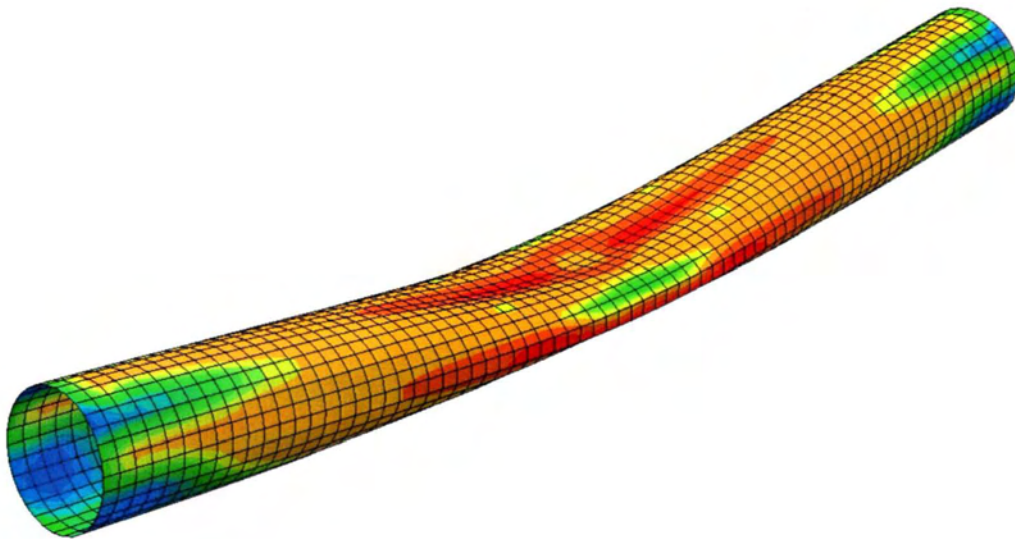


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**Προσομοίωση της Μηχανικής Συμπεριφοράς
Υποθαλάσσιων Αγωγών Υπό Εξωτερική Πίεση και Κάμψη
με Πεπερασμένα Στοιχεία**

Κωνσταντίνος-Γεώργιος Ναμλής



Επιβλέπων: Σπύρος Α. Καραμάνος
Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΘ

Βόλος, 2014



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 13283/1
Ημερ. Εισ.: 04-11-2014
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜ
2014
NAM

© 2014 Κωνσταντίνος-Γεώργιος Ναμλής

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής
(Επιβλέπων)

Δρ. Σπύρος Καραμάνος
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

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

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Αλέξης Κερμανίδης
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής. Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Άννα και Θεόφιλο, καθώς και την αδερφή μου Θάλεια για την ηθική και υλική υποστήριξη τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόσωμο το προσωπικό του Εργαστηρίου Μηχανικής & Αντοχής Υλικών και την διδακτορική φοιτήτρια Αγλαΐα Πουρνάρα για την απλόχερη συνδρομή τους, αλλά ιδιαίτερα τον Δρ. Δανιήλ Βασιλική για την εκμάθηση του υπολογιστικού προγράμματος Abaqus και τον χρόνο που διέθεσε σε λύσεις καίριων προβλημάτων ανάλυσης σε κομβικά χρονικά σημεία. Τον ευχαριστώ πολύ και του εύχομαι ό,τι καλύτερο.

Ευχαριστώ, ιδιαίτερα τους στενούς φίλους μου για όλες τις στιγμές, καλές και κακές, που περάσαμε μαζί καθ' όλη την διάρκεια της φοιτητικής και σχολικής μου σταδιοδρομίας.

Είμαι ευγνώμων, επίσης, στα μέλη και καθηγητές της εξεταστικής επιτροπής Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο και Αλέξη Κερμανίδη για την ανάγνωση της εργασίας και τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Τέλος, η σύνταξη της εργασίας αυτής δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς το κίνητρο και την πολύτιμη καθοδήγηση που μου δόθηκε από τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου, Σπύρο Καραμάνο, ο οποίος πέρα από την απλόχερη βοήθεια του για την εργασία έγινε πρότυπο για την μετέπειτα επαγγελματική μου σταδιοδρομία. Τον ευχαριστώ πολύ.

Προσομοίωση της Μηχανικής Συμπεριφοράς Υποθαλάσσιων Αγωγών Υπό Εξωτερική Πίεση και Κάμψη με Πεπερασμένα Στοιχεία

Κωνσταντίνος-Γεώργιος Ναμλής

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2014

Επιβλέπων: Δρ. Σπύρος Καραμάνος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το θέμα της προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς υποθαλάσσιων αγωγών που υπόκεινται σε φορτίσεις, εξωτερικής πίεσης και κάμψης. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην μηχανική συμπεριφορά αγωγών μελετώντας κυρίως το φαινόμενο της αστοχίας των αγωγών μέσω της εύρεσης του κρίσιμου φορτίου λόγω λυγισμού (δομικής αστάθειας), της μεταλυγισμικής συμπεριφοράς και της ευαισθησίας σε αρχικές ατέλειες. Η παρούσα μελέτη είναι υπολογιστική χρησιμοποιώντας υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για την μοντελοποίηση και την ακόλουθη εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων.

Πιο αναλυτικά, στο πρώτο μέρος της εργασίας παρουσιάζεται το πεδίο εφαρμογής των υποθαλάσσιων αγωγών και η σημασία τους, παρουσιάζοντας το κίνητρο σε επιστήμονες και ερευνητές να μελετήσουν την απόκριση των αγωγών σε μεγάλα θαλάσσια βάθη κάτι που αποτελεί και τον σκοπό της εργασίας αυτής.

Έπειτα, ακολουθεί το τμήμα της εργασίας που αναφέρεται στην αντοχή και την συμπεριφορά αγωγών υπό τη φόρτιση εξωτερικής πίεσης με αναφορά στον λυγισμό και την πλαστικοποίηση κυλινδρικών κελυφών. Στην συνέχεια αναπτύσσεται η μοντελοποίηση του προβλήματος αυτού μέσω υπολογιστικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, αφού προηγηθεί η επιλογή υλικού και η αναφορά των τεχνικών χαρακτηριστικών του (διαστάσεις, υλικό). Με βάση αυτή την πληροφορία και το υπολογιστικό μοντέλο ακολουθούν αποτελέσματα από τις υπολογιστικές αναλύσεις, για διάφορα μήκη σωλήνα και λόγους διαμέτρου προς πάχος (D/t), για το πώς επηρεάζεται η τιμή της πίεσης κατάρρευσης από την ύπαρξη αρχικών ατελειών και άλλων παραμέτρων σε ένα παχύ μεταλλικό κυλινδρικό κέλυφος. Εν τέλει, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της ανάλυσης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την υπολογιστική προσομοίωση.

Αντίστοιχα, με την διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παρουσίαση της αντοχής υποθαλάσσιων αγωγών υπό εξωτερική πίεση, διεξάγεται η ίδια ανάλυση στο επόμενο κομμάτι της εργασίας για την φόρτιση της καθαρής κάμψης. Αρχικά, παρουσιάζεται ο λυγισμός και η ανελαστική συμπεριφορά αγωγών υπό κάμψη για διάφορους λόγους D/t , παρουσιάζοντας την μοντελοποίηση του προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία. Ακολουθεί η παρουσίαση αριθμητικών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων, καθώς και το πώς επηρεάζουν την αντοχή του αγωγού οι μικροί (αρχικοί) κυματισμοί πτύχωσης (wrinkles) που θεωρούνται ως αρχική ατέλεια με την άσκηση ροπής, εξάγοντας χρήσιμα συμπεράσματα για την αντοχή των αγωγών υπό

καμπτική φόρτιση.

Η φόρτιση υποθαλάσσιων αγωγών με συνδυασμένη καταπόνηση καθιστά το πρόβλημα περισσότερο ρεαλιστικό σε σχέση με τις μεμονωμένες φορτίσεις της εξωτερικής πίεσης ή της καθαρής κάμψης. Στο τμήμα της εργασίας που αναλύεται η συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης και κάμψης παρουσιάζονται τα φαινόμενα του λυγισμού και της ανελαστικής συμπεριφοράς σε έναν αγωγό για διάφορους λόγους D/t . Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων του προβλήματος με επακόλουθη εξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων. Εν τέλει, προκύπτουν τα συμπεράσματα που περιλαμβάνουν την μείωση του οριακού φορτίου κάμψης του αγωγού με την παρουσία εξωτερική πίεσης και αντίστροφα την μείωση της πίεσης κατάρρευσης με την παρουσία διαμήκους κάμψης.

Στόχος της εργασίας αυτής είναι να εισάγει και να εξοικειώσει τον αναγνώστη με τον ανελαστικό λυγισμό κυλινδρικών κελυφών σε συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης και κάμψης, καθώς και με τις αντίστοιχες δυνατότητες του υπολογιστικού προγράμματος Abaqus. Η παρουσίαση αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων είναι απαραίτητη για την πλήρη κατανόηση και εμβάθυνση στην μηχανική συμπεριφορά των αγωγών σε μεγάλα θαλάσσια βάθη, με στόχο την δομική τους ασφάλεια.

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| 1. Εισαγωγή | 9 |
| 1.1 Συνοπτική παρουσίαση του φυσικού προβλήματος | 9 |
| 1.2 Στόχος της παρούσας εργασίας | 13 |
| 2. Αντοχή σε εξωτερική πίεση | 14 |
| 2.1 Ελαστικός λυγισμός υπό εξωτερική πίεση | 15 |
| 2.1.1 Ατελής σωλήνας | 18 |
| 2.2 Μετα-λυγισμική ανελαστική συμπεριφορά | 20 |
| 2.3 Περιγραφή αγωγών | 22 |
| 2.3.1 Διαστάσεις αγωγού | 22 |
| 2.3.2 Υλικό αγωγού | 23 |
| 2.4 Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων | 25 |
| 2.4.1 Μοντελοποίηση σωλήνων μορφής "διατομής" | 26 |
| 2.4.2 Μοντελοποίηση τρισδιάστατων δακτυλίων πεπερασμένου μήκους | 27 |
| 2.5 Αριθμητικά αποτελέσματα | 31 |
| 2.5.1 Επίδραση αρχικής ατέλειας μορφής οβάλ (σ_0) | 31 |
| 2.5.2 Επίδραση παραμενουσών τάσεων | 37 |
| 2.5.3 Επίδραση της ανισοτροπίας του υλικού | 40 |
| 2.5.4 Η επίδραση της καμπύλης σ-ε του υλικού | 43 |
| 2.5.5 Η επίδραση του μήκους σωλήνα | 45 |
| 2.6 Συμπεράσματα | 47 |
| 3. Αντοχή σε καθαρή κάμψη | 49 |
| 3.1 Λυγισμός και πλαστική συμπεριφορά κυλινδρικών κελυφών σε καθαρή κάμψη | 50 |
| 3.2 Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων δακτυλίων πεπερασμένου μήκους | 54 |
| 3.2.1 Δημιουργία κυματισμών πτύχωσης (wrinkles) | 55 |
| 3.2.2 Δημιουργία τελικού μοντέλου με αρχική ατέλεια wrinkles | 57 |
| 3.3 Αριθμητικά αποτελέσματα | 58 |
| 3.3.1 Μηχανική συμπεριφορά αγωγών υλικού X70 σε κάμψη | 59 |
| 3.3.2 Επιρροή αρχικών κυματισμών πτύχωσης (wrinkles) στην αντοχή | 62 |
| 3.4 Συμπεράσματα | 66 |
| 4. Συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης και κάμψης | 68 |
| 4.1 Λυγισμός και πλαστική συμπεριφορά κυλινδρικών κελυφών σε συνδυασμένη φόρτιση εξωτερικής πίεσης και κάμψης | 69 |

| | |
|--|----|
| 4.2 Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων | 70 |
| 4.2.1 Μοντελοποίηση προβλήματος φόρτισης $P \rightarrow k$ | 72 |
| 4.2.2 Μοντελοποίηση προβλήματος φόρτισης $k \rightarrow P$ | 73 |
| 4.3 Αποτελέσματα | 73 |
| 4.4 Προβλέψεις με διδιάστατη ανάλυση..... | 77 |
| 4.5 Συμπεράσματα | 81 |
| 5. Συμπεράσματα | 82 |
| 6. Βιβλιογραφία..... | 83 |

1. Εισαγωγή

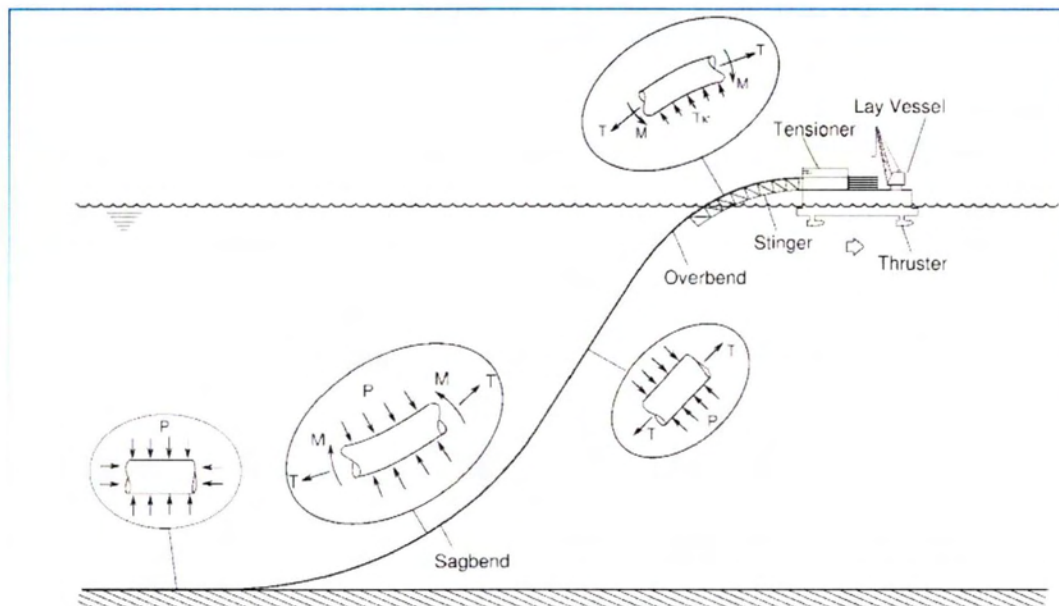
1.1 Συνοπτική παρουσίαση του φυσικού προβλήματος

Στην ιστορία της παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου καθ' όλη την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα, η σύγχρονη αναγέννηση του κλάδου ξεκίνησε στις αρχές του 1970, όταν η Βόρεια θάλασσα έγινε ένας σημαντικός χώρος υπεράκτιας (offshore) παραγωγής υδρογονανθράκων. Από τότε η επέκταση της υπεράκτιας βιομηχανίας έγινε συνεχής και ταχεία σε πολλά μέρη του κόσμου. Αυτό συνδυάστηκε με μία σταδιακή μετάβαση σε ολοένα και βαθύτερα νερά, όπου σήμερα η εξόρυξη έχει φθάσει να πραγματοποιείται ακόμα και σε νερά βάθους περίπου 7000 ft (2130 m), ενώ η εξερεύνηση ενεργειακών πόρων προχωράει τόσο βαθιά όσο και στα 10000 ft (3050 m). Οι αγωγοί είναι αναπόσπαστο και υψίστης σημασίας κομμάτι της βιομηχανίας των υδρογονανθράκων και χρησιμοποιούνται στην εξερεύνηση, γεώτρηση, παραγωγή και μεταφορά των ενεργειακών πόρων. Η εγκατάσταση και η λειτουργία των αγωγών σε βαθιά νερά θέτει υψηλές απαιτήσεις αντοχής. Οι υψηλές πιέσεις και οι μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες που επικρατούν στα βάθη της θάλασσας, οι υψηλές εξωτερικές δυνάμεις που προέρχονται από το περιβάλλον (π.χ. σεισμοί και άλλοι γεω-κίνδυνοι), οι μεγάλες φορτίσεις που δημιουργούνται κατά την εγκατάσταση τους σε μεγάλα βάθη και γενικότερα οι αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες συνεπάγονται ένα μεγάλο αριθμό οριακών καταστάσεων, οι οποίες πρέπει να αντιμετωπισθούν μέσω κατάλληλης τεχνολογικής έρευνας και ανάπτυξης.

Οι αγωγοί αποτελούν ένα σημαντικό μέσο συλλογής και μεταφοράς μίας μεγάλης ποικιλίας προϊόντων όπως πετρέλαιο, φυσικό αέριο, χημικές ουσίες, νερό κλπ. Η χρήση τους έχει επεκταθεί επειδή είναι ενεργειακά αποδοτικοί σε σχέση με άλλα μέσα μεταφοράς αλλά και λόγω της τεχνολογικής ανέλιξης τα τελευταία χρόνια, που καθιστούν τους υποθαλάσσιους και τους χερσαίους αγωγούς ικανούς να συνεισφέρουν ένα μεγάλο τμήμα της μεταφοράς ενέργειας διασχίζοντας χώρες και ηπείρους με ασφάλεια. Παρά το γεγονός ότι απαιτούν μεγάλο αρχικό κεφάλαιο κατασκευής, έχουν διάρκεια ζωής τουλάχιστον 40 χρόνια και απαιτούν σχετικά μικρή συντήρηση, πράγμα που τους κάνει ακόμα πιο πρακτικούς και αποδοτικούς. Είναι αυτονόητο πώς τα έργα που σχετίζονται με την εξόρυξη και την μεταφορά υδρογονανθράκων και φυσικού αερίου είναι έργα που απαιτούν επενδύσεις δισεκατομμυρίων δολαρίων, καθώς επίσης και σημαντικές διακρατικές συμφωνίες (λόγω της στρατηγικής τους σημασίας) πράγμα που καθιστά αναγκαία την απαίτηση για την αξιοπιστία και την δομική τους ακεραιότητα.

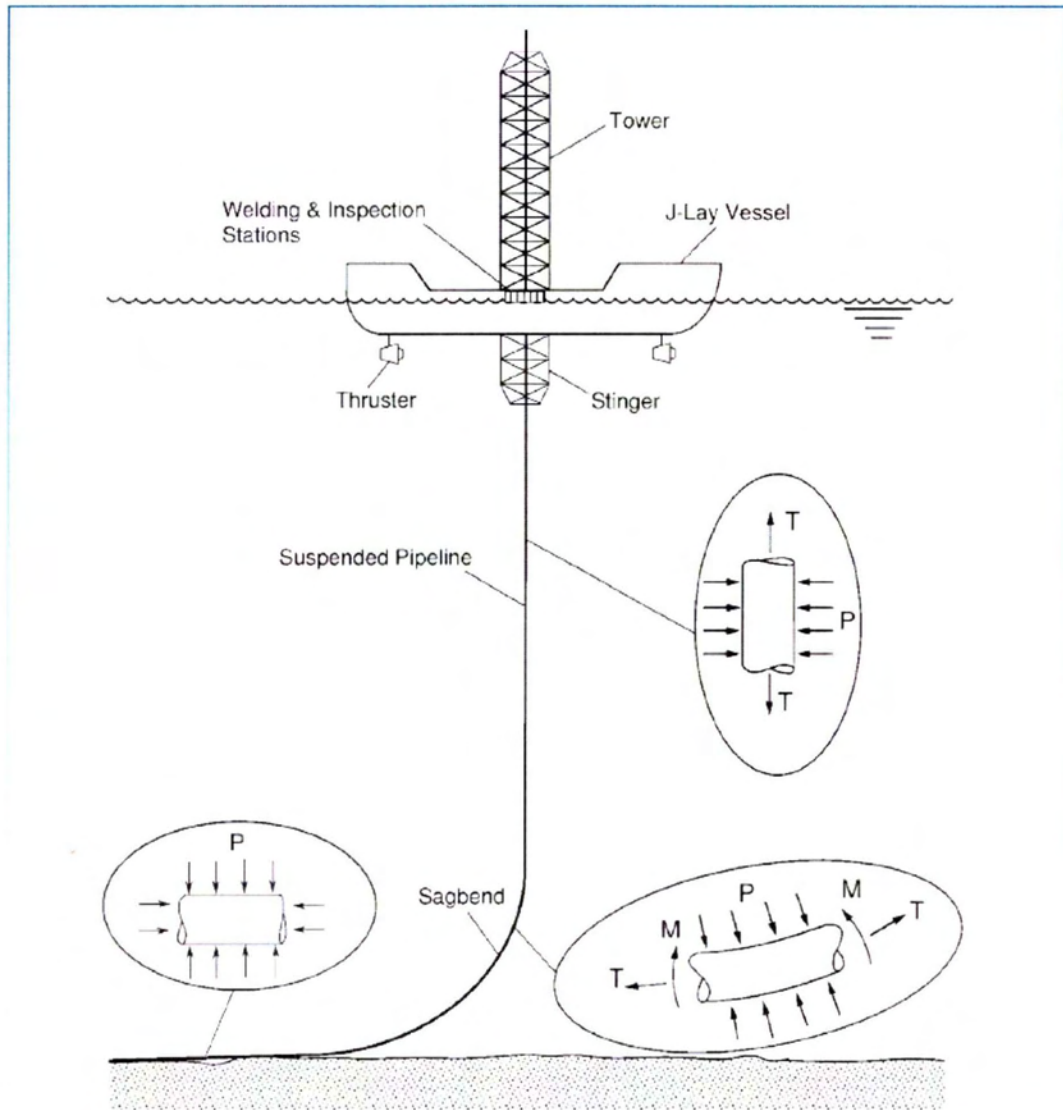
Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν τις φορτίσεις που τους καταπονούν κατά την εγκατάσταση, τις φορτίσεις λειτουργίας (όπως εξωτερική πίεση, κάμψη και αξονικά φορτία) και τις φορτίσεις που προέρχονται από σχεδιαστικά λάθη (ατέλειες). Η πλειοψηφία αυτών των καταστάσεων φόρτισης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό. Για παράδειγμα, κατά την

εγκατάσταση δημιουργούνται πλαστικές παραμορφώσεις στον αγωγό προκαλώντας μείωση στην τιμή του οριακού φορτίου με συνέπεια την υποβάθμιση της αντοχής του. Ενδεικτικά, στην πόντιση αγωγού με την μέθοδο S-lay είναι εμφανές πώς ο αγωγός αποκτά σημαντικές παραμορφώσεις (σχήμα 1.1). Αντίστοιχα, στην μέθοδο J-lay η οποία είναι η πλέον ενδεδειγμένη για την πόντιση αγωγών σε μεγάλα θαλάσσια βάθη (σχήμα 1.2) οι παραμορφώσεις είναι έντονες αποφεύγοντας την πρώτη ζώνη φόρτισης σε αντίθεση με την μέθοδο S-lay, κάτι που γίνεται εμφανές από τον διαφορετικό τρόπο πόντισης στις δύο μεθόδους. Επίσης, κατά την διαδικασία πόντισης με την μέθοδο Reeling, όπου ο αγωγός ξετυλίγεται από το περιστρεφόμενο τύμπανο του πλοίου και ποντίζεται στην θάλασσα (σχήμα 1.3), οι καμπτικές παραμορφώσεις είναι σημαντικές πριν ο αγωγός εισέλθει στο νερό. Αυτές οι τρεις μέθοδοι εγκατάστασης που αναφέρθηκαν παραπάνω (J-lay, S-lay, Reeling) αποτελούν τις βασικές μεθόδους πόντισης αγωγών σε θαλάσσια ύδατα.



Σχήμα 1.1 Σχηματική αναπαράσταση φορτίσεων κατά την πόντιση αγωγού με την μέθοδο εγκατάστασης S-lay (Kyriakides, S., Corona, E. (2007)).

Σημαντικό ρόλο στην μηχανική συμπεριφορά των υποθαλάσσιων αγωγών, και συγκεκριμένα στην μείωση της αντοχής τους παίζουν οι αρχικές ατέλειες. Ως ατέλεια μπορεί να θεωρηθεί η απόκλιση του σχήματος ενός αγωγού από το τέλειο κυκλικό ή κυλινδρικό σχήμα, που μπορεί να δημιουργηθεί είτε από ακούσια σφάλματα στην παραγωγή των σωλήνων, είτε από κάποιο απρογραμμάτιστο χτύπημα. Επίσης, ατέλεια μπορεί να θεωρηθεί η ανισοτροπία που παρουσιάζει το υλικό του αγωγού σε διάφορες διευθύνσεις ή η ύπαρξη παραμενουσών τάσεων λόγω κάποιας συγκόλλησης. Αυτό καθιστά αναγκαία την θεώρηση των αρχικών ατελειών κατά τον σχεδιασμό.



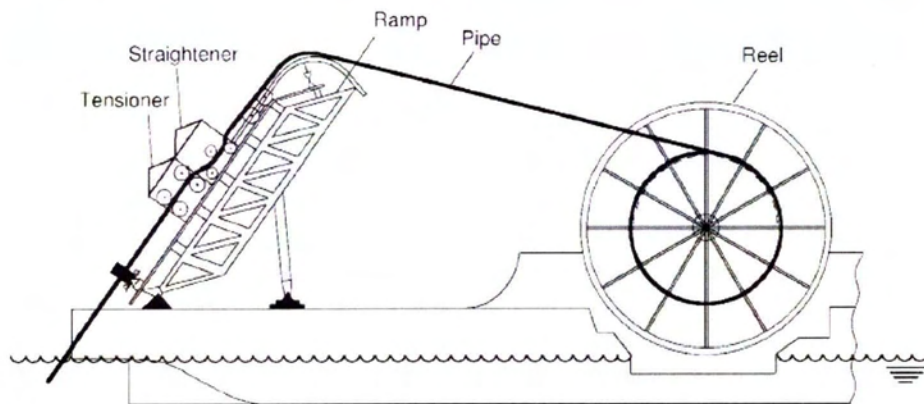
Σχήμα 1.2 Σχηματική αναπαράσταση φορτίσεων κατά την πόντιση αγωγού με την μέθοδο εγκατάστασης J-lay (Kyriakides, S., Corona, E. (2007)).

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί καταπονούνται κατά βάση από ισχυρή εξωτερική πίεση που προέρχεται από την υδροστατική πίεση του νερού. Ενδεικτικά, σε βάθος 2000 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας η υδροστατική πίεση είναι 200 bar ή 20 MPa. Επομένως, σε τέτοιες συνθήκες επιβάλλεται η επιλογή του κατάλληλου υλικού και η σωστή διαστασιολόγηση των αγωγών εντός ανοχών. Ενδεικτικά, η διάμετρος των υποθαλάσσιων αγωγών κυμαίνεται συνήθως μέχρι τις 36 ίντσες (ενώ σε πιο ρηγά νερά ενδέχεται να υπερβαίνει τις 36 ίντσες). Η συνδυασμένη φόρτιση που προκύπτει κατά την εγκατάσταση και την λειτουργία καθιστά τους υποθαλάσσιους αγωγούς παχείς, αφού ο λόγος εξωτερικής διαμέτρου προς πάχος (D/t) κυμαίνεται από 50 για ρηγά νερά, ενώ φτάνει μέχρι και την τιμή 15 για βαθιά ύδατα. Η αναφορά και σε άλλου είδους φορτίσεις (όπως κάμψη, αξονικά φορτία) τα οποία ασκούνται στους αγωγούς εκτός της εξωτερικής πίεσης επιβεβαιώνει την σημασία τους στα σχήματα

1.1 και 1.2, όπου παρουσιάζονται οι ζώνες φόρτισης κατά την διαδικασία εγκατάστασης και πόντισης του αγωγού με την διαδικασία S-lay, J-lay αντίστοιχα. Παρατηρούμε πώς το κάθε σημείο του αγωγού κατά την πόντιση διέρχεται από ζώνες που τον φορτίζουν συνδυαστικά με εξωτερική πίεση, κάμψη καθώς και αξονικά φορτία, γεγονός που μειώνει την αντοχή του και ενδέχεται σε κάθε περίπτωση να προκαλέσει αστοχία με την μορφή λυγισμού [1].



(a)



(b)

Σχήμα 1.3 Πλοίο της εταιρίας Technip κατά την πόντιση υποθαλάσσιων αγωγών με τη μέθοδο Reeling (α) φωτογραφία και (β) σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας της μεθόδου Reeling (Kyriakides, S., Corona, E. (2007)).

1.2 Στόχος της παρούσας εργασίας

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς επιμηκών κυλινδρικών κελυφών υλικού χάλυβα, που χρησιμοποιούνται σε υποθαλάσσιες εφαρμογές. Συγκεκριμένα, θεωρείται αγωγός από υλικό χάλυβα X70, διαμέτρου $D=711.2$ mm, και λόγω διαμέτρου προς πάχος $D/t=39.5$ που καταπονείται από συνδυασμένη φόρτιση εξωτερικής πίεσης και κάμψης μέσω της ανάλυσης σε θέματα που αναφέρονται σε:

1. Αντοχή και ευαισθησία κυλινδρικών κελυφών σε αρχικές ατέλειες και διαφορετικά μήκη αγωγών σε καταπόνηση από εξωτερική πίεση (Κεφάλαιο 2).
2. Αντοχή και ευαισθησία κυλινδρικών κελυφών με την ύπαρξη αρχικών ατελειών (κυματισμοί πτύχωσης ή "wrinkles") που καταπονούνται από καθαρή κάμψη (Κεφάλαιο 3).
3. Αντοχή κυλινδρικών κελυφών σε συνδυασμένη φόρτιση εξωτερικής πίεσης και κάμψης (Κεφάλαιο 4).

Οι σωλήνες υπό εξέταση έχουν παραχθεί από την Γερμανική εταιρία Saltzgitter Mannesmann και είναι υποψήφιοι για χρήση σε εφαρμογές υποθαλάσσιων αγωγών μετρίου θαλάσσιου βάθους.

2. Αντοχή σε εξωτερική πίεση

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί κατά την εγκατάστασή τους ποντίζονται στην θάλασσα χωρίς να υπάρχει ροή διαμέσου αυτών, για να μειωθεί το βάρος εγκατάστασης. Επίσης, κατά την λειτουργία τους αποσυμπιέζονται ορισμένες φορές για λόγους συντήρησης. Αυτό συνεπάγεται πώς η εξωτερική πίεση είναι μία σημαντική παράμετρος φόρτισης στον σχεδιασμό, η οποία πολλές φορές γίνεται και η πρωταρχική παράμετρος δομικού σχεδιασμού [1].

Αυτό το κεφάλαιο πραγματεύεται την μηχανική συμπεριφορά των αγωγών υπό εξωτερική πίεση. Στην παράγραφο 2.1 και 2.2 παρουσιάζονται στοιχεία από την μηχανική και τον σχεδιασμό που διέπει τους αγωγούς μέσω του λυγισμού και της πλαστικοποίησης κυλινδρικών κελυφών υπό εξωτερική πίεση. Στην παράγραφο 2.3 γίνεται περιγραφή του σωλήνα που εξετάζεται, δηλαδή παρουσιάζεται το υλικό και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του (διαστάσεις). Στην παράγραφο 2.4 αναπτύσσεται η μοντελοποίηση του προβλήματος μέσω μη-γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων με την βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος Abaqus. Στην παράγραφο 2.5 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα με την μορφή διαγραμμάτων και τέλος, στην παράγραφο 2.6 παρατίθενται ορισμένα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση.

2.1 Ελαστικός λυγισμός υπό εξωτερική πίεση

Η παράγραφος αυτή πραγματεύεται τον λυγισμό ελαστικών λεπτότοιχων δακτυλίων κάνοντας την παραδοχή ότι οι δακτύλιοι αποτελούν μία απλουστευμένη θεώρηση ενός κελύφους μεγάλου μήκους υπό συνθήκες επίπεδης έντασης.

Θεωρείται λεπτότοιχος ελαστικός δακτύλιος διαμέτρου D και πάχους t , το πρόβλημα είναι δι-διάστατο και το φορτίο είναι ομοιόμορφη εξωτερική πίεση μέτρου P . Η εξωτερική πίεση είναι πάντα κάθετη στην περιφέρεια του δακτυλίου.

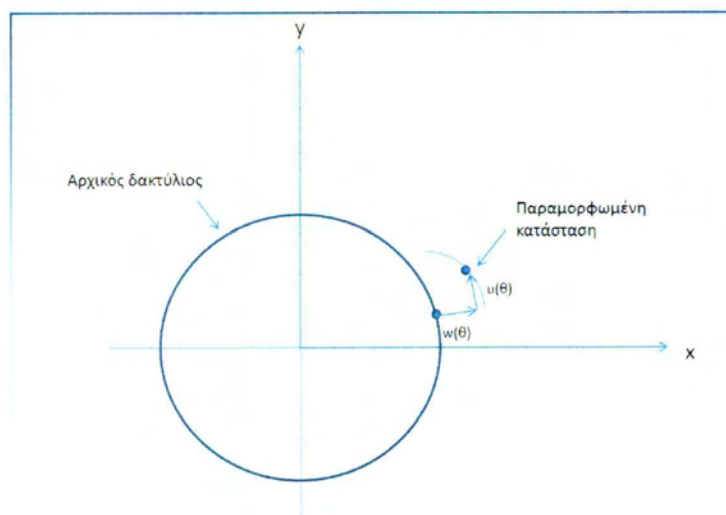
Από την θεωρία ελαστικότητας λεπτότοιχων κυλινδρικών κελυφών προκύπτει ότι για να ισορροπεί ο δακτύλιος, θα πρέπει να συρρικνώνεται ελαστικά και ομοιόμορφα με μετατόπιση σε κάθε σημείο της περιφέρειας του ίση με [2]:

$$w_0(\theta) = -\frac{PR^2}{EA} \quad (2.1)$$

στην ακτινική διεύθυνση και

$$u_0(\theta) = 0 \quad (2.2)$$

στην εφαπτομενική διεύθυνση. Ο δείκτης $(\cdot)_0$ δεικνύει την προλυγισμική κατάσταση.



Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση των μετατοπίσεων.

Η τάση που αναπτύσσεται στην περιφέρεια σύμφωνα με την θεωρία λεπτότοιχων κυλίνδρων είναι:

$$\sigma_{\theta} = -\frac{PD}{2t} \quad (2.3)$$

Επομένως, ενώ αυξάνεται το μέτρο της πίεσης P , το πρόβλημα περιγράφεται από τις τετριμμένες λύσεις (2.1) και (2.2), δηλαδή την ομοιόμορφη συρρίκνωση του δακτυλίου λόγω της εξωτερικής πίεσης. Καθώς αυξάνεται η πίεση υπάρχει μία τιμή που ο δακτύλιος παύει να συμπιέζεται ομοιόμορφα και μεταβαίνει σε διαφορετική κατάσταση παραμόρφωσης (οβαλοποίηση). Με άλλα λόγια, από τον πρωτεύοντα δρόμο ισορροπίας μόλις η πίεση φτάσει σε μία κρίσιμη τιμή, δημιουργείται ένα σημείο διακλάδωσης που οδηγεί τον δακτύλιο στον δευτερεύοντα δρόμο ισορροπίας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται λυγισμός και το φορτίο που συμβαίνει ο λυγισμός ονομάζεται κρίσιμο φορτίο ή φορτίο λυγισμού [3]. Το κρίσιμο φορτίο του δακτυλίου υπό εξωτερική πίεση δίνεται από την σχέση:

$$P_{cr} = 2E \left(\frac{t}{D}\right)^3 \quad (2.4)$$

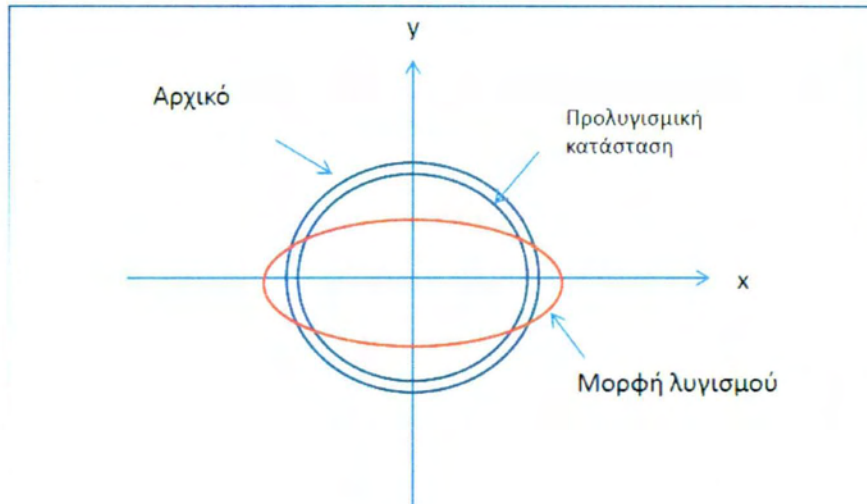
Είναι σημαντικό να τονιστεί πώς το κρίσιμο φορτίο λυγισμού εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας E του υλικού και την γεωμετρία. Συγκεκριμένα εξαρτάται από τον λόγο t/D και όχι το D ή το t σε απόλυτο μέγεθος. Αυτό σημαίνει πώς ένας μικρός σωλήνας και ένας μεγάλος σωλήνας από το ίδιο υλικό (δηλαδή το ίδιο E) και με το ίδιο D/t , θα έχουν την ίδια αντοχή σε εξωτερική πίεση.

Εφαρμόζοντας την θεωρία της διαταραχής [2], εκτός από την κρίσιμη πίεση βρίσκουμε και τις αντίστοιχες μετατοπίσεις στο σημείο διακλάδωσης, όπως δίνονται από τις εξισώσεις (2.5) στην ακτινική διεύθυνση και (2.6) στην εφαπτομενική,

$$w = A \cos 2\theta \quad (2.5)$$

$$u = -\frac{A}{2} \sin 2\theta \quad (2.6)$$

όπου A μία αυθαίρετη σταθερά, η οποία αντιπροσωπεύει το εύρος της οβαλοποίησης.



Σχήμα 2.2 Οβάλ μορφή λυγισμού.

Μπορεί να αποδειχθεί πώς ο πρωτεύων δρόμος ισορροπίας έχει γραμμική μορφή σύμφωνα με την σχέση (2.1) σε διάγραμμα πίεσης – ακτινικής μετατόπισης σε ένα χαρακτηριστικό σημείο. Ο δευτερεύων δρόμος ισορροπίας τέμνει τον πρωτεύοντα στο σημείο διακλάδωσης και διατηρώντας σταθερή την κρίσιμη τιμή της πίεσης, με βάση την ελαστική θεωρία, έχουμε αύξηση της μετατόπισης [2], όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 σε ποιοτικό διάγραμμα.

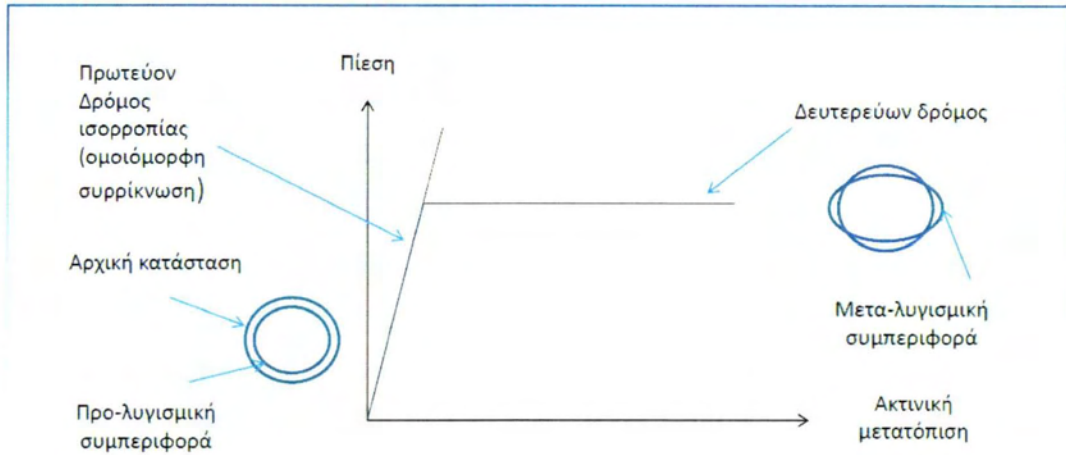
Η καμπτική ροπή που αναπτύσσεται στα τοιχώματα του δακτυλίου μετά τον λυγισμό δίνεται από την σχέση:

$$M = EIk \quad (2.9)$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, I η ροπή αδράνειας του δακτυλίου (2.10) και k η καμπυλότητα (2.11) που αναπτύσσεται λόγω οβαλοποίησης.

$$I = \frac{t^3}{12} \quad (2.10)$$

$$k = \frac{u' - w''}{R^2} \quad (2.11)$$



Σχήμα 2.3 Ποιοτικό διάγραμμα πίεσης - ακτινικής μετατόπισης για τέλει κυκλικό σωλήνα.

2.1.1 Ατελής σωλήνας

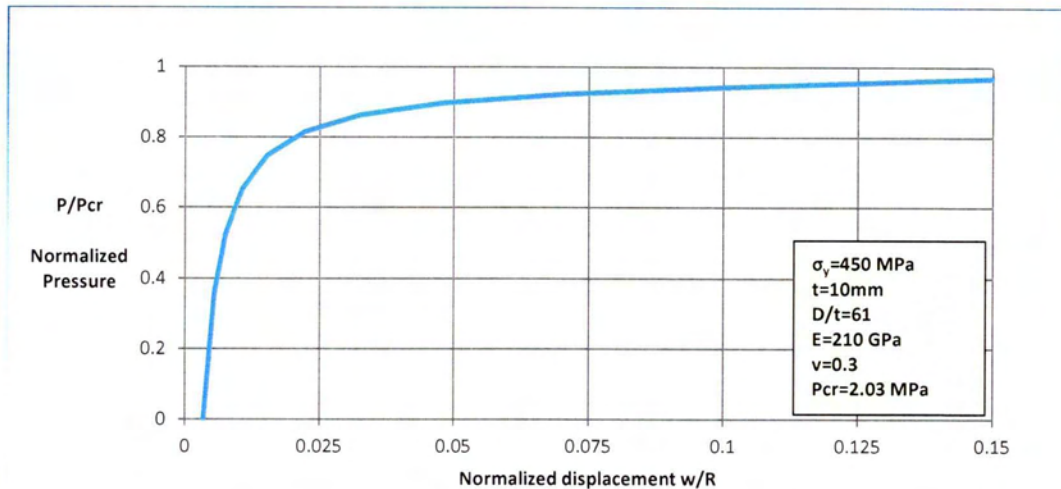
Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει τέλειος κυκλικός σωλήνας, αφού όλοι οι σωλήνες περιέχουν ατέλειες. Επομένως, η ανάλυση που προηγήθηκε πρέπει να λάβει υπόψη της μία αρχική ατέλεια, γεγονός που καθιστά το πρόβλημα ένα μη-γραμμικό πρόβλημα ισορροπίας θεωρώντας έναν δακτύλιο με αρχική ατέλεια της μορφής των εξισώσεων (2.5) κατά την ακτινική διεύθυνση και (2.6) κατά την εφαπτομενική. Για να υπολογιστεί επομένως η συνολική μετατόπιση θα πρέπει να προστεθούν οι αντίστοιχες μετατοπίσεις στην προλυγισμική και την μεταλυγισμική λύση, όπως δίνεται από τις αντίστοιχες εξισώσεις (2.7) και (2.8) [2],

$$w_1 = -\frac{PR^2}{EA} + A \cos 2\theta + w \quad (2.7)$$

στην ακτινική διεύθυνση,

$$u_1 = -\frac{A}{2} \sin 2\theta + u \quad (2.8)$$

στην εφαπτομενική, όπου w και u η μεταλυγισμική λύση (εξισώσεις (2.5) και (2.6)) στην ακτινική και την εφαπτομενική διεύθυνση αντίστοιχα. Στο σχήμα 2.4 φαίνεται η υπολογιστική λύση από πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι παρατηρείται μία όμοια συμπεριφορά ανάμεσα στην αναλυτική λύση (σχήμα 2.3) και την υπολογιστική λύση (σχήμα 2.4), για ατελή σωλήνα με αρχική ατέλεια μορφής οβάλ.



Σχήμα 2.4 Κανονικοποιημένο διάγραμμα πίεσης - ακτινικής μετατόπισης σε ελαστικό ατελή σωλήνα. Δημιουργήθηκε με βάση τα αποτελέσματα από το Abaqus.

Στον ατελή σωλήνα, η τάση που αναπτύσσεται στον δακτύλιο μετά τον λυγισμό θα είναι το άθροισμα της τάσης λόγω πίεσης και της τάσης λόγω της καμπτικής ροπής που δημιουργείται, καταλήγοντας στην σχέση (2.12).

$$\sigma_{\theta} = -\frac{PD}{2t} \pm \left[\frac{3EI}{R^2} \left(\frac{A}{1-\frac{P}{P_{cr}}} \right) \right] \frac{t}{12} \cos 2\theta \quad (2.12)$$

Η ανωτέρω θεωρία αφορά συνθήκες επίπεδης έντασης. Για να περιγραφεί όμως η μηχανική συμπεριφορά σωλήνα μεγάλου μήκους πρέπει να γίνει παραδοχή για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης ($\epsilon_x=0$), τότε η σχέση σ_{θ} - ϵ_{θ} στην περιμετρική διεύθυνση κατά τον νόμο του Hook θα γίνει:

$$\sigma_{\theta} = \frac{E}{1-\nu^2} \epsilon_{\theta} \quad (2.13)$$

Και τότε ισχύουν όλες οι σχέσεις που προηγήθηκαν με $\frac{E}{1-\nu^2}$ αντί για E .

Είναι λογικό πώς για παχύτερους δακτυλίους, με μικρότερο λόγο D/t , δεν ισχύει η θεωρία λεπτότοιχων κυλινδρικών κελυφών. Αυτοί πλαστικοποιούνται προτού φτάσουν στο ελαστικό φορτίο αστάθειας (φορτίο λυγισμού), επομένως ένα σημαντικό ερώτημα που αποσαφηνίζεται παρακάτω είναι πότε ισχύει η θεωρία που προηγήθηκε και πότε όχι.

Από την θεωρία λεπτότοιχων κυλίνδρων, η τιμή της εξωτερικής πίεσης που απαιτείται για την πλήρη πλαστικοποίηση της διατομής είναι [2]:

$$P_y = 2\sigma_y \frac{t}{D} \quad (2.14)$$

όπου σ_y είναι το όριο διαρροής του υλικού. Για να ισχύει λοιπόν η παραπάνω θεωρία θα πρέπει:

$$P_{cr} \leq P_y \quad (2.15)$$

όπου αντικαθιστώντας το P_{cr} από την σχέση (2.4) και το P_y από την (2.14) προκύπτει η προϋπόθεση για να ισχύει η ελαστική θεωρία λυγισμού.

$$\frac{D}{t} \geq \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad (2.16)$$

Για δακτύλιο υλικού χάλυβα X70 με μέτρο ελαστικότητας $E=205$ GPa, $\nu=0.3$ και ονομαστική τιμή ορίου διαρροής $\sigma_y=485$ MPa (πίνακας 2.2) προκύπτει πώς η ελαστική θεωρία ισχύει για λόγο $\frac{D}{t} \geq 21.55$.

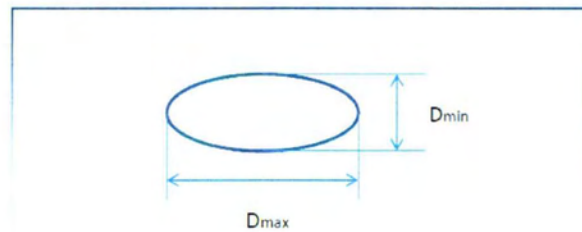
2.2 Μετα-λυγισμική ανελαστική συμπεριφορά

Θεωρείται δακτύλιος από ελαστοπλαστικό υλικό με αρχική γεωμετρική ατέλεια, η οποία έχει μορφή οβάλ. Με την εφαρμογή εξωτερικής πίεσης το πρόβλημα μετατρέπεται σε μη-γραμμικό. Για οποιαδήποτε τιμή του $P>0$ υπάρχουν μετατοπίσεις $u(\theta)$ και $w(\theta)$. Αυτό σημαίνει πώς το πρόβλημα αναλυτικά γίνεται πολύ περίπλοκο [1], και απαιτείται αριθμητική επίλυση.

Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί πώς από την σχέση (2.12) ότι μετά τον λυγισμό, οι θέσεις που εμφανίζεται η μέγιστη τάση είναι για $\theta=0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$. Σε αυτές τις θέσεις δημιουργείται η πρώτη πλαστικοποίηση του υλικού, δημιουργώντας τέσσερις πλαστικές αρθρώσεις και έναν μηχανισμό κατάρρευσης (σχήμα 2.2). Έτσι, η πλαστικοποίηση θα συνεχίζεται μέχρι την κατάρρευση του αγωγού λόγω της ανελαστικής συμπεριφοράς στην μεταλυγισμική κατάσταση [2].

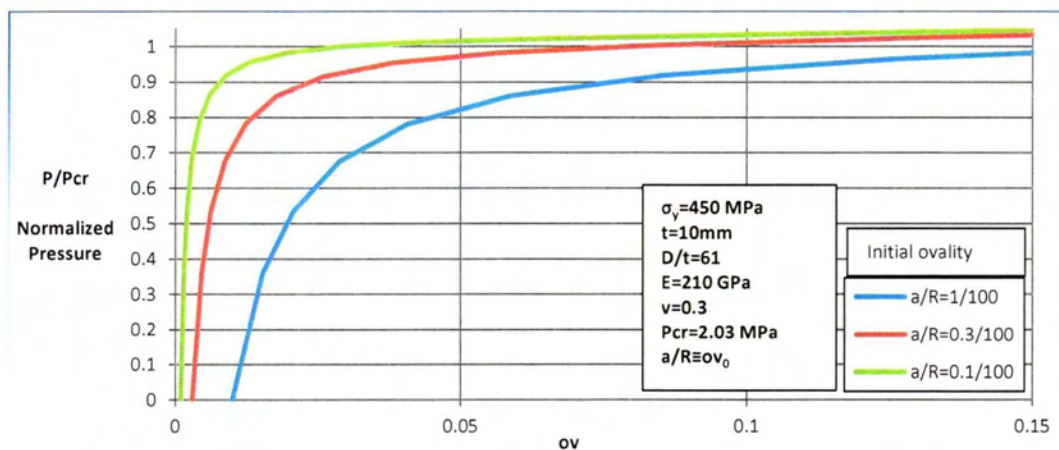
Το μέγεθος της μεταβολής στην διατομή ενός δακτυλίου είναι μια σημαντική μεταβλητή στην ανάλυση δακτυλίου υπό εξωτερική πίεση και όχι μόνο, καθώς καθορίζει την μεταλυγισμική μορφή του. Προσμετράται με την αδιάστατη παράμετρο ov , η οποία ορίζεται κάτωθι και δείχνει το πόσο οβάλ είναι σε όλη την διάρκεια της φόρτισης ο δακτύλιος [1].

$$ov = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \quad (2.17)$$

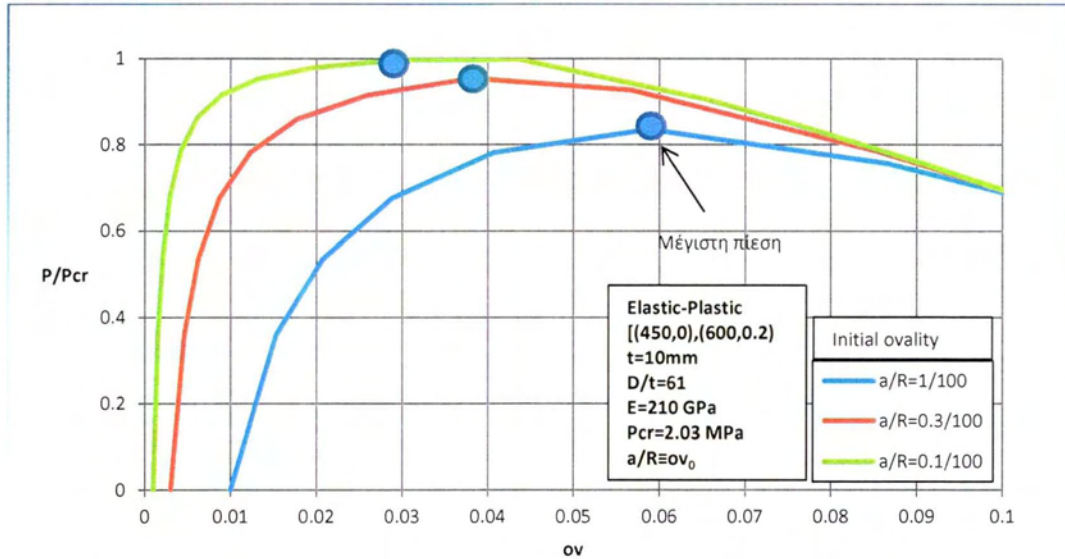


Σχήμα 2.5 Ovalization της διατομής, μέγιστη διάμετρος D_{max} και ελάχιστη διάμετρος D_{min} .

Με βάση την σχέση (2.12), ο Timoshenko υπολόγισε την τιμή της οριακής πίεσης με βάση τη διαρροή του υλικού $\sigma_\theta = \sigma_y$ προτείνοντας πώς η μέγιστη αυτή πίεση που μπορεί να ασκηθεί σε έναν δακτύλιο με αρχική ατέλεια, είναι ένα συντηρητικό άνω όριο προσδιορισμού της πίεσης κατάρρευσης [1]. Επομένως, χρησιμοποιώντας υπολογιστικές μεθόδους μέσω πεπερασμένων στοιχείων, μπορεί να εξεταστεί η συμπεριφορά ελαστοπλαστικών δακτυλίων και να συγκριθούν με αυτά για ελαστικό υλικό (σχήματα 2.6 και 2.7).



Σχήμα 2.6 Σύγκριση τριών ελαστικών σωλήνων διαφορετικής αρχικής γεωμετρικής ατέλειας σε κανονικοποιημένο διάγραμμα πίεσης ως προς την κρίσιμη πίεση σε σχέση με την οβαλότητα.



Σχήμα 2.7 Σύγκριση της απόκρισης τριών ελαστοπλαστικών σωλήνων διαφορετικής αρχικής γεωμετρικής ατέλειας σε κανονικοποιημένο διάγραμμα πίεσης ως προς την κρίσιμη πίεση σε σχέση με την οβαλότητα.

Στο σχήμα 2.7 παρατηρείται πώς η αντοχή του δακτυλίου μετά την μέγιστη πίεση μειώνεται λόγω των πλαστικών παραμορφώσεων που δημιουργούνται μετά τον λυγισμό, ενώ στο σχήμα 2.6 φαίνεται πώς η αντοχή του δακτυλίου για ελαστικό υλικό δεν επηρεάζεται από την παρουσία αρχικών ατελειών.

2.3 Περιγραφή αγωγών

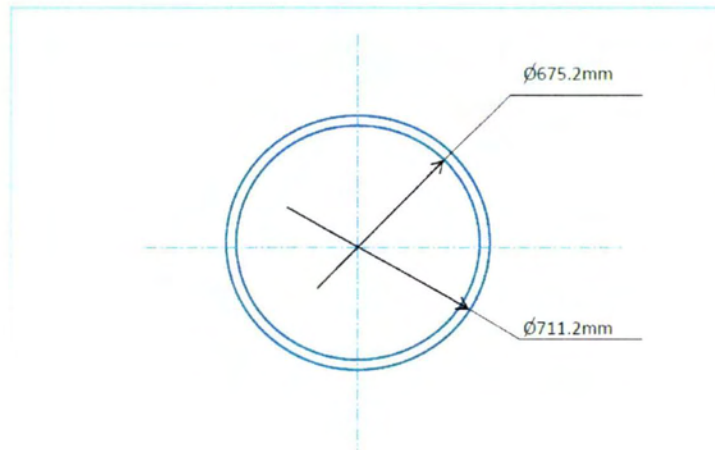
Η παράγραφος αυτή ασχολείται με την γενική περιγραφή των σωλήνων που προσομοιώνονται μέσα από το υπολογιστικό πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων. Με άλλα λόγια, αναφέρεται στις διαστάσεις των σωλήνων καθώς και το υλικό που χρησιμοποιείται καθ' όλη την διάρκεια των αναλύσεων.

2.3.1 Διαστάσεις αγωγού

Οι διαστάσεις του σωλήνα είναι : διάμετρος $D=28$ inches (ή 711.2 mm) και πάχος 18 mm (πίνακας 2.1). Με βάση αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (πίνακας 2.1) υπολογίζεται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού για δακτύλιο υλικού χάλυβα X70 ($\sigma_y = 542.4$ MPa) με μέτρο ελαστικότητας $E=205$ GPa και λόγο Poisson $\nu=0.3$. Άρα, με βάση την σχέση (2.4) με την θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης εύκολα προκύπτει $P_{cr} = 7.3$ MPa.

| | |
|---------------|-----------------------|
| Διάμετρος [D] | 28 inches [=711.2 mm] |
| Πάχος [t] | 18 mm |
| Λόγος D/t | 39.5 |

Πίνακας 2.1 Διαστάσεις Αγωγού.

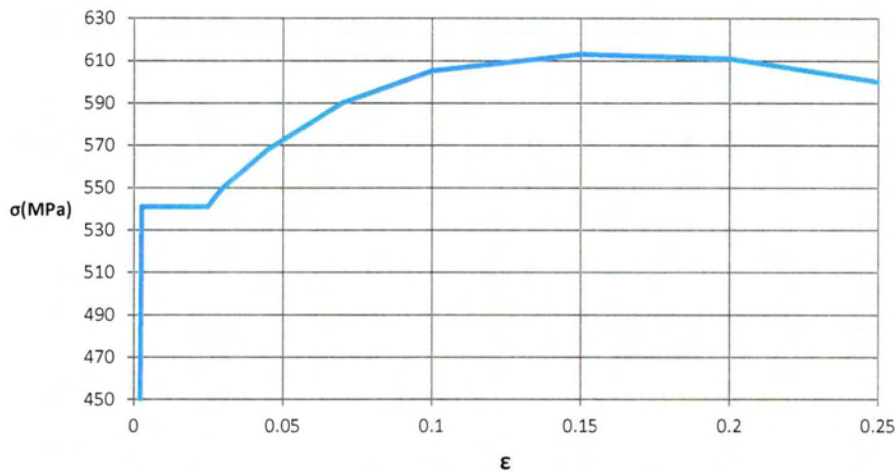


Σχήμα 2.8 Όψη αγωγού.

2.3.2 Υλικό αγωγού

Το υλικό που χρησιμοποιείται καθ' όλη την διάρκεια των αναλύσεων είναι χάλυβας X70 με μέτρο ελαστικότητας $E=205$ GPa, όριο διαρροής $\sigma_y=542.4$ MPa και λόγο Poisson $\nu=0.3$. Η καμπύλη του υλικού φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 2.9 [4].

Η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης που προκύπτει από τον μονοαξονικό εφελκυσμό υλικού εκφρασμένη σε ονομαστικές τιμές πρέπει να προσαρμοστεί για χρήση στο Abaqus σε μεγάλες ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις του υλικού, επειδή βασίζεται στις αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου εφελκυσμού. Κατά συνέπεια, όταν οι παραμορφώσεις στο υλικό παίρνουν μεγάλες τιμές (όπως συμβαίνει με τις πλαστικές παραμορφώσεις), τότε είναι απαραίτητη η έκφραση της τάσης και της παραμόρφωσης σε τιμές που να βασίζονται στις εκάστοτε διαστάσεις του δοκιμίου. Έτσι, χρησιμοποιούνται η πραγματική τάση (true stress) και η λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση (logarithmic strain) για την συμπεριφορά στην πλαστική περιοχή του δοκιμίου [5].



Σχήμα 1.9 Καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης υλικού X70.
(Vasilikis et al. (2014)).

Το υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την ελαστικοπλαστική συμπεριφορά του υλικού απαιτεί μία σειρά σημείων για την λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση και την πραγματική τάση, που δίνονται σε σχέση με την ονομαστική παραμόρφωση (ε) και την ονομαστική τάση (σ) από τους τύπους:

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.18)$$

$$\varepsilon_{ln}^p = \ln(1 + \varepsilon) - \frac{\sigma_T}{E} \quad (2.19)$$

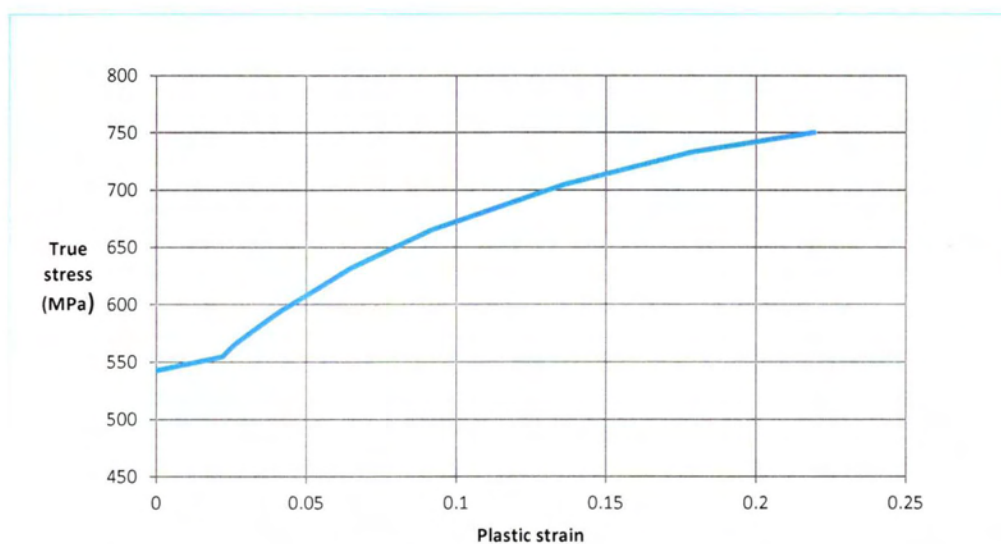
όπου σ_T είναι η πραγματική τάση και ε_{ln}^p είναι η λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση.

Ακολουθεί ο πίνακας των τάσεων και των αντίστοιχων παραμορφώσεων (πίνακας 2.2) καθώς και το σχήμα 2.10 που παρουσιάζει το διάγραμμα πραγματικής τάσης και λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης για υλικό X70.

Στο σημείο αυτό με βάση αυτά που προηγήθηκαν και την σχέση (2.14) υπολογίζεται το φορτίο της εξωτερικής πίεσης που απαιτείται για την πλήρη πλαστικοποίηση του δακτυλίου, για υλικό X70 με λόγο $D/t=39.5$. Έτσι, $P_y = 27.45 \text{ MPa}$.

| σ (stress) | ϵ (strain) | True stress (σ_T) | Plastic strain (ϵ_{ln}^p) |
|-------------------|---------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 541 | 0.00264 | 542.428 | 0 |
| 541 | 0.01 | 546.410 | 0.007285 |
| 541 | 0.017 | 550.197 | 0.014173 |
| 541 | 0.025 | 554.525 | 0.021988 |
| 545 | 0.0271 | 559.770 | 0.024009 |
| 550 | 0.03 | 566.500 | 0.026795 |
| 568 | 0.045 | 593.560 | 0.041121 |
| 590 | 0.07 | 631.300 | 0.064579 |
| 605 | 0.1 | 665.500 | 0.092064 |
| 613 | 0.15 | 704.950 | 0.136323 |
| 611 | 0.2 | 733.200 | 0.178745 |
| 600 | 0.25 | 750.000 | 0.219485 |

Πίνακας 2.2 Τάσεις και παραμορφώσεις για υλικό X70.



Σχήμα 2.10 Διάγραμμα πραγματικής τάσης - λογαριθμικής πραγματικής παραμόρφωσης υλικού X70.

2.4 Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων

Στην παράγραφο αυτή αναλύουμε τον τρόπο που μοντελοποιείται το πρόβλημα της εξωτερικής πίεσης σε έναν αγωγό χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πρόγραμμα του Abaqus. Λόγω της επιρροής βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν την αντοχή των σωλήνων απαιτούνται δύο τρόποι μοντελοποίησης του προβλήματος οι οποίοι θα παρουσιαστούν στις παραγράφους που ακολουθούν.

2.4.1 Μοντελοποίηση σωλήνων μορφής "διατομής"

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την επίδραση αρχικών ατελειών στην αντοχή του αγωγού σε εξωτερική πίεση, είναι γενικώς ένα τρισδιάστατο πρόβλημα. Αυτός ο σωλήνας αν είναι πολύ μακρύς, δεν υπάρχει επιρροή συνοριακών συνθηκών, και στην περίπτωση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι η παραμόρφωσή του αντιπροσωπεύεται πλήρως από τη μεσαία διατομή του μεγάλου μήκους του. Επομένως, η μοντελοποίηση μπορεί να γίνει με έναν αντίστοιχο δακτύλιο μοναδιαίου μήκους, κάνοντας το πρόβλημα να ανακύπτει σε ένα δι-διάστατο πρόβλημα.

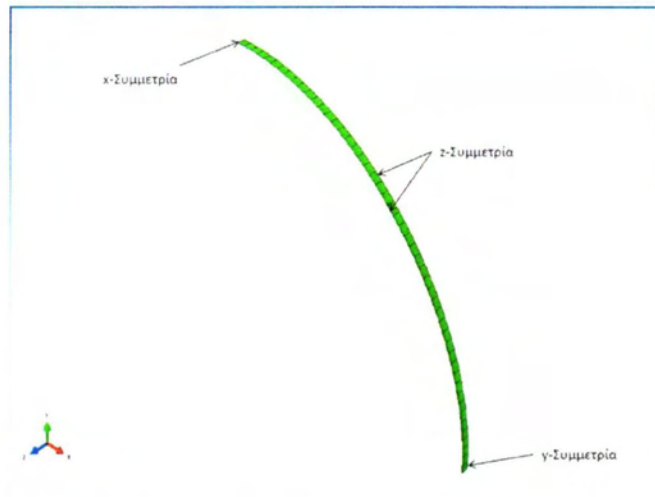
Επομένως, πρώτο βήμα της μοντελοποίησης είναι να δημιουργηθεί η γεωμετρία του μοντέλου, δημιουργώντας ένα τεταρτοκύκλιο του δακτυλίου λόγω της διπλής συμμετρίας που υπάρχει στην διατομή, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Στην αριστερή παρειά του τεταρτοκυκλίου μας καθ' όλο το μήκος ο δακτύλιος παρουσιάζει συμμετρία κατά τον άξονα-x, στη δεξιά παρειά παρουσιάζει συμμετρία κατά τον άξονα-y, ενώ οι δύο πλευρές στην περιφέρεια του δακτυλίου παρουσιάζουν συμμετρία ως προς τον z-άξονα. Για την χρήση της συμμετρίας κατά τον άξονα-x χρησιμοποιείται η εντολή "x-symm", στον άξονα-y η εντολή "y-symm" και στον άξονα-z η εντολή "z-symm". Στο σχήμα 2.11 παρουσιάζεται η γεωμετρία καθώς και οι συμμετρίες σε κάθε πλευρά. Η εντολή "x-symm" δεσμεύει την μετατόπιση κατά τον y-άξονα καθώς και την στροφή ως προς τον άξονα-x. Αντίστοιχα για τις άλλες εντόλες ισχύουν τα παρακάτω:

x-symm: $U1=UR2=UR3=0$

y-symm: $U2=UR1=UR3=0$

z-symm: $U3=UR1=UR2=0$

Το μοντέλο του σχήματος 2.11 έχει διαστάσεις με διάμετρο $D=711.2$ mm και πάχος $t=18$ mm με υλικό X70 (η εισαγωγή υλικού γίνεται με τα σημεία της λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης και της πραγματικής τάσης στην πλαστική περιοχή του υλικού, σύμφωνα με τον πίνακα 2.2) και με αρχική γεωμετρική ατέλεια. Η παράμετρος της αρχικής ατέλειας on_0 ισούται με 1% και το μοντέλο μας φορτίζεται με εξωτερική πίεση. Έτσι, η ανάλυση πραγματοποιείται σε 3 στάδια, στο πρώτο στάδιο ασκείται μια πίεση αυξανόμενη μέχρι μία τιμή στον πάνω αριστερά κόμβο, ικανή να παραμορφώσει έστω και λίγο το μοντέλο (μέσω της εντολής "Shell edge load"). Στη συνέχεια το κέλυφος αποφορτίζεται ελαστικά προκαλώντας μία μόνιμη πλαστική παραμόρφωση (μέσω ενός "κενού βήματος"). Στη συνέχεια, επιβάλλεται στο μοντέλο εξωτερική πίεση μέσω της μεθόδου Riks (μέσω της εντολής "Pressure" με μέγεθος 1 MPa). Το μέγεθος (ή "Magnitude" όπως χρησιμοποιείται στο Abaqus) είναι το μέτρο της πίεσης που βρίσκει την τελική πίεση που ασκείται στο μοντέλο μέσω της σχέσης $P=LPF*1$, όπου 1 είναι το μέτρο της πίεσης σε μονάδες MPa.



Σχήμα 2.11 Αναπαράσταση υπολογιστικού μοντέλου σωλήνα μορφής "διατομής".

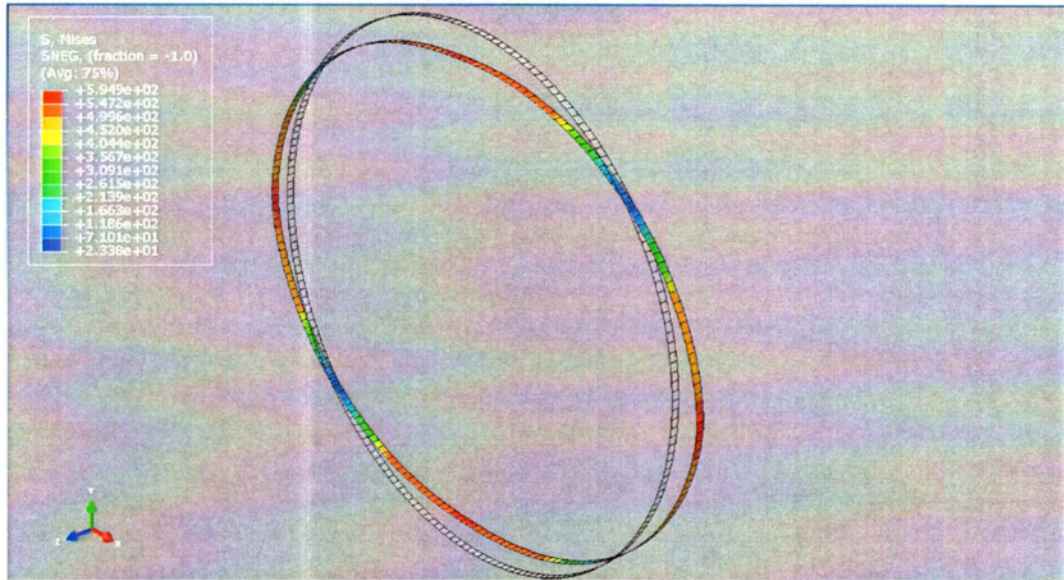
Το πλέγμα που χρησιμοποιούμε αποτελείται από 50 στοιχεία, 50 κατά την περιφέρεια και ένα κατά το μήκος. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε όλα τα μοντέλα που πραγματοποιούνται σε αυτήν την εργασία είναι στοιχεία κελύφους, S4R (Four node reduced-integration shell elements), δηλαδή τετρα-κομβικά, μειωμένης ολοκλήρωσης τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση λεπτότοιχων κυλίνδρων και σωλήνων.

Για την πιστοποίηση της ανάλυσης, το σχήμα 2.12 παρουσιάζει τα αποτελέσματα από την υπολογιστική ανάλυση. Είναι ενδιαφέρον να τονιστούν οι 4 πλαστικές αρθρώσεις σε 4 ισαπέχοντα σημεία πάνω στην περιφέρεια από τα οποία ξεκινά η πλαστικοποίηση και δημιουργούν τον μηχανισμό κατάρρευσης.

2.4.2 Μοντελοποίηση τρισδιάστατων δακτυλίων πεπερασμένου μήκους

Για την μελέτη της επιρροής του μήκους ενός αγωγού με αρχική γεωμετρική ατέλεια (σ_{0}), στην μέγιστη πίεση η υπολογιστική ανάλυση απαιτεί ένα πιο σύνθετο μοντέλο σε σχέση με αυτό που περιγράφηκε για δακτύλιο μοναδιαίου μήκους. Στην περίπτωση αυτή εισάγεται το επιθυμητό μήκος με το οποίο πραγματοποιείται η ανάλυση διατηρώντας τα υπόλοιπα στοιχεία της ανάλυσης, που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.4.

Ορίζεται η γεωμετρία, δηλαδή ένα τεταρτοκύκλιο ενός δακτυλίου και του δίνεται το εκάστοτε μήκος. Λόγω συμμετρίας χρησιμοποιείται το 1/8 του συνολικού

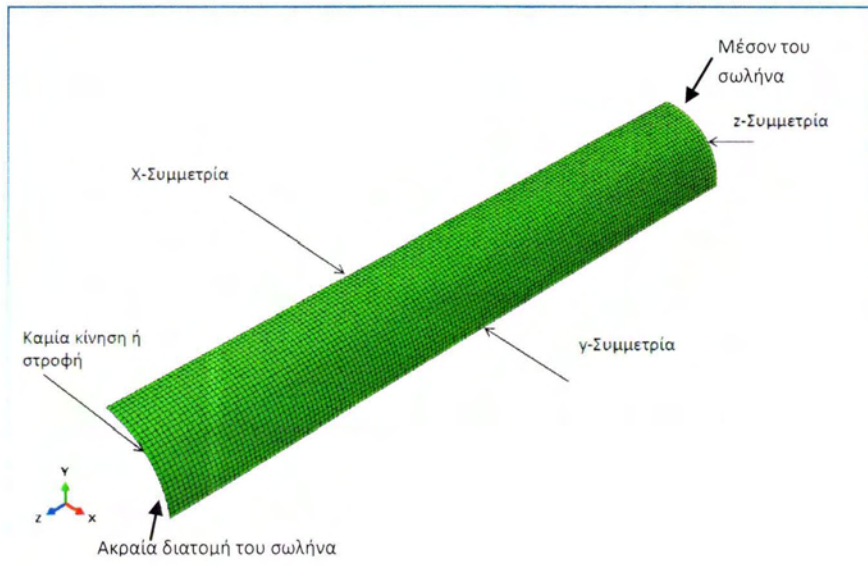


Σχήμα 2.12 Παραμορφωμένος δακτύλιος υλικού X70 υπό εξωτερική πίεση για σωλήνα μορφής “διατομής”.

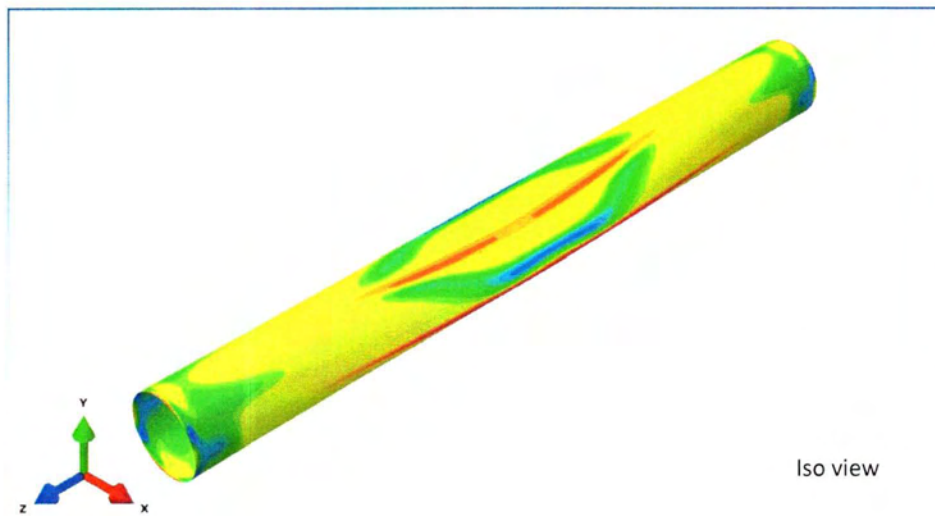
αγωγού, δηλαδή η ανάλυση πραγματοποιείται με ό,τι απομένει από την τομή του συνολικού αγωγού στην μέση αξιοποιώντας το ένα τεταρτοκύκλιο. Η μοντελοποίηση αυτή με τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες συμμετρίας πραγματοποιείται λόγω της εξοικονόμησης χρόνου που εξασφαλίζει προς τον χρήστη.

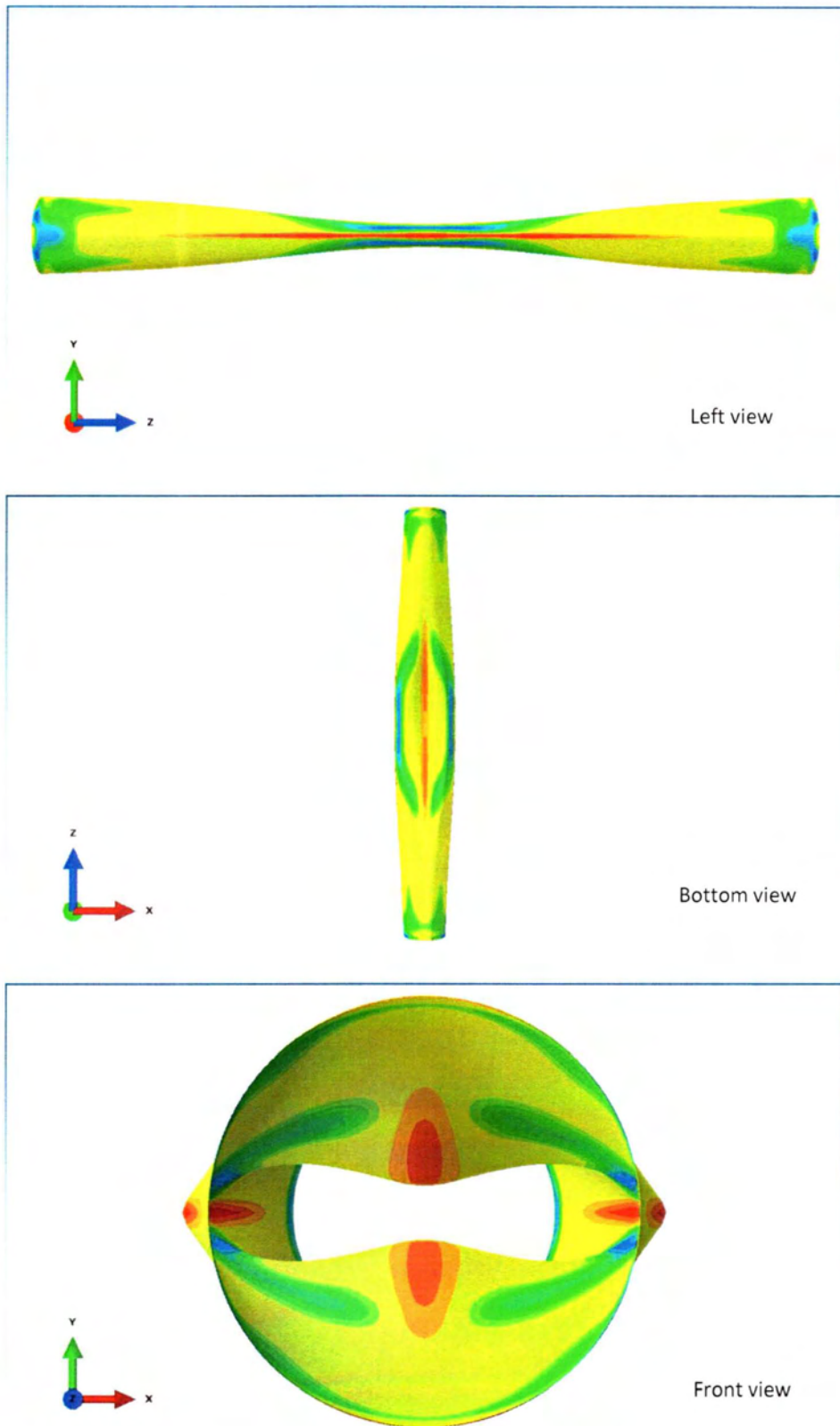
Στην περίπτωση αυτή η βασική διαφορά σε σχέση με την ανάλυση δακτυλίου μοναδιαίου μήκους στις συνοριακές συνθήκες είναι ότι το ένα άκρο του τεταρτοκυκλίου πρέπει να περιοριστεί προς κάθε μετατόπιση και στροφή. Αυτό πραγματοποιείται με την εισαγωγή ενός σημείου αναφοράς (reference point) στο κέντρο της ακραίας διατομής, το οποίο συμπεριφέρεται όπως όλα τα σημεία της διατομής και έτσι με εισαγωγή της συνοριακής συνθήκης “Displacement/Rotation” επιλέγεται το σημείο αυτό να μην έχει καμία μετατόπιση ή περιστροφή, δεσμεύοντας ταυτόχρονα και όλη την πλευρά. Η ανάλυση αυτή σε σχέση με την παράγραφο 2.4.1 πραγματοποιείται με τα αντίστοιχα βήματα, δηλαδή με την επιβολή φορτίου στην πάνω αριστερά ακμή του τεταρτοκυκλίου, την αντίστοιχη ελαστική αποφόρτιση με συνέπεια παραμένουσες παραμορφώσεις μετά το βήμα και τέλος την επιβολή εξωτερικής πίεσης μέσω της μεθόδου Riks. Έτσι ακολουθεί το σχήμα 2.13 το οποίο παρουσιάζει το μοντέλο με τις νέες συνοριακές συνθήκες που το διέπουν.

Για την πιστοποίηση του αποτελέσματος, στο σχήμα 2.14 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για αγωγό υλικού X70, διαμέτρου $D=711.2$ mm, πάχους $t=18$ mm και μήκους $L=10D$.



Σχήμα 2.13 Αναπαράσταση μοντέλου πεπερασμένου μήκους.





Σχήμα 2.14 Οψεις παραμορφωμένου αγωγού υπό εξωτερική πίεση μέσω μοντέλου πεπερασμένου μήκους ($L=10D$).

2.5 Αριθμητικά αποτελέσματα

Στην παράγραφο αυτή αναλύονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή των αγωγών, μελετώντας την τιμή της οριακής πίεσης P_{max} που μπορούν να παραλάβουν χρησιμοποιώντας την κατάλληλη μοντελοποίηση για την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή ενός αγωγού μπορεί να είναι είτε ατέλειες, είτε το μήκος του σωλήνα ή ο λόγος D/t , ακόμα και άλλες φορτίσεις που ασκούνται στον αγωγό. Σημαντικές παράμετροι μπορεί να είναι μια γεωμετρική ατέλεια, ως απόκλιση από το κυκλικό σχήμα ενός αγωγού (μορφή οβάλ), η ύπαρξη παραμενουσών τάσεων, η ανισοτροπία του υλικού καθώς και η μεταβολή των ιδιοτήτων του υλικού.

2.5.1 Επίδραση αρχικής ατέλειας μορφής οβάλ (ονο)

Στην παράγραφο 2.1 και 2.2 παρουσιάστηκαν κάποια αποτελέσματα για ελαστικό και ελαστοπλαστικό υλικό με γεωμετρική ατέλεια μορφής οβάλ. Το μέγεθος της ατέλειας κάθε στιγμή της φόρτισης δίνεται σύμφωνα με την σχέση (2.17) δίνεται από:

$$ov = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}}$$

με $D_{max} = D + 2u_x$ (2.18)

$$D_{min} = D + 2u_y$$
 (2.19)

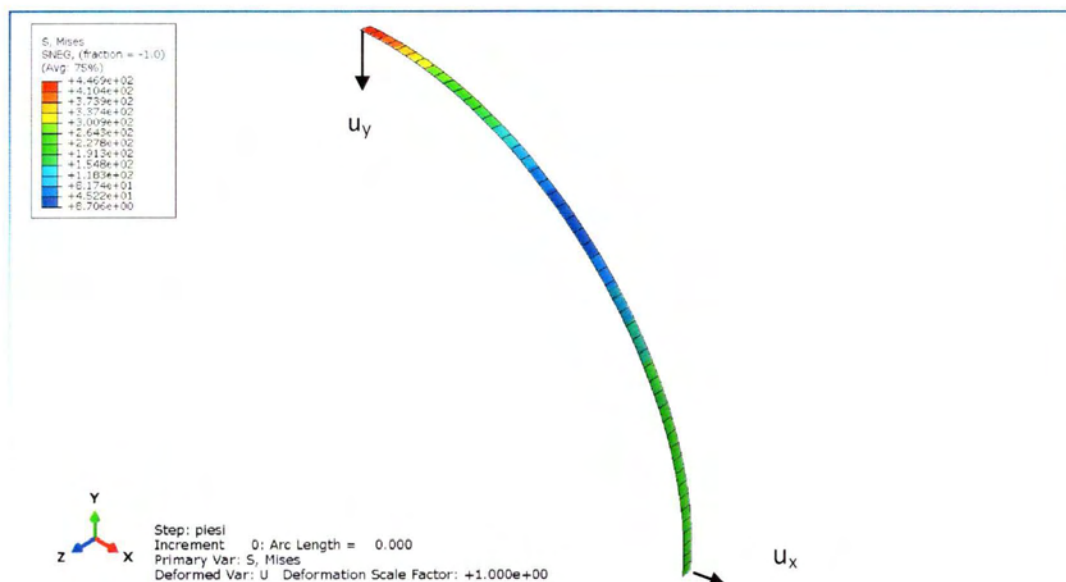
όπου u_x η ακτινική μετατόπιση κατά την διεύθυνση που βρίσκεται το D_{max} ή όπως δείχνει ο άξονας στο σχήμα 2.15 και u_y η ακτινική μετατόπιση κατά την διεύθυνση που βρίσκεται το D_{min} ή όπως δείχνει ο άξονας στο σχήμα 2.15 [1].

Αρχική ατέλεια μορφής οβάλ μπορεί να εισαχθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος αναλύθηκε κατά την περιγραφή της παραγράφου 2.4, και περιλαμβάνει μία φόρτιση στο πάνω άκρο του αγωγού μέχρι κάποια σταθερή τιμή και επακόλουθη ελαστική αποφόρτιση. Αυτό προσομοιώνει την περίπτωση εξωτερικού χτυπήματος κατά την κατασκευή ή την πόντιση (αρχική γεωμετρική ατέλεια τύπου 2). Η διαδικασία αυτή έχει συνέπεια την πλαστική παραμόρφωση του αγωγού με την δημιουργία αρχικών παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.15.

Ένας άλλος τρόπος δημιουργίας αρχικής ατέλειας μορφής οβάλ, που χρησιμοποιείται και στην πλειοψηφία των μοντέλων λόγω της ευκολίας εφαρμογής

του, είναι να δημιουργηθεί η γεωμετρία του σωλήνα με αρχική γεωμετρική ατέλεια μορφής οβάλ δίνοντας εξ' αρχής την αρχική παράμετρο ov_0 (αρχική γεωμετρική ατέλεια τύπου 1). Αυτό υλοποιείται κατά την κατασκευή της γεωμετρίας δημιουργώντας το $\frac{1}{4}$ από μία έλλειψη. Έπειτα ακολουθεί η ίδια διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 2.4.

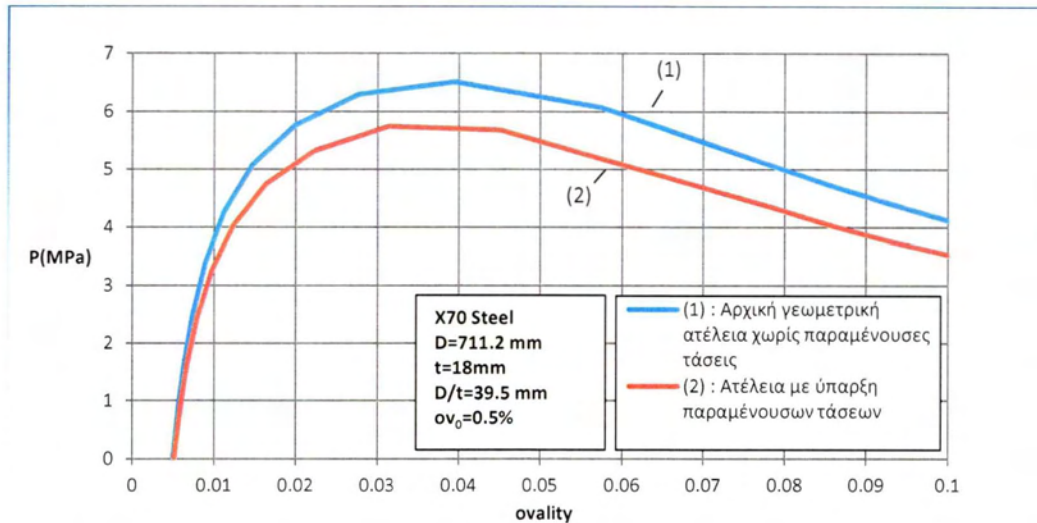
Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μία αρχική ατέλεια χωρίς την ύπαρξη παραμενουσών τάσεων (αρχική γεωμετρική ατέλεια τύπου 1), πράγμα που διευκολύνει την ανάλυση μας για την επίδραση των αρχικών γεωμετρικών ατελειών στην αντοχή αγωγών υπό εξωτερική πίεση.



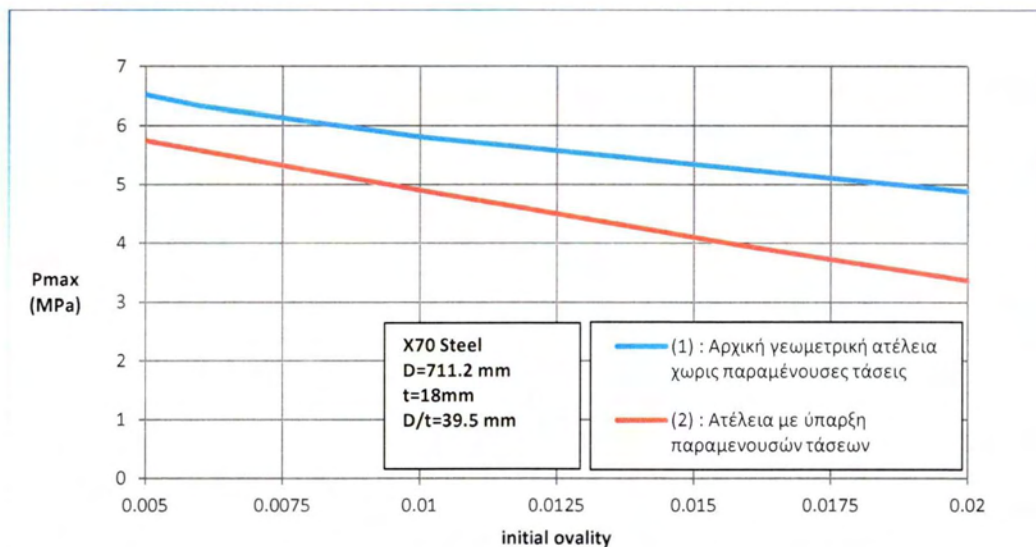
Σχήμα 2.15 Προβολή παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων στο βήμα όπου η εξωτερική πίεση έχει τιμή 0 με την δημιουργία ατέλειας μέσω της επιβολής πίεσης στον άνω κόμβο και την αποφόρτιση του.

Ενδεικτικά, οι διαφορές στην αντοχή για τους δύο τρόπους παρουσιάζονται στα σχήματα 2.16 και 2.17. Στο σχήμα 2.16 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα P-ov για τις δύο περιπτώσεις, ενώ στο σχήμα 2.17 φαίνεται η ευαισθησία της οριακής πίεσης στο αρχικό μέγεθος της ατέλειας συγκρίνοντας τους δύο τρόπους.

Υπάρχει μία απόκλιση περίπου 12% στις δύο μεθόδους και παρατηρούμε πώς η ανάλυση σε μοντέλο με αρχική γεωμετρική ατέλεια τύπου 2 παρουσιάζει υποβαθμισμένη αντοχή σε σχέση με αυτήν για μοντέλο με αρχική γεωμετρική ατέλεια τύπου 1. Επομένως επιβεβαιώνεται η απόφαση πώς η χρήση ανάλυσης με αρχική γεωμετρική ατέλεια χωρίς παραμένουσες τάσεις είναι πιο ρεαλιστική και ιδανική να μελετήσει μεμονωμένα την επίδραση της αρχικής ατέλειας μορφής οβάλ στην αντοχή ενός κυλινδρικού κελύφους.



Σχήμα 2.16 Δρόμοι ισορροπίας πίεσης – οβαλότητας δύο μοντέλων με διαφορετικό τρόπο δημιουργίας της ατέλειας μέσω μοντέλου σωλήνα μορφής "διατομής".

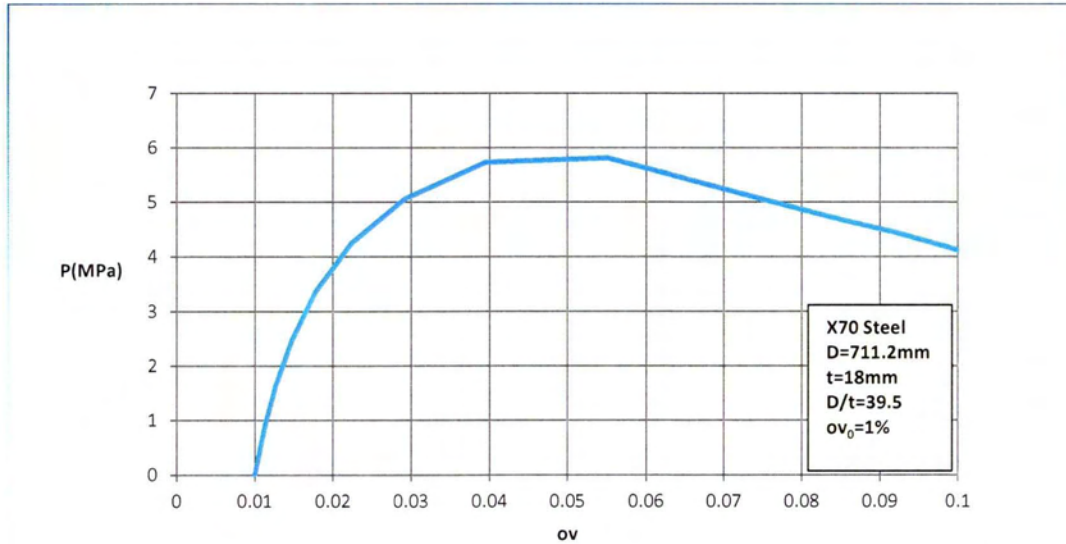


Σχήμα 2.17 Διάγραμμα οριακής πίεσης σε σχέση με την αρχική ατέλεια μορφής οβάλ για διαφορετικούς τρόπους δημιουργίας ατέλειας μέσω μοντέλου σωλήνα μορφής "διατομής".

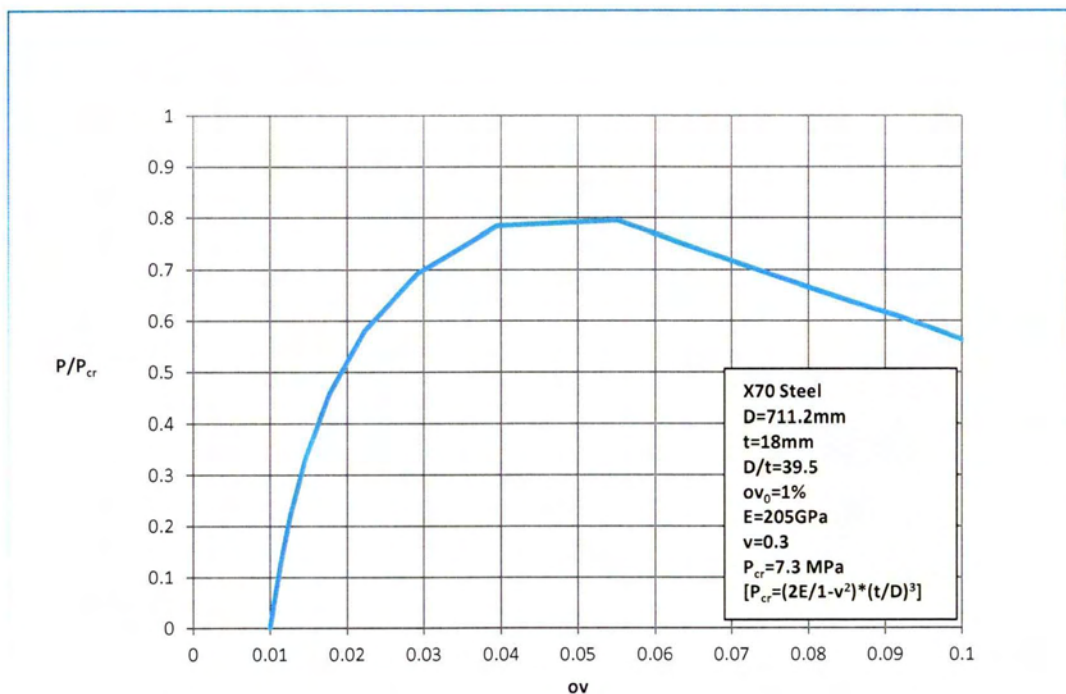
Ενδεικτικά, παρουσιάζονται στα σχήματα 2.18, 2.19, 2.20, 2.21 και 2.22 καμπύλες από διαγράμματα πίεσης για διάφορες τιμές αρχικών ατελειών.

Έτσι παρατηρεί κανείς από το σχήμα 2.21 ότι η οριακή πίεση (πίεση κατάρρευσης) εξαρτάται από την τιμή της αρχικής οβαλότητας σ_0 (αρχική ατέλεια). Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική ατέλεια μορφής οβάλ τόσο υποβαθμίζεται η τιμή της οριακής πίεσης. Στα σχήματα 2.23 και 2.24 παρουσιάζεται η μεταβολή (μείωση) της οριακής πίεσης συναρτήσει της αρχικής οβαλότητας που έχει κατασκευαστεί κάθε αγωγός. Μία καλή μαθηματική προσέγγιση της μεταβολής της οριακής πίεσης συναρτήσει της αρχικής οβαλότητας (σχήμα 2.24) μπορεί να

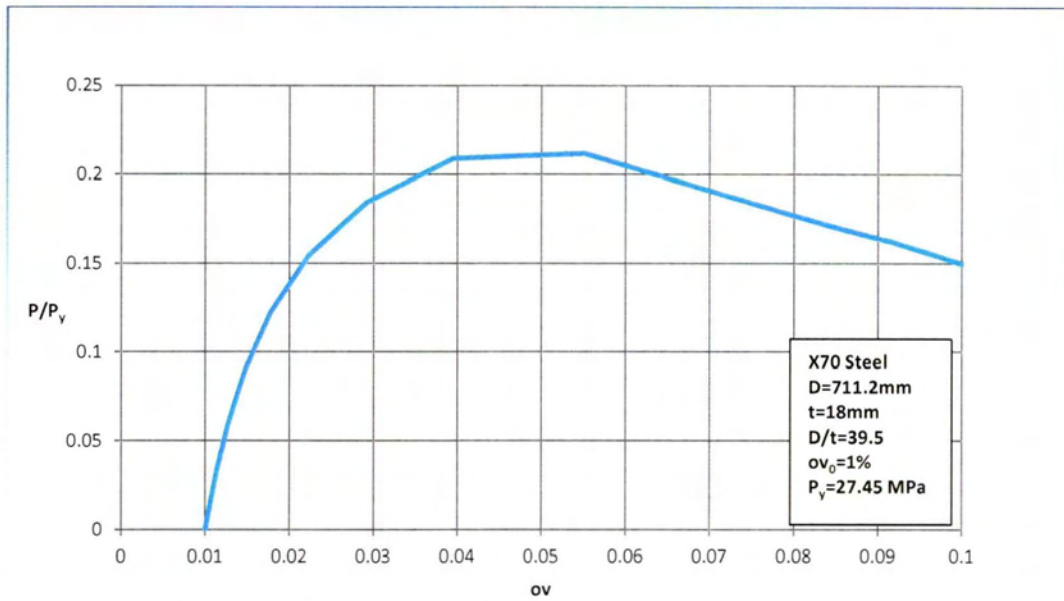
περιγραφεί από την σχέση $\frac{P_{max}}{P_{cr}} = 1 - c(\sigma_0)^n$. Παρατηρούμε πώς για $c=59$ και $n=0.762$ υπάρχει σύγκλιση ανάμεσα στην υπολογιστική και προσεγγιστική λύση.



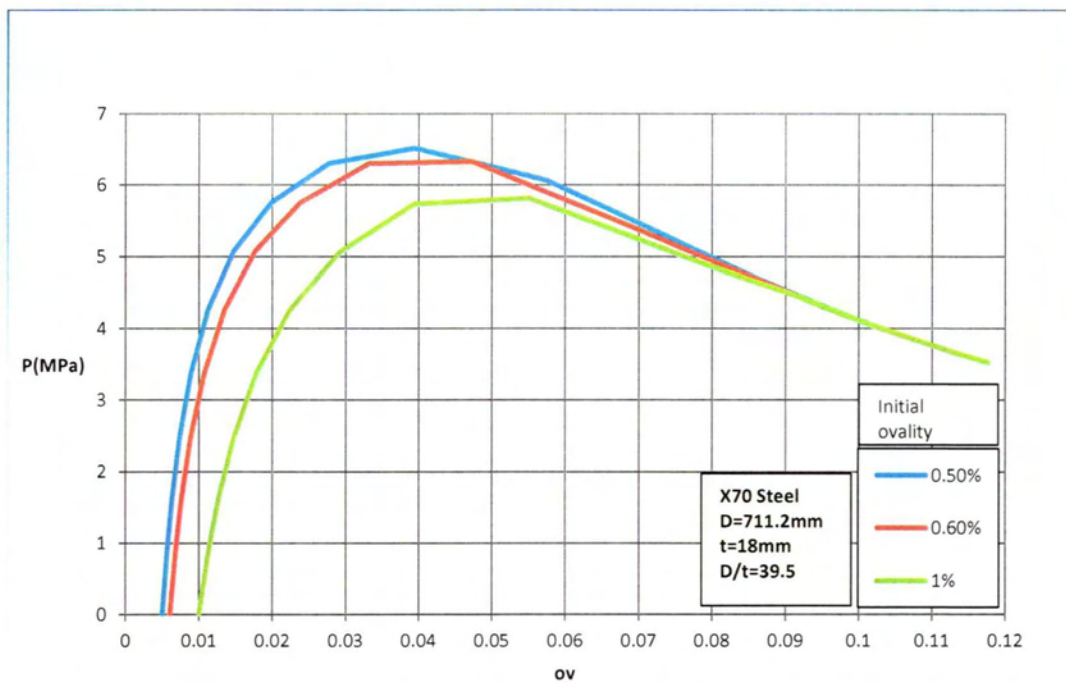
Σχήμα 2.18 Διάγραμμα πίεσης – οβαλοποίησης με μοντέλο σωλήνα μορφής "διατομής".



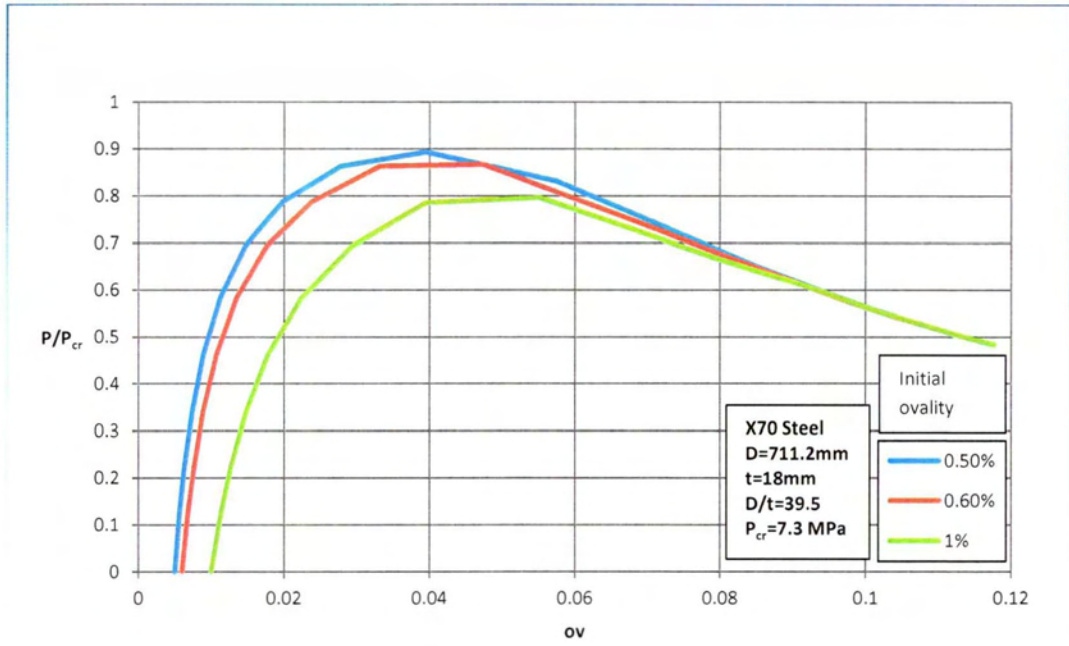
Σχήμα 2.19 Διάγραμμα πίεσης – οβαλοποίησης κανονικοποιημένο ως προς την κρίσιμη πίεση (παράγραφος 2.3.1) για δεδομένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται στο σχήμα.



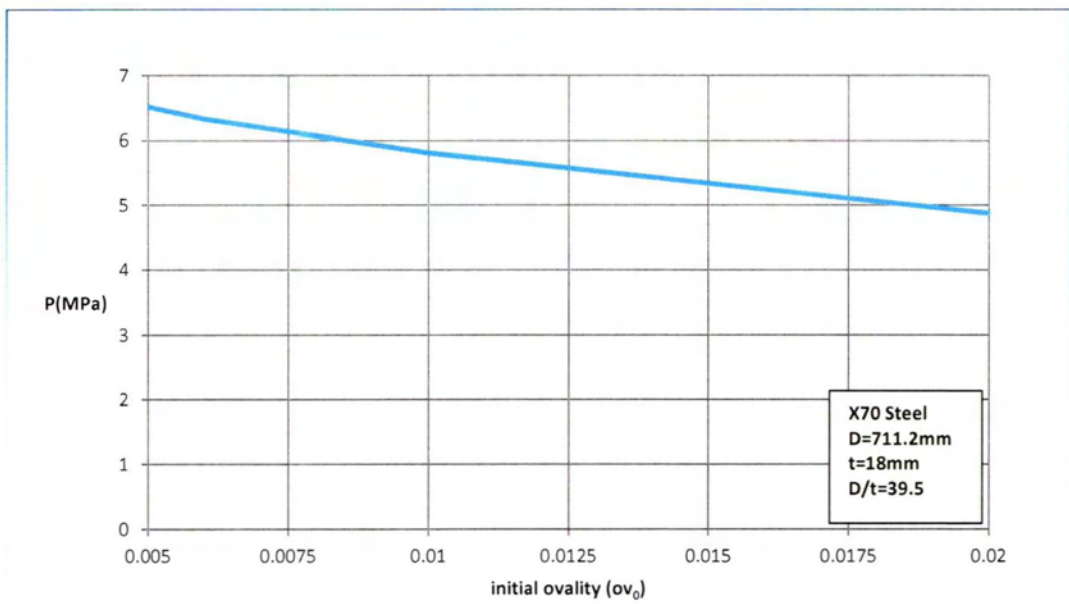
Σχήμα 2.20 Το διάγραμμα 2.18 κανονικοποιημένο με την πίεση πλήρους πλαστικοποίησης P_y .



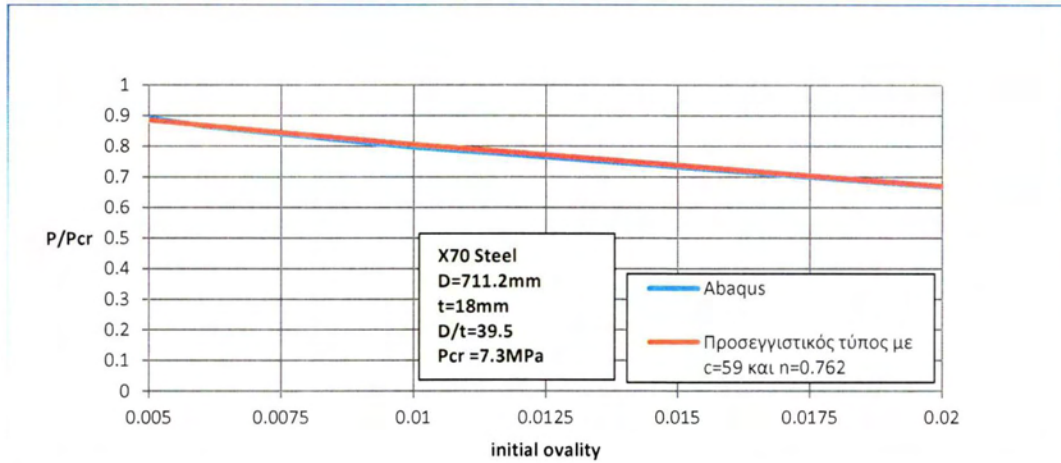
Σχήμα 2.21 Δρόμοι ισορροπίας για διάφορες τιμές αρχικής οβαλότητας μέσω μοντέλου σωλήνα μορφής "διατομής".



Σχήμα 2.22 Το προηγούμενο διάγραμμα κανονικοποιημένο ως προς την κρίσιμη πίεση.



Σχήμα 2.23 Διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης πίεσης (πίεσης κατάρρευσης) συναρτήσει του μεγέθους της ατέλειας με μοντέλο σωλήνα μορφής "διατομής".

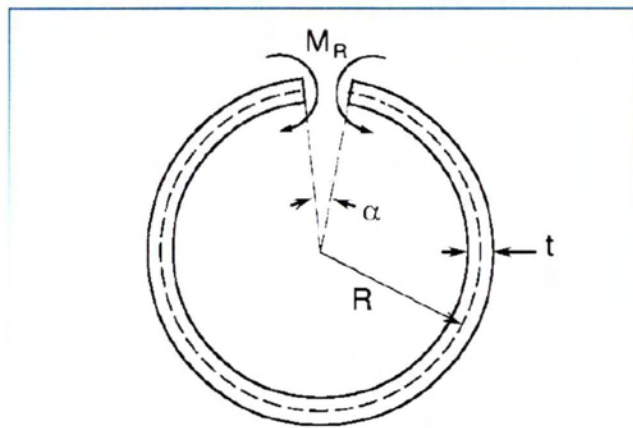


Σχήμα 2.24 Μαθηματική εξίσωση για την μεταβολή της οριακής πίεσης συναρτήσει της αρχικής οβαλότητας από την σχέση $\frac{P}{P_{cr}} = 1 - c(ov_0)^n$.

2.5.2 Επίδραση παραμενουσών τάσεων

Όπως και πολλές κατασκευές, έτσι και οι αγωγοί λόγω κατεργασίας ψυχρής έλασης και πιθανών συγκολλήσεων ραφής, αποκτούν παραμενουσες τάσεις λόγω των μεγάλων θερμοκρασιακών διαφορών κατά την σύνδεση άκρων, με αποτέλεσμα την δημιουργία περιφερειακών καμπτικών φορτίσεων [1].

Το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων μπορεί να προσδιοριστεί από ένα απλό πείραμα δακτυλίου που λαμβάνεται από το σωλήνα κάνοντας μία τομή στο τοίχωμα του, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.25 .



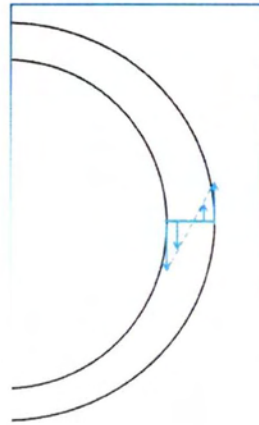
Σχήμα 2.25 Σχηματική απεικόνιση πειράματος μέτρησης παραμενουσών τάσεων (Kyriakides, S., Corona, E. (2007)).

Λόγω των παραμενουσών τάσεων τα τοιχώματα της τομής θα πλησιάσουν ή θα

απομακρυνθούν ανάλογα με το πρόσημο της συνιστάμενης ροπής. Έτσι, με βάση την εν λόγω μετατόπιση είναι εφικτό μέσω της γωνίας να προσδιοριστεί το μέτρο τους μέσω της σχέσης (2.20) [6],

$$|\sigma_{res}| = \frac{Et}{4\pi R} a \quad (2.20)$$

όπου a είναι η γωνία κατά την οποία άνοιξε ή έκλεισε η τομή. Επίσης, για μακρύτερους δακτυλίους το E αντικαθίσταται από το $(E/1-\nu^2)$. Το προφίλ των τάσεων κατά το πάχος του δακτυλίου μπορεί να θεωρηθεί γραμμικό, με μηδενική τιμή στην μέση του πάχους και μέγιστες αλλά αντίθετες τιμές στα δύο άκρα του πάχους όπως φαίνεται στο σχήμα 2.26.



Σχήμα 2.26 Γραμμική κατανομή τάσεων.

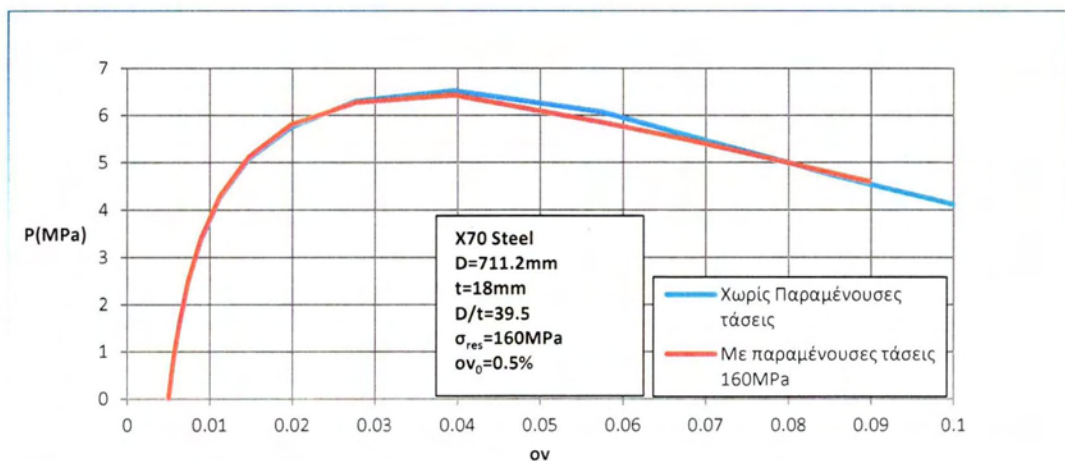
Για να προσομοιωθεί υπολογιστικά η επίδραση των παραμενουσών τάσεων χρησιμοποιείται στο μοντέλο αρχική ατέλεια μεγέθους $\sigma_{\nu_0}=0.005$ (0.5/100), χρησιμοποιώντας υλικό X70, διαμέτρου $D=711.2$ mm και πάχους 18 mm. Ομοίως με την περιγραφή που αναλύθηκε στην παράγραφο 2.4 για μοντέλο σωλήνα μορφής “διατομής” η προσθήκη των παραμενουσών τάσεων γίνεται με την προσθήκη μίας τιμής τάσης στα 5 σημεία ολοκλήρωσης κατά το πάχος για να δημιουργηθεί ένα κατάλληλο γραμμικό προφίλ τάσεων κατά το πάχος.

Εισάγεται η παράμετρος μεγέθους των παραμενουσών τάσεων [1]:

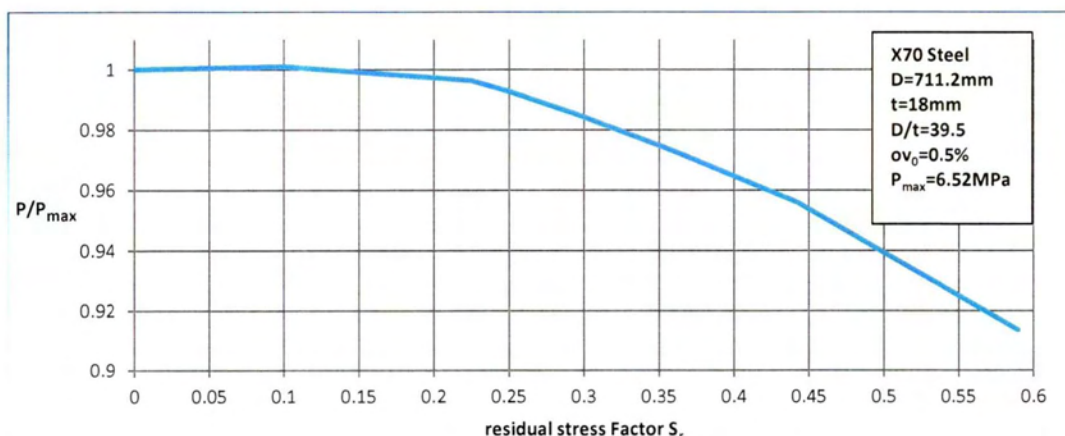
$$S_r = \frac{|\sigma_{res}|}{\sigma_y} \quad (2.21)$$

όπου σ_{res} το μέτρο της μέγιστης τιμής των παραμενουσών τάσεων και σ_y είναι το όριο διαρροής του υλικού, στην προκειμένη περίπτωση $\sigma_y=541\text{MPa}$. Διαπιστώνεται εύκολα πώς η παράμετρος S_r εκφράζει με αδιάστατο τρόπο το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων σε σχέση με το όριο διαρροής του υλικού. Ακολουθούν αριθμητικά αποτελέσματα από τις υπολογιστικές αναλύσεις.

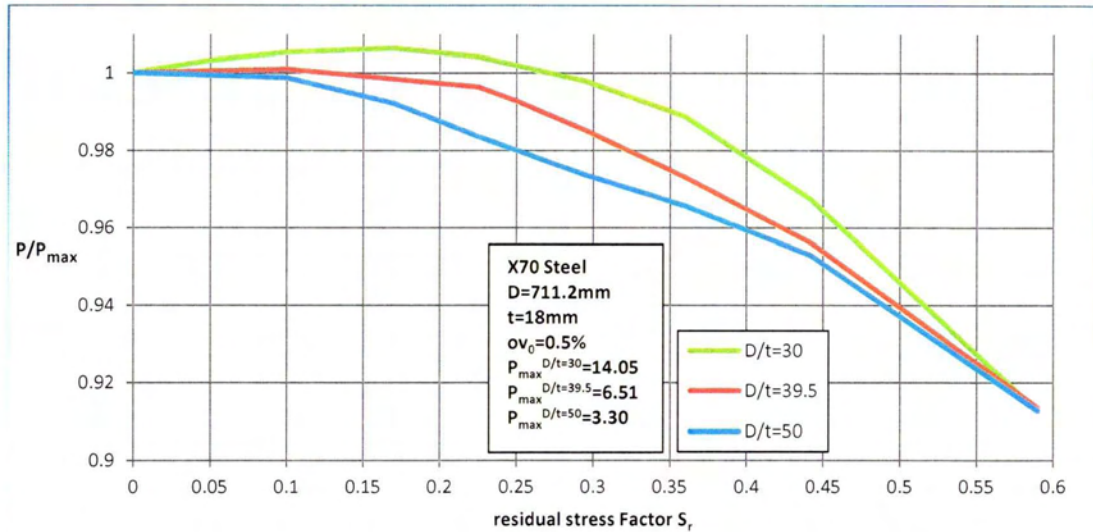
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προκύπτει πώς η ύπαρξη παραμενουσών τάσεων κατά το πάχος του σωλήνα υποβαθμίζει ελαφρώς την τιμή της οριακής πίεσης στην κατασκευή, παρατηρώντας από το σχήμα 2.29 πώς για μεγάλους λόγους D/t έχουμε μεγαλύτερες επιπτώσεις στην αντοχή σε σχέση με μικρότερους λόγους. Δηλαδή, οι λεπτότοιχοι σωλήνες έχουν μικρότερη ανθεκτικότητα στις παραμένουσες τάσεις σε σχέση με αυτούς που έχουν μεγάλο πάχος.



Σχήμα 2.27 Δρόμοι ισορροπίας για ένα μοντέλο με παραμένουσες τάσεις και χωρίς, μεγέθους $\sigma_{res}=160\text{MPa}$, χρησιμοποιώντας μοντέλο μοναδιαίου μήκους.



Σχήμα 2.28 Επίδραση των παραμενουσών τάσεων σε διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης πίεσης (υπολογισμένη με την ύπαρξη παραμενουσών τάσεων) κανονικοποιημένο με την πίεση κατάρρευσης P_{max} συναρτήσει του S_r (μοντέλο σωλήνα μορφής "διατομής").



Σχήμα 2.29 Επίδραση των παραμενουσών τάσεων σε διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης πίεσης (υπολογισμένη με την ύπαρξη παραμενουσών τάσεων) κανονικοποιημένο με την πίεση κατάρρευσης P_{max} συναρτήσει του S_r , για διάφορους λόγους D/t (μοντέλο σωλήνα μορφής “διατομής”).

2.5.3 Επίδραση της ανισοτροπίας του υλικού

Οι αγωγοί συνήθως παρουσιάζουν ανισοτροπία, δηλαδή διαφορετικές ιδιότητες σε διαφορετικές κατευθύνσεις μέσα στο υλικό. Σημαντικό ρόλο στην αντοχή του αγωγού υπό φόρτιση εξωτερικής πίεσης παίζει η διαφορά ανάμεσα στο όριο διαρροής στην διαμήκη και περιφερειακή διεύθυνση [1]. Το μέγεθος της ανισοτροπίας σε κάθε διεύθυνση μπορεί να μετρηθεί με την εισαγωγή του λόγου ανισοτροπίας του ορίου διαρροής (σχέση 2.22) ,

$$R_{ij} = \frac{\bar{\sigma}_{ij}}{\sigma_y} \quad (2.22)$$

όπου $\bar{\sigma}_{ij}$ είναι το όριο διαρροής που μετράται σε κάθε διεύθυνση και σ_y είναι το όριο διαρροής του υλικού (μέσω πειράματος εφελκυσμού σε ένα δοκίμιο αυτού). Για να περιγραφεί η πλαστικότητα ενός υλικού χρησιμοποιείται η τρισδιάστατη διατύπωση του κριτηρίου διαρροής κατά Hill [7]. Εκφράζοντας τις συνιστώσες του ταυυστή των τάσεων σε καρτεσιανές συντεταγμένες το κριτήριο του Hill έχει την μορφή:

$$2f(\sigma) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 \quad (2.23)$$

όπου F,G,H,L,M,N είναι χαρακτηριστικές παράμετροι της τρέχουσας κατάστασης ανισοτροπίας όπου,

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \\
 G &= \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} \right) \\
 H &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} \right) \\
 L &= \frac{3}{2R_{23}^2} \\
 M &= \frac{3}{2R_{13}^2} \\
 N &= \frac{3}{2R_{12}^2}
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

Επομένως, οι 6 παράμετροι που απαιτούνται για τον ορισμό του κριτηρίου του Hill είναι οι εξής:

$$\frac{\overline{\sigma_{11}}}{\sigma_y}, \quad \frac{\overline{\sigma_{22}}}{\sigma_y}, \quad \frac{\overline{\sigma_{33}}}{\sigma_y}, \quad \frac{\overline{\sigma_{12}}}{\tau_y}, \quad \frac{\overline{\sigma_{13}}}{\tau_y}, \quad \frac{\overline{\sigma_{23}}}{\tau_y}$$

όπου $\tau_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$. Επίσης, απαραίτητη προϋπόθεση είναι οι 6 παράμετροι να είναι θετικοί για να είναι καλώς ορισμένη η συνάρτηση Hill.

Στο μοντέλο που θα μελετηθεί, ορίζεται η διαφορά στο όριο διαρροής κατά την διαμήκη και περιφερειακή διεύθυνση μέσω της παραμέτρου S, η οποία ορίζεται ως [1]:

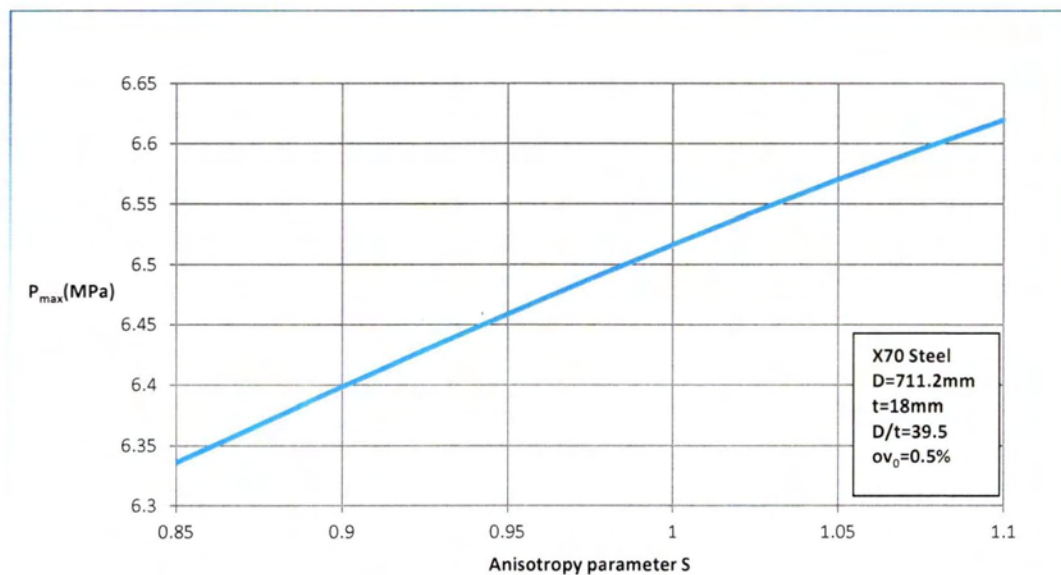
$$S = \frac{\sigma_{\theta\theta}}{\sigma_{ox}} \tag{2.25}$$

όπου σ_{ox} και $\sigma_{\theta\theta}$ είναι αντίστοιχα το όριο διαρροής στην διαμήκη και την περιφερειακή διεύθυνση.

Για την υπολογιστική ανάλυση της επιρροής της ανισοτροπίας στην αντοχή του υλικού, δημιουργείται μοντέλο σωλήνα μορφής “διατομής”, υλικού X70,

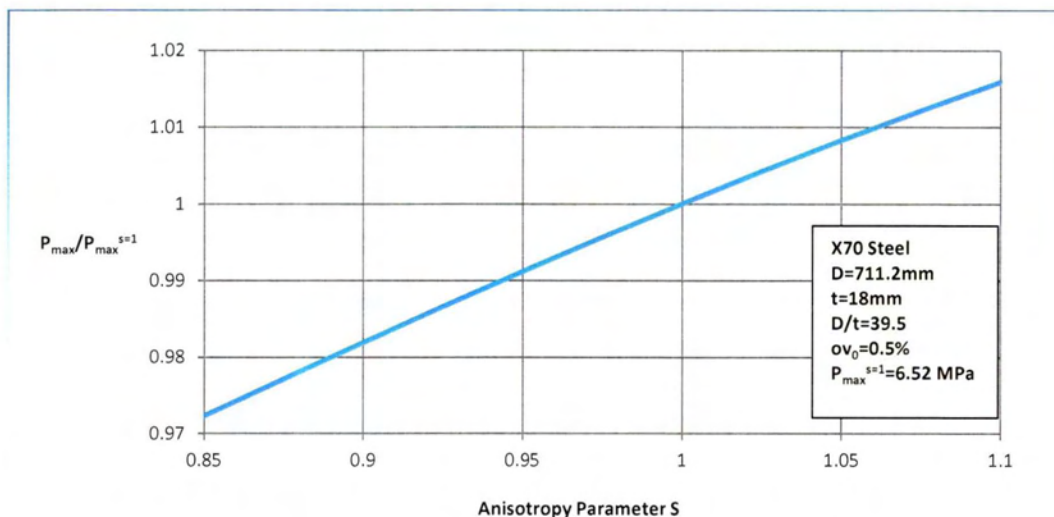
διαμέτρου $D=711.2$ mm και πάχους $t=18$ mm με αρχική οβαλότητα (σ_0) 0.5%. Η ανάλυση δεν διαφέρει σημαντικά με αυτή που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.4.1 με την μόνη διαφορά πώς μέσω της εντολής "Potential" στο υπολογιστικό πρόγραμμα του Abaqus δίνονται οι παράμετροι R_{ij} σε τοπικό κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων. Στην περίπτωση της μελέτης που θα πραγματοποιηθεί, ο άξονας "1" σε τοπικό σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων (με βάση το μοντέλο της παρ. 2.4.1) είναι αυτός που αντιστοιχεί στην περιφερειακή διεύθυνση σε κάθε σημείο. Επομένως, δίνεται μέσω της εντολής "Potential" στο $R_{11} = s$ τιμές που κυμαίνονται από 0.85 έως 1.1, στο $R_{22} = R_{33} = 1$ και οι υπόλοιπες παράμετροι μένουν κενές, θεωρώντας πάντα ότι $\sigma_y = 541$ MPa με βάση αυτά που προηγήθηκαν.

Ακολουθούν αποτελέσματα πάνω στην συμπεριφορά του αγωγού καθώς και στον υπολογισμό της οριακής πίεσης για διάφορες τιμές ανισοτροπίας.



Σχήμα 2.30 Μεταβολή της οριακής πίεσης για διάφορες τιμές ανισοτροπίας μέσω μοντέλου σωλήνα μορφής "διατομής".

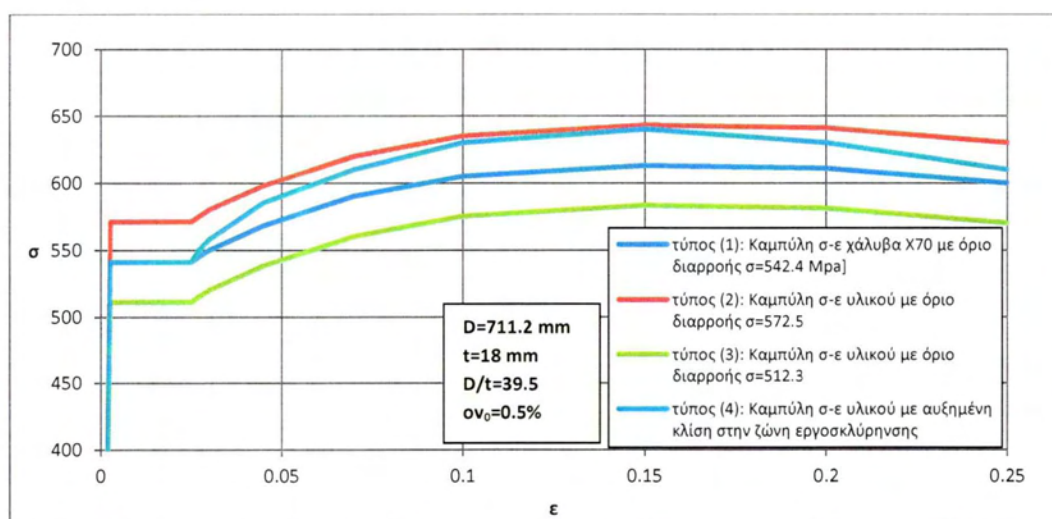
Από τα σχήματα 2.30 και 2.31 προκύπτει πώς όσο το όριο διαρροής στην περιφερειακή διεύθυνση είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό στην διαμήκη τόσο ο σωλήνας αποκτά μεγαλύτερη αντοχή σε εξωτερική πίεση. Κάτι που σημαίνει πως η ανισοτροπία κατά την περιφερειακή διεύθυνση είναι σημαντική για τον ακριβή υπολογισμό της οριακής πίεσης.



Σχήμα 2.31 Μεταβολή της οριακής πίεσης κανονικοποιημένη με την οριακή πίεση για $s=1$.

2.5.4 Η επίδραση της καμπύλης σ-ε του υλικού

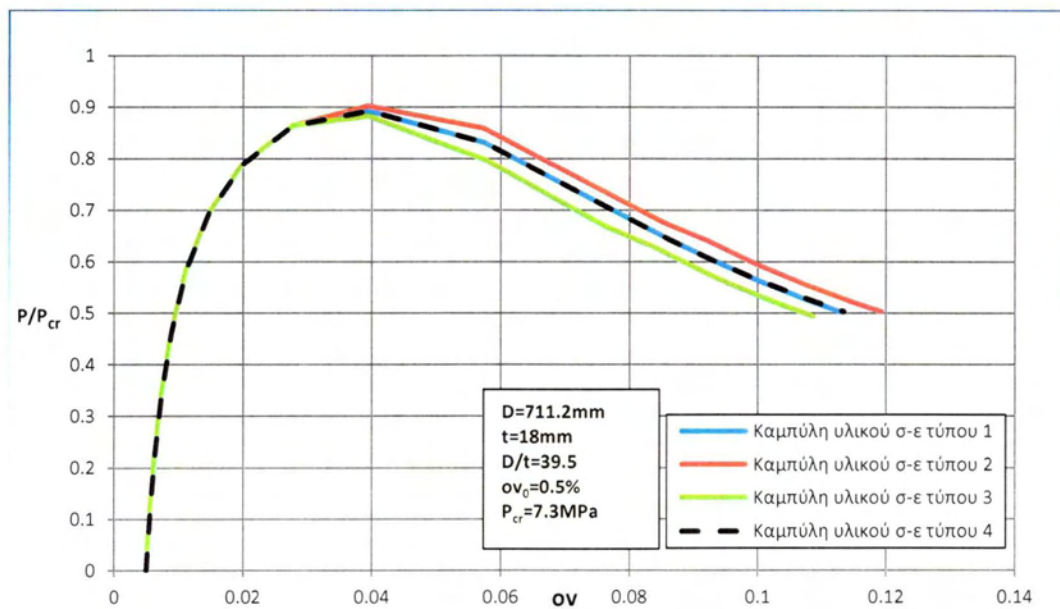
Το όριο διαρροής παίζει σημαντικό ρόλο στην μηχανική συμπεριφορά ενός αγωγού, γεγονός που καθιστά ενδιαφέρουσα την μελέτη επίδρασης της καμπύλης σ-ε του υλικού στην αντοχή σε εξωτερική πίεση. Στην παράγραφο αυτή θα μελετηθούν διαφορετικές καμπύλες σ-ε υλικού με διαφορετικές ιδιότητες και θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την ανάλυση. Σύμφωνα με την παράγραφο 2.4.1, η διαδικασία ανάλυσης μέσω Abaqus είναι ίδια, με την μόνη διαφορά ότι αλλάζει η καμπύλη του υλικού κάθε φορά. Στην παράγραφο αυτή μελετώνται οι καμπύλες υλικών σ-ε του σχήματος 2.32.



Σχήμα 2.32 Διάγραμμα καμπύλων σ-ε για εξέταση πάνω στην αντοχή υπό εξωτερική πίεση.

Με βάση το σχήμα 2.32 η καμπύλη σ - ϵ τύπου 2 έχει αυξημένο όριο διαρροής σε σχέση με αυτό του X70 κατά 5.5% ($\sigma_y=572.5$ MPa), ενώ αντίθετα στην καμπύλη σ - ϵ τύπου 3 υπάρχει μείωση στο όριο διαρροής σε σχέση με αυτό του X70 κατά 5.9% ($\sigma_y=512.3$ MPa).

Στο σχήμα 2.33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση παρατηρώντας μια αύξηση της αντοχής για υλικό με μεγαλύτερο όριο διαρροής και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, ενώ στον πίνακα 2.3 παρουσιάζονται οι διαφορές στις τιμές της οριακής πίεσης κατά την μεταβολή του ορίου διαρροής οι οποίες είναι αμνηλητές.



Εικόνα 2.33 Διάγραμμα πίεσης κανονικοποιημένη με την κρίσιμη πίεση συναρτήσει της οβαλότητας σε μοντέλο σωλήνα μορφής "διατομής" για υλικά με διαφορετικές ιδιότητες.

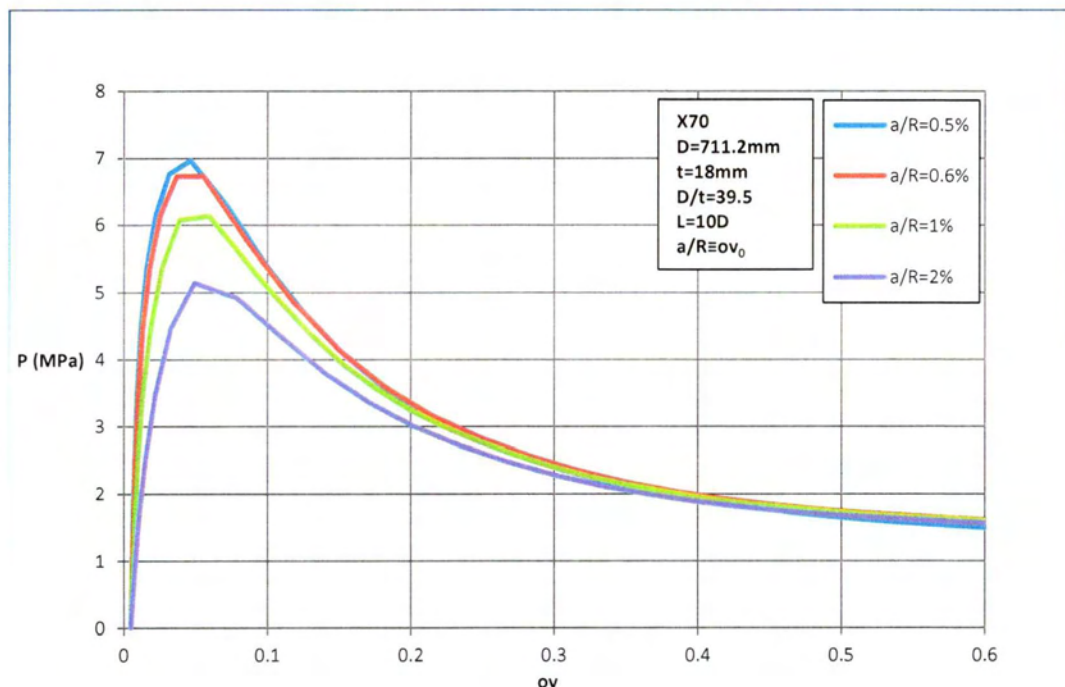
| | D/t=30 | D/t=39.5 | D/t=50 |
|-----------------------------------|--------|----------|--------|
| P_{max} [$\sigma_y=572.5$ MPa] | 14.23 | 6.586 | 3.339 |
| Διαφορά με τον X70 | 1.29% | 1.08% | 1% |
| P_{max} [$\sigma_y=512.3$ MPa] | 13.85 | 6.438 | 3.267 |
| Διαφορά με τον X70 | -1.4% | -1.2% | -1.11% |
| P_{max} [$\sigma_y=542.4$ MPa] | 14.05 | 6.516 | 3.305 |

Πίνακας 2.3 Παρουσίαση οριακών πιέσεων για διάφορες καμπύλες σ - ϵ (πού παρουσιάστηκαν στο σχήμα 2.32) υλικών με διάφορους λόγους D/t .

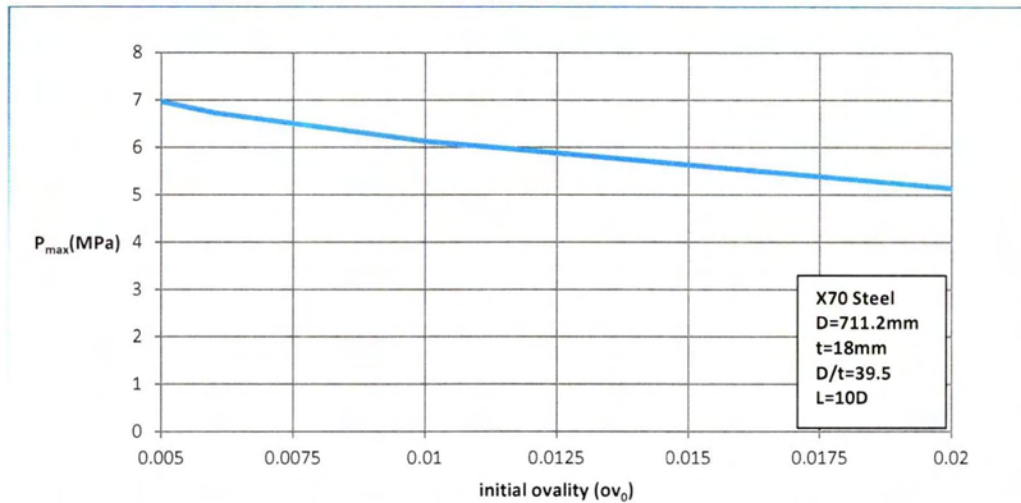
2.5.5 Η επίδραση του μήκους σωλήνα

Η ανάλυση που χρησιμοποιείται για μοντέλο σωλήνα μορφής “διατομής” προσομοιάζει την περίπτωση αγωγού πολύ μεγάλου μήκους, λόγω της υπόθεσης ύπαρξης επίπεδης παραμόρφωσης [1]. Στην παράγραφο αυτή αναλύεται ο ρόλος που παίζει το μήκος ενός αγωγού στην συμπεριφορά του υπό εξωτερική πίεση μέσω της εύρεσης της τιμής της οριακής πίεσης. Αρχικά στα σχήματα 2.34 και 2.35 παρουσιάζεται η συμπεριφορά ενός σωλήνα διαμέτρου $D=711.2$ mm, μήκους 7112 mm (10D) και πάχους $t=18$ mm καθώς και η ευαισθησία του σε αρχικές γεωμετρικές ατέλειες μορφής οβάλ. Στο σχήμα 2.36 ακολουθεί διάγραμμα P-ον για διάφορα μήκη σωλήνων και τέλος στο σχήμα 2.37 παρουσιάζεται η τάση της τιμής της οριακής πίεσης να μειώνεται καθώς αυξάνεται το μήκος του σωλήνα.

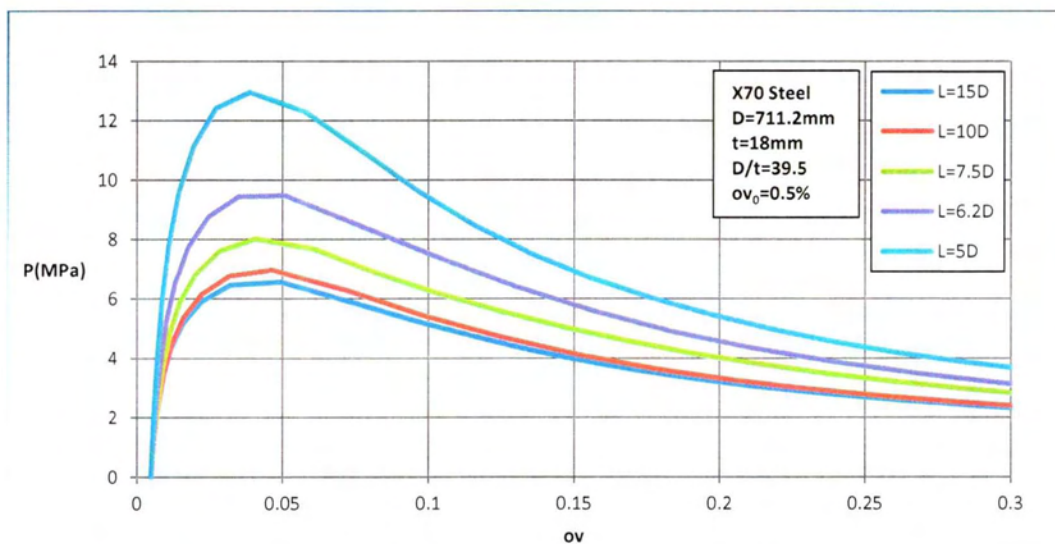
Η ανάλυση για την εξαγωγή των επόμενων διαγραμμάτων, βασίστηκε στην παράγραφο 2.4.2 με εισαγωγή αρχικής γεωμετρικής ατέλειας μορφής οβάλ καθ’ όλο το μήκος του αγωγού χωρίς αρχικές παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις.



Σχήμα 2.34 Διάγραμμα P-ον για διάφορες τιμές αρχικής ατέλειας όπου η οβαλότητα (παράμετρος ov) μετράται στην μεσαία διατομή (πού πρώτη καταρρέει) χρησιμοποιώντας μοντελοποίηση σωλήνα πεπερασμένου μήκους.

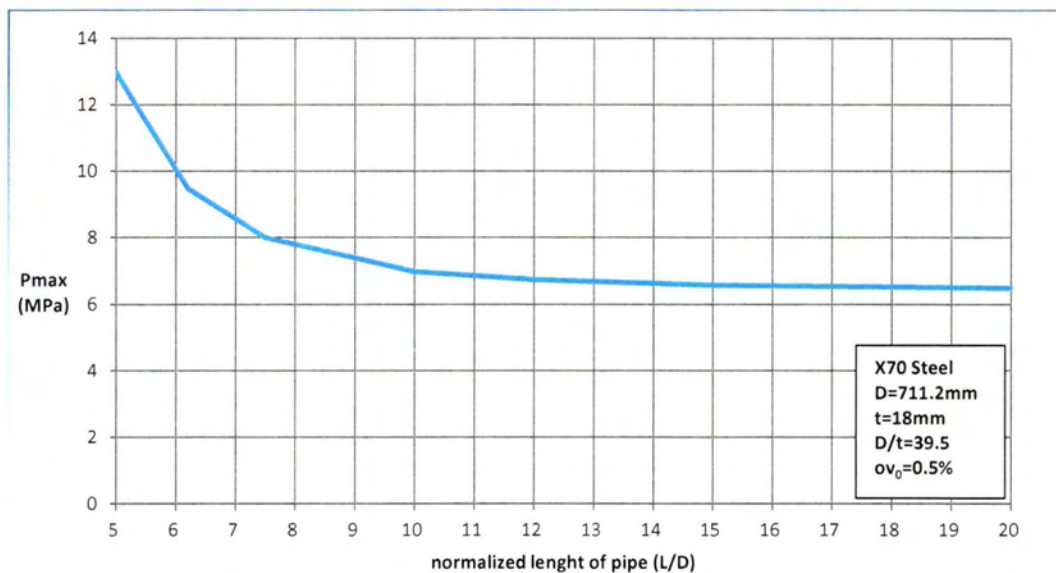


Σχήμα 2.35 Διάγραμμα οριακής πίεσης συναρτήσει της αρχικής οβαλότητας μέσω μοντέλου πεπερασμένου μήκους.



Σχήμα 2.36 Διαγράμματα P-ov για διαφορετικά μήκη σωλήνων με την οβαλότητα να μετράται στην μεσαία διατομή τους καθενός.

Με βάση τα αποτελέσματα σε αυτήν την παράγραφο παρατηρείται εξασθένιση στην αντοχή ενός σωλήνα υπό εξωτερική πίεση με αύξηση του μήκους του. Αυτό σημαίνει πώς όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος ενός σωλήνα τόσο μειώνεται η τιμή της οριακής πίεσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.37. Επίσης, είναι σημαντικό να τονιστεί πώς με βάση το σχήμα 2.37 για ένα άνω όριο στην τιμή του μήκους σωλήνα η τιμή της οριακής πίεσης διατηρείται σταθερή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση αυτό το άνω όριο στο μήκος του σωλήνα είναι $L_A=15D$.



Σχήμα 2.37 Διάγραμμα οριακής πίεσης αγωγού υπό εξωτερική πίεση συναρτήσει του μήκους αγωγού μέσω μοντέλου πεπερασμένου μήκους.

2.6 Συμπεράσματα

Η ανάλυση και μελέτη της συμπεριφοράς και αντοχής αγωγών υλικού χάλυβα X70, με λόγο $D/t=39.5$ υπό εξωτερική πίεση παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία σειρά από βασικά συμπεράσματα που παρατίθενται αριθμητικά παρακάτω:

1. Με βάση τα σχήματα 2.16 και 2.17 η ανάλυση με αρχική γεωμετρική ατέλεια μορφής οβάλ (γεωμετρική αρχική ατέλεια τύπου 1) είναι περισσότερο πρακτική και απλή σε σχέση με την επιβολή αρχικής πίεσης για την δημιουργία παραμένουσας παραμόρφωσης (γεωμετρική αρχική ατέλεια τύπου 2), καθότι πέρα από τον υπολογιστικό φόρτο μπορεί να αποφευχθεί και η επιρροή των παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων στις αναλύσεις με γεωμετρική αρχική ατέλεια τύπου (2), κάτι που δημιουργεί απόκλιση ποσοστού 12% περίπου μεταξύ των δύο μεθόδων.
2. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.23, η τιμή της οριακής πίεσης μειώνεται σχεδόν γραμμικά σε σχέση με την αύξηση του μεγέθους της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας μορφής οβάλ. Ενδεικτικά, 1% αύξηση μεγέθους της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας προκαλεί μείωση 18.5% στην τιμή της οριακής πίεσης.
3. Στο σχήμα 2.29, όσο πιο λεπτότοιχος είναι ένας σωλήνας (μεγάλος λόγος D/t) τόσο μειώνεται η αντοχή του από την ύπαρξη παραμενουσών τάσεων. Ταυτόχρονα από το ίδιο σχήμα φαίνεται πώς οι μεταβολές της οριακής πίεσης συναρτήσει του μεγέθους των παραμενουσών τάσεων είναι αρκετά μικρές για

τον αγωγό που θεωρήσαμε, κάτι που σημαίνει πώς μόνο σε οριακές καταστάσεις είναι αναγκαίο να ληφθεί υπόψη η επιρροή των παραμενουσών τάσεων στο σχεδιασμό.

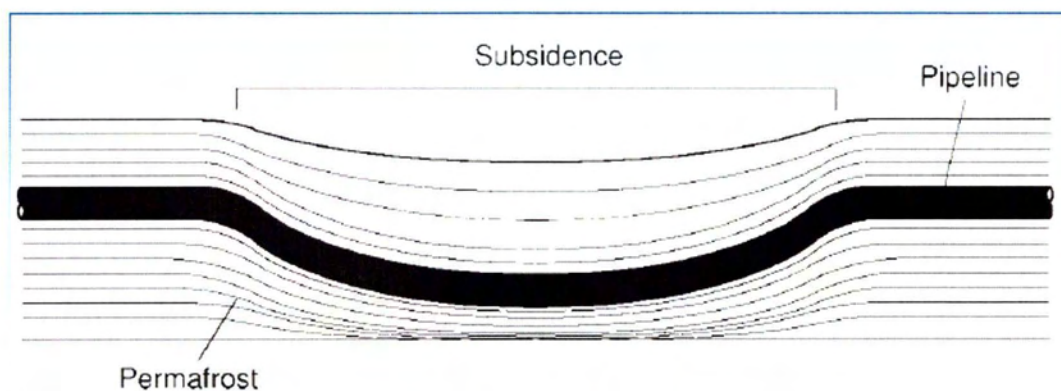
4. Με βάση το σχήμα 2.30, η τιμή της οριακής πίεσης μειώνεται σχεδόν γραμμικά με την αντίστοιχη μείωση στην ανισοτροπία του ορίου διαρροής του αγωγού στην περιφερειακή διεύθυνση σε σχέση με την αξονική. Είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι για αύξηση (μείωση) της ανισοτροπίας κατά 10% έχουμε μία αύξηση (μείωση) κατά 1% στην τιμή της οριακής πίεσης.
5. Όσο αναφορά τις ιδιότητες του υλικού από την ανάλυση που πραγματοποιείται στην παράγραφο 2.5.4, υλικά με υψηλό όριο διαρροής ανεξάρτητα από το στάδιο της εργοσκλήρυνσης στην πλαστική περιοχή έχουν και μεγαλύτερη αντοχή σε φόρτιση εξωτερικής πίεσης. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.3 για αύξηση του ορίου διαρροής κατά 5.5% έχουμε αύξηση 1.29% στην τιμή της οριακής πίεσης σε αγωγό με λόγο $D/t=39.5$, ενώ μειώνεται η μεταβολή στην τιμή της οριακής πίεσης για αύξηση του λόγου D/t (δηλαδή όσο πιο λεπτός είναι ένας αγωγός μειώνεται και η αντοχή του σε εξωτερική πίεση). Επομένως, είναι σκόπιμο να χρησιμοποιούνται υλικά με τις καλύτερες δυνατές ιδιότητες (υψηλότερο όριο διαρροής με μεγαλύτερη εργοσκλήρυνση) που απαιτούν για κάθε κατασκευή.
6. Το μήκος ενός σωλήνα επηρεάζει την αντοχή σε εξωτερική πίεση σημαντικά, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.36.
7. Στο σχήμα 2.37 φαίνεται πώς μετά από μία συγκεκριμένη τιμή μήκους η καμπύλη της οριακής πίεσης αποκτά ασυμπτωτική μορφή, γεγονός που αποδεικνύει πώς για ένα ορισμένο μήκος σωλήνα και έπειτα η αντοχή του σε εξωτερική πίεση δεν μεταβάλλεται. Είναι χρήσιμο να τονιστεί πώς η τιμή της οριακής πίεσης για μεγάλα μήκη σωλήνων (υλικού X70 με λόγο $D/t=39.5$) με βάση το σχήμα 2.37 το οποίο προσομοιώθηκε υπολογιστικά με μοντέλο σωλήνα μορφής "διατομής" είναι $P_{max}=6.5$ MPa.
8. Σε σχέση με την ανωτέρω παρατήρηση, τα υπολογιστικά μοντέλα που περιγράφηκαν στις παραγράφους 2.4.1 και 2.4.2, δίνουν συμβατά αποτελέσματα. Από το σχήμα 2.23 για αρχική οβαλότητα 0.5% η τιμή της οριακής πίεσης για μοντέλο σωλήνα μορφής "διατομής" (υλικού X70 με λόγο $D/t=39.5$) είναι $P_{max}=6.5$ MPa, όπως και στους μεγάλου μήκους σωλήνες.

Αυτό επιβεβαιώνει την υπόθεση πώς η ανάλυση με σωλήνα μορφής "διατομής" δίνει καλά αποτελέσματα για σωλήνες μεγάλου μήκους, και σε αυτή την περίπτωση ο δακτύλιος της ανάλυσης συμπεριφέρεται σαν την μεσαία διατομή ενός σωλήνα μεγάλου μήκους.

3. Αντοχή σε καθαρή κάμψη

Η κάμψη είναι μία κυρίαρχη φόρτιση στους αγωγούς και εμφανίζεται κυρίως κατά την διάρκεια εγκατάστασης (πόντισης) και λειτουργίας. Στους υποθαλάσσιους αγωγούς εμφανίζεται κυρίως κατά την διαδικασία τυλίγματος του αγωγού στο τύμπανο μέσω της διαδικασίας Reeling (σχήμα 1.3) και την επακόλουθη πόντιση του στο νερό ξετυλίγοντας τον μέσω της μεθόδου S-lay (σχήμα 1.1). Στους χερσαίους αγωγούς η κάμψη εμφανίζεται σε περίπτωση καθίζησης του εδάφους, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Η καθίζηση μπορεί να προκληθεί λόγω κάποιου σεισμού ή από άλλους αστάθμητους παράγοντες [1].

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στην ανελαστική συμπεριφορά, στον λυγισμό και στην κατάρρευση αγωγών υπό καθαρή κάμψη. Στη παράγραφο 3.1 περιγράφεται ο λυγισμός και η πλαστική συμπεριφορά αγωγών σε καθαρή κάμψη, με αναφορά σε πειράματα τα οποία βοηθούν να προχωρήσει η ανάλυση σε κυλινδρικά κελύφη υλικού X70. Στην παράγραφο 3.2 αναλύεται ο τρόπος προσομοίωσης του προβλήματος, για σωλήνες υλικού X70 με τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην παράγραφο 2.3, μέσω υπολογιστικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων (Abaqus). Στην παράγραφο 3.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση για την καθαρή κάμψη μέσω κατάλληλων διαγραμμάτων. Τέλος, στην παράγραφο 3.4 εκθέτονται μερικά βασικά συμπεράσματα.



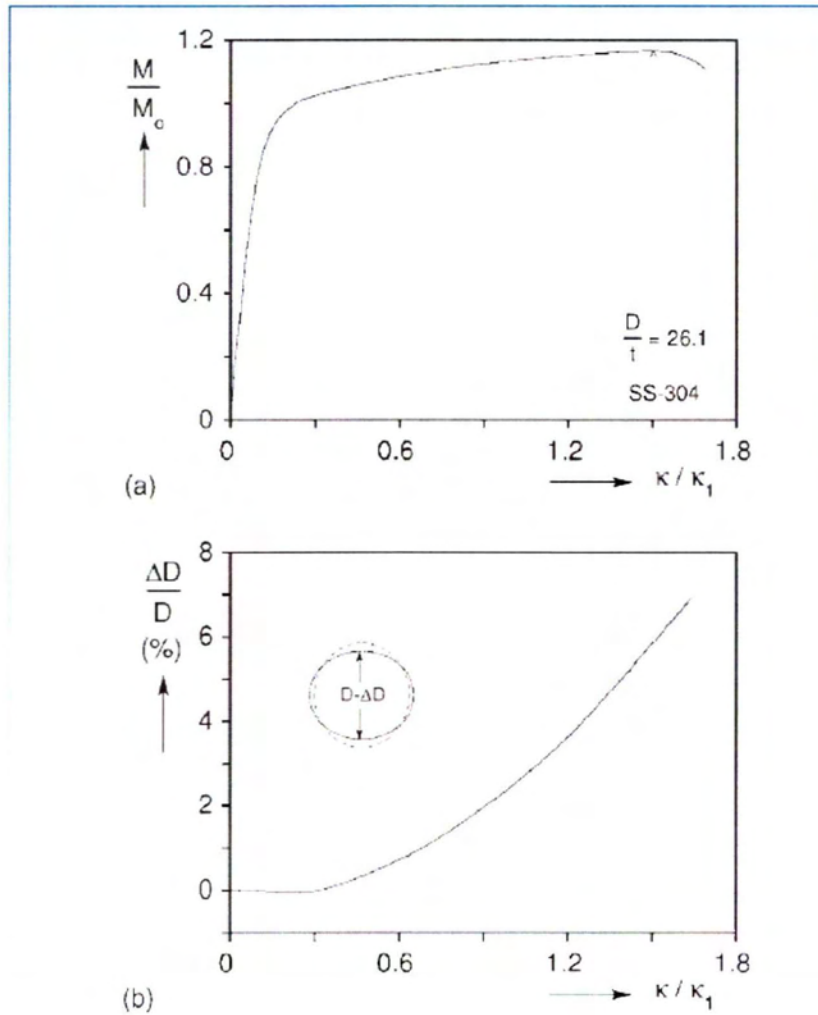
Σχήμα 3.1 Κάμψη αγωγού από υποχώρηση στηρίγματος (Πηγή: Kyriakides, S., Corona, E. (2007). *Mechanics of offshore pipelines vol.1. : Buckling and collapse. Elsevier, Oxford, UK.*)

3.1 Λυγισμός και πλαστική συμπεριφορά κυλινδρικών κελυφών σε καθαρή κάμψη

Ένας μακρὺς σωλήνας πού κάμπτεται, εκ πρώτης όψεως, συμπεριφέρεται ως δοκός. Η βασική διαφορά όμως ανάμεσα τους έγκειται στο γεγονός ότι η κάμψη σε κυλινδρικό κέλυφος προκαλεί μεταβολές στην μορφή της διατομής (ovalization). Η αύξηση αυτή της οβαλότητας με την σειρά της, προκαλεί μία επακόλουθη σταδιακή μείωση στην καμπτική ακαμψία του σωλήνα, έτσι με αυξανόμενη καμπυλότητα η ροπή οδηγείται σε μία μέγιστη τιμή. Η κατάσταση αυτή αποτελεί μία οριακή κατάσταση της κατασκευής και το φορτίο της ροπής αυτής ονομάζεται “οριακό φορτίο κάμψης”. Η πρόταση αυτή διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τον Brazier το 1927 και ονομάστηκε επίδραση του Brazier (Brazier’s effect) [8]. Για σωλήνες με χαμηλή τιμή λόγου D/t από μέταλλο και μέτρια σκληρότητα, η φόρτιση τους σε αυξανόμενη κάμψη προκαλεί έντονη οβαλοποίηση της διατομής η οποία συνεχίζει να αυξάνεται ραγδαία μέχρι μία μέγιστη τιμή κάμψης. Αυτή η τιμή της κάμψης είναι η οριακή κατάσταση της κατασκευής σύμφωνα με τον Brazier [1]. Παράδειγμα από την απόκριση τέτοιων σωλήνων σε κάμψη φαίνεται σε κανονικοποιημένο διάγραμμα ροπής - καμπυλότητας ($M-k$), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2(a), για σωλήνα υλικού SS-304 με λόγο D/t ίσο με 26.1. Στο σχήμα 3.2(b) φαίνεται το αντίστοιχο κανονικοποιημένο διάγραμμα οβαλότητας - καμπυλότητας ($ov-k$) πού δείχνει την αλλαγή της οβαλότητας στο επίπεδο της κάμψης με αυξανόμενη καμπυλότητα. Η μέγιστη ροπή στο σχήμα 3.2(a) σημειώνεται με τον συμβολισμό (\wedge), που εμφανίζεται στην κανονικοποιημένη καμπυλότητα με τιμή 1.505. Έπειτα από την μέγιστη ροπή, το κέλυφος αναπτύσσει έναν μηχανισμό τοπικής κατάρρευσης όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3(a).

Για σωλήνες με υψηλότερους λόγους D/t , φαινόμενα όπως η δημιουργία μικρών κυματισμών πτύχωσης και λυγισμού μπορούν να προηγηθούν της εμφάνισης του “οριακού φορτίου κάμψης” που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο [1]. Στο σχήμα 3.4(a), φαίνεται το κανονικοποιημένο διάγραμμα ροπής - καμπυλότητας σε σωλήνα υλικού Al 6061-T6 με λόγο $D/t=35.57$. Στο σχήμα 3.4(b), παρουσιάζεται η αλλαγή της οβαλότητας σε δύο διαφορετικές διατομές κατά το μήκος του σωλήνα. Ο σωλήνας αρχικά παίρνει την μορφή οβάλ όμοια σε αυτές τις δύο περιοχές, αλλά σε κανονικοποιημένες καμπυλότητες μεγαλύτερες από 0.8 εμφανίζεται μία απόκλιση στην συμπεριφορά τους. Στο σημείο της καμπύλης του σχήματος 3.4(a), όπως σημειώνεται με το βελάκι της μορφής (\downarrow), μικροί κυματισμοί πτύχωσης εμφανίζονται σε όλη την οβαλοποιημένη περιοχή (σχήμα 3.4(b)). Εκεί έχουμε το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού, ο οποίος αποτελεί πλέον την οριακή κατάσταση της κατασκευής. Σύντομα, μετά την εμφάνιση των κυματισμών πτύχωσης εμφανίζεται το μέγιστο φορτίο κάμψης με τον συμβολισμό (\wedge) στο σχήμα 3.4(a), και έπειτα ο σωλήνας καταρρέει τοπικά σε μία χαμηλότερη τιμή ροπής μετά από όλα αυτά. Το σχήμα 3.3(b) δείχνει ένα παράδειγμα από μία τοπική αστοχία με χαρακτηριστική μορφή τοπικής

πτύχωσης (“local kink”) που ενεργοποιείται από την εμφάνιση των κυματισμών λόγω του λυγισμού.



Σχήμα 3.2 Συμπεριφορά σωλήνων σε καθαρή κάμψη υλικού SS-304 με λόγο $D/t=26.1$: (a) Ροπή-καμπυλότητα και (b) οβαλότητα-καμπυλότητα. (Kyriakides, S., Corona, E. (2007)).

Τα διαγράμματα κανονικοποιούνται με κάποιες τυπικές παραμέτρους που προκύπτουν από οριακές καταστάσεις φόρτισης και έχουν την μορφή [1]:

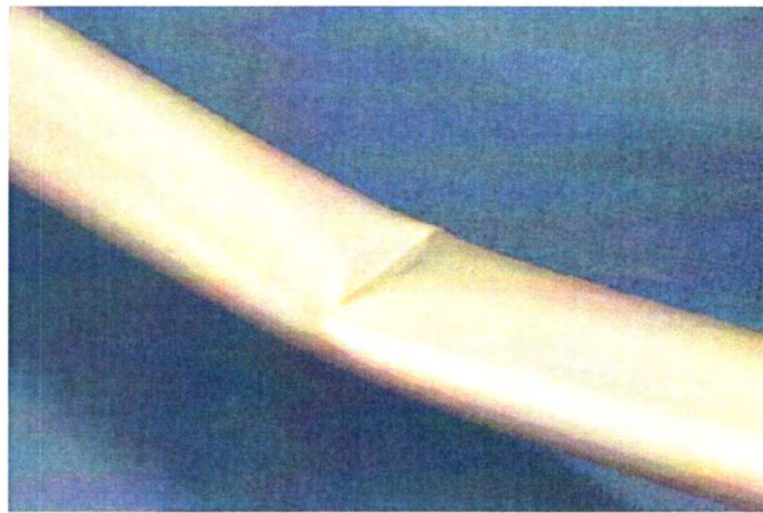
$$M_0 = \sigma_y D_0^2 t \text{ (παράμετρος αδιαστοποίησης της ροπής)}$$

$$k_1 = \frac{t}{D_0^2} \text{ (παράμετρος αδιαστοποίησης της καμπυλότητας)}$$

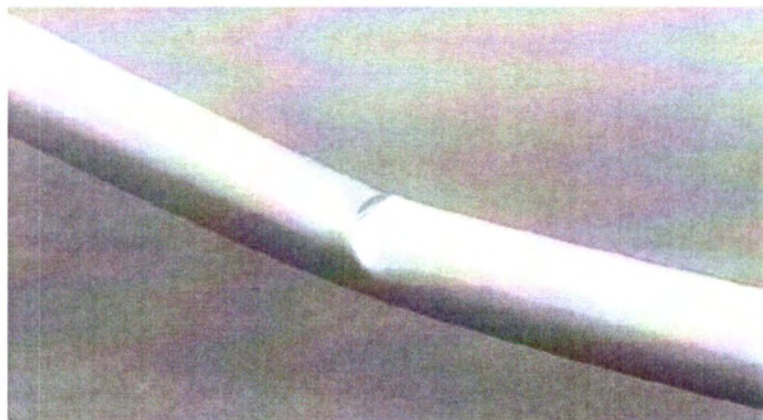
(3.1)



(a)

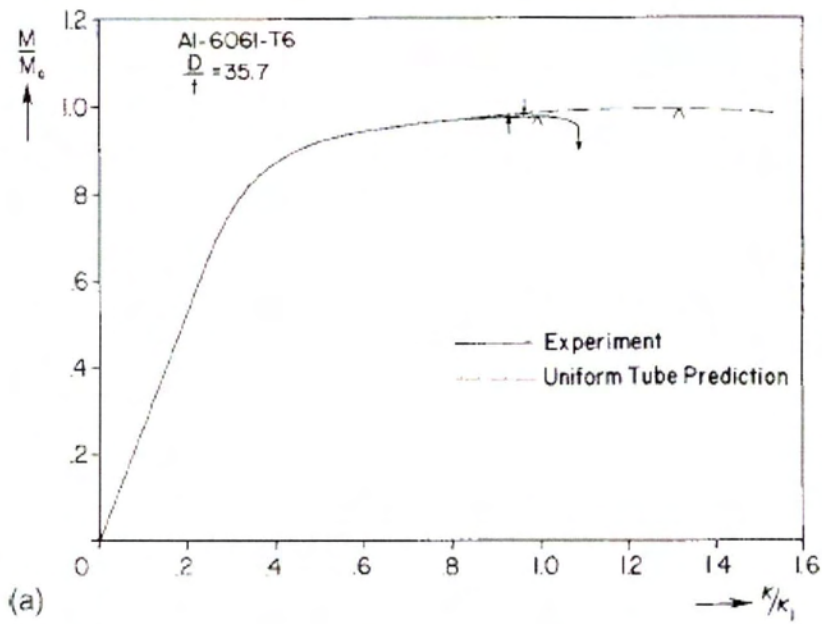


(b)

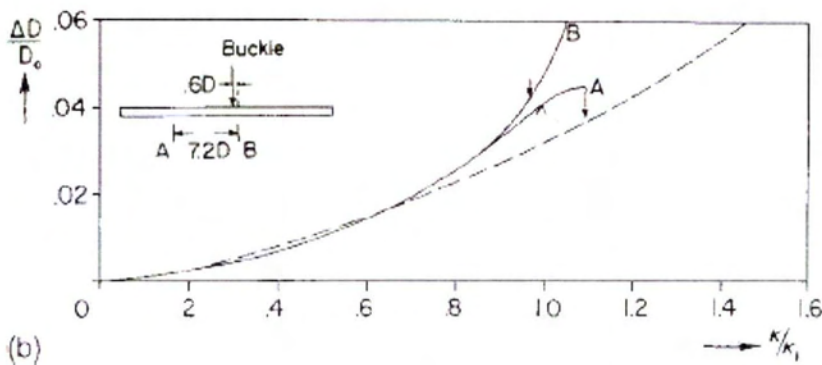


(c)

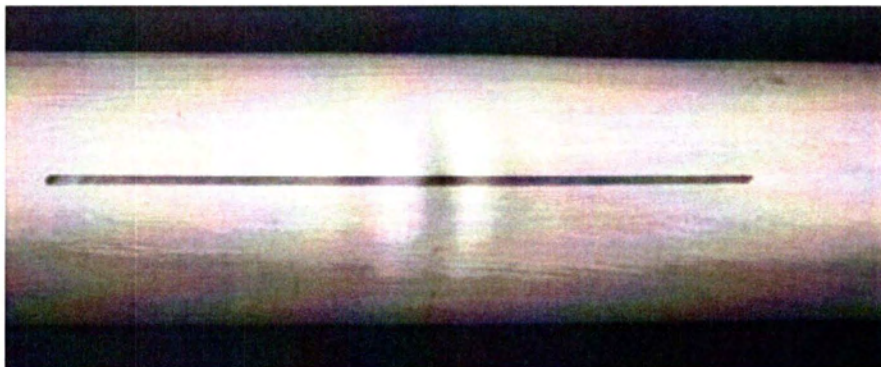
Σχήμα 3.3 Παραδείγματα από μορφές κατάρρευσης υπό καθαρή κάμψη: (a) *diffuse local collapse* για χαμηλούς λόγους D/t , (b) δημιουργία τοπικής πτύχωσης (*local kink*) κατά την κατάρρευση για ενδιάμεσες τιμές D/t και (c) μορφή κατάρρευσης *diamond-mode* για υψηλούς λόγους D/t . (Kyriakides, S., Corona, E. (2007)).



(a)



(b)



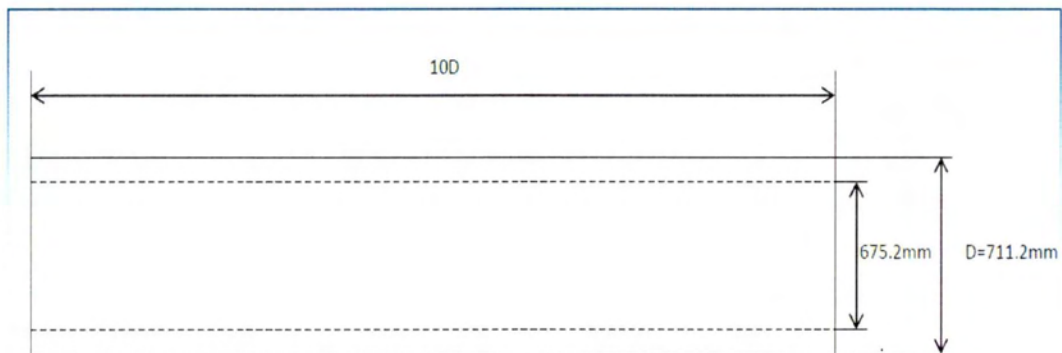
(c)

Σχήμα 3.4 Πειραματικά και αναλυτικά αποτελέσματα σε σωλήνα υπό κάμψη με υλικό Al-6061-T6 λόγω $D/t=35.7$: (a) ροπή-καμπυλότητα (b) οβαλότητα-καμπυλότητα και (c) μορφή κυματισμών που δημιουργήθηκαν σε σωλήνα υλικού Al-6061-T6 ($D/t=36.1$) με επακόλουθη δημιουργία τοπικής πτύχωσης (κατάρρευση) του σχήματος 3.3(b). (Kyriakides, S., Corona, E. (2007)).

3.2 Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων δακτυλίων πεπερασμένου μήκους

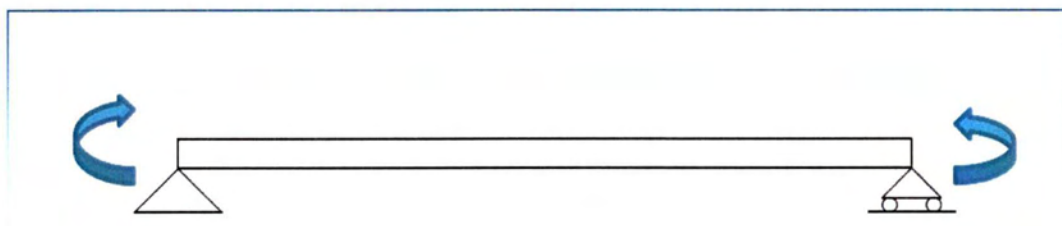
Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με την περιγραφή του προβλήματος της καθαρής κάμψης καθώς και την μοντελοποίηση του σε υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (Abaqus) χρησιμοποιώντας τρισδιάστατη ανάλυση μέσω μοντελοποίησης κυλινδρικού κελύφους πεπερασμένου μήκους.

Το πρόβλημα που θα μοντελοποιηθεί έχει τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά σύμφωνα με το σχήμα 3.5. Δηλαδή, διάμετρο $D=711.2$ mm, πάχος $t=18$ mm και μήκος $10D$ ($L=7112$ mm).



Σχήμα 3.5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σωλήνα προβλήματος.

Εκτός, από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός προβλήματος υπάρχουν και οι απαραίτητες συνοριακές συνθήκες. Το πρόβλημα που περιγράφεται στην παράγραφο αυτή είναι η υποβολή κάμψης στα δύο άκρα του σωλήνα με την μία άκρη του να συμπεριφέρεται ως άρθρωση και την άλλη να συμπεριφέρεται ως κύλιση (σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6 Συνοριακές συνθήκες προβλήματος.

Στην προσομοίωση του προβλήματος εισάγονται ως αρχική ατέλεια μικρού μεγέθους κυματισμοί πτύχωσης (wrinkles), διότι δεν υπάρχει τέλειος σωλήνας χωρίς κάποια μορφή ατέλειας. Η ύπαρξη ατελειών όπως παραμένουσες τάσεις ή ανισοτροπία ενδέχεται να επιφέρουν αρχικές πτυχώσεις πράγμα που καθιστά την χρήση τους απαραίτητη σε αρχικό στάδιο για την εξαγωγή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων.

3.2.1 Δημιουργία κυματισμών πτύχωσης (wrinkles)

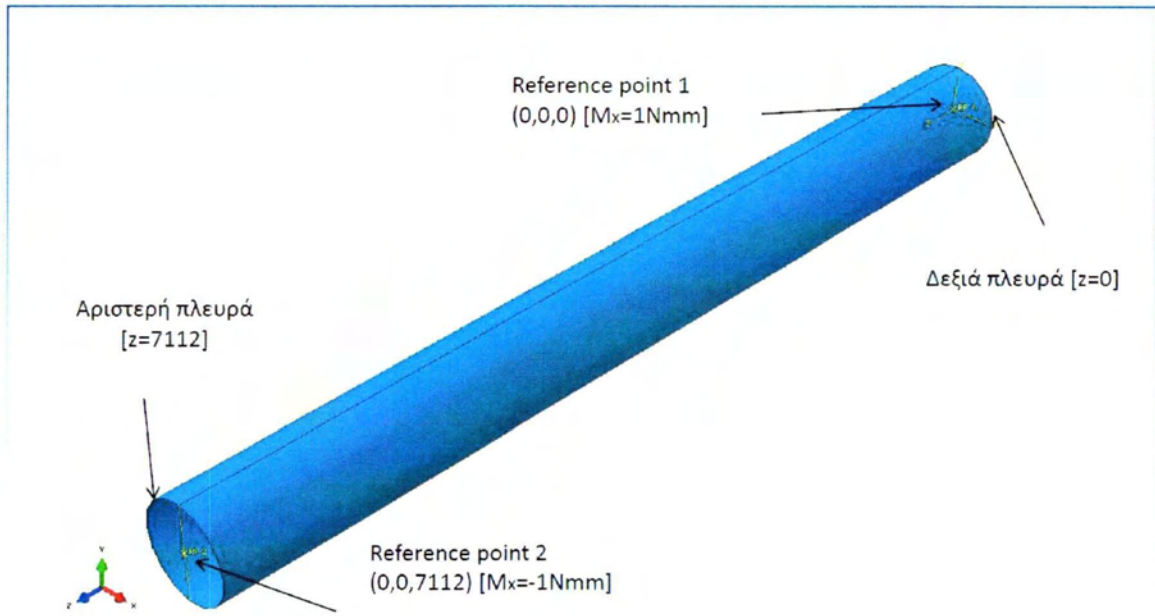
Στην διαδικασία αυτή αναζητείται μία κατάλληλη συνάρτηση για την περιγραφή των κυματισμών πτύχωσης σαν αρχική ατέλεια στον σωλήνα. Δημιουργείται ένα μοντέλο το οποίο θα έχει την ίδια μορφή με αυτό που θα υποβληθεί σε κάμψη καθώς και με τις ίδιες συνοριακές συνθήκες, με την μόνη διαφορά ότι το υλικό τίθεται αποκλειστικά ελαστικό και δίνεται μία σταθερή μοναδιαία ροπή.

Συγκεκριμένα, δημιουργείται η γεωμετρία με έναν τέλειο σωλήνα πάχους 18 mm, διαμέτρου 711.2 mm και μήκους 7112 mm ($L=10D$). Έπειτα, ορίζεται το υλικό ελαστικό με $E=205$ GPa και $\nu=0.3$. Δημιουργείται στη συνέχεια ένα βήμα μέσω της εντολής “step” και με την εντολή “Buckle” εξάγονται ως αποτέλεσμα οι 5 πρώτες ιδιομορφές. Με την εντολή “Interaction” συνδέονται τα σημεία των ακριανών πλευρών με δύο διαφορετικά σημεία αναφοράς (reference points) που βρίσκονται στο κέντρο των πλευρών (σχήμα 3.7). Με αυτό τον τρόπο δεσμεύονται οι κόμβοι των ακραίων πλευρών να συμπεριφέρονται σαν τα σημεία αναφοράς, καθότι σε αυτά ασκείται μοναδιαία ροπή και αντίθετου πρόσημου για να προκύψει η ιδιομορφή που ζητείται. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως η ροπή ασκείται πάντα κάθετα στον άξονα περιστροφής του σωλήνα μέσω της εντολής “Follow nodal rotation”. Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος φαίνονται στον πίνακα 3.1. Στη συνέχεια δημιουργείται το πλέγμα με στοιχεία τετρα-κομβικά και μειωμένης ολοκλήρωσης (S4R). Κατά μήκος θεωρούνται 300 στοιχεία, ενώ κατά την περιφέρεια 75 στοιχεία.

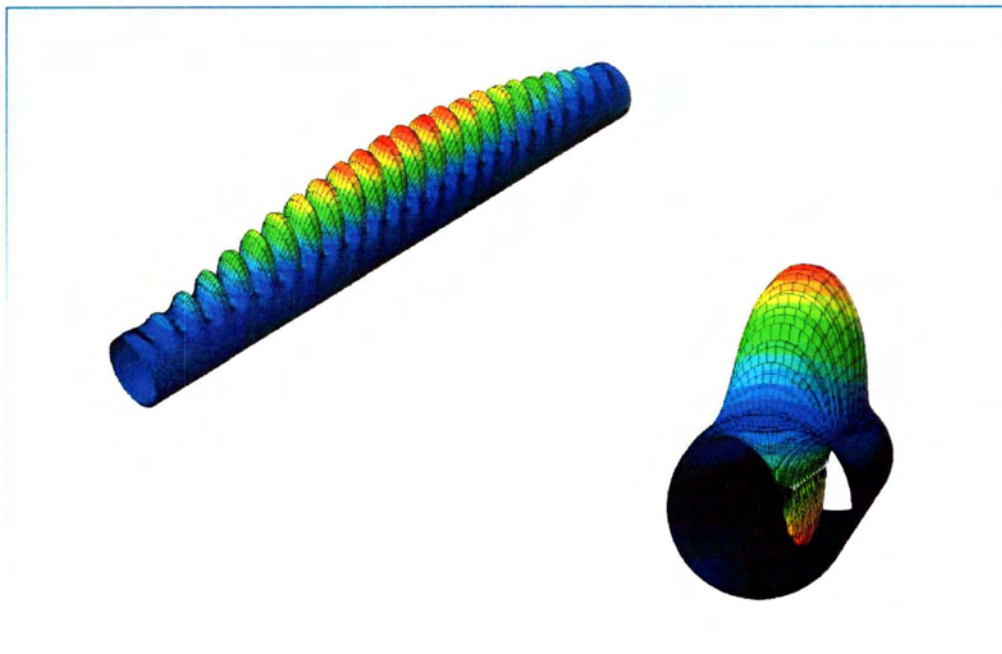
Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η μορφή της ιδιομορφής που προκύπτει από την παραπάνω διαδικασία.

| | Reference Point 1 (0,0,7112) | Reference Point 2 (0,0,0) |
|----------------------------|---|---|
| Boundary conditions | | |
| Kinematic coupling | Kin1: Δέσμευση όλων των κόμβων της αριστερής πλευράς $Z=7112$ εκτός από το $UR1 \neq 0$ | Kin2: Δέσμευση όλων των κόμβων της δεξιάς πλευράς $Z=0$ εκτός από το $UR1 \neq 0$ και $U3 \neq 0$ |

Πίνακας 3.1 Συνοριακές συνθήκες μοντέλου.



Σχήμα 3.7 Παρουσίαση γεωμετρίας προβλήματος.



Σχήμα 3.8 Ιδιομορφή για την δημιουργία "wrinkles".

3.2.2 Δημιουργία τελικού μοντέλου με αρχική ατέλεια wrinkles

Δημιουργώντας την ιδιομορφή από τους κυματισμούς πτύχωσης, προκύπτουν οι μετατοπίσεις από όλους τους κόμβους προς όλους τους άξονες, δηλαδή U1,U2,U3. Επομένως, έχοντας τις συντεταγμένες του τέλειου σωλήνα όλων των κόμβων (όπως παραπάνω) προς όλους τους άξονες, δηλαδή X,Y,Z, δημιουργείται γεωμετρία σωλήνα με αρχική ατέλεια "wrinkles" προσθέτοντας τις συντεταγμένες των κόμβων σε κάθε άξονα ξεχωριστά του τέλειου σωλήνα με το γινόμενο της μετατόπισης αυτών στον ίδιο άξονα των συντεταγμένων (πού προκύπτουν από την ιδιομορφή) με ένα συντελεστή που προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του w/t με το t=18mm (όπου w η μέγιστη τιμή του ύψους των "wrinkles") (σχήμα 3.9(α)). Για παράδειγμα αν w/t=0.1 τότε ο συντελεστής ισούται με 1.8.

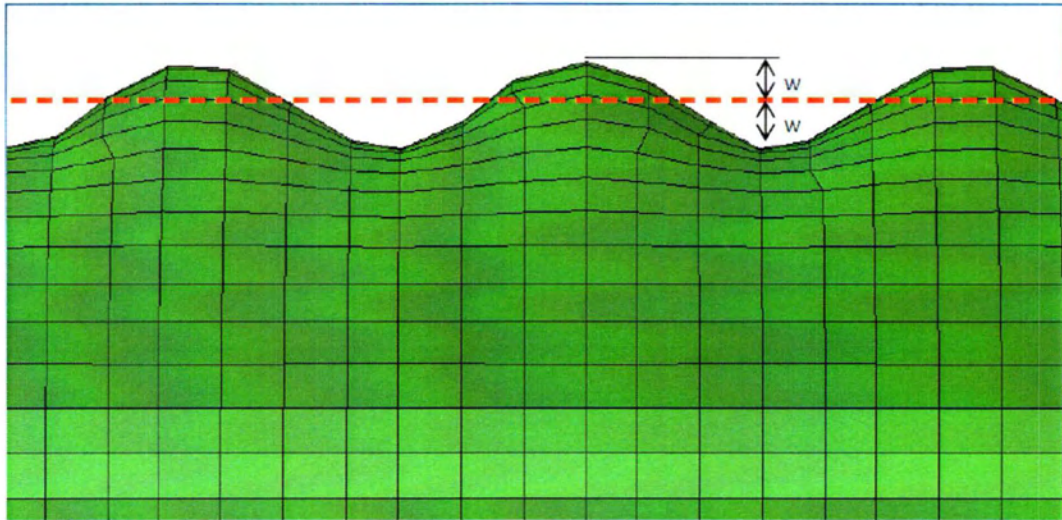
Οι συντεταγμένες του τελικού μοντέλου με αρχική ατέλεια κυματισμών πτύχωσης (wrinkles) θα είναι:

$$\begin{aligned} X'(\text{νέο}) &= x(\text{συντεταγμένη τέλειου σωλήνα}) + U1(\text{μετατόπιση κατά τον X-άξονα}) * w \\ Y'(\text{νέο}) &= y(\text{συντεταγμένη τέλειου σωλήνα}) + U2(\text{μετατόπιση κατά τον Y-άξονα}) * w \\ Z'(\text{νέο}) &= z(\text{συντεταγμένη τέλειου σωλήνα}) + U3(\text{μετατόπιση κατά τον Z-άξονα}) * w \end{aligned}$$

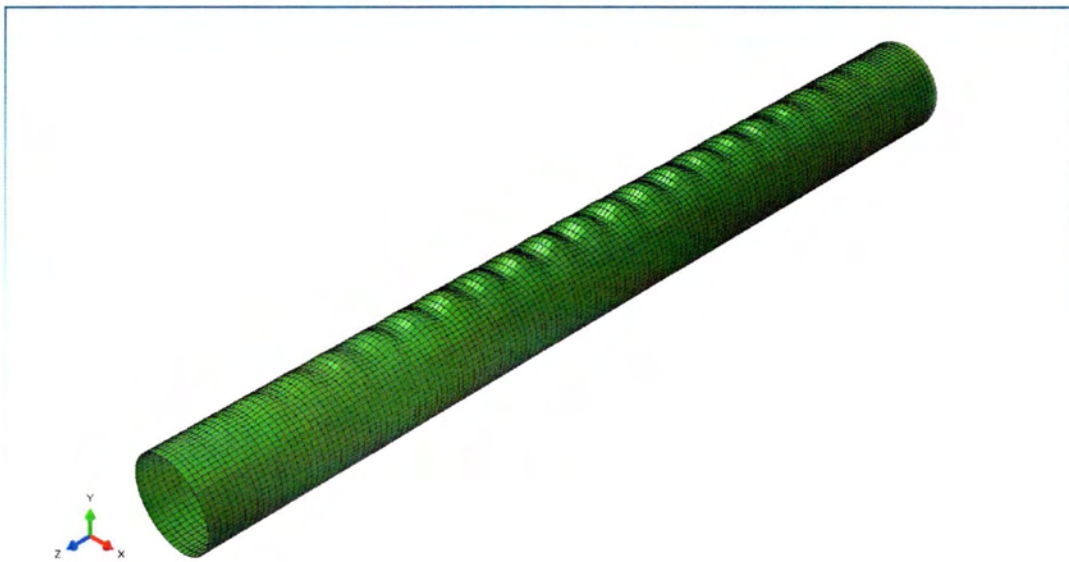
$$\text{όπου } w = \frac{w}{t} t \quad (3.2)$$

Η κατασκευή του τελικού μοντέλου, είναι όμοια με το μοντέλο που κατασκευάστηκε για την εύρεση της ιδιομορφής. Δημιουργείται ένας τέλειος σωλήνας με την ίδια γεωμετρία που αναφέρθηκε παραπάνω, στον οποίο πλέον δίνονται χαρακτηριστικά ελαστοπλαστικού υλικού X70 με βάση τον πίνακα 2.2 θέτοντας τις τιμές για την πλαστική περιοχή του υλικού μέσω της πραγματικής τάσης και της λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης. Δημιουργείται η σύνδεση των σημείων αναφοράς με τους κόμβους των ακραίων διατομών του σωλήνα όπως αναφέρθηκε και έπειτα ορίζεται ένα βήμα με την εντολή "Static, Riks" για φόρτιση ροπής (εντολή "Moment"). Θέτονται οι ίδιες συνοριακές συνθήκες όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1 και επιλέγεται η ροπή στα άκρα να έχει μέτρο (Magnitude) 10^6 Nmm ή 1 kNm και να είναι πάντα κάθετη στον άξονα περιστροφής, έτσι ώστε η ροπή να δίνεται από την σχέση $M = LPF * I$.

Δημιουργώντας αυτό το αρχείο, μέσω του αρχείου Input γίνεται αντικατάσταση των αρχικών συντεταγμένων με τις συντεταγμένες που υπολογίστηκαν μέσω των σχέσεων (3.2). Επομένως το μοντέλο παίρνει αρχικά την μορφή του σχήματος 3.9(b). Στο σχήμα 3.10 φαίνεται η μορφή κατάρρευσης του μοντέλου για w/t=0.1. Είναι εμφανές πώς ταιριάζει πολύ με την μορφή κατάρρευσης του σχήματος 3.3(b) (μορφή "localized kinking").



(a)

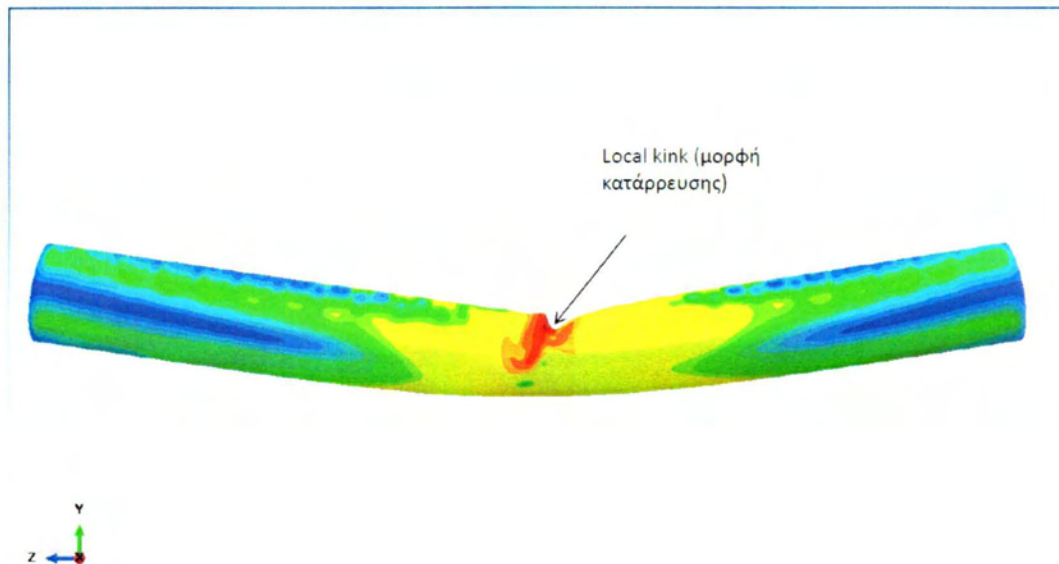


(b)

Σχήμα 3.9 Μοντέλο με αρχική ατέλεια κυματισμών πτύχωσης.

3.3 Αριθμητικά αποτελέσματα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται σειρά αριθμητικών αποτελεσμάτων από πειράματα σε κυλινδρικό κέλυφος για υλικό X70, διαμέτρου $D=711.2$ mm, πάχους $t=18$ mm και μήκους $L=10D$ (7112mm). Θα μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά των αγωγών σε καθαρή κάμψη καθώς και η επιρροή των κυματισμών πτύχωσης ως ατέλεια σε έναν σωλήνα.



Σχήμα 3.10 Μορφή κατάρρευσης (τοπική πτύχωση ή Local kink) υλικού X70 διαμέτρου $D=711.2\text{mm}$, πάχους 18mm και μήκους $10D$ για $w/t=0.1$.

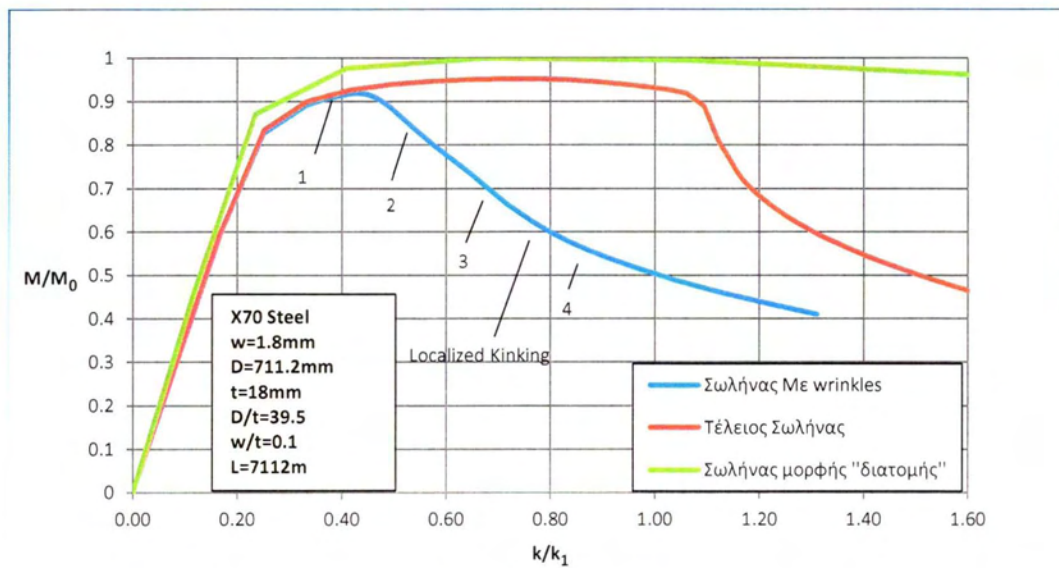
3.3.1 Μηχανική συμπεριφορά αγωγών υλικού X70 σε κάμψη

Στην παράγραφο αυτή αναλύεται η μηχανική συμπεριφορά αγωγού από υλικό X70 με τα τεχνικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω κατά την διάρκεια της φόρτισης σε καθαρή κάμψη, μέσω διαγραμμάτων και εικόνων (σχήμα 3.5). Η ανάλυση περιλαμβάνει 3 στάδια. Στο πρώτο γίνεται υπολογιστική ανάλυση σε σωλήνα με αρχική ατέλεια κυματισμών πτύχωσης με $w/t=0.1$ (δηλαδή το μέγεθος του μέτρου της ατέλειας είναι 1.8mm), στο δεύτερο πραγματοποιείται ανάλυση για τέλειο σωλήνα ίδιας γεωμετρίας. Στο τρίτο παρουσιάζονται προβλέψεις από τα αποτελέσματα τυποποιημένου υπολογιστικού αρχείου Abaqus, μοντέλου σωλήνα μορφής “διατομής” που συμπεριφέρεται σαν την διατομή ενός μεγάλου μήκους σωλήνα (περισσότερα για την διδιάστατη ανάλυση βλέπε παρ. 4.4). Στο σχήμα 3.11(a) παρουσιάζεται κανονικοποιημένο διάγραμμα ροπής - καμπυλότητας για τα τρία στάδια ανάλυσης. Όμοια, στο σχήμα 3.11(b) παρουσιάζεται κανονικοποιημένο διάγραμμα οβαλότητας - καμπυλότητας για τέλειο σωλήνα, ατελή σωλήνα με “wrinkles” και σωλήνα μορφής “διατομής”. Στο 3.11 (c) παρουσιάζονται οι μορφές του σωλήνα στις διάφορες θέσεις του διαγράμματος 3.11(a) που σημειώθηκαν.

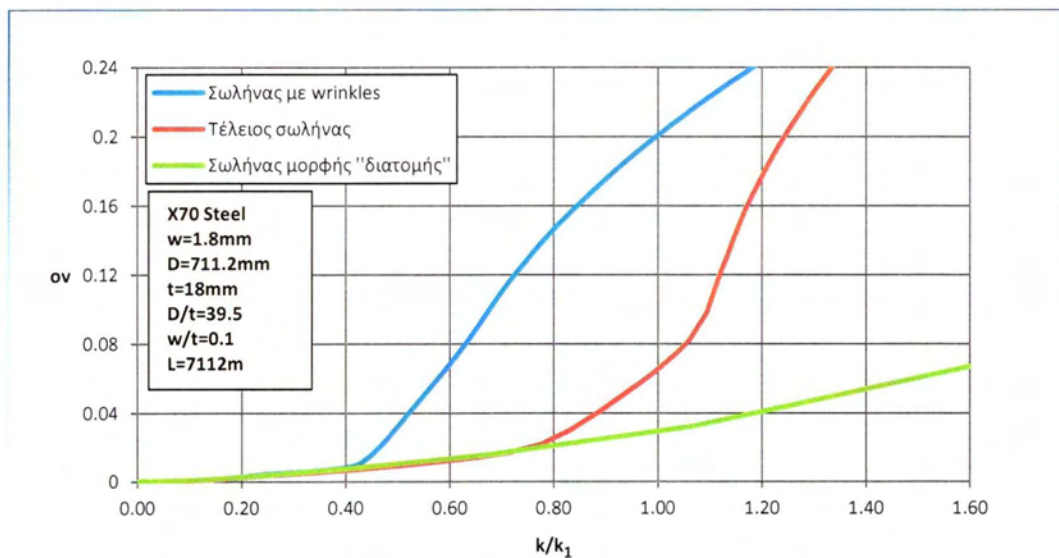
Μετά από προσεκτική ανάλυση των αποτελεσμάτων (σχήμα 3.11(a), 3.11(b), 3.11(c)) φαίνεται πώς τα αποτελέσματα συμπίπτουν με την θεωρία που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 3.1 για σωλήνες με υψηλές τιμές λόγων D/t , καθώς κατά την κατάρρευση αποκτούν μορφή “local kinking” (τοπική πτύχωση). Αυτό είναι μία καλή ένδειξη για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων.

Επίσης, προσεκτική παρατήρηση στο σχήμα 3.11(a) δείχνει πώς η ύπαρξη

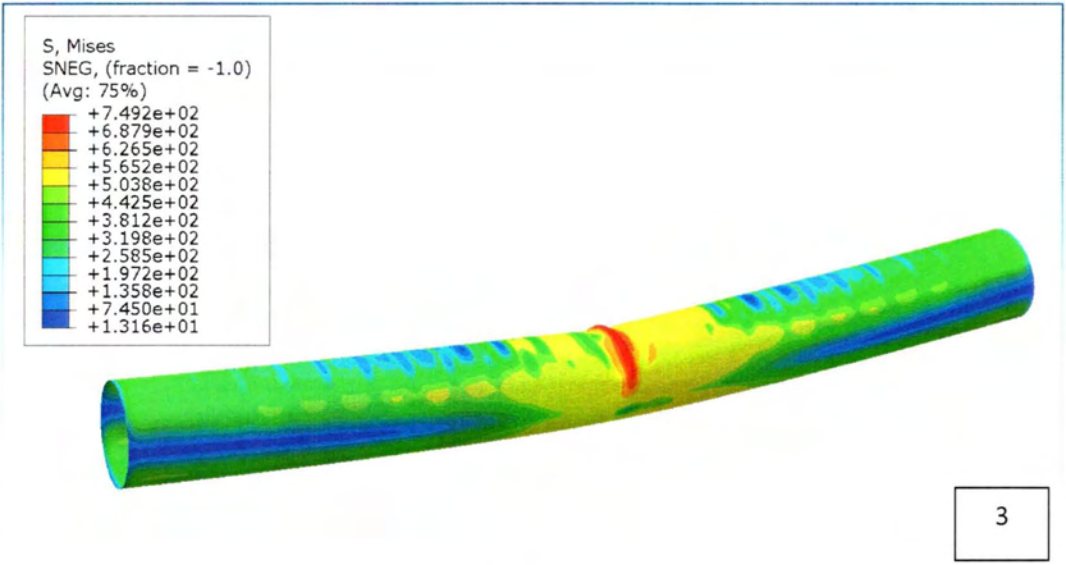
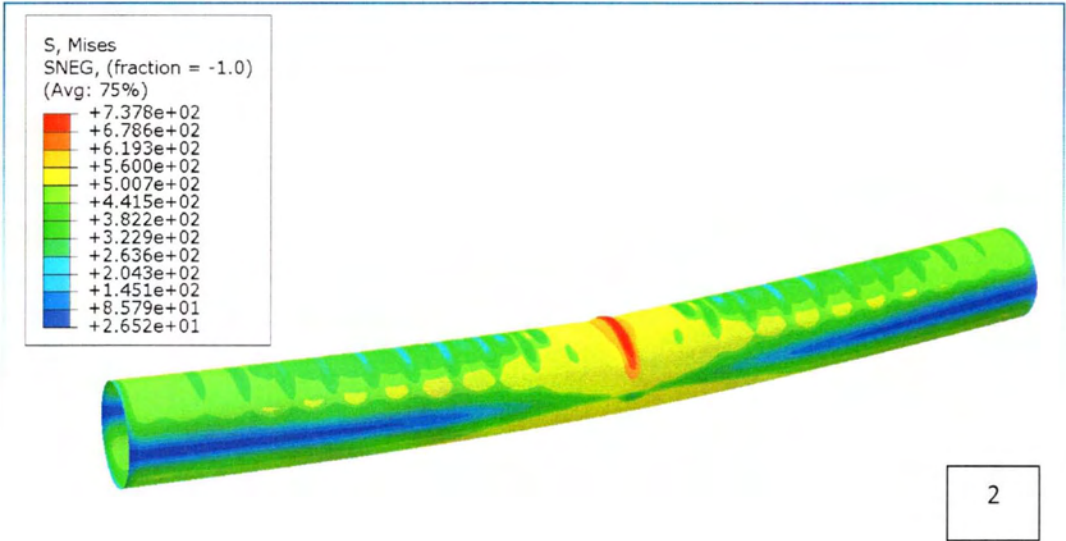
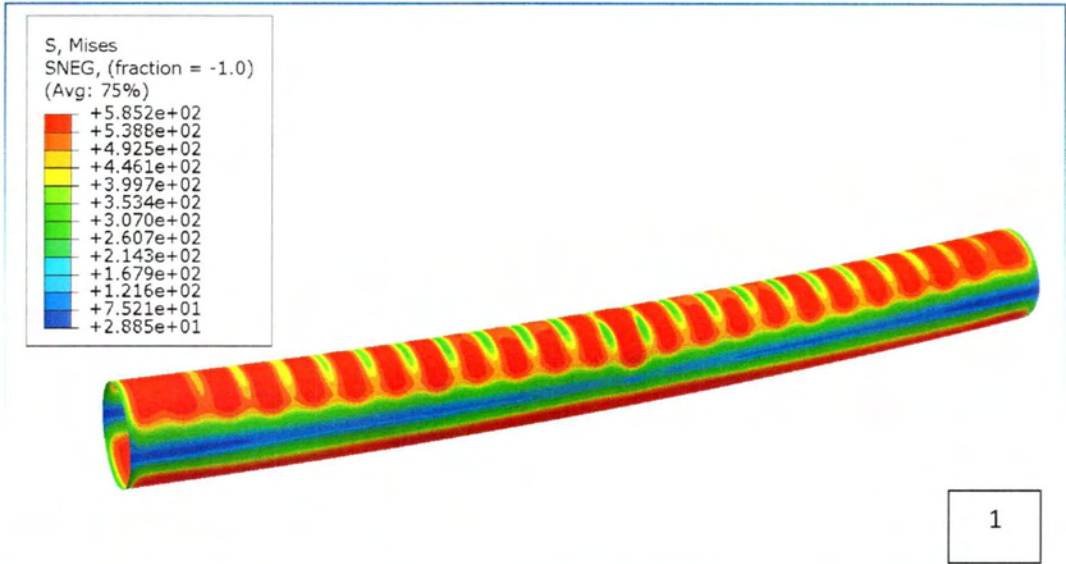
κυματισμών πτύχωσης σε έναν σωλήνα ως αρχική γεωμετρική ατέλεια βοηθάει στην εξαγωγή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων. Οι τέλει σωλήνες, εκτός από την απαίτηση μεγάλου υπολογιστικού χρόνου, δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα λόγω του ότι παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε μεγάλες καμπυλότητες (για υψηλούς λόγους D/t), κάτι που δεν συμβαίνει ακόμα και για μικρές τιμές ατελειών "wrinkles". Τέλος, η ανάλυση κάμψης σωλήνα με τυποποιημένο μοντέλο σωλήνα μορφής "διατομής" φαίνεται πως αποτελεί μια απλουστευμένη και σύντομη προσέγγιση του αποτελέσματος παρουσιάζοντας μεγάλη αντοχή για μεγάλες καμπυλότητες, κάτι που δικαιολογείται από το μεγάλο "πλατό" που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.11(a).

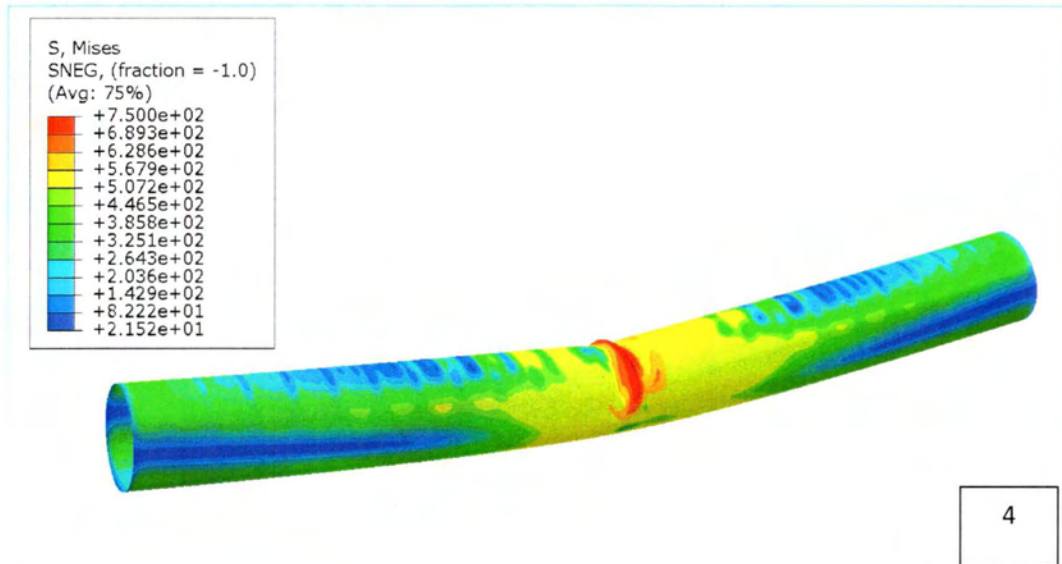


(a)



(b)





(c)

Σχήμα 3.11 Προλυσισμική και μετάλυσισμική συμπεριφορά από σωλήνα υλικού X70 με λόγο $D/t=39.5$ και $w/t=0.1$: (a) Ροπή-καμπυλότητα, (b) οβαλότητα-καμπυλότητα στις διατομές όπου έχουμε πρώτα κατάρρευση και (c) ακολουθία από σχηματισμούς κατά την εξέλιξη του πειράματος της κάμψης με βάση το σχήμα 3.11(a) μέχρι δημιουργίας τοπικής πτύχωσης (kink).

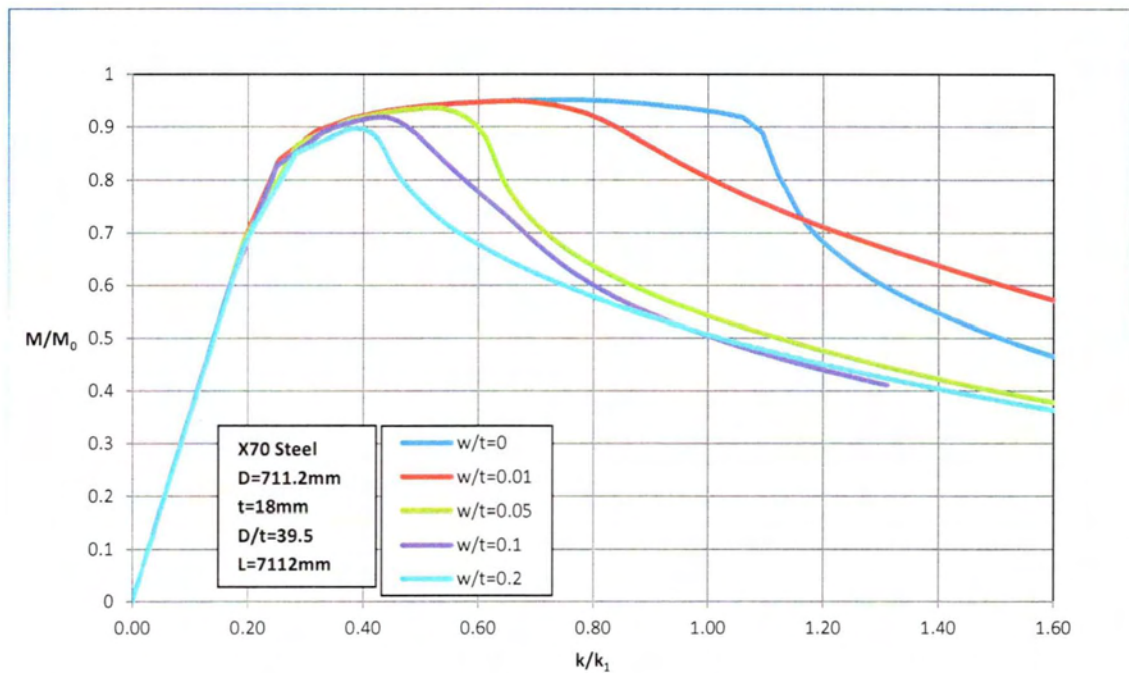
3.3.2 Επιρροή αρχικών κυματισμών πτύχωσης (wrinkles) στην αντοχή

Η μελέτη της επιρροής των αρχικών κυματισμών πτύχωσης (“wrinkles”) στην αντοχή αγωγού υπό καθαρή κάμψη πραγματοποιείται σε σωλήνα υλικού X70, διαμέτρου $D=711.2$ mm, πάχους $t=18$ mm και μήκους $L=10D$ ($=7112$ mm) για διαφορετικές τιμές αρχικής ατέλειας τύπου “wrinkles” σε κανονικοποιημένο διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται εικόνες κατά την κατάρρευση των σωλήνων για κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Στο σχήμα 3.13 και 3.14 φαίνεται η επιρροή του μεγέθους των αρχικών κυματισμών πτύχωσης (wrinkles) στην μεταβολή της μέγιστης τιμής της, καθώς και μία αναλυτική προσέγγιση της μεταβολής αυτής μέσω της σχέσης (3.1),

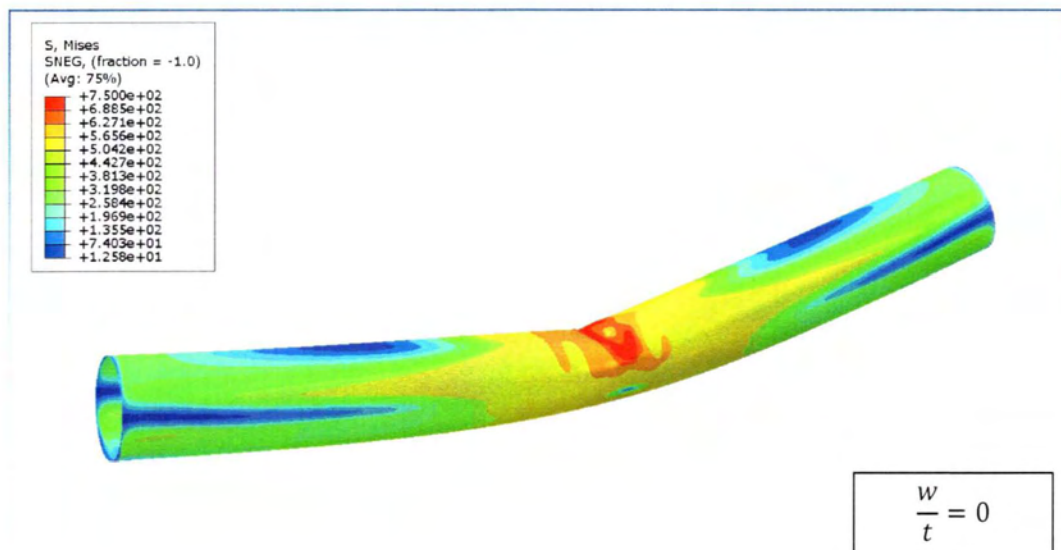
$$\frac{M_{max}}{M_{max,0}} = 1 - c \left(\frac{w}{t}\right)^n \quad (3.3)$$

όπου M_{max} είναι το μέγιστο φορτίο κάμψης, $M_{max,0}$ είναι το μέγιστο φορτίο κάμψης για $w/t=0$ (τέλειος σωλήνας), με τις σταθερές $c=0.3$ και $n=0.762$.

Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί πώς η μείωση της μέγιστης ροπής της κάμψης μπορεί να είναι μικρή όταν αυξάνεται το μέγεθος των κυματισμών πτύχωσης, αλλά αυτό οδηγεί σε επίσπευση του οριακού φορτίου κάμψης (οριακή κατάσταση κατασκευής), κάτι που μειώνει την αντοχή του σωλήνα σε περαιτέρω αύξηση της καμπυλότητας και οδηγεί πιο σύντομα σε φαινόμενα κατάρρευσης.

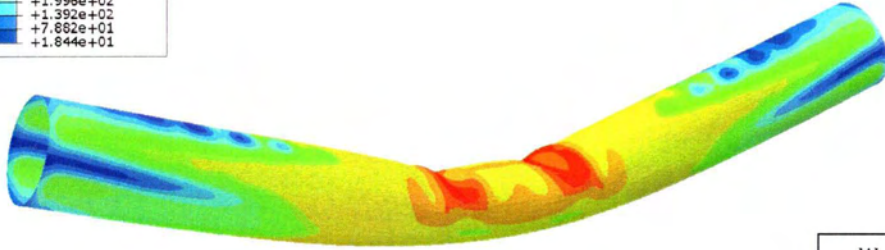


(a)



S, Mises
 SNEG, (fraction = -1.0)
 (Avg: 75%)

| | |
|---|-----------|
| + | 7.430e+02 |
| + | 6.826e+02 |
| + | 6.223e+02 |
| + | 5.619e+02 |
| + | 5.015e+02 |
| + | 4.411e+02 |
| + | 3.807e+02 |
| + | 3.204e+02 |
| + | 2.600e+02 |
| + | 1.996e+02 |
| + | 1.392e+02 |
| + | 7.882e+01 |
| + | 1.844e+01 |



$$\frac{w}{t} = 0.01$$

S, Mises
 SNEG, (fraction = -1.0)
 (Avg: 75%)

| | |
|---|-----------|
| + | 7.500e+02 |
| + | 6.902e+02 |
| + | 6.305e+02 |
| + | 5.708e+02 |
| + | 5.106e+02 |
| + | 4.508e+02 |
| + | 3.910e+02 |
| + | 3.311e+02 |
| + | 2.713e+02 |
| + | 2.114e+02 |
| + | 1.516e+02 |
| + | 9.175e+01 |
| + | 3.191e+01 |



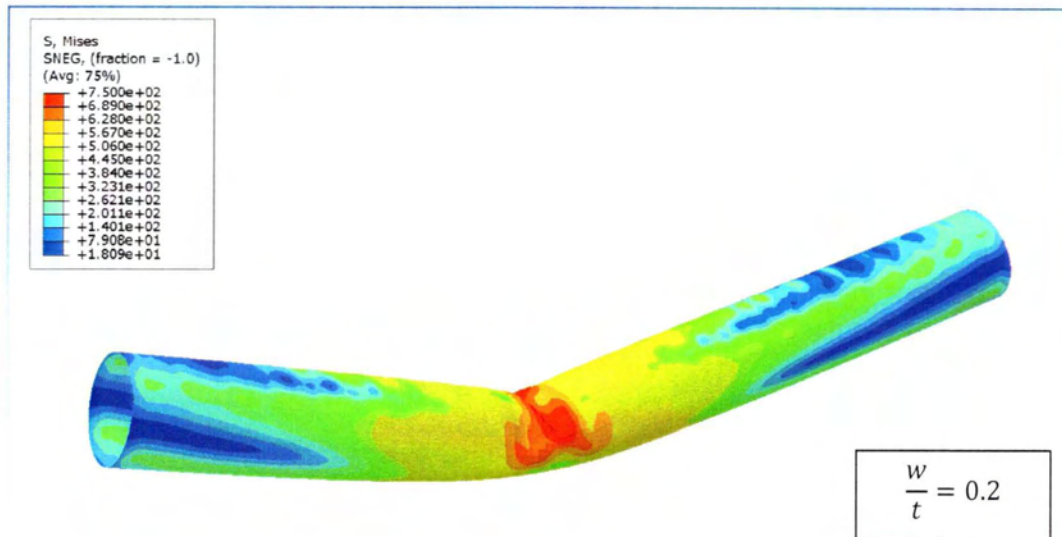
$$\frac{w}{t} = 0.05$$

S, Mises
 SNEG, (fraction = -1.0)
 (Avg: 75%)

| | |
|---|-----------|
| + | 7.500e+02 |
| + | 6.892e+02 |
| + | 6.284e+02 |
| + | 5.676e+02 |
| + | 5.067e+02 |
| + | 4.459e+02 |
| + | 3.851e+02 |
| + | 3.243e+02 |
| + | 2.635e+02 |
| + | 2.027e+02 |
| + | 1.419e+02 |
| + | 8.105e+01 |
| + | 2.024e+01 |

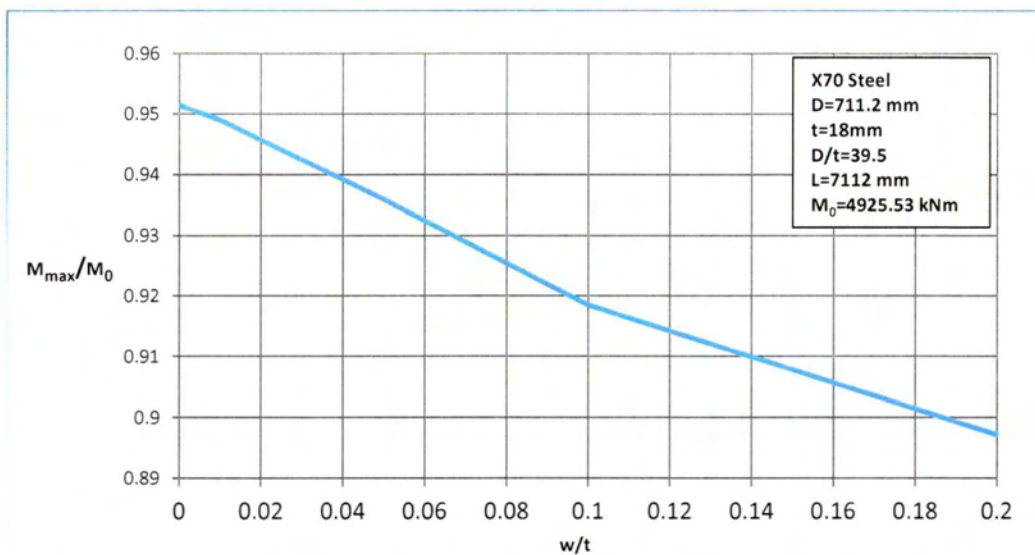


$$\frac{w}{t} = 0.1$$

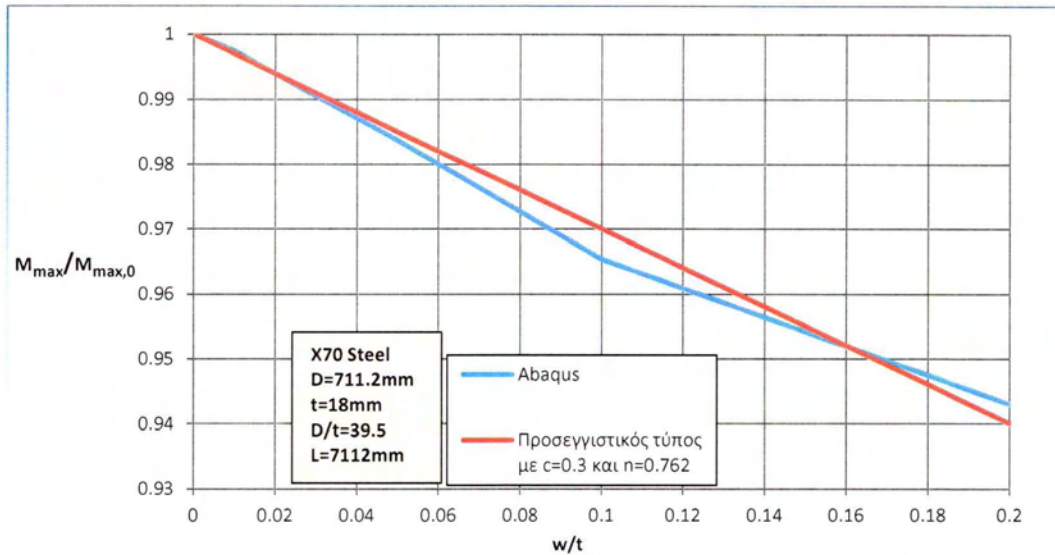


(b)

Σχήμα 3.12 (α) Κανονικοποιημένο διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας για διάφορες τιμές μεγέθους των κυματισμών πτύχωσης (wrinkles) και (β) μορφές κατάρρευσης για κάθε μέγεθος αρχικών κυματισμών πτύχωσης.



Σχήμα 3.13 Κανονικοποιημένο διάγραμμα μεταβολής της οριακής τιμής της κάμψης για τιμές αρχικής ατέλειας "wrinkles".



Σχήμα 3.14 Αναλυτική προσέγγιση της μεταβολής της οριακής τιμής κάμψης κανονικοποιημένη με την οριακή τιμή της κάμψης για $w/t=0$ (τέλειος σωλήνας) συναρτήσει του μεγέθους των αρχικών κυματισμών πτύχωσης.

3.4 Συμπεράσματα

1. Η καμπτική απόκριση ενός σωλήνα στην ανελαστική περιοχή παραμόρφωσης διαφοροποιείται από την απόκριση μίας κοινής ανελαστικής δοκού, λόγω της οβαλοποίησης των διατομών [1]. Η αύξηση της οβαλότητας προκαλεί μία σταδιακή μείωση στην καμπτική ακαμψία του σωλήνα, προκαλώντας την εμφάνιση του οριακού φορτίου κάμψης και την επακόλουθη κατάρρευση του με διάφορες μορφές (“diffuse local ovalization”, “local kinking”, “diamond mode”).
2. Το υπό εξέταση κυλινδρικό κέλυφος υλικού X70 λόγου $D/t=39.5$ και μήκους $L=7112$ mm ($=10D$) ως σχετικώς λεπτότοιχο κέλυφος όπως έδειξαν οι αναλύσεις έχει ως οριακή κατάσταση αστοχίας τον λυγισμό, αφού ο λυγισμός στην περίπτωση αυτή προηγείται του οριακού φορτίου κάμψης, που υφίσταται μέσω της ύπαρξης γεωμετρικής ατέλειας κυματισμών πτύχωσης.
3. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το υπό εξέταση κυλινδρικό κέλυφος, αστοχεί με την μορφή “local kinking” (μορφή τοπικής πτύχωσης) κάτι που πιστοποιεί το αποτέλεσμα με την αναφορά που πραγματοποιήθηκε για σχετικώς υψηλές τιμές λόγου D/t .
4. Η ύπαρξη ατελειών “wrinkles” (κυματισμών πτύχωσης) οδηγεί σε μείωση της αντοχής ενός σωλήνα υπό καθαρή κάμψη. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της ατέλειας τόσο μικρότερη είναι η τιμή του οριακού φορτίου κάμψης (σχήμα 3.13). Ενδεικτικά, για αύξηση 1% στο μέγεθος του μέτρου των “wrinkles” υπάρχει ακόλουθη μείωση 3.61% στην τιμή του οριακού φορτίου κάμψης.

5. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12, για μεγαλύτερα μεγέθη κυματισμών πτύχωσης (για μεγαλύτερους λόγους w/t) η προλυγισμική κατάσταση στην πλαστική ζώνη παραμόρφωσης συρρικνώνεται σημαντικά και έχουμε επίσπευση φαινομένων λυγισμού και κατάρρευσης κάτι που μειώνει την στροφική ικανότητα ενός κυλινδρικού κελύφους σε καθαρή κάμψη.

4. Συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης και κάμψης

Οι αγωγοί υπόκεινται σε κάμψη με την παρουσία εξωτερικής κατά την εγκατάσταση και ακολούθως κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους. Σε μεθόδους εγκατάστασης όπως η μέθοδος S-lay (σχήμα 1.1) κατά την πόντιση του αγωγού στην θάλασσα, με την ύπαρξη ήδη καμπτικών φορτίων από την διαδικασία του Reeling στο πλοίο, ο αγωγός φορτίζεται από εξωτερική πίεση και αξονικά φορτία λόγω της μεταβαλλόμενης συμπεριφοράς του νερού, κυρίως στο επίπεδο της θάλασσας λόγω της ύπαρξης κυμάτων. Όπως φαίνεται στα σχήματα 1.1 και 1.2 δημιουργούνται ζώνες φόρτισης με βάση το βάθος που βρίσκεται ο αγωγός [1].

Δημιουργείται λοιπόν η ανάγκη μελέτης της αντοχής αγωγού σε συνδυασμένη καταπόνηση, κάτι που πραγματεύεται το κεφάλαιο αυτό. Συγκεκριμένα, στην παράγραφο 4.1 περιγράφεται ο λυγισμός και η πλαστική συμπεριφορά αγωγών υπό συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης και κάμψης μέσω πειραμάτων που βοηθούν στην εξοικείωση του αναγνώστη με τους ορισμούς αυτούς. Στην παράγραφο 4.2 αναλύεται ο τρόπος προσομοίωσης του προβλήματος για δύο διαφορετικούς τρόπους φόρτισης, μέσω υπολογιστικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων (Abaqus). Στην παράγραφο 4.3 παρουσιάζονται αποτελέσματα από την μελέτη για συνδυασμένη φόρτιση, σε σωλήνα υλικού X70 με τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην παράγραφο 2.3, ενώ στην παράγραφο 4.4 παρουσιάζονται προβλέψεις που προκύπτουν από απλουστευμένη υπολογιστική ανάλυση (Cross section analysis) καθώς και σύγκριση αυτής με τα πειραματικά αποτελέσματα της παραγράφου 4.3. Τέλος, στην παράγραφο 4.5 εκθέτονται βασικά συμπεράσματα και προτάσεις με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

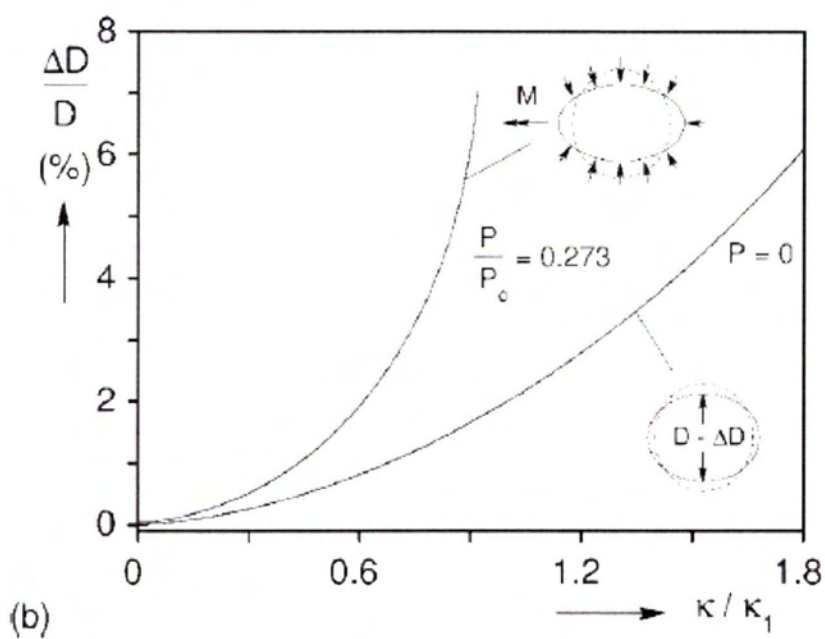
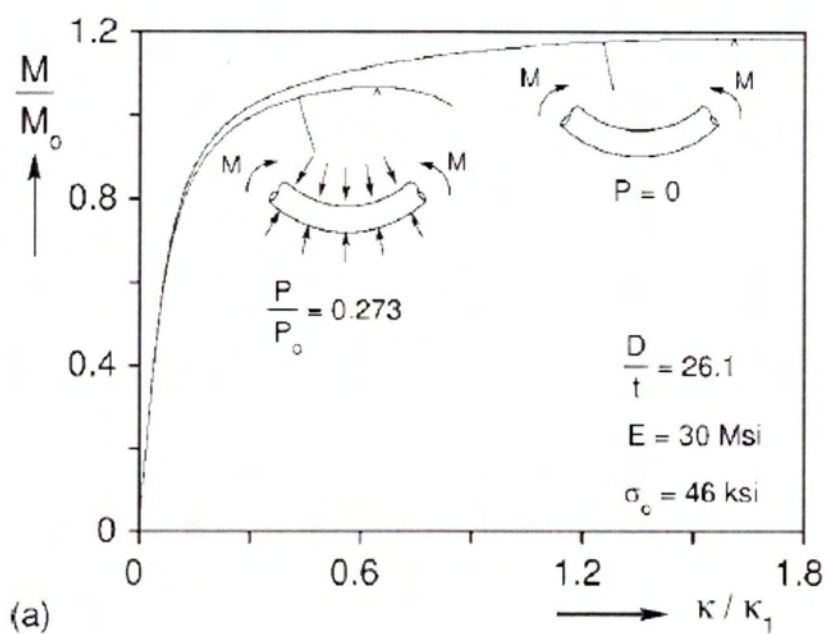
4.1 Λυγισμός και πλαστική συμπεριφορά κυλινδρικών κελυφών σε συνδυασμένη φόρτιση εξωτερικής πίεσης και κάμψης

Το κανονικοποιημένο διάγραμμα ροπής - καμπυλότητας για σωλήνα μεγάλου μήκους και λόγο $D/t=26.1$ που κάμπτεται πλαστικά φαίνεται στο σχήμα 4.1(a) από πειραματικά αποτελέσματα. Η οβάλ μορφή που αναπτύσσεται στην διατομή φαίνεται στο σχήμα 4.1(b). Η ανάπτυξη της προκαλεί μείωση στην καμπτική ακαμψία του σωλήνα, με αποτέλεσμα την εμφάνιση του οριακού φορτίου κάμψης (το οποίο εμφανίζεται στο σχήμα 4.1(a) με τον συμβολισμό (^)). Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, το οριακό φορτίο κάμψης αποτελεί την οριακή κατάσταση της κατασκευής και βρίσκεται εκεί που η ροπή παίρνει την μέγιστη τιμή της. Έπειτα ακολουθούν φαινόμενα κατάρρευσης με την υποβάθμιση της αντοχής του σωλήνα σε κάμψη (μείωση ροπής). Θεωρήστε το ίδιο πείραμα κάμψης σε κυλινδρικό κέλυφος, με την παρουσία όμως εξωτερικής πίεσης $P/P_0=0.273$, όπως φαίνεται στα σχήματα 4.1(a) και 4.1(b) ($P_0=P_y$ (σχέση 2.14)). Η εξωτερική πίεση ενισχύει την ανάπτυξη της οβάλ μορφής που προκαλείται από την κάμψη. Έτσι, προκύπτει ότι η ελαστική περιοχή του διαγράμματος ροπής - καμπυλότητας παραμένει αμετάβλητη με την ύπαρξη της εξωτερικής πίεσης, καθώς η ανάπτυξη της οβάλ μορφής του σωλήνα είναι σχετικά μικρή σε αυτό το κομμάτι. Μεγαλύτερες τιμές ροπής προκαλούν την ανελαστική συμπεριφορά του σωλήνα, οι οποίες επιταχύνουν την οβαλοποίηση όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1(b). Αυτό προκαλεί μείωση της καμπτικής ακαμψίας, με αποτέλεσμα επακόλουθη μείωση στην τιμή του οριακού φορτίου κάμψης και εμφάνιση αυτού σε καμπυλότητα σημαντικά μικρότερη σε σχέση με αυτήν στην καθαρή κάμψη. Σε ακόμα ψηλότερες τιμές πίεσης αυτή η υποβάθμιση στην ροπή και την καμπυλότητα είναι πιο έντονη.

Για λεπτού πάχους σωλήνες (δηλαδή με υψηλό λόγο D/t) σε χαμηλές πιέσεις, εμφανίζεται το φαινόμενο του λυγισμού με την μορφή κυματισμών πτύχωσης. Ο λυγισμός πλέον προηγείται του οριακού φορτίου και έτσι το σημείο αυτό γίνεται η οριακή κατάσταση της κατασκευής, με επακόλουθα φαινόμενα αστοχίας με την μείωση της ροπής. Ο λυγισμός εμφανίζεται κυρίως στην κάμψη με παρουσία χαμηλής εξωτερικής πίεσης (φόρτιση $P \rightarrow k$) [1].

Τα διαγράμματα κανονικοποιούνται με κάποιες τυπικές παραμέτρους που προκύπτουν από τις οριακές καταστάσεις φόρτισης κυλινδρικών κελυφών και έχουν την μορφή [1]:

$$\begin{aligned} P_0 &= P_y = 2\sigma_y \left(\frac{t}{D}\right) \text{ (παράμετρος αδιαστατοποίησης της εξωτερικής πίεσης)} \\ M_0 &= \sigma_y D^2 t \text{ (παράμετρος αδιαστατοποίησης της ροπής)} \\ k_1 &= \frac{t}{D^2} \text{ (παράμετρος αδιαστατοποίησης της καμπυλότητας)} \end{aligned} \tag{4.1}$$



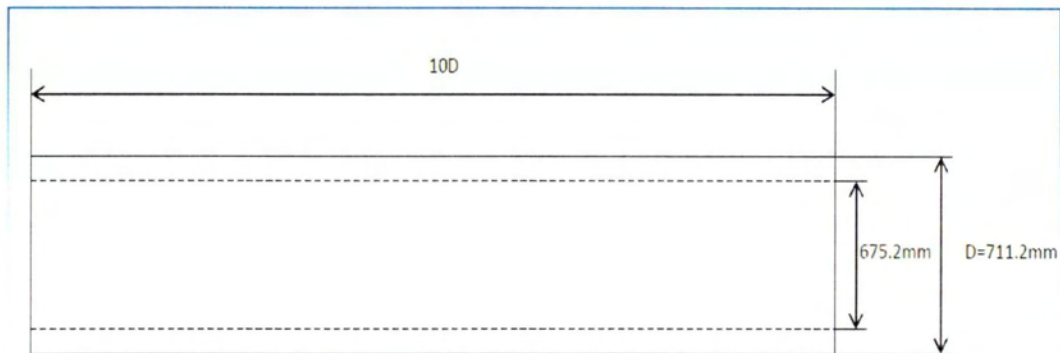
Σχήμα 4.1 Απόκριση σωλήνων σε καθαρή κάμψη και σε κάμψη με παρουσία εξωτερικής πίεσης: (α) ροπή-καμπυλότητα και (β) οβαλότητα-καμπυλότητα (Kyriakides, S., Corona, E. (2007)).

4.2 Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται το πρόβλημα της φόρτισης κυλινδρικού κελύφους σε κάμψη με παρουσία εξωτερικής πίεσης και αναλύεται ο τρόπος προσομοίωσης σε υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (Abaqus). Η

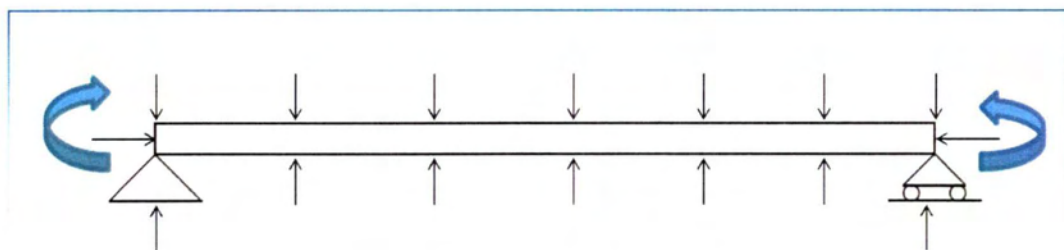
ανάλυση πραγματοποιείται σε 3-D ανάλυση με την δημιουργία κυλινδρικού κελύφους πεπερασμένου μήκους και την επακόλουθη προσθήκη συνοριακών συνθηκών και φορτίων.

Συγκεκριμένα, το πρόβλημα που θα μοντελοποιηθεί έχει τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά σύμφωνα με το σχήμα 4.2. Δηλαδή, διάμετρο $D=711.2\text{ mm}$, πάχος $t=18\text{ mm}$ και μήκος $10D$ ($L=7112\text{ mm}$).



Σχήμα 4.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σωλήνα προβλήματος.

Εκτός από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός μοντέλου πρέπει να αναφερθούν οι συνοριακές συνθήκες που το διέπουν. Το πρόβλημα που περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό είναι η επιβολή κάμψης στα δύο άκρα του σωλήνα με την παρουσία εξωτερικής πίεσης που ασκείται ομοιόμορφα στην περιφερειακή καθώς και στις δύο παράπλευρες επιφάνειες, με την μία άκρη του σωλήνα να συμπεριφέρεται ως άρθρωση και την άλλη ως κύλιση (σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 Συνοριακές συνθήκες προβλήματος.

Το πρόβλημα αναλύεται με δύο τρόπους λόγω των διαφορετικών αποτελεσμάτων που προκύπτει από την κάθε περίπτωση. Στην πρώτη περίπτωση ($P \rightarrow k$) προσομοιώνεται το πρόβλημα σωλήνα, καθορισμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών (σχήμα 4.2) που αναφέρθηκαν παραπάνω και με τις συνοριακές συνθήκες που το διέπουν (σχήμα 4.3),

με την διαδοχική φόρτιση εξωτερικής πίεσης μέχρι μία τιμή και, διατηρώντας την τιμή αυτή σταθερή ασκείται στη συνέχεια ροπή στα άκρα του σωλήνα παρακολουθώντας την απόκριση του κελύφους. Αντίστροφα, στην δεύτερη περίπτωση ($k \rightarrow P$) προσομοιώνεται στο ίδιο μοντέλο αντίστροφη φόρτιση, δηλαδή ασκείται πρώτα καμπυλότητα στα δύο άκρα του σωλήνα μέχρι μία τιμή και, διατηρώντας την τιμή αυτή σταθερή, ασκείται έπειτα ομοιόμορφη εξωτερική πίεση παρακολουθώντας την αντοχή του μοντέλου. Οι δύο αυτές αναλύσεις περιγράφονται παρακάτω.

4.2.1 Μοντελοποίηση προβλήματος φόρτισης $P \rightarrow k$

Στην περίπτωση αυτή με βάση το μοντέλο που περιγράφηκε παραπάνω (σχήμα 4.2 και 4.3) ασκείται ομοιόμορφη εξωτερική πίεση σε όλη την εξωτερική επιφάνεια καθ' όλο το μήκος καθώς και στις παράπλευρες επιφάνειες του σωλήνα μέχρι μία προκαθορισμένη τιμή και έπειτα διατηρώντας σταθερή την εξωτερική πίεση προστίθεται ροπή (ή στροφή) στα δύο άκρα του σωλήνα.

Πιο συγκεκριμένα, δημιουργείται αρχικά η γεωμετρία του προβλήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Ορίζεται ένας τέλειος κυκλικός σωλήνας διαμέτρου $D=711.2$ mm, πάχους $t=18$ mm και μήκους $L=7112$ mm ($L=10D$). Έπειτα, δίνονται χαρακτηριστικά ελαστοπλαστικού υλικού X70 ($E=205$ GPa και $\nu=0.3$), με βάση τον πίνακα 2.2, θέτοντας τις τιμές για την πλαστική περιοχή του υλικού μέσω της πραγματικής τάσης και της λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης. Με την εντολή "Interaction" συνδέονται οι ακραίοι κόμβοι των πλευρών με δύο διαφορετικά σημεία αναφοράς (reference points) που βρίσκονται στο κέντρο των πλευρών (βλέπε σχήμα 3.7). Με βάση την εντολή "step" ορίζονται τα βήματα που θα εκτελέσει το μοντέλο. Αρχικά, τίθεται για την φόρτιση της εξωτερικής πίεσης η εντολή "Static, General" και έπειτα προστίθεται μέσω της εντολής "Static, Riks" η στροφή. Στην συνέχεια υποβάλλονται οι φορτίσεις του αγωγού. Συγκεκριμένα, στο βήμα της εντολής "Static, General" υποβάλλονται η εξωτερική πίεση στην περιφερειακή επιφάνεια του κελύφους (με την εντολή "Pressure"), καθώς και η πίεση στην παράπλευρη επιφάνεια η οποία μετατρέπεται σε αξονικό φορτίο που ασκείται όλο στο κέντρο της επιφάνειας μέσω της σχέσης $F = P\pi \frac{D^2}{4}$ (μέσω της εντολής "Concentrated force"). Οι παράπλευρες αξονικές φορτίσεις ασκούνται με την φορά του σχήματος 4.3. Οι φορτίσεις στο βήμα "Static, General" ασκούνται μέχρι μία τιμή που ορίζεται μέσω της εντολής "Magnitude". Διατηρώντας την φόρτιση της εξωτερικής πίεσης μέσω της εντολής "Propagated", ασκείται ροπή θέτοντας τα άκρα να στρέφονται με στροφή ίδιου μέτρου και αντίθετης φοράς. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως η δύναμη λόγω πίεσης στα άκρα του σωλήνα ασκείται πάντα κάθετη στον άξονα περιστροφής του σωλήνα μέσω της εντολής "Follow nodal rotation". Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος φαίνονται στον πίνακα 4.1. Το πλέγμα του προβλήματος δημιουργείται

με στοιχεία τετρα-κομβικά μειωμένης ολοκλήρωσης και αποτελείται από 150 στοιχεία κατά μήκος, ενώ κατά την περιφέρεια 60 στοιχεία.

| | Reference Point 1 (0,0,7112) | Reference Point 2 (0,0,0) |
|----------------------------|--|---|
| Boundary conditions | | |
| Kinematic coupling | Kin1: Δέσμευση όλων των κόμβων της αριστερής πλευράς Z=7112 εκτός από το UR1≠0 | Kin2: Δέσμευση όλων των κόμβων της δεξιάς πλευράς Z=0 εκτός από το UR1≠0 και U3≠0 |

Πίνακας 4.1 Συνοριακές συνθήκες μοντέλου.

4.2.2 Μοντελοποίηση προβλήματος φόρτισης $k \rightarrow P$

Η διαδικασία προσομοίωσης σε αυτήν την παράγραφο περιγράφεται για σωλήνα ο οποίος στρέφεται στα δύο άκρα του με στροφή ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς μέχρι μία τιμή και διατηρώντας την τιμή αυτή σταθερή προστίθεται ομοιόμορφη εξωτερική πίεση σε όλη την επιφάνεια του σωλήνα (και στις παράπλευρες επιφάνειες).

Η ανάλυση δεν διαφοροποιείται με αυτήν που προηγήθηκε στην παράγραφο 4.2.1 με την μόνη διαφορά στην σειρά που εισάγονται οι φορτίσεις. Δηλαδή, στο βήμα του "Static, General" υπάρχει πλέον η στροφή στα δύο άκρα του σωλήνα, ενώ στο βήμα του "Static, Riks" τίθεται η πίεση στην επιφάνεια του σωλήνα και τα συγκεντρωμένα φορτία στις παράπλευρες επιφάνειες, με τον τρόπο που αναλύθηκε παραπάνω. Η εισαγωγή γεωμετρίας, υλικού, βημάτων εκτέλεσης, σημείων αναφοράς, συνοριακών συνθηκών και πλέγματος δεν αλλάζει σε σχέση με την αναφορά που πραγματοποιήθηκε στην παράγραφο 4.2.1 για αντίστροφη φόρτιση.

4.3 Αποτελέσματα

Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση των μοντέλων που περιγράφηκαν στην παράγραφο 4.2.1 και 4.2.2 χρησιμοποιήθηκε το κυλινδρικό κέλυφος υλικού και γεωμετρίας με βάση την παράγραφο 2.3. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε τέλειος κυλινδρικός σωλήνας υλικού X70, διαμέτρου $D=711.2$ mm, πάχους $t=18$ mm, λόγου $D/t=39.5$ και μήκους $L=10D$ ($L=7112$ mm). Με βάση αυτή τη γεωμετρία οι τιμές των παραμέτρων που

χρησιμοποιούνται για την κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων με βάση τις σχέσεις (4.1) είναι: $P_0 = P_y = 27.45 \text{ MPa}$, $M_0 = 4938.535 \text{ kNm}$, $k_1 = 3.56 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^{-1}$.

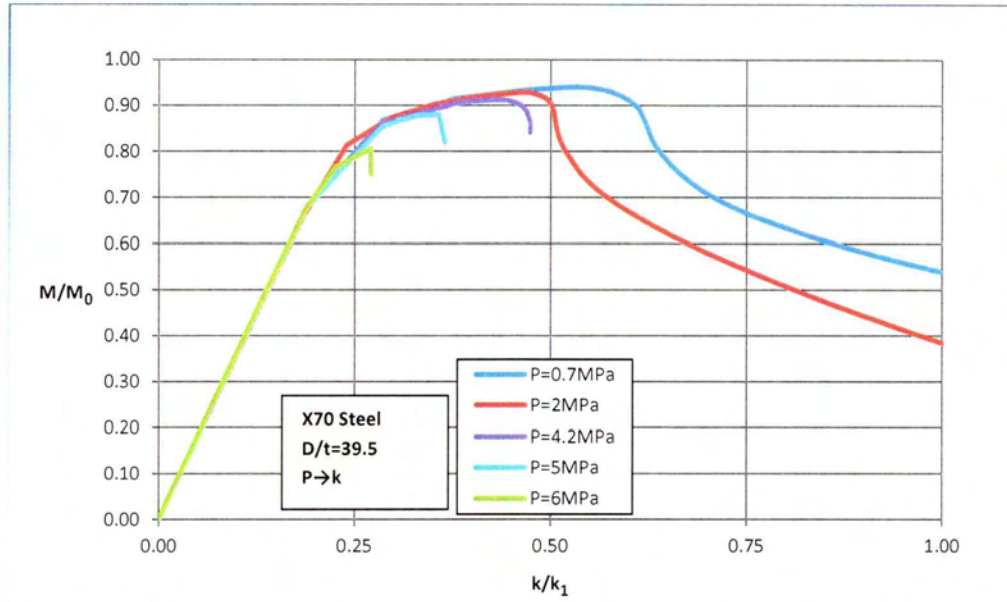
Στα πειράματα που έχουν ως τώρα διεξαχθεί πραγματοποιούνται 2 διαδικασίες φόρτισης ($k \rightarrow P$ load $P \rightarrow k$ load). Στην πρώτη, ο σωλήνας κάμπτεται μέχρι μία τιμή καμπυλότητας και διατηρώντας την τιμή αυτή ασκείται εξωτερική πίεση μέχρι ο σωλήνας να καταρρεύσει (φόρτιση $k \rightarrow P$). Αντίστροφα στην δεύτερη διαδικασία φόρτισης ο σωλήνας φορτίζεται με εξωτερική πίεση μέχρι μία τιμή πίεσης και διατηρώντας την τιμή αυτή ασκείται κάμψη μέχρι την κατάρρευση του (φόρτιση $P \rightarrow k$). Για τις δύο αυτές φορτίσεις πραγματοποιούνται πολλές αναλύσεις για πολλές τιμές πίεσης και καμπυλότητας έτσι ώστε να υποδείξουν την συμπεριφορά ενός αγωγού σε συνδυασμένη φόρτιση.

Στην φόρτιση $P \rightarrow k$, η πίεση (P) εφαρμόζεται πρώτη ενισχύοντας σε έναν σημαντικό βαθμό την αρχική μεταβολή της οβαλότητας που παρουσιάζεται στον σωλήνα. Η καμπυλότητα έπειτα αυξάνεται ενώ η πίεση παραμένει σταθερή. Η κάμψη που προκαλείται ενισχύει την οβαλοποίηση στην διατομή και το φαινόμενο αυτό επιταχύνεται από την παρουσία της εξωτερικής πίεσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1(a). Η αύξηση της ροπής συνεχίζεται μέχρι το οριακό φορτίο κάμψης, την οριακή κατάσταση της κατασκευής. Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροπής - καμπυλότητας για σωλήνα λόγου $D/t=39.5$ που κάμπτεται σε διαφορετικές πιέσεις. Η επίδραση της πίεσης στην συμπεριφορά είναι ξεκάθαρη. Σε χαμηλότερες τιμές πίεσης η κατάρρευση έπεται του οριακού φορτίου κάμψης. Σε υψηλότερες πιέσεις ο σωλήνας κάμπτεται μέχρι την εμφάνιση τοπικού λυγισμού μέσω εμφάνισης κυματισμών πτύχωσης. Στην περίπτωση αυτή ο τοπικός λυγισμός προηγείται του οριακού φορτίου κάμψης με φαινόμενα κατάρρευσης, και θυμίζουν αυτά που παρατηρήσαμε για καθαρή κάμψη ("kink" και "diamond mode"). Η κάμψη πέρα από το οριακό φορτίο προκαλεί επίσης αύξηση της μορφής οβάλ στην διατομή. Στο σχήμα 4.5 φαίνονται μορφές σωλήνων υπό κατάρρευση σε δοκιμές πειραμάτων για ψηλές τιμές πίεσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της πίεσης τόσο πιο "ισοπεδωτική" είναι η μορφή κατάρρευσης του σωλήνα.

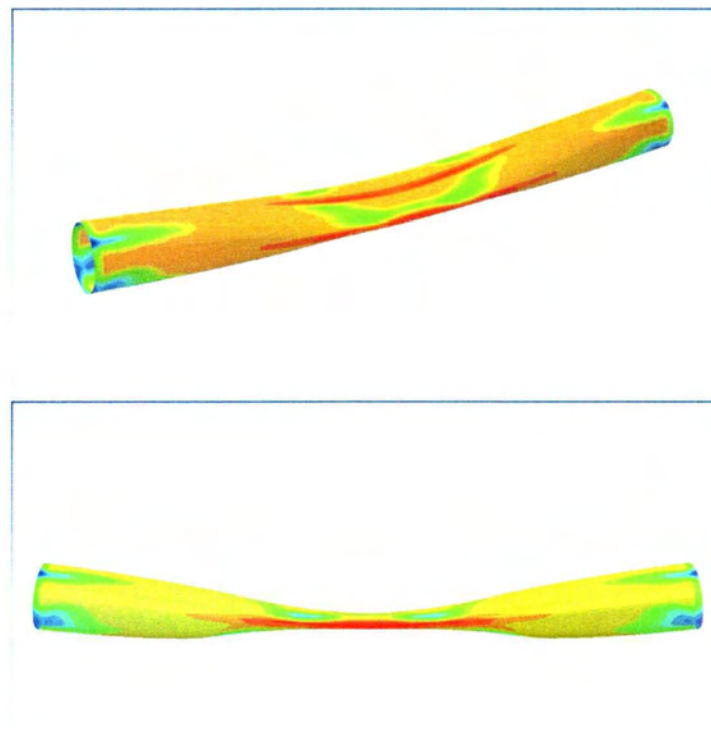
Στην φόρτιση $k \rightarrow P$, ο σωλήνας κάμπτεται μέχρι μία τιμή της καμπυλότητας \bar{k}_1 με ροπή \bar{M}_1 , όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Έπειτα ασκείται εξωτερική πίεση η οποία αυξάνεται ενώ η καμπυλότητα μένει σταθερή (σχήμα 4.7). Αυτό οδηγεί σε μικρή μείωση της ροπής και στην αύξηση της οβαλότητας. Ο σωλήνας καταρρέει όταν η οβαλότητα της διατομής αυξηθεί τόσο που η αντίστοιχη τιμή της πίεσης δεν μπορεί να αυξηθεί άλλο. Η πίεση κατάρρευσης αντιστοιχεί στην οριακή τιμή της πίεσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7.

Η επίδραση των δύο διαφορετικών τρόπων φόρτισης παρουσιάζεται στο σχήμα 4.8, για λόγο $D/t=39.5$.

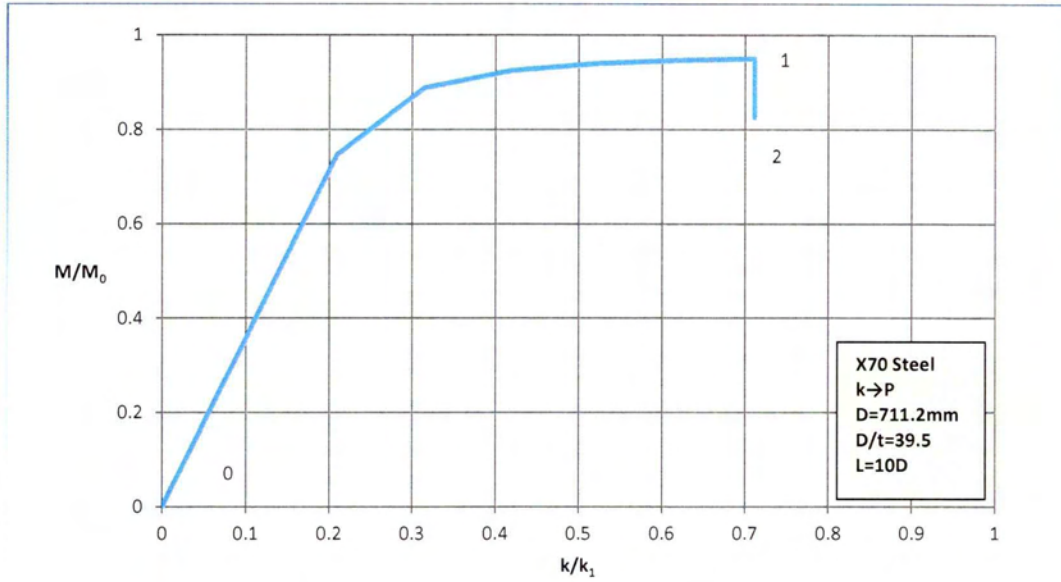
Επίσης, η καμπύλη φόρτισης $P \rightarrow k$ είναι χαμηλότερη από αυτήν για φόρτιση $k \rightarrow P$ λόγω της δημιουργίας των τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων στην διατομή από την αρχική φόρτιση της εξωτερικής πίεσης (όπως αναφέραμε στο Κεφάλαιο 2) κάτι που επιταχύνει την κατάρρευση [1].



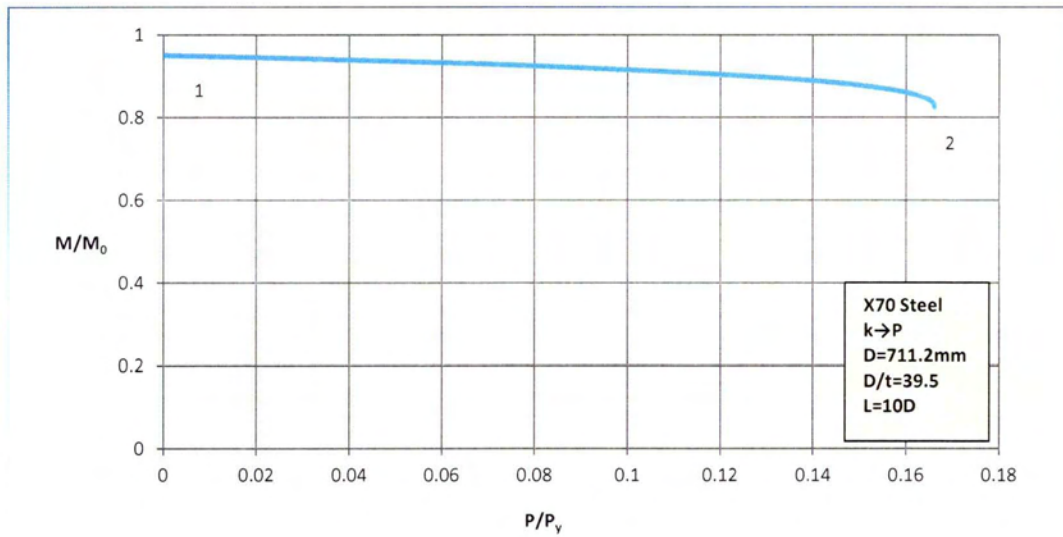
Σχήμα 4.4 Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας για σωλήνα υπό κάμψη με παρουσία διάφορων τιμών εξωτερικής πίεσης (φόρτιση $P \rightarrow k$).



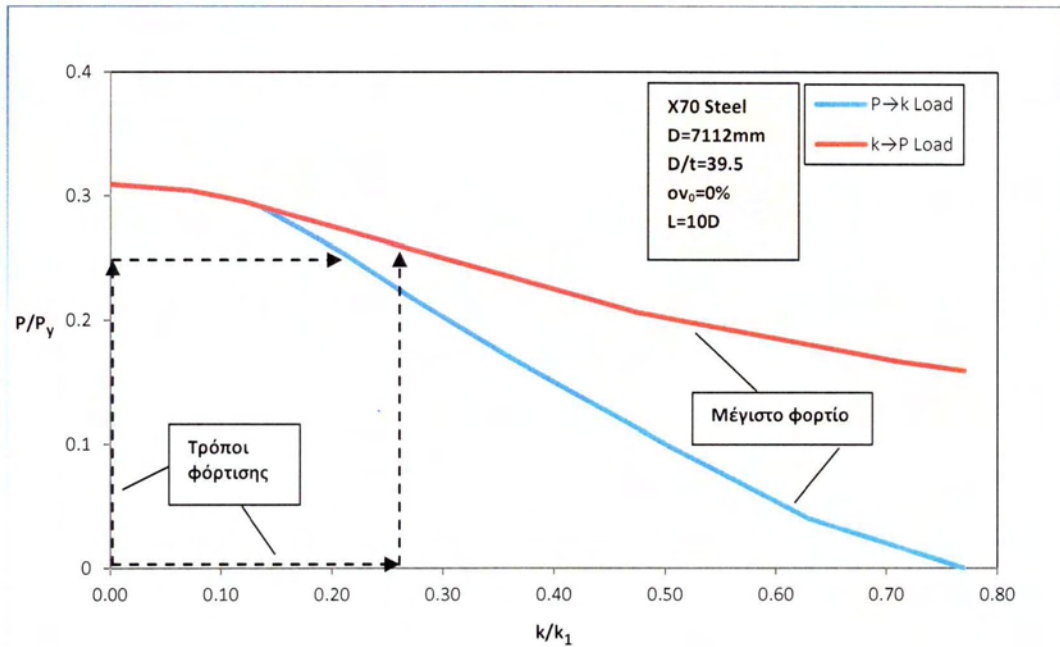
Σχήμα 4.5 Κατάρρευση σωλήνων σε μεγάλες τιμές πίεσης ($k \rightarrow P$ Load για $k_0/k_1=0.7$ και $P_{max}/P_y=0.17$).



Σχήμα 4.6 Διάγραμμα ροπής-καμπλότητας για απόκριση σωλήνα σε φόρτιση $k \rightarrow P$.



Σχήμα 4.7 Διάγραμμα ροπής-πίεσης για απόκριση σωλήνα σε φόρτιση $k \rightarrow P$.



Σχήμα 4.8 Οριακές καμπύλες αντοχής για σωλήνες υλικού X70 με λόγο $D/t=39.5$ με τρόπους φόρτισης $P \rightarrow k$ και $k \rightarrow P$.

4.4 Προβλέψεις με διδιάστατη ανάλυση

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται προβλέψεις από τα αποτελέσματα κοινού τυποποιημένου υπολογιστικού αρχείου πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, το οποίο έχει την μορφή δακτυλίου μικρού μήκους που συμπεριφέρεται σαν την διατομή ενός μεγάλου μήκους σωλήνα. Το μοντέλο έχει την αρχική μορφή ενός ημί-δακτυλίου λόγω συμμετρίας (σχήμα 4.9). Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας την διαδικασία από τις παραγράφους 4.2.1 και 4.2.2 για τις φορτίσεις $P \rightarrow k$ και $k \rightarrow P$ και χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες του προβλήματος δημιουργούμε ένα μοντέλο το οποίο αποκρίνεται στα χαρακτηριστικά ενός σωλήνα μεγάλου μήκους. Το αρχείο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως για αρχικές προβλέψεις πάνω σε πειράματα συνδυασμένης καταπόνησης και χρησιμοποιείται με την ονομασία "Cross sectional analysis".

Ακολουθώντας τα ίδια πειράματα με την παράγραφο 4.3 σε τέλειο δακτύλιο υλικού X70 και λόγου $D/t=39.5$ για τις φορτίσεις $P \rightarrow k$ και $k \rightarrow P$ καταλήγουμε σε χρήσιμες προβλέψεις που βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση των αναλυτικών αποτελεσμάτων της παραγράφου 4.3.

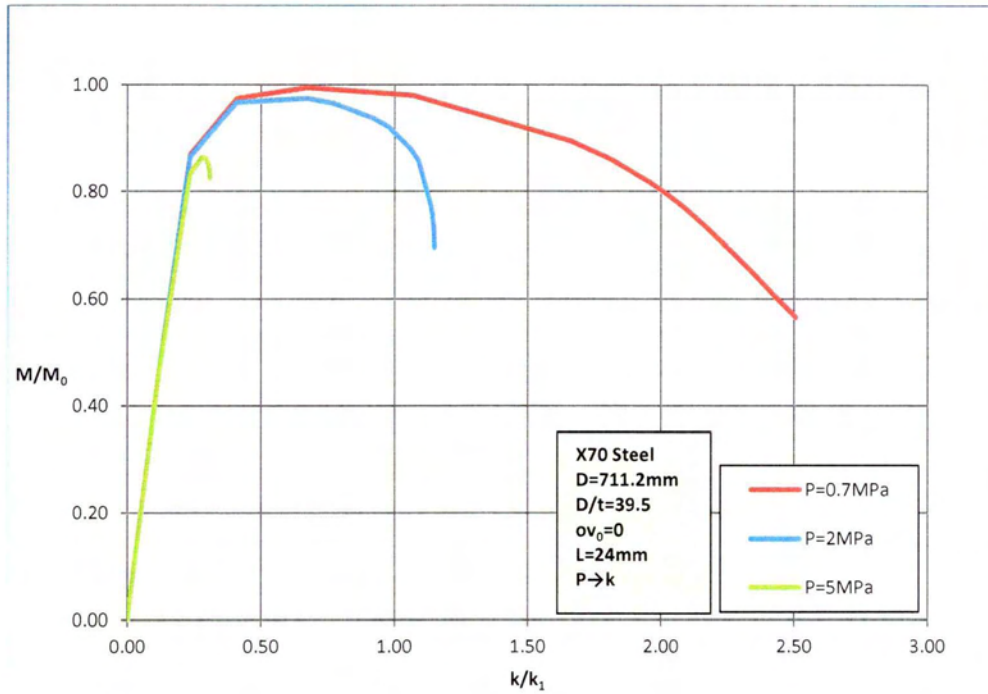


Σχήμα 4.9 Cross sectional analysis.

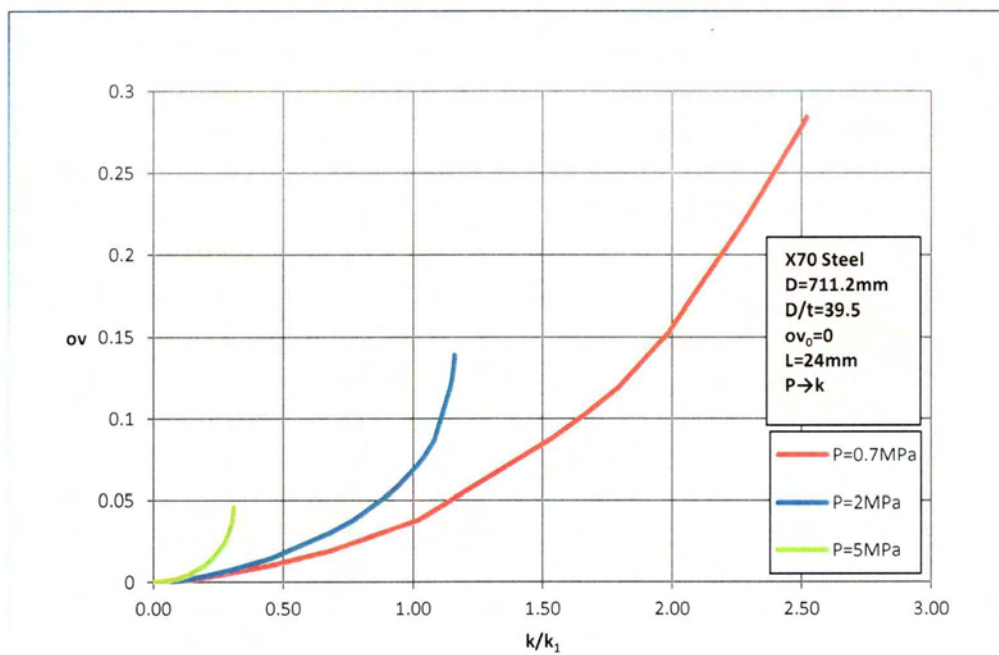
Για την φόρτιση $P \rightarrow k$, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.3, η απόκριση του δακτυλίου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3 μέσω διαγράμματος ροπής-καμπυλότητας για διάφορες τιμές εξωτερική πίεσης ενώ στο σχήμα 4.11 παρουσιάζεται διάγραμμα οβαλότητας - καμπυλότητας για τις αντίστοιχες τιμές πίεσης.

Ακολουθώντας τα ίδια βήματα για την φόρτιση $k \rightarrow P$, όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.3, προκύπτει στο σχήμα 4.12 το διάγραμμα που παρουσιάζει την επίδραση των διαφορετικών τρόπων φόρτισης ($P \rightarrow k$ και $k \rightarrow P$) στην οριακή κατάσταση της κατασκευής.

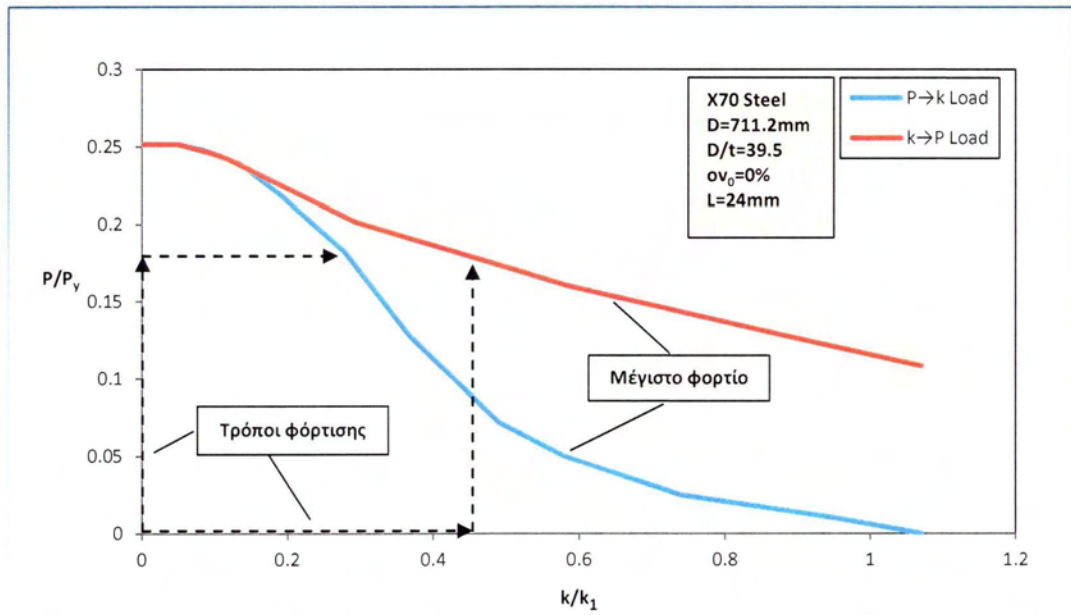
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα στο σχήμα 4.13, φαίνεται πώς οι δύο αναλύσεις (3-D και “Cross sectional analysis”) για μικρές και μεγάλες τιμές καμπυλότητας αποκλίνουν σε μικρό ποσοστό. Είναι ξεκάθαρο πώς αυτή η απόκλιση στις τιμές αυτές είναι λογική. Για μικρές τιμές καμπυλότητας η εξωτερική πίεση γίνεται η κυρίαρχη φόρτιση κατάρρευσης του σωλήνα, κάτι που δικαιολογεί το γεγονός της διαφοράς. Στην παράγραφο 2.5.5 αποδείχθηκε πώς για μεγάλα μήκη σωλήνων η αντοχή σε εξωτερική πίεση μειώνεται, κάτι που κάνει την καμπύλη της “Cross sectional analysis”, η οποία αποτελεί απλούστευση ενός μεγάλου μήκους σωλήνα, να υστερεί στις μικρές καμπυλότητες. Παρατηρώντας το σχήμα 4.14 βλέπουμε πώς αυτό το μεγάλο “πλατό” που δημιουργείται με τις τιμές της “Cross sectional analysis” κάνει το μοντέλο της ανάλυσης αυτής να έχει μεγάλη αντοχή στην κάμψη για μεγάλες τιμές καμπυλότητας, κάτι που δεν ισχύει με την ανάλυση 3-D για σωλήνα μήκους $L=7112$ mm και με ύπαρξη πραγματικών συνοριακών συνθηκών στα άκρα του σωλήνα. Αυτό δικαιολογεί την μικρή απόκλιση των δύο υπολογιστικών μεθόδων για μεγάλες τιμές καμπυλότητας και μικρές πίεσης.



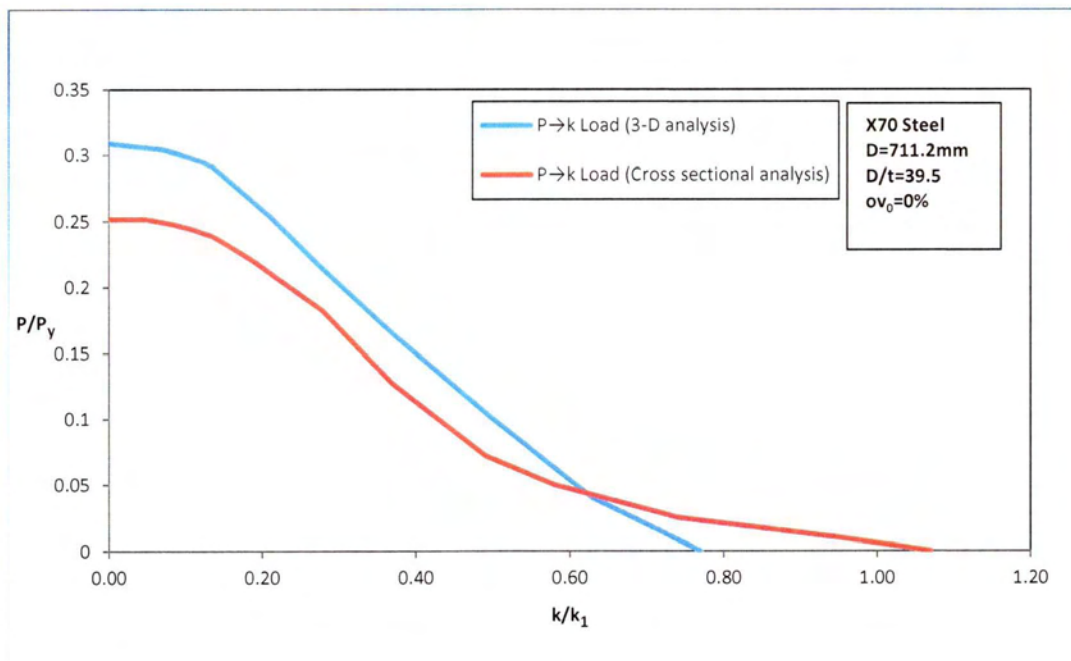
Σχήμα 4.10 Απόκριση σωλήνα σε διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας για διάφορες τιμές εξωτερική πίεσης με φόρτιση $P \rightarrow k$ (Cross sectional analysis).



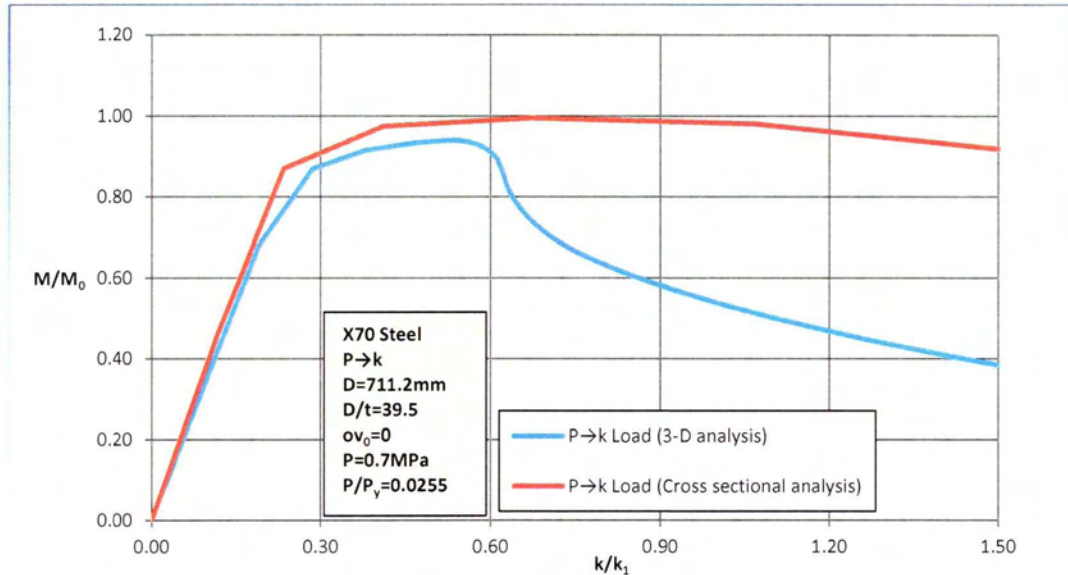
Σχήμα 4.11 Απόκριση σωλήνα σε διάγραμμα οβαλότητας-καμπυλότητας για διάφορες τιμές εξωτερικής πίεσης με φόρτιση $P \rightarrow k$ (Cross sectional analysis).



Σχήμα 4.12 Οριακές καμπύλες αντοχής για δακτύλιο υλικού X70 με λόγο $D/t=39.5$ με τρόπους φόρτισης $P \rightarrow k$ και $k \rightarrow P$ (Cross sectional analysis).



Σχήμα 4.13 Σύγκριση φόρτισης $P \rightarrow k$ με δύο διαφορετικές υπολογιστικές αναλύσεις.



Σχήμα 4.14 Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας με φόρτιση $P \rightarrow k$ με πίεση $P/P_y=0.0255$.

4.5 Συμπεράσματα

1. Στο κεφάλαιο 3, αποδείχθηκε πώς η κάμψη ενός σωλήνα προκαλεί οβαλοποίηση των διατομών σε όλο το μήκος του επιφέροντας καταστάσεις αστάθειας. Στο κεφάλαιο 4 αποδείχθηκε πώς όταν εξωτερική πίεση και κάμψη ασκούνται μαζί, επιδρούν ακόμα ισχυρότερα στην οβαλοποίηση της διατομής. Κατά συνέπεια, κάμπτοντας έναν σωλήνα με την παρουσία εξωτερικής πίεσης προκαλείται κατάρρευση σε μικρότερη καμπυλότητα σε σχέση με την καθαρή κάμψη. Αντίστοιχα, η εξωτερική πίεση σε έναν υπό κάμψη σωλήνα προκαλεί κατάρρευση σε μικρότερη πίεση σε σχέση με την μεμονωμένη φόρτιση εξωτερικής πίεσης.
2. Το μέγιστο φορτίο κάμψης στην περίπτωση του υπό εξέταση κυλινδρικού κελύφους γίνεται οριακή κατάσταση της κατασκευής από την στιγμή που οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για τέλειους σωλήνες χωρίς κυματισμούς πτύχωσης ή οβαλότητα ως αρχική ατέλεια .
3. Η οριακή κατάσταση της κατασκευής εξαρτάται από τον τρόπο φόρτισης της ($P \rightarrow k$ ή $k \rightarrow P$). Για παράδειγμα, από τα σχήματα 4.9 και 4.12, η κάμψη υπό σταθερή πίεση ($P \rightarrow k$) είναι πιο κρίσιμη σε έναν σωλήνα που υποβάλλεται σε πίεση υπό σταθερή καμπυλότητα ($k \rightarrow P$).
4. Οι αναλύσεις που χρησιμοποιήθηκαν για να παρουσιάσουν τα αποτελέσματα και τις προβλέψεις (“3-D analysis” και “Cross sectional analysis”) έχουν μικρές διαφορές για πολύ μικρές και πολύ μεγάλες καμπυλότητες, όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.4, κάτι που καθιστά την “Cross sectional analysis” πρακτική για προβλήματα σωλήνων μεγάλου μήκους.

5. Συμπεράσματα

Βάσει της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε σε κυλινδρικό κέλυφος υλικού X70 με λόγο $D/t=39.5$ προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για κάθε είδους φόρτιση:

- Εξωτερική πίεση
 1. Η ύπαρξη αρχικών ατελειών (γεωμετρική ατέλεια μορφής οβάλ, παραμένουσες τάσεις, ανισοτροπία κ.α.) μειώνουν την αντοχή μέσω της μείωσης της οριακής πίεσης, κάτι που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό.
 2. Η παράμετρος του μήκους σωλήνα μεταξύ άκαμπτων συνοριακών συνθηκών παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό καθώς για κάθε αύξηση του μήκους η τιμή της οριακής πίεσης (αντοχή) μειώνεται σημαντικά μέχρι μία σταθερή τιμή για ένα άνω όριο του μήκους σωλήνα.
- Καθαρή κάμψη
 3. Σε καθαρή κάμψη το υπό εξέταση κυλινδρικό κέλυφος με αρχική ατέλεια κυματισμών πτύχωσης (wrinkles) έχει ως οριακή κατάσταση το φαινόμενο του λυγισμού, αφού προηγείται του οριακού φορτίου κάμψης, που εμφανίζεται κυρίως σε κελύφη με σχετικά μεγάλο λόγο D/t .
 4. Μετά τον λυγισμό, το κυλινδρικό κέλυφος αστοχεί με την μορφή “local kinking” (τοπική πτύχωση τοιχώματος).
 5. Η ύπαρξη αρχικών κυματισμών πτύχωσης ως αρχική ατέλεια μειώνει την τιμή του μέγιστου φορτίου κάμψης και μειώνει την καμπτική παραμόρφωση του κυλινδρικού κελύφους με αποτέλεσμα την επίσπευση φαινομένων τοπικού λυγισμού και κατάρρευσης.
- Συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης και κάμψης
 6. Η οριακή κατάσταση της κατασκευής εξαρτάται από τον τρόπο φόρτισης της ($P \rightarrow k$ ή $k \rightarrow P$). Συγκεκριμένα, η κάμψη υπό σταθερή πίεση ($P \rightarrow k$) είναι πιο κρίσιμη για έναν σωλήνα από την φόρτιση με πίεση υπό σταθερή καμπυλότητα ($k \rightarrow P$).
 7. Στην φόρτιση $P \rightarrow k$ έχουμε μείωση του οριακού φορτίου κάμψης του σωλήνα με την συνεχή αύξηση στην τιμή της εξωτερικής πίεσης η οποία διατηρείται σταθερή κατά την κάμψη. Αντίστροφα, στην φόρτιση $k \rightarrow P$ έχουμε την μείωση της πίεσης κατάρρευσης με την συνεχή αύξηση στην τιμή της καμπυλότητας η οποία διατηρείται σταθερή κατά την φόρτιση της εξωτερικής πίεσης.

6. Βιβλιογραφία

- [1]Kyriakides, S., Corona, E. (2007). *Mechanics of offshore pipelines vol.1. : Buckling and collapse*. Elevesier, Oxford, UK.
- [2]Brush, D.O., Almroth, B.O. (1975). *Buckling of Bars, Plates, and Shells*, McGraw-Hill, New York, NY
- [3]Timoshenko, S.P. and Gere, J.M. (1961). *Theory of Elastic Stability*, 2nd Edn. McGraw-Hill, New York, NY.
- [4]Vasilikis, D., Karamanos, S.A., Van Es, S.H.J., Gresnigt, A.M., (2014). *Bending deformartion capacity of large-diameter spiral-welded tubes*, Proceedings of 10th International Pipeline Conference. Calgary, Alberta, Canada.
- [5]William, D., Callister, Jr. (1999). *Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών*, 5^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- [6]Frame, W.M. (1938). Casing setting depths are not assured by physical properties of the steel. *API Drilling and Production*, pp. 323-352
- [7] Abaqus Documentation 6.10. Available: <http://abaqusdoc.ucalgary.ca/>
- [8] Wikipedia.org. *Brazier effect*. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Brazier_effect
- [9] Kyriakides, S. and Ju, G.-T. (1992). Bifurcation and localization instabilities in cylindrical shells under bending. Part I, Experiments. *Int. J. Solid. Struct.* 29, 1117-1171.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000123965