

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΟΡΙΑΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΓΩΓΩΝ ΦΥΣΙΚΟΥ
ΑΕΡΙΟΥ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΚΑΙ ΚΑΜΨΗ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία

υπό
Χρυσάνθη Ι. Παπαδάκη



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2015

© 2015 Χρυσάνθη Παπαδάκη

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 Α. Καραμάνος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Χαϊδεμενόπουλος Γρηγόρης
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Αγόρας Μιχάλης
Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Σπύρο Καραμάνο, για την ανάθεση του θέματος, την πολύτιμη βοήθεια του, το ενδιαφέρον του, αλλά και το χρόνο που αφιέρωσε κατά τη διεκπεραίωση της διπλωματικής εργασίας. Η ακαδημαϊκή του αρτιότητα και η μεθοδικότητα του με προσέλκυσαν στην περιοχή της Μηχανικής των Κατασκευών και των πεπερασμένων στοιχείων.

Θα ήθελα, επίσης, να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον Καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο κ Νικόλαο Αράβα, για την συνεχή υποστήριξη τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Τα προπτυχιακά και μεταπτυχιακά μαθήματα τους στον τομέα των Υλικών και της Μηχανικής, ενίσχυσαν το γνωστικό μου υπόβαθρο ως Μηχανολόγο Μηχανικό.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα τρίτο μέλος της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Μιχάλη Αγόρα για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις του.

Εν όψη της αποφοίτησης μου από το τμήμα, οφείλω θερμές ευχαριστίες στους καθηγητές του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βασίλειο Μποντόζογλου, Άννα Ζερβάκη, Γεώργιο Κοζανίδη, Νικόλαο Ανδρίτσο, Νικόλαο Χασιώτη και Τάσο Σταμάτη, για τις ακαδημαϊκές γνώσεις που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την υποψήφια διδάκτωρ Γιαννούλα Χατζοπούλου για την πολύτιμη βοήθειά της στις προσομοιώσεις με το πρόγραμμα ABAQUS, καθώς επίσης και τον Γρηγόρη Σαρβάνη, την Αγλαΐα Πουρνάρα, τον Δανιήλ Βασιλίκης και τον Πολυνίκη Βαζούρας. Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Βαγγέλη Καραμούστο και τον κ. Νίκο Χολέβα για την τεχνική υποστήριξή τους στις ανάγκες του εργαστηρίου.

Θα ήθελα επίσης να αναφέρω και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους συμφοιτητές και φίλους μου, Κλέρη, Ελένη, Στεφανία, Στέλιο, Σταμάτη, Νίκο, Μήτσο και Αγαπητό, για την φιλία τους και την ηθική υποστήριξή τους. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Γιώργο, για την συμπαράσταση, την κατανόησή και την εμπύχωση του, κυρίως κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειάς μου.

Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Ιερώνυμο και Αθηνά, και τα αδέρφια μου Κατερίνα και Γιώργο για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΟΡΙΑΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΓΩΓΩΝ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΚΑΙ ΚΑΜΨΗ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Χρυσάνθη Ι. Παπαδάκη

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Επιβλέπων: Σπύρος Α. Καραμάνος, Καθηγητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η μελέτη της οριακής αντοχής χαλύβδινων αγωγών σε κάμψη υπό εσωτερική πίεση, μέσω της αριθμητικής προσομοίωσης τους. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, αναπτύχθηκαν μη γραμμικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, ικανά να περιγράψουν τις γεωμετρικές μη γραμμικότητες με ακριβή τρόπο. Με τη χρήση των μοντέλων αυτών, διεξήχθη μια εκτενής μελέτη για να διασαφηνιστεί η μηχανική συμπεριφορά και να εξετασθεί η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην απόκριση των σωλήνων.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση πειραμάτων που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, κι έγινε σύγκριση των αριθμητικών με τα πειραματικά αποτελέσματα. Έπειτα, αναπτύχθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο που για την προσομοίωση της κατεργασίας παραγωγής σωλήνων ελικοειδούς ραφής, ώστε να υπολογιστούν οι παραμένουσες τάσεις από την εν λόγω κατεργασία, οι οποίες αποτελούνται από τις παραμένουσες τάσεις που προκύπτουν από την αποσυμπείρωση του ελάσματος από το ρολό, καθώς και από την ψυχρή κάμψη του κατά την ελικοειδή ραφή. Τέλος, μελετήθηκε η καμπτική συμπεριφορά υπό εσωτερική πίεση αγωγών με διάμετρο 36 και 48 ιντσών. Επίσης, διερευνήθηκε η επιρροή των παραμενουσών τάσεων από την κατεργασία της ελικοειδούς ραφής στην οριακή αντοχή των αγωγών, ενώ εξετάστηκε η ευαισθησία τους σε αρχικές γεωμετρικές ατέλειες.

Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον ασφαλέστερο σχεδιασμό και λειτουργία αγωγών φυσικού αερίου.

Πίνακας Περιεχομένων

1.	Εισαγωγή	1
1.1.	Περιγραφή του προβλήματος.....	1
1.2.	Βιβλιογραφική επισκόπηση	3
1.3.	Στόχος της παρούσας εργασίας.....	3
2.	Περιγραφή της προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων	5
3.	Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα	9
3.1.	Περιγραφή των πειραμάτων Limam et al. (2010)	9
3.2.	Προσομοίωση των πειραμάτων και σύγκριση αριθμητικών – πειραματικών αποτελεσμάτων	11
4.	Προσομοίωση της κατεργασίας ελικοειδούς ραφής	31
4.1.	Περιγραφή της κατεργασίας ελικοειδούς ραφής.....	31
4.2.	Περιγραφή των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.....	32
4.3.	Υπολογισμός παραμενουσών τάσεων.....	35
5	Αριθμητικά αποτελέσματα σε σωλήνες μεγάλης διαμέτρου.....	56
5.1	Περιγραφή σωλήνων (48 και 36 ιντσών).....	56
5.2	Αποτελέσματα για εσωτερική πίεση και κάμψη	57
5.3	Επιρροή των παραμενουσών τάσεων στην καμπτική αντοχή.....	68
5.4	Σύγκριση με μεθοδολογίες σχεδιασμού	73
6	Συμπεράσματα.....	76
	Βιβλιογραφία	77

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Κάμψη αγωγού λόγω καθιζήσεων στο υπέδαφος [10].	1
Εικόνα 1.2: Κάμψη αγωγού καθώς περνά κάτω από ένα ποτάμι [10].	1
Εικόνα 1.3: Ακραία σενάρια καταπονήσεων σε εφαρμογές αγωγών λόγω εδαφικών μετατοπίσεων.	2
Εικόνα 1.4: Αστοχία αγωγού λόγω κινήσεων του εδάφους (τοπικός λυγισμός και ρωγμή σε αγωγό διαμέτρου 40" και συνέπειες της διάρρηξης αγωγού διαμέτρου 26", USA 2003)	2
Εικόνα 2.1: Αρχική κυματιστή γεωμετρική ατέλεια με τη μορφή της πρώτης μορφής λυγισμού σε κάμψη.	5
Εικόνα 2.2: Σημεία αναφοράς στις ακριανές διατομές του σωλήνα και κινηματικοί περιορισμοί (kinematic coupling).	6
Εικόνα 3.1: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για την κάμψη των δοκιμίων στα πειράματα [9].	9
Εικόνα 3.2: Σχηματική απεικόνιση του αυτόνομου συστήματος κλειστού βρόχου για την παρακολούθηση των υπό μελέτη μεγεθών στα πειράματα [9].	10
Εικόνα 3.3: Σχηματική απεικόνιση του αυτόνομου συστήματος κλειστού βρόχου με έλεγχο της πίεσης, που χρησιμοποιήθηκε για τη συμπίεση των σωλήνων στα πειράματα [9].	10
Εικόνα 3.4: Μέγιστη ροπή και κρίσιμη καμπυλότητα στο σημείο της κατάρρευσης.	13
Εικόνα 3.5: Μορφές αστοχίας πειραματικά [9] και αριθμητικά για πίεση (α) $P=0$, και (β) $P=0.403P_0$.	14
Εικόνα 3.6: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπής-καμπυλότητας για το δείγμα BIP9, για την πίεση $P=0.311P_0$ με πλάτος αρχικής ατέλειας $w_0=0.3\%t$.	14
Εικόνα 3.7: Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας για το δείγμα BIP9, για την πίεση $P=0.403P_0$ με πλάτος αρχικής ατέλειας $w_0=0.3\%t$.	15
Εικόνα 3.8: Περιοχή στο πλαίσιο στο διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας για το δείγμα BIP9, για την πίεση $P=0.403P_0$ με πλάτος αρχικής ατέλειας $w_0=0.3\%t$.	15
Εικόνα 3.9: Ανάπτυξη ρυτιδώσεων (wrinkling) με αύξηση της καμπυλότητας.	16
Εικόνα 3.10: (α) Συσσώρευση ρυτιδώσεων σε μία, (β) διόγκωση ρυτιδώσης (bulging) και αστοχία, (γ) μεταλυγισμική κατάσταση.	18
Εικόνα 3.11: Διαδοχικές φάσεις κατά την κάμψη του δοκιμίου BIP9, για την πίεση $P=0.403P_0$ με πλάτος αρχικής ατέλειας $w_0=0.3\%t$.	18
Εικόνα 3.12: Μορφές αστοχίας για πίεση (α) $P=0$, και (β) $P=0.138P_0$.	19
Εικόνα 3.13: Μορφές αστοχίας για σημαντική πίεση (α) $P=0.311$, και (β) $P=0.403P_0$.	19
Εικόνα 3.14: Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας για διάφορες πιέσεις για ατέλεια με πλάτος $w_0=0.3\%t$.	20
Εικόνα 3.15: Μεταβολή της κρίσιμης καμπυλότητας με την εσωτερική πίεση.	21
Εικόνα 3.16: Μεταβολή της μέγιστης ροπής με την εσωτερική πίεση.	21
Εικόνα 3.17: Κυματοειδής γεωμετρική ατέλεια (wrinkles) με πλάτος $w_0=0.003t$ και υπό κλίμακα μορφή αστοχίας του αγωγού για $P=0.311P_0$ με πλάτος $w_0=0.035t$.	22
Εικόνα 3.18: Αρχική γεωμετρική ατέλεια με τη μορφή της μορφής αστοχίας του αγωγού σε κάμψη υπό $P=0.311P_0$ με πλάτος $w_0=0.035t$.	22

Εικόνα 3.19: Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας για την ευαισθησία του μοντέλου στη νέα μορφή ατέλειας.....	23
Εικόνα 3.20: Αρχική γεωμετρική ατέλεια για διάφορες τιμές του πλάτους w_0	23
Εικόνα 3.21: Παραμετρική Ανάλυση για την ευαισθησία του αγωγού στο πλάτος της αρχικής ατέλειας.	24
Εικόνα 3.22: Κυματιστή γεωμετρική ατέλεια πτυχώσεων για διάφορες τιμές το πλάτος w_0	25
Εικόνα 3.23: Οριακές τιμές για την κρίσιμη καμπυλότητα που προκύπτουν από τα πρότυπα DNV OS-F101, CSA Z662 και πειραματικές τιμές.	28
Εικόνα 3.24: Οριακές τιμές για την κρίσιμη καμπυλότητα που προκύπτουν από τα πρότυπα DNV OS-F101, CSA Z662 και αριθμητικά αποτελέσματα.....	29
Εικόνα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση κατεργασίας ελικοειδούς ραφής. [10].	31
Εικόνα 4.2: (α) Γεωμετρία και συνοριακές του μοντέλου που προσομοιώνει την εκτύλιξη του ελάσματος, (β) Αρχική και παραμορφωμένη κατάσταση του ελάσματος.....	32
Εικόνα 4.3: Προώθηση του ελάσματος στο σύστημα τριών ελαστρων.	33
Εικόνα 4.4: Τελική ελικοειδής μορφή του ελάσματος μετά την κατεργασία.....	33
Εικόνα 4.5: Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αριθμητικού μοντέλου για την κατεργασία ελικοειδούς ραφής.	34
Εικόνα 4.6: Ολικό και τοπικό σύστημα συντεταγμένων σε στοιχεία κελύφους.	35
Εικόνα 4.7: Ολικό και τοπικό σύστημα συντεταγμένων στο μοντέλο για την εκτύλιξη του ελάσματος.....	36
Εικόνα 4.8: Ολικό και τοπικό σύστημα συντεταγμένων στο μοντέλο για την κατεργασία ελικοειδούς μορφής (α) αρχική κατάσταση, (β) παραμορφωμένη κατάσταση.	36
Εικόνα 4.9: Τοπικό σύστημα συντεταγμένων στο μοντέλο για την κάμψη του αγωγού υπό εσωτερική πίεση.	38
Εικόνα 4.10: Μετατροπή από το τοπικό στο ολικό σύστημα συντεταγμένων.....	38
Εικόνα 4.11: Η συνιστώσα S11 του τοπικού συστήματος συντεταγμένων του μοντέλου 1.....	39
Εικόνα 4.12: Η συνιστώσα S22 του τοπικού συστήματος συντεταγμένων του μοντέλου 1.....	39
Εικόνα 4.13: Γραμμή κάθετη και γραμμή παράλληλη στην έλικα πάνω στις οποίες μετρήθηκαν οι συνιστώσες της τάσης.	41
Εικόνα 4.14: : Κατανομή των τάσεων S11, S22 και S12 κατά μήκος μιας γραμμής κάθετη στην κατεύθυνση της έλικας (τοπικό σύστημα συντεταγμένων) , αμελώντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος.	42
Εικόνα 4.15: Κατανομή των τάσεων S11, S22 και S12 κατά μήκος μιας γραμμής παράλληλα στην κατεύθυνση της έλικας (τοπικό σύστημα συντεταγμένων) , αμελώντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος.	43
Εικόνα 4.16: Εξέλιξη των τάσεων κατά την κατεργασία της κατεργασία ελικοειδούς ραφής, αμελώντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος.	44
Εικόνα 4.17: Κατανομή των τάσεων S11, S22 και S12 κατά μήκος μιας γραμμής κάθετα στην κατεύθυνση της έλικας (τοπικό σύστημα συντεταγμένων) , συνυπολογίζοντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος. .	46

Εικόνα 4.18: Απεικόνιση του πλέγματος στην παραμορφωμένη κατάσταση και της κατανομής των τάσεων S11, S22 και S12 κατά μήκος μιας γραμμής κάθετα στην κατεύθυνση της έλικας (τοπικό σύστημα συντεταγμένων) , συνυπολογίζοντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος.....	47
Εικόνα 4.19: Απεικόνιση του πλέγματος στην παραμορφωμένη κατάσταση και της κατανομής των τάσεων S11, S22 , S12 και S Mises.	48
Εικόνα 4.20 : Κατανομή των τάσεων S11, S22 και S12 κατά μήκος μιας γραμμής παράλληλα στην κατεύθυνση της έλικας (τοπικό σύστημα συντεταγμένων) , συνυπολογίζοντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος. .	49
Εικόνα 4.21: Εξέλιξη των τάσεων κατά την κατεργασία της κατεργασία ελικοειδούς ραφής, συνυπολογίζοντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος.....	50
Εικόνα 4.22: Σύγκριση στην εξέλιξη των τάσεων κατά την κατεργασία της ελικοειδούς ραφής, συνυπολογίζοντας και αμελώντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος.....	52
Εικόνα 4.23: Σύγκριση της εξέλιξης των τάσεων κατά την κατεργασία της ελικοειδούς ραφής (συνυπολογίζοντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος) για δύο διαφορετικές γωνίες κάμψης.	55
Εικόνα 5.1: Διαδοχικές φάσεις κατά την κάμψη του αγωγού διαμέτρου 36 ιντσών, για την πίεση $P=0.5P_y$ με πλάτος αρχικής ατέλειας $w_0=5\%t$	57
Εικόνα 5.2: Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας, για τον αγωγό διαμέτρου 36" για αρχική ατέλεια με πλάτος $w_0=5\%t$ για διάφορες τιμές τις πίεσης.	58
Εικόνα 5.3: Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας, για τον αγωγό διαμέτρου 48" για αρχική ατέλεια με πλάτος $w_0=5\%t$ για διάφορες τιμές τις πίεσης.	58
Εικόνα 5.4: Μεταβολή της κρίσιμης καμπυλότητας με την εσωτερική πίεση για τους υπό εξέταση αγωγούς.....	59
Εικόνα 5.5: Μεταβολή της μέγιστης ροπής κάμψης με την εσωτερική πίεση για τους υπό εξέταση αγωγούς.....	59
Εικόνα 5.6: Επίδραση εσωτερικής πίεσης στο πλάτος της ατέλειας πριν την επιβολή της κάμψης.....	60
Εικόνα 5.7: Παραμετρική μελέτη για την ευαισθησία του αγωγού στο πλάτος της ατέλειας ($P=0$).....	61
Εικόνα 5.8: Επίδραση του πλάτους της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας στην κρίσιμη καμπυλότητα κατά την αστοχία για $OD=36"$	61
Εικόνα 5.9: Επίδραση του πλάτους της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας στην μέγιστη ροπή κάμψης κατά την αστοχία για $OD=36"$	62
Εικόνα 5.10: Παραμετρική μελέτη για την ευαισθησία του αγωγού 48" στο πλάτος της ατέλειας ($P=0$).....	62
Εικόνα 5.11: Επίδραση του πλάτους της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας στην κρίσιμη καμπυλότητα κατά την αστοχία για $OD=48"$	63
Εικόνα 5.12: Επίδραση του πλάτους της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας στην μέγιστη ροπή κάμψης κατά την αστοχία για $OD=48"$	63
Εικόνα 5.13: Μορφή της κυματιστής γεωμετρικής ατέλειας που εισάγεται στον αρχικά τέλειο αγωγό με διάμετρο $OD=36"$ και $t=17.1mm$, για διάφορες τιμές για το πλάτος ατέλειας w_0	64

Εικόνα 5.14: Μορφή αστοχίας του αγωγού διαμέτρου 36", όταν κάμπτεται υπό διάφορες τιμές για την εσωτερική πίεση.	65
Εικόνα 5.15: Μορφή αστοχίας του αγωγού με διάμετρο 36" για διάφορες τιμές της εσωτερικής πίεσης.	65
Εικόνα 5.16: Μορφή αστοχίας για ένα αγωγό με διάμετρο 36" με πλάτος αρχικής γεωμετρικής ατέλειας ίσο με $w_0=6\%t$, όταν αυτός κάμπτεται υπό εσωτερική πίεση $P=0.75P_y$	66
Εικόνα 5.17: Διάγραμμα ροπής καμπυλότητας για ένα αγωγό με διάμετρο 36" με πλάτος αρχικής γεωμετρικής ατέλειας ίσο με $w_0=6\%t$, όταν αυτός κάμπτεται υπό εσωτερική πίεση $P=0.75P_y$	66
Εικόνα 5.18: Μορφή αστοχίας για ένα αγωγό με διάμετρο 48" με πλάτος αρχικής γεωμετρικής ατέλειας ίσο με $w_0=0.05t$, όταν αυτός κάμπτεται υπό εσωτερική πίεση $P=0.65P_y$	67
Εικόνα 5.19: Διάγραμμα ροπής καμπυλότητας για ένα αγωγό με διάμετρο 36" με πλάτος αρχικής γεωμετρικής ατέλειας ίσο με $w_0=12\%t$, όταν αυτός κάμπτεται υπό εσωτερική πίεση $P=0.85P_y$	67
Εικόνα 5.20: Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν.	68
Εικόνα 5.21: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις, για διάφορες τιμές της εσωτερικής πίεσης, για τον αγωγό διαμέτρου 36".	69
Εικόνα 5.22: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις, για διάφορες τιμές της εσωτερικής πίεσης, για τον αγωγό διαμέτρου 48".	70
Εικόνα 5.23: Μεταβολή της κρίσιμης καμπυλότητας σε σχέση με την εσωτερική πίεση στις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις, για τον αγωγό διαμέτρου 36".	71
Εικόνα 5.24: Μεταβολή της κρίσιμης καμπυλότητας σε σχέση με την εσωτερική πίεση στις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις, για τον αγωγό διαμέτρου 48".	71
Εικόνα 5.25: Μεταβολή της μέγιστης ροπής κάμψης σε σχέση με την εσωτερική πίεση στις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις, για τον αγωγό διαμέτρου 36".	72
Εικόνα 5.26: Μεταβολή της μέγιστης ροπής κάμψης σε σχέση με την εσωτερική πίεση στις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις, για τον αγωγό διαμέτρου 48".	72
Εικόνα 5.27: Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις για τον αγωγό με διάμετρο 36" με τα πρότυπα DNV και CSA.	74
Εικόνα 5.28: Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις για τον αγωγό με διάμετρο 48" με τα πρότυπα DNV και CSA.	75

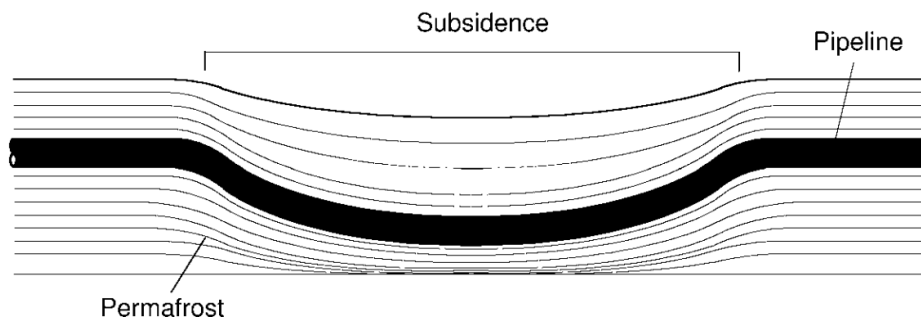
Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και μηχανικές ιδιότητες των αγωγών που προσομοιώθηκαν.....	7
Πίνακας 3.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δείγματος BIP9.	11
Πίνακας 3.2: Μηχανικές ιδιότητες του ανοξείδωτου χάλυβα SS321 για το δείγμα BIP9.	11
Πίνακας 3.3: Σύνοψη πειραματικών-αριθμητικών αποτελεσμάτων για τη μέγιστη ροπή και την κρίσιμη καμπυλότητα στο σημείο της κατάρρευσης.....	12
Πίνακας 5.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αγωγών μεγάλης διαμέτρου	56
Πίνακας 5.2: Μηχανικές ιδιότητες του ανοξείδωτου χάλυβα βαθμού X70.....	56
Πίνακας 5.3: Σύνοψη αριθμητικών αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις.....	73

1. Εισαγωγή

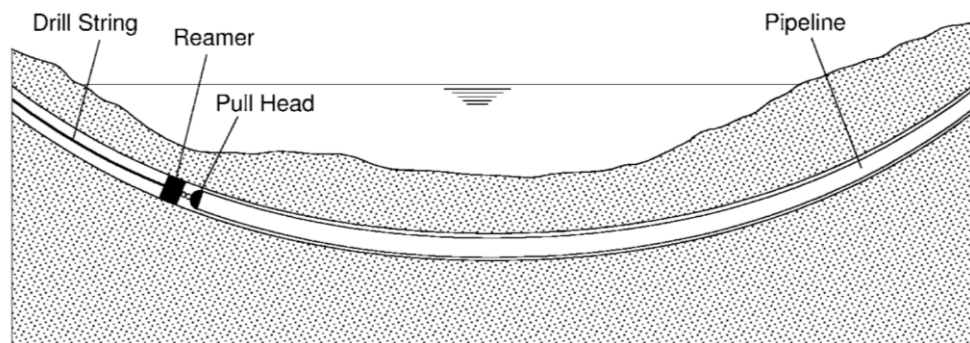
1.1. Περιγραφή του προβλήματος

Οι αγωγοί αποτελούν ένα εξαιρετικά σημαντικό και ασφαλές μέσο για τη μεταφορά φυσικού αερίου, πετρελαίου, νερού και άλλων ρευστών προϊόντων σε ξηρά και θάλασσα. Για τους χερσαίους αγωγούς το κύριο φορτίο για το σχεδιασμό είναι συνήθως η εσωτερική πίεση, ενώ οι υπεράκτιοι αγωγοί πρέπει επίσης να αντιστέκονται στην εξωτερική πίεση, ειδικά κατά τη διάρκεια της εγκατάστασής τους, αλλά και σε διακοπές της λειτουργίας τους για συντήρηση. Ωστόσο, ανάλογα με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των περιοχών που διασχίζουν, οι αγωγοί σε ορισμένες περιπτώσεις υποβάλλονται σε ιδιαίτερα απαιτητικά σενάρια φόρτισης, που προκαλούνται από φαινόμενα όπως κατολισθήσεις, καθιζήσεις ή ρευστοποιήσεις εδάφους. Σε σεισμογενείς περιοχές, οι μετακινήσεις του εδάφους μπορεί, επίσης, να προκαλέσουν κάμψη του αγωγού σε συνδυασμό με θλίψη ή εφελκυσμό. Σε αρκτικές περιοχές, αναπτύσσονται αντίστοιχα φαινόμενα λόγω καθιζήσεων στο παγωμένο υπέδαφος, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.1.



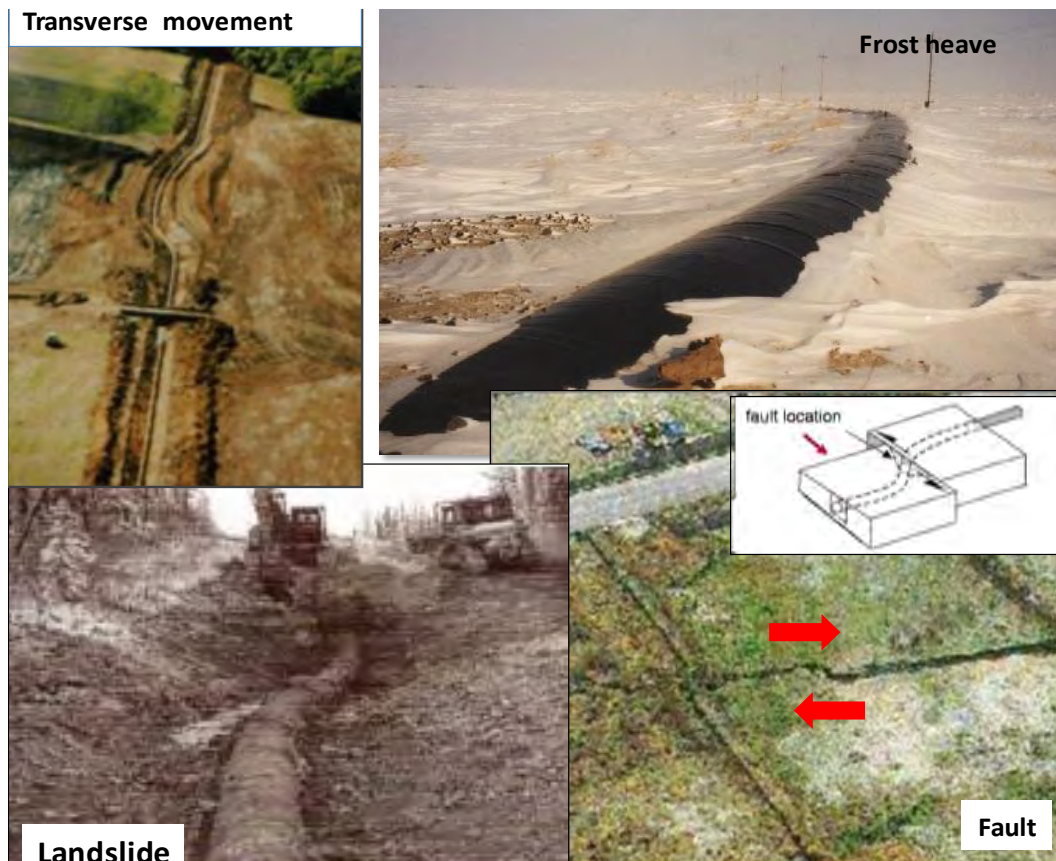
Εικόνα 1.1: Κάμψη αγωγού λόγω καθιζήσεων στο υπέδαφος [10].

Εκτός από υποχωρήσεις του εδάφους που προκύπτουν από σεισμικές δραστηριότητες, σε ακραίες περιπτώσεις, η μέθοδος της οριζόντιας διάτρησης μπορεί επίσης να προκαλέσει την κάμψη των χερσαίων αγωγών. Η εικόνα 1.2 απεικονίζει έναν αγωγό που περνά κάτω από ένα ποτάμι. Ο αγωγός έχει σημαντική καμπυλότητα, και σε ορισμένες περιπτώσεις κάμπτεται σε ανελαστικές παραμορφώσεις.



Εικόνα 1.2: Κάμψη αγωγού καθώς περνά κάτω από ένα ποτάμι [10].

Η εικόνα 1.3 απεικονίζει ακραία σενάρια καταπονήσεων που έχουν παρατηρηθεί σε πραγματικές εφαρμογές αγωγών και η εικόνα 1.4 αστοχίες που οφείλονται σε τέτοιες ακραίες καταπονήσεις. Προφανώς, είναι αδύνατο να αποκλειστεί εκ των προτέρων ότι αντίστοιχα σενάρια φόρτισης, όπως αυτά που παρουσιάστηκαν παραπάνω, δεν θα λάβουν χώρα καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας ενός αγωγού και μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές αστοχίες. Επομένως, κρίνεται επιτακτικός ο προσεκτικός σχεδιασμός τους, έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι μπορούν να λειτουργήσουν με ασφάλεια σε εύλογα επίπεδα τέτοιων συνδυασμένων καταπονήσεων.



Εικόνα 1.3: Ακραία σενάρια καταπονήσεων σε εφαρμογές αγωγών λόγω εδαφικών μετατοπίσεων.



Εικόνα 1.4: Αστοχία αγωγού λόγω κινήσεων του εδάφους (τοπικός λυγισμός και ρωγμή σε αγωγό διαμέτρου 40" και συνέπειες της διάρρηξης αγωγού διαμέτρου 26", USA 2003)

1.2. Σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση

Η μελέτη της καμπτικής συμπεριφοράς ενός σωλήνα υπό κάμψη και εσωτερική πίεση ξεκίνησε από την ανάγκη και απαίτηση για δομική ασφάλεια σε κύριους αγωγούς όπως ο Trans Alaska Pipeline System. Η ικανότητα κάμψης και αξονικής καταπόνησης των αγωγών με συνδυασμένες φορτίσεις, όπως αξονική θλίψη, κάμψη και η εσωτερική πίεση, διερευνήθηκε πειραματικά από τους Dorey et al. [1] και άλλους. Η πλειονότητα των δοκιμών αφορούσε την εσωτερική συμπίεση ενός τμήματος ενός σωλήνα μεγάλης διαμέτρου και έπειτα τη θλίψη του μέχρι την αστοχία, είτε φορτίζοντας κατά μήκος του άξονα του σωλήνα είτε έκκεντρα εισάγοντας έτσι επιπρόσθετη κάμψη. Επίσης, δοκιμές πλήρους κλίμακας με θλίψη και εσωτερική πίεση πραγματοποιήθηκαν από τον Suzuki et al. [2], οι οποίες προσομοιώθηκαν αριθμητικά.

Η κάμψη λεπτών ελαστικών κυκλικών κυλίνδρων είναι σημαντική σε αεροδιαστημικές εφαρμογές και, κατά συνέπεια, έχει διερευνηθεί στο παρελθόν [3-6]. Πιο πρόσφατα, οι Mathon και Limam [7] δημοσίευσαν αποτελέσματα από μια σειρά πειραμάτων σε κυλινδρικά κελύφη με λεπτά τοιχώματα ($550 \leq R/t \leq 1,450$), τα οποία τέθηκαν σε κάμψη υπό διάφορα επίπεδα εσωτερικής πίεσης. Παρόλο που η δομή παραμένει ευαίσθητη σε ατέλειες, κατέδειξαν ότι η εσωτερική πίεση τείνει να σταθεροποιηθεί τη δομή, ωθώντας το λυγισμό στην πλαστική περιοχή του υλικού. Η καθαρή κάμψη μεγάλων κυλίνδρων είναι πιο απαιτητική πειραματικά και ως εκ τούτου τα αποτελέσματα για κάμψη υπό εσωτερική πίεση σε μεγάλους σωλήνες είναι περιορισμένα. Ο Suzuki et al., [8] δημοσίευσε μία δοκιμή πλήρους κλίμακας σε ένα σωλήνα 30 ιντσών ($D/t=49$), ο οποίος κάμφθηκε μέχρι την αστοχία υπό πίεση $0.53 P_0$, μαζί με μία επιτυχή προσομοίωση χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Ο σωλήνας έφτασε σε μια σημαντική καμπυλότητα πριν από την έναρξη της κατάρρευσης, η οποία ήταν με τη μορφή μίας τοπικής προς τα έξω διόγκωσης.

Τέλος, οι Limam et al [9]., πραγματοποίησε μία σειρά πειραμάτων σε σωλήνες μικρής κλίμακας ($D/t \approx 52$) για κάμψη υπό διάφορα επίπεδα εσωτερικής πίεσης, καθώς επίσης και την πειραματική προσομοίωσή τους.

1.3. Στόχος της παρούσας εργασίας

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην μελέτη της οριακής αντοχής σωλήνων από χάλυβα σε κάμψη υπό εσωτερική πίεση, μέσω της αριθμητικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς χαλύβδινων σωλήνων. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται μη γραμμικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, ικανά να περιγράψουν τις γεωμετρικές μη γραμμικότητες με ακριβή τρόπο. Με τη χρήση των μοντέλων αυτών, διεξάγεται μια εκτενής μελέτη για να διασαφηνιστεί η μηχανική συμπεριφορά και να εξετασθεί η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην απόκριση των σωλήνων.

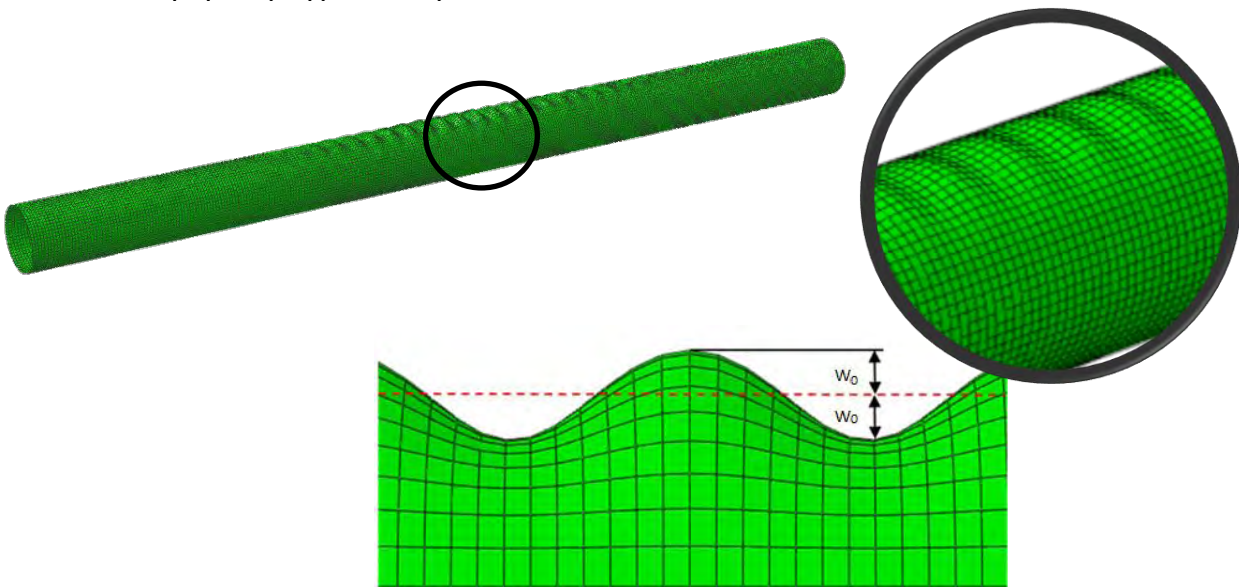
Αναλυτικά, η εργασία διαρθρώνεται ως εξής. Στο κεφάλαιο 2, παρουσιάζεται μία λεπτομερής περιγραφή των αριθμητικών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκαν για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των μεταλλικών αγωγών κατά την κάμψη τους υπό εσωτερική πίεση. Στο τρίτο κεφάλαιο, αφού γίνει εκτενής περιγραφή των πειραμάτων Limam et al. [9], γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση των πειραμάτων. Στο κεφάλαιο 4, περιγράφεται η κατεργασία παραγωγής σωλήνων ελικοειδούς ραφής και το αριθμητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της. Έπειτα, παρεμβάλλεται ο υπολογισμός των οι παραμενουσών τάσεων από την εν λόγω κατεργασία, οι οποίες αποτελούνται από τις παραμένουσες τάσεις που προκύπτουν από την αποσυσπείρωση του ελάσματος από το ρολό, καθώς και από την ψυχρή κάμψη του ελάσματος κατά την ελικοειδή ραφή. Στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για την καμπτική συμπεριφορά υπό εσωτερική πίεση για αγωγούς με διάμετρο 36 και 48 ιντσών. Επίσης, διερευνάται η επιρροή των παραμενουσών τάσεων από την κατεργασία της ελικοειδούς ραφής στην οριακή αντοχή των αγωγών, ενώ μελετάται η ευαισθησία τους σε αρχικές γεωμετρικές ατέλειες. Τέλος, στο κεφάλαιο 6, συνοψίζονται ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα.

2. Περιγραφή της προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων

Για την προσομοίωση της καμπτικής συμπεριφοράς μεταλλικών αγωγών υπό εσωτερική πίεση, αναπτύχθηκαν μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα ABAQUS. Με τα μοντέλα αυτά, εκτός από την μηχανική συμπεριφορά τους, διερευνήθηκε η ευαισθησία των αγωγών σε γεωμετρικές παραμέτρους με μία σειρά από παραμετρικές μελέτες. Επίσης, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, με το οποίο υπολογίζονται οι παραμένουσες τάσεις που προκύπτουν από την κατεργασία ελικοειδούς ραφής, στην οποία συνυπολογίζονται οι παραμένουσες τάσεις που προκύπτουν από την εκτύλιξη του αγωγού από το ρολό, (βλ. κεφ. 4) και μελετάται η επίδραση τους στην καμπτική συμπεριφορά του αγωγού (βλ. κεφ. 5).

Για την προσομοίωση των σωλήνων χρησιμοποιείται ένα ορθογωνικό πλέγμα τετρακομβικών στοιχείων κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης, με 5 σημεία ολοκλήρωσης κατά το πάχος. Ένα σχετικά πυκνό πλέγμα των στοιχείων κελύφους χρησιμοποιείται, έτσι ώστε να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια.

Ο σωλήνας θεωρείται αρχικά ατελής, με μια κυματιστή γεωμετρική ατέλεια (wrinkles) όπως φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν. Η ατέλεια αυτή έχει υπό κλίμακα τη μορφή της πρώτης μορφής λυγισμού, που λαμβάνεται μέσω μίας ανάλυσης ιδιοτιμών του υπό εξέταση σωλήνα. Στην ανάλυση ιδιοτιμών, που εκτελέστηκε επίσης σε περιβάλλον ABAQUS, οι σωλήνες υποβλήθηκαν σε καθαρή κάμψη. Στην εικόνα παρουσιάζεται μία χαρακτηριστική μορφή της κυματιστής γεωμετρικής ατέλειας του σωλήνα. Το μέγιστο βάθος των ρυτίδων συμβολίζεται ως $\delta=2w_0$, με w_0 να είναι το πλάτος της ατέλειας, δηλαδή η μέγιστη απόκλιση της πτυχωτής επιφάνειας του κελύφους από τον τέλειο κύλινδρο. Στις επόμενες ενότητες, παρουσιάζεται μία παραμετρική μελέτη που συνοψίζει την ευαισθησία του σωλήνα στο μέγεθος της ατέλειας.

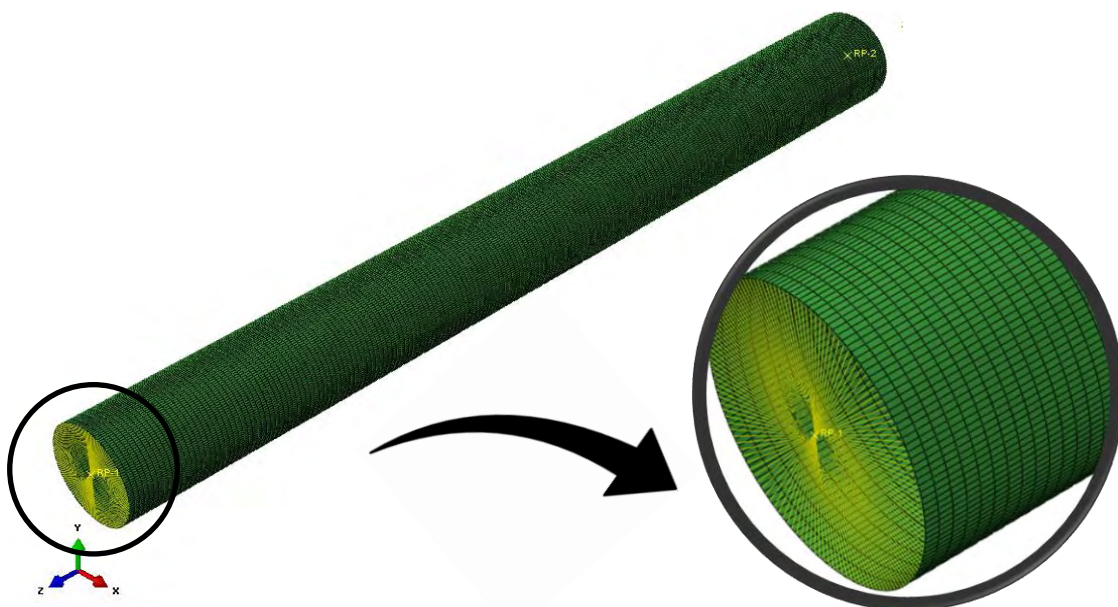


Εικόνα 2.1: Αρχική κυματιστή γεωμετρική ατέλεια με τη μορφή της πρώτης μορφής λυγισμού σε κάμψη.

Αφού σχεδιαστεί η γεωμετρία και εισαχθεί η αρχική γεωμετρική ατέλεια, ορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, η ανελαστική συμπεριφορά του υλικού θεωρείται μέσω ενός μοντέλου πλαστικότητας Von Mises με ιστροπική κράτυνση. Όταν το μοντέλο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των πειραμάτων των Limam et. al., το υλικό που χρησιμοποιείται είναι ανοξείδωτος χάλυβας SS321. Στις αναλύσεις που προσομοιώνουν τη μηχανική συμπεριφορά αγωγών μεγάλης διαμέτρου, το υλικό είναι χάλυβας X70. Ο πίνακας 2.1 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των αγωγών που μελετήθηκαν .

Η συνολική φόρτιση του αγωγού γίνεται σε δύο διαδοχικά βήματα. Στο πρώτο βήμα, επιβάλλεται η εσωτερική πίεση στην κυλινδρική επιφάνεια, καθώς και οι δυνάμεις που αντιστοιχούν στη φόρτιση στα άκρα. Αφότου φτάσει η εσωτερική πίεση στην τιμή, επιβάλλεται στροφή στα άκρα, για να επιτευχθεί η κάμψη του αγωγού. Για την επιβολή της κάμψης, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Riks, έτσι ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του αγωγού και να χαραχθεί ο δρόμος ισορροπίας του πριν και μετά την αστοχία (μεταλυσιμική συμπεριφορά).

Το κέλυφος συμπιέζεται εσωτερικά από μία κατανεμημένη δύναμη στην κυλινδρική επιφάνεια. Δεδομένου ότι τα άκρα υποτίθεται ότι είναι κλειστά, μια συγκεντρωμένη δύναμη εφαρμόζεται στους κόμβους που αντιστοιχούν στις ακραίες διατομές του αγωγού, προσομοιώνοντας τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στα άκρα. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας δύο κόμβους αναφοράς, έναν σε κάθε άκρο, σε κάθε ένα από τους οποίους επιβάλλονται συγκεντρωμένες δυνάμεις ίσες με το $CF=P*A$, όπου P είναι το μέγεθος της εσωτερικής πίεσης και A το εμβαδόν της διατομής. Με την επιβολή των κατάλληλων κινηματικών περιορισμών (kinematic coupling), όπως γίνεται αντιληπτό από την εικόνα 2.2, οι κόμβοι που αντιστοιχούν στις ακραίες διατομές του αγωγού δεσμεύονται με κόμβους αναφοράς και δέχονται το ίδιο φορτίο και τις ίδιες μετατοπίσεις.



Εικόνα 2.2: Σημεία αναφοράς στις ακριανές διατομές του σωλήνα και κινηματικοί περιορισμοί (kinematic coupling).

Η κάμψη του αγωγού επιτυγχάνεται επιβάλλοντας την επιθυμητή γωνία περιστροφής θ , στους κόμβους αναφοράς στα δύο άκρα του αγωγού. Έτσι, οι ακραίες διατομές παραμένουν επίπεδες και οι κόμβοι που αντιστοιχούν σε αυτές αναγκάζονται να ακολουθήσουν την περιστροφή του κόμβου αναφοράς. Η περιστροφή πραγματοποιείται σταδιακά και η ροπή λαμβάνεται από την αντίδραση του κόμβου αναφοράς. Η μέση καμπυλότητα κάμψης του αγωγού είναι $\kappa=2\theta/L$.

Τέλος, επιβάλλονται οι συνοριακές συνθήκες μέσω των κόμβων αναφοράς. Συγκεκριμένα, δεσμεύονται οι περιστροφές και οι μετακινήσεις των κόμβων αυτών, έτσι ώστε το ένα άκρο να αντιστοιχεί σε άρθρωση και το άλλο άκρο να αντιστοιχεί σε κύλιση.

Πίνακας 2.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και μηχανικές ιδιότητες των αγωγών που προσομοιώθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

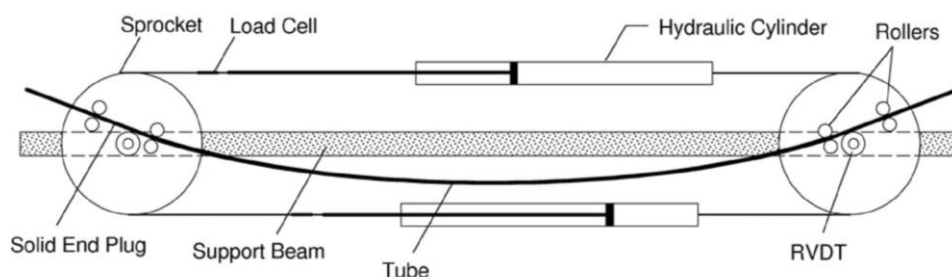
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά			Μηχανικές Ιδιότητες Υλικού			
Do in (mm)	t mm	Do/t	Υλικό	E MPa	σ_y MPa	σ_{uts} MPa
1.50 (38.15)	0.734	51.98	SS321	185000	221	586
36 (914.4)	17.1	53.5	X70	205000	482	565
48 (1219.2)	19.3	63.2	X70	205000	482	565

3. Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

3.1. Περιγραφή των πειραμάτων Limam et al. (2010)

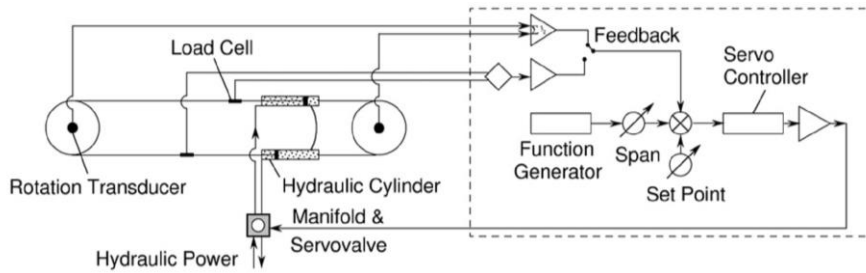
Πειραματική διαδικασία

Τα πειράματα που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν σωλήνες από ανοξείδωτο χάλυβα SS321 με λόγο διαμέτρου προς πάχος D/t περίπου 52. Στα δοκίμια αυτά πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάμψης στην εγκατάσταση που παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 3.1. Η μηχανή κάμψης αποτελείται από δύο γρανάζια τοποθετημένα σε δύο δύσκαμπτους δοκούς στήριξης. Γύρω από τα γρανάζια, διατρέχουν βαριές αλυσίδες που συνδέονται με δύο ενεργοποιητές και με δύο σε σειρά συνδεδεμένα μετρητικά κύτταρα φορτίου, ώστε να σχηματίσουν ένα κλειστό βρόχο. Κάθε δοκίμιο συγκολλήθηκε με ράβδους επέκτασης από ανοξείδωτο χάλυβα, κι έπειτα τοποθετήθηκε στο μηχάνημα κάμψης. Οι ράβδοι επέκτασης στα άκρα των δοκιμίων συγκρατούνται από λεία ελαστρά που βρίσκονται εγκατεστημένα σε κάθε σύστημα γραναζιών, όπως φαίνεται στην εικόνα. Η μηχανή ενεργοποιείται από την συστολή ενός από τους ενεργοποιητές και την παράλληλη επέκταση του άλλου, προκαλώντας έτσι περιστροφή των γραναζιών. Η διάταξη των ελαστρών επιτρέπει την απαραίτητη κάμψη τεσσάρων σημείων (four-point bending) του σωλήνα, καθώς και την απαιτούμενη μετατόπιση των ράβδων.



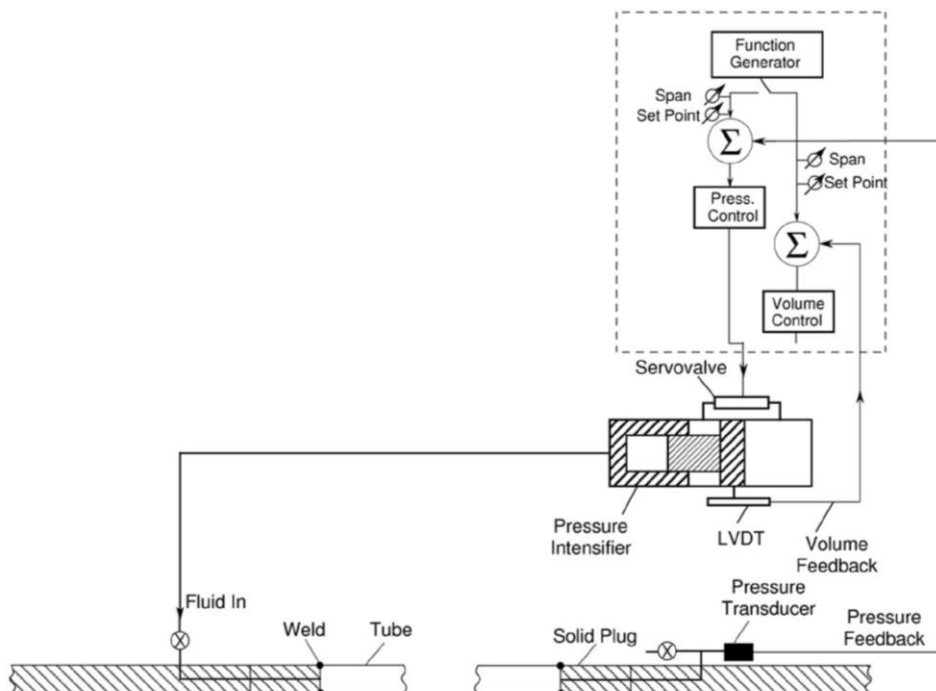
Εικόνα 3.1: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για την κάμψη των δοκιμίων στα πειράματα [9].

Η εφαρμοζόμενη ροπή (M) καταγράφηκε από μετρητικά κύτταρα φορτίου, ενώ κατάλληλα όργανα (RVDTs) κατέγραψαν την περιστροφή των γραναζιών (εικόνα 3.2). Για την παρακολούθηση της μεταβολής της διαμέτρου του σωλήνα στο επίπεδο της κάμψης χρησιμοποιήθηκε ένα ελαφρύ εργαλείο, τοποθετημένο στο μέσο κάθε δοκιμίου. Η καμπυλότητα (κ) του σωλήνα είναι ανάλογη του αθροίσματος των γωνιών περιστροφής των γραναζιών. Ο σταθερός ρυθμός περιστροφής που χρησιμοποιείται, αντιστοιχεί σε μέγιστο ρυθμό παραμόρφωσης του σωλήνα λόγω κάμψης της τάξεως του 10^{-4} s^{-1} . Πριν από κάθε δοκιμή είχε προηγηθεί μία σειρά μετρήσεων της διαμέτρου, του πάχους τοιχώματος και του μήκους. Οι ίδιες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση του αρχικού ωοειδούς σχήματος (Δ_0) στο σωλήνα και για την αρχική εκκεντρικότητα του τοιχώματος (Ξ_0). Τα μήκη των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν, κυμαίνονταν μεταξύ $17D$ για χαμηλές και $11D$ για υψηλές πιέσεις.



Εικόνα 3.2: Σχηματική απεικόνιση του αυτόνομου συστήματος κλειστού βρόχου για την παρακολούθηση των υπό μελέτη μεγεθών στα πειράματα [9].

Τα δοκίμια πληρώθηκαν με υδραυλικό λάδι και συμπιέστηκαν, χρησιμοποιώντας ένα αυτόνομο σύστημα κλειστού βρόχου με έλεγχο της πίεσης, όπως φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 3.3. Η αντλία λειτουργεί με υδραυλική ισχύ ίση με 3000 psi (207 bar), ενώ μπορεί να φτάσει τα 10.000 psi (690 bar). Τα εν λόγω πειράματα πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο της πίεσης, η οποία παρακολουθείται με ένα βαθμονομημένο μετρητή πίεσης, που συνδέεται με ένα από τα στερεά βύσματα στο τέλος του δείγματος. Κάθε δείγμα πρώτα συμπιέστηκε στο επιθυμητό επίπεδο, κι έπειτα επιβλήθηκε κάμψη σταδιακά μέχρι να αστοχήσει, ενώ η πίεση κρατήθηκε σταθερή.



Εικόνα 3.3: Σχηματική απεικόνιση του αυτόνομου συστήματος κλειστού βρόχου με έλεγχο της πίεσης, που χρησιμοποιήθηκε για τη συμπίεση των σωλήνων στα πειράματα [9].

3.2. Προσομοίωση των πειραμάτων και σύγκριση αριθμητικών – πειραματικών αποτελεσμάτων

Το αριθμητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε και περιγράφηκε εκτενώς στην προηγούμενη ενότητα, χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των εργαστηριακών πειραμάτων που περιγράφηκαν προηγουμένως. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η οριακή αντοχή σωλήνων από ανοξείδωτο χάλυβα SS321, όταν υφίστανται κάμψη με εσωτερική πίεση.

Για την εκτέλεση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια ίδιου υλικού SS321 με $D/t=52$. Για την προσομοίωση επιλέγεται το δοκίμιο BIP9, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οποίου συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δείγματος BIP9.

Δείγμα	D in (mm)	t in (mm)	D/t
BIP9	1.5021 (38.15)	0.0289 (0.734)	51.98

Στο αριθμητικό μοντέλο, που όπως αναφέρθηκε αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα ABAQUS, οι σωλήνες μοντελοποιούνται με τετρακομβικά στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης (S4R) με 5 σημεία ολοκλήρωσης κατά το πάχος. Στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, η ανελαστική συμπεριφορά του υλικού θεωρείται μέσω ενός μοντέλου πλαστικότητας Von Mises με ιστροπική σκλήρυνση. Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού του δοκιμίου συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 3.2: Μηχανικές ιδιότητες του ανοξείδωτου χάλυβα SS321 για το δείγμα BIP9.

Δείγμα	E (MPa)	σ_0 (MPa)	σ_y (MPa)	n	et (%)
BIP9	185000	254.3	221	9	2.27

Στην παρούσα ενότητα, συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και παρουσιάζεται η σύγκριση των πειραματικών με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Έπειτα, τα αποτελέσματα αντιπαραβάλλονται με τις επιτρεπτές τιμές για την μέγιστη καμπυλότητα και την οριακή ροπή, που προκύπτουν από τις διατάξεις του κώδικα και DNV-OS-F101 και από την εμπειρική εξίσωση αντοχής που προτάθηκε από τον Gresnigt. Επίσης, μελετάται μέσω μίας παραμετρικής μελέτης η ευαισθησία του υπό εξέταση αγωγού στην αρχική γεωμετρική ατέλεια.

Σύγκριση πειραματικών-αριθμητικών αποτελεσμάτων

Στον πίνακα 3.3 και το διάγραμμα 3.4 που ακολουθούν, συνοψίζονται οι τιμές της μέγιστης ροπής και της κρίσιμης καμπυλότητας στο σημείο της κατάρρευσης. Συγκεκριμένα, η πρώτη στήλη αναφέρεται στα πειραματικά, ενώ η άλλες δύο στα αριθμητικά αποτελέσματα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η καμπυλότητα στο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζεται ως το άθροισμα των περιστροφών των κόμβων αναφοράς στα άκρα, διαιρεμένο κατά το μήκος του δοκιμίου, που εν προκειμένω ισούται με $17D_0$. Οι τιμές της ροπής, της καμπυλότητας και της πίεσης κανονικοποιούνται διαιρώντας με τις εξής χαρακτηριστικές τιμές:

$$M_0 = \sigma_0 D_0^2 t \text{ με } D_0 = D - t \quad (3.1)$$

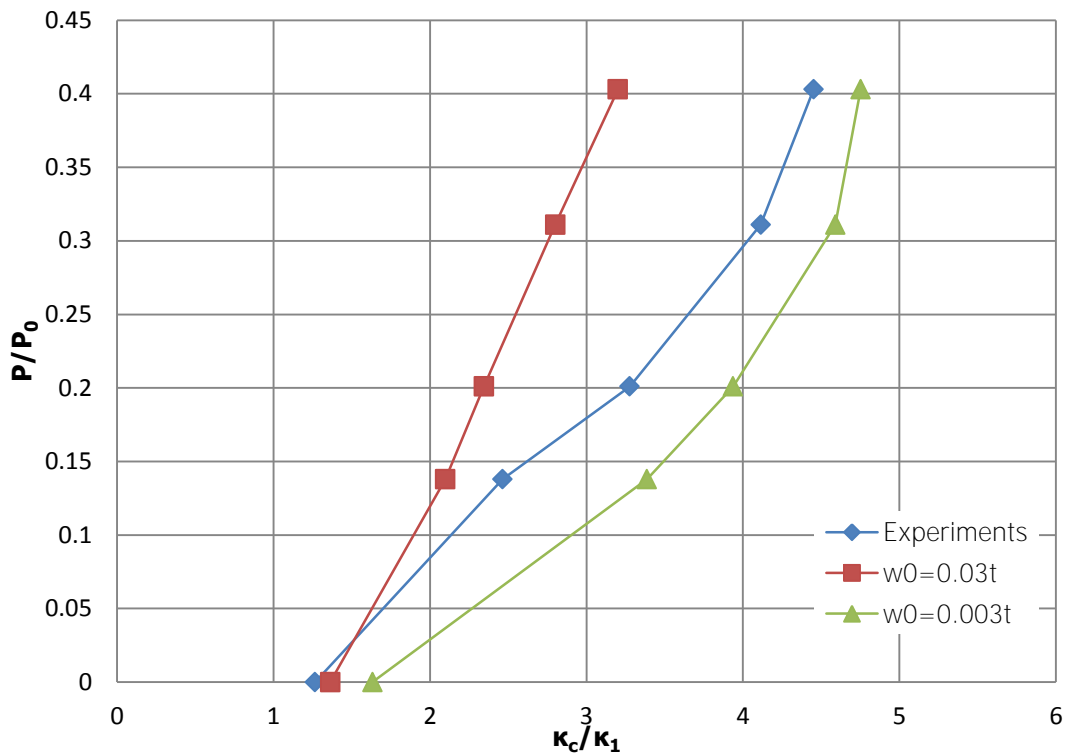
$$\kappa_1 = t/D_0^2 \quad (3.2)$$

$$P_0 = 2\sigma_0 t/D_0 \quad (3.3)$$

Στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκαν αρχικές ατέλειες με πλάτος $w_0/t=3\%$ και $w_0/t=0.3\%$. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται μία παραμετρική μελέτη, που εξετάζει την ευαισθησία του αγωγού στο πλάτος αρχικής ατέλειας. Όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό από τα αποτελέσματα, η εσωτερική πίεση, δεδομένου ότι εξομαλύνει τις ατέλειες και τείνει να τις περιορίσει, αυξάνει την καμπτική αντοχή του σωλήνα. Με την αύξηση της πίεσης, εκτός από το ότι αυξάνεται σταδιακά η μέγιστη ροπή, λαμβάνει χώρα σημαντική αύξηση της κρίσιμης καμπυλότητας. Συγκεκριμένα, η τιμή της κρίσιμης καμπυλότητας για $P=0.403P_0$ έχει τριπλασιαστεί συγκριτικά με την τιμή που είχε για μηδενική εσωτερική πίεση.

Πίνακας 3.3: Σύνοψη πειραματικών-αριθμητικών αποτελεσμάτων για τη μέγιστη ροπή και την κρίσιμη καμπυλότητα στο σημείο της κατάρρευσης.

P/P ₀	Πειράματα		Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων			
	κ _c /κ ₁	M _c /M ₀	w ₀ =0.03t		w ₀ =0.003t	
	κ _c /κ ₁	M _c /M ₀	κ _c /κ ₁	M _c /M ₀	κ _c /κ ₁	M _c /M ₀
0	1.265	1.11	1.363	1.15	1.633	1.11
0.138	2.464	1.254	2.098	1.25	3.387	1.25
0.201	3.277	1.332	2.345	1.27	3.937	1.28
0.311	4.114	1.328	2.801	1.29	4.591	1.31
0.403	4.452	1.352	3.201	1.29	4.753	1.31

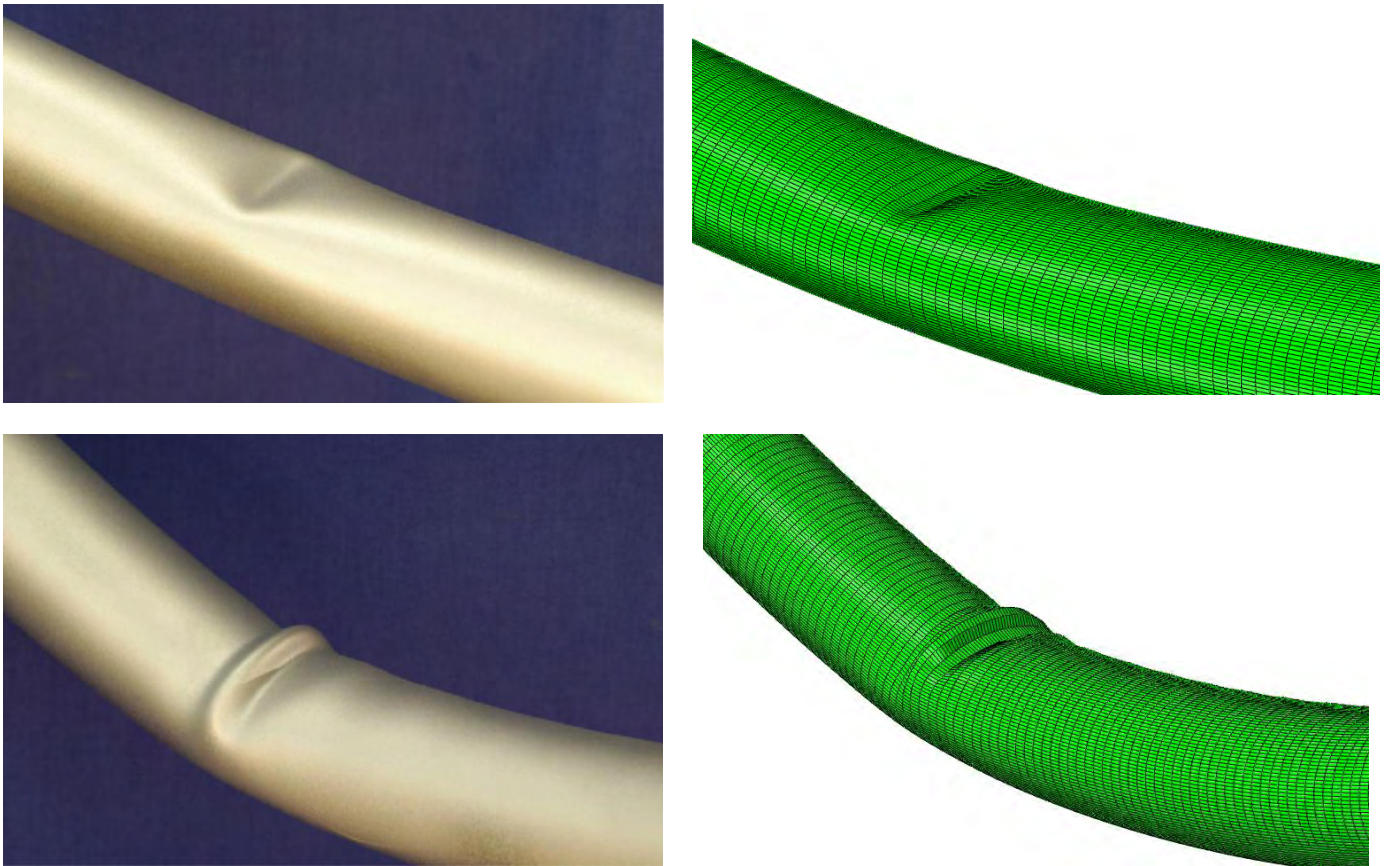


Εικόνα 3.4: Μέγιστη ροπή και κρίσιμη καμπυλότητα στο σημείο της κατάρρευσης.

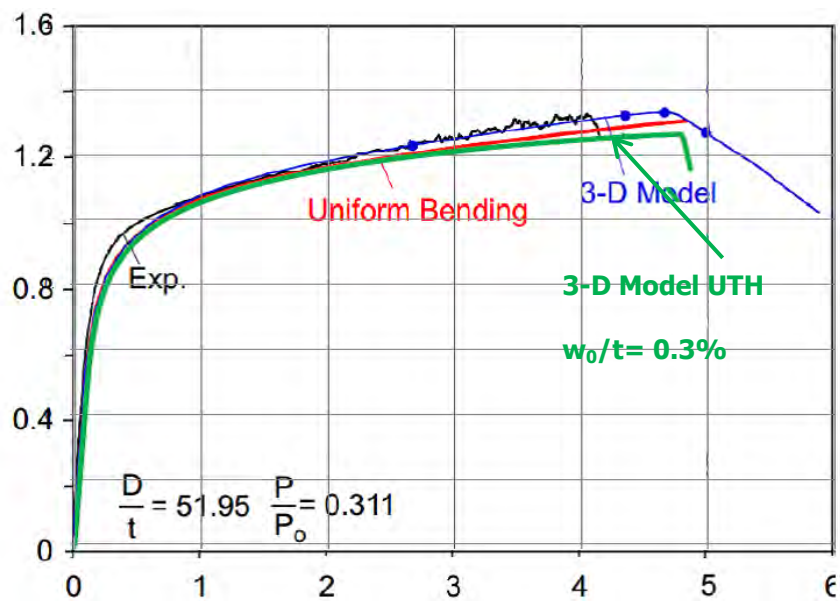
Στο διάγραμμα 3.4, παρουσιάζονται οι τιμές που προκύπτουν από τα πειράματα για την κρίσιμη καμπυλότητα στο σημείο της κατάρρευσης, και οι αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από το αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Τα σημεία με μπλε χρώμα αντιστοιχούν στα πειραματικά αποτελέσματα, αυτά με το κόκκινο χρώμα αντιστοιχούν στα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν με πλάτος της αρχικής ατέλειας ίσο με $w_0=0.03t$, ενώ αυτά με το πράσινο αντιστοιχούν στα αριθμητικά αποτελέσματα με $w_0=0.003t$. Η έντονη επιρροή της εσωτερικής πίεσης στην καμπτική αντοχή του σωλήνα οδηγεί στην σημαντική αύξηση της καμπυλότητας με την πίεση. Στο διάγραμμα αυτό, επισημαίνεται, παράλληλα, η ευαισθησία του σωλήνα στο μέγεθος της ατέλειας. Όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό από τα αποτελέσματα, το μεγαλύτερο πλάτος ατέλειας προκαλεί την αστοχία του σωλήνα σε χαμηλότερες τιμές για την καμπυλότητα. Αντίθετα, η κατάρρευση του σωλήνα με ατέλεια με μικρότερο πλάτος λαμβάνει χώρα σε σημαντικά μεγαλύτερη καμπυλότητα.

Στις εικόνες που ακολουθούν (εικόνες 3.5(α) και 3.5 (β)), αντιπαραβάλλονται οι πειραματικές μορφές αστοχίας και αυτές που προκύπτουν από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Τα πειραματικά και τα αριθμητικά αποτελέσματα συμφωνούν σε εξαιρετικό βαθμό. Στην περίπτωση όπου υφίσταται κάμψη χωρίς εσωτερική πίεση, ο αγωγός κάμπτεται μέχρι που αστοχεί σχηματίζοντας μία έντονη ύβωση προς τα μέσα. Για μη μηδενική εσωτερική πίεση, αναπτύσσονται ρυτιδώσεις οι οποίες συσσωρεύονται γρήγορα αμέσως μετά την εμφάνισή τους, και τελικά καταλήγουν στην τσάκιση του αγωγού, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.5. Έπειτα, την εικόνα 3.6 συγκρίνονται τα διαγράμματα ροπής-καμπυλότητας που προκύπτουν για πίεση $P=0.311P_0$. Προκύπτει ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα συμφωνούν

εξαιρετικά με τις πειραματικές τιμές, καθώς και τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για την προσομοίωση των πειραμάτων από τον Limam et. al. [9]. Η γεωμετρική ατέλεια που εισάγεται στον αγωγό έχει πλάτος $w_0=0.3\%t$.



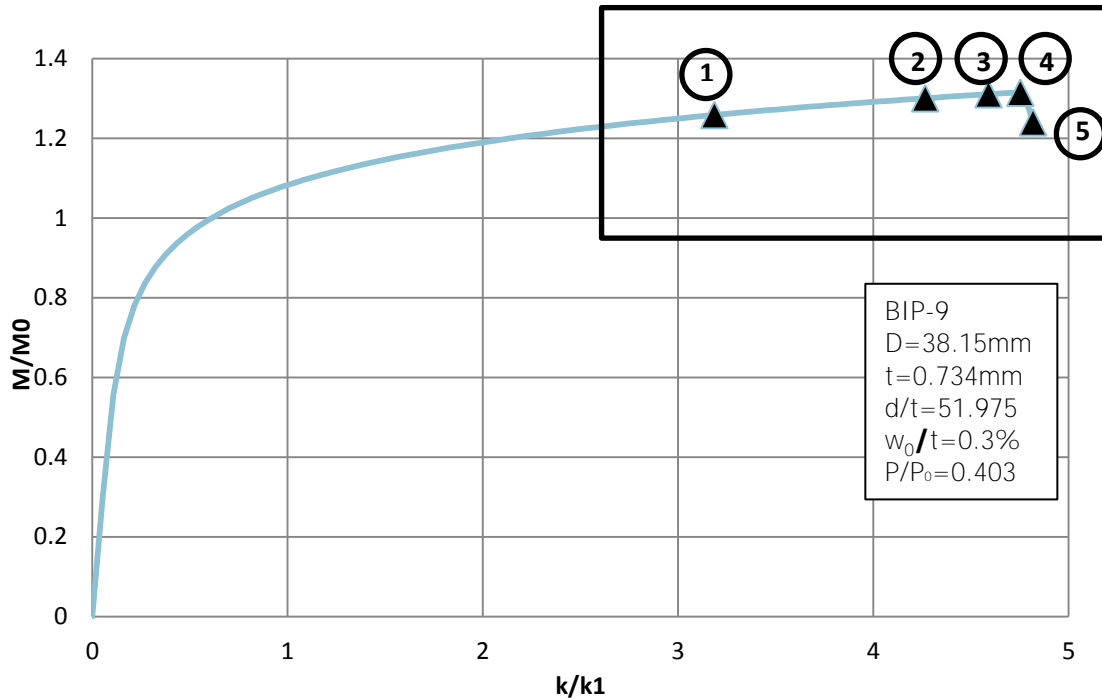
Εικόνα 3.5: Μορφές αστοχίας πειραματικά [9] και αριθμητικά για πίεση **(α)** $P=0$, και **(β)** $P=0.403P_0$.



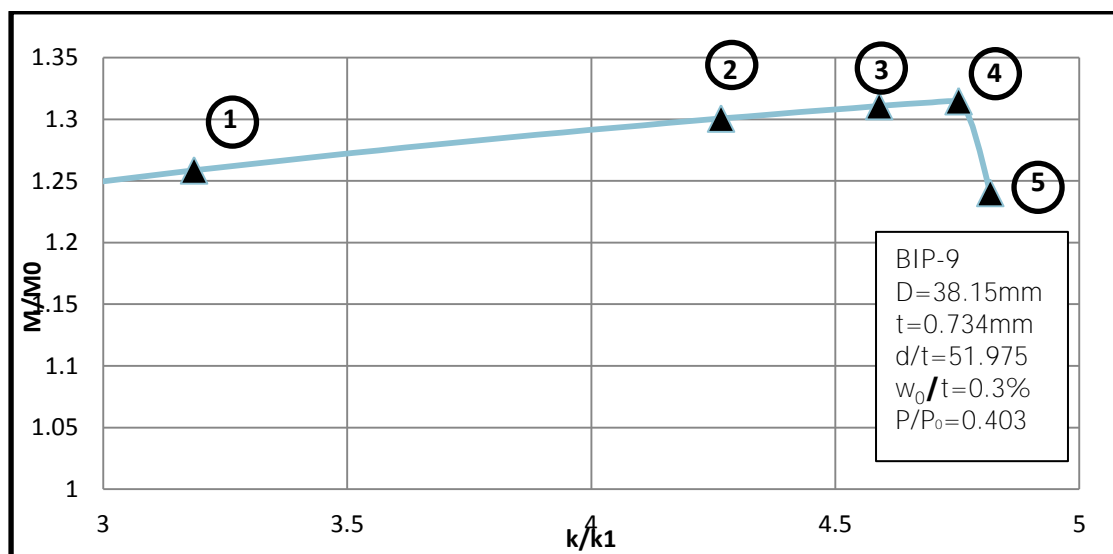
Εικόνα 3.6: Σύγκριση διαγραμμάτων ροπής-καμπυλότητας για το δείγμα BIP9, για την πίεση $P=0.311P_0$ με πλάτος αρχικής ατέλειας $w_0=0.3\%t$.

Περιγραφή μηχανικής συμπεριφοράς των σωλήνων κατά την κάμψη τους υπό εσωτερική πίεση

Με τη χρήση του ακόλουθου διαγράμματος ροπής-καμπυλότητας και των εικόνων που έπονται αυτού, γίνεται άμεσα αντιληπτή η μηχανική συμπεριφορά του αγωγού κατά τη διάρκεια της κάμψης του υπό εσωτερική πίεση. Συγκεκριμένα, πρόκειται για το δείγμα από ανοξείδωτο χάλυβα SS321 BIP9, το οποίο συμπιέζεται εσωτερικά μέχρι την πίεση $P=0.403P_0$, κι έπειτα κάμπτεται σταδιακά μέχρι να αστοχήσει. Η γεωμετρική ατέλεια που εισάγεται στον αγωγό έχει πλάτος $w_0=0.3\%t$.

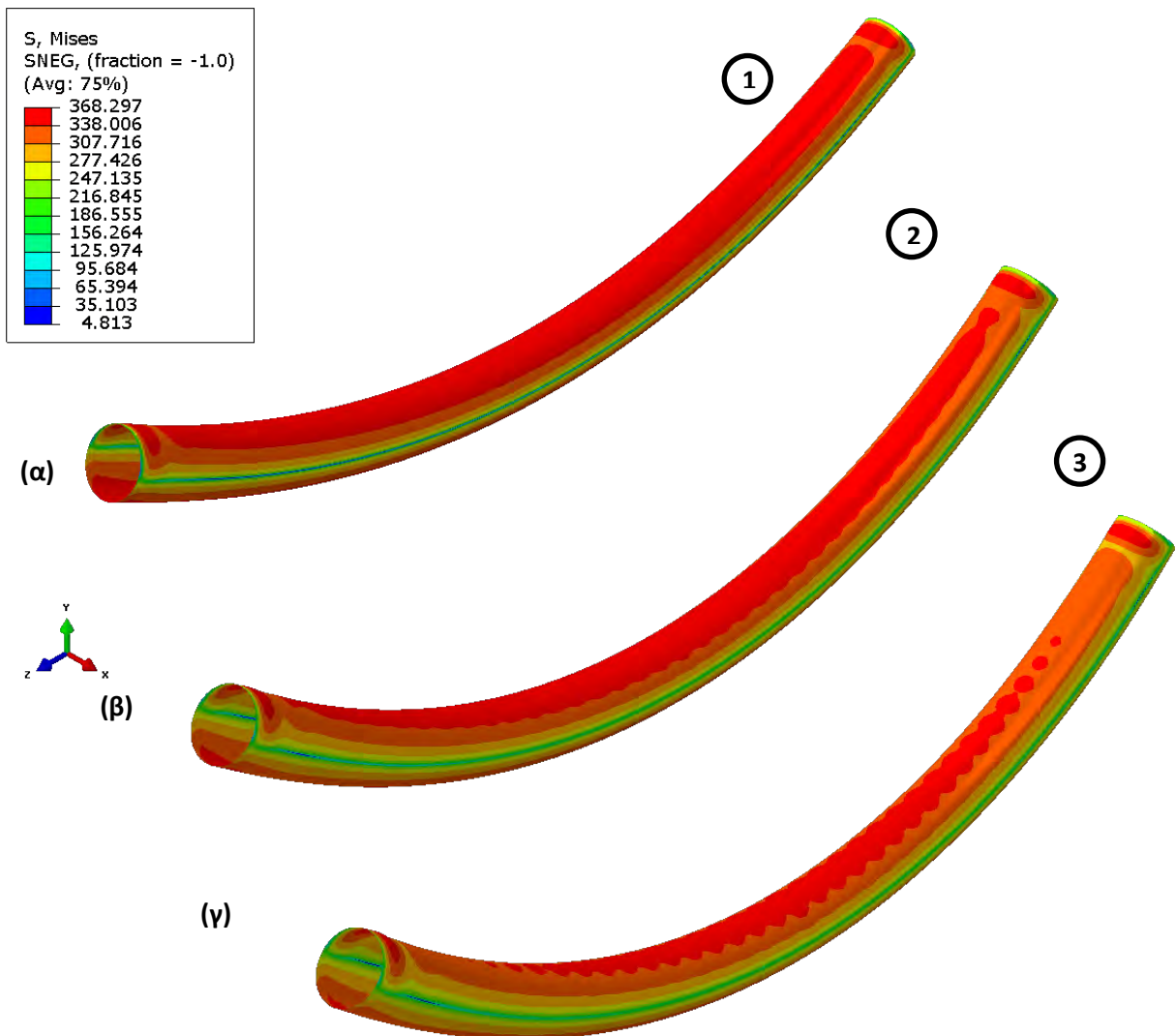


Εικόνα 3.7: Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας για το δείγμα BIP9, για την πίεση $P=0.403P_0$ με πλάτος αρχικής ατέλειας $w_0=0.3\%t$.



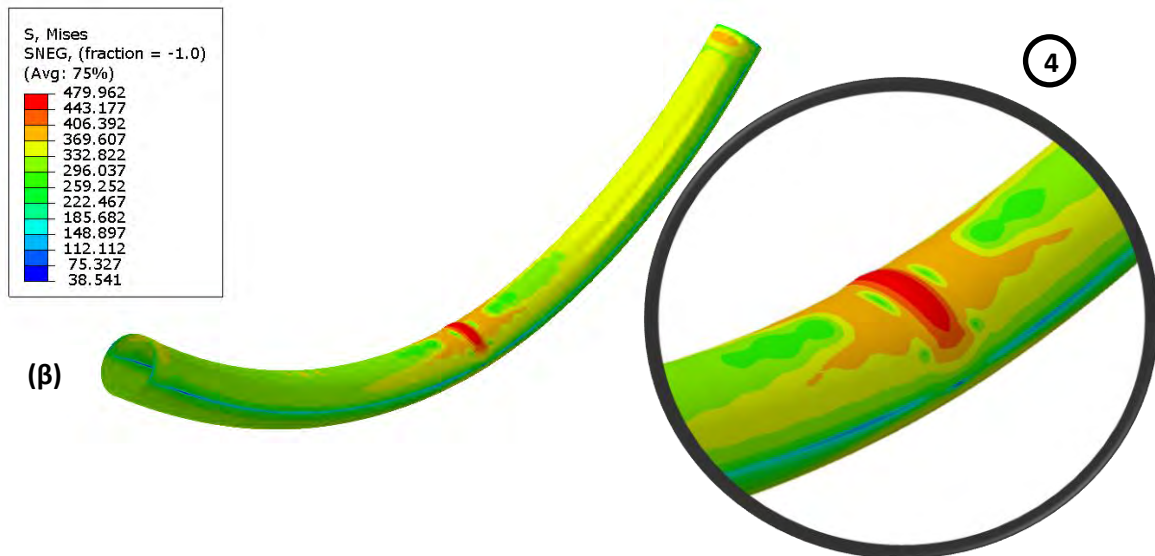
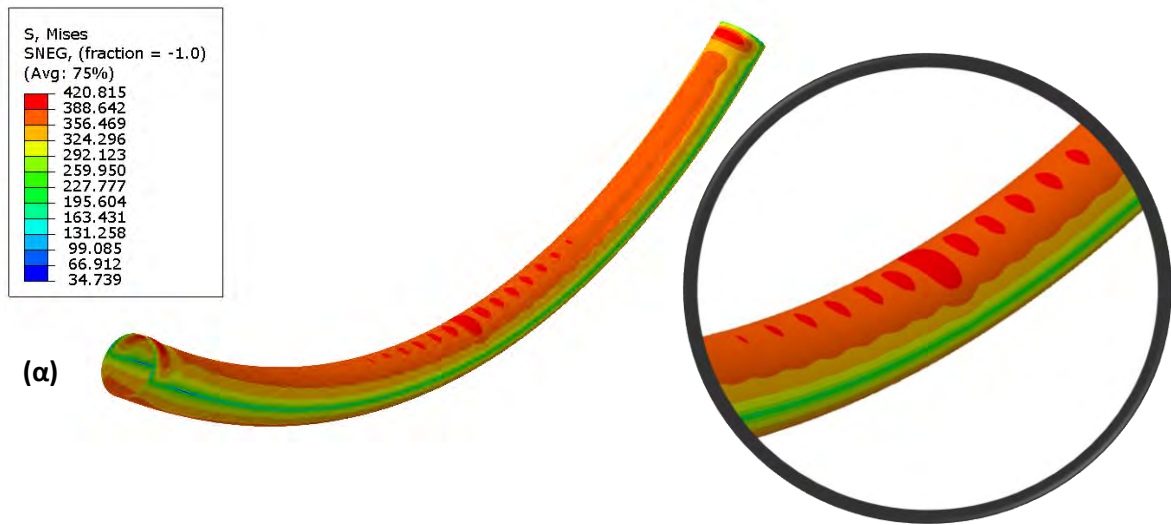
Εικόνα 3.8: Περιοχή στο πλαίσιο στο διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας για το δείγμα BIP9, για την πίεση $P=0.403P_0$ με πλάτος αρχικής ατέλειας $w_0=0.3\%t$.

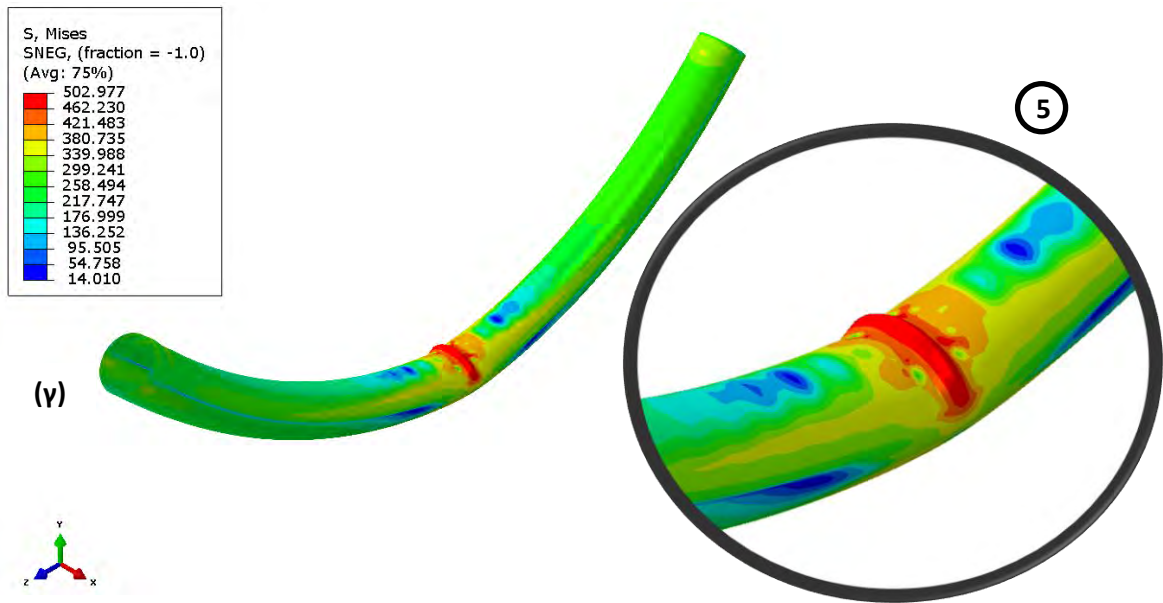
Αρχικά, στο διάγραμμα 3.8 υπάρχει ένα γραμμικά ελαστικό καθεστώς, όπου ο αγωγός, αφού συμπιεστεί εσωτερικά μέχρι το επιθυμητό επίπεδο, κάμπτεται ομοιόμορφα και η αρχικά κυκλική διατομή του παίρνει ωσειδές σχήμα. Το ελαστικό καθεστώς συνεχίζει ομαλά και καταλήγει στην έναρξη της ανελαστικής συμπεριφοράς, η οποία χαρακτηρίζεται από ένα καθεστώς γραμμικής «κράτυνσης», το οποίο συνεχίζει μέχρι μια σχετικά υψηλή καμπυλότητα. Το σημείο 1 του διαγράμματος, που αντιστοιχεί στην εικόνα 3.9(α), παρουσιάζει τον αγωγό, ο οποίος έχει φτάσει σε μια σημαντική καμπυλότητα. Έπειτα, καθώς αυξάνεται η καμπυλότητα, στην επάνω γενέτειρα του καμπτόμενου σωλήνα αναπτύσσονται μικρές πτυχώσεις στο τοίχωμα του σωλήνα (wrinkling), οι οποίες αρχικά είναι μετά βίας αντιληπτές. Οι, αρχικά, ήπιες ρυτίδες, φαίνονται στην εικόνα 3.9(β), η οποία αντιστοιχεί στο σημείο 2 του διαγράμματος. Με περαιτέρω αύξηση της επιβαλλόμενης καμπυλότητας, το πλάτος των ρυτιδώσεων αυξάνεται σημαντικά και πλέον οι ρυτιδώσεις στην εικόνα 3.9(γ), που αντιστοιχεί μέχρι το σημείο 3 στο διαγράμματος, είναι ευδιάκριτες.



Εικόνα 3.9: Ανάπτυξη ρυτιδώσεων (wrinkling) με αύξηση της καμπυλότητας.

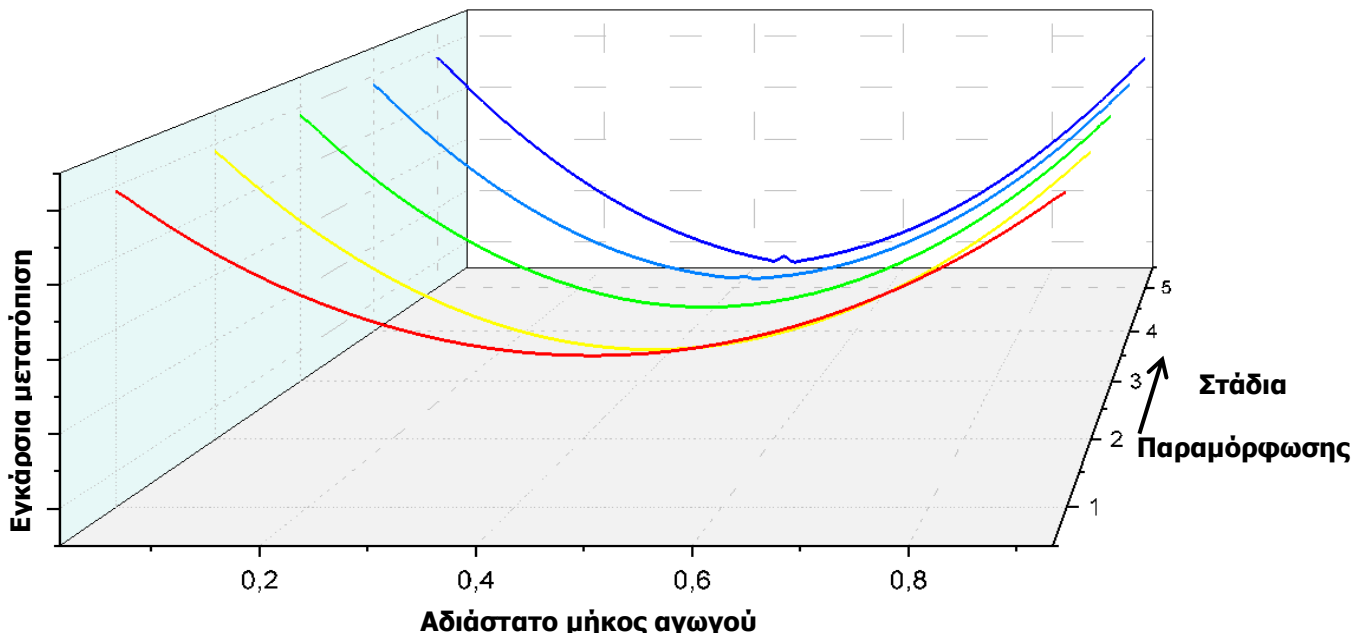
Σταδιακά, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.10(a), το φαινόμενο wrinkling συσσωρεύεται σε μία από τις ρυτίδες, η οποία βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα του σωλήνα. Τελικά, η συγκεκριμένη ρυτίδωση φουσκώνει προς τα έξω (bulging), και η δομή αρχίζει να καταρρέει (εικόνα 3.10(β)). Το σημείο αυτό, που αντιστοιχεί στο σημείο 4 στο διάγραμμα, είναι το σημείο στο οποίο η ροπή παίρνει τη μέγιστη τιμή της και η καμπυλότητα στο σημείο αυτό αντιστοιχεί στην κρίσιμη καμπυλότητα. Έπειτα, όσο προχωράμε στη μεταλυγισμική περιοχή, η αστοχία εκφράζεται με την περαιτέρω πτώση της ροπής στο τελικό σημείο 5 του διαγράμματος, η οποία συνοδεύεται με έντονη παραμόρφωση και διόγκωση του φουσκώματος προς τα έξω (εικόνα 3.10(γ)).





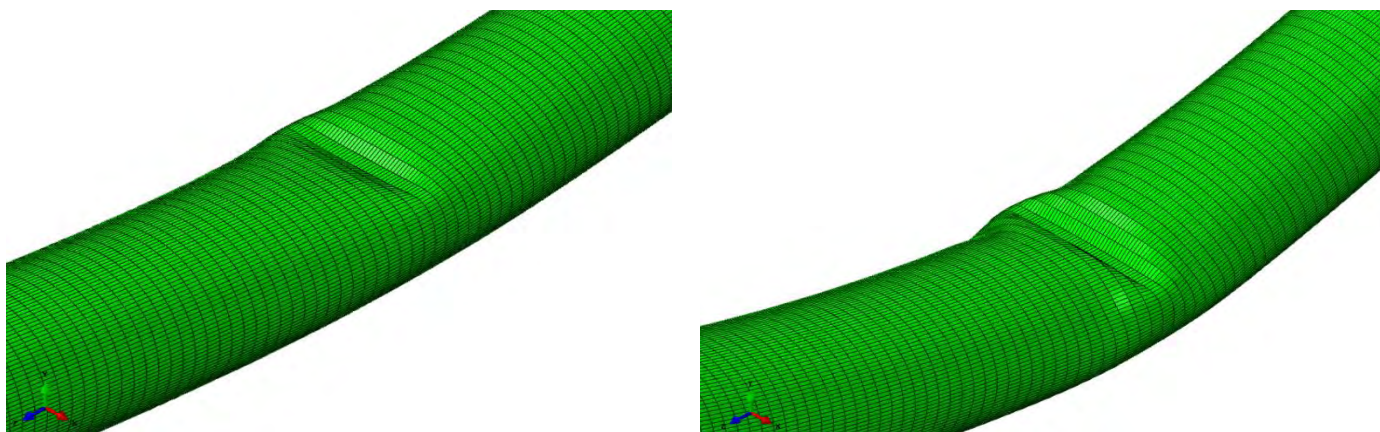
Εικόνα 3.10: (α) Συσσωρευση ρυτιδώσεων σε μία, (β) διόγκωση ρυτίδωσης (bulging) και αστοχία, (γ) μεταλυσιμική κατάσταση.

Στο διάγραμμα 3.11 αντιπαραβάλλονται οι διαδοχικές φάσεις κατά την κάμψη του δοκιμίου BIP9, για την πίεση $P=0.403P_0$ με πλάτος αρχικής ατέλειας $w_0=0.3\%t$ που παρουσιάζονται στις εικόνες 3.7 έως 3.10. Γίνεται άμεσα αντιληπτή η σημαντική αύξηση της καμπυλότητας μέχρι την αστοχία. Επίσης, στη φάση 5, είναι ευδιάκριτο το φούσκωμα που έχει αναπτυχθεί κατά την κατάρρευση της δομής.

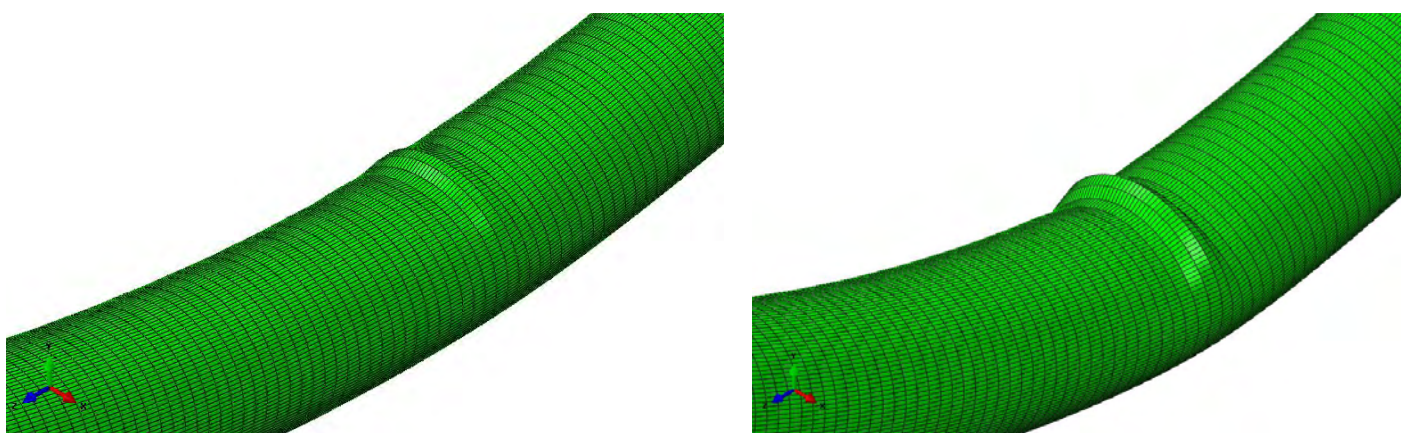


Εικόνα 3.11: Διαδοχικές φάσεις κατά την κάμψη του δοκιμίου BIP9, για την πίεση $P=0.403P_0$ με πλάτος αρχικής ατέλειας $w_0=0.3\%t$.

Με την παρουσία εσωτερικής πίεσης, ακόμη και σε χαμηλές τιμές, το φαινόμενο της κατάρρευσης καθυστερεί. Σε χαμηλότερα επίπεδα πίεσης ο σωλήνας κατά την κατάρρευση είναι πτυχωμένος προς τα μέσα, παρόμοια με την περίπτωση μηδενικής πίεσης. Σε υψηλότερες πιέσεις, οι πτυχώσεις που προκαλούνται καταλήγουν σε κυρτές υβώσεις, όπως στην εικόνα 3.13, ενώ αυξάνεται σημαντικά η καμπυλότητα κατά την αστοχία.

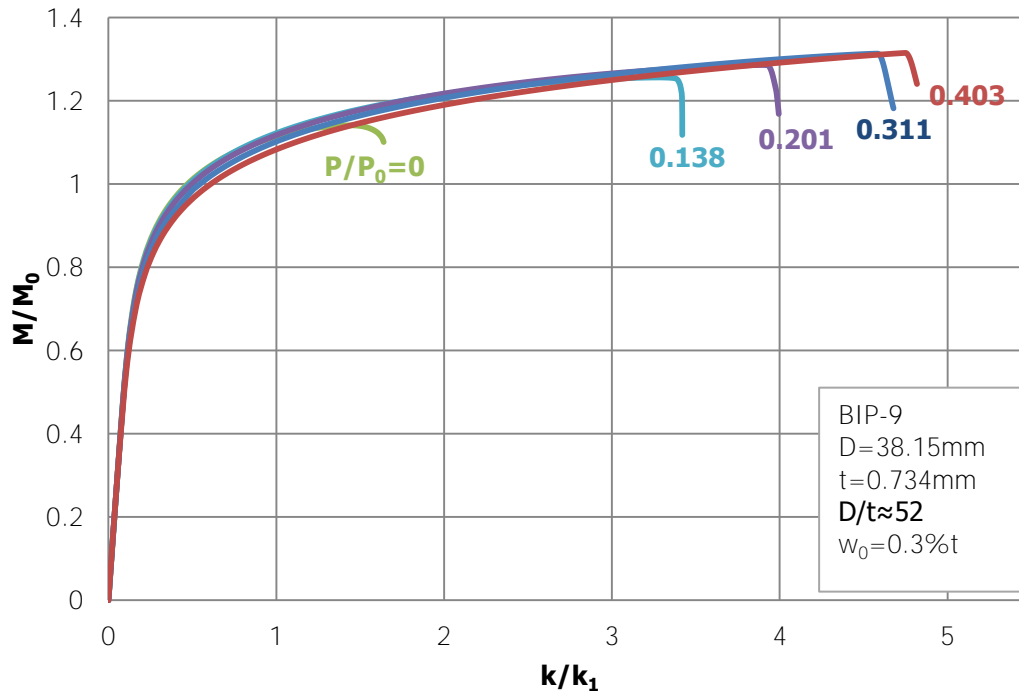


Εικόνα 3.12: Μορφές αστοχίας για πίεση **(α)** $P=0$, και **(β)** $P=0.138P_0$.



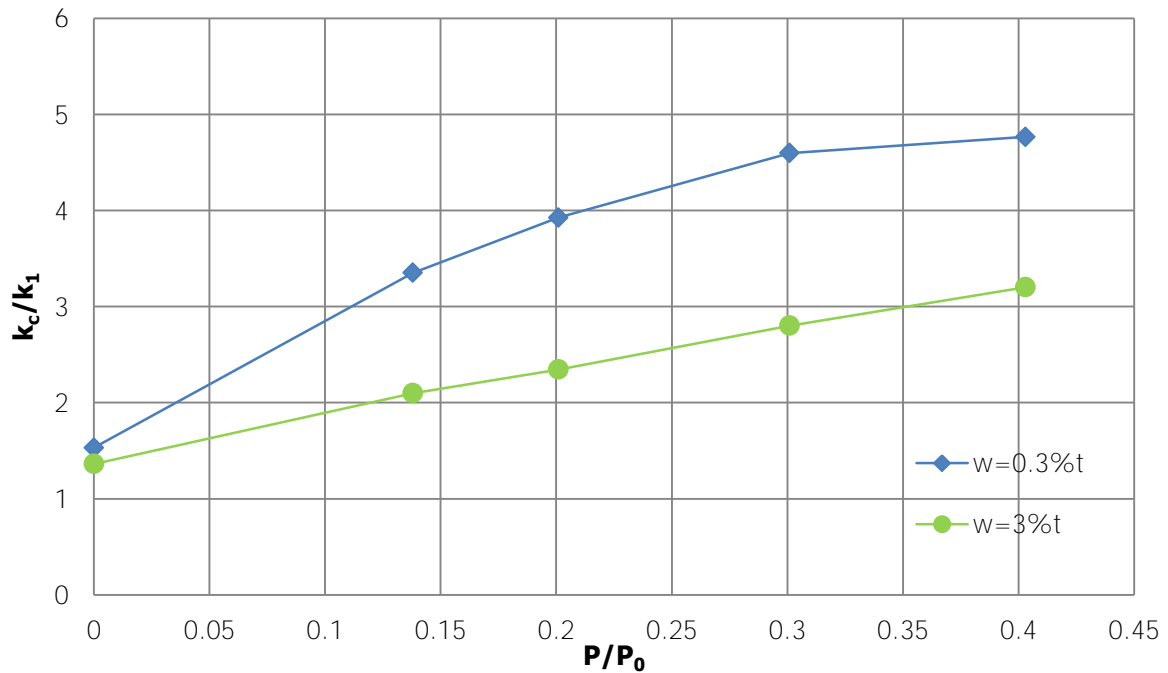
Εικόνα 3.13: Μορφές αστοχίας για σημαντική πίεση **(α)** $P=0.311$, και **(β)** $P=0.403P_0$.

Στα διαγράμματα ροπής-καμπυλότητας που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την κάμψη του δείγματος BIP-9, για διάφορες τιμές της εσωτερικής πίεσης. Ο σωλήνας θεωρείται αρχικά ατελής με πλάτος ατέλειας ίσο με $w_0=0.3\%t$. Η ατέλεια αυτή θεωρείται σχετικά μικρή, δεδομένου ότι σε πραγματικές εφαρμογές, τυπικές τιμές για το πλάτος της ατέλειας είναι μεταξύ 2% και 10% [11]. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται αυτή η ατέλεια στην προσομοίωση των πειραμάτων είναι ότι αποδίδει ικανοποιητικά τα πειραματικά αποτελέσματα.



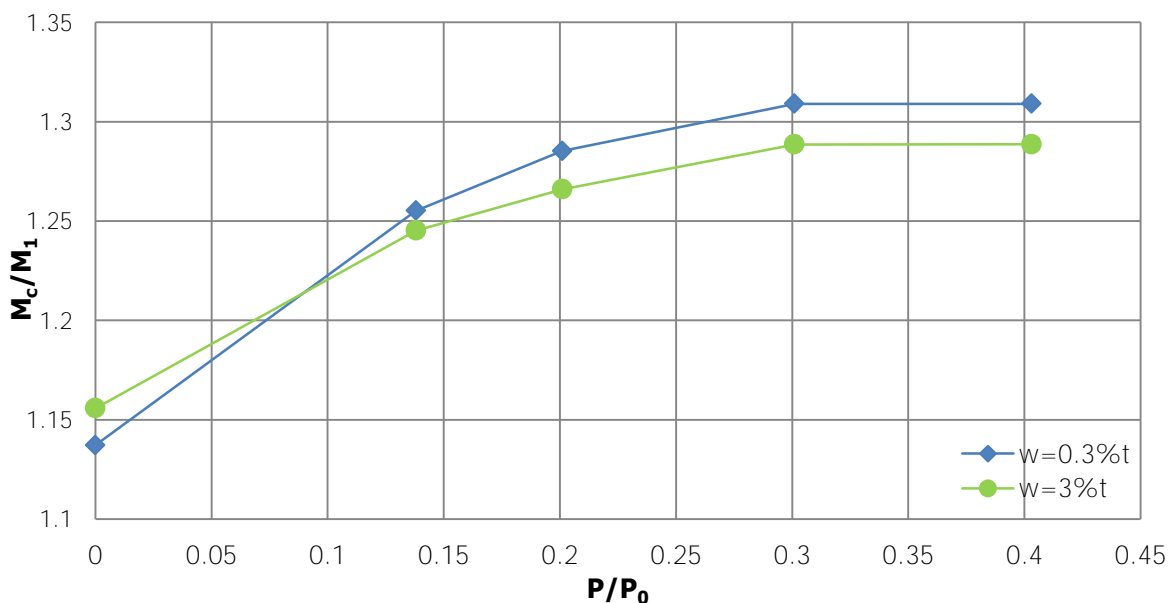
Εικόνα 3.14: Διάγραμμα ροής-καμπυλότητας για διάφορες πιέσεις για ατέλεια με πλάτος $w_0=0.3\%t$.

Εξετάζοντας το διάγραμμα στην εικόνα 3.14, γίνεται άμεσα αντιληπτή η ισχυρή σταθεροποιητική επίδραση της εσωτερικής πίεσης, η οποία, όπως αναφέρθηκε, καθυστερεί το φαινόμενο της κατάρρευσης. Για μηδενική πίεση, η κρίσιμη καμπυλότητα του αγωγού κατά την αστοχία ισούται με $k=1.633k_1$. Ακόμα και για μικρή αύξηση της εσωτερικής πίεσης, η κρίσιμη καμπυλότητα κατά την κατάρρευση αυξάνεται αξιοσημείωτα. Για $P = 0.138P_0$, η τιμή της κρίσιμης καμπυλότητας είναι υπερδιπλάσια αυτής για μηδενική πίεση, και συγκεκριμένα $k=3.387k_1$. Επίσης, η εσωτερική πίεση ευνοεί την καμπτική αντοχή του αγωγού, όσο αφορά την μέγιστη ροπή την οποία μπορεί να δεχθεί ο αγωγός μέχρι την αστοχία. Συγκεκριμένα, όταν η εσωτερική πίεση φθάσει $0.403P_0$ παρατηρείται αύξηση της τάξεως 18% συγκριτικά με την αντίστοιχη τιμή της μέγιστης ροής υπό μηδενική πίεση.



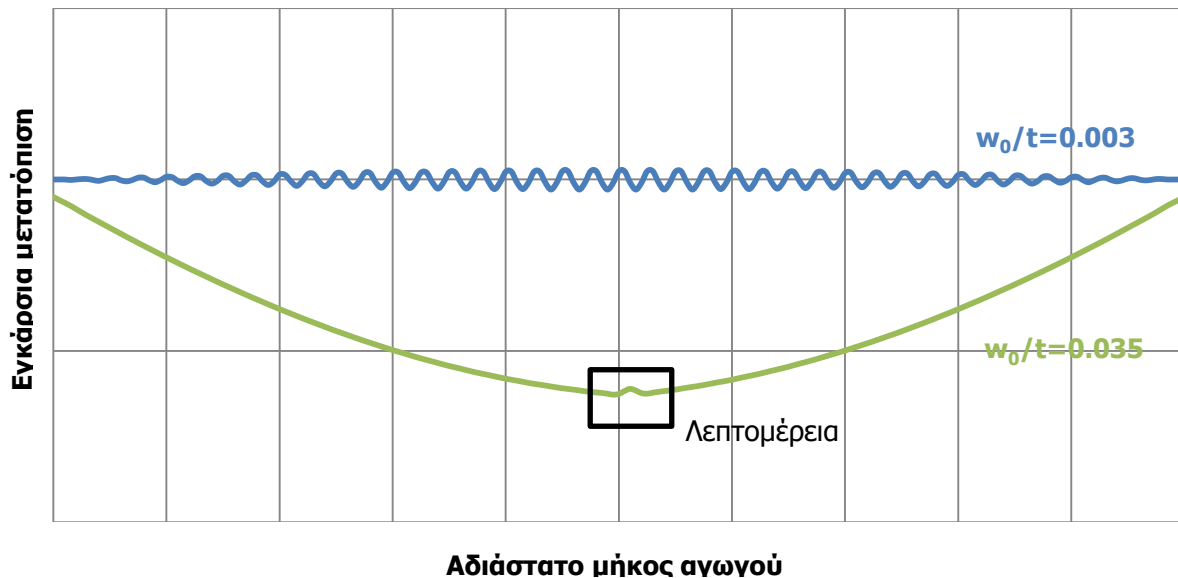
Εικόνα 3.15: Μεταβολή της κρίσιμης καμπυλότητας με την εσωτερική πίεση.

Στην εικόνα 3.15, συνοψίζεται η μεταβολή της κρίσιμης καμπυλότητας κατά την αστοχία σε σχέση με την εσωτερική πίεση, για δύο διαφορετικά πλάτη της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας. Όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό, υπάρχει μία σχεδόν γραμμική άνοδος στην τιμή της κρίσιμης καμπυλότητας καθώς αυξάνεται η εσωτερική πίεση. Με την αύξηση της εσωτερικής πίεσης, υπάρχει, επίσης, μία μικρή αύξηση της μέγιστης ροπής κάμψης (εικόνα 3.16). Η αύξηση που παρατηρείται στην τιμή της μέγιστης ροπής δεν είναι τόσο έντονη όσο αυτή της κρίσιμης καμπυλότητας. Επιπρόσθετα, είναι αξιοσημείωτη η επιρροή του πλάτους της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας. Μεγαλύτερη ατέλεια οδηγεί σε αστοχία του σωλήνα σε μικρότερες τιμές για την κρίσιμη καμπυλότητα και τη μέγιστη ροπή κάμψης.

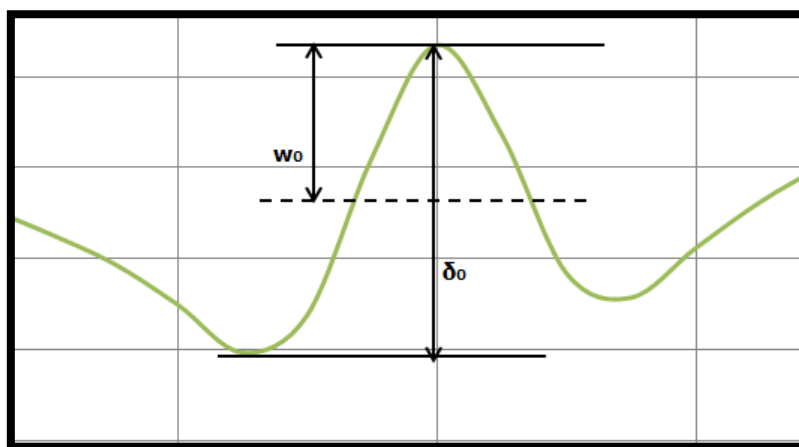


Εικόνα 3.16: Μεταβολή της μέγιστης ροπής με την εσωτερική πίεση.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η εσωτερική πίεση τείνει να εξομαλύνει την ατέλεια, ενισχύει την κυκλικότητα της διατομής και καθυστερεί την αστοχία. Έτσι, για υψηλές πιέσεις και συγκεκριμένα για $P = 0.403P_0$, το μοντέλο παρουσιάζει μία δυσκολία στην ανίχνευση της ατέλειας. Έτσι, σε υψηλότερες πιέσεις, όταν κρίθηκε απαραίτητο, η αρχική ατέλεια που εισήχθη στον αρχικά τέλειο σωλήνα δεν είχε την κυματοειδή μορφή που προκύπτει από την ανάλυση ιδιοτιμών, αλλά είχε την μορφή της αστοχίας του αγωγού για χαμηλές πιέσεις. Η μορφή αυτή εισήχθη υπό κλίμακα στον αρχικά τέλειο σωλήνα, πολλαπλασιασμένη επί έναν συντελεστή f . Στην εικόνα 3.17, αντιπαραβάλλεται η κυματοειδής γεωμετρική ατέλεια που προκύπτει από την ανάλυση ιδιοτιμών με πλάτος ίσο με $w_0 = 0.3\%t$, με την υπό κλίμακα ($f = 0.0003$) μορφή αστοχίας του αγωγού όταν κάμπτεται υπό πίεση $P = 0.311P_0$ με πλάτος $w_0 = 3.5\%t$. Στη δεύτερη περίπτωση, εισάγεται μια αρχική καμπυλότητα στον αγωγό, καθώς και το χαρακτηριστικό εξόγκωμα στο κεντρικό τμήμα του που προκύπτει κατά την αστοχία του.

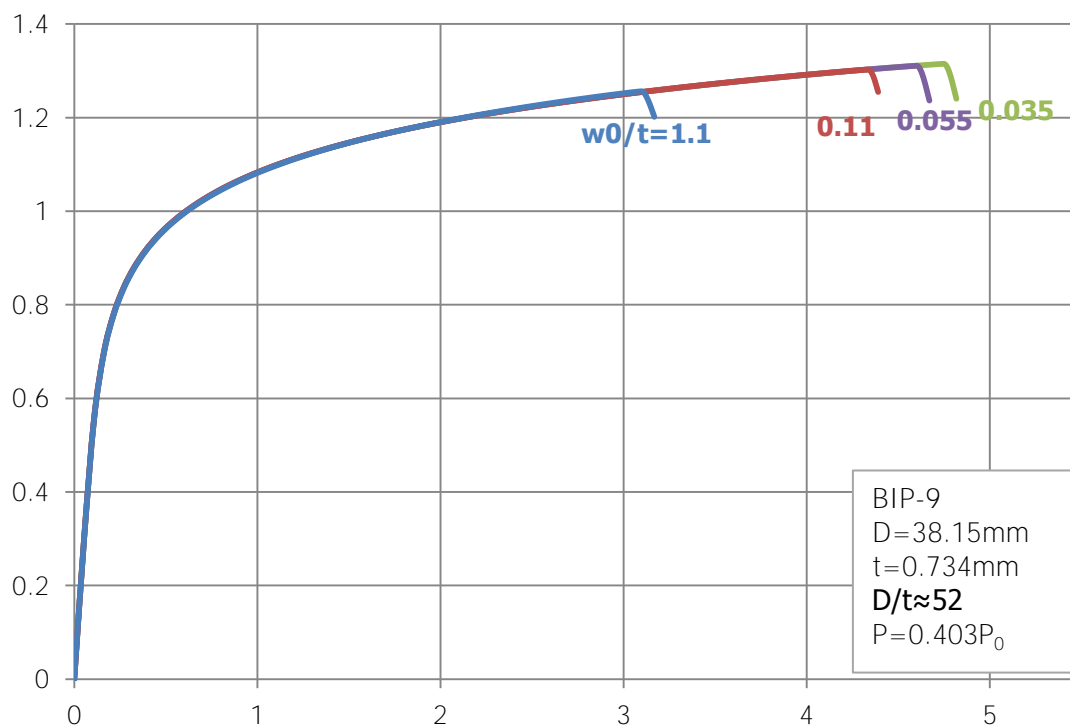


Εικόνα 3.17: Κυματοειδής γεωμετρική ατέλεια (wrinkles) με πλάτος $w_0 = 0.003t$ και υπό κλίμακα μορφή αστοχίας του αγωγού για $P = 0.311P_0$ με πλάτος $w_0 = 0.035t$.

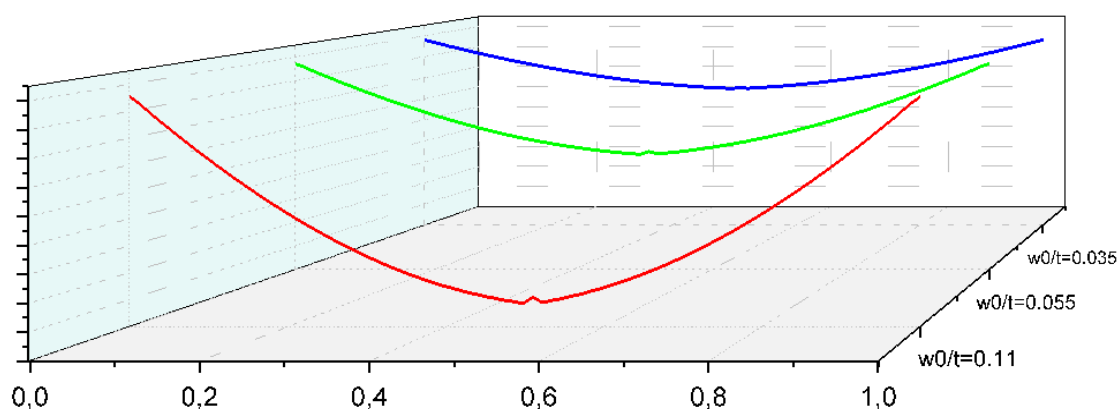


Εικόνα 3.18: Αρχική γεωμετρική ατέλεια με τη μορφή της μορφής αστοχίας του αγωγού σε κάμψη υπό $P = 0.311P_0$ με πλάτος $w_0 = 0.035t$.

Το παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 3.19) ροπής-καμπυλότητας φαίνεται η ευαισθησία του μοντέλου σε αυτήν την μορφή ατέλειας. Για μεγαλύτερες τιμές για το πλάτος, άρα και για το συντελεστή f , η καμπτική αντοχή του σωλήνα μειώνεται σημαντικά. Για ατέλεια με πλάτος $w_0=3.5\%t$, η κρίσιμη καμπυλότητα κατά την αστοχία που προκύπτει αριθμητικά σχεδόν συμπίπτει με την αντίστοιχη τιμή που προέκυψε από τα πειράματα.



Εικόνα 3.19: Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας για την ευαισθησία του μοντέλου στη νέα μορφή ατέλειας,

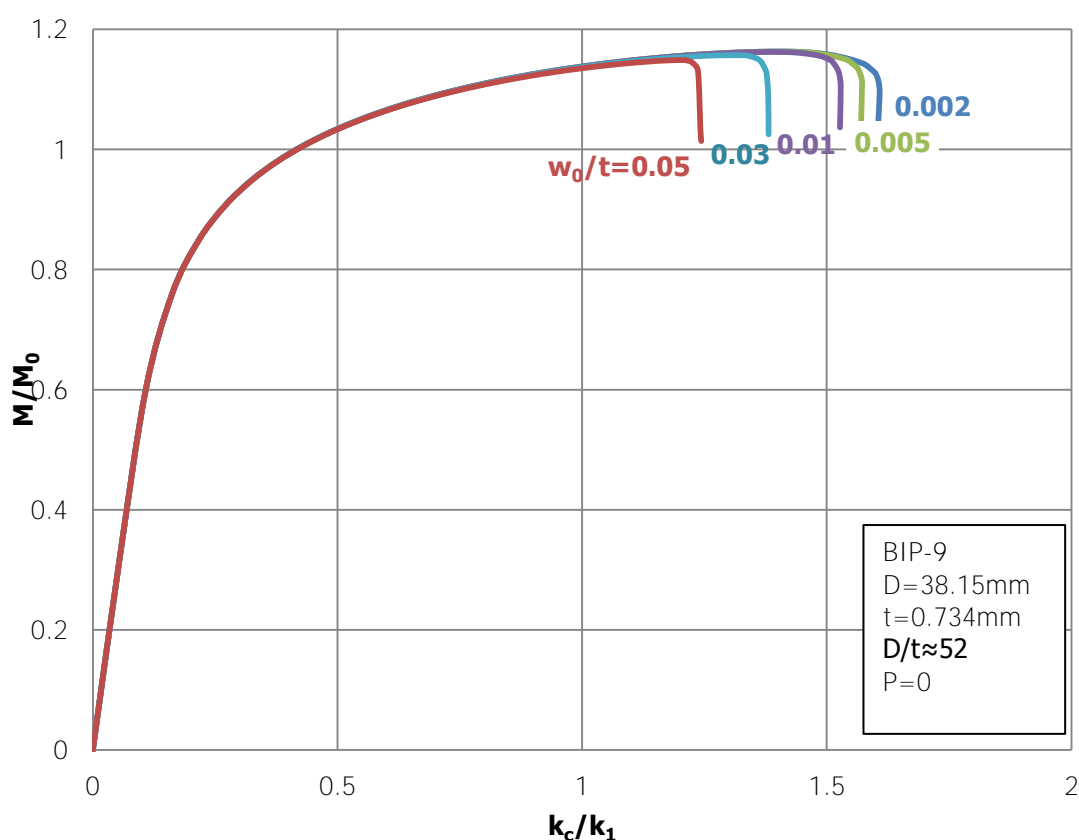


Εικόνα 3.20: Αρχική γεωμετρική ατέλεια για διάφορες τιμές του πλάτους w_0 .

Παραμετρική Ανάλυση

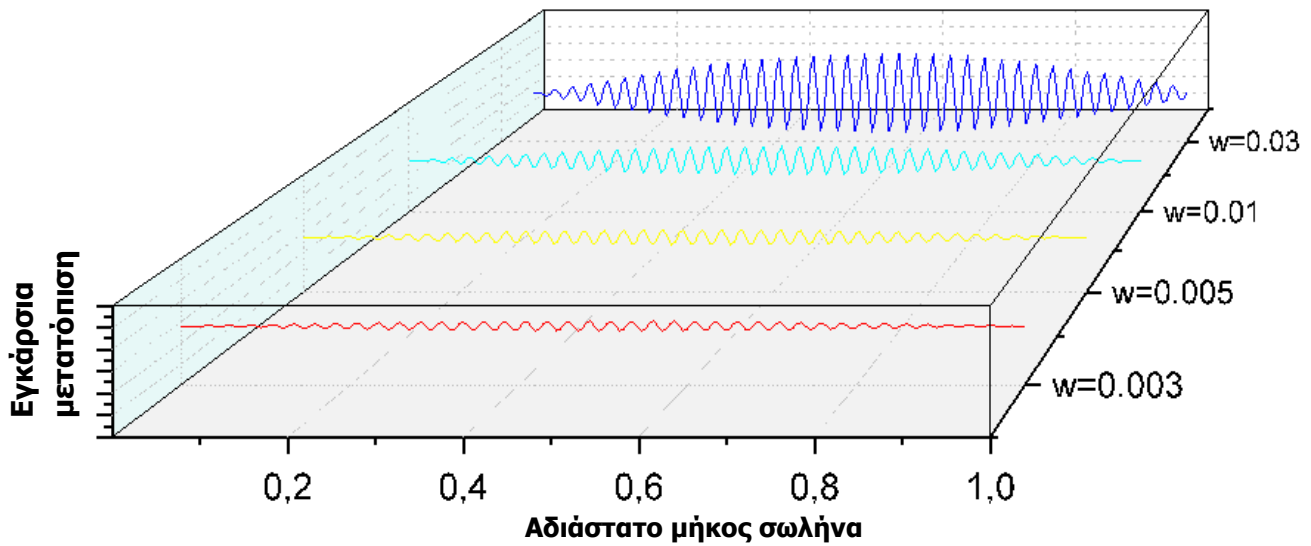
Τα αριθμητικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή μιας παραμετρικής μελέτης για την επίδραση του πλάτους της αρχικής ατέλειας πτυχώσεων στη συμπεριφορά και την αντοχή κατά την κάμψη των σωλήνων.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα για την ευαισθησία του αγωγού σε αρχική ατέλεια, αφορούν δοκίμιο διαμέτρου 38.15mm και πάχους $t=0.734\text{mm}$, για μηδενική εσωτερική πίεση. Τα αποτελέσματα στην εικόνα 3.21, δείχνουν ότι η καμπτική απόκριση του αγωγού είναι αρκετά ευαίσθητη στην παρουσία αρχικών πτυχώσεων στο τοίχωμα του σωλήνα, κυρίως όσον αφορά την κρίσιμη καμπυλότητα στο σημείο της αστοχίας. Η μέγιστη ροπή είναι περίπου ίση με $1.15M_0$, ανεξάρτητα από το μέγεθος της ατέλειας. Για μικρές τιμές της αρχικής ατέλειας, και συγκεκριμένα για ατέλειες με πλάτος w_0 μικρότερο από 1% του πάχους του αγωγού, οι τιμές για την κρίσιμη καμπυλότητα είναι μεγαλύτερες από $1.5k_1$. Μεγαλύτερο πλάτος των αρχικών ατελειών, που αντιστοιχούν σε τιμές μεταξύ 3% και 5%, συνεπάγεται με σημαντική και μείωση της ικανότητας παραμόρφωσης. Σε κάθε περίπτωση, η απόκριση χαρακτηρίζεται από ένα οριακό σημείο στο διάγραμμα, γνωστό ως "snap-through point», που χαρακτηρίζεται από μια απότομη πτώση στην μεταλυγισμική περιοχή του διαγράμματος ροπής-καμπυλότητας.



Εικόνα 3.21: Παραμετρική Ανάλυση για την ευαισθησία του αγωγού στο πλάτος της αρχικής ατέλειας.

Στην εικόνα 3.22, παρουσιάζεται η μορφή της κυματιστής γεωμετρικής ατέλειας που εισάγεται στον αρχικά τέλειο αγωγό, για διάφορες τιμές για το πλάτος ατέλειας w . Υπενθυμίζεται ότι το μέγιστο βάθος των ρυτίδων είναι $\delta=2w_0$, με w_0 που είναι το πλάτος της ατέλειας, δηλαδή η μέγιστη απόκλιση της πτυχωτής επιφάνειας του κελύφους από τον τέλειο κύλινδρο.



Εικόνα 3.22: Κυματιστή γεωμετρική ατέλεια πτυχώσεων για διάφορες τιμές το πλάτος w_0 .

Σύγκριση αποτελεσμάτων με πρότυπα

Τα διεθνή πρότυπα για το σχεδιασμό, που ορίζουν τα επιτρεπτά όρια για την κρίσιμη παραμόρφωση των αγωγών όταν υφίστανται κάμψη υπό εσωτερική πίεση, είναι τα DNV OS-F101 [12] και CSA Z662 [13]. Παρακάτω, συγκρίνονται οι οριακές τιμές για την κρίσιμη καμπυλότητα που προκύπτουν από τα πρότυπα, με αυτές που προκύπτουν από τα πειράματα καθώς και με τα αριθμητικά αποτελέσματα.

Πρότυπο DNV OS-F101

Σύμφωνα με το πρότυπο DNV OS-F101 (Κεφ. 5 – σελ. 76) για την περίπτωση όπου η παραμόρφωση γίνεται με έλεγχο της μετατόπισης, (Displacement controlled situation), η κρίσιμη παραμόρφωση ε_c υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\varepsilon_c = 0.78 \cdot \left(\frac{WT}{OD} - 0.01 \right) \cdot \left(1 + 5.75 \cdot \frac{p_{min} - p_e}{p_b} \right) \cdot \alpha_h^{-1.5} \cdot \alpha_{gw} \quad (3.1)$$

όπου:

OD = εξωτερική διάμετρος,

WT = πάχος τοιχώματος,

p_{min} = ελάχιστη εσωτερική πίεση που μπορεί να επιβληθεί,

p_e = εξωτερική πίεση,

$\alpha_h = (R_{t0.5}/R_m)_{max}$,

α_{gw} = συντελεστής περιφερειακής συγκόλλησης

p_b = πίεση διάρρηξης (burst pressure) που δίνεται από την εξίσωση:

$$p_b(t) = \frac{2t}{D-t} f_{cb} \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

με:

$$f_{cb} = \text{Min}[f_y, f_u/1.15]$$

$$f_y = (\text{SMYS} - f_{y,temp}) a_u$$

$$f_u = (\text{SMTS} - f_{u,temp}) a_u$$

όπου $f_{y,temp}$ και $f_{u,temp}$ είναι οι διορθωμένες τιμές για τη θερμοκρασία στο όριο ροής και για το σημείο μέγιστης αντοχής εφελκυσμού αντίστοιχα.

a_u = συντελεστής αντοχής του υλικού

Για το υλικό SS321, ισχύει ότι SMYS=221MPa και SMTS=586MPa. Από τους πίνακες 5.4, 5.10, και 7.5 στο πρότυπο, προκύπτουν αντίστοιχα $a_u = 0,96$, και $a_h = 0.93$. Για το συντελεστή περιφερειακής συγκόλλησης ισχύει ότι $a_{gw} \approx 0.7$, δεδομένου ότι $D/t \approx 52$. Οπότε, για μηδενική εξωτερική πίεση, οπότε:

$$f_y = (SMYS - f_{y,temp}) a_u = 221 * 0.96 = 212.16 \text{ MPa}$$

$$f_u = (SMTS - f_{u,temp}) a_u = 586 * 0.96 = 562.56 \text{ MPa}$$

Οπότε

$$f_{cb} = \text{Min}[f_y, f_u/1.15] = 212.16 \text{ MPa}$$

Άρα:

$$p_b(t) = \frac{2 * 0.734}{38.15 - 0.734} 212.16 \frac{2}{\sqrt{3}} = 9.61 \text{ MPa}$$

Έτσι:

$$\varepsilon_c = 0.78 \left(\frac{0.734}{38.15} - 0.01 \right) \left(1 + 5.75 \frac{p_{min} - 0}{9.61} \right) 0.93^{-1.5} 0.7 = 5.63 \cdot 10^{-3} (1 + 0.59 p_{min})$$

Τελικά, η κρίσιμη παραμόρφωση είναι:

$$\Rightarrow \varepsilon_c = 5.63 \cdot 10^{-3} + 3.316 \cdot 10^{-3} p_{min} \quad (3.3)$$

Πρότυπο CSA Z662

Η συνθήκη για την κρίσιμη παραμόρφωση σύμφωνα με τον CSA Z662 είναι λιγότερο συντηρητική από την αντίστοιχη συνθήκη του DNV. Η κρίσιμη παραμόρφωση δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_c = 0.5 \cdot \frac{WT}{OD} - 0.0025 + 3,000 \left(\frac{(p_i - p_e) OD}{2 \cdot WT \cdot E} \right)^2 \quad (3.5)$$

όπου

OD = εξωτερική διάμετρος,

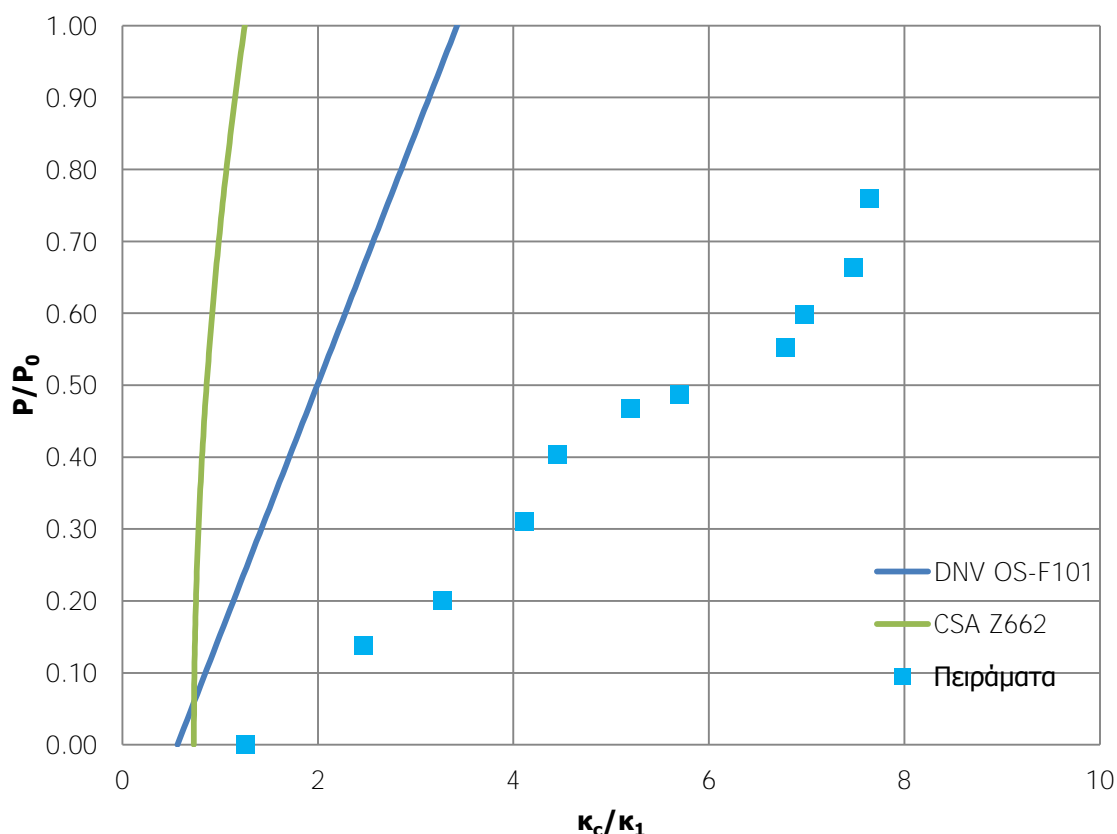
WT = πάχος τοιχώματος,

p_i = ελάχιστη εσωτερική πίεση που μπορεί να επιβληθεί,

p_e = εξωτερική πίεση.

Οπότε:

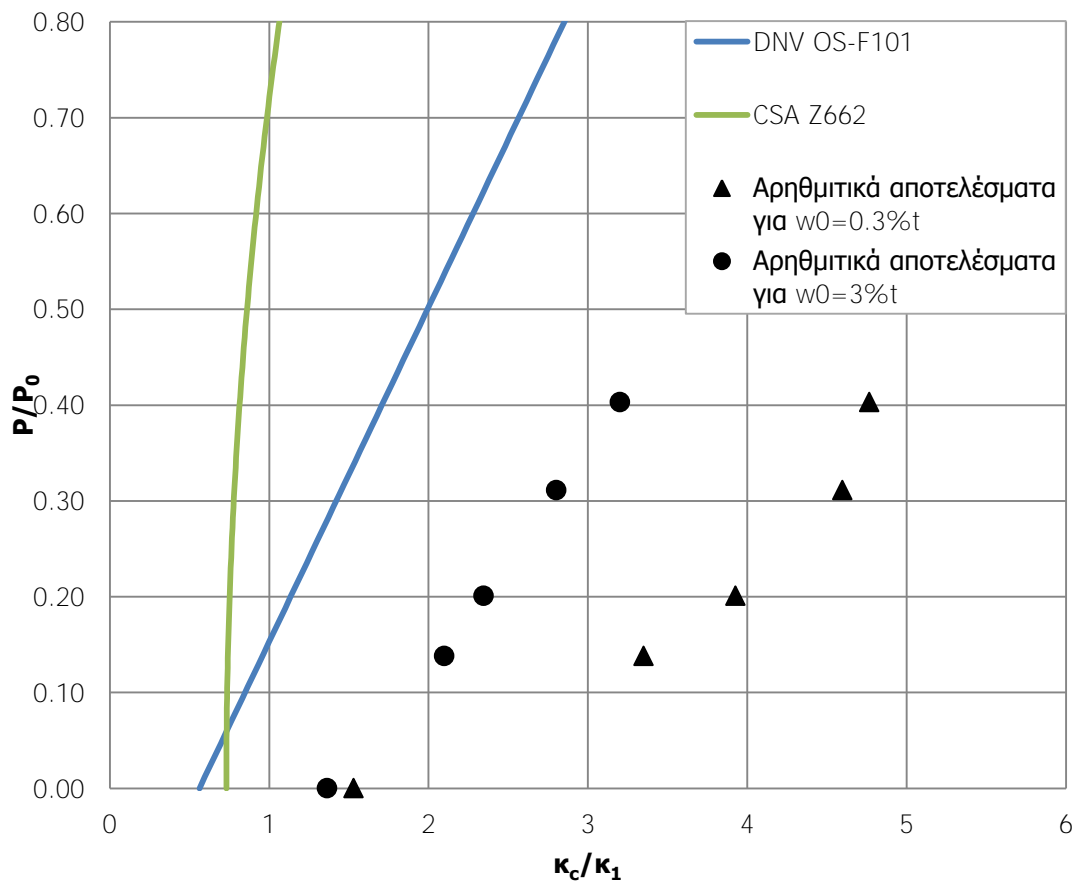
$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= 0.5 \cdot \frac{0.734}{38.15} - 0.0025 + 3000 \left(\frac{(p_i - 0)38.15}{2 \cdot 0.734 \cdot 185000} \right)^2 = \\ &= 7.31 \cdot 10^{-3} + 3000 \left(\frac{38.15}{271580} \right)^2 p_i^2 = 7.31 \cdot 10^{-3} + 5.92 \cdot 10^{-5} p_i^2 \end{aligned} \quad (3.6)$$



Εικόνα 3.23: Οριακές τιμές για την κρίσιμη καμπυλότητα που προκύπτουν από τα πρότυπα DNV OS-F101, CSA Z662 και πειραματικές τιμές.

Στο παραπάνω διάγραμμα (εικόνα 3.23), συγκρίνονται οι τιμές που προκύπτουν για την κρίσιμη καμπυλότητα κατά την κατάρρευση, από τα πρότυπα DNV OS-F101 και CSA Z662 με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τα πειράματα. Στην εικόνα 3.24, γίνεται η αντίστοιχη σύγκριση των οριακών τιμών από τα πρότυπα με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι οι τιμές που προκύπτουν πειραματικά για την κρίσιμη καμπυλότητα υπερβαίνουν κατά πολύ τις οριακές τιμές που προβλέπονται από τα διεθνή πρότυπα. Σύμφωνα με το Limam, οι καμπυλότητες που καταγράφονται είναι τόσο υψηλές που μπορεί να επιτυγχάνονται μόνο σε πολύ ακραίες συνθήκες εκτός σχεδιασμού, και υπό την προϋπόθεση υλικό διαθέτει επαρκή ολκιμότητα. Ο λόγος για τον οποίο επιτυγχάνονται αυτές οι τιμές, είναι ότι το μέγεθος της αρχικής ατέλειας στα

πειραματικά δοκίμια είναι εξαιρετικά μικρά. Με την εισαγωγή εσωτερικής πίεσης, η ήδη μικρή ατέλεια εξομαλύνεται, με αποτέλεσμα να είναι σχεδόν ανύπαρκτη. Σε πραγματικές εφαρμογές, κατά την κατασκευή, τη μεταφορά και την εγκατάσταση των αγωγών, δημιουργούνται αναπόφευκτα ατέλειες στη γεωμετρία του, οι οποίες πρέπει να προβλέπονται κατά το σχεδιασμό τους. Επομένως, τα παραπάνω πειράματα αφορούν δοκίμια στα οποία η ατέλεια είναι η ελάχιστη δυνατή, και για αυτό τα πειραματικά αποτελέσματα που προκύπτουν δεν είναι συγκρίσιμα με πραγματικές εφαρμογές αγωγών.



Εικόνα 3.24: Οριακές τιμές για την κρίσιμη καμπυλότητα που προκύπτουν από τα πρότυπα DNV OS-F101, CSA Z662 και αριθμητικά αποτελέσματα.

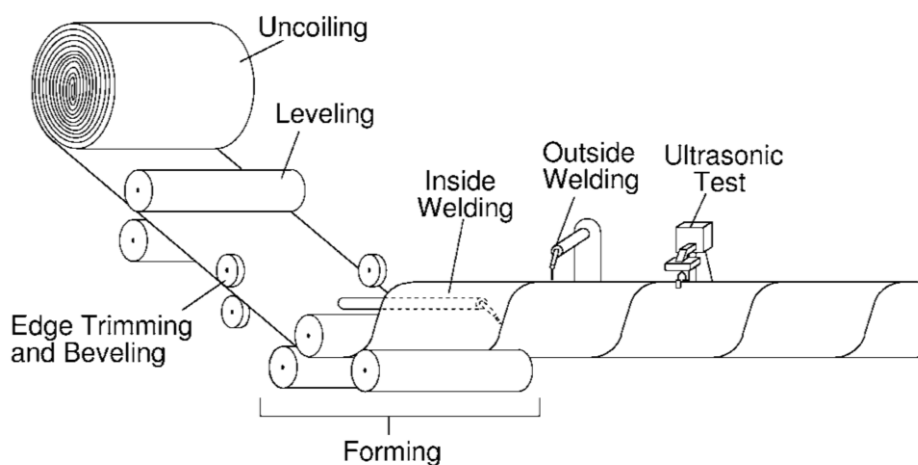
4. Προσομοίωση της κατεργασίας ελικοειδούς ραφής

4.1. Περιγραφή της κατεργασίας ελικοειδούς ραφής

Μία ευρέως διαδεδομένη κατεργασία κατασκευής αγωγών μεγάλης διαμέτρου, και συγκεκριμένα για αγωγούς με διάμετρο μεταξύ 20 και 100 ιντσών, είναι η κατεργασία με συγκόλληση ελικοειδούς ραφής. Η εικόνα 4.1 παρουσιάζει συνοπτικά την εν λόγω κατεργασία. Για την κατεργασία ελικοειδούς ραφής χρησιμοποιείται ένα συνεχές φύλλο ελάσματος με το επιθυμητό πάχος και πλάτος, το οποίο εκτυλίσσεται από ένα ρολό ελάσματος. Έπειτα, το έλασμα ισοπεδώνεται, καθώς εισέρχεται ανάμεσα από σε μία σειρά από έλαστρα. Μετά, αφού γίνει η διαμόρφωση των ακμών, ακολουθεί η διαδικασία κατά την οποία το έλασμα παίρνει σπειροειδή μορφή. Συγκεκριμένα, το έλασμα είναι τοποθετημένο σε κατάλληλη γωνία από τρία έλαστρα, τα οποία κάμπτουν το έλασμα έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή διάμετρος. Η διάμετρος του αγωγού μετά το τέλος της διαδικασίας ρυθμίζεται από το πλάτος του ελάσματος και τη γωνία του ελάσματος με τα έλαστρα. Αν B το πλάτος του ελάσματος και α η γωνία του ελάσματος με τα έλαστρα, τότε η διάμετρος δίνεται από την παρακάτω γεωμετρική σχέση:

$$\sin \alpha = \frac{B}{\pi D} \quad (4.1)$$

Ακολουθώς, λαμβάνει χώρα η ραφή, η πιο συνηθισμένη μέθοδος της οποίας είναι η συγκόλληση με βυθισμένο τόξο (SAW). Η εσωτερική συγκόλληση προηγείται της εξωτερικής. Μετά την ολοκλήρωση των συγκολλήσεων γίνεται μια σειρά από μη καταστρεπτικούς ελέγχους με υπερήχους, ώστε να ανιχνευτούν τυχόν σφάλματα στις συγκολλήσεις. Ο αγωγός, τότε, διέρχεται μέσα από μία σειρά έλαστρα ώστε να ενισχυθεί η κυκλικότητα του. Τέλος, ο αγωγός κόβεται στο επιθυμητό μήκος, και υφίσταται ραδιογραφικό έλεγχο και υδροστατικές δοκιμές.

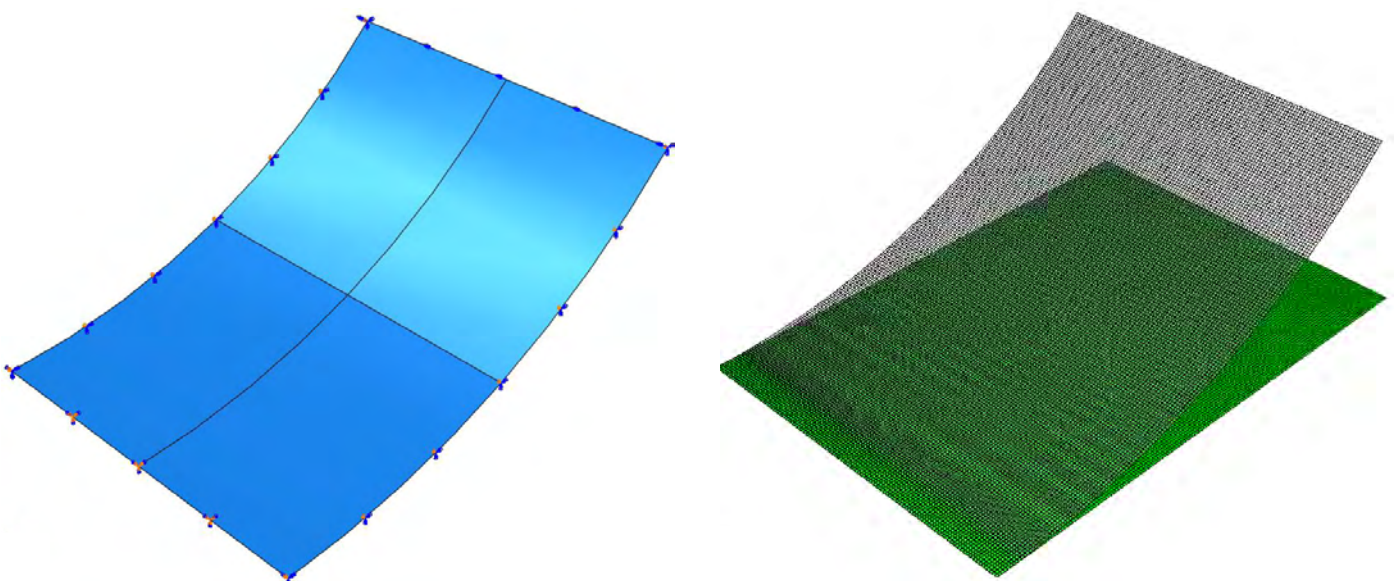


Εικόνα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση κατεργασίας ελικοειδούς ραφής. [10].

4.2. Περιγραφή των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων

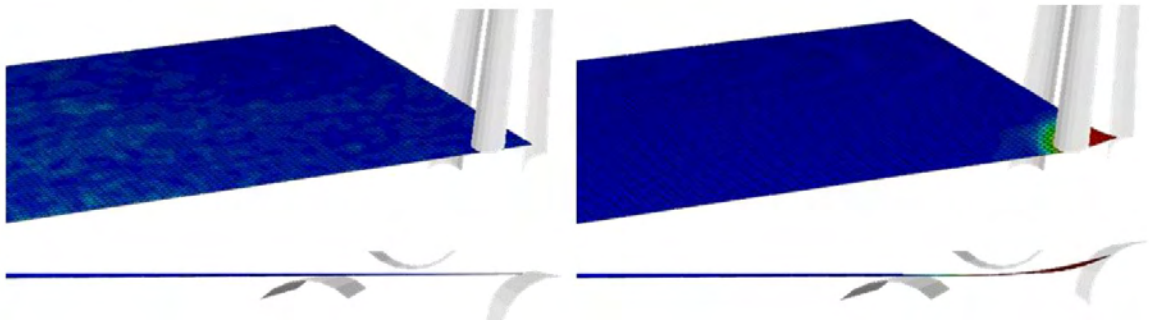
Η αριθμητική προσομοίωση που παρουσιάζεται σε αυτήν την ενότητα έχει ως στόχο την πρόβλεψη των τάσεων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής σωλήνων ελικοειδούς ραφής. Οι τάσεις αυτές είναι το σύνολο των παραμενουσών τάσεων από την εκτύλιξη του ελάσματος από το ρολό και την εν ψυχρώ κατεργασία κάμψης του για την ελικοειδή ραφή. Οι προκύπτουσες τάσεις χρησιμοποιούνται ως αρχικές συνθήκες στο αριθμητικό μοντέλο για την προσομοίωση της κάμψης αγωγών με εσωτερική πίεση που περιγράφεται στις επόμενες ενότητες.

Για τα αριθμητικά μοντέλα για την προσομοίωση της κατεργασίας εκτύλιξης του ελάσματος καθώς και της κατεργασίας ελικοειδούς ραφής χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ABAQUS/Standard. Για τον υπολογισμό των παραμενουσών τάσεων από την εκτύλιξη του ελάσματος, χρησιμοποιήθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο που προσομοιώνει ικανοποιητικά τη διαδικασία και συνοψίζεται στις εικόνες που ακολουθούν. Αρχικά, δεδομένου ότι ρολό του ελάσματος έχει προκύψει από θερμή έλαση, το έλασμα θεωρείται χωρίς φορτίο. Στο μοντέλο σχεδιάζεται ένα τμήμα του ελάσματος τυλιγμένο στο ρολό. Το πάχος και το πλάτος του ελάσματος επιλέγονται με βάση τη διάμετρο του αγωγού για τον οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, ενώ οι υπολογισμοί για τις παραμένουσες τάσεις έγιναν για διάφορες ακτίνες για το ρολό. Το έλασμα πακτώνεται από την μία πλευρά, δεδομένου ότι συγκρατείται από το ρολό, ενώ όλες οι άλλες πλευρές του είναι ελεύθερες. Έπειτα, επιβάλλεται μία στροφή στην απέναντι από την πακτωμένη πλευρά, η οποία τείνει να κάνει το έλασμα επίπεδο, προσομοιώνοντας την διαδικασία του de-coiling. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο αυτό είναι τετρακομβικά στοιχεία κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης. Με τη διαδικασία αυτή υπολογίζονται οι παραμένουσες τάσεις από το «ξετύλιγμα» του ελάσματος από το ρολό, οι οποίες έπειτα θα χρησιμοποιηθούν ως αρχικές συνθήκες για τη συνέχεια της προσομοίωσης της κατεργασίας.



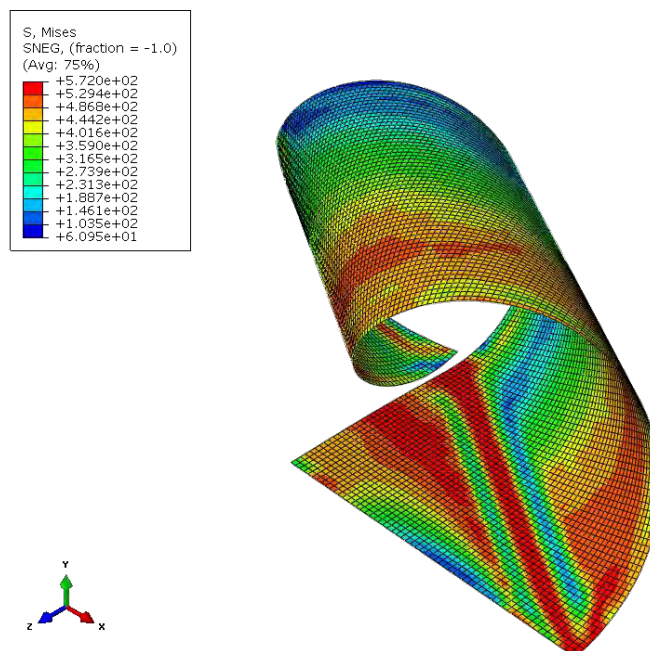
Εικόνα 4.2: (α) Γεωμετρία και συνοριακές του μοντέλου που προσομοιώνει την εκτύλιξη του ελάσματος, (β) Αρχική και παραμορφωμένη κατάσταση του ελάσματος.

Αφού υπολογιστούν οι παραμένουσες τάσεις από το πρώτο στάδιο της κατεργασίας, ακολουθεί η διαδικασία που προσομοιώνει την ελικοειδή ραφή του ελάσματος και παρουσιάζεται στην εικόνα 4.3 (spiral cold bending). Το έλασμα κινείται στην διαμήκη διεύθυνση μέχρι η γωνία του να φτάσει στο σύστημα των τριών ελαστρων, τα οποία είναι τοποθετημένα σε κατάλληλη γωνία και θέση.



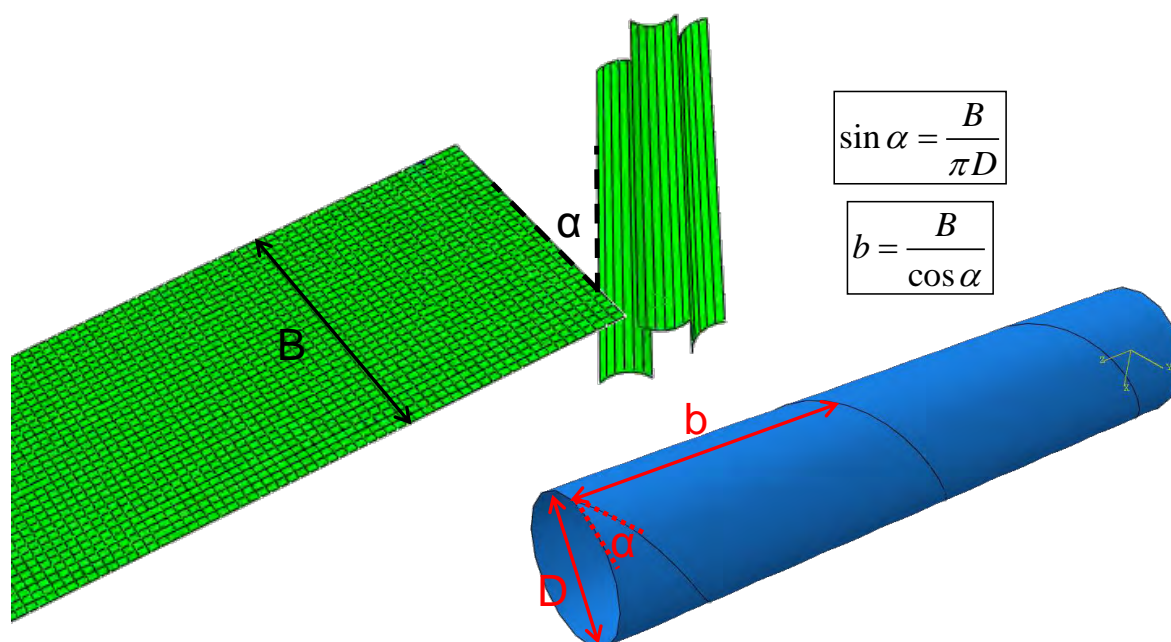
Εικόνα 4.3: Προώθηση του ελάσματος στο σύστημα τριών ελαστρων.

Αφού το έλασμα τοποθετηθεί μέσα στο σύστημα κάμψεως τριών ελαστρων, τα έλαστρα λαμβάνουν την κατάλληλη θέση, ώστε να κάμψουν το έλασμα στην απαραίτητη καμπυλότητα για να επιτευχθεί η επιθυμητή διάμετρος για το σωλήνα. Με τη συνεχή προώθηση του ελάσματος δια μέσου των ελαστρων επιτυγχάνεται η κάμψη του ελάσματος που τελικά παίρνει σπειροειδή μορφή.



Εικόνα 4.4: Τελική ελικοειδής μορφή του ελάσματος μετά την κατεργασία.

Το παραμορφώσιμο έλασμα χάλυβα προσομοιώνεται με τετρακομβικά στοιχεία κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης (S4R), ενώ τα έλαστρα ως άκαμπτα μέρη. Το υλικό του ελάσματος είναι ελαστοπλαστικό υλικό, και συγκεκριμένα χάλυβας X70 με όριο διαρροής 70 ksi (482 MPa) με μέτρο ελαστικότητας $E=205$ GPa και $\nu=0.3$. Σχετικά με το πλέγμα του ελάσματος, ένα κατάλληλο μέγεθος για τα στοιχεία επιλέγεται έτσι ώστε να επιτευχθεί η μεγαλύτερη ακρίβεια, και συγκεκριμένα το μέγεθος ενός στοιχείου του ελάσματος ισούται περίπου με 3% της διαμέτρου του αγωγού για την κατασκευή του οποίου θα χρησιμοποιηθεί. Επιλέγονται 5 σημεία ολοκλήρωσης κατά το πάχος. Οι ιδιότητες της αλληλεπίδρασης μεταξύ του ελάσματος και των ελαστρων ορίζονται μέσω ενός αλγόριθμου επαφής, όπου τα έλαστρα θεωρούνται ως «master surfaces» και το έλασμα ως "slave surfaces". Επιπλέον, στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης, αμελούνται οι τριβές μεταξύ ελάσματος- ελαστρων.



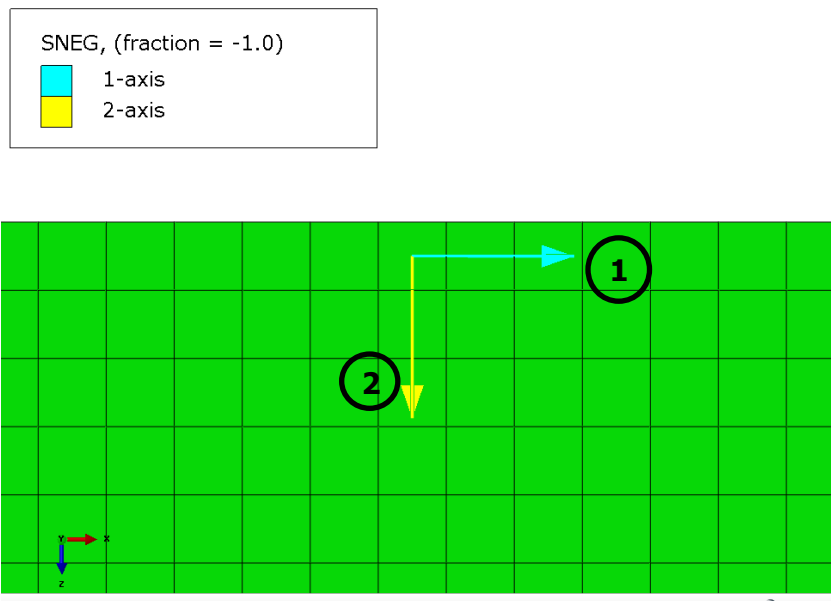
Εικόνα 4.5: Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αριθμητικού μοντέλου για την κατεργασία ελικοειδούς ραφής.

Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αριθμητικού μοντέλου απεικονίζονται στην εικόνα 4.5. Δεδομένης της επιθυμητής διαμέτρου για τον αγωγό, μπορούν να ρυθμιστούν η γωνία της διαμόρφωσης καθώς και το απαιτούμενο πλάτος για το έλασμα. Για τους υπό εξέταση αγωγούς, οι παραμένουσες τάσεις υπολογίστηκαν για διαφορετικά ζεύγη γωνιών και πλάτους ελάσματος, ενώ πραγματοποιήθηκε μία παραμετρική μελέτη για την επιρροή αυτών των γεωμετρικών μεγεθών στο μέγεθος των παραμενουσών τάσεων και στην καμπτική συμπεριφορά του αγωγού.

4.3. Υπολογισμός παραμενουσών τάσεων

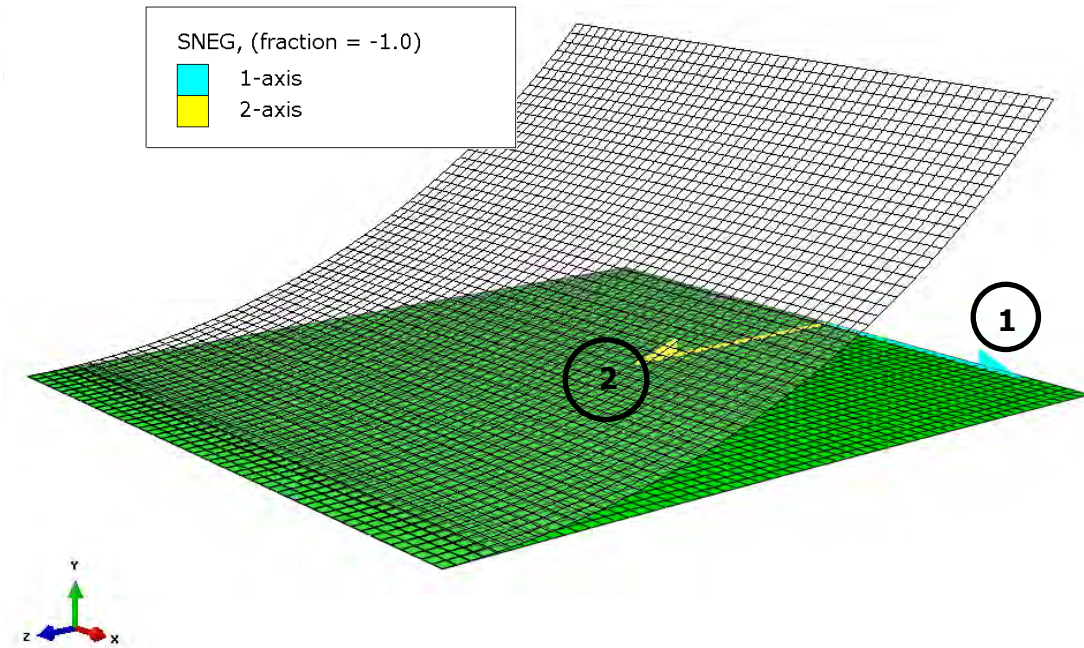
Οι τάσεις που προκύπτουν από τις ανωτέρω αναλύσεις είναι υπολογισμένες στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων κάθε στοιχείου κελύφους κάθε μοντέλου. Οπότε, για να εισάγουμε τις παραμένουσες τάσεις από το μοντέλο για την εκτύλιξη του ελάσματος από το ρολό σε αυτό για την ελικοειδή κατεργασία, και τέλος να εισάγουμε τις συνολικές παραμένουσες τάσεις στο μοντέλο για την κάμψη του αγωγού, πρέπει να γίνουν μία σειρά από μετατροπές ώστε να είναι συμβατά το ένα μοντέλο με το άλλο.

Η βασική διαφορά του από το ολικό σύστημα συντεταγμένων είναι ότι το τοπικό σύστημα συντεταγμένων ακολουθεί το στοιχείο κατά την παραμόρφωσή του. Στην εικόνα που ακολουθεί, στην κάτω δεξιά γωνία, φαίνεται το ολικό σύστημα συντεταγμένων (X, Y, Z) ενώ τα μπλε και κίτρινο βέλη αντιστοιχούν στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων (1, 2, 3). Πάνω στην επιφάνεια κάθε στοιχείου κελύφους, βρίσκονται οι τοπικές κατευθύνσεις 1 και 2. Η τοπική κατεύθυνση 1 είναι η προβολή της ολικής X-κατεύθυνσης πάνω στο στοιχείο και η τοπική κατεύθυνση 2 είναι κάθετη στην τοπική-1. Η τοπική κατεύθυνση 3 είναι κάθετη στην επιφάνεια του στοιχείου (στην εικόνα είναι προς τα μέσα), έτσι ώστε οι τοπικές κατευθύνσεις 1,2 και 3 να ικανοποιούν τον κανόνα του δεξιού χεριού.



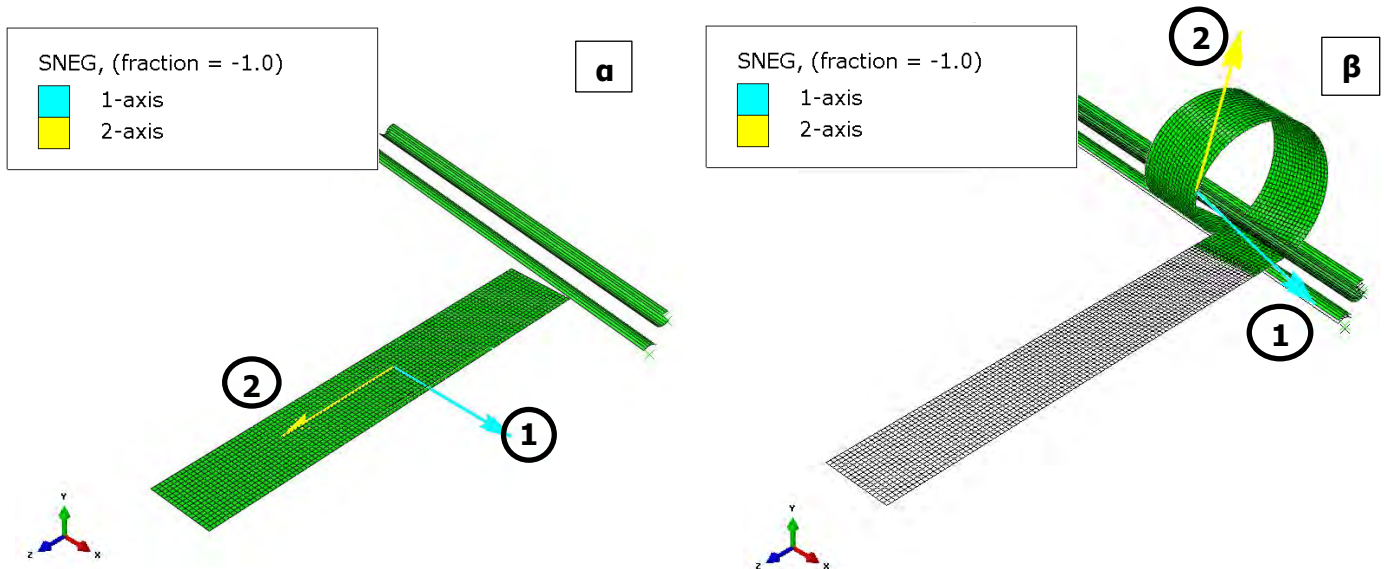
Εικόνα 4.6: Ολικό και τοπικό σύστημα συντεταγμένων σε στοιχεία κελύφους.

Στην εικόνα 4.7, απεικονίζεται η αρχική και η παραμορφωμένη κατάσταση από το μοντέλο που προσομοιώνει την εκτύλιξη του ελάσματος από το ρολό. Στην περίπτωση αυτή, το τοπικό σύστημα συντεταγμένων στην παραμορφωμένη κατάσταση δεν έχει υποστεί κάποια περιστροφή σε σχέση με την αρχική κατάσταση.



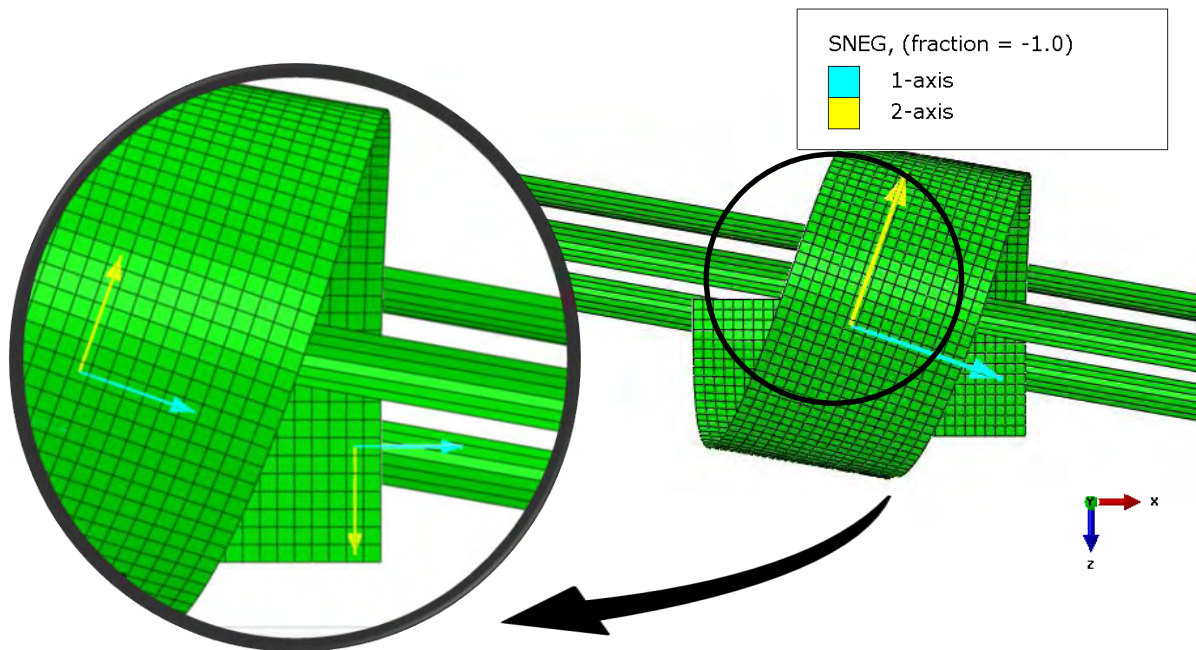
Εικόνα 4.7: Ολικό και τοπικό σύστημα συντεταγμένων στο μοντέλο για την εκτύλιξη του ελάσματος.

Αφού υπολογίσουμε με το παραπάνω μοντέλο τις παραμένουσες τάσεις από το «ξετύλιγμα» του ελάσματος από το ρολό, εισάγουμε τις τάσεις αυτές ως αρχικές συνθήκες στο μοντέλο που προσομοιώνει την ελικοειδή κατεργασία. Πρώτα, όμως, εξετάζουμε τις μετατροπές που ενδέχεται να απαιτούνται για είναι εξασφαλίσουμε τη συμβατότητα μεταξύ των δύο μοντέλων. Δεδομένου ότι το τοπικό σύστημα συντεταγμένων της αρχικής κατάστασης του δεύτερου μοντέλου (εικόνα 4.8(α)) συμπίπτει με το τοπικό σύστημα συντεταγμένων της τελικής κατάστασης του πρώτου μοντέλου (εικόνα 4.7), δεν απαιτείται κάποια μετατροπή σε αυτό το στάδιο.



Εικόνα 4.8: Ολικό και τοπικό σύστημα συντεταγμένων στο μοντέλο για την κατεργασία ελικοειδούς μορφής **(α)** αρχική κατάσταση, **(β)** παραμορφωμένη κατάσταση.

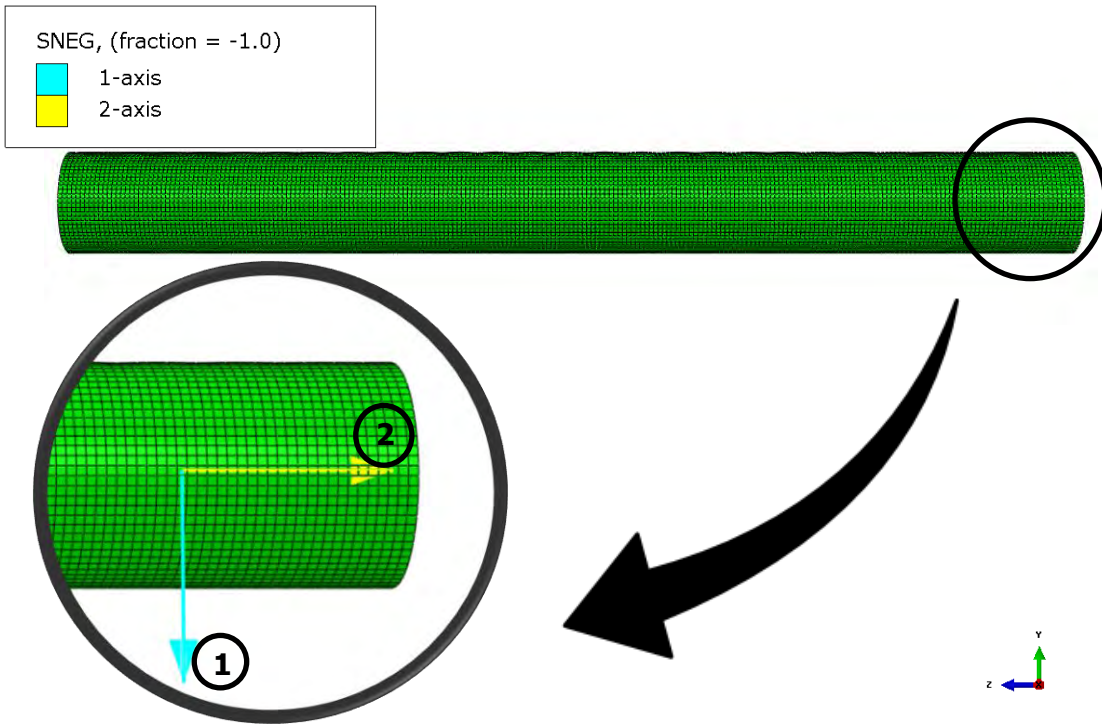
Από την εικόνα 4.8, γίνεται αντιληπτό ότι κατά την παραμόρφωση του ελάσματος κατά την κατεργασία ελικοειδούς ραφής, το τοπικό σύστημα συντεταγμένων των στοιχείων κελύφους του ελάσματος μεταβάλλεται. Συγκεκριμένα, υφίσταται μία περιστροφή σε σχέση με το αρχικό, η οποία διασαφηνίζεται στην εικόνα 4.9.



Εικόνα 4.9: Περιστροφή του τοπικού συστήματος συντεταγμένων στην παραμορφωμένη κατάσταση στο μοντέλο για την κατεργασία ελικοειδούς μορφής.

Στην παραμορφωμένη κατάσταση, το έλασμα, αφού διέλθει από τα έλαστρα, έχει περιστραφεί κατά γωνία α ώστε να επιτευχθεί η κατεργασία της ελικοειδούς ραφής. Η γωνία αυτή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εξαρτάται από το πλάτος του ελάσματος, για μία δεδομένη τιμή της ζητούμενης διαμέτρου. Επομένως, το τοπικό σύστημα συντεταγμένων, ακολουθώντας την παραμόρφωση του κάθε στοιχείου, υφίσταται, επίσης, μία περιστροφή γωνίας α . Για να προχωρήσουμε λοιπόν, απαιτείται ο μετασχηματισμός με τη χρήση των κατάλληλων τανυστικών εξισώσεων των παραμενουσών τάσεων από το τοπικό σε ένα νέο ενδιάμεσο σύστημα συντεταγμένων, που προκύπτει από δεξιόστροφη περιστροφή του πρώτου κατά γωνία α .

Οι τάσεις που υπολογίζονται από το παραπάνω μοντέλο, εισάγονται τελικά ως αρχικές συνθήκες στο μοντέλο που προσομοιώνει την κάμψη του αγωγού υπό εσωτερική πίεση. Το τοπικό σύστημα συντεταγμένων των στοιχείων κελύφους του αγωγού παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4.10: Τοπικό σύστημα συντεταγμένων στο μοντέλο για την κάμψη του αγωγού υπό εσωτερική πίεση.

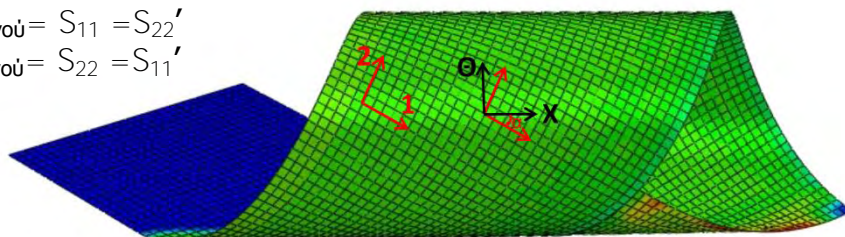
Παρατηρούμε, στο παραπάνω μοντέλο, ότι η τοπική συνιστώσα 2 αντιστοιχεί στην αξονική διεύθυνση x του αγωγού, ενώ η τοπική συνιστώσα 1 αντιστοιχεί στην περιφερειακή διεύθυνση θ του αγωγού. Στο προηγούμενο μοντέλο, που προσομοιώνει την ελικοειδή κατεργασία, η αξονική διεύθυνση του αγωγού αντιστοιχεί στην τοπική 1, ενώ η περιφερειακή διεύθυνση του αγωγού είναι η τοπική 2 συνιστώσα. Συνοπτικά, λοιπόν, οι μετατροπές που πρέπει να γίνουν είναι:

1. Ο μετασχηματισμός των παραμενουσών τάσεων μετά την κατεργασία ελικοειδούς ραφής από το τοπικό, σε νέο ενδιάμεσο σύστημα συντεταγμένων, που προκύπτει από δεξιόστροφη περιστροφή του πρώτου κατά γωνία α .

$$\begin{aligned} S_{11} &\rightarrow S_{11}' \\ S_{22} &\rightarrow S_{22}' \\ S_{12} &\rightarrow S_{12}' \end{aligned}$$

2. Αντιστοίχιση με την αξονική διεύθυνση x και την περιφερειακή διεύθυνση θ του αγωγού, που αντιστοιχούν στις κατευθύνσεις 2 και 1 του τοπικού συστήματος του αγωγού.

$$\begin{aligned} S_{\theta, \text{αγωγού}} &= S_{11} = S_{22}' \\ S_{x, \text{αγωγού}} &= S_{22} = S_{11}' \end{aligned}$$



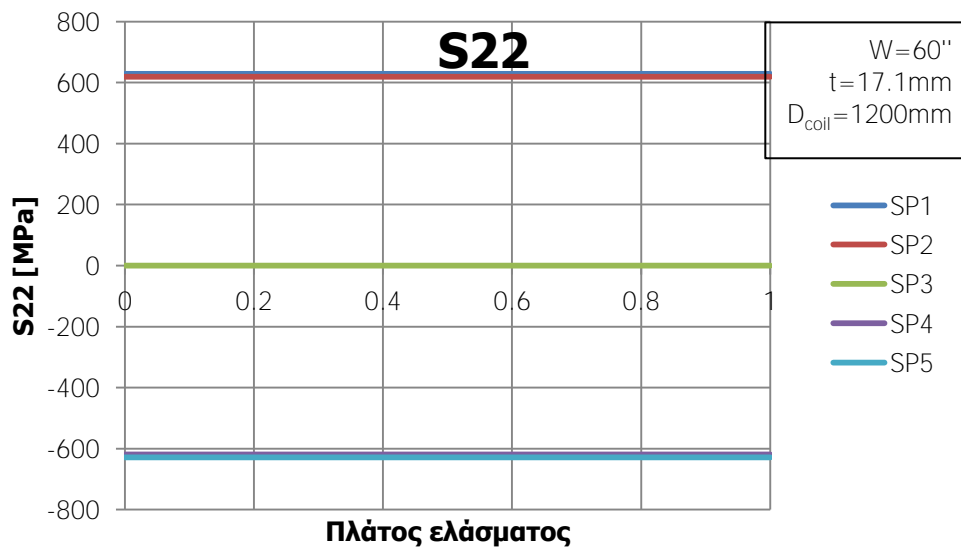
Εικόνα 4.11: Μετατροπή από το τοπικό στο ολικό σύστημα συντεταγμένων.

Αποτελέσματα από το μοντέλο 1

Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο που προσομοιώνει την εκτύλιξη του αγωγού από το ρολό, δείχνουν μία ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων κατά το πλάτος του ελάσματος.



Εικόνα 4.12: Η συνιστώσα S11 του τοπικού συστήματος συντεταγμένων του μοντέλου 1.



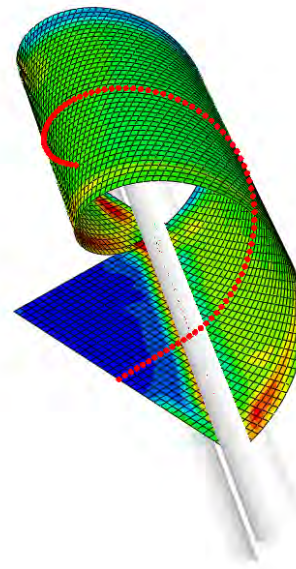
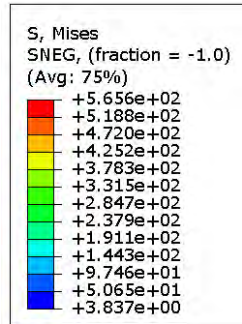
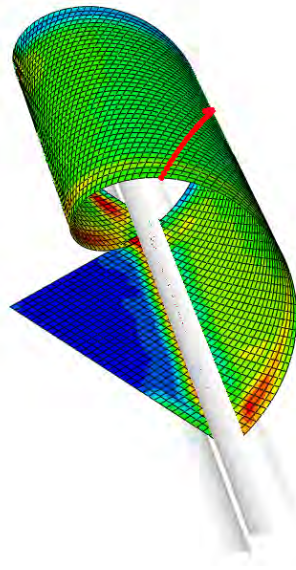
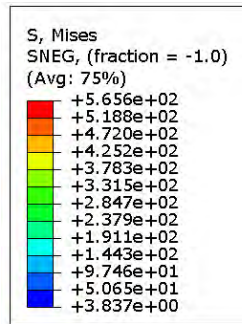
Εικόνα 4.13: Η συνιστώσα S22 του τοπικού συστήματος συντεταγμένων του μοντέλου 1.

Τα διαγράμματα 4.11 και 4.12, απεικονίζουν την κατανομή των τάσεων S11 και S22 κατά το πλάτος του ελάσματος κατά την εκτύλιξη του από το ρολό. Τα SP1, SP2, SP3, SP4 και SP5 είναι τα σημεία ολοκλήρωσης κατά το πάχος. Συγκεκριμένα, το SP1 βρίσκεται στην εσωτερική και το SP5 στην εξωτερική επιφάνεια. Υπενθυμίζουμε ότι αναφερόμαστε στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν έλασμα με πλάτος 60" και πάχος 17.1mm, για ρολό με διάμετρο 1200mm. Το συγκεκριμένο έλασμα θα χρησιμοποιηθεί αργότερα για την κατασκευή αγωγού διαμέτρου 36". Τα αποτελέσματα έχουν ομοιόμορφη κατανομή για τις S12 και S12, ενώ οι τιμές που προκύπτουν για την S12 είναι αμελητέες. Τα αποτελέσματα προκύπτουν για διάφορες διαστάσεις ελασμάτων είναι αντίστοιχα, οπότε η παρεμβολή τους παραλείπεται.

Αποτελέσματα από το μοντέλο 2

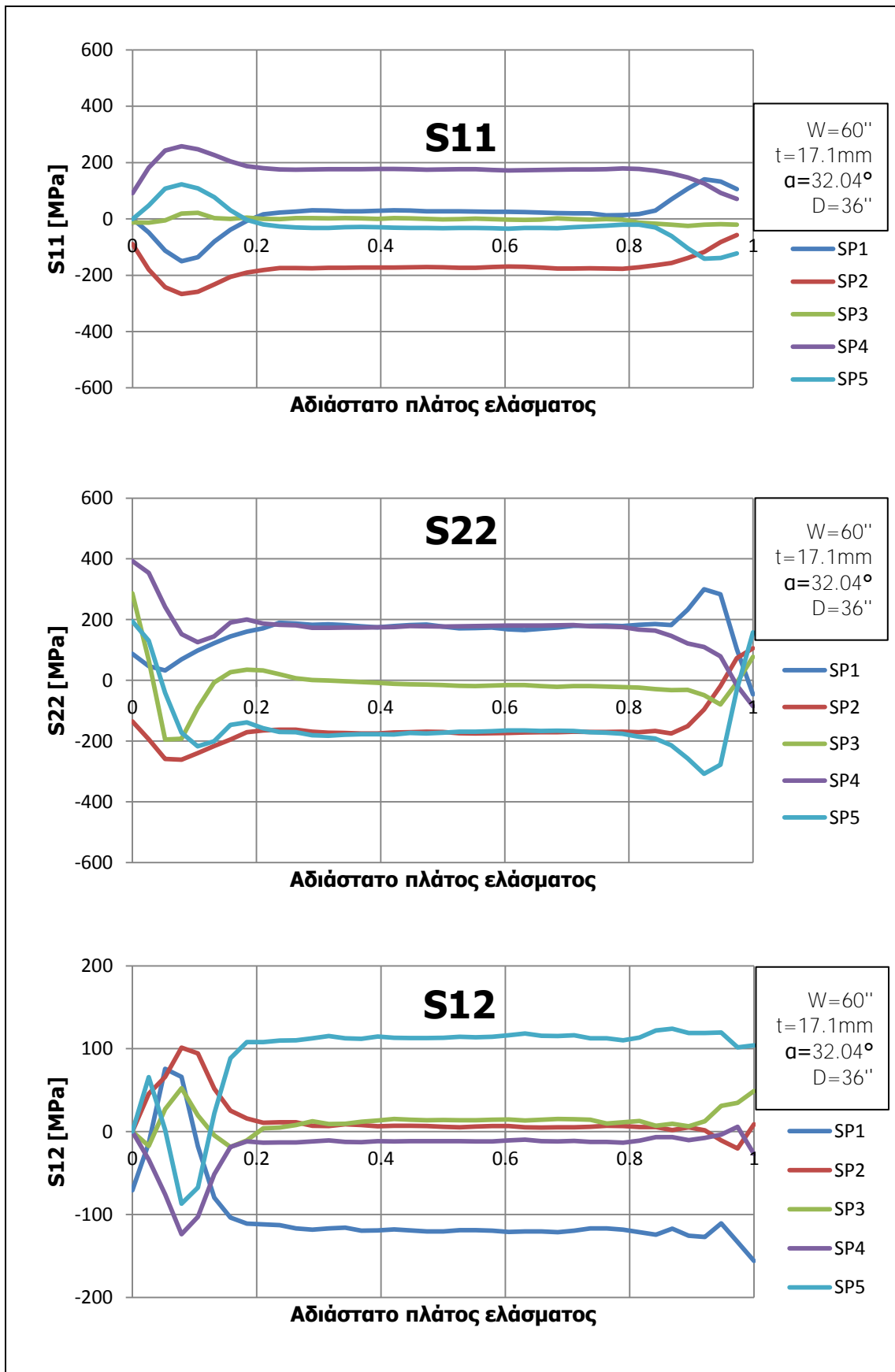
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο που προσομοιώνει την κατεργασία της ελικοειδούς ραφής του ελάσματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων και αφορούν έλασμα με πλάτος 60" και πάχος 17.1mm για την κατασκευή αγωγού διαμέτρου 36". Η γωνία α των ελάστρων από το έλασμα ισούται με 32.04° . Στόχος είναι ο προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων που προκύπτουν από την κατεργασία της ελικοειδούς ραφής του ελάσματος, ώστε να εισαχθούν ως αρχικές συνθήκες στους αγωγούς. Για να γίνει αυτό, πρέπει να βρεθεί το βέλτιστο σημείο στο οποίο το μέγεθος των τάσεων είναι ενδεικτικό για την κατεργασία.

Τα διαγράμματα στις εικόνες 4.14 και 4.15 απεικονίζουν την κατανομή των τάσεων S11, S22 και S12 στο έλασμα κατά την κατεργασία ελικοειδούς ραφής. Συγκεκριμένα, διερευνάται η κατανομή των παραμενουσών τάσεων κατά μήκος μιας γραμμής κάθετα στην κατεύθυνση της έλικας, που επισημαίνεται στην εικόνα 4.13. Έπειτα, εξετάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα που αφορούν μια γραμμή παράλληλα στην κατεύθυνση της έλικας. Υπενθυμίζεται ότι αναφερόμαστε στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Τα SP1, SP2, SP3, SP4 και SP5 είναι τα σημεία ολοκλήρωσης κατά το πάχος, όπως στα προηγούμενα, με το SP1 στην εσωτερική και το SP5 στην εξωτερική επιφάνεια. Αρχικά, για λόγους σύγκρισης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει χωρίς την εισαγωγή των παραμενουσών τάσεων από την εκτύλιξη του ελάσματος, τα οποία έπειτα συγκρίνονται με αυτά στα οποία συνυπολογίζονται οι παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος.

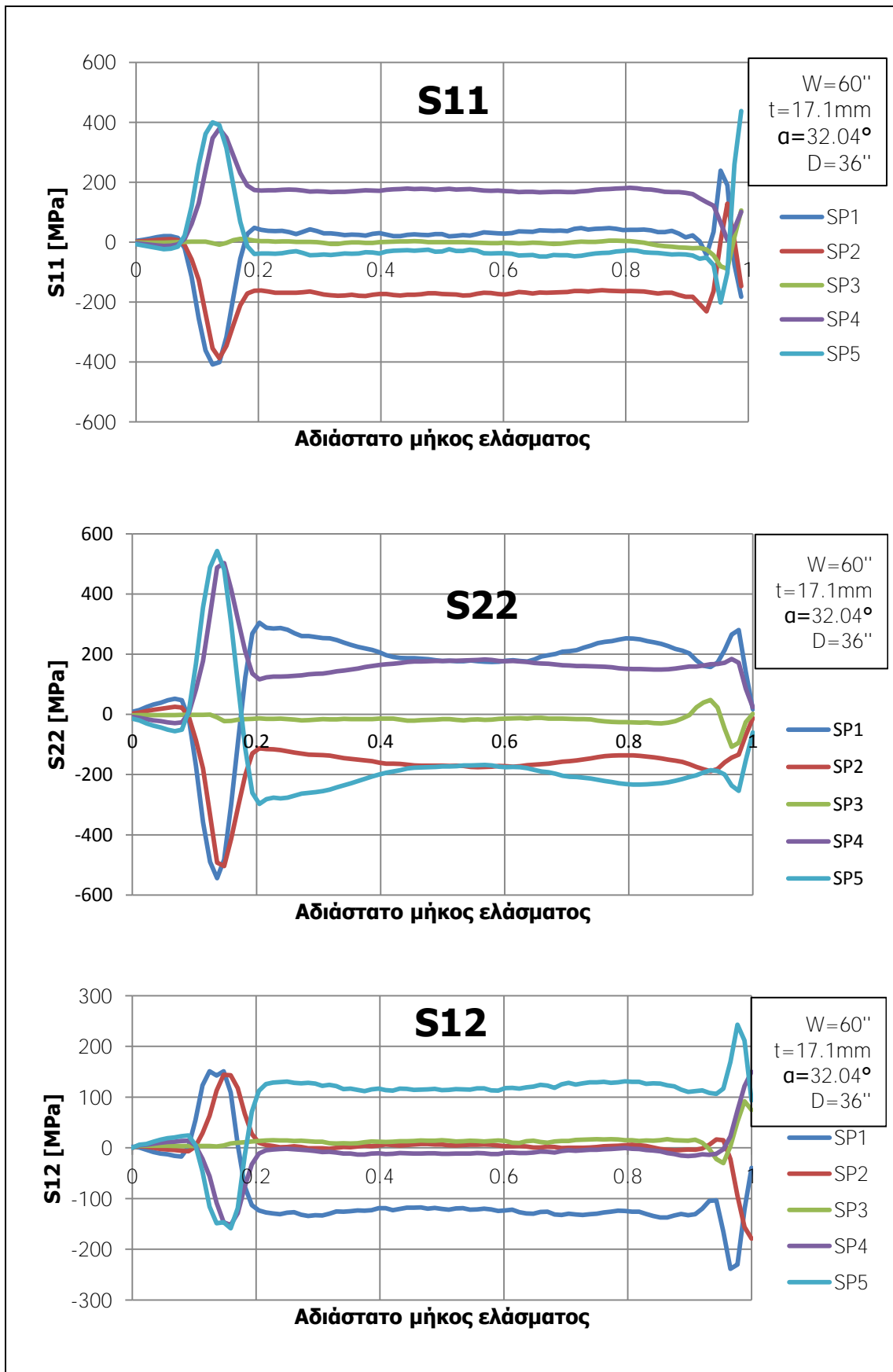


Εικόνα 4.14: Γραμμή κάθετη και γραμμή παράλληλη στην έλικο πάνω στις οποίες μετρήθηκαν οι συνιστώσες της τάσης.

Στα διαγράμματα της εικόνας 4.14, εξετάζεται η κατανομή των τάσεων S_{11} , S_{22} και S_{12} σε μια γραμμή κάθετα στην κατεύθυνση της έλικας. Τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι, στο κεντρικό τμήμα του ελάσματος οι τάσεις έχουν μια σταθερή τιμή. Αντιθέτως, οι τιμές στα άκρα του ελάσματος παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις, που οφείλονται κυρίως στις οριακές συνθήκες που επιβάλλονται στις ελεύθερες ακμές. Σε μια γραμμή παράλληλα στην κατεύθυνση της έλικας, δηλαδή κατά το μήκος του ελάσματος, οι τιμές για τις συνιστώσες της τάσης έχουν, επίσης, σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή, όπως φαίνεται στα διαγράμματα στην εικόνα 4.15. Εξαιρέση αποτελούν τα άκρα του ελάσματος, όπου το έλασμα έρχεται σε επαφή με τα έλαστρα.

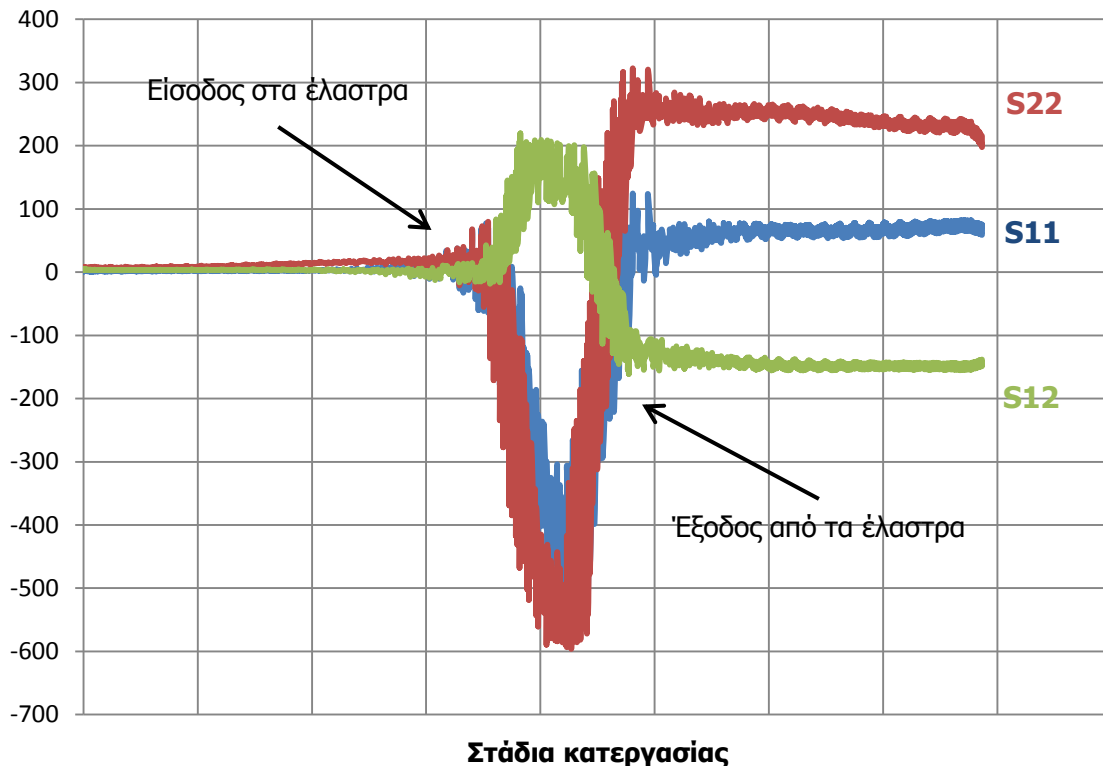


Εικόνα 4.15: Κατανομή των τάσεων S11, S22 και S12 κατά μήκος μιας γραμμής κάθετη στην κατεύθυνση της έλικας (τοπικό σύστημα συντεταγμένων), αμελώντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος.



Εικόνα 4.16: Κατανομή των τάσεων S_{11} , S_{22} και S_{12} κατά μήκος μιας γραμμής παράλληλα στην κατεύθυνση της έλικας (τοπικό σύστημα συντεταγμένων), αμελώντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος.

Στη εικόνα 4.16, παρουσιάζεται η εξέλιξη των τάσεων σε ένα συγκεκριμένο κόμβο του ελάσματος κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Ειδικότερα, το διάγραμμα αναφέρεται σε έναν κόμβο που βρίσκεται στο κέντρο του ελάσματος και στην εσωτερική επιφάνειά του. Τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει μια ταχεία αύξηση των τάσεων λόγω της κάμψης του όταν το έλασμα διέρχεται από τα έλαστρα, όπως φαίνεται στην εικόνα. Μετά από αυτό το στάδιο, οι τάσεις σταθεροποιούνται σε χαμηλότερο επίπεδο λόγω της ελαστικής επαναφοράς.

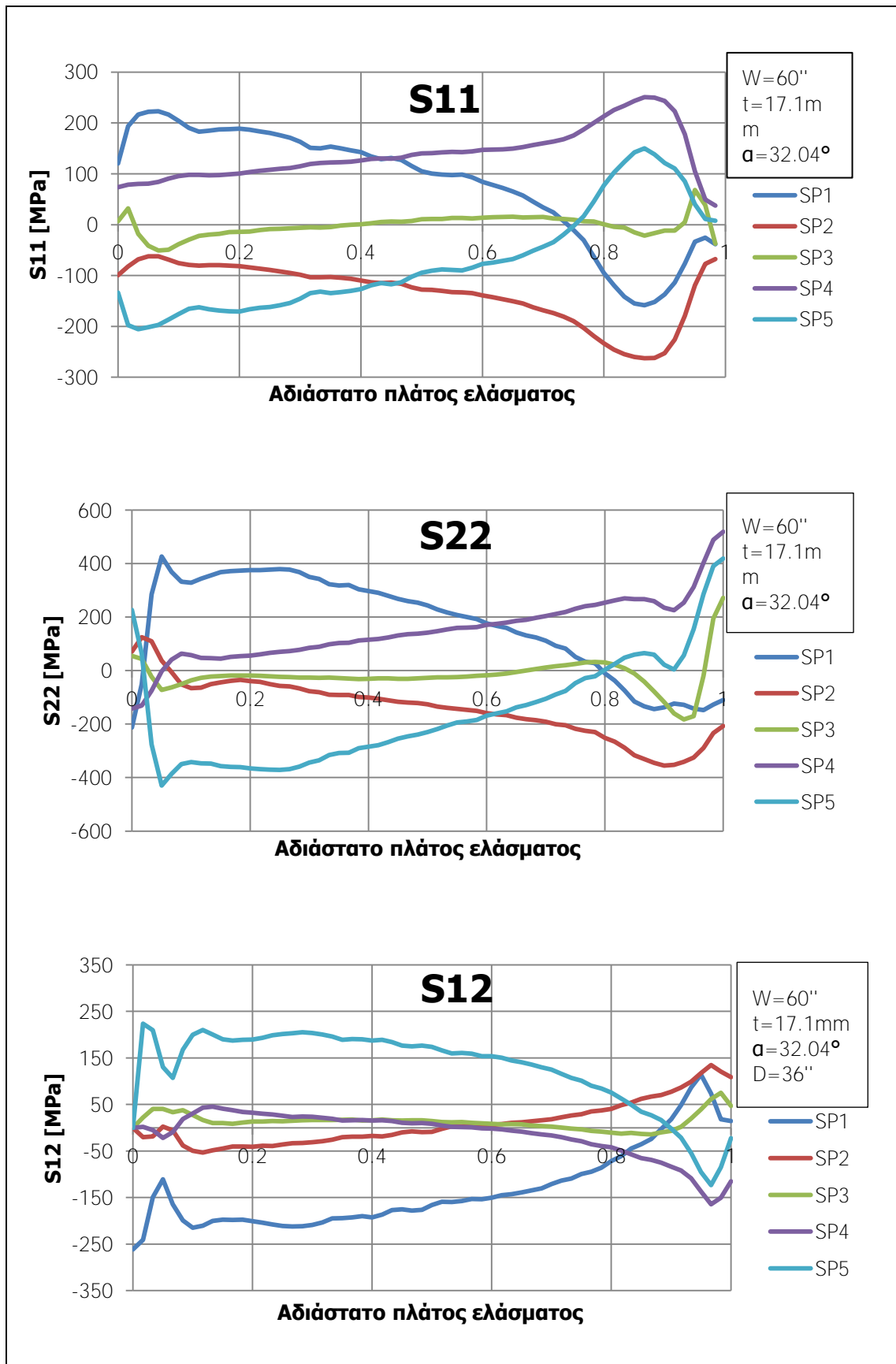


Εικόνα 4.17: Εξέλιξη των τάσεων κατά την κατεργασία της κατεργασία ελικοειδούς ραφής, αμελώντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος.

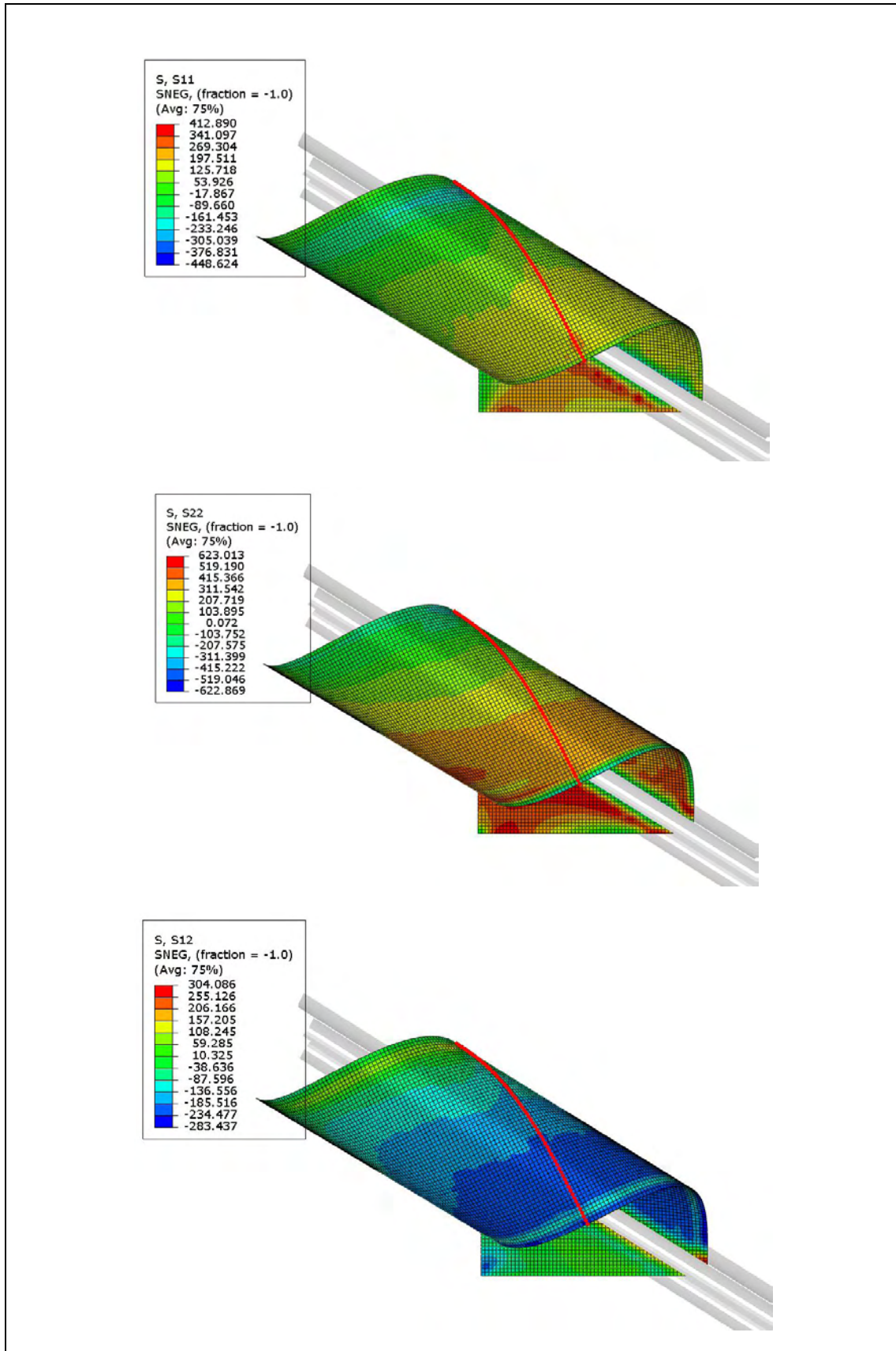
Τα αριθμητικά αποτελέσματα στα διαγράμματα 4.14-4.16, έχουν προκύψει χωρίς την εισαγωγή των παραμενουσών τάσεων από την εκτύλιξη του ελάσματος. Αναφέρονται, δηλαδή, στις προκύπτουσες τάσεις από την κάμψη του ελάσματος για την κατεργασία της ελικοειδούς ραφής, αμελώντας τις παραμένουσες τάσεις που προκύπτουν από την εκτύλιξη του ελάσματος από το ρολό. Στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα από τις αναλύσεις στις οποίες συμπεριλαμβάνονται οι παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη κι έπειτα συγκρίνονται με αυτά από τις αναλύσεις στις οποίες αμελούνται.

Συγκεκριμένα, έλασμα με πλάτος 60" και πάχος 17.1mm, εκτυλίσσεται από ρολό με διάμετρο 1200mm, και οι τάσεις που προκύπτουν από το μοντέλο που προσομοιώνει την εκτύλιξη του ελάσματος, όπως περιγράφηκε παραπάνω, εισάγονται ως αρχικές συνθήκες στο μοντέλο που προσομοιώνει την κάμψη του ελάσματος για την κατεργασία ελικοειδούς ραφής και την κατασκευή αγωγού διαμέτρου 36". Δεδομένου ότι διερευνάται το βέλτιστο σημείο στο οποίο το μέγεθος των τάσεων είναι ενδεικτικό για την κατεργασία, εξετάζεται η κατανομή των παραμενουσών τάσεων κατά μήκος μιας γραμμής κάθετα κι έπειτα κατά μήκος μιας γραμμής παράλληλα στην κατεύθυνση της έλικας. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η εξέλιξη των τάσεων στον κεντρικό κόμβο του ελάσματος κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Τέλος, πραγματοποιούνται μία σειρά από συγκρίσεις μεταξύ των περιπτώσεων που περιλαμβάνουν και αυτών που αμελούν τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος, καθώς επίσης και συγκρίσεις στην κατανομή των τάσεων σε ελάσματα που κάμπτονται με διαφορετική γωνία.

Στα διαγράμματα της εικόνας 4.17, εξετάζεται η κατανομή των τάσεων S11, S22 και S12 σε μια γραμμή κάθετα στην κατεύθυνση της έλικας. Με την εισαγωγή των παραμενουσών τάσεων από την εκτύλιξη του ελάσματος, η ομοιομορφία στην κατανομή των τάσεων που υπήρχε χωρίς αυτές διαταράσσεται. Οι μέγιστες αποκλίσεις παρατηρούνται στα άκρα της λωρίδας, και οφείλονται κυρίως στις οριακές συνθήκες που επιβάλλονται στις ελεύθερες ακμές. Η εικόνα 4.18 που ακολουθεί παρουσιάζει την κατανομή των τάσεων στην παραμορφωμένη εικόνα του πλέγματος.



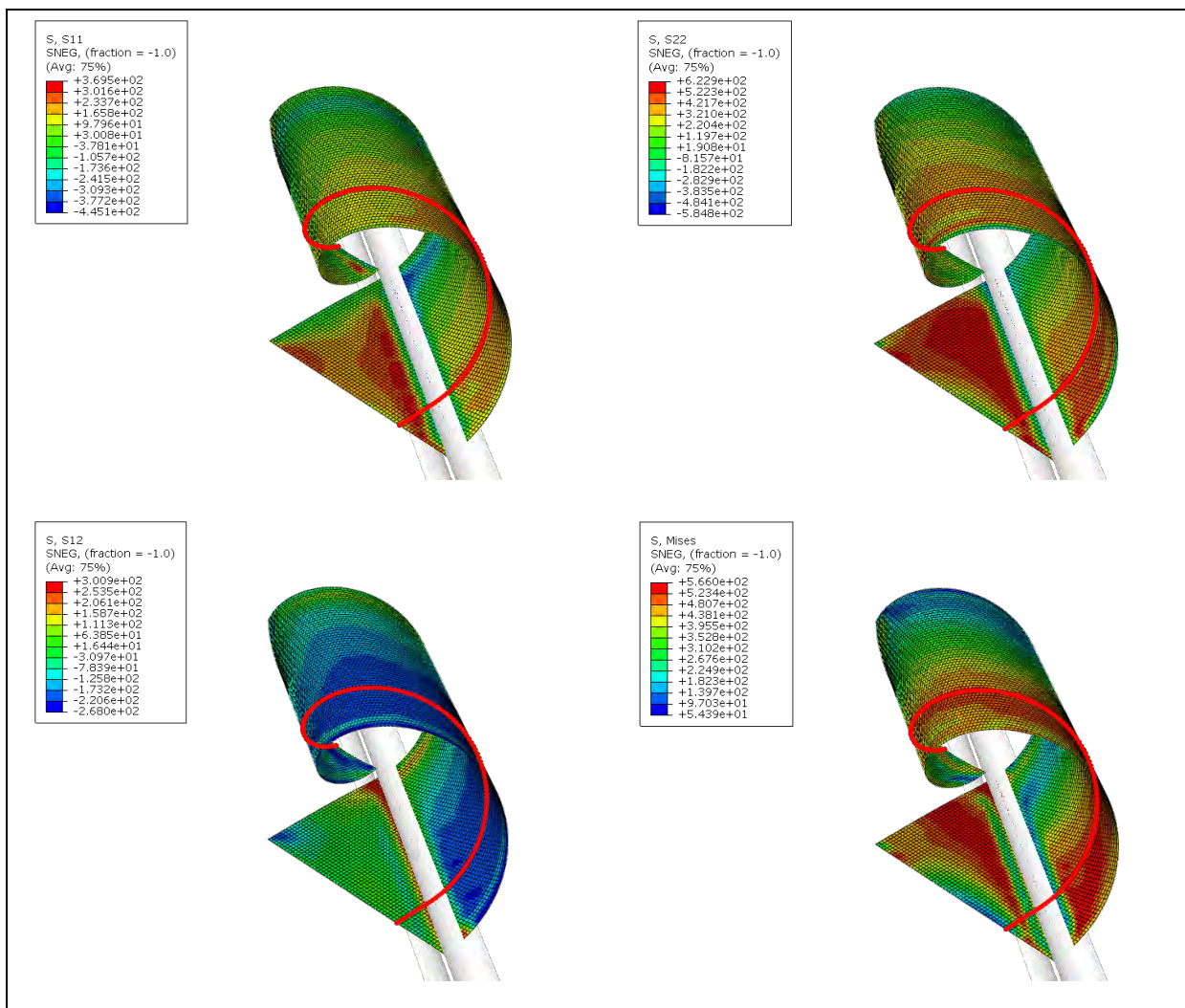
Εικόνα 4.18: Κατανομή των τάσεων S11, S22 και S12 κατά μήκος μιας γραμμής κάθετα στην κατεύθυνση της έλικας (τοπικό σύστημα συντεταγμένων), συνοπολογίζοντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος.



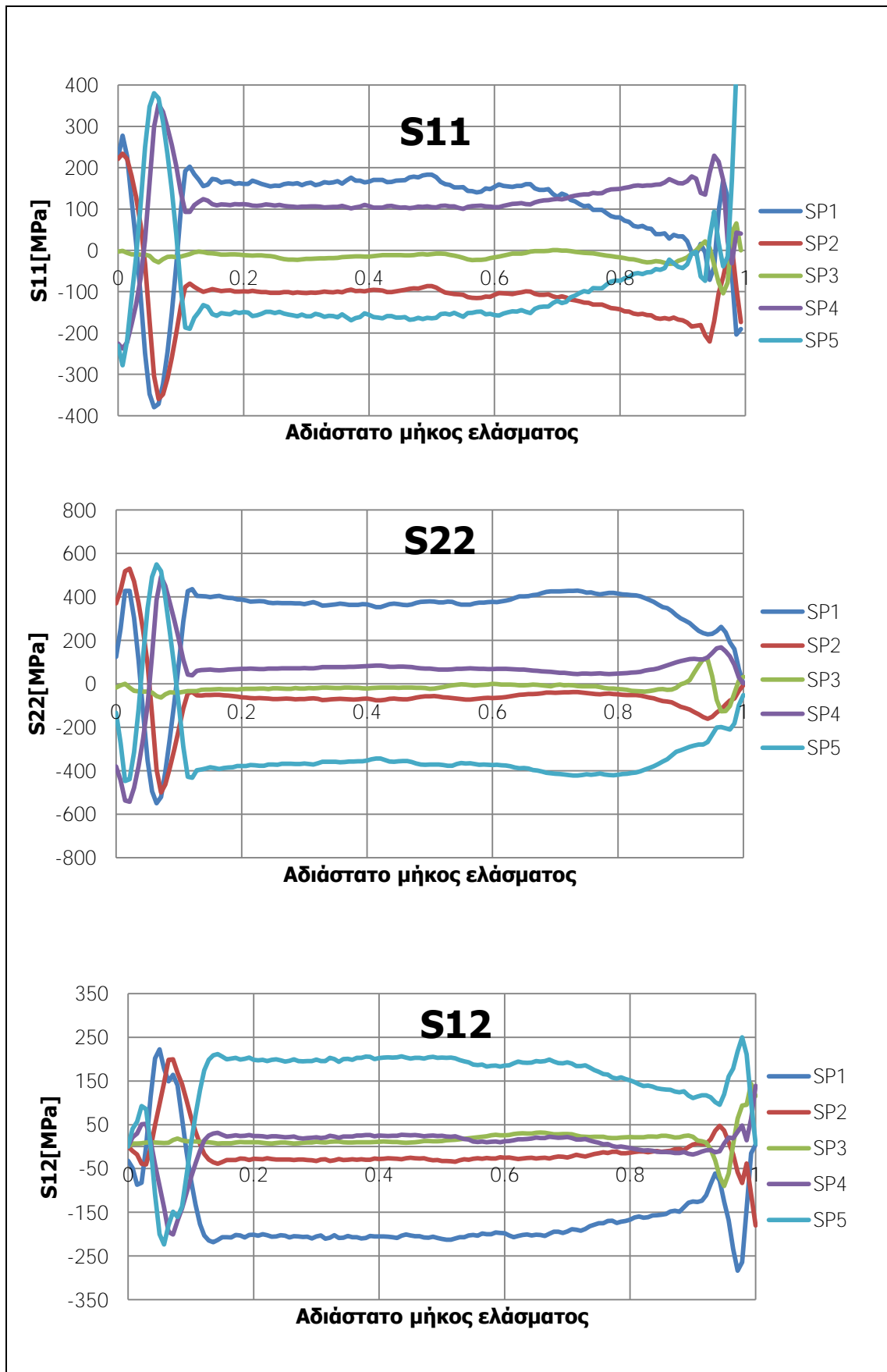
Εικόνα 4.19: Απεικόνιση του πλέγματος στην παραμορφωμένη κατάσταση και της κατανομής των τάσεων S11, S22 και S12 κατά μήκος μιας γραμμής κάθετα στην κατεύθυνση της έλικας (τοπικό σύστημα συντεταγμένων) , συνοπολογίζοντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος.

Στην εικόνα 4.20, παρουσιάζεται η κατανομή των συνιστωσών της τάσης που αναπτύσσονται κατά το μήκος του ελάσματος κατά την κάμψη του για την κατεργασία της ελικοειδούς ραφής, όταν στην ανάλυση συμπεριλαμβάνονται οι παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος από το ρολό. Οι τάσεις υπολογίζονται σε μία γραμμή παράλληλα στην έλικα, η οποία επιλέγεται έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη της το δυσμενέστερο σενάριο, δηλαδή το σημείο όπου οι παραμένουσες τάσεις μεγιστοποιούνται (εικόνα 4.19).

Οι τιμές των τάσεων S11, S22 και S12 έχουν σε αυτήν την περίπτωση ομοιόμορφη κατανομή κατά το μήκος του ελάσματος, με εξαίρεση τα άκρα του ελάσματος, όπου το έλασμα έρχεται σε επαφή με τα έλαστρα. Οι συνιστώσες S22 και S12 είναι αυτές που δέχονται τη μεγαλύτερη επιρροή από την εισαγωγή των παραμενουσών τάσεων από την εκτύλιξη. Συγκεκριμένα, όταν στο έλασμα εισάγονται οι παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη, η S22 στην εσωτερική επιφάνεια ισούται περίπου με 400 MPa, ενώ την περίπτωση που οι παραμένουσες τάσεις αμελούνται η αντίστοιχη τιμή είναι περίπου 200 MPa. Αντίστοιχα οι τιμές που προκύπτουν για την S12 συνυπολογίζοντας τις παραμένουσες τάσεις φτάνουν τα 200 MPa, ενώ αμελώντας τις δεν ξεπερνούν τα 115 MPa.

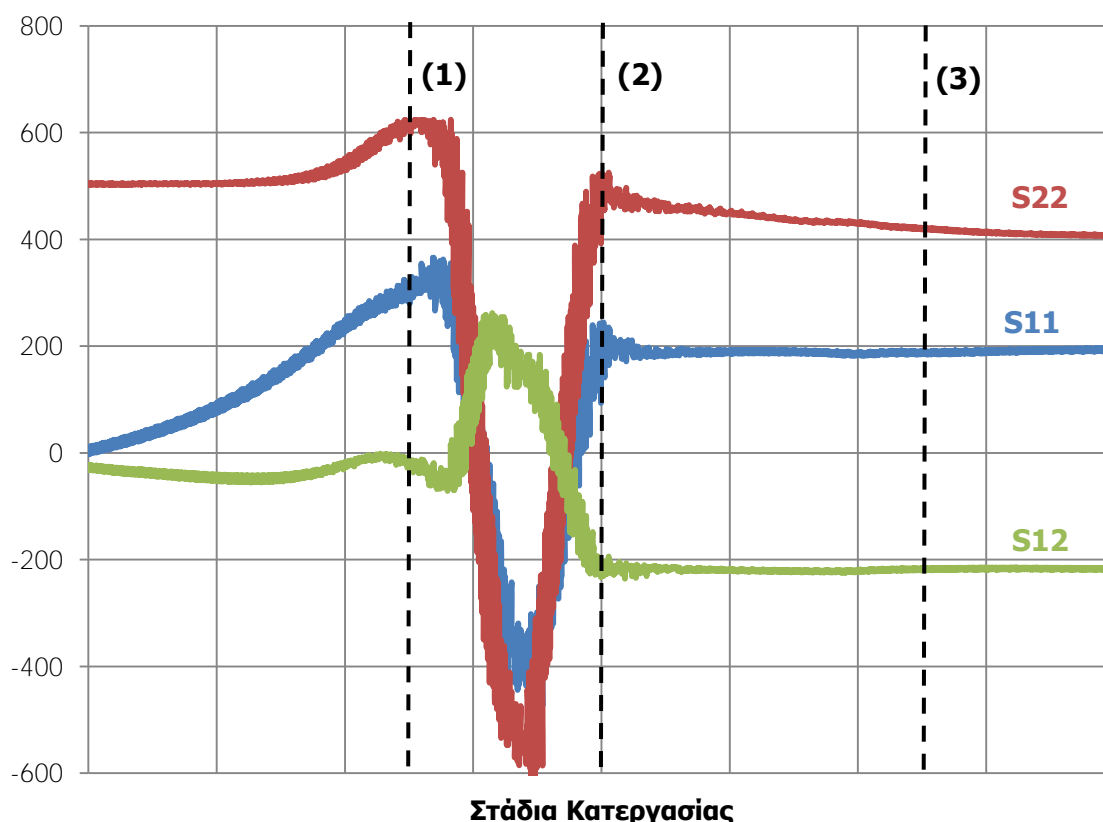


Εικόνα 4.20: Απεικόνιση του πλέγματος στην παραμορφωμένη κατάσταση και της κατανομής των τάσεων S11, S22, S12 και S Mises.



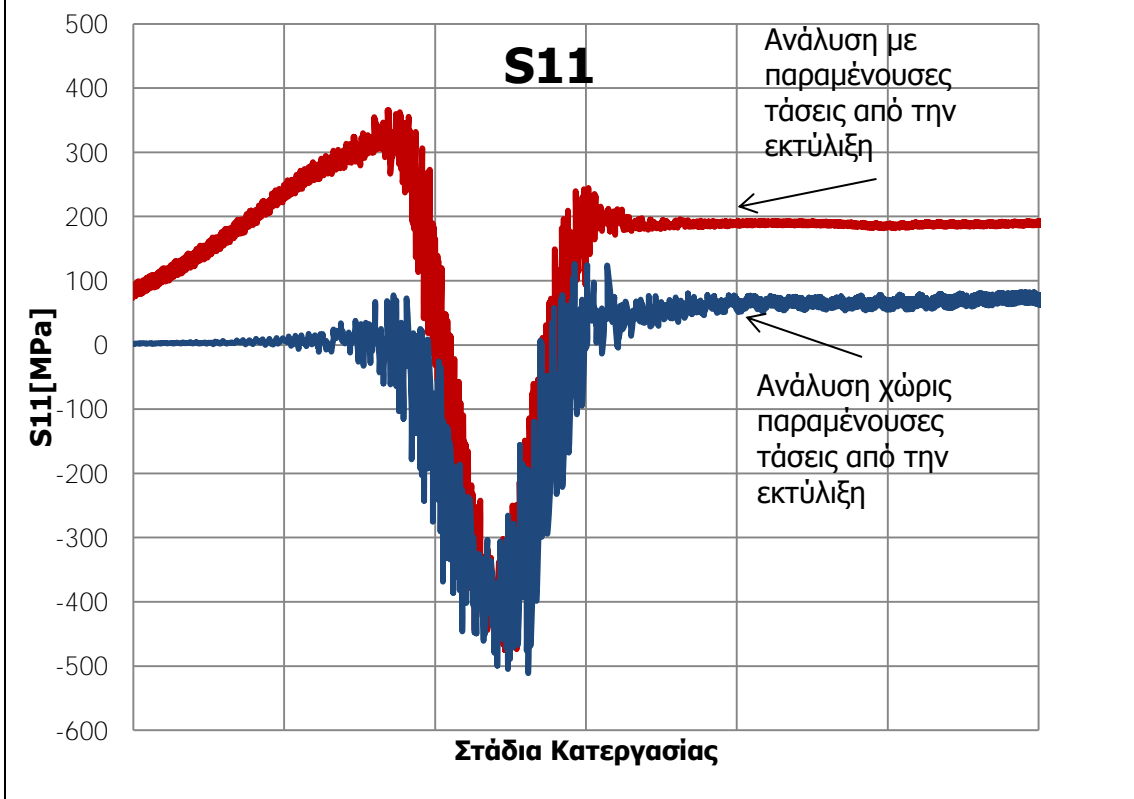
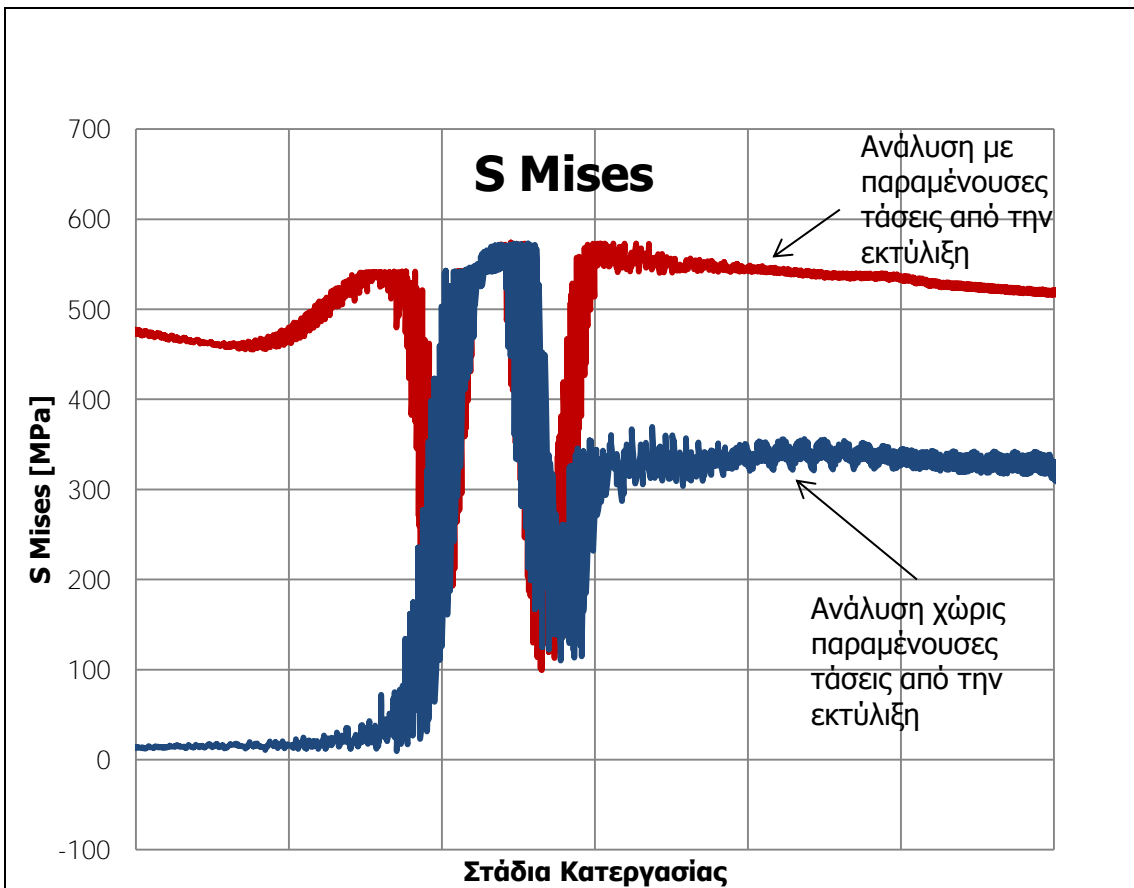
Εικόνα 4.21 : Κατανομή των τάσεων S_{11} , S_{22} και S_{12} κατά μήκος μιας γραμμής παράλληλα στην κατεύθυνση της έλικας (τοπικό σύστημα συντεταγμένων) , συνοπολογίζοντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος.

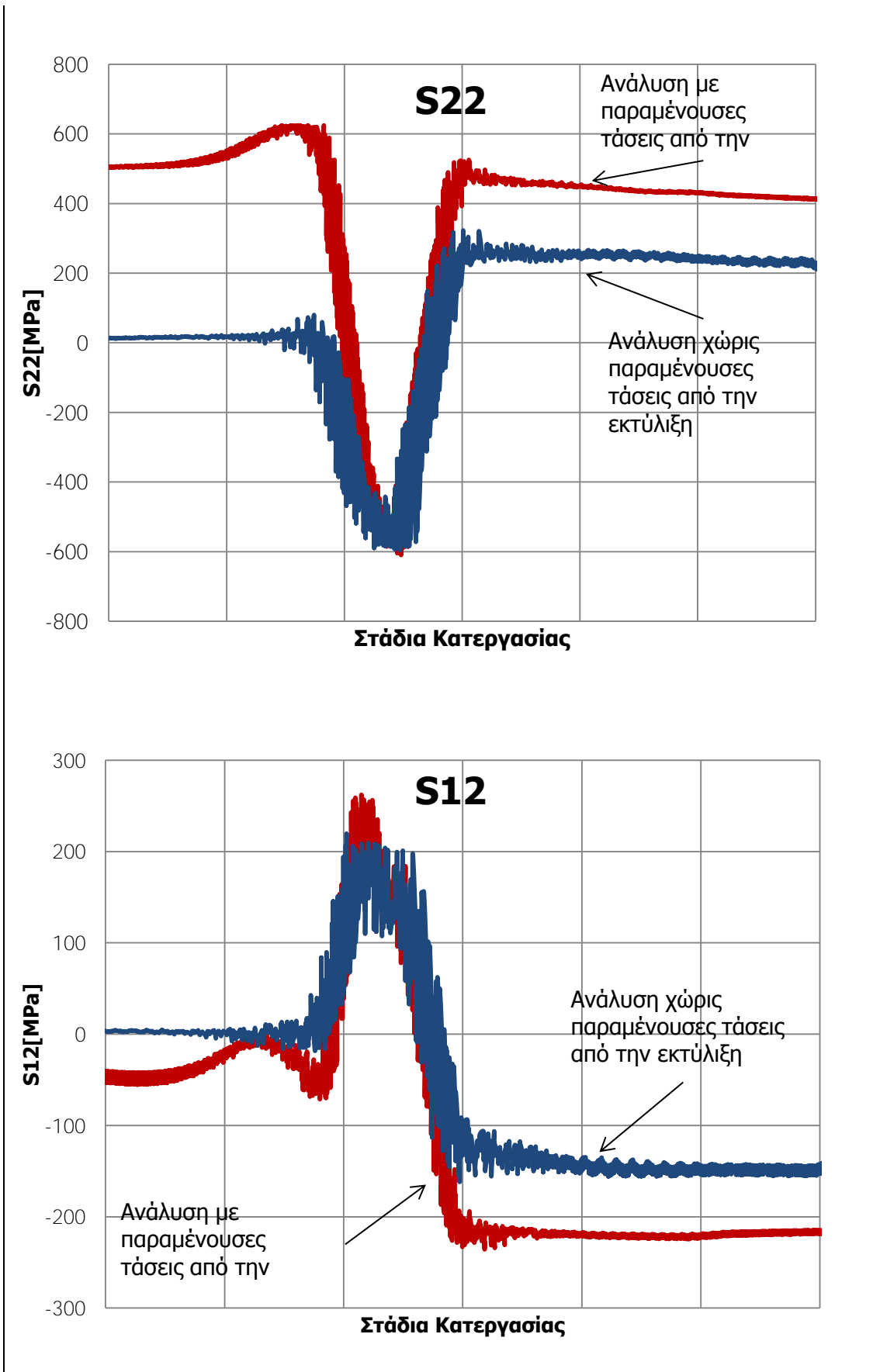
Η εξέλιξη των τάσεων σε ένα συγκεκριμένο κόμβο του ελάσματος κατά τη διάρκεια της κατεργασίας ελικοειδούς ραφής όπου έχει γίνει εισαγωγή των παραμενουσών τάσεων από την εκτύλιξη του ελάσματος παρουσιάζεται στην εικόνα 4.21. Το διάγραμμα αναφέρεται σε έναν κόμβο που βρίσκεται στην περιοχή του ελάσματος, όπου οι παραμένουσες τάσεις μεγιστοποιούνται. Αρχικά εισάγονται οι παραμένουσες τάσεις και σταθεροποιούνται στην επιθυμητή τιμή (στάδιο 1). Έπειτα το έλασμα διέρχεται από τα έλαστρα (στάδιο 2), όπου δεδομένης της παραμόρφωσης του ελάσματος λόγω της κάμψης του, υπάρχει μια απότομη μεταβολή των τάσεων. Μετά από αυτό το στάδιο, οι τάσεις σταθεροποιούνται σε χαμηλότερο επίπεδο λόγω της ελαστικής επαναφοράς (στάδιο 3).



Εικόνα 4.22: Εξέλιξη των τάσεων κατά την κατεργασία της κατεργασία ελικοειδούς ραφής, συνυπολογίζοντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος.

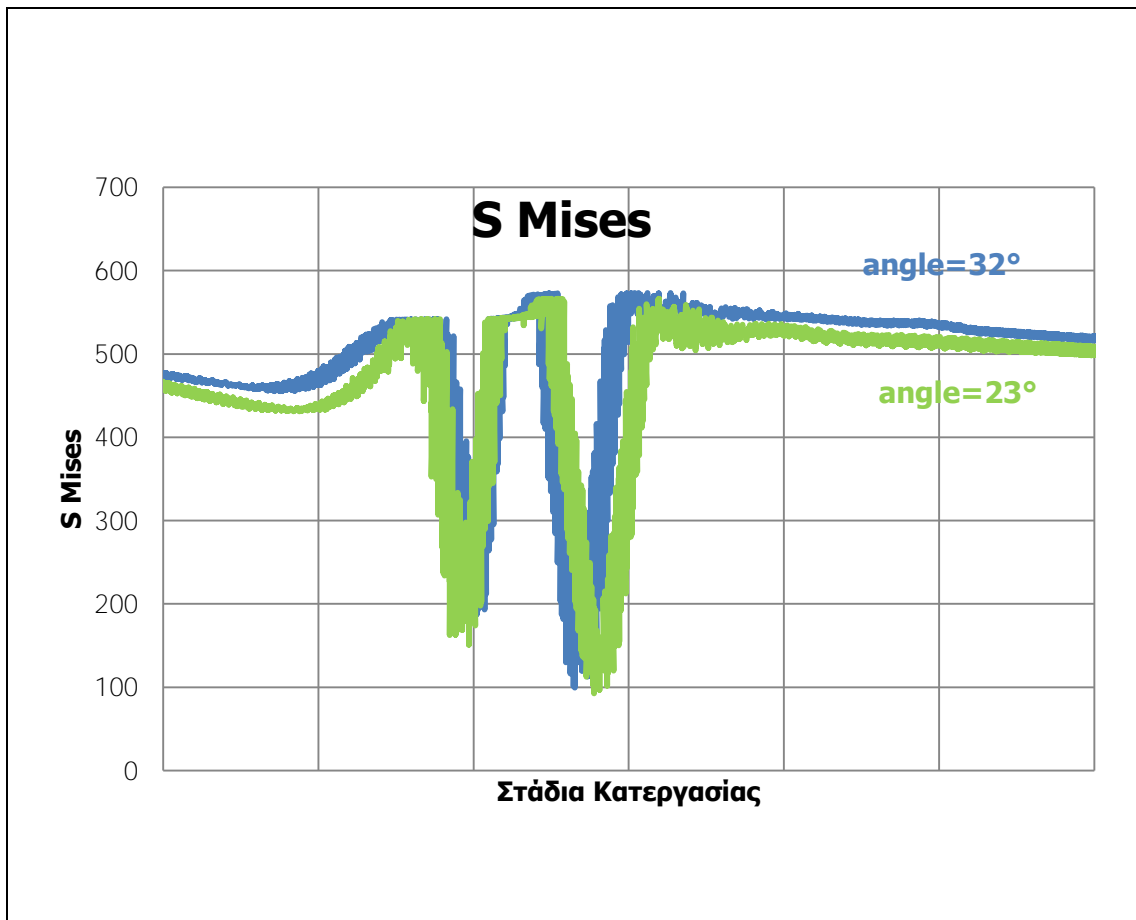
Στα επόμενα διαγράμματα (εικόνα 4.22) παρουσιάζονται κάποιες συγκρίσεις μεταξύ των δύο περιπτώσεων, δηλαδή όταν συνυπολογίζονται και όταν αγνοούνται οι παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη. Οι καμπύλες με κόκκινο χρώμα αντιστοιχούν στην περίπτωση όπου οι παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη συνυπολογίζονται, και οι μπλε στην περίπτωση όπου αμελούνται. Γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι όταν συνυπολογίζονται οι παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος από το ρολό, το μέγεθος των τάσεων που προκύπτουν από την κατεργασία ελικοειδούς κάμψης είναι αισθητά μεγαλύτερο.

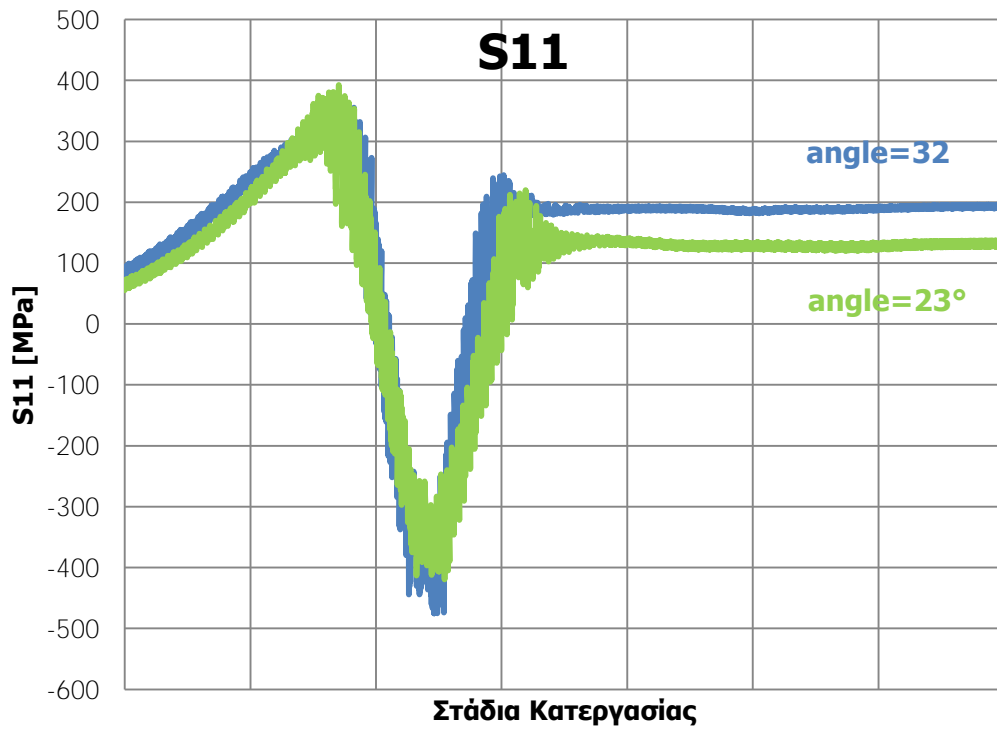


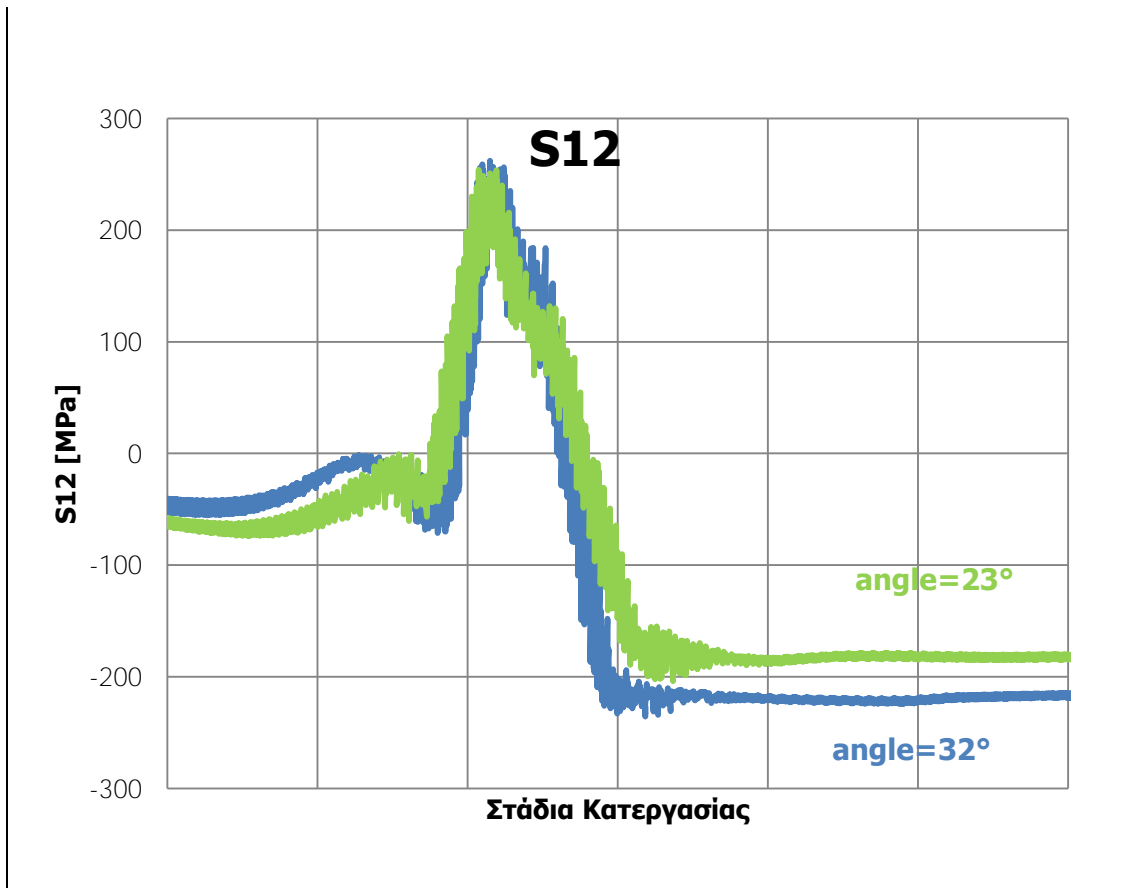


Εικόνα 4.23: Σύγκριση στην εξέλιξη των τάσεων κατά την κατεργασία της ελικοειδούς ραφής, συνοπολογίζοντας και αμελώντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος.

Στη συνέχεια, εξετάζεται την επιρροή του γωνίας κάμψης του ελάσματος στο μέγεθος των παραμενουσών τάσεων. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται τις τάσεις που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία ελικοειδούς ραφής σε έλασμα με πλάτος ίσο με 60 ίντσες, το οποίο κάμπτεται σε κατάλληλες γωνίες ώστε να επιτευχθεί διάμετρος $D_1=36$ και $D_2=48$ ίντσες. Έτσι, στην πρώτη περίπτωση η γωνία ισούται με $\alpha \approx 32^\circ$, ενώ στη δεύτερη $\alpha \approx 23^\circ$. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μία διαφορά μεταξύ των τιμών που προκύπτουν για τις δύο γωνίες κάμψης, αλλά παρόλα αυτά η επιρροή φαίνεται να είναι περιορισμένη.







Εικόνα 4.24: Σύγκριση της εξέλιξης των τάσεων κατά την κατεργασία της ελικοειδούς ραφής (συνυπολογίζοντας τις παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος) για δύο διαφορετικές γωνίες κάμψης.

5 Αριθμητικά αποτελέσματα σε σωλήνες μεγάλης διαμέτρου

5.1 Περιγραφή σωλήνων (48 και 36 ιντσών)

Το αριθμητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε και περιγράφηκε εκτενώς στην προηγούμενη ενότητα (βλ. κεφ. 2), χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της καμπτικής αντοχής αγωγών μεγάλης διαμέτρου. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η οριακή αντοχή σωλήνων από χάλυβα βαθμού X70, όταν υφίστανται κάμψη με εσωτερική πίεση. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αγωγών συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αγωγών μεγάλης διαμέτρου

Εξωτερική Διάμετρος Do in (mm)	Πάχος τοιχώματος t mm	Do/t	Μέση Διάμετρος Dm mm	Μήκος mm L=10 Dm
36 (914.4)	17.1	53.5	905.85	908.85
48 (1219.2)	19.3	63.2	1209.55	12095.5

Στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, η ανελαστική συμπεριφορά του υλικού θεωρείται μέσω ενός μοντέλου πλαστικότητας Von Mises με ιστροπική κράτυνση. Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού του των αγωγών συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

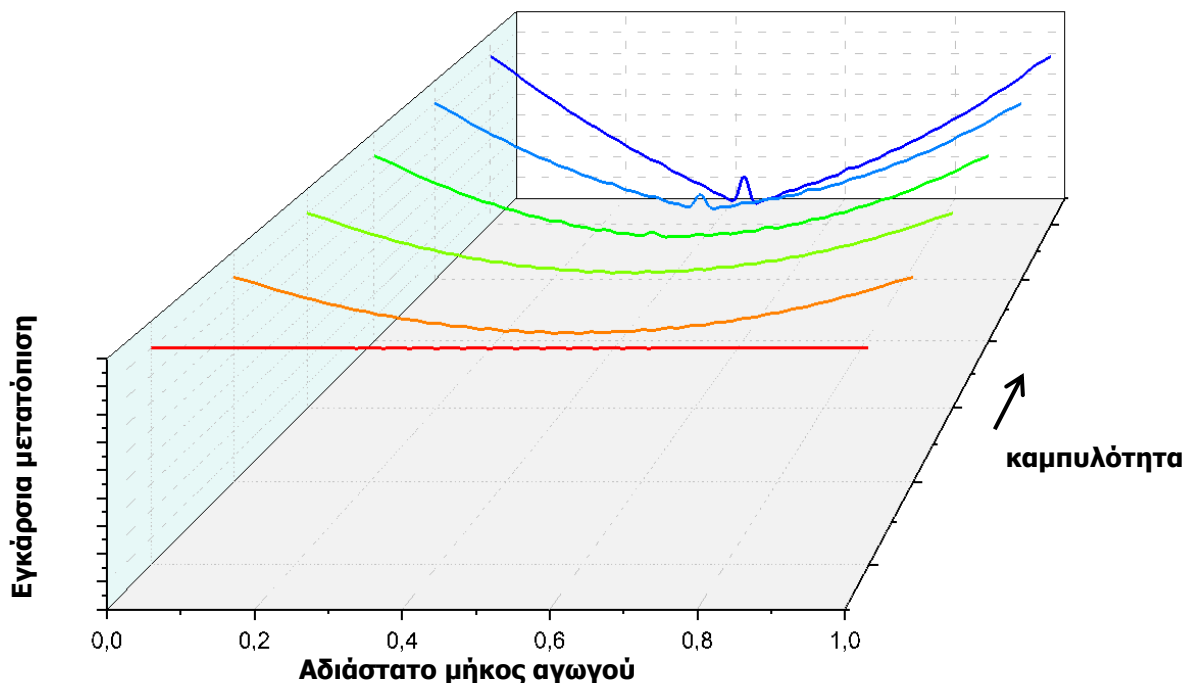
Πίνακας 5.2: Μηχανικές ιδιότητες του ανοξείδωτου χάλυβα βαθμού X70.

E (MPa)	σ_y ksi (MPa)	σ_{uts} ksi (MPa)	ν
205000	70 (482)	82 (565)	0.3

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για αγωγούς μεγάλης διαμέτρου. Αρχικά, διερευνάται η επίδραση της εσωτερικής πίεσης στην καμπτική αντοχή των αγωγών με διάμετρο 36" και 48". Έπειτα, παρουσιάζονται οι μορφές αστοχίας που προέκυψαν και μελετάται, μέσω μίας παραμετρικής μελέτης, η ευαισθησία των υπό εξέταση αγωγών στην αρχική γεωμετρική ατέλεια. Επίσης, εξετάζεται η επίδραση των παραμενουσών τάσεων από την εκτύλιξη του ελάσματος από το ρολό και την εν ψυχρώ κατεργασία κάμψης του για την κατεργασία της ελικοειδούς ραφής στην καμπτική συμπεριφορά των αγωγών. Τελικά, αφού υπολογιστούν, οι επιτρεπτές τιμές για την μέγιστη ροπή και την κρίσιμη καμπυλότητα, που προκύπτουν από τους κώδικες DNV-OS-F101 και CSA Z662, ελέγχεται αν οι τιμές που προκύπτουν από τα αριθμητικά μοντέλα είναι εντός σχεδιασμού.

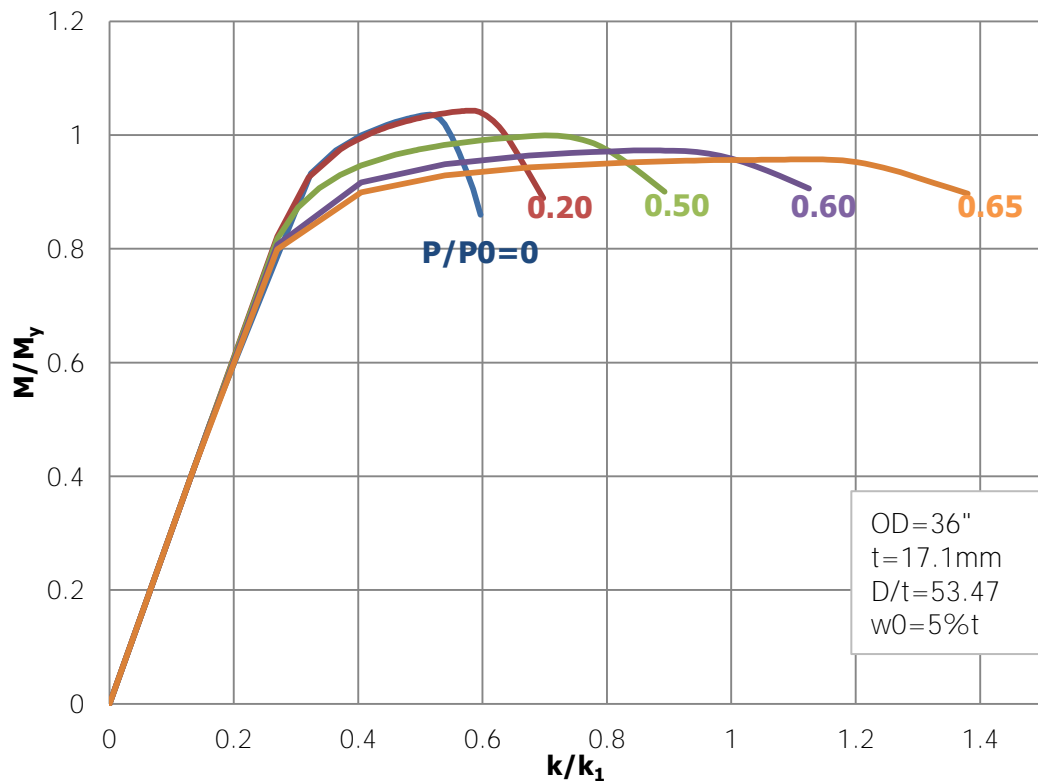
5.2 Αποτελέσματα για εσωτερική πίεση και κάμψη

Με τη χρήση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκαν, διερευνήθηκε η μηχανική συμπεριφορά των αγωγών μεγάλης διαμέτρου κατά την κάμψη τους υπό εσωτερική πίεση. Ο αγωγός συμπιέζεται εσωτερικά μέχρι την επιθυμητή πίεση, κι έπειτα κάμπτεται σταδιακά. Η αρχικά κυκλική διατομή του παίρνει οβάλ σχήμα και, καθώς αυξάνεται η καμπυλότητα, στην επάνω γενέτειρα του καμπτόμενου σωλήνα αναπτύσσονται μικρές ρυτιδώσεις. Με περαιτέρω αύξηση της καμπυλότητας, το πλάτος των ρυτιδώσεων αυξάνεται σημαντικά μέχρι που το φαινόμενο συσσωρεύεται σε μία από τις ρυτίδες, η οποία φουσκώνει προς τα έξω και η δομή αρχίζει να καταρρέει. Στην εικόνα 5.1, αντιπαραβάλλονται οι διαδοχικές φάσεις κατά την κάμψη του αγωγού διαμέτρου 36 ιντσών, για την πίεση $P=0.5P_y$ με πλάτος αρχικής ατέλειας $w_0=5\%t$.

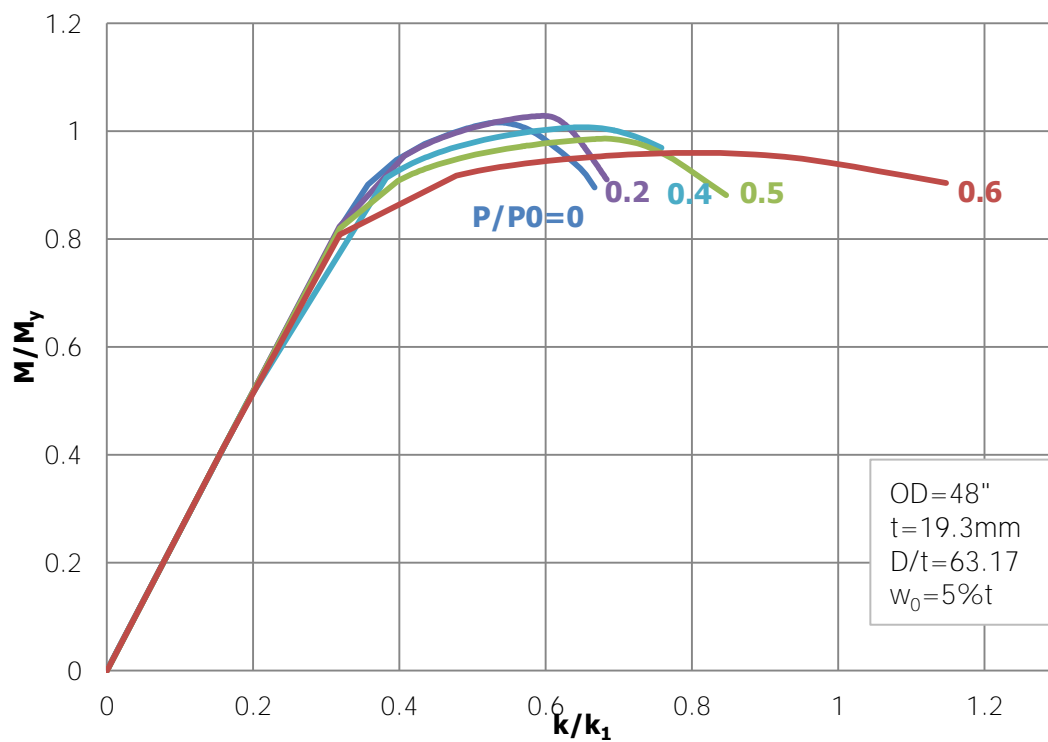


Εικόνα 5.1: Διαδοχικές φάσεις κατά την κάμψη του αγωγού διαμέτρου 36 ιντσών, για την πίεση $P=0.5P_y$ με πλάτος αρχικής ατέλειας $w_0=5\%t$.

Τα διαγράμματα ροπής-καμπυλότητας στις εικόνες 5.2 και 5.3, αναφέρονται στην κάμψη υπό εσωτερική πίεση χαλύβδινων αγωγών διαμέτρου 36 και 48 ιντσών αντίστοιχα. Η γεωμετρική ατέλεια που εισάγεται και στις δύο περιπτώσεις έχει πλάτος $w_0=0.05t$, η οποία, όπως αναφέρθηκε, θεωρείται μία αντιπροσωπευτική ατέλεια. Στο σημείο αυτό, δεν συμπεριλαμβάνονται οι παραμένουσες τάσεις από την κατεργασία ελικοειδούς ραφής. Όπως επιβεβαιώθηκε από τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, η εσωτερική πίεση αυξάνει την καμπτική αντοχή των αγωγών, κι επομένως καθυστερεί την αστοχία. Με αύξηση της εσωτερικής πίεσης, η κρίσιμη καμπυλότητα κατά την κατάρρευση αυξάνεται σημαντικά, ενώ η τιμή της μέγιστης ροπής κάμψης παρουσιάζει μία μικρή πτώση.

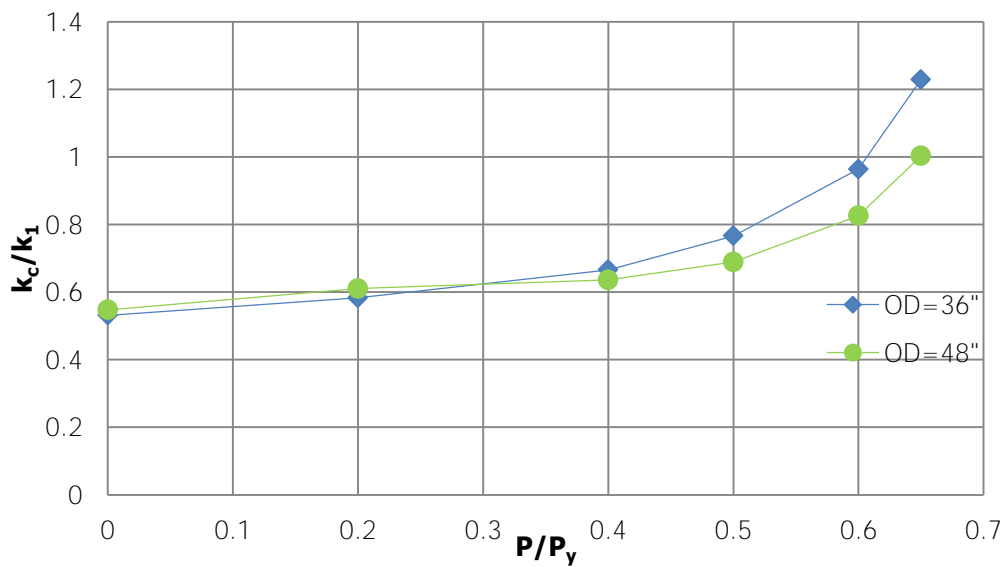


Εικόνα 5.2: Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας, για τον αγωγό διαμέτρου 36" για αρχική ατέλεια με πλάτος $w_0=5\%t$ για διάφορες τιμές της πίεσης.

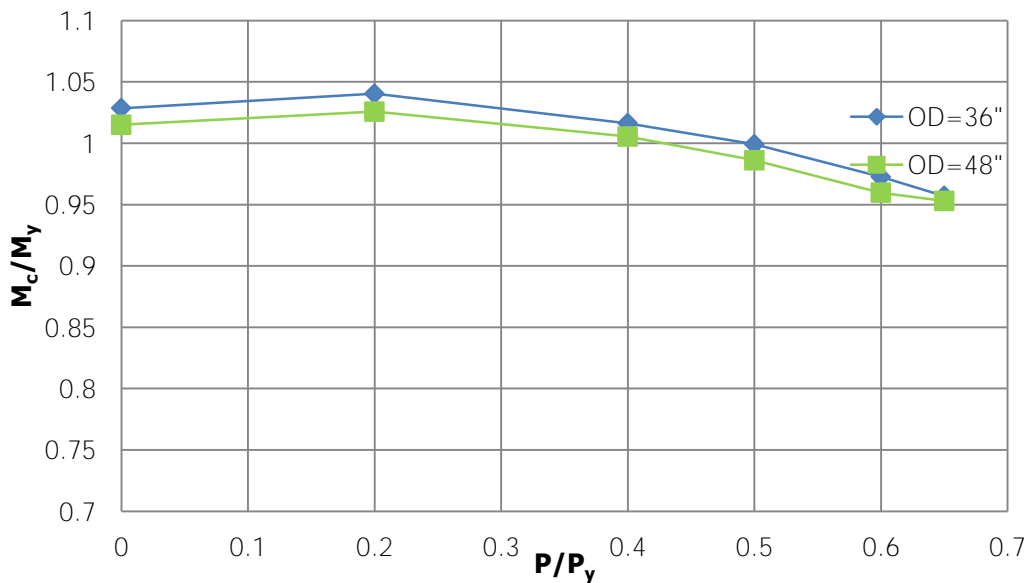


Εικόνα 5.3: Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας, για τον αγωγό διαμέτρου 48" για αρχική ατέλεια με πλάτος $w_0=5\%t$ για διάφορες τιμές της πίεσης.

Η μεταβολή της κρίσιμης καμπυλότητας σε σχέση με την εσωτερική πίεση για τους υπό εξέταση αγωγούς απεικονίζεται στο διάγραμμα 5.4. Η κρίσιμη καμπυλότητα αυξάνεται σχεδόν εκθετικά με την αύξηση της πίεσης και για τις δύο γεωμετρίες. Για $OD=48''$, όπου ισχύει $D/t \approx 63$, παρατηρούνται ελαφρώς μικρότερες τιμές για την κρίσιμη καμπυλότητα συγκριτικά με $OD=36''$, όπου $D/t \approx 52$. Στη συνέχεια, το διάγραμμα 5.5 συνοψίζει τη μεταβολή της μέγιστης ροπής κάμψης σε σχέση με την εσωτερική πίεση για τους υπό εξέταση αγωγούς. Αρχικά, όταν $P=0.2P_y$, και στις δύο γεωμετρίες παρατηρείται μία στοιχειώδης αύξηση της μέγιστης ροπής συγκριτικά με την περίπτωση της μηδενικής εσωτερικής πίεσης. Έπειτα, όσο αυξάνεται η πίεση, η τιμή για την κρίσιμη καμπυλότητα φθίνει.

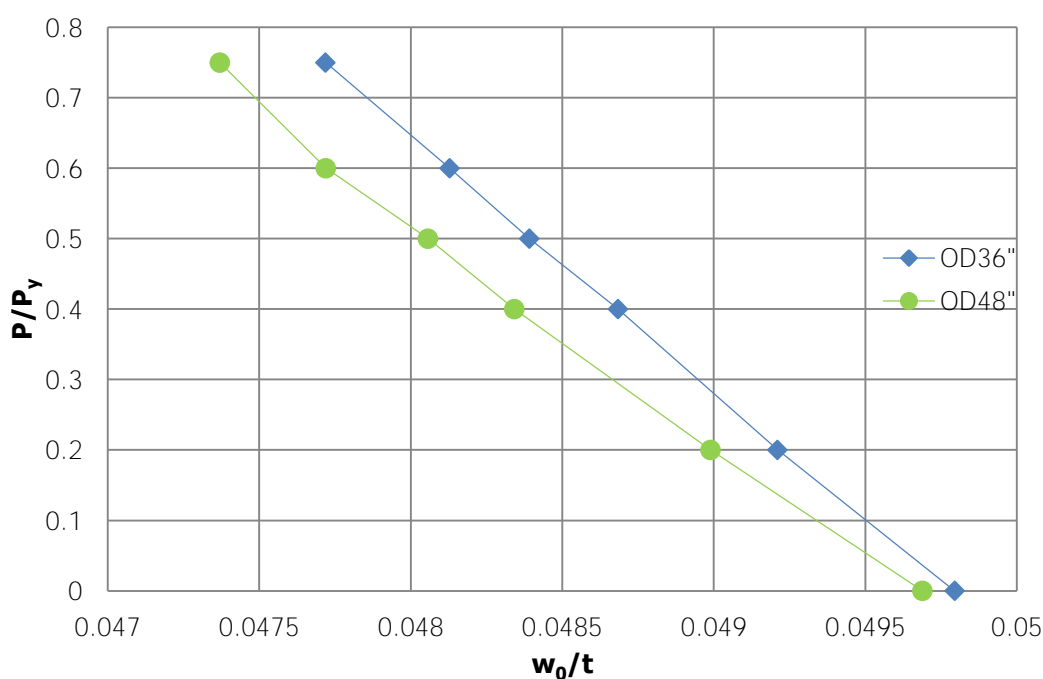


Εικόνα 5.4: Μεταβολή της κρίσιμης καμπυλότητας με την εσωτερική πίεση για τους υπό εξέταση αγωγούς.



Εικόνα 5.5: Μεταβολή της μέγιστης ροπής κάμψης με την εσωτερική πίεση για τους υπό εξέταση αγωγούς.

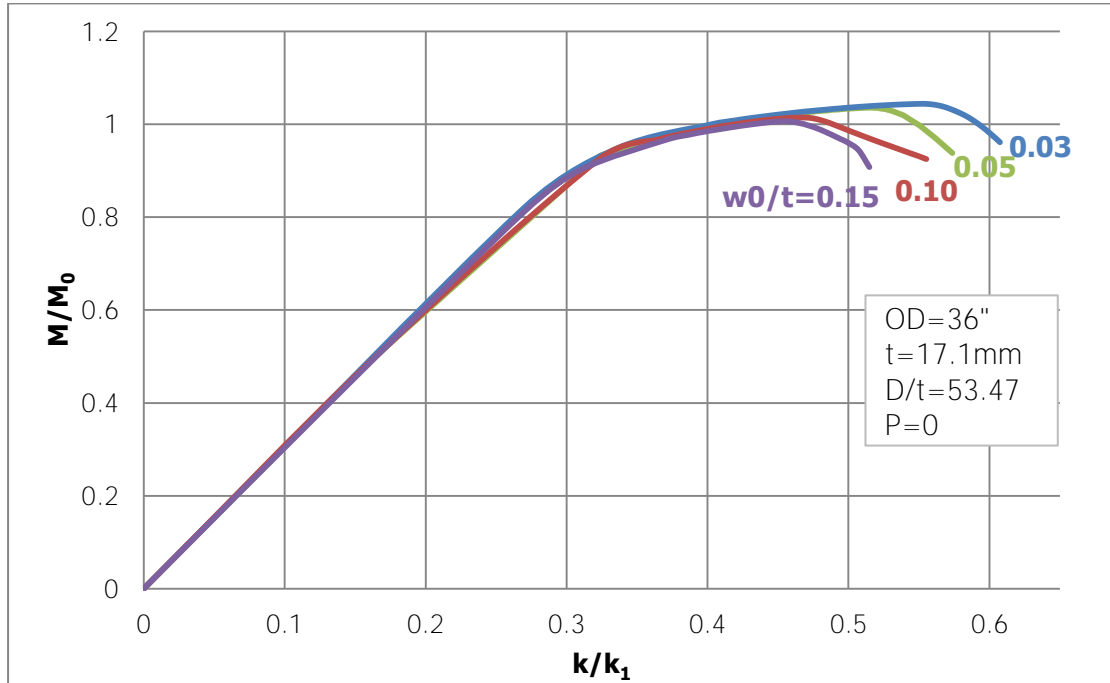
Η σημαντική αύξηση της κρίσιμης καμπυλότητας κατά την κατάρρευση, είναι αποτέλεσμα της ισχυρής σταθεροποιητικής δράσης της εσωτερικής πίεσης στους αγωγούς. Πιο συγκεκριμένα, η εσωτερική πίεση εξομαλύνει τις γεωμετρικές ατέλειες στον αγωγό, ενισχύοντας την κυκλικότητα της διατομής, με αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της διάταξης και την αύξηση της καμπτικής αντοχής του αγωγού. Στο διάγραμμα 5.6, παρουσιάζεται η επίδραση της εσωτερικής πίεσης στο πλάτος της κυματιστής γεωμετρικής ατέλειας που έχει εισαχθεί στον αγωγό. Η αρχική γεωμετρική ατέλεια έχει πλάτος που ισούται με 5% του πάχους του τοιχώματος του αγωγού, που για OD=36", t=17.1mm ενώ για OD=48", t=19.3mm. Το πλάτος της ατέλειας μειώνεται γραμμικά με αύξηση της εσωτερικής πίεσης. Για πίεση ίση με $P=0.2P_y$, το πλάτος της ατέλειας έχει μειωθεί περίπου κατά 1.5%. Για υψηλότερες τιμές της εσωτερικής πίεσης, παρουσιάζεται μείωση του πλάτους της αρχικής ατέλειας μέχρι και 5%.



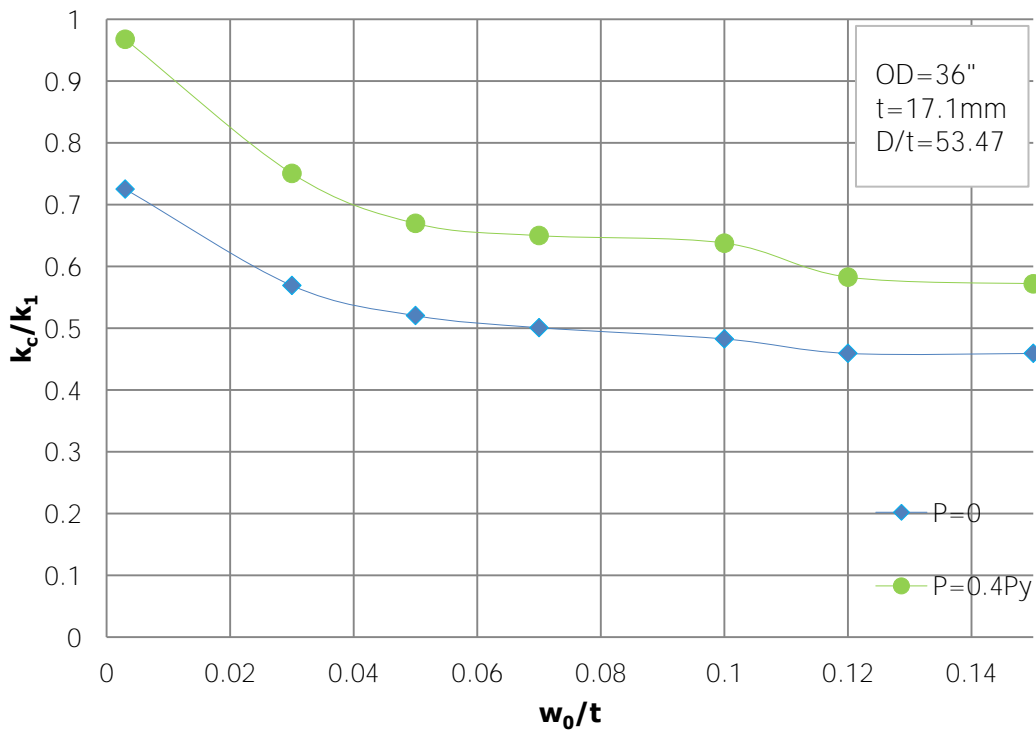
Εικόνα 5.6: Επίδραση εσωτερικής πίεσης στο πλάτος της ατέλειας πριν την επιβολή της κάμψης.

Δεδομένης της ευαισθησίας που παρουσιάζει ο αγωγός, στο πλάτος της γεωμετρικής ατέλειας, η μείωση σε αυτό, η οποία προκαλείται με την αύξηση της εσωτερικής πίεσης, οδηγεί τελικά στην σταθεροποίηση της διάταξης. Η παραμετρική μελέτη στην εικόνα 5.7 παρουσιάζει την ευαισθησία του αγωγού στο πλάτος της γεωμετρικής ατέλειας για μηδενική εσωτερική πίεση, για διάμετρο OD=36" και t=17.1mm. Διαπιστώνουμε ότι ο αγωγός είναι ιδιαίτερα ευάλωτος στο πλάτος της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας. Στα ακόλουθα διαγράμματα (εικόνες 5.8 και 5.9), παρουσιάζεται η επίδραση του πλάτους της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας στην κρίσιμη καμπυλότητα και την μέγιστη ροπή κάμψης κατά την αστοχία, όταν η εσωτερική πίεση είναι μηδενική και όταν $P=0.4P_y$.

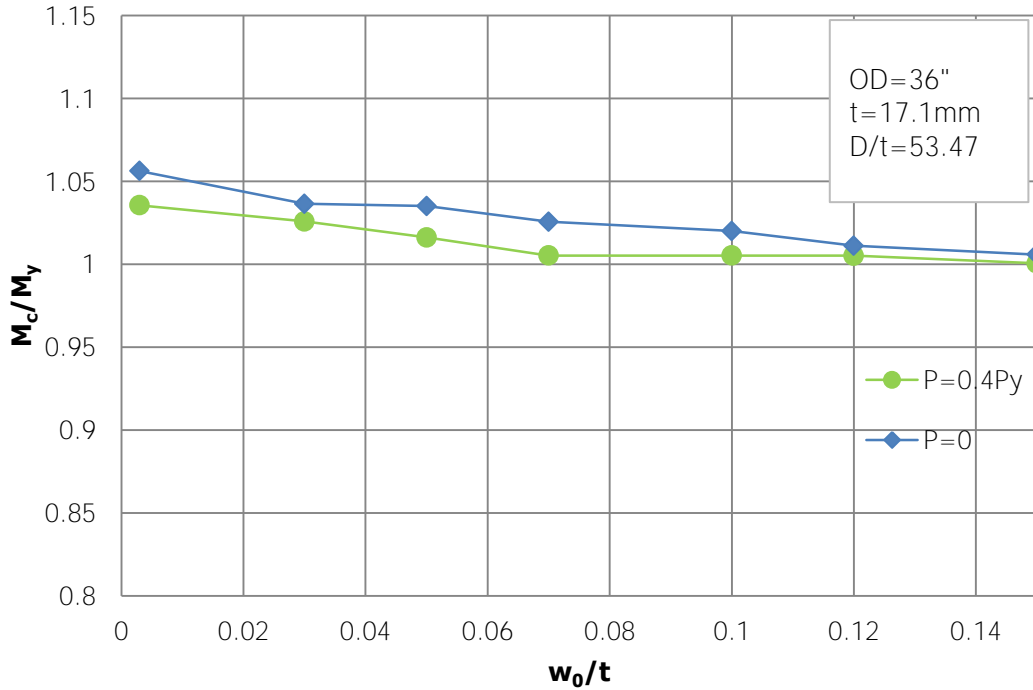
Όπως γίνεται αντιληπτό, ανεξάρτητα από την τιμή της εσωτερικής πίεσης, καθώς αυξάνεται το πλάτος της αρχικής κυματιστής ατέλειας η κρίσιμη καμπυλότητα μειώνεται σημαντικά. Η μέγιστη ροπή κάμψης που αναπτύσσεται παρουσιάζει, επίσης, μία στοιχειώδη πτώση με την αύξηση της ατέλειας, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.9.



Εικόνα 5.7: Παραμετρική μελέτη για την ευαισθησία του αγωγού στο πλάτος της ατέλειας ($P=0$).

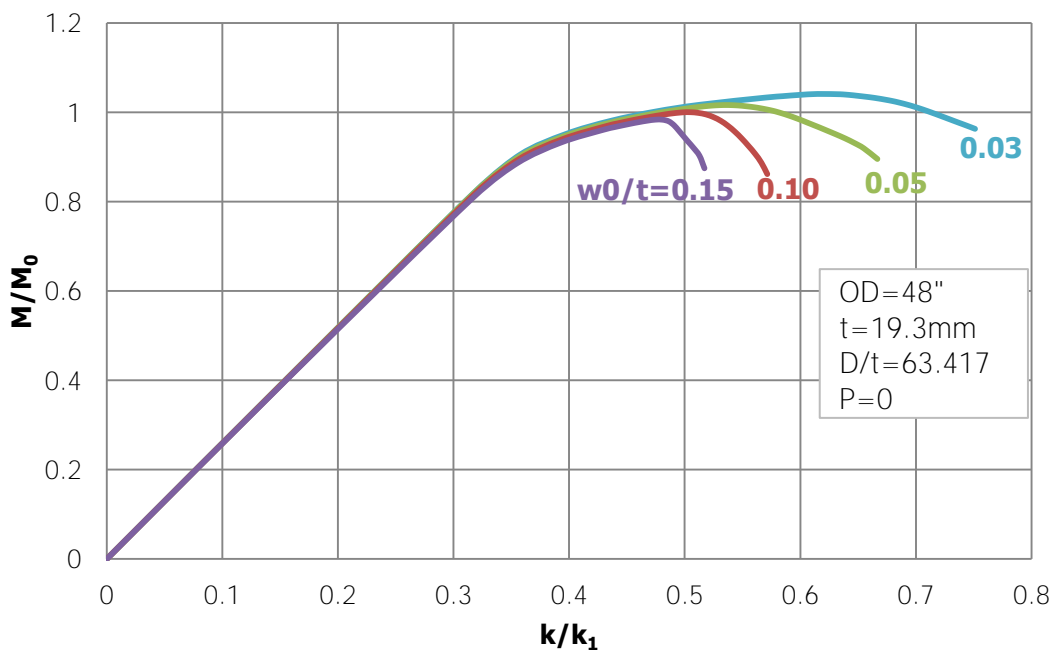


Εικόνα 5.8: Επίδραση του πλάτους της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας στην κρίσιμη καμπυλότητα κατά την αστοχία για $OD=36''$.

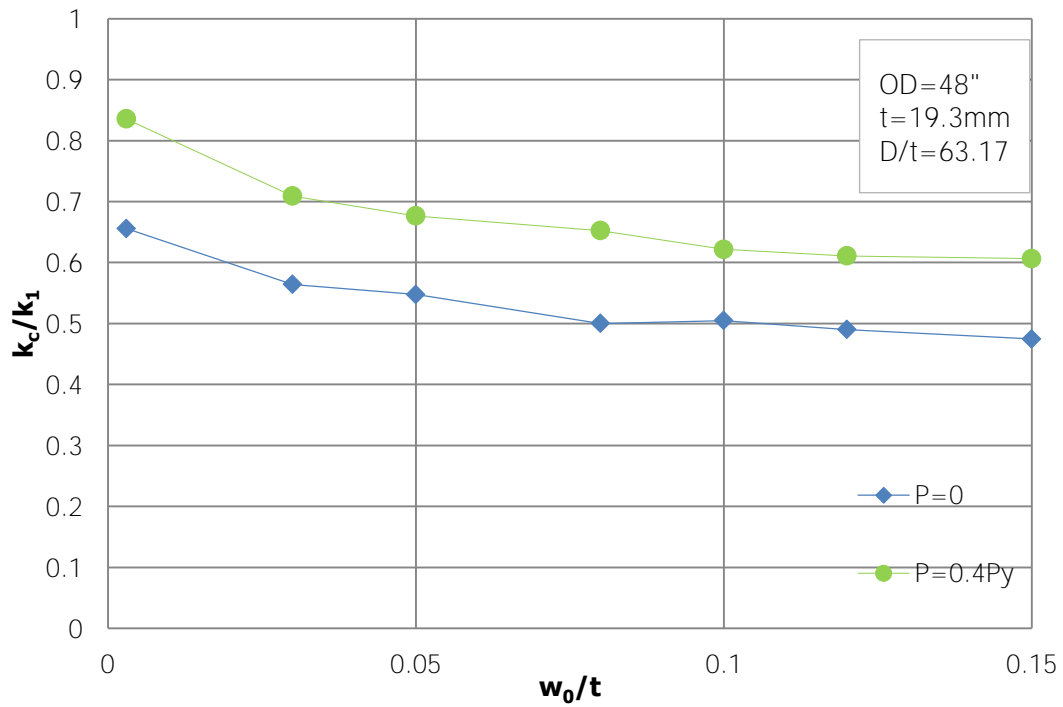


Εικόνα 5.9: Επίδραση του πλάτους της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας στην μέγιστη ροπή κάμψης κατά την αστοχία για $OD=36"$.

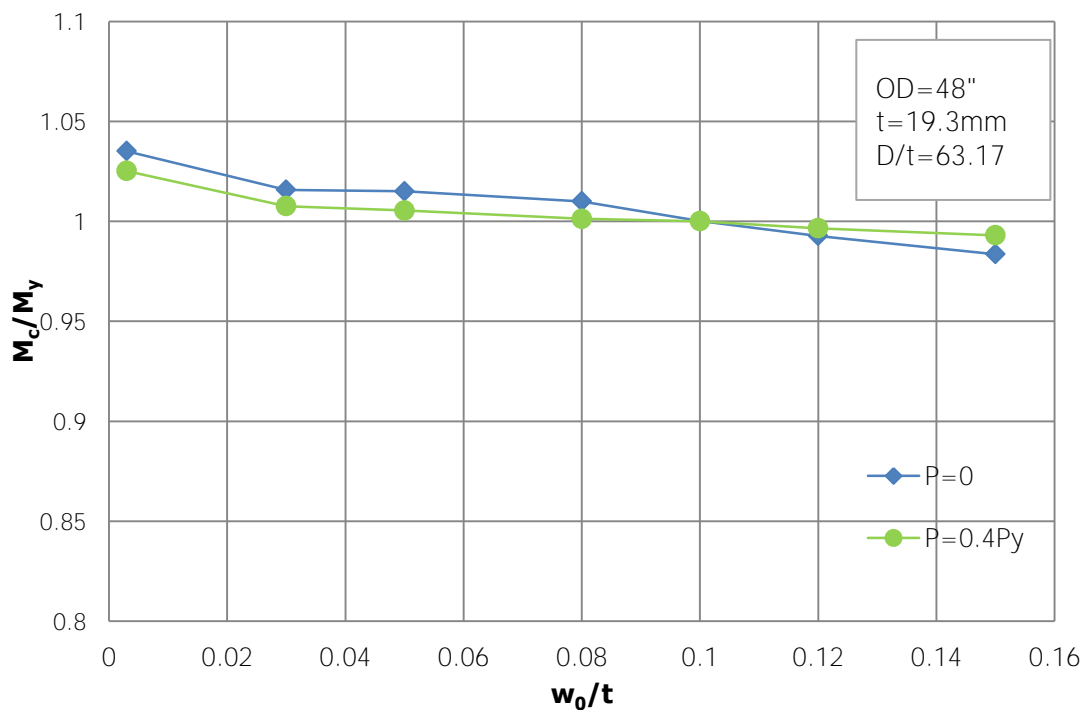
Για διάμετρο $OD=48"$ και $t=19.3\text{mm}$, όπου $D/t \approx 63$, ο αγωγός είναι επίσης ευάλωτος στην παρουσία αρχικών ατελειών, όπως φαίνεται στο ακόλουθα διαγράμματα. Με την αύξηση του πλάτους της ατέλειας, η κρίσιμη καμπυλότητα κατά την αστοχία φθίνει σχεδόν εκθετικά. Η μέγιστη ροπή που αναπτύσσεται παρουσιάζει, επίσης, μία μικρή πτώση.



Εικόνα 5.10: Παραμετρική μελέτη για την ευαισθησία του αγωγού 48" στο πλάτος της ατέλειας ($P=0$).

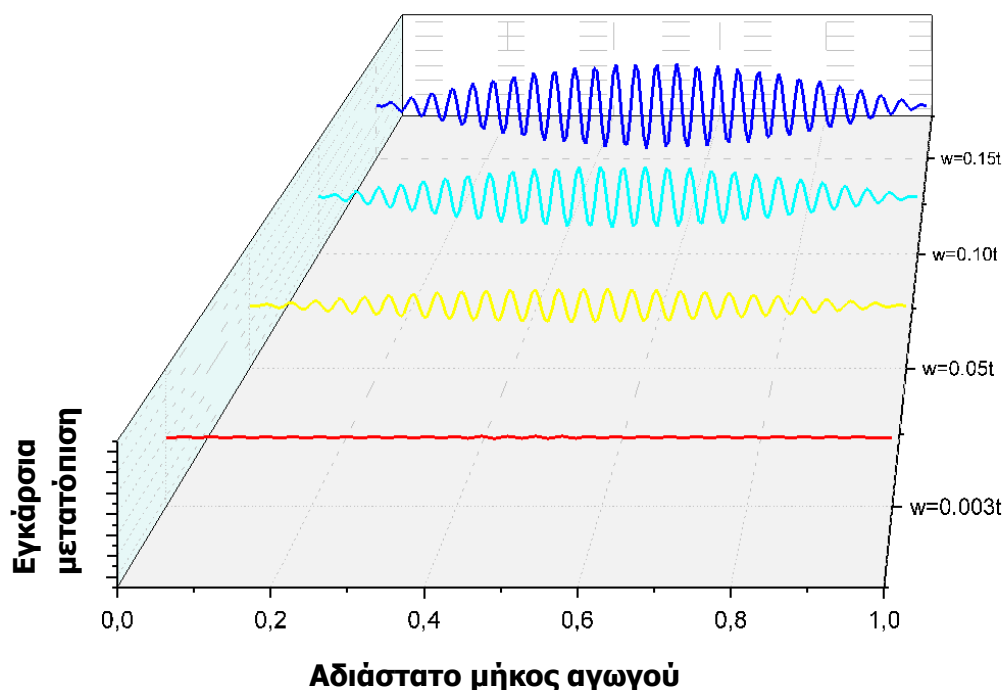


Εικόνα 5.11: Επίδραση του πλάτους της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας στην κρίσιμη καμπυλότητα κατά την αστοχία για OD=48".



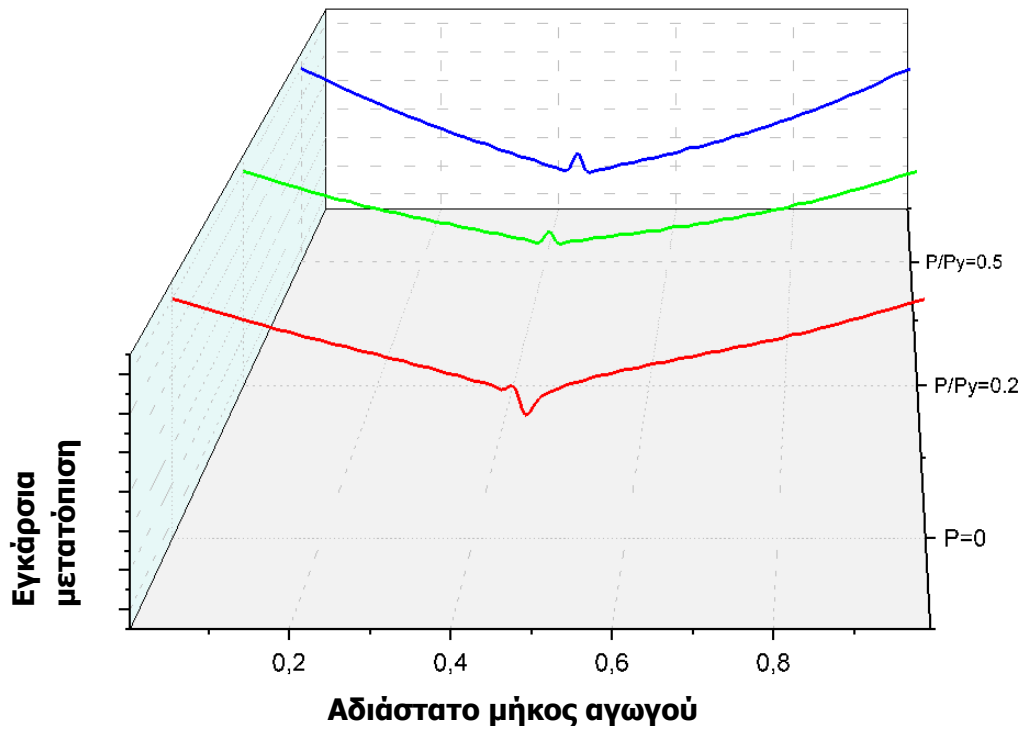
Εικόνα 5.12: Επίδραση του πλάτους της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας στην μέγιστη ροπή κάμψης κατά την αστοχία για OD=48".

Για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η μορφή της γεωμετρικής ατέλειας που εισάγεται στον αρχικά τέλειο αγωγό, στην εικόνα 5.13, παρουσιάζεται η μορφή της κυματιστής γεωμετρικής ατέλειας που εισάγεται στον αρχικά τέλειο αγωγό με διάμετρο $OD=36''$ και $t=17.1\text{mm}$, για διάφορες τιμές για το πλάτος ατέλειας w_0 . Υπενθυμίζεται ότι το μέγιστο βάθος των ρυτίδων είναι $\delta_0=2w_0$, με w_0 που είναι το πλάτος της ατέλειας, δηλαδή η μέγιστη απόκλιση της πτυχωτής επιφάνειας του κελύφους από τον τέλειο κύλινδρο.

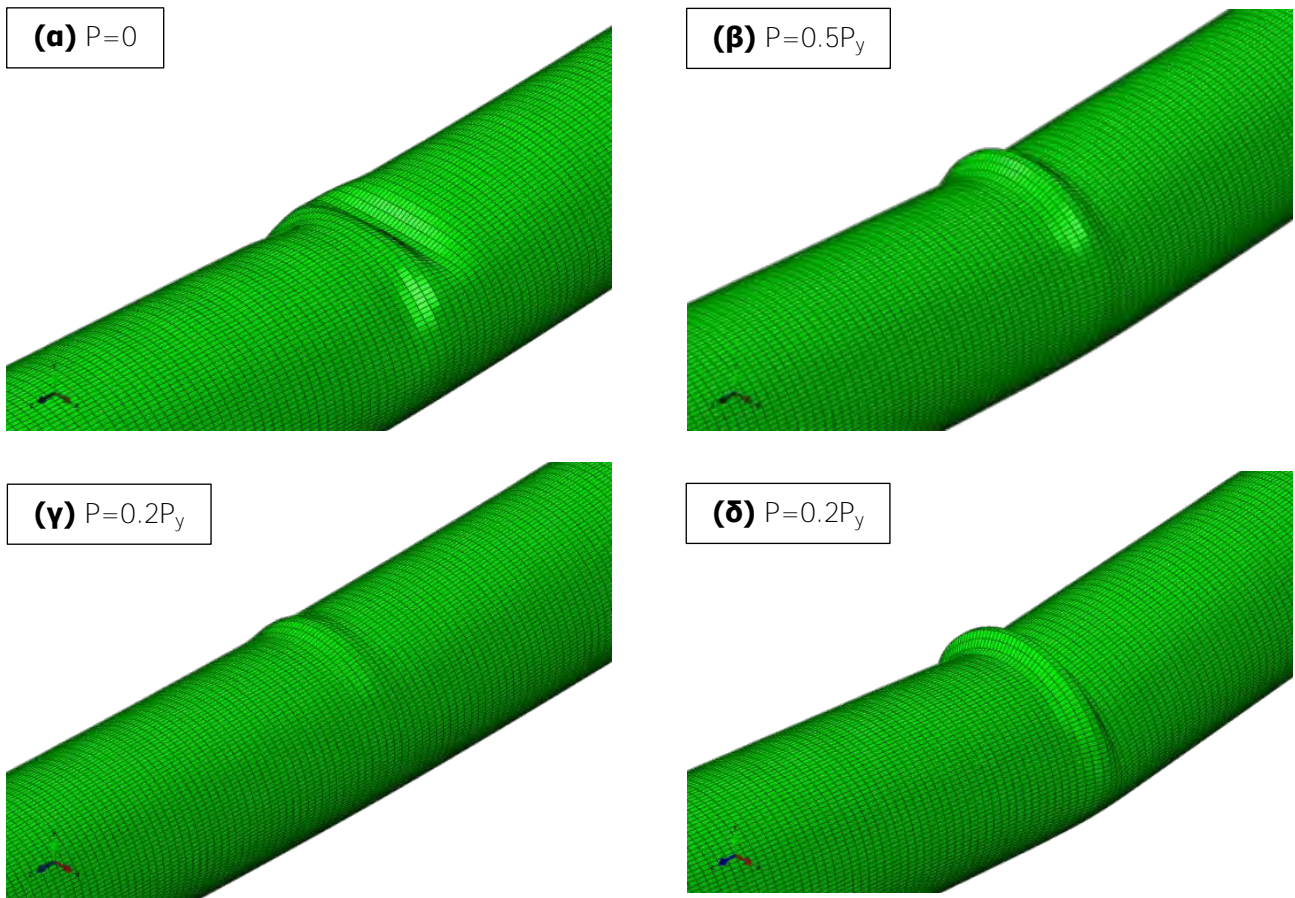


Εικόνα 5.13: Μορφή της κυματιστής γεωμετρικής ατέλειας που εισάγεται στον αρχικά τέλειο αγωγό με διάμετρο $OD=36''$ και $t=17.1\text{mm}$, για διάφορες τιμές για το πλάτος ατέλειας w_0 .

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κατά την κάμψη του αγωγού υπό εσωτερική πίεση, όταν η καμπυλότητα φτάσει σε μία κρίσιμη τιμή, μία από τις ρυτίδες που έχουν αναπτυχθεί στην επάνω γενέτειρα του καμπτόμενου σωλήνα φουσκώνει προς τα έξω και η δομή αρχίζει να καταρρέει. Στις εικόνες 5.14 και 5.15 παρουσιάζεται η μορφή της αστοχίας του αγωγού διαμέτρου $36''$, όταν κάμπτεται υπό εσωτερική πίεση. Σε μηδενική πίεση, ο αγωγός κατά την αστοχία σχηματίζει μία ύβωση προς τα μέσα. Σε χαμηλά επίπεδα εσωτερικής πίεσης, ο σωλήνας κατά την κατάρρευση είναι επίσης τσακισμένος προς τα μέσα, παρόμοια με την περίπτωση μηδενικής πίεσης. Σε υψηλότερες πιέσεις, οι ρυτίδες που προκαλούνται καταλήγουν σε κυρτές υβώσεις-εξογκώματα όμοια με αυτό στην εικόνα 5.15(β), ενώ αυξάνεται η καμπυλότητα κατά την αστοχία. Όσο προχωράμε στη μεταλυγισμική περιοχή, τα εξογκώματα που εμφανίζονται κατά την κατάρρευση γίνονται πιο έντονα, όπως αυτό στην εικόνα 5.15(δ).

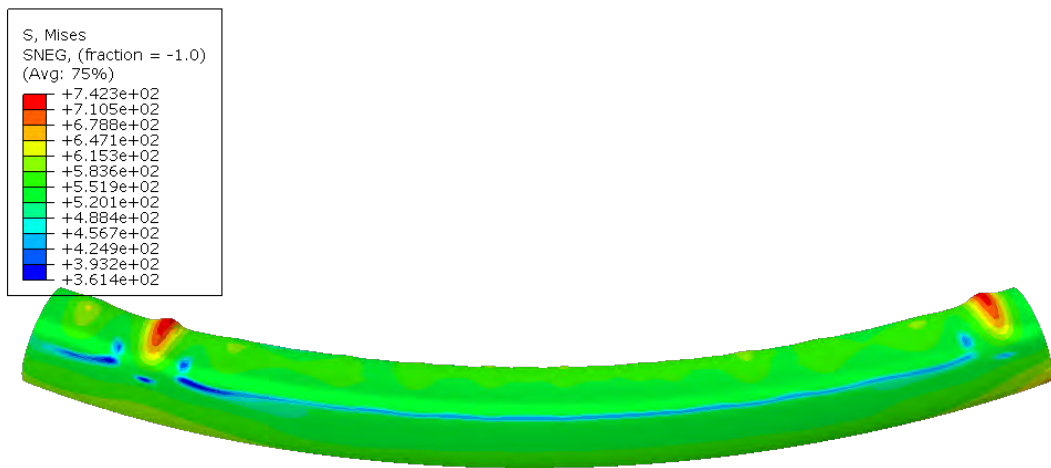


Εικόνα 5.14: Μορφή αστοχίας του αγωγού διαμέτρου 36", όταν κάμπτεται υπό διάφορες τιμές για την εσωτερική πίεση.

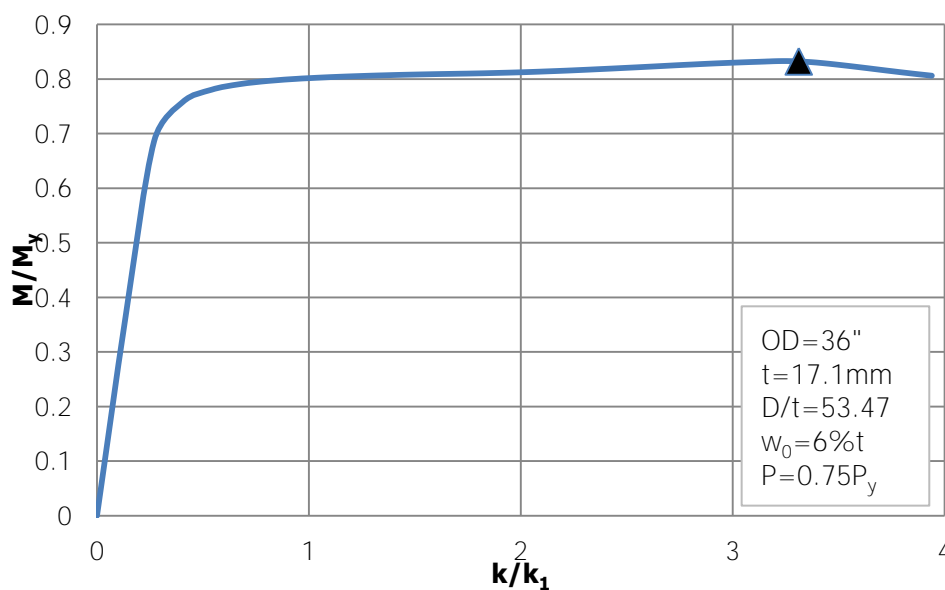


Εικόνα 5.15: Μορφή αστοχίας του αγωγού με διάμετρο 36" για διάφορες τιμές της εσωτερικής πίεσης.

Για υψηλότερες τιμές της εσωτερικής πίεσης, παρουσιάζεται πιο έντονη μείωση του πλάτους της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας. Η ατέλεια λόγω της πίεσης εξομαλύνεται κι επομένως ενισχύεται η κυκλικότητα της διατομής. Έτσι, ενδυναμώνεται η ικανότητα παραμόρφωσης του αγωγού και, συνεπώς, η τιμή της κρίσιμης καμπυλότητας κατά την αστοχία παίρνει υψηλές τιμές. Σε κάποιες περιπτώσεις όταν η αρχική γεωμετρική ατέλεια είναι μικρή, η μορφή της αστοχίας αγωγών που κάμπτονται υπό υψηλή εσωτερική πίεση διαφέρει από αυτή που παρουσιάστηκε παραπάνω. Η εικόνα 5.16 απεικονίζει την μορφή αστοχίας για ένα αγωγό με διάμετρο 36" με πλάτος αρχικής γεωμετρικής ατέλειας ίσο με $w_0=6\%t$, όταν αυτός κάμπτεται υπό εσωτερική πίεση $P=0.75P_y$. Παρατηρούμε ότι κατά την αστοχία του, αναπτύσσονται κυρτές υβώσεις σε περιοχές κοντά στα άκρα του αγωγού. Το διάγραμμα της εικόνας, δείχνει ότι η κρίσιμη καμπυλότητα κατά την κατάρρευση του αγωγού ισούται περίπου με $k_c=3.3k_1$.

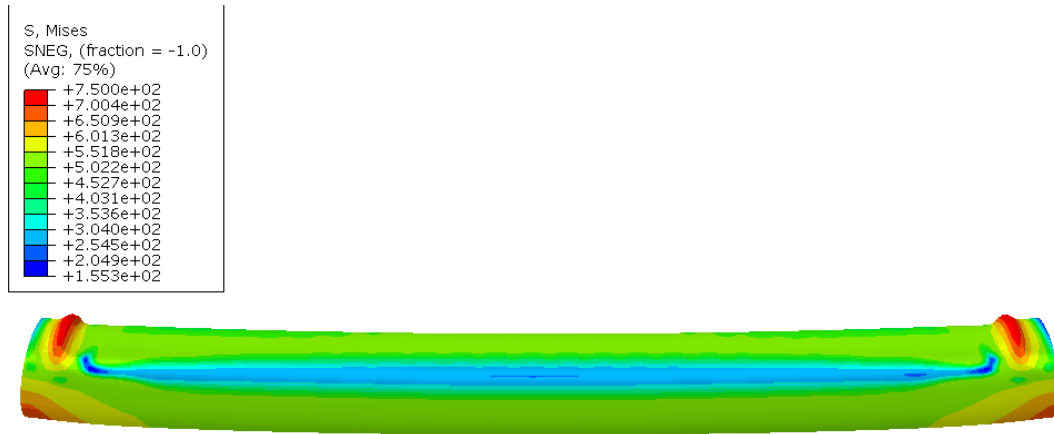


Εικόνα 5.16: Μορφή αστοχίας για ένα αγωγό με διάμετρο 36" με πλάτος αρχικής γεωμετρικής ατέλειας ίσο με $w_0=6\%t$, όταν αυτός κάμπτεται υπό εσωτερική πίεση $P=0.75P_y$.



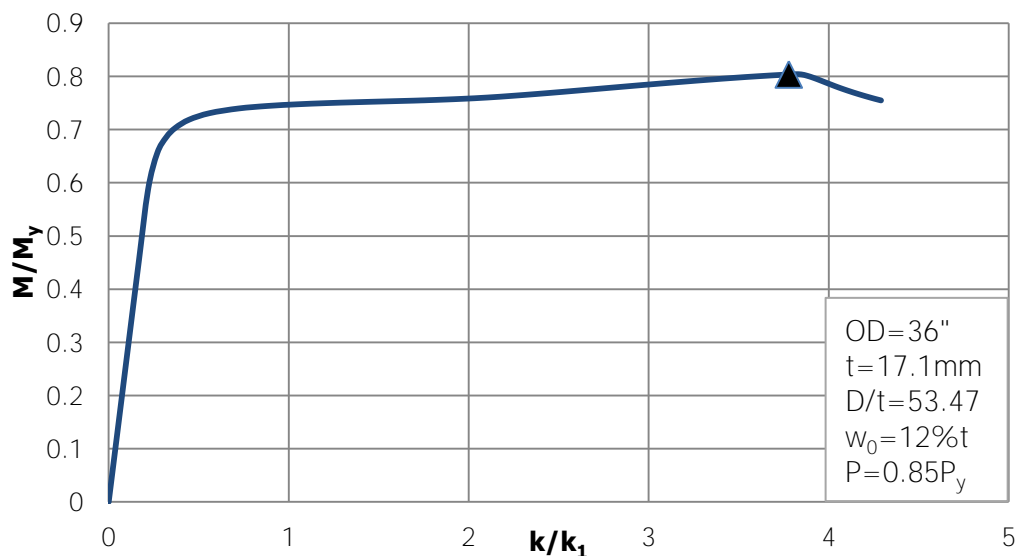
Εικόνα 5.17: Διάγραμμα ροπής καμπυλότητας για ένα αγωγό με διάμετρο 36" με πλάτος αρχικής γεωμετρικής ατέλειας ίσο με $w_0=6\%t$, όταν αυτός κάμπτεται υπό εσωτερική πίεση $P=0.75P_y$.

Για τον αγωγό με διάμετρο 48", για τον οποίο ισχύει $D/t \approx 63$, παρουσιάστηκε, επίσης, η μορφή αστοχίας στην οποία αναπτύσσονται κυρτές υβώσεις στις περιοχές κοντά στα άκρα. Η εικόνα 5.18 απεικονίζει τη μορφή αστοχίας ενός αγωγού 48", μετά την κάμψη του υπό εσωτερική πίεση $P=0.65P_y$. Το πλάτος της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας ισούται με $w_0=0.05t$.



Εικόνα 5.18: Μορφή αστοχίας για ένα αγωγό με διάμετρο 48" με πλάτος αρχικής γεωμετρικής ατέλειας ίσο με $w_0=0.05t$, όταν αυτός κάμπτεται υπό εσωτερική πίεση $P=0.65P_y$.

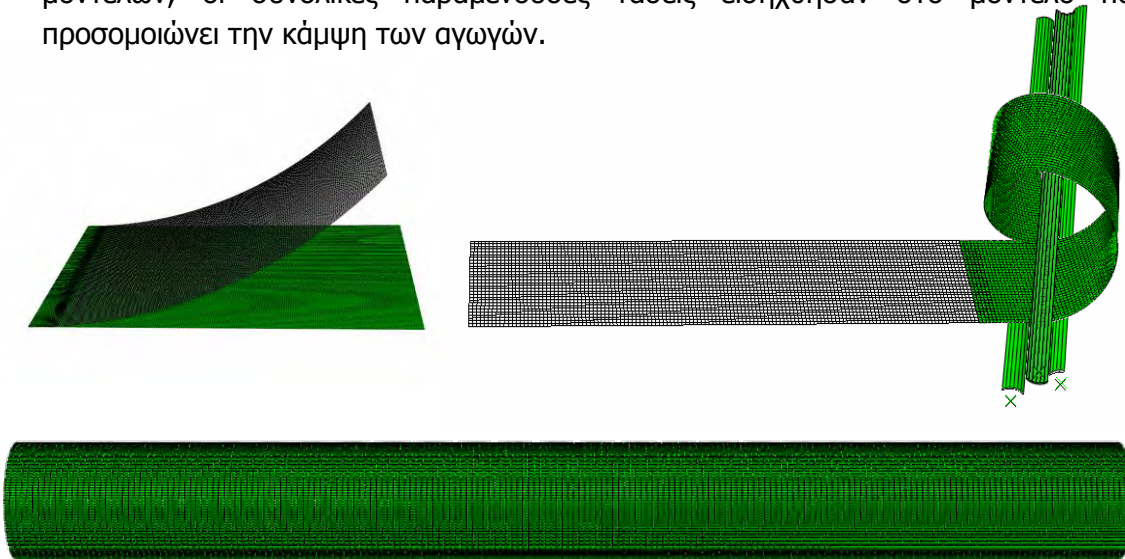
Σε εξαιρετικά υψηλές τιμές για την εσωτερική πίεση, οι τιμές που παίρνει η κρίσιμη καμπυλότητα κατά την αστοχία είναι τόσο μεγάλες, που είναι σχεδόν ανέφικτο να επιτευχθούν σε πρακτικές εφαρμογές, λόγω των κινηματικών περιορισμών που επιβάλλονται από τη συνολική διάταξη. Ενδεικτικά, παραβάλλεται το ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 5.19) το οποίο αναφέρεται στην κάμψη ενός αγωγού διαμέτρου 36", υπό εσωτερική πίεση ίση με $P=0.85P_y$. Η αρχική γεωμετρική ατέλεια που εισάγεται στον αγωγό έχει πλάτος ίσο με $w_0=0.12t$.



Εικόνα 5.19: Διάγραμμα ροπής καμπυλότητας για ένα αγωγό με διάμετρο 36" με πλάτος αρχικής γεωμετρικής ατέλειας ίσο με $w_0=12\%t$, όταν αυτός κάμπτεται υπό εσωτερική πίεση $P=0.85P_y$.

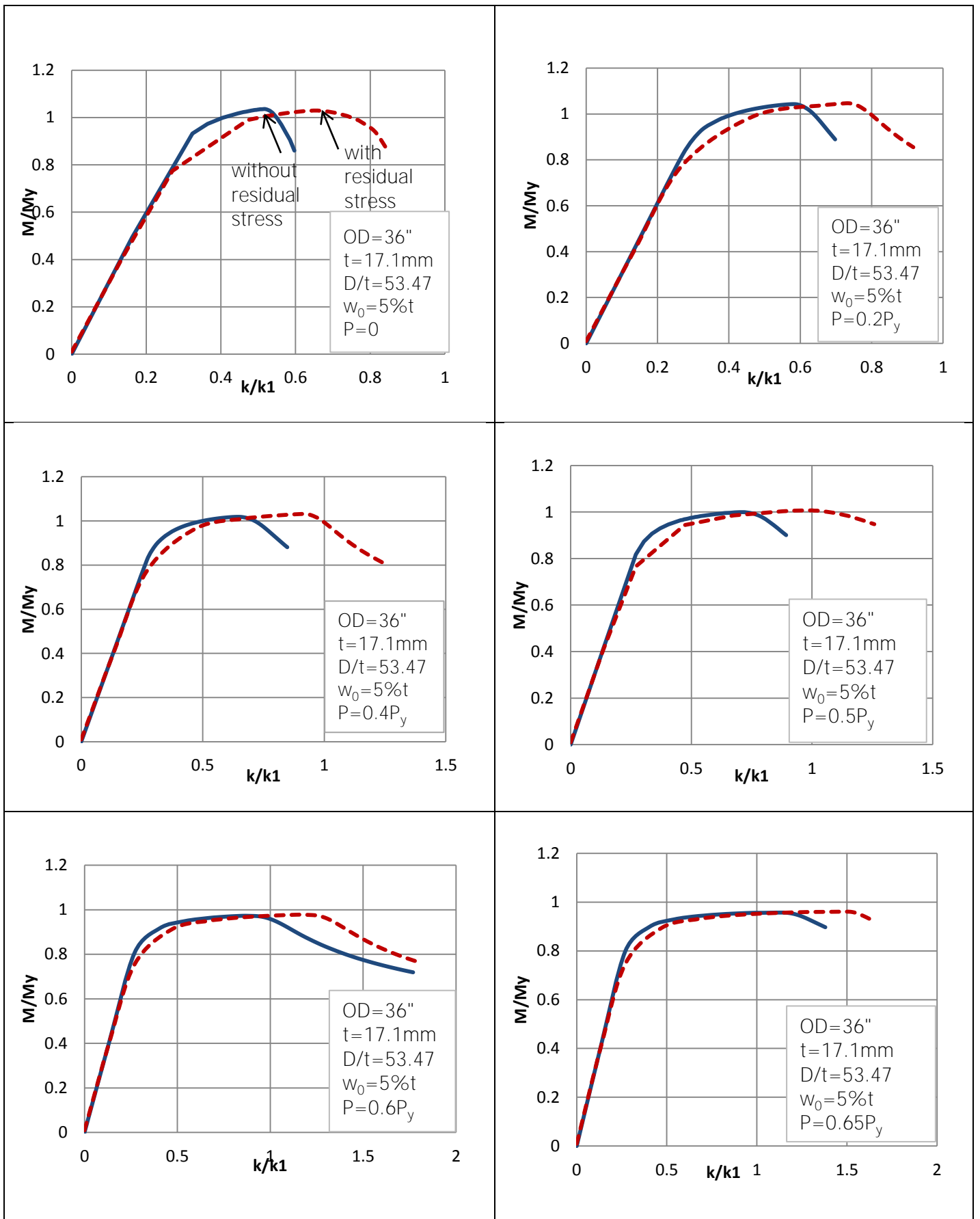
5.3 Επιρροή των παραμενουσών τάσεων στην καμπτική αντοχή

Στην παρούσα ενότητα, μελετάται η επιρροή των παραμενουσών τάσεων από την εκτύλιξη του ελάσματος από το ρολό και την εν ψυχρώ κάμψη του για την κατεργασία διαμόρφωσης της ελικοειδούς ραφής. Ο υπολογισμός των παραμενουσών τάσεων έγινε με χρήση του μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Συνοπτικά, αφού γίνει ο υπολογισμός των παραμενουσών τάσεων από την εκτύλιξη του ελάσματος από το ρολό, με ένα κατάλληλο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, οι τάσεις εισάγονται ως αρχικές ατέλειες στο μοντέλο που προσομοιώνει την κάμψη του ελάσματος για την κατεργασία ελικοειδούς ραφής. Έπειτα, επιλέχθηκε ένα αντιπροσωπευτικό στοιχείο, στο οποίο η κατανομή των τάσεων είναι ενδεικτική για την κατεργασία. Τελικά, αφού έγιναν οι απαραίτητες μετατροπές από το τοπικό σύστημα συντεταγμένων του ενός στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων του άλλου μοντέλου, ώστε να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ των δύο μοντέλων, οι συνολικές παραμένουσες τάσεις εισήχθησαν στο μοντέλο που προσομοιώνει την κάμψη των αγωγών.

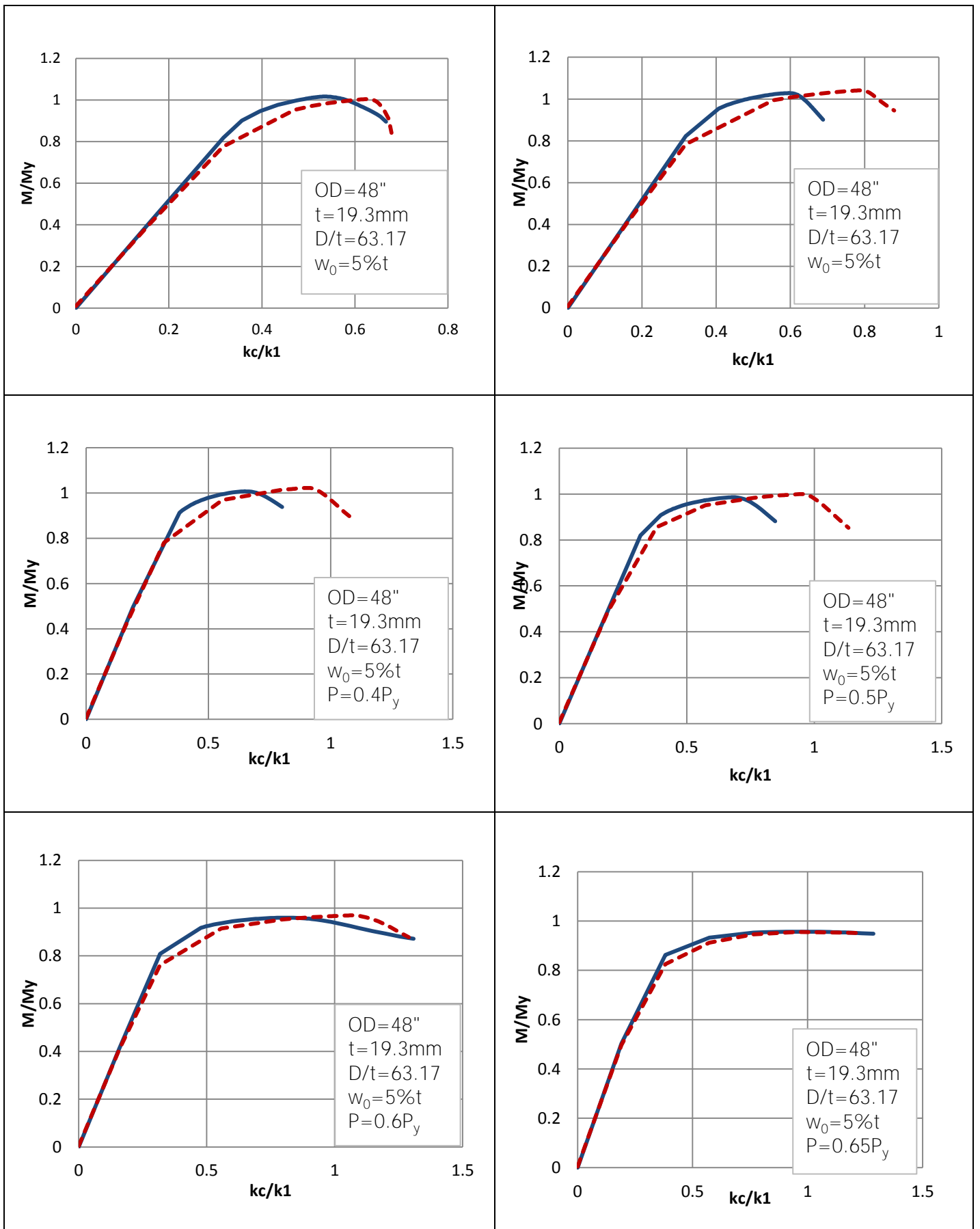


Εικόνα 5.20: Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν.

Στα ακόλουθα διαγράμματα 5.21 και 5.22, παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ αναλύσεων με και χωρίς παραμένουσες τάσεις. Τα διαγράμματα αφορούν τον αγωγό με διάμετρο 36" και το πλάτος της αρχικής ατέλειας που εισάγεται ισούται με $w_0=5\%t$. Οι αναλύσεις που συμπεριλαμβάνουν την επιρροή από τις παραμένουσες τάσεις, αφορούν έλασμα με πλάτος $W=60''$ το οποίο εκτυλίσσεται από ρολό με διάμετρο $D_{coil}=1200mm$. Το έλασμα αυτό κάμπτεται στη διάταξη τριών ελαστρων, που βρίσκονται σε διεύθυνση γωνίας ίσης με περίπου 32° με το έλασμα. Οι καμπύλες με μπλε χρώμα αντιπροσωπεύουν τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις οι οποίες δεν συμπεριλαμβάνουν τις προκύπτουσες από προηγούμενες κατεργασίες τάσεις, ενώ με διακεκομμένες με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα στα οποία έχει γίνει εισαγωγή των τάσεων αυτών. Τα αριθμητικά αποτελέσματα καταδεικνύουν μια σημαντική αύξηση της ικανότητας παραμόρφωσης, όταν στην ανάλυση συμπεριλαμβάνονται παραμένουσες τάσεις.

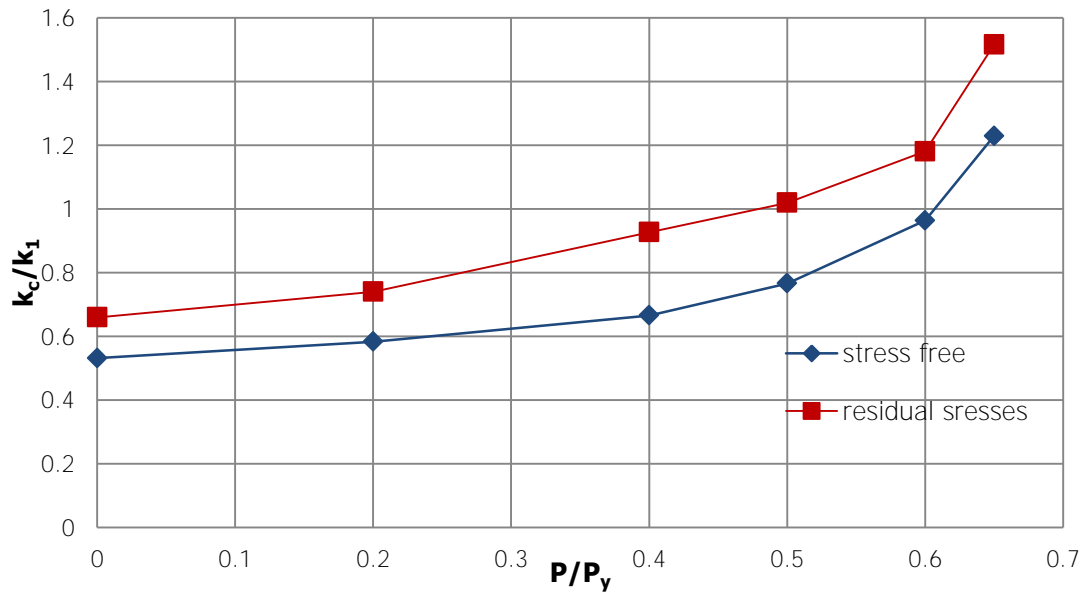


Εικόνα 5.21: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις, για διάφορες τιμές της εσωτερικής πίεσης, για τον αγωγό διαμέτρου 36".

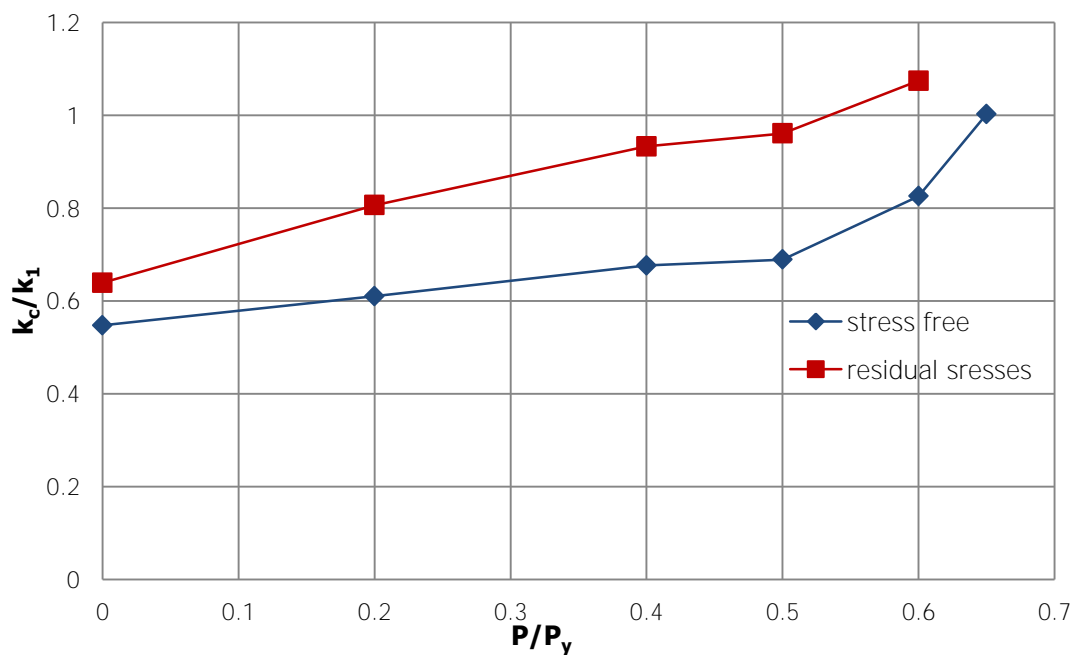


Εικόνα 5.22: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις με και χωρίς παραμεινυσες τάσεις, για διάφορες τιμές της εσωτερικής πίεσης, για τον αγωγό διαμέτρου 48".

Τα επόμενα διαγράμματα 5.23 και 5.24, απεικονίζουν τη μεταβολή της κρίσιμης καμπυλότητας με την αύξηση της εσωτερικής πίεσης για τους αγωγούς διαμέτρου 36" και 48", όταν στην ανάλυση αμελούνται και όταν συμπεριλαμβάνονται οι συνολικές παραμένουσες τάσεις από την εκτύλιξη του ελάσματος από το ρολό και την εν ψυχρώ κάμψη του για την κατεργασία ελικοειδούς ραφής. Στη δεύτερη περίπτωση, όταν στην ανάλυση συμπεριλαμβάνονται παραμένουσες τάσεις, η κρίσιμη καμπυλότητα κατά την αστοχία αυξάνεται αξιοσημείωτα, με ποσοστό που κυμαίνεται μεταξύ 25% και φτάνει έως 40%. Και στις δύο περιπτώσεις, η κρίσιμη καμπυλότητα αυξάνεται σχεδόν εκθετικά με την αύξηση της εσωτερικής πίεσης.

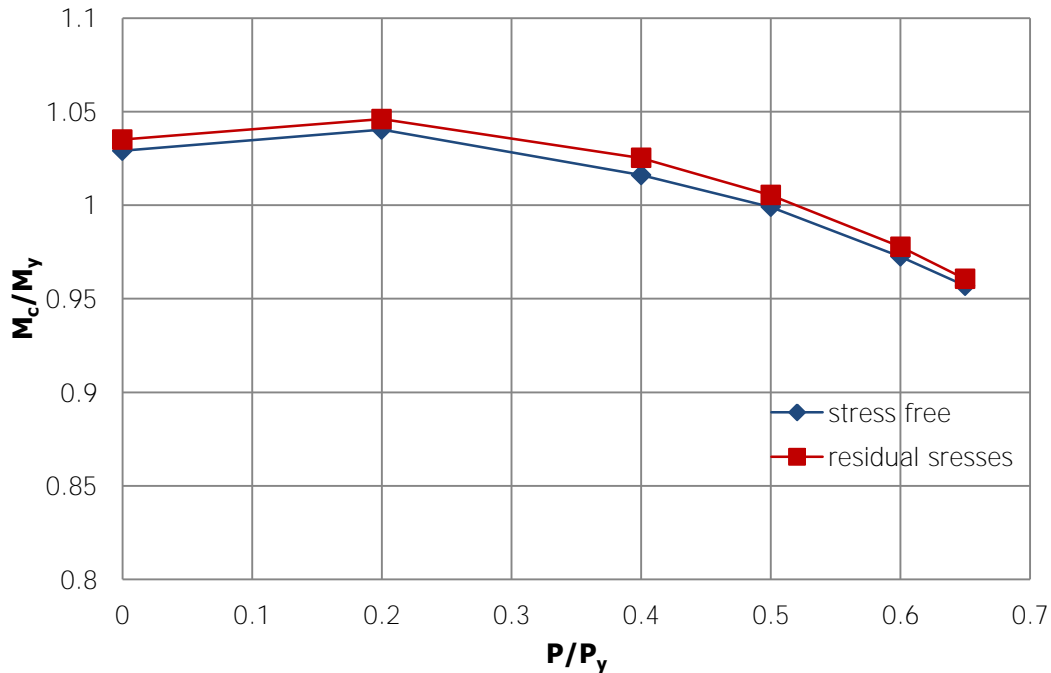


Εικόνα 5.23: Μεταβολή της κρίσιμης καμπυλότητας σε σχέση με την εσωτερική πίεση στις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις, για τον αγωγό διαμέτρου 36".

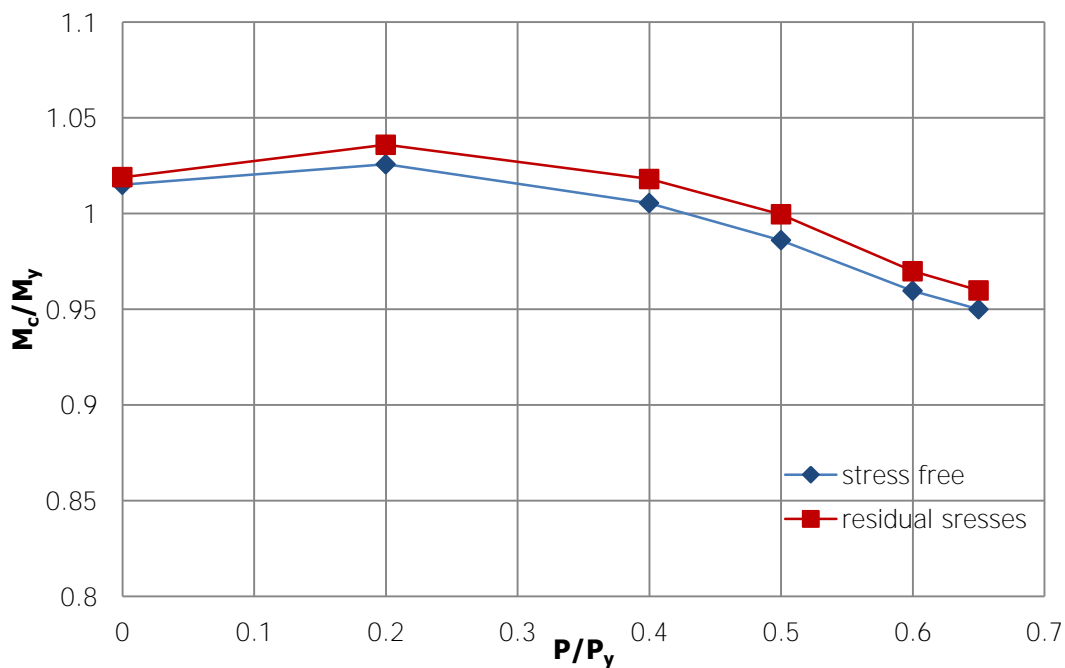


Εικόνα 5.24: Μεταβολή της κρίσιμης καμπυλότητας σε σχέση με την εσωτερική πίεση στις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις, για τον αγωγό διαμέτρου 48".

Η μεταβολή της μέγιστης ροπής με την αύξηση της εσωτερικής πίεσης για τους αγωγούς διαμέτρου 36" και 48", όταν στην ανάλυση αμελούνται και όταν συμπεριλαμβάνονται οι συνολικές παραμένουσες τάσεις, παρουσιάζεται στα διαγράμματα 5.25 και 5.26. Και στις δύο περιπτώσεις, αρχικά, όταν εισάγεται εσωτερική πίεση, παρατηρείται μία στοιχειώδης αύξηση της μέγιστης ροπής σε σύγκριση με την μηδενική εσωτερικής πίεση. Έπειτα, όσο αυξάνεται η πίεση, η κρίσιμη καμπυλότητα μειώνεται.



Εικόνα 5.25: Μεταβολή της μέγιστης ροπής κάμψης σε σχέση με την εσωτερική πίεση στις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις, για τον αγωγό διαμέτρου 36".



Εικόνα 5.26: Μεταβολή της μέγιστης ροπής κάμψης σε σχέση με την εσωτερική πίεση στις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις, για τον αγωγό διαμέτρου 48".

5.4 Σύγκριση με μεθοδολογίες σχεδιασμού

Τα διεθνή πρότυπα για το σχεδιασμό, που ορίζουν τα επιτρεπτά όρια για την κρίσιμη παραμόρφωση των αγωγών όταν υφίστανται κάμψη υπό εσωτερική πίεση, είναι τα DNV OS-F101 [12] και CSA Z662 [13], που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Παρακάτω, συγκρίνονται οι οριακές τιμές για την κρίσιμη καμπυλότητα που προκύπτουν από τα πρότυπα, με αυτές που προκύπτουν από τα αριθμητικά μοντέλα και για τις δύο διαμέτρους, τα οποία συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα. Το πλάτος της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας που χρησιμοποιήθηκε και για τις δύο γεωμετρίες είναι $w_0=0.05t$.

Πίνακας 5.3: Σύνοψη αριθμητικών αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις.

P/Py	OD=36"		OD=48"	
	k/k1		k/k1	
	αναλύσεις χωρίς παραμένουσες τάσεις	αναλύσεις με παραμένουσες τάσεις	αναλύσεις χωρίς παραμένουσες τάσεις	αναλύσεις με παραμένουσες τάσεις
0	0.53131	0.659657	0.54753	0.639066
0.2	0.58305	0.740159	0.610216	0.80632
0.4	0.66567	0.927214	0.635788	0.932939
0.5	0.7662	1.019845	0.689015	0.960844
0.6	0.96357	1.18095	0.825781	1.074355
0.65	1.229	1.516523	1.002838	1.002

OD=36", t=17.1mm

- Πρότυπο DNV OS-F101

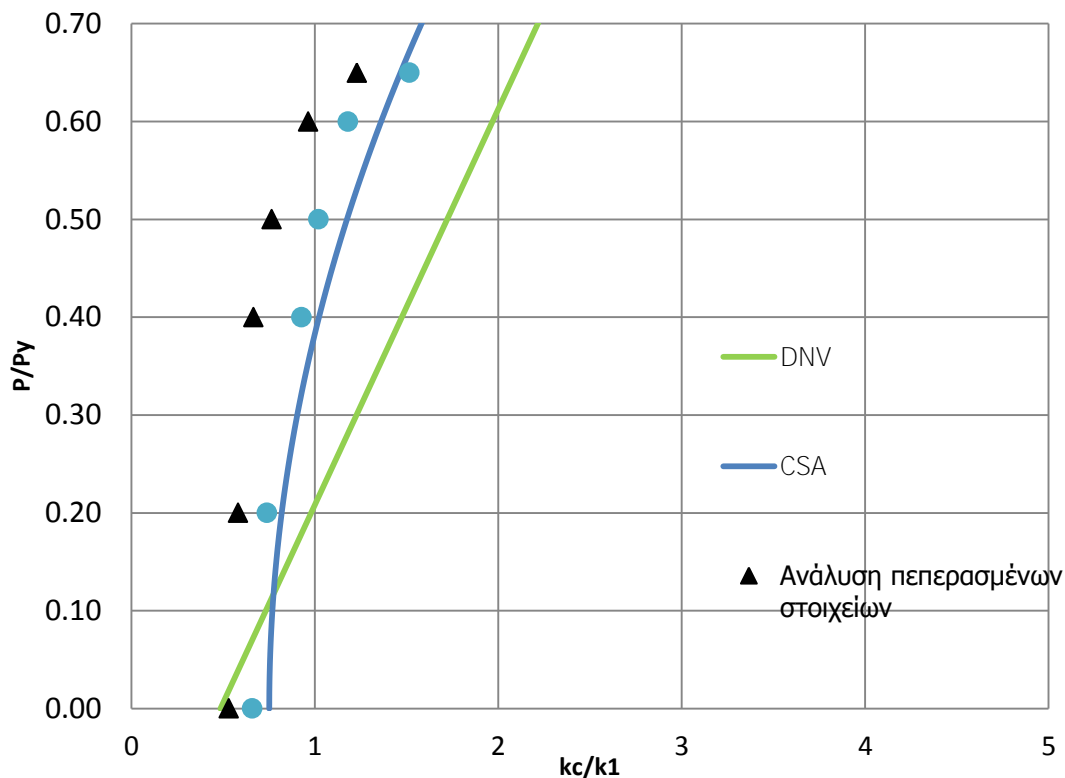
Για τον χάλυβα βαθμού X70, ισχύει ότι $SMYS=70\text{ksi}$ (482 MPa) και $SMTS=81.9\text{ksi}$ (565 MPa). Από τους πίνακες 5.4, 5.10, και 7.5 στο πρότυπο, προκύπτουν αντίστοιχα $a_u=0.96$, και $a_h=0.93$. Για διάμετρο $D=36"$, με πάχος τοιχώματος $t=17.1\text{mm}$, ο συντελεστής περιφερειακής συγκόλλησης ισχύει ότι $a_{gw}\approx 0.7$, δεδομένου ότι $D/t\approx 53$. Τελικά, η κρίσιμη παραμόρφωση είναι:

$$\varepsilon_c = 0.0053007 + 0.001507p_{min} \quad (5.1)$$

- Πρότυπο CSA Z662

Για διάμετρο $D=36"$, με πάχος τοιχώματος $t=17.1\text{mm}$, η κρίσιμη παραμόρφωση δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_c = 6.85 \cdot 10^{-3} + 5.103 \cdot 10^{-5} p_i^2 \quad (5.2)$$



Εικόνα 5.27: Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις για τον αγωγό με διάμετρο 36" με τα πρότυπα DNV και CSA.

Παρατηρούμε ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι εν γένει εντός των ορίων που προκύπτουν από τα διεθνή πρότυπα. Στο διάγραμμα 5.28, παρουσιάζεται η αντίστοιχη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις για τον αγωγό με διάμετρο 48" με τα πρότυπα DNV και CSA. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν είναι και σε αυτή την περίπτωση εντός των ορίων που προκύπτουν από τα διεθνή πρότυπα.

OD=48", t=17.1mm

- Πρότυπα DNV OS-F101

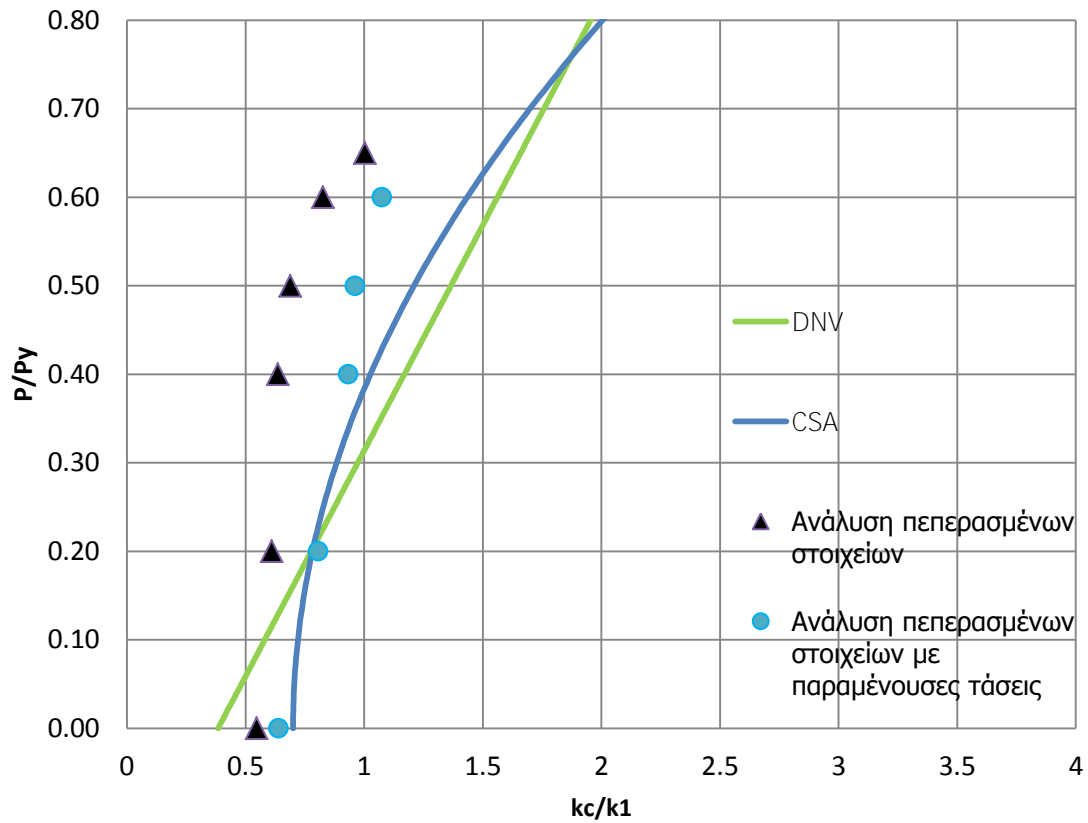
Για διάμετρο $D=48''$, με πάχος τοιχώματος $t=19.3\text{mm}$, ισχύει ότι ο συντελεστής περιφερειακής συγκόλλησης ισχύει ότι $a_{gw} \approx 0.6$, δεδομένου ότι $D/t \approx 63$. Προκύπτει $p_b=17.1882\text{MPa}$ και τελικά:

$$\varepsilon_c = 7.605 \cdot 10^{-3} + 2.545 \cdot 10^{-3} p_{min} \quad (5.3)$$

- Πρότυπο CSA Z662

Για διάμετρο $D=48''$, με πάχος τοιχώματος $t=19.3\text{mm}$, η κρίσιμη παραμόρφωση είναι:

$$\varepsilon_c = 5.41510^{-3} + 7.12 \cdot 10^{-5} p_i^2 \quad (5.4)$$



Εικόνα 5.28: Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις με και χωρίς παραμένουσες τάσεις για τον αγωγό με διάμετρο 48'' με τα πρότυπα DNV και CSA.

6 Συμπεράσματα

Από τις αναλύσεις που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, μπορούν να εξαχθούν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα για τη μηχανική συμπεριφορά των αγωγών, όταν υφίστανται κάμψη υπό εσωτερική πίεση.

Εν γένει, η εσωτερική πίεση εξομαλύνει τις γεωμετρικές ατέλειες στον αγωγό, ενισχύοντας την κυκλικότητα της διατομής, με αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση του αγωγού έναντι τοπικού λυγισμού και την αύξηση της καμπτικής αντοχής του αγωγού. Η συμπεριφορά αυτή γίνεται αντιληπτή τόσο στα πειράματα και την προσομοίωση αυτών, όσο και στις αναλύσεις για τους αγωγούς μεγάλης διαμέτρου. Η εσωτερική πίεση έχει έντονη σταθεροποιητική επίδραση, αυξάνοντας την καμπτική αντοχή των αγωγών. Συνεπώς, η εσωτερική πίεση συνεπάγεται με σημαντική αύξηση της κρίσιμης καμπυλότητας κατά την αστοχία στους αγωγούς. Καθώς αυξάνεται η τιμή της εσωτερικής πίεσης, η κρίσιμη καμπυλότητα κατά την κατάρρευση αυξάνεται σχεδόν εκθετικά. Παράλληλα, με αύξηση της πίεσης παρατηρείται μία μείωση στην μέγιστη ροπή κάμψης των αγωγών.

Οι αγωγοί είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι στην ύπαρξη αρχικών γεωμετρικών ατελειών. Για ατέλειες με μεγαλύτερο πλάτος, η κρίσιμη καμπυλότητα κατά την αστοχία είναι αισθητά μικρότερη συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές για ατέλειες με μικρότερο πλάτος. Η ευαισθησία της καμπτικής συμπεριφοράς των αγωγών σε αρχικές γεωμετρικές ατέλειες γίνεται αντιληπτή τόσο από τα πειραματικά αποτελέσματα, όσο και από τις αναλύσεις για τους αγωγούς μεγάλης διαμέτρου. Στα πειραματικά αποτελέσματα και η προσομοίωση αυτών, έδειξε ότι για πολύ μικρές τιμές για το πλάτος της ατέλειας, οι τιμές που προκύπτουν για την κρίσιμη καμπυλότητα κατά την αστοχία είναι τόσο μεγάλες που δεν επιτρέπονται από τις οριακές τιμές που προβλέπονται από τα πρότυπα σχεδιασμού. Στους αγωγούς μεγάλης διαμέτρου, παραμετρικές αναλύσεις για τους αγωγούς με διάμετρο 36" και 48", φανερώνουν την ευαισθησία των αγωγών στο πλάτος της αρχικής ατέλειας, ανεξάρτητα από το μέγεθος της εσωτερικής πίεσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο μελετάται η επιρροή των παραμενουσών τάσεων από την εκτύλιξη του ελάσματος από το ρολό και την εν ψυχρώ κάμψη του για την κατεργασία της ελικοειδούς ραφής. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται καταδεικνύουν μια σημαντική αύξηση της ικανότητας παραμόρφωσης, όταν στην ανάλυση συμπεριλαμβάνονται παραμένουσες τάσεις. Η κρίσιμη καμπυλότητα κατά την κατάρρευση στις αναλύσεις με τις παραμένουσες τάσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερη συγκριτικά με τις αναλύσεις χωρίς τις παραμένουσες τάσεις.

Βιβλιογραφία

- [1] Dorey AB, Murray DW, Cheng JJ, Grondin GY, Zhou ZJ. Testing and experimental results from NPS30 line pipe under combined loads. OMAE PL 99-5022. In: Proceedings of the 18th international conference on offshore mechanics and arctic engineering, June 1999, St. Johns, Newfoundland.
- [2] Suzuki N, Kondo J, Endo S, Ishikawa N, Okatsu M, Shimamura J. Strain capacity of X80 high strain line pipes. OMAE2007-29505. In: Proceedings of the 26th international conference on offshore mechanics and arctic engineering, June 2007, San Diego, CA.
- [3] Brazier LG. On the flexure of thin cylindrical shells and other thin sections. Proc R Soc London A 1927;116:104–14.
- [4] Stephens WB, Starnes JH, Almorh BO. Collapse of long cylindrical shells under combined bending and pressure loads. AIAA J 1975;13:20–5.
- [5] Fabian O. Collapse of cylindrical, elastic tubes under combined bending, pressure and axial loads. Int J Solids Struct 1977;13:1257–70.
- [6] Houliara S, Karamanos SA. Buckling and post-buckling of long pressurized elastic thin-walled tubes under in-plane bending. Int J Nonlinear Mech 2006;41:491–511.
- [7] Mathon C, Limam A. Experimental collapse of thin cylindrical shells submitted to internal pressure and pure bending. Thin-Walled Struct 2006;44:39–50.
- [8] Suzuki N, Kondo J, Endo S, Ishikawa N, Okatsu M, Shimamura J. Effects of geometric imperfection on bending capacity of X80 linepipe. PRC2006-10070. In: Proceedings of the 6th international pipeline conference, September 2006, Alberta, Canada.
- [9] Limam A, Lee LH, Corona E, Kyriakides S. Inelastic wrinkling and collapse of tubes under combined bending and internal pressure. Int J Mech Sci 2010;52:637-647.
- [10] Kyriakides S, Corona E. Mechanics of Offshore Pipelines, Vol. I: Buckling and Collapse. Elsevier 2007.
- [11] Vasilikis D, Karamanos SA, Sjors HJ, Gresnigt AM. Bending deformation capacity of large-diameter spiral-welded tubes. IPC2014-33231. In: Proceedings of the 10th International Pipeline Conference, September 29 – October 03, 2014, Calgary, Alberta, Canada.
- [12] DNV OS-F101, Submarine Pipeline Systems. 2012.
- [13] Canadian Standards Association. CSA Z662. Oil and Gas Pipeline Systems. 2007 .