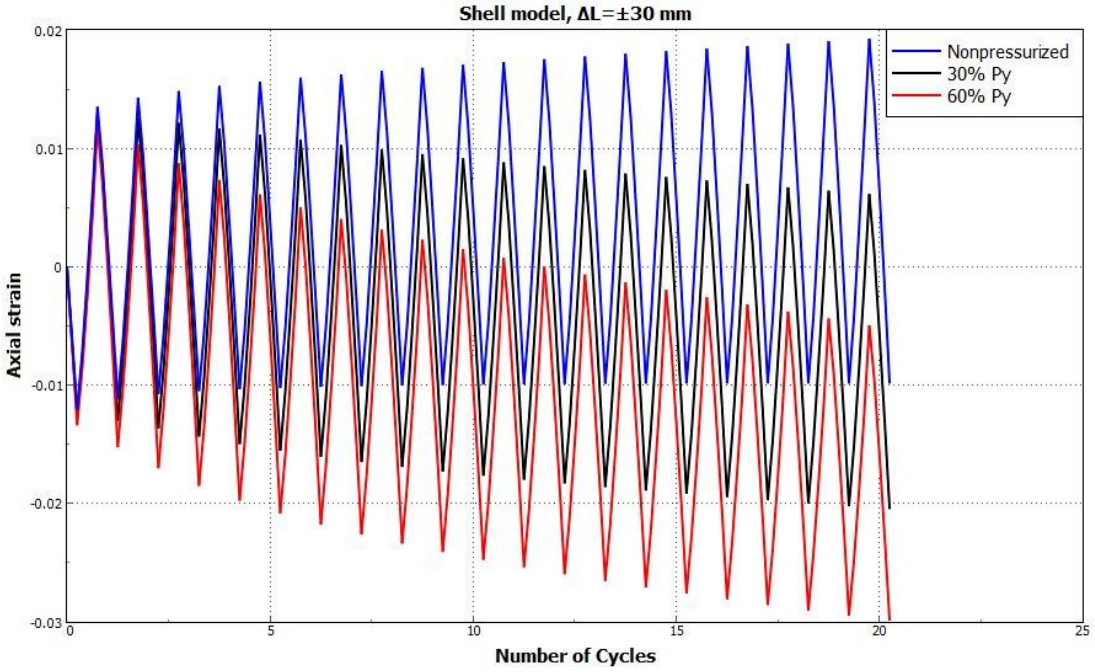


Σχήμα 6.20: Ανάπτυξη περιφερειακής παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στην εσωτερική πλευρά του flank, για τις Αναλύσεις 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0), 11 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 13 MPa) και 12 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)

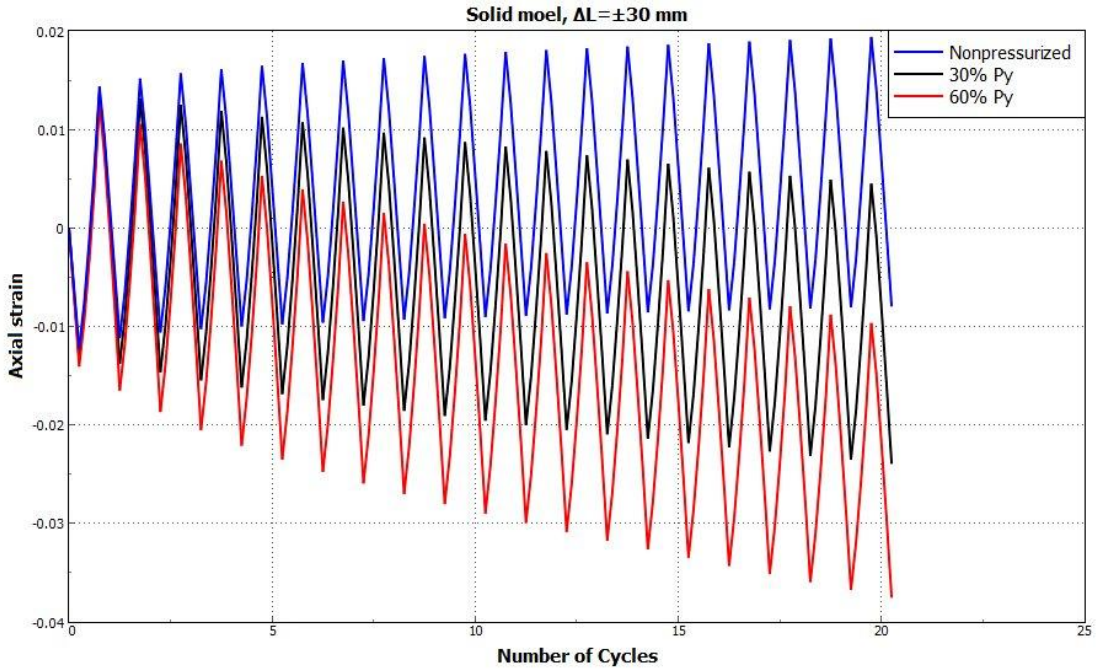
Από τα άνωθεν διαγράμματα μπορεί να παρατηρηθεί πως το εύρος της περιφερειακής παραμόρφωσης μειώνεται για αναλύσεις με μεγαλύτερη εσωτερική πίεση, όπως επιβεβαιώνεται και στην δεύτερη στήλη του Πίνακα 6.2.

Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί πως στις αναλύσεις με εσωτερική πίεση, η μέγιστη περιφερειακή παραμόρφωση όπως μετράται σε κάθε κύκλο φόρτισης, αυξάνεται με τους κύκλους φόρτισης. Το φαινόμενο αυτό δηλώνει συσσώρευση πλαστικής παραμόρφωσης στην περιφερειακή κατεύθυνση (ratcheting). Επίσης η συσσώρευση δείχνει να έχει μεγαλύτερο ρυθμό , για μεγαλύτερη εσωτερική πίεση.

Η μεταβολή της διαμήκους παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης, όπως μετράται στην εξωτερική πλευρά της περιοχής intrados του καμπύλου τμήματος για τις ίδιες αναλύσεις, φαίνεται στα Σχήματα 6.21και 6.22.



Σχήμα 6.21: Ανάπτυξη διαμήκους παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στην εξωτερική πλευρά της περιοχής intrados, για τις Αναλύσεις4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0), 5 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 13 MPa) και 6 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)



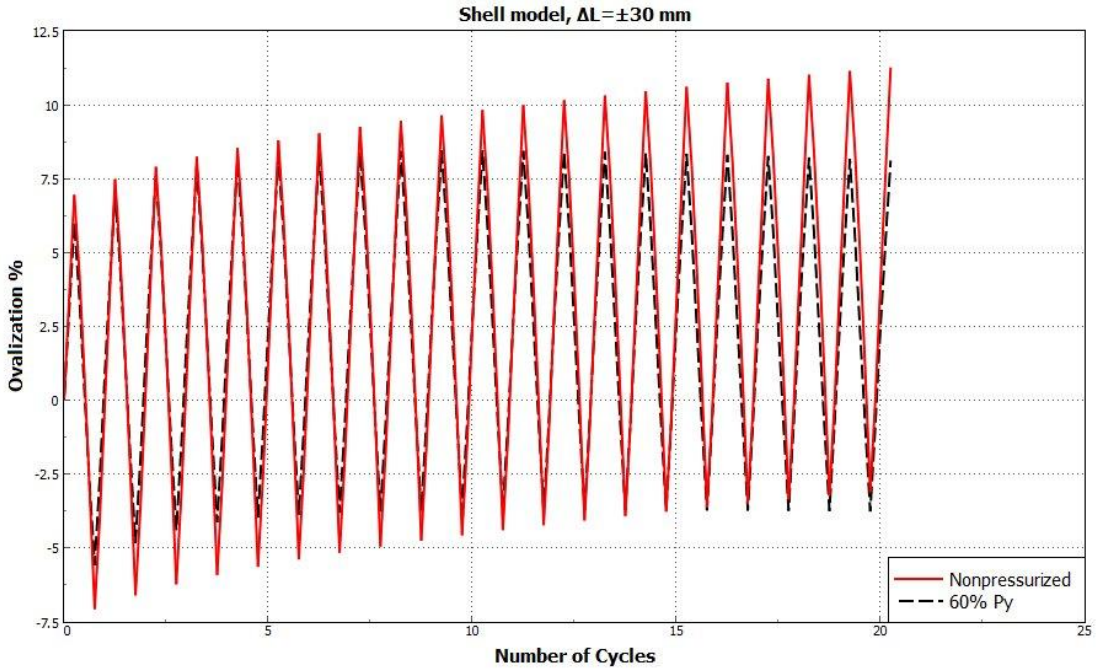
Σχήμα 6.22: Ανάπτυξη διαμήκους παραμόρφωσης με τους κύκλους φόρτισης στην εξωτερική πλευρά της περιοχής intrados, για τις Αναλύσεις 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0), 11 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 13 MPa) και 12 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)

Λαμβάνοντας υπόψιν και τις μετρήσεις στον Πίνακα 6.2 (πέμπτη στήλη), το εύρος της διαμήκους παραμόρφωσης δεν μεταβάλλεται σημαντικά με την αύξηση της εσωτερικής πίεσης.

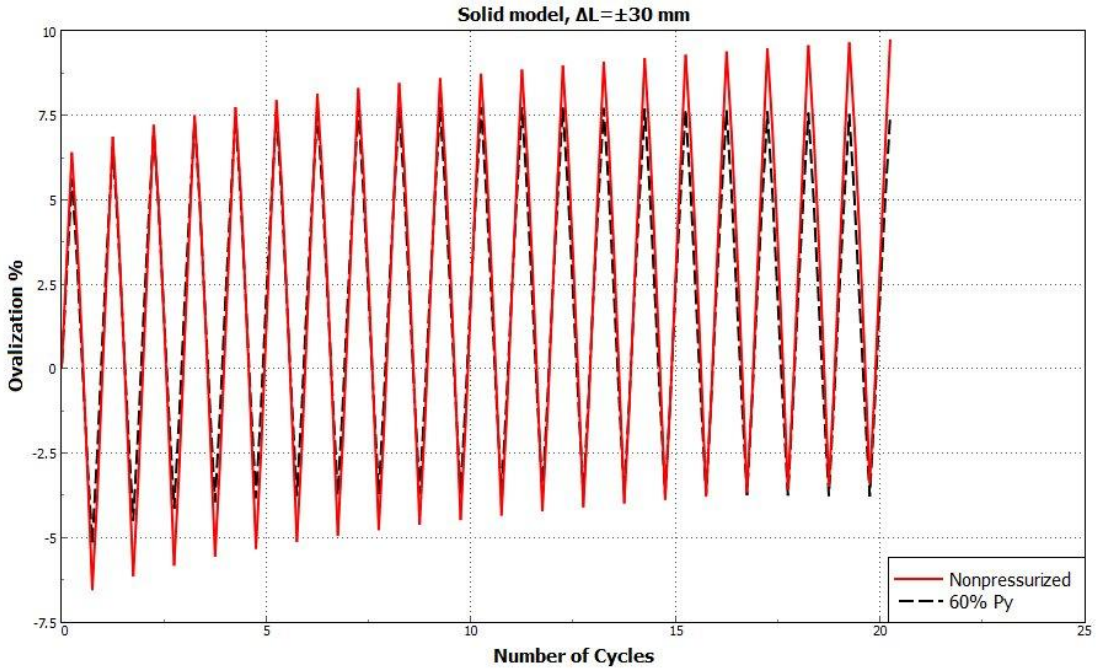
Σχολιάζεται ακόμη, πως για τις περιφερειακές παραμορφώσεις παρατηρείται κάποια απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων κελύφους και στερεού, η οποία είναι μικρότερη για τις διαμήκεις παραμορφώσεις που μελετήθηκαν.

6.4.3 Παραμόρφωση της διατομής

Εξετάζοντας την οβαλοποίηση της διατομής όπως προκύπτει από τις αναλύσεις με μηδενική εσωτερική πίεση και εσωτερική πίεση ίση με 60% της πίεσης διαρροής, προκύπτουν τα Σχήματα 6.23 και 6.24, στα οποία απεικονίζεται η μεταβολή του μεγέθους αυτού με τους κύκλους φόρτισης.



Σχήμα 6.23: Ανάπτυξη της οβαλοποίησης της μεσαίας διατομής του καμπύλου σωλήνα με τους κύκλους φόρτισης, για τις Αναλύσεις 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) και 6 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)



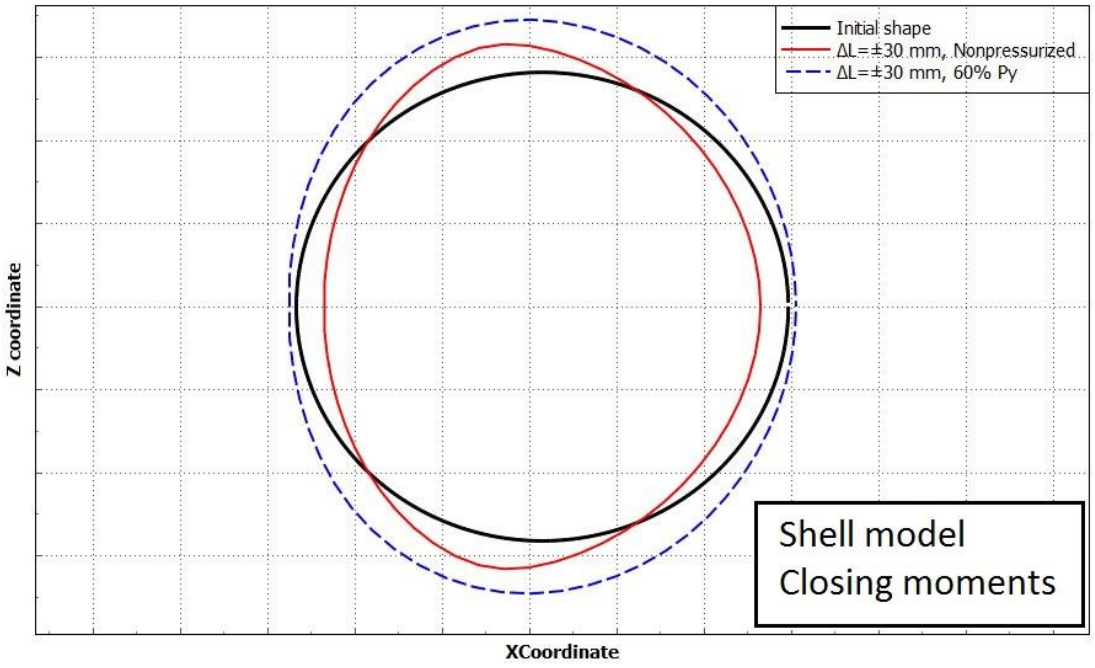
Σχήμα 6.24: Ανάπτυξη της οβαλοποίησης της μεσαίας διατομής του καμπύλου σωλήνα με τους κύκλους φόρτισης, για τις Αναλύσεις 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) και 12 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)

Μπορεί να παρατηρηθεί, πως για την περίπτωση των μεγεθών αυτών, η επιβολή εσωτερικής πίεσης μειώνει σημαντικά την οβαλοποίηση της διατομής. Ενδεχομένως το φαινόμενο αυτό να σχετίζεται με την μείωση του εύρους της

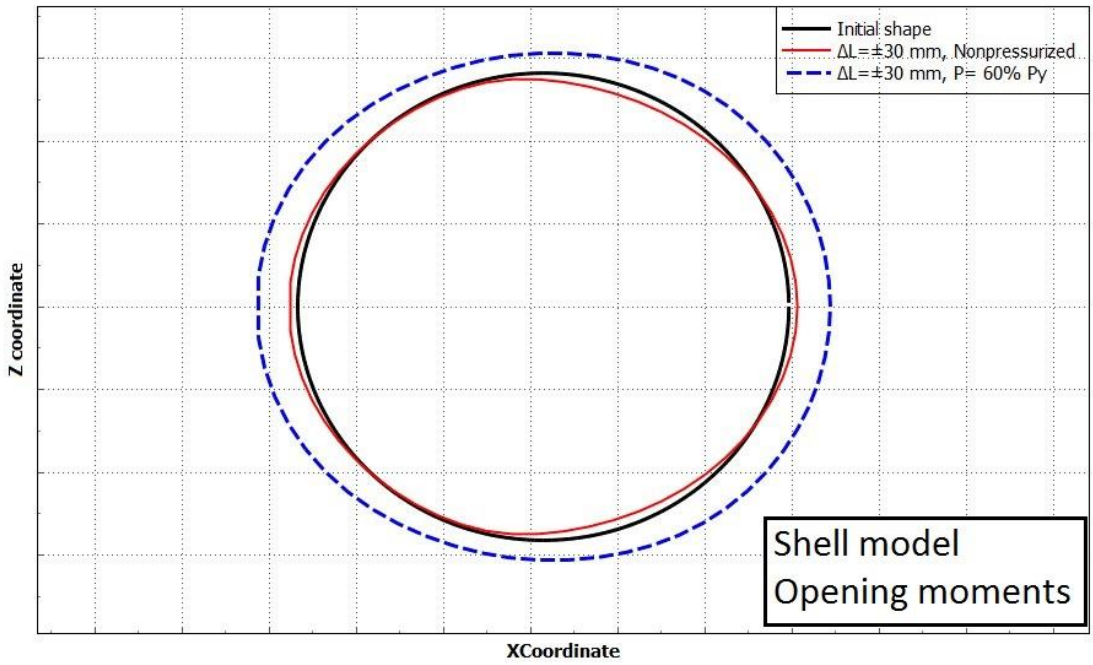
περιφερειακής παραμόρφωσης που επίσης παρατηρείται με την αύξηση της εσωτερικής πίεσης.

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί πως για τις αναλύσεις με εσωτερική πίεση ίση με 60% Py, η οβαλοποίηση αυξάνεται με τους κύκλους φόρτισης μέχρι και τον δέκατο κύκλο όπου αποκτά την μέγιστη τιμή της, ενώ έπειτα το μέγεθός της μειώνεται.

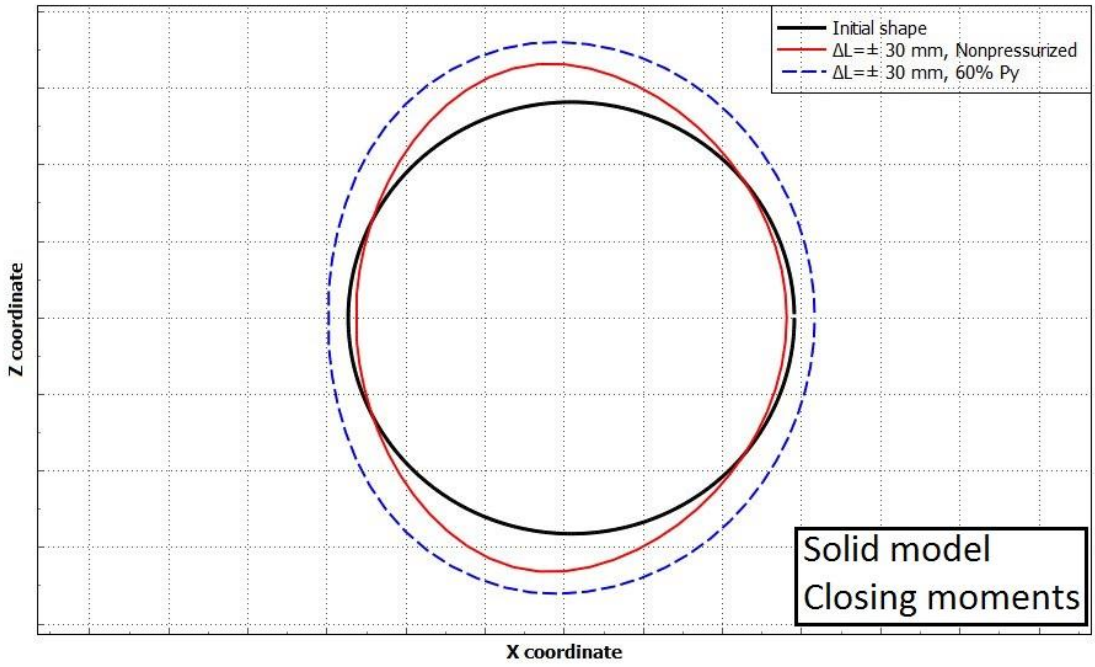
Το σχήμα τις οβαλοποιημένης διατομής για τις αναλύσεις αυτές, υπό κλείνουσες και ανοίγουσες ροπές, παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.25 έως 6.28.



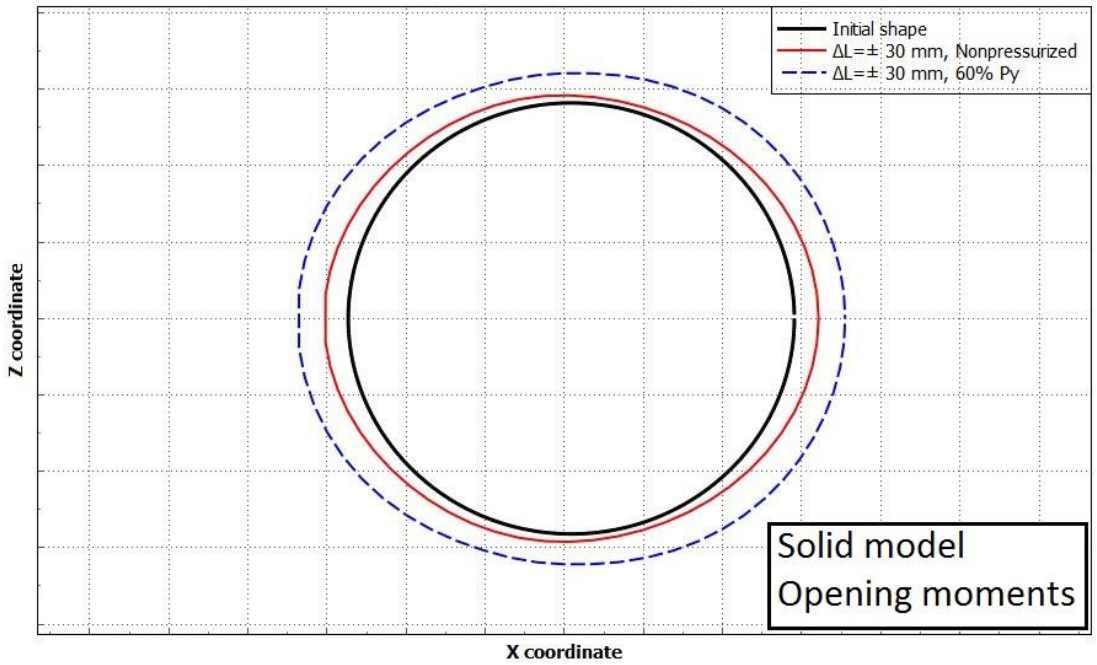
Σχήμα 6.25: Σχήμα οβαλοποιημένης διατομής υπό κλείνουσες καμπτικές ροπές σε σχέση με το αρχικό σχήμα, για τις Αναλύσεις 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) και 6 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)



Σχήμα 6.26: Σχήμα οβαλοποιημένης διατομής υπό ανοίγουσες καμπτικές ροπές σε σχέση με το αρχικό σχήμα, για τις Αναλύσεις 4 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 0) και 6 (κελύφους, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)



Σχήμα 6.27: Σχήμα οβαλοποιημένης διατομής υπό κλείνουσες καμπτικές ροπές σε σχέση με το αρχικό σχήμα, για τις Αναλύσεις 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) και 12 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)

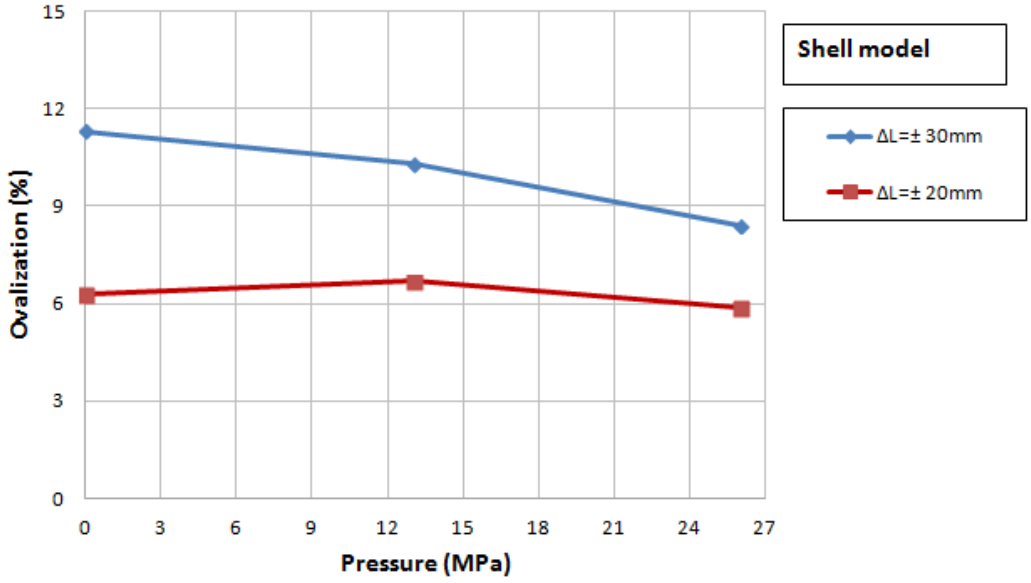


Σχήμα 6.28: Σχήμα οβαλοποιημένης διατομής υπό ανοίγουσες καμπτικές ροπές σε σχέση με το αρχικό σχήμα, για τις Αναλύσεις 10 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 0) και 12 (στερεού, ΔL=± 30 mm, P= 26 MPa)

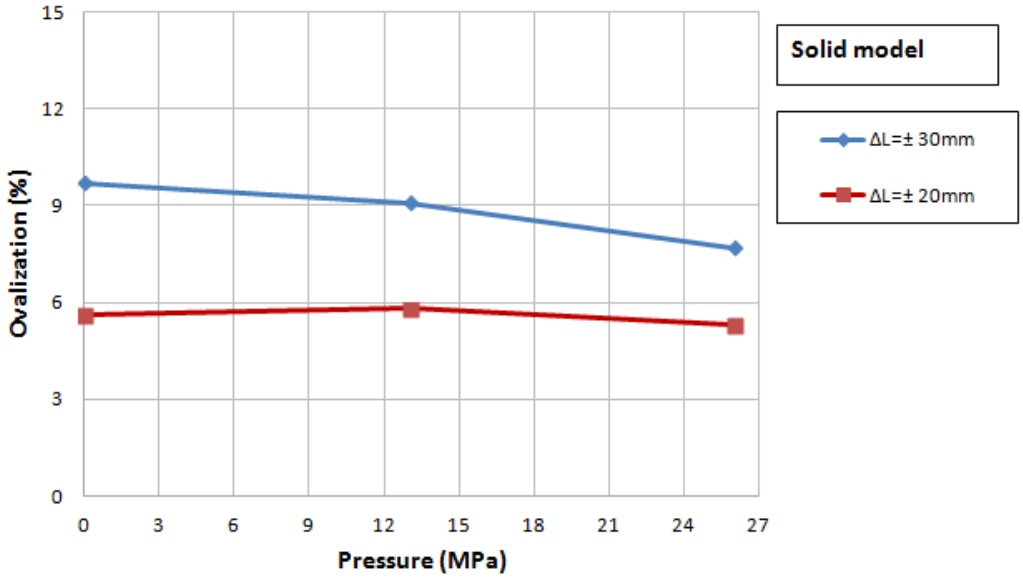
Μπορεί να παρατηρηθεί πως στην περίπτωση εσωτερικής πίεσης ίσης με 60% p_y, ο σωλήνας έχει «φουσκώσει», εφόσον οι τιμές των διαμέτρων της οβαλοποιημένης διατομής σε κάθε κατεύθυνση (D_{max} και D_{min}) είναι μεγαλύτερες της αρχικής διαμέτρου της κυκλικής διατομής. Το φαινόμενο αυτό, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, σχετίζεται με τη διδιάστατη συσσώρευση πλαστικής παραμόρφωσης που λαμβάνει χώρα κατά την κάμψη του σωλήνα.

Επίσης, εξετάζοντας τα Σχήματα για κλείνουσες καμπτικές ροπές στα οποία η παραμόρφωση της διατομής φαίνεται εντονότερη, παρατηρείται πως για την περίπτωση εσωτερικής πίεσης ίσης με 60% p_y, το σχήμα της διατομής δεν δείχνει τόσο παραμορφωμένο, δηλαδή είναι πιο κοντά στο κυκλικό σε σχέση με αυτό για μηδενική εσωτερική πίεση. Αυτό υποδηλώνει τη μείωση της οβαλοποίησης με την αύξηση της εσωτερικής πίεσης, γεγονός ευεργετικό για την κατασκευή καθώς, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, ο σωλήνας υπό αυτές τις συνθήκες παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή σε υψηλότερες φορτίσεις.

Τα αποτελέσματα που αφορούν την μέγιστη οβαλοποίηση της διατομής όπως προκύπτει για κάθε ανάλυση (Πίνακας 6.3), συνοψίζονται στα Σχήματα 6.29 και 6.30.



Σχήμα 6.29: Μέγιστη οβαλοποίηση, όπως προκύπτει από τις Αναλύσεις με στοιχεία κελύφους



Σχήμα 6.30: Μέγιστη οβαλοποίηση, όπως προκύπτει από τις Αναλύσεις με στοιχεία στερεού.

Μεγαλύτερο πλάτος μετατόπισης οδηγεί σε κάθε περίπτωση σε αυξημένη οβαλότητα, ενώ παράλληλα παρατηρείται η εξάρτηση της παραμόρφωση της διατομής από το επίπεδο της επιβαλλόμενης εσωτερικής πίεσης.

7. Υπολογισμός της αντοχής σε κόπωση

Στο παρόν Κεφάλαιο γίνεται ο υπολογισμός των κύκλων ζωής σε κόπωση μέσω εμπειρικών σχέσεων. Πρόκειται για σχέσεις οι οποίες προτάθηκαν από τον Varelis et al. σε δημοσίευσή του [8], η οποία παρουσιάζεται περιληπτικά στο Κεφάλαιο 3. Παρακάτω γίνεται σύντομή περιγραφή της διαδικασίας διεξαγωγής των εξισώσεων, η οποία υπάρχει αναλυτικά στην άνω δημοσίευση.

Αρχικά, λαμβάνοντας υπόψιν το διαξονικό πεδίο των παραμορφώσεων που χαρακτηρίζει το πρόβλημα, κρίθηκε σκόπιμη η έκφραση αυτών μέσω ενός όρου ισοδύναμου εύρους παραμόρφωσης $\Delta\varepsilon_{eq}$, το οποίο υπολογίζεται ως:

$$\Delta\varepsilon_{eq} = \sqrt{\Delta\varepsilon_H{}^2 + \Delta\varepsilon_L{}^2 + \Delta\varepsilon_H\Delta\varepsilon_L} \tag{7.1}$$

Για τον υπολογισμό του όρου αυτού, χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις του εύρους περιφερειακής και διαμήκους παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή αστοχίας του flank.

Η παρουσία εσωτερικής πίεσης, όπως καταλήγει η εργασία, μειώνει το εύρος των περιφερειακών παραμορφώσεων, ενώ ενδέχεται να επηρεάζει και τους κύκλους ζωής του δοκιμίου υπό φόρτιση. Προκειμένου να συμπεριληφθεί η επίδραση της εσωτερικής πίεσης στην αντοχή του καμπύλου σωλήνα σε κόπωση, υπολογίζεται το «ενισχυμένο» εύρος ισοδύναμης παραμόρφωσης, ως:

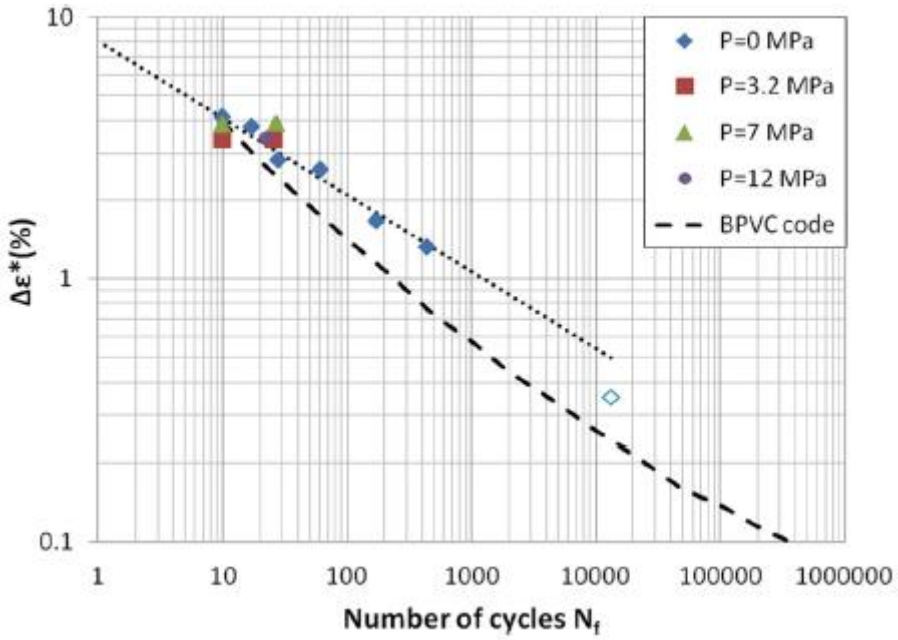
$$\Delta\varepsilon^* = \left(\frac{1}{1 - P/P_y}\right)\Delta\varepsilon_{eq} \tag{7.2}$$

Στην εξίσωση (7.2), το ισοδύναμο εύρος πλαστικής παραμόρφωσης πολλα-πλασιάζεται με έναν παράγοντα «πίεσης» ο οποίος χρησιμοποιεί τον λόγο της επιβαλλόμενης πίεσης P προς την πίεση διαρροής του σωλήνα P_y , με την τελευταία να υπολογίζεται από την σχέση (5.1).

Αξιοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα και τους κύκλους ως την αστοχία, όπως συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1, οι συγγραφείς προτείνουν την ακόλουθη εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής σε κόπωση:

$$N_f = \left(\frac{8.198}{\Delta\varepsilon^*}\right)^{3.43} \tag{7.3}$$

Σε διπλή λογαριθμική κλίμακα, η σχέση (7.3) περιγράφεται ως ευθεία γραμμή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1.



Σχήμα 7.1: Καμπύλη κόπωσης, όπως προκύπει από πειραματικά αποτελέσματα [8]

Προκειμένου να γίνει μια εκτίμηση της αντοχής σε κόπωση για το πρόβλημα της παρούσας εργασίας, γίνεται χρήση των εμπειρικών σχέσεων (7.1), (7.2) και (7.3). Τα αποτελέσματα αυτών συγκεντρώνονται στον Πίνακα 7.1, για κάθε ανάλυση που έλαβε χώρα. Για τους υπολογισμούς, έχει ληφθεί υπόψιν το εύρος της περιφερειακής και διαμήκους παραμόρφωσης στην κρίσιμη περιοχή αστοχίας, την εσωτερική πλευρά της περιοχής flank του καμπύλου σωλήνα. Οι τιμές αυτές, όπως και οι παράμετροι κάθε ανάλυσης αναγράφονται επίσης στον Πίνακα 7.1, χάριν πληρότητας. Υπενθυμίζεται ακόμα πως για τους σωλήνες του προβλήματος, η πίεση διαρροής P_y είναι ίση με 43 MPa.

Analysis	Model	ΔL (mm)	P (MPa)	$\Delta\varepsilon_H$% at flank inner face	$\Delta\varepsilon_L$% at flank inner face	$\Delta\varepsilon_{eq}$ %	$\Delta\varepsilon^*$%	N_f
1	Shell	±20	0	3.7	0.009	3.7	3.7	15
2	Shell	±20	13	3.3	0.06	3.3	4.8	6
3	Shell	±20	26	2.6	0.14	2.7	6.7	1
4	Shell	±30	0	7.6	0.16	7.7	7.7	1
5	Shell	±30	13	6.3	0.11	6.4	9.1	0
6	Shell	±30	26	3.4	0.32	3.6	9.0	0
7	Solid	±20	0	3.5	0.18	3.6	3.6	16
8	Solid	±20	13	2.8	0.27	2.9	4.2	9
9	Solid	±20	26	2.2	0.35	2.4	6.1	2
10	Solid	±30	0	5.9	0.20	6.0	6.0	2
11	Solid	±30	13	4.2	0.43	4.4	6.4	2
12	Solid	±30	26	3.0	0.62	3.4	8.5	0

Πίνακας 7.1: Υπολογισμοί για την αντοχή σε κόπωση, με βάση εμπειρικές σχέσεις

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα για τους κύκλους ζωής σε κόπωση, φαίνεται πως η εμπειρική σχέση (7.3), δεν οδηγεί σε ιδιαίτερα «αξιόπιστα» αποτελέσματα για το παρόν πρόβλημα. Για την περίπτωση μάλιστα των Αναλύσεων 5,6 και 12, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγάλα πλάτη μετατόπισης και εσωτερικής πίεσης, προβλέπεται η άμεση αστοχία του σωλήνα με την έναρξη της κυκλικής φόρτισης.

Η ακαταλληλότητα της εξίσωσης αυτής, ενδεχομένως οφείλεται στα διαφορετικά χαρακτηριστικά γεωμετρίας και υλικού που παρουσιάζουν τα δύο προβλήματα. Επίσης, μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός πως στο πρόβλημα της δημοσίευσης το εύρος των περιφερειακών παραμορφώσεων αναφέρεται στην εξωτερική πλευρά της περιοχής flank, το οποίο προκύπτει μικρότερο από αυτό στην εσωτερική πλευρά που χρησιμοποιεί η παρούσα εργασία.

8. Προεργασία σχεδιασμού πειραμάτων

Προκειμένου η μελέτη του παρόντος προβλήματος να είναι ολοκληρωμένη, χρειάζεται να διεξαχθεί σειρά πειραμάτων ώστε να καταγραφεί η πραγματική απόκριση του καμπύλου τμήματος όταν αυτό βρίσκεται υπό πίεση και παράλληλα υπόκειται σε ισχυρά κυκλικά φορτία. Η διάταξη που προσομοιώνεται στις αριθμητικές αναλύσεις είναι σημαντικό να σχεδιαστεί σε πραγματική κλίμακα, ώστε να της επιβληθούν τα ίδια μεγέθη φόρτισης όπως περιγράφονται στα προηγούμενα Κεφάλαια. Το παρόν Κεφάλαιο αποτελεί μέρος της προεργασίας του σχεδιασμού των πειραματικών δοκιμών, οι οποίες συνίσταται να λάβουν χώρα.

Οι διαθέσιμοι καμπύλοι σωλήνες είναι, σύμφωνα με τις προδιαγραφές τους, χωρίς ραφή, εξωτερικής διαμέτρου 2 ιντσών (60.3 mm), 90 μοιρών, «μεγάλης ακτίνας» (R/D=1.5) και χαρακτηρίζονται από SCH=40 (pipe schedule) με παχος 3.91 mm. Ακολουθούν το πρότυπο ANSI B16.9, ενώ πρόκειται για υλικό ASTM A234 WPB με όριο διαρροής 35000 psi (240 MPa) και μέγιστη αντοχή 60000 psi (415 MPa).

Τα ευθύγραμμα τμήματα σωλήνων τα οποία διατίθενται για την πειραματική μελέτη, είναι, σύμφωνα με τις προδιαγραφές τους, χωρίς ραφή, εξωτερικής διαμέτρου 2 ιντσών (60.3 mm) και χαρακτηρίζονται από SCH=40 με πάχος 3.91 mm. Ακολουθούν το πρότυπο ANSI 36.10, με υλικό ASTM A106 GR.B ιδίου ορίου διαρροής και μεγίστης αντοχής με το υλικό των καμπύλων σωληνωτών τμημάτων.

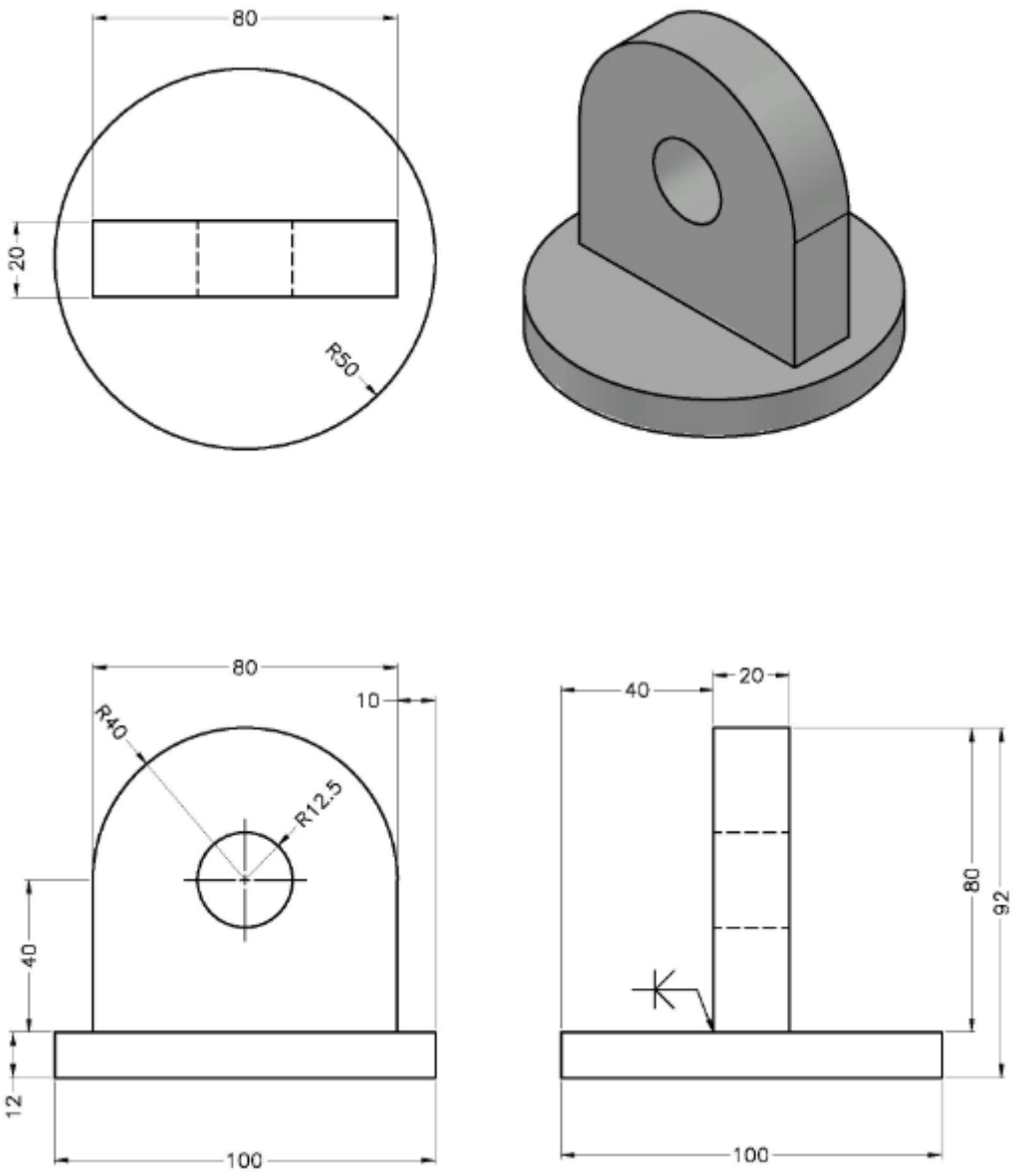
Συνολικά, προβλέπεται η διεξαγωγή δώδεκα πειραμάτων, όπως «αντιστοιχούν» στις δώδεκα αριθμητικές αναλύσεις της εργασίας, προκειμένου να μελετηθούν οι παράμετροι του επιβαλλόμενου πλάτους μετατόπισης και εσωτερικής πίεσης. Σημειώνεται εδώ, πως είναι επίσης σημαντικό, προ της διαξαγωγής της άνω «κύριας» σειράς πειραμάτων, να πραγματοποιηθεί σειρά πειραμάτων που αφορά την μελέτη της συμπεριφοράς του υλικού των καμπύλων τμημάτων. Πρόκειται για πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού και κυκλικής φόρτισης, σε δοκίμια που προέρχονται από τους καμπύλους σωλήνες, από τη διαμήκη και περιφερειακή διεύθυνσή τους.

Για κάθε μία από τις δώδεκα πειραματικές δοκιμές, χρειάζεται να κατασκευαστεί διάταξη σωληνώσεων η οποία αποτελείται από ένα καμπύλο τμήμα σωλήνα το οποίο στα άκρα του συγκολλάται με δύο ευθύγραμμα τμήματα σωλήνα, με το καθένα από τα τελευταία να έχει μήκος 300 mm, ίσο με πέντε φορές την διάμετρό του.

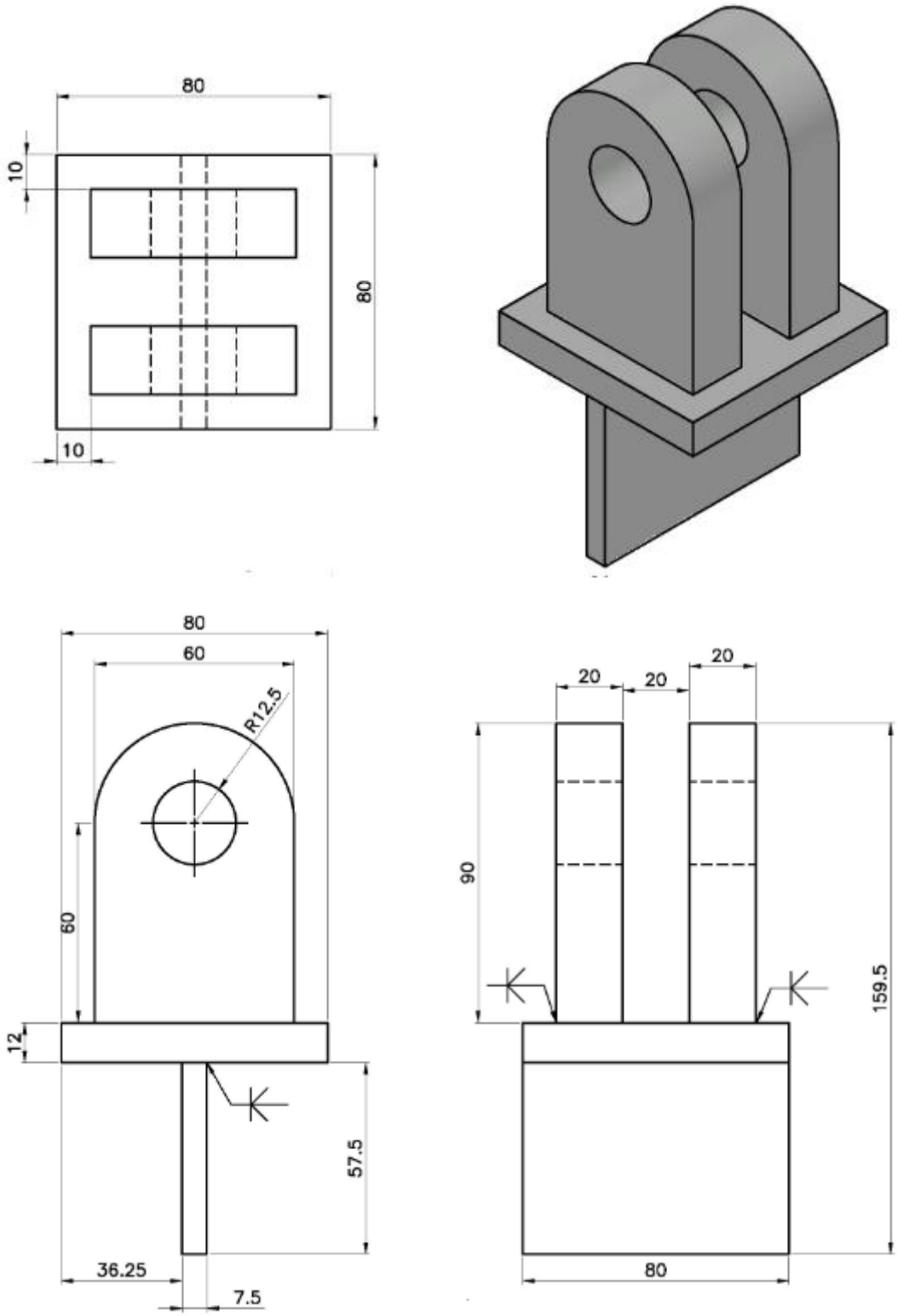
Η διάταξη αυτή μπορεί να τοποθετηθεί σε μηχανή εφελκυσμού με τέτοιον τρόπο, έτσι ώστε να προσομοιώνεται η κάμψη του καμπύλου τμήματος εντός επιπέδου. Επίσης, η διάταξη σωληνώσεων χρειάζεται να είναι «κλειστή» προκειμέ-

νου να γίνει η εφαρμογή της εσωτερικής πίεσης. Για αυτόν τον λόγο, στα άκρα των ευθύγραμμων σωλήνων χρειάζεται να συγκολληθούν εξαρτήματα τα οποία αποτελούν τα «καπάκια» της διάταξης. Τα τελευταία συνδέονται έπειτα, μέσω πείρου σύνδεσης, με αρθρώσεις οι οποίες εφαρμόζουν στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού.

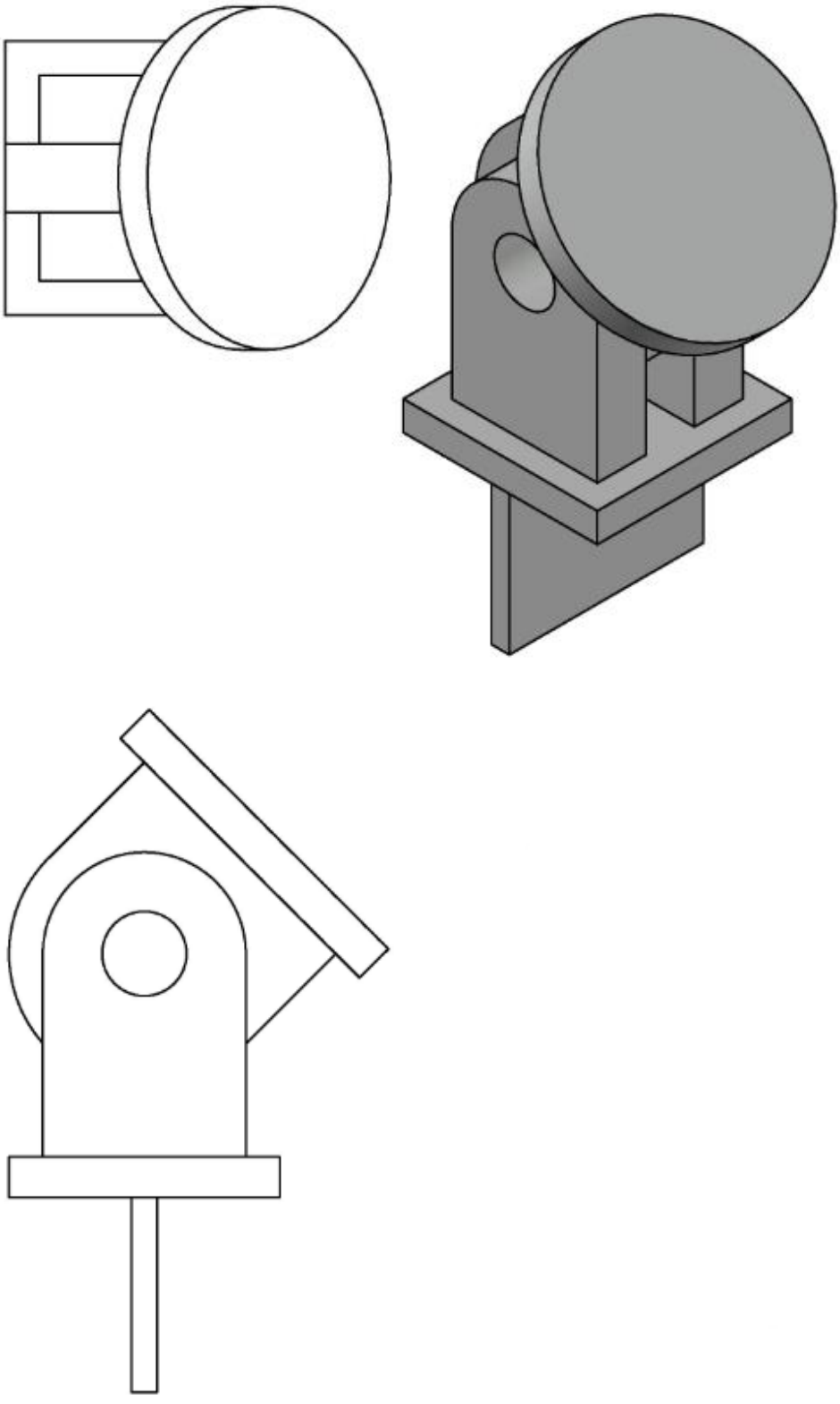
Τα μηχανολογικά σχέδια με τη γεωμετρία και τις διαστάσεις που προτείνονται για τα «καπάκια» και τις αρθρώσεις, φαίνονται στις Εικόνες 8.1 και 8.2 σε κλίμακα 1:2. Επίσης, η σύνδεσή τους φαίνεται στην Εικόνα 8.3, όπου έχει χρησιμοποιηθεί η ίδια κλίμακα. Ο σχεδιασμός έγινε με χρήση του λογισμικού AutoCAD Mechanical 2018.



Εικόνα 8.1: Μηχανολογικά σχέδια για τα «καπάκια» της πειραματικής διάταξης, κλίμακα 1:2



Εικόνα 8.2: Μηχανολογικά σχέδια για τις αρθρώσεις της πειραματικής διάταξης, κλίμακα 1:2

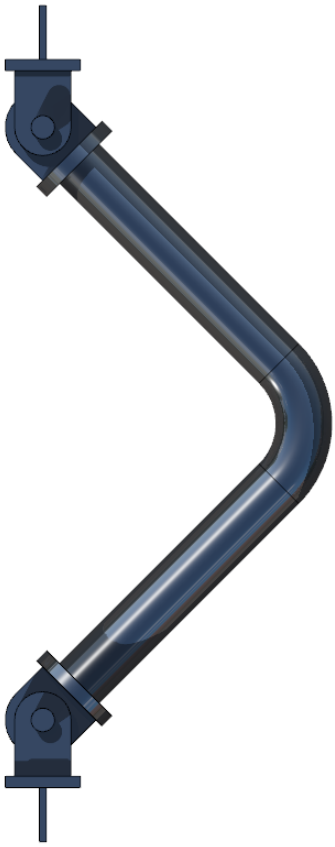


Εικόνα 8.3: Σύνδεση μεταξύ «καπακιού» και άρθρωσης, κλίμακα 1:2

Σημειώνεται εδώ πως τα «καπάκια» και οι αρθρώσεις έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να απαρτίζονται από ελάσματα σε συγκόλληση. Συνεπώς, για την κατασκευή τους θα πρέπει να επιλεγεί υλικό το οποίο χαρακτηρίζεται από «καλές» συγκολλητικές ιδιότητες. Επίσης, συστήνεται η χρήση υλικού του οποίου το όριο διαρροής είναι μεγαλύτερο από αυτό των σωλήνων, προκειμένου να αποφευχθεί η παραμόρφωσή των εξαρτημάτων αυτών. Μια πρόταση αποτελεί η επιλογή χάλυβα S275 ή S335, οι οποίοι ικανοποιούν τις παραπάνω απαιτήσεις σχεδιασμού.

Όσον αφορά τη διαδικασία της συγκόλλησης μεταξύ του καμπύλου σωλήνα και των ευθύγραμμων τμημάτων, καθώς και αυτής μεταξύ των σωλήνων και των καπακιών, χρειάζεται να γίνει η προδιαγραφή τους σε έγγραφο WPS (Welding Procedure Specification). Επιπλέον, κατά τον σχεδιασμό της άνω διαδικασίας, πρέπει να ληφθεί υπόψιν η διαφορά στο πάχος του τοιχώματος που παρουσιάζουν τα καμπύλα τμήματα από τα ευθύγραμμα, καθώς στα πρώτα μετράται συχνά μεγαλύτερο πάχος από το ονομαστικό. Το μεγαλύτερο του προδιαγεγραμμένου πάχος των καμπύλων σωλήνων, προκύπτει κατά την κατασκευή του, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2.

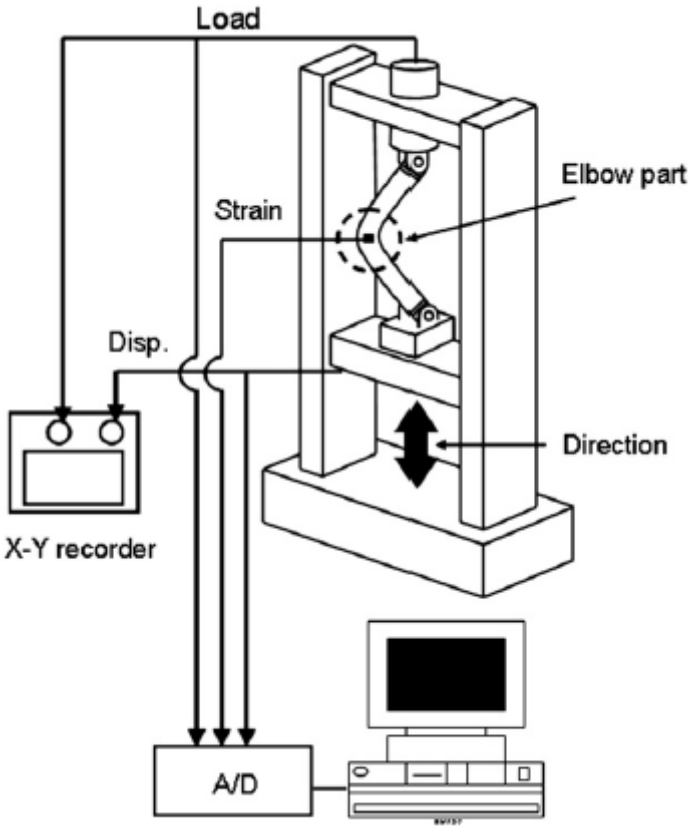
Η συνολική πειραματική διάταξη η οποία προτείνεται, λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, περιγράφεται σχηματικά στην Εικόνα 8.4. Το συνολικό της ύψος, υπολογίζεται στα 770 mm.



Εικόνα 8.4: Συνολική πειραματική διάταξη, σχηματική απεικόνιση

Η διάταξη της άνω Εικόνας, τοποθετείται σε μηχανή εφελκυσμού ώστε να της επιβληθεί η επιθυμητή φόρτιση. Συγκεκριμένα, η «κάτω» άρθρωση (βλ. Εικόνα 8.4) συνδέεται σε έμβολο της μηχανής εφελκυσμού, ώστε να ασκηθεί σε αυτήν ελεγχόμενη κυκλική μετατόπιση σταθερού πλάτους. Παράλληλα, η «άνω» άρθρωση συγκρατείται ακίνητη μέσω της μηχανής. Με τον τρόπο αυτό, ο καμπύλος σωλήνας υφίσταται κάμψη εντός επιπέδου.

Κάθε πειραματική δοκιμή, έχει σκοπό την συλλογή δεδομένων που αφορούν τα αναπτυσσόμενα φορτία, τους κύκλους φόρτισης έως την αστοχία του καμπύλου τμήματος και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται τοπικά σε αυτόν. Για την επίτευξη της μέτρησης των παραμορφώσεων, είναι απαραίτητη η χρήση μυκηνσιόμετρων τα οποία συνίσταται να τοποθετηθούν στην κρίσιμη περιοχή αστοχίας του καμπύλου τμήματος (flank). Στην Εικόνα 8.5 περιγράφεται σχηματικά ο πειραματικός εξοπλισμός και η διάταξη των σωλήνων.



Εικόνα 8.5: Πειραματικός εξοπλισμός, σχηματική απεικόνιση [6]

Τέλος, πριν την διεξαγωγή κάθε πειραματικής δοκιμής οι σωλήνες χρειάζεται να γεμιστούν με νερό στο επιθυμητό επίπεδο πίεσης. Προκειμένου να επιτευχθεί η διαδικασία αυτή, χρειάζεται να πραγματοποιηθεί επιπλέον μελέτη, η οποία δεν συμπεριλαμβάνεται στην παρούσα εργασία.

9. Συμπεράσματα και προτάσεις

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται μέσω υπολογιστικής μελέτης, η μηχανική συμπεριφορά των καμπύλων τμημάτων σωληνώσεων υπό πίεση και ισχυρή κυκλική καταπόνηση. Για τον σκοπό αυτό, έλαβε χώρα σειρά αριθμητικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, η οποία αφορά προσομοίωση διάταξης σωληνώσεων. Η προσομοίωση γίνεται με χρήση δύο διαφορετικών μοντέλων, κελύφους και στερεού, τα οποία υπόκεινται σε διάφορα μεγέθη επιβαλλόμενης κυκλικής φόρτισης και εσωτερικής πίεσης.

Είναι σημαντικό πως, τα αποτελέσματα των αναλύσεων κελύφους και στερεού της εργασίας, παρουσιάζουν ικανοποιητική σύγκλιση, ιδιαίτερα ως προς τον εντοπισμό των περιοχών με τις μέγιστες παραμορφώσεις. Οι τιμές των διάφορων αποτελεσμάτων, επίσης δεν παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση, στις περισσότερες των περιπτώσεων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα κάθε ανάλυσης, οι καμπύλοι σωλήνες υπό ισχυρές κυκλικές καταπονήσεις παρουσιάζουν σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις, με τις μέγιστες τιμές αυτών να συγκεντρώνονται στην εσωτερική πλευρά της πλαϊνής περιοχής αυτού (flank). Η περιοχή αυτή είναι η κρίσιμη για αστοχία. Το εύρος των περιφερειακών παραμορφώσεων στην περιοχή flank, καθώς και σε ολόκληρο τον καμπύλο σωλήνα, είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το εύρος των διαμήκων παραμορφώσεων. Τα αποτελέσματα αυτά, δικαιολογούν και την κατεύθυνση της ρωγμής η οποία, όπως προκύπτει από πειραματικές μελέτες, αναπτύσσεται από την εσωτερική προς την εξωτερική επιφάνεια της περιοχής flank, ενώ ακολουθεί την διαμήκη διεύθυνση του καμπύλου τμήματος.

Εξετάζοντας την επιρροή του μεγέθους του επιβαλλόμενου πλάτους μετατόπισης στην απόκριση του καμπύλου σωλήνα, προκύπτει πως μεγαλύτερο πλάτος μετατόπισης συνεπάγεται την ανάπτυξη μεγαλύτερων φορτίων στην διάταξη. Το εύρος των περιφερειακών και διαμήκων παραμορφώσεων είναι ιδιαίτερα αυξημένο υπό ισχυρότερες κυκλικές καταπονήσεις, όπως επίσης και η οβαλοποίηση που παρατηρείται στην μεσαία διατομή του καμπύλου τμήματος.

Η επιβολή εσωτερικής πίεσης σημαντικού επιπέδου στην διάταξη σωληνώσεων, οδηγεί σε ανάπτυξη σημαντικά μεγαλύτερων φορτίων σε αυτήν. Σύμφωνα όμως και με τα υπόλοιπα αποτελέσματα, η επιβολή της δείχνει να έχει και κάποια «ευεργετική» επίδραση στην κατασκευή. Το εύρος των περιφερειακών παραμορφώσεων, το οποίο είναι «υπεύθυνο» για την αστοχία, μειώνεται σημαντικά όταν ο σωλήνας βρίσκεται υπό συνθήκες υψηλής πίεσης. Επίσης η

οβαλοποίηση της διατομής φαίνεται να προλαμβάνεται, καθώς το σχήμα της τείνει περισσότερο στο κυκλικό.

Παράλληλα σε σημαντικά επίπεδα πίεσης, παρατηρείται αύξηση του μεγέθους της διατομής, γεγονός το οποίο υποδηλώνει πως ο σωλήνας «φουσκώνει» υπό αυτές τις συνθήκες. Η τελευταία απόκριση, οφείλεται στο φαινόμενο της διαξονικής συσσώρευσης πλαστικής παραμόρφωσης (ratcheting), η οποία λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα κατά την περιφερειακή και διαμήκη διεύθυνση. Μάλιστα, μεγαλύτερη εσωτερική πίεση φαίνεται να οδηγεί σε αυξημένο ρυθμό συσσώρευσης της παραμόρφωσης, φαινόμενο που ενδεχομένως να μειώσει τον χρόνο ζωής σε κόπωση του σωλήνα.

Τα παραπάνω συμπεράσματα προκύπτουν από αποτελέσματα υπολογιστικής μελέτης και χρειάζεται να συγκριθούν με αντίστοιχα πειραματικής εργασίας. Για αυτόν τον λόγο, συνίσταται η διεξαγωγή σειράς πειραμάτων, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 8, προκειμένου να μελετηθεί η απόκριση του σωλήνα σε πραγματική κλίμακα. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται παράλληλα «επαλήθευση» της ορθότητας των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκαν για τους σκοπούς της εργασίας αυτής.

Επίσης πρόταση αποτελεί και η χρήση ενός περισσότερο «ανεπτυγμένου» μοντέλου για την προσομοίωση της πλαστικής συμπεριφοράς του υλικού σε ισχυρή κυκλική φόρτιση. Μια τέτοια επιλογή, θα προσδώσει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αριθμητικά αποτελέσματα, καθώς θα προσεγγίζουν περισσότερο ικανοποιητικά τα αντίστοιχα πειραματικά.

Βιβλιογραφία

[1] S.A., Karamanos, 2016. “Mechanical Behavior of Steel Pipe Bends: An Overview”, Pressure Vessel Technology, ASME, Vol. 138(4), pp 04120315-1-15.

[2] Fujiwaka, T., Endou, R., Furukawa, S., Ono, S., and Oketani, K., 1999, “Study on Strength of Piping Components Under Elastic-Plastic Behavior Due to Seismic Loading,” ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Boston, MA,Aug. 1–5.

[3] Chattopadhyay, J., Nathani, D. K., Dutta, B. K., and Kushwaha, H. S., 2000,“Closed-Form Collapse Moment Equations of Elbows Under Combined Internal Pressure and In-Plane Bending Moment,” ASME J. Pressure Vessel Technol.,122(4), pp. 431–436.

[4] Yahiaoui, K., Moffat, D. G., and Moreton, D. N., 1996, “Response and CyclicStrain Accumulation of Pressurized Piping Elbows Under Dynamic In-Plane Bending,” J. Strain Anal. Eng. Des., 31(2), pp. 135–151.

[5] D.N. Moreton, K. Yahiaoui, D.G. Moffat, 1996. “Onset of ratchetting in pressurised piping elbows subjected to in-plane bending moments”, Int. J. Pressure Vessel & Piping, 68, 73–79.

[6] Takahashi, K., Tsunoi, S., Hara, T., Ueno, T., Mikami, A., Takada, H., Ando,K., and Shiratori, M., 2009, “Experimental Study of Low Cycle Fatigue of Pipe Elbows With Local Wall Thinning and Life Estimation Using Finite Element Analysis,” Int. J. Pressure Vessels Piping, 87(5), pp. 211–219.

[7] Hassan, T., Rahman, S. M., Bari S., 2015. “Low-Cycle Fatigue andRatcheting Responses of Elbow Piping Components", ASME J. Pressure Vessel Technol.

[8] G.E. Varelis, S.A. Karamanos, A.M. Gresnigt, 2013. “Pipe elbows under strong cyclic loading”, J. Press. Vessel Technol. 135, 11207–11209.

[9] Varelis, G. E., and Karamanos, S. A., 2015, “Low-Cycle Fatigue of Pressurized Steel Elbows Under In-Plane Bending,” ASME J. Pressure Vessel Technol., 137(1), p. 011401.

[10] C. Karvelas, G. Chatzopoulou, A.D. Zervaki, N. Stathas, E. Strepelias, X. Palios, S.N. Bousias, S.A. Karamanos, 2021. "Mechanical Response of an Industrial Piping System under Strong Cyclic Loading", ASME Pressure Vessel & Piping Conference.

[11] I. Skarakis, G. Chatzopoulou, S.A. Karamanos, N.G. Tsouvalis, A.E. Pournara, 2017. "CFRP Reinforcement and Repair of Steel Pipe Elbows Subjected to Severe Cyclic Loading" Journal of Pressure Vessel Technology 139 (5)

[12] ABAQUS 6.11 Theory Manual

[13] ABAQUS Analysis User's Manual (v.6.6)

[14] ASME Code for Factory- Made Wrought Buttweld Fittings- ASME B.16.9- 2007 (Revision of ASME B.16.9- 2003)

[15] ASME Code for Factory- Made Wrought Steel Buttweld Induction Bends for Transportation and Distribution Systems- ASME B.16.49- 2007 (Revision of ASME B.16.9- 2000)

[16] ASME Code for Pressure Piping, B31- ASME B.31.3- 2016 (Revision of ASME B.31.3- 2014)

[17] C.G. Salmon, J.E. Johnson, F.A. Malhas, "Steel Structures, Design and Behavior", 5th edition, Pearson Education. Inc., 2009, U.S.A

[18] Γ. Ι. Καραγιαννάκης, 2017, "Ανάλυση Τρωτότητας και Εκτίμηση Σεισμικού Κινδύνου με βάση τον «Επιτελεστικό Σχεδιασμό» σε ένα Τυπικό Σύστημα Αγωγών μίας Πετροχημικής Εγκατάστασης", Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών

[19] Κ. Αντωνίου, 2016, "Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων της Μηχανικής Συμπεριφοράς Καμπύλων Τμημάτων Σπονδυλωτού Τύπου σε Αγωγούς Υδατος υπό την Επίδραση Κάμψης και Πίεσης", Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας