

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ
ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΜΕ ΤΗΝ
ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΕΤΡΙΤΣΟΠΟΥΛΟΣ



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

Βόλος 2016

© 2016 ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΕΤΡΙΤΣΟΠΟΥΛΟΣ

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Σπύρος Καραμάνος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Αλέξης Κερμανίδης Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Άννα Ζερβάκη Μέλος ΕΔΙΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα από όλους, τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Σπύρο Καραμάνο, για την υπομονή που έδειξε στα πρώτα στάδια της διπλωματικής καθώς και για την υποστήριξη και καθοδήγηση που μου παρείχε μέχρι και την ολοκλήρωσή της. Ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω επίσης στους Καθηγητές κ. Αλέξη Κερμανίδη και Άννα Ζερβάκη για τον χρόνο που αφιέρωσαν για την εξέταση της εργασίας. Ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να πω στους φίλους μου, με τους οποίους περάσαμε πολλές ευχάριστες εμπειρίες στα φοιτητικά μας χρόνια. Ευγνώμων είμαι επίσης για την ομάδα "Centaurus Racing Team", μέσω της οποίας γνώρισα πολύ αξιόλογα άτομα, τα οποία δεν θα είχα γνωρίσει αλλιώς, καθώς και για τις εμπειρίες που μου χάρισε. Ο χρόνος μου στην ομάδα, με έκανε τον άνθρωπο που είμαι σήμερα και μου έδωσε τα εφόδια, μέσω της πρακτικής εφαρμογής των όσων έμαθα στην Σχολή, να κυνηγήσω τα όνειρα μου.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ, το αξίζουν οι γονείς μου Ζέτα και Θωδωρής, ο αδερφός μου Στέφανος και ο θείος μου Φώτης για την αγάπη τους και την υποστήριξη των μέχρι τώρα επιλογών μου. Σε αυτούς αφιερώνεται η διπλωματική μου εργασία.

Κωνσταντίνος Πετριτσόπουλος

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ
ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗ ΤΗΣ ΣΕ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΜΕ ΤΗΝ
ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΠΕΤΡΙΤΣΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2016

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά το φαινόμενο της διάδοσης ύβωσης σε υποθαλάσσιους αγωγούς και την ανάλυσή της, κάνοντας χρήση μη-γραμμικών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.

Μελετάται η επιρροή παραμέτρων που επηρεάζουν την αντοχή των αγωγών, όπου αναδεικνύεται η σημασία του μεγέθους της ατέλειας στον αγωγό, ενώ φανερώνεται πώς οι παραμένουσες τάσεις από την κατασκευή του επηρεάζουν σημαντικά όταν ξεπερνούν ένα συγκεκριμένο ποσοστό του ορίου διαρροής του υλικού.

Διερευνάται η επίδραση του λόγου μήκους τού προς εξέταση αγωγού ως προς την διατομή του στην εγκυρότητα των αποτελεσμάτων σε πειραματικές διατάξεις, ενώ αναπτύσσεται ένα μοντέλο που υπολογίζει την χαρακτηριστική πίεση της διαδιδόμενης ύβωσης. Η τιμή της διαδιδόμενης ύβωσης συγκρίνεται με δυο απλοποιημένες μεθόδους.

Μελετάται επίσης ο μηχανισμός ανάλυσης της διαδιδόμενης ύβωσης με την εισαγωγή αναστολέων τύπου "integral" οι οποίοι μετέπειτα δοκιμάζονται σε πλήρες αριθμητικό μοντέλο για να επιβεβαιωθεί η απόδοσή τους.

Τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, θα μπορούσαν να συνεισφέρουν στην βελτίωση των πειραματικών διατάξεων και στην ακρίβεια των αριθμητικών μοντέλων, που αναπτύσσονται για τον ασφαλέστερο σχεδιασμό υποθαλάσσιων αγωγών.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ.....	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	xi
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΑΓΩΓΟΙ.....	1
1.1.1 ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗ ΥΒΩΣΗ.....	2
1.1.2 ΑΝΑΣΤΟΛΗ ΤΗΣ ΥΒΩΣΗΣ.....	4
1.1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΙΕΣΗΣ.....	6
1.1.4 ΕΝΑΡΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ	9
1.2 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	10
2 ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	11
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ	12
2.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΑΤΕΛΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΙΕΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ	14
2.3.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ-ΠΛΕΓΜΑ-ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ 15	
2.3.2 ΜΕΤΑΛΛΥΓΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ	17
2.3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	18
2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ.....	21
2.4.1 ΜΕΘΟΔΟΣ PALMER & MARTIN.....	21
2.4.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ MAXWELL	23
2.4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ	27
3 ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	29
3.1 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥ	29
3.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ Α	30

3.1.1.1	ΜΟΝΤΕΛΟ-ΠΛΕΓΜΑ-ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	30
3.1.1.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	32
3.1.1.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	34
3.1.2	ΜΕΘΟΔΟΣ Β	34
3.1.2.1	ΜΟΝΤΕΛΟ-ΠΛΕΓΜΑ-ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	34
3.1.2.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	35
3.1.2.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	37
3.1.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ Α ΚΑΙ Β	37
3.2	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΥΠΟΥ ΑΡΧΙΚΗΣ ΑΤΕΛΕΙΑΣ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	39
3.2.1	ΑΤΕΛΕΙΑ ΤΥΠΟΥ Ι.....	40
3.2.2	ΑΤΕΛΕΙΑ ΤΥΠΟΥ ΙΙ.....	40
3.2.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΤΥΠΟΥ Ι ΚΑΙ ΙΙ.....	43
3.3	ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ	44
3.3.1	ΜΟΝΤΕΛΟ-ΠΛΕΓΜΑ-ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	45
3.3.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	47
3.4	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ.....	49
3.4.1	ΜΟΝΤΕΛΟ-ΠΛΕΓΜΑ-ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	51
3.4.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	51
3.4.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	54
4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ ΥΒΩΣΗΣ	57
4.1	ΠΡΟΤΥΠΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	57
4.1.1	ΑΡΙ ΡΡ 1111	58
4.1.2	DNV OS-F101	60
4.2	ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΑΡΧΟΝΤΟΣ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ	61
4.2.1	ΜΟΝΤΕΛΟ-ΠΛΕΓΜΑ-ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	62
4.2.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	63

4.2.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΠΡΟΤΥΠΑ ΑΡΙ ΚΑΙ DNV	66
4.3	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ-ΠΡΟΤΑΣΗ ΝΕΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ.....	68
4.3.1	ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΙΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ DNV OS-F101_2012_08	68
4.3.2	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ-ΠΛΕΓΜΑ-ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	69
4.3.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	69
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	73
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	76

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1:	Σύστημα άντλησης πετρελαίου/φυσικού αερίου	1
Εικόνα 2:	S-lay μέθοδος πόντισης.....	2
Εικόνα 3:	J-lay μέθοδος πόντισης	3
Εικόνα 4:	Reel pipe laying μέθοδος πόντισης.....	3
Εικόνα 5:	Αναστολέας ύψωσης τύπου Integral-Ring (Netto & Kyriakides,1999).....	4
Εικόνα 6:	Αναστολέας ύψωσης τύπου Slip-On (Kyriakides & Babcock, 1980).....	5
Εικόνα 7:	Αναστολέας ύψωσης τύπου Spiral (Kyriakides & Babcock, 1982).....	5
Εικόνα 8:	Παραμορφωμένες καταστάσεις δακτυλίου κατά την αστοχία (Kyriakides & Babcock,1982).....	11
Εικόνα 9:	Αναπαράσταση μοντέλου διδιάστατης ανάλυσης στο ABAQUS	12
Εικόνα 10:	Αναπαράσταση γεωμετρικής ατέλειας/οβαλότητας	14
Εικόνα 11:	Αναπαράσταση ακμών εφαρμογής συνοριακών συνθηκών	16
Εικόνα 12:	Επιβολή παραμόρφωσης στην άνω γενέτειρα του μοντέλου.....	17
Εικόνα 13:	Διαδικασία παραμόρφωσης δακτυλίου υπό ομοιόμορφη εξωτερική πίεση (μεταλυγισμική συμπεριφορά)	18
Εικόνα 14:	Μηχανισμός κατάρρευσης μέσω πλαστικών αρθρώσεων (Palmer & Martin)	22
Εικόνα 15:	Αναπαράσταση επιφάνειας στην αρχική και τελική κατάσταση δακτυλίου.....	24
Εικόνα 16:	Γραφική αναπαράσταση της πίεσης συναρτήσει της μεταβολής επιφάνειας ενός δακτυλίου	24
Εικόνα 17:	Μοντέλο αγωγού για τριδιάστατη ανάλυση	29

Εικόνα 18: Πειραματική διάταξη μέτρησης χαρακτηριστικών πιέσεων αγωγού (Kyriakides, Park, Netto) [9].....	30
Εικόνα 19: Συνοριακές συνθήκες για την Μέθοδο Α	31
Εικόνα 20: Εφαρμοζόμενη μετατόπιση στους κόμβους της άνω γενέτειρας σε αγωγό μήκους $L/D=3$	32
Εικόνα 21: Συνοριακές συνθήκες για την Μέθοδο Β.....	35
Εικόνα 22: Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού Ι για μήκη $L/D=3$ & $L/D=20$	39
Εικόνα 23: Σχέδιο διατομής ατέλειας τύπου ΙΙ	40
Εικόνα 24: Αναπαράσταση τρόπου υπολογισμού των παραμενουσών τάσεων σε έναν αγωγό	44
Εικόνα 25: Κατανομή παραμενουσών τάσεων σε αγωγό κυκλικής διατομής	45
Εικόνα 26: Αναπαράσταση φαινομένου διάδοσης ύβωσης	49
Εικόνα 27: Καμπύλη $P-\Delta V$ για αγωγό υπό εξωτερική πίεση.....	50
Εικόνα 28: Διάδοση ύβωσης στον αγωγό Ι.....	52
Εικόνα 29: Γεωμετρία αναστολέα τύπου ‘Integral’	57
Εικόνα 30: Μοντελοποίηση διαμορφώσεων άκρων αναστολέα	62
Εικόνα 31: Πλέγμα μοντέλου ανάλυσης δεδομένου αναστολέα για τον αγωγό Ι.....	63
Εικόνα 32: Κατάρρευση αγωγού και διάδοση ύβωσης για δεδομένο αναστολέα για τον αγωγό Ι.....	63
Εικόνα 33: Αναστολή ύβωσης	64
Εικόνα 34: Ανάσχεση αναστολέα και διάδοση της ύβωσης στον αγωγό Ι	64
Εικόνα 35: Μοντέλα αναστολέων για τον αγωγό Ι (πάνω) και για τον αγωγό ΙΙ (κάτω).....	69
Εικόνα 36: Διάδοση της ύβωσης, ανάσχεσή της και υπερπήδηση αναστολέα για τον αγωγό Ι69	

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 1: Μεταβολή πίεσης ως προς την μεταβολή του όγκου του αγωγού	9
Γράφημα 2: Αναπαράσταση πραγματικής τάσης- πλαστικής παραμόρφωσης για το υλικό X-65	13
Γράφημα 3: Γραφική αναπαράσταση του λόγου w/R με την P_c για τον αγωγό Ι.....	20
Γράφημα 4: Γραφική αναπαράσταση του λόγου w/R με την P_c για τον αγωγό ΙΙ	20
Γράφημα 5: Γραφική αναπαράσταση $P-\Delta A$ για τον αγωγό Ι με την πίεση διάδοσης.....	25
Γράφημα 6: Αδιαστατοποιημένη γραφική αναπαράσταση $P-\Delta A$ για τον αγωγό Ι με την πίεση διάδοσης.....	26
Γράφημα 7: Γραφική αναπαράσταση $P-\Delta A$ για τον αγωγό ΙΙ με την πίεση διάδοσης.....	26

Γράφημα 8: Αδιαστατοποιημένη γραφική αναπαράσταση P-ΔA για τον αγωγό II με την πίεση διάδοσης	27
Γράφημα 9: Διάγραμμα Pc-L/D για τον αγωγό I με την Μέθοδο A	33
Γράφημα 10: Διάγραμμα Pc-L/D για τον αγωγό II με την Μέθοδο A	34
Γράφημα 11: Διάγραμμα Pc-L/D για τον αγωγό I με την Μέθοδο B	36
Γράφημα 12: Διάγραμμα Pc-L/D για τον αγωγό II με την Μέθοδο B	37
Γράφημα 13: Καμπύλες Pc-L/D για τον αγωγό I των δυο μεθόδων	38
Γράφημα 14: Καμπύλες Pc-L/D για τον αγωγό II των δυο μεθόδων	38
Γράφημα 15: Καμπύλη Pc-L/D για τον αγωγό I με ατέλεια Τύπου II	41
Γράφημα 16: Καμπύλη Pc-L/D για τον αγωγό II με ατέλεια Τύπου II	42
Γράφημα 17: Καμπύλες Pc-L/D των δυο τύπων ατελειών για τον αγωγό I	43
Γράφημα 18: Καμπύλες Pc-L/D των δυο τύπων ατελειών για τον αγωγό II	43
Γράφημα 19: Καμπύλη Pc-% συ για τον αγωγό I	47
Γράφημα 20: Καμπύλη Pc-% συ για τον αγωγό II	48
Γράφημα 21: Διάγραμμα P-ΔV για τον αγωγό I	51
Γράφημα 22: Αδιάστατο διάγραμμα P/P _y -ΔV/V _o για τον αγωγό I	53
Γράφημα 23: Διάγραμμα P-ΔV για τον αγωγό II	53
Γράφημα 24: Αδιάστατο διάγραμμα P/P _y -ΔV/V _o για τον αγωγό II	54
Γράφημα 25: Διάγραμμα πίεσης με μεταβολή όγκου μοντέλου με δεδομένο αναστολέα για τον αγωγό I	64
Γράφημα 26: Αδιάστατο διάγραμμα P/P _y -ΔV/V _o για δεδομένο αναστολέα για τον αγωγό I	65
Γράφημα 27: Διάγραμμα P-ΔV για τον αγωγό I με τον νέο αναστολέα	70
Γράφημα 28: Αδιάστατο διάγραμμα P/P _y -ΔV/V _o για τον αγωγό I με τον νέο αναστολέα	70
Γράφημα 29: Διάγραμμα P-ΔV για τον αγωγό II με τον νέο αναστολέα	71
Γράφημα 30: Αδιάστατο διάγραμμα P/P _y -ΔV/V _o για τον αγωγό II με τον νέο αναστολέα	72

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

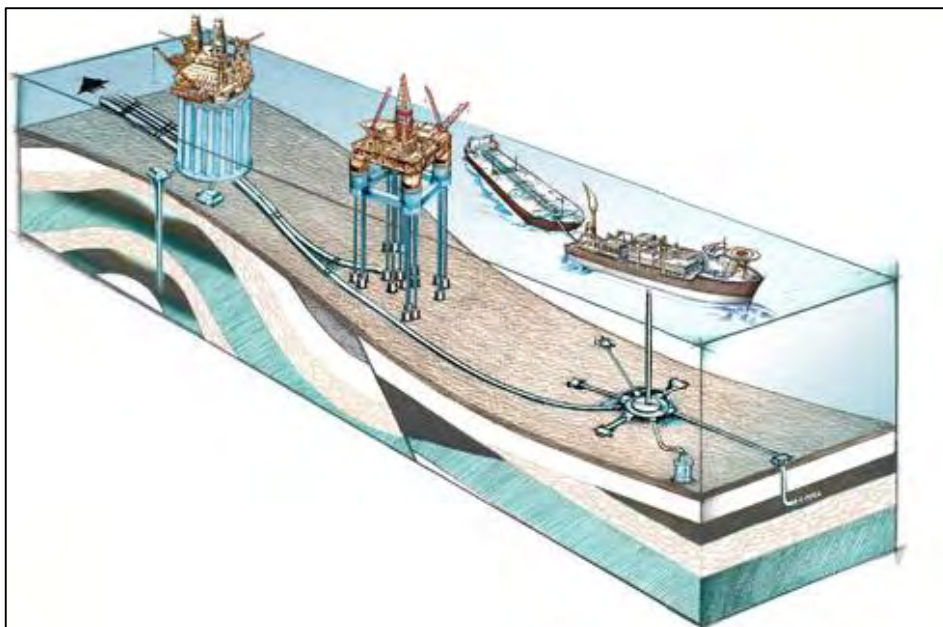
Πίνακας 1: Αποτελέσματα μεταβολής λόγου w/R στην Pc για τον αγωγό I	19
Πίνακας 2: Αποτελέσματα λόγου w/R στην Pc στον αγωγό II	19
Πίνακας 3: Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογισμού διάδοσης πίεσης για τους αγωγούς I και II	27
Πίνακας 4: Μεταβολή πίεσης κατάρρευσης σε σχέση με την μεταβολή μήκους για τον αγωγό I με την Μέθοδο A	32

Πίνακας 5:Μεταβολή πίεσης κατάρρευσης σε σχέση με την μεταβολή μήκους για τον αγωγό II με την μέθοδο A.....	33
Πίνακας 6:Μεταβολή πίεσης κατάρρευσης σε σχέση με την μεταβολή μήκους για τον αγωγό I με την Μέθοδο B.....	35
Πίνακας 7: Μεταβολή πίεσης κατάρρευσης σε σχέση με την μεταβολή μήκους για τον αγωγό II με την Μέθοδο B.....	36
Πίνακας 8:Μεταβολή πίεσης κατάρρευσης σε σχέση με την μεταβολή μήκους για τον αγωγό I με ατέλεια Τύπου II.....	41
Πίνακας 9:Μεταβολή πίεσης κατάρρευσης σε σχέση με την μεταβολή μήκους για τον αγωγό II με ατέλεια Τύπου II.....	42
Πίνακας 10: Αποτελέσματα επιρροής παραμενουσών τάσεων στην πίεση κατάρρευσης για τον αγωγό I.....	47
Πίνακας 11:Αποτελέσματα επιρροής παραμενουσών τάσεων στην πίεση κατάρρευσης για τον αγωγό II.....	48
Πίνακας 12: Πίνακας υπολογισμένων πιέσεων διάδοσης για τους αγωγούς I και II.....	54
Πίνακας 13: Δεδομένα για υπολογισμούς από τα πρότυπα API και DNV.....	66
Πίνακας 14: Αποτελέσματα πιέσεων σε MPa για τον δεδομένο αναστολέα για τον αγωγό I	66

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΑΓΩΓΟΙ

Με τις ενεργειακές απαιτήσεις παγκοσμίως να σημειώνουν σημαντικές αυξήσεις τον τελευταίο αιώνα η μόνη μορφή ενέργειας που μπορούσε να τις ικανοποιήσει άμεσα ήταν η καύση υδρογονανθράκων. Για τον λόγο αυτό η παραγωγή πετρελαίου και πιο πρόσφατα, φυσικού αερίου έχει αυξηθεί δραματικά τις τελευταίες δεκαετίες. Με τα χερσαία αποθέματα να εξαντλούνται, στα τέλη του 19^{ου} αιώνα στην California της Αμερικής έγιναν οι πρώτες προσπάθειες για άντληση πετρελαίου από την θάλασσα σε νερά κοντά στην ακτή. Υπάρχουν πλέον πάνω από 900 μεγάλοι σταθμοί άντλησης πετρελαίου και φυσικού αερίου παγκοσμίως με ικανότητες άντλησης σε πολύ μεγάλα βάθη. Αυτή την στιγμή, το "παγκόσμιο ρεκόρ" για άντληση πετρελαίου είναι τα 2934m στον Κόλπο του Μεξικού ενώ αντίστοιχα για το φυσικό αέριο το μέγιστο βάθος είναι 2700m πάλι στον Κόλπο του Μεξικού και υπάρχουν στόχοι για άντληση σε βάθη των 3-4km [1].

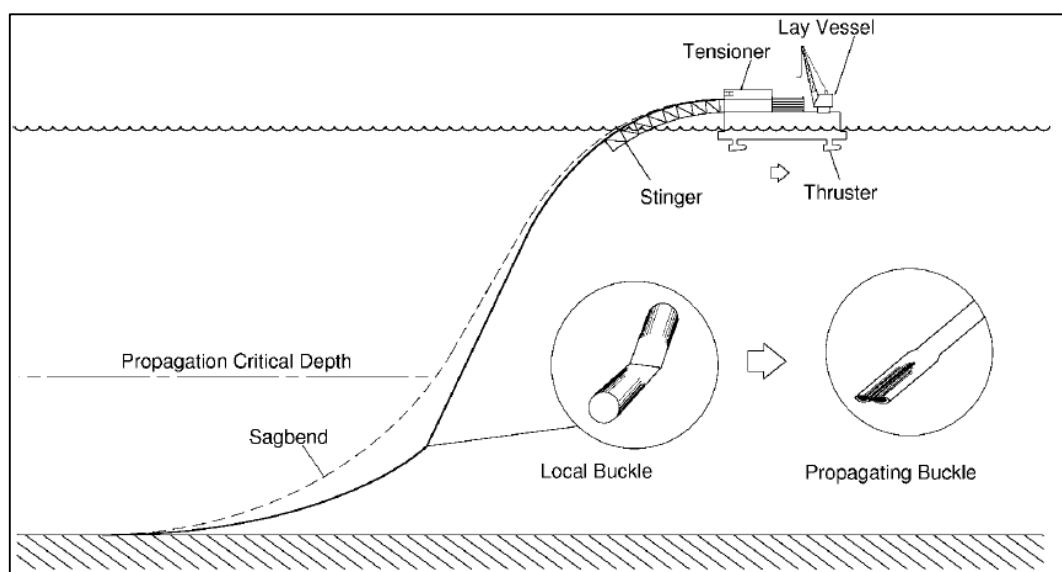


Εικόνα 1: Σύστημα άντλησης πετρελαίου/φυσικού αερίου

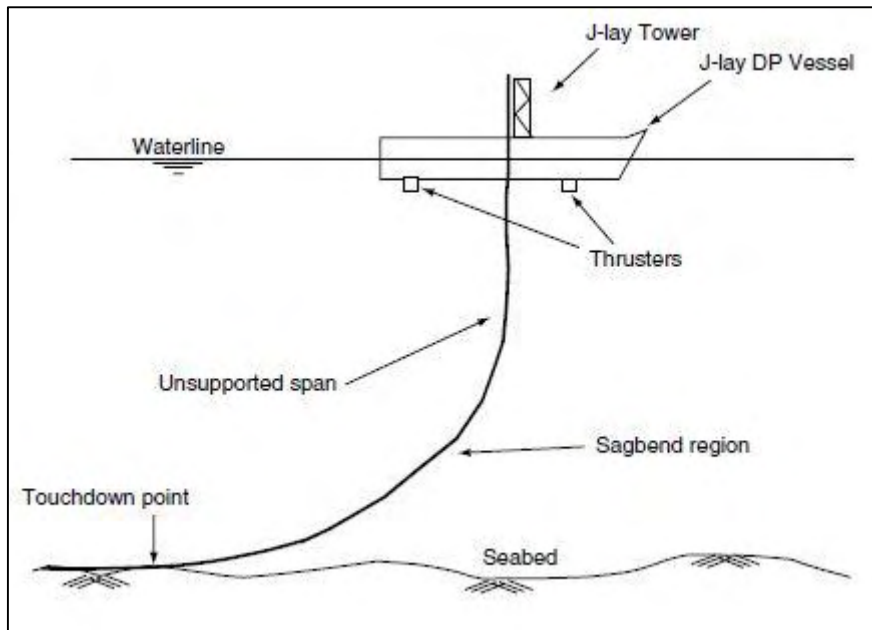
Για την μεταφορά του πετρελαίου και του φυσικού αερίου χρησιμοποιούνται υποθαλάσσιοι αγωγοί οι οποίοι εξαιτίας των φορτίων πίεσης που δέχονται σε αυτά τα βάθη πρέπει να έχουν μεγάλη αντοχή. Καταπόνηση των αγωγών προκαλείται κυρίως από τις μεγάλες εξωτερικές πιέσεις από το νερό αλλά και από εξωγενείς δυνάμεις (π.χ. σεισμός) ενώ καταπονούνται επίσης σημαντικά και από την διαδικασία εγκατάστασής τους στα μεγάλα αυτά βάθη. Ο συνδυασμός όλων αυτών των φορτίων δημιουργεί ένα σύνθετο πρόβλημα με πολλές παραμέτρους που πρέπει να αναλυθεί για να είναι δυνατός ο σωστός και ασφαλής σχεδιασμός των αγωγών με σημαντικότερη εξ αυτών να είναι η διαδιδόμενη ύβωση.

1.1.1 ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗ ΥΒΩΣΗ

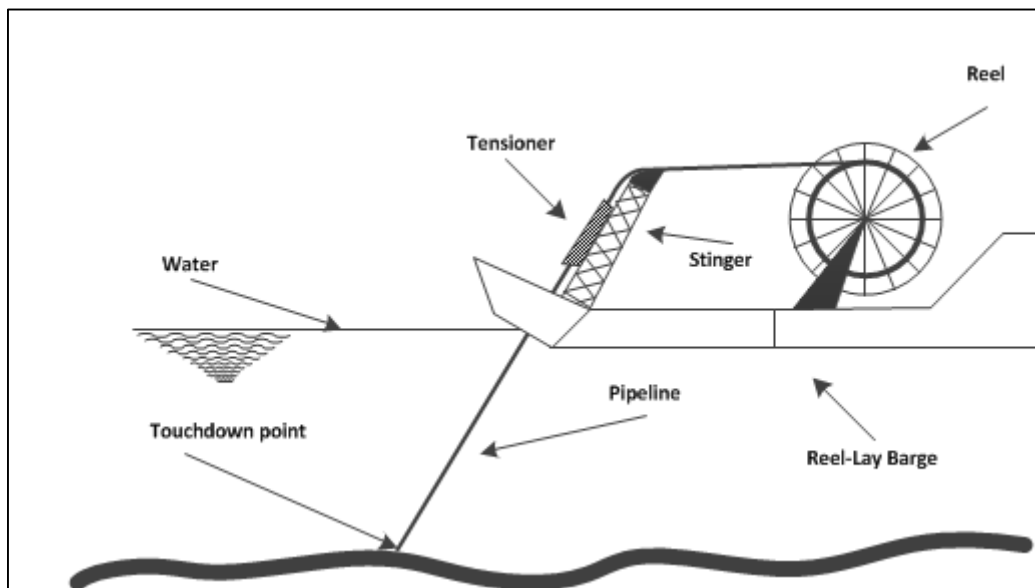
Το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης αναφέρεται στην ανεξέλεγκτη αστοχία του αγωγού κατά το μήκος του εφόσον καταρρεύσει μια πρώτη διατομή του. Η αστοχία της πρώτης διατομής οφείλεται στην ύπαρξη ατελειών στον αγωγό και στην παρουσία υψηλής πίεσης σε μεγάλα θαλάσσια βάθη. Οι ατέλειες αυτές μπορεί να είναι μικρές αλλοιώσεις στην τέλεια γεωμετρία και μπορούν να προκληθούν από διάφορους τρόπους. Σημαντικότερη πηγή ατελειών είναι η διαδικασία παραγωγής τους στο εργοστάσιο και η μεταφορά τους για την πόντιση. εισόδου του αγωγού στο νερό και η εγκατάστασή του στον πυθμένα, η λεγόμενη διαδικασία "πόντισης". Με το πέρασμα των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας, δημιουργήθηκαν αρκετοί τρόποι πόντισης με τους τρεις κυριότερους να είναι η μέθοδος S-lay, η μέθοδος J-lay και η πιο πρόσφατη Reel pipe laying [2].



Εικόνα 2: S-lay μέθοδος πόντισης



Εικόνα 3: J-lay μέθοδος πόντισης



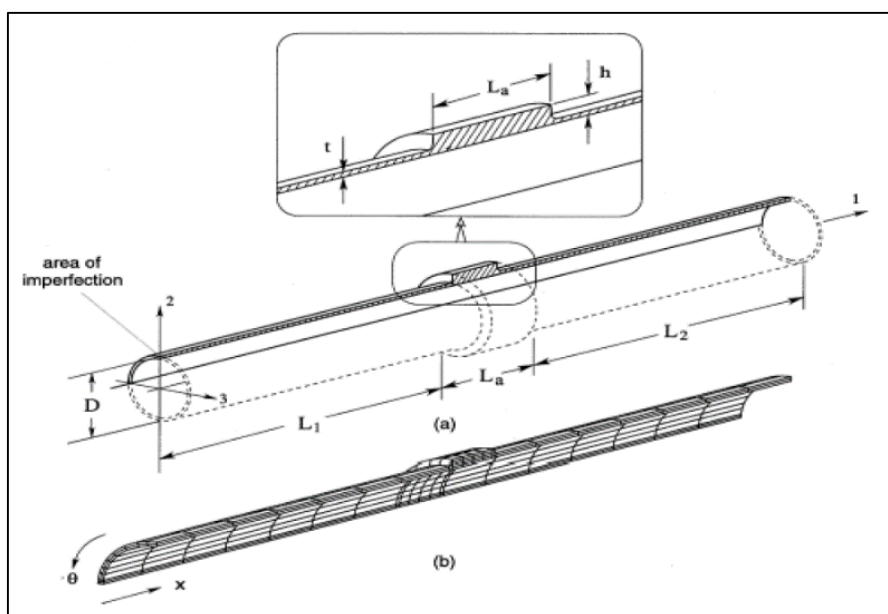
Εικόνα 4: Reel pipe laying μέθοδος πόντισης

Κατά την διαδικασία πόντισης ο αγωγός δέχεται ταυτόχρονα κάμψη, εφελκυσμό καθώς και την υδροστατική πίεση που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο βάθος. Το σημείο "sagbend" που αναφέρεται και στην Εικόνα 2 είναι εκείνο που είναι πιο πιθανό να δημιουργήσει την αστοχία στον αγωγό καθώς εκεί είναι το σημείο μέγιστης καταπόνησης του αγωγού κατά την εισαγωγή του στο νερό. Ατέλειες όμως που δημιουργούνται κατά την κατασκευή του αγωγού από το εργοστάσιο, από την μεταφορά του, ακόμα και κατά τον χειρισμό του στο σκάφος μπορούν να μειώσουν σημαντικά την αντοχή σε πίεση.

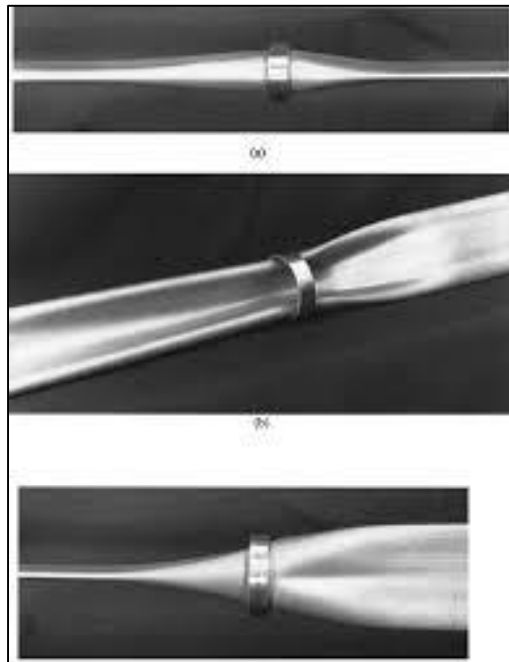
Ο λόγος που ακόμα και μικρές ατέλειες είναι επικίνδυνες είναι επειδή αδυνατίζουν την διατομή του αγωγού στο σημείο που βρίσκονται, μειώνοντας την αντοχή του και αναλόγως με τις τάσεις που δέχεται μπορεί να οδηγήσουν στην "κατάρρευση" της διατομής αυτής. Το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης εκφράζει αυτό που ακολουθεί, δηλαδή, την διαδοχική κατάρρευση των γειτονικών διατομών μέχρι που τελικά οδηγείται στην αστοχία ένα πολύ μεγάλο μήκος του αγωγού.

1.1.2 ΑΝΑΣΤΟΛΗ ΤΗΣ ΥΒΩΣΗΣ

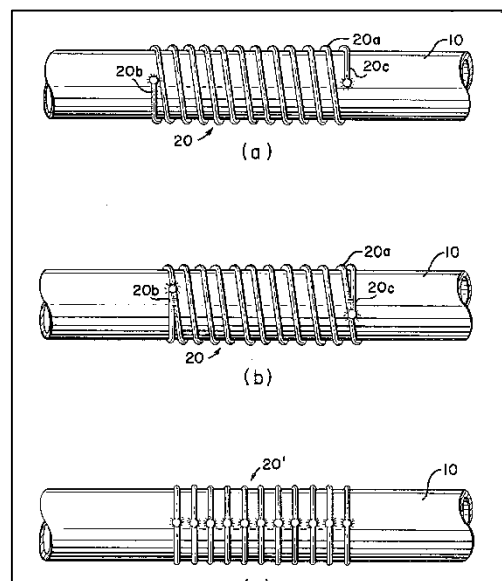
Λόγω του μεγέθους του αγωγού που αστοχεί λόγω του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης γίνεται αντιληπτό το πόσο σοβαρό πρόβλημα αυτή δημιουργεί. Η διαδιδόμενη ύβωση σταματάει όταν η υδροστατική πίεση που ασκείται γίνει μικρότερη από την πίεση διάδοσης η οποία θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 1.1.3. Εξαιτίας όμως του βάθους που βρίσκονται οι αγωγοί, η υδροστατική πίεση έχει πολύ μεγάλη τιμή και μέχρι να γίνει μικρότερη της πίεσης διάδοσης θα έχουν καταστραφεί εκατοντάδες μέτρα του αγωγού. Η λύση η οποία έχει καθιερωθεί και χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά πλέον είναι η τοποθέτηση μηχανισμών αναστολής (buckle arrestors) ανά τακτά διαστήματα στον αγωγό, οι λεγόμενοι "αναστολείς". Υπάρχουν αρκετοί τύποι αναστολέων με τους κυριότερους να είναι οι: "integral-ring" (Εικόνα 5), "slip on" (Εικόνα 6) και οι "spiral" (Εικόνα 7). Οι τρεις αυτοί τύποι, διαφέρουν τόσο στην γεωμετρία τους όσο και στον τρόπο σύνδεσής τους στον αγωγό [3] [4] [5].



Εικόνα 5: Αναστολέας ύβωσης τύπου Integral-Ring (Netto & Kyriakides, 1999)



Εικόνα 6: Αναστολέας ύβωσης τύπου Slip-On (Kyriakides & Babcock, 1980)



Εικόνα 7: Αναστολέας ύβωσης τύπου Spiral (Kyriakides & Babcock, 1982)

Η παρούσα διπλωματική αναλύει τον τύπο "integral ring" ο οποίος χρησιμοποιείται περισσότερο σε εφαρμογές σε μεγάλα βάθη. Αποτελεί ουσιαστικά δακτύλιο ίδιας εσωτερικής διατομής με αυτή του αγωγού, όμως έχει αρκετά μεγαλύτερο πάχος. Δεδομένου του ότι οι αγωγοί κατασκευάζονται από τμήματα σωλήνων μικρού μήκους (συνήθως 20-30 m) τα οποία στοιβάζονται στην φορτηγίδα και έπειτα συγκολλούνται

διαδοχικά κατά την πόντισή τους, οι αναστολές αυτού του τύπου συνδέονται με τους αγωγούς με συγκόλληση ενδιάμεσα δυο τμημάτων αγωγού.

Ο λόγος που τοποθετούνται αυτοί οι δακτύλιοι στους αγωγούς είναι ότι λόγω της αυξημένης ακαμψίας τους, η διαδιδόμενη ύβωση δεν θα μπορέσει να καταρρεύσει τις διατομές τους με αποτέλεσμα το φαινόμενο να σταματάει εκεί. Με αυτόν τον τρόπο η αστοχία περιορίζεται στο τμήμα ανάμεσα σε δυο αναστολές το οποίο, με κατάλληλη διαδικασία μπορεί να αντικατασταθεί.

1.1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΙΕΣΗΣ

- Κρίσιμη πίεση λυγισμού

Για τον κάθε αγωγό υπάρχει μια κρίσιμη πίεση P_{cr} κάτω από την οποία θα οδηγηθεί σε αστοχία με αποτέλεσμα να ξεκινήσει η διαδιδόμενη ύβωση και μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από την σχέση που δημοσιεύτηκε από τον Langner το 1984 [6] :

$$P_{cr} = \frac{P_e P_y}{\sqrt{P_y^2 + P_e^2}} \quad (1.1)$$

Η P_e αποτελεί το κρίσιμο φορτίο λυγισμού για ελαστικό δακτύλιο υπό ομοιόμορφη εξωτερική πίεση και υπολογίζεται ως:

$$P_e = \frac{2E}{1 - \nu^2} \left[\frac{t}{D} \right]^3 \quad (1.2)$$

όπου ν ο λόγος του Poisson, E το μέτρο Ελαστικότητας, t το πάχος και D η διάμετρος του δακτυλίου αντίστοιχα.

Αντίστοιχα το P_y ορίζεται ως η τιμή της εξωτερικής πίεσης που απαιτείται για την πλήρη πλαστικοποίηση της διατομής του δακτυλίου και υπολογίζεται από:

$$P_y = 2\sigma_y \frac{t}{D} \quad (1.3)$$

όπου σ_y , το όριο διαρροής του υλικού του αγωγού. Οι παραπάνω εξισώσεις έχουν ισχύ σε δακτυλίους χωρίς αρχικές ατέλειες με ελαστική συμπεριφορά και δίνουν το θεωρητικό άνω όριο της αντοχής αγωγού σε κατάρρευση. Στην πραγματικότητα οι αγωγοί θα έχουν ατέλειες οι οποίες θα μειώσουν την αντοχή τους οπότε για την πραγματική πίεση που θα χρειάζεται να τους ασκηθεί ούτως ώστε να καταρρεύσουν P_c , θα ισχύει ότι:

$$P_c \leq P_{cr} \quad (1.4)$$

Για τον λόγο αυτό ενσωματώνονται συντελεστές ασφαλείας κατά τον σχεδιασμό των αγωγών.

- Πίεση διάδοσης

Μόλις μια διατομή του αγωγού καταρρεύσει, υπό υδροστατική πίεση θα διαδοθεί η ύβωση με διαδοχική κατάρρευση των διατομών του σωλήνα. Η ελάχιστη πίεση που απαιτείται για να διατηρηθεί η διάδοση του φαινομένου ονομάζεται πίεση διάδοσης P_p , η οποία είναι πολύ μικρότερη από την κρίσιμη πίεση P_{cr} . Σε συνήθεις εφαρμογές ισχύει γενικώς ότι:

$$\frac{1}{10} P_{cr} \leq P_p \leq \frac{1}{5} P_{cr} \quad (1.5)$$

Για τον υπολογισμό της πίεσης διάδοσης, δόθηκε για πρώτη φορά από τους Palmer & Martin (1975) [7] για αγωγούς μεγάλου μήκους μια αναλυτική εξίσωση:

$$P_p = \pi \sigma_y \left(\frac{t}{D} \right)^2 \quad (1.6)$$

Με το όριο διαρροής να υπολογίζεται ως η τάση που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση 0.005, t το πάχος και D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού.

Οι Kyriakides & Babcock (1982) [5] ύστερα από διεξαγωγή πειραμάτων σε αγωγούς αλουμινίου και χάλυβα κατέληξαν σε μια εμπειρική εξίσωση για τον υπολογισμό της πίεσης διάδοσης που μπορεί να αναχθεί στην αντίστοιχη των Palmer & Martin:

$$P_p = A\sigma_y \left(\frac{t}{D}\right)^\beta \quad (1.7)$$

Για σχεδιασμό αγωγών με χαλύβδινο υλικό οι συντελεστές A, β συνιστώνται οι τιμές $A=14.5$ και $\beta=2.254$ ενώ για αγωγούς αλουμινίου $A=11.3$ και $\beta=2.281$.

- Πίεση ανάσχεσης αναστολέα

Χαρακτηριστική πίεση για τον αναστολέα αποτελεί η πίεση ανάσχεσης (cross-over pressure) η οποία συμβολίζεται με P_{co} . Η πίεση αυτή εκφράζει την τιμή της ομοιόμορφης εξωτερικής πίεσης που πρέπει να ασκηθεί στον αγωγό στον οποίο έχει ήδη αναπτυχθεί μια διαδιδόμενη ύβωση ώστε αυτή να υπερβεί τον αναστολέα και να συνεχίσει στο επόμενο κομμάτι του αγωγού. Διαφορετικά, αν ισχύει ότι

$$P_p < P_{co} \quad (1.8)$$

η ύβωση θα ανασταλεί και δεν θα προχωρήσει στον υπόλοιπο αγωγό. Η πίεση ανάσχεσης εξαρτάται από τις διαστάσεις του αναστολέα (μήκος L_a και πάχος t_a) σε σχέση με τις διαστάσεις του αγωγού (D, t). Σε αρκετές εργασίες [8] [3] [9] ορίζεται η ανηγμένη αποτελεσματικότητα (normalized efficiency) του αναστολέα ως:

$$n = \frac{P_{co} - P_p}{P_c - P_p} \quad (1.9)$$

για την οποία θα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$P_c > P_{co} \quad (1.10)$$

Στην περίπτωση που δεν ίσχυε η σχέση (1.8) ο αναστολέας θα είχε μεγαλύτερη αντοχή από ότι θα είχε όλος ο αγωγός σε αστοχία, οπότε σε κάθε περίπτωση θα κατέρρεε όλος ο αγωγός εκατέρωθεν του αναστολέα. Η μη ικανοποίηση της ανισότητας (1.10) σημαίνει πως έχει γίνει υπερδιαστασιολόγηση και για το μέγεθος του αναστολέα πέραν της δυσκολίας στην κατασκευή και τον χειρισμό, είναι πολύ μεγάλο το επιπλέον

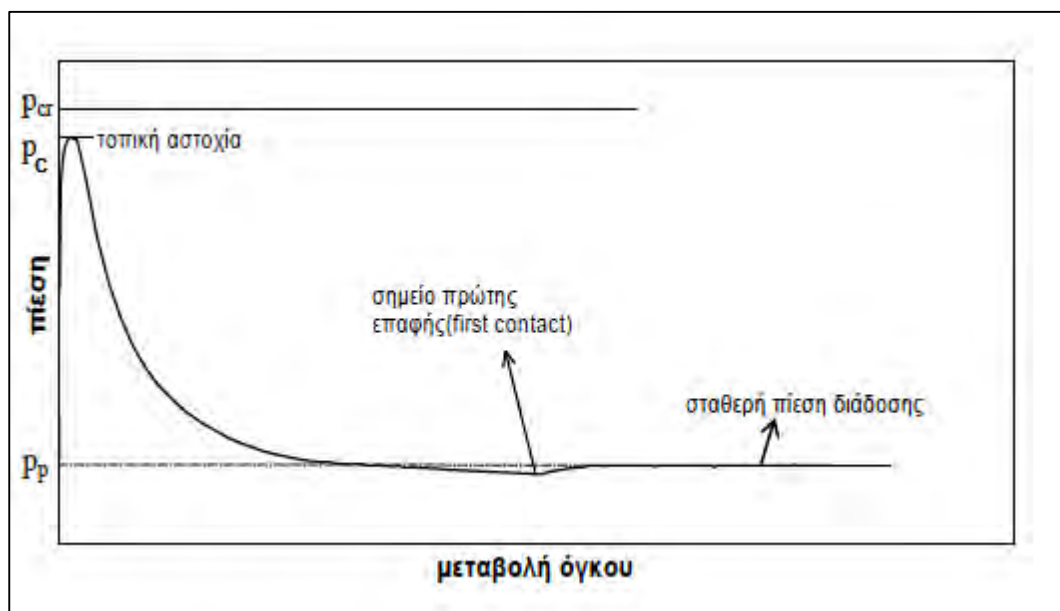
κόστος. Οπότε γίνεται αντιληπτό πως δεν έχει γίνει βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του.

1.1.4 ΕΝΑΡΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι ισχύει πως:

$$P_p \leq P_c \leq P_{cr} \quad (1.11)$$

Μια καλύτερη εικόνα για τις πιέσεις που δέχεται ο αγωγός και την συσχέτιση μεταξύ τους κατά την διαδικασία κατάρρευσης της πρώτης διατομής και της διαδιδόμενης ύβωσης που ακολουθεί δίνει το Γράφημα 1.



Γράφημα 1: Μεταβολή πίεσης ως προς την μεταβολή του όγκου του αγωγού

Στο διάγραμμα αυτό αναπαρίσταται η πίεση που απαιτείται ώστε να παραμορφωθεί ο αγωγός σε σχέση με την μεταβολή του όγκου του καθ' όλη την διαδικασία που προαναφέρθηκε. Το διάγραμμα δείχνει ποιοτικά την κατάσταση ισορροπίας του αγωγού κατά το φαινόμενο της δημιουργίας και διάδοσης της ύβωσης. Αρχικά, παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση της πίεσης μέχρι αυτή να φτάσει την τιμή P_c , την πίεση δηλαδή έναρξης αστοχίας η οποία όπως φαίνεται αντιστοιχεί σε πολύ μικρή μεταβολή όγκου. Όπως είναι λογικό, η P_c είναι μικρότερη της P_{cr} , το μέγεθος της

διαφοράς τους εξαρτάται από την αρχική ατέλεια. Όσο πιο μεγάλη η αρχική ατέλεια, τόσο πιο πολύ θα απέχει η πίεση έναρξης από την θεωρητική κρίσιμη τάση. Την αρχική αστοχία-ύβωση ακολουθεί μια απότομη πτώση της πίεσης η οποία εκφράζει την κατάρρευση της διατομής που είχε την ατέλεια. Η πίεση συνεχίζει να πέφτει έως ότου γίνει επαφή δυο αντιδιαμετρικών σημείων της διατομής. Σε εκείνο το σημείο υπάρχει μια μικρή αύξηση της πίεσης που αντιστοιχεί στην μέγιστη περεταίρω θλίψη που μπορεί να πάρει μια διατομή πριν ξεκινήσει να καταρρέει η επόμενη διατομή. Στην συνέχεια η πίεση σταθεροποιείται και αυτή η τιμή είναι η πίεση διάδοσης.

1.2 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην κατανόηση και μελέτη του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης καθώς και της αναστολής της σε υποθαλάσσιους αγωγούς. Γίνεται ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν την αντοχή των αγωγών χρησιμοποιώντας προσομοίωση αριθμητικών μοντέλων. Χρησιμοποιώντας πρότυπα σχεδιασμού αγωγών, θα σχεδιαστούν αναστολείς τύπου "integral" των οποίων οι διαστάσεις θα βελτιστοποιηθούν ενώ θα προταθεί και θα δοκιμαστεί ένας νέος αναστολέας. Γίνεται ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν την αντοχή ενός αγωγού χρησιμοποιώντας μη γραμμικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία μπορούν να περιγράψουν τις γεωμετρικές μη γραμμικότητες και ελαστοπλαστική συμπεριφορά με ακριβή τρόπο.

Στο 2^ο κεφάλαιο εξετάζεται η αστοχία δυο διαφορετικών αγωγών σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης και μελετάται η αλληλεπίδραση που έχουν οι παράμετροι που προσδιορίζουν το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης μεταξύ τους, μέσω κατάλληλης παραμετρικής μελέτης.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται τριδιάστατη ανάλυση μεγάλου μήκους των δυο αγωγών προς τον προσδιορισμό της πίεσης διάδοσης καθώς και της επιρροής των βασικών μεγεθών του αγωγού στην πίεση έναρξης.

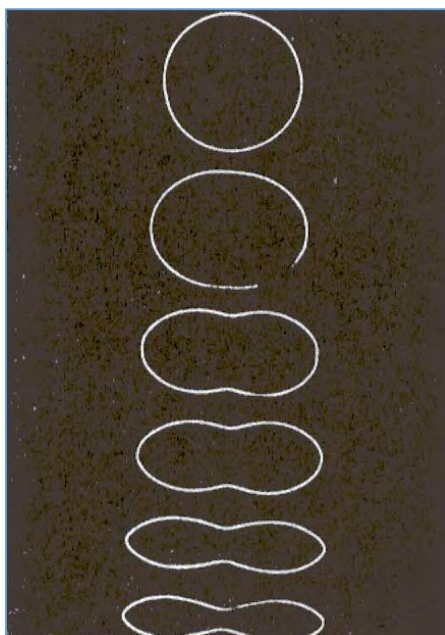
Στο 4^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται σχεδιασμός αναστολέων για τους αγωγούς με βάση διεθνή πρότυπα σχεδιασμού και γίνεται σύγκριση με τους αναστολείς που έχουν προταθεί από τις κατασκευάστριες εταιρείες για τους προς μελέτη αγωγούς.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας.

2 ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η διδιάστατη αστοχία δακτυλίων σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης ως μια πρώτη προσέγγιση για να προσδιοριστεί η επιρροή των βασικών παραμέτρων του προβλήματος, καθώς και ένας αρχικός υπολογισμός της πίεσης διάδοσης. Οι Kyriakides & Babcock (1982) μέσω πειραμάτων κατέληξαν στην διαπίστωση πως οι διαδοχικές διατομές κάθε αγωγού, στον οποίο λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης συμπεριφέρονται όπως ένας δακτύλιος όταν αυτός αστοχεί λόγω αστάθειας. Οι δακτύλιοι λοιπόν που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις που ακολουθούν εκφράζουν μια μοναδική διατομή του αγωγού.

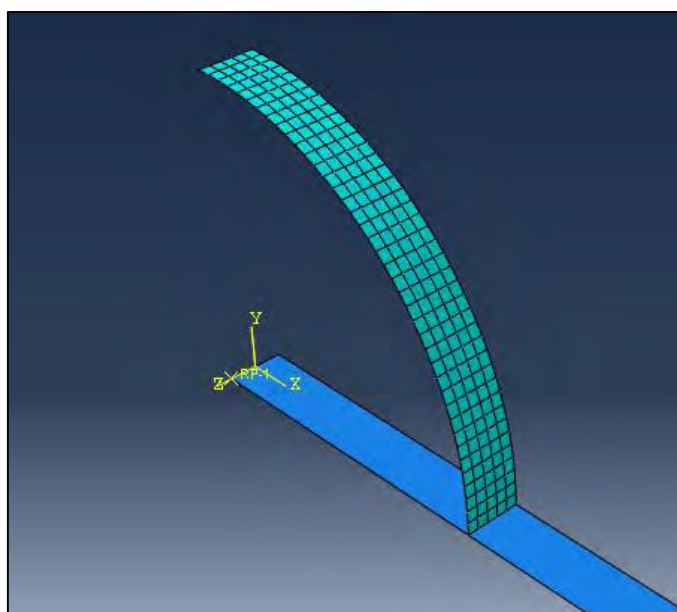


Εικόνα 8: Παραμορφωμένες καταστάσεις δακτυλίου κατά την αστοχία (Kyriakides & Babcock, 1982)

Οι δακτύλιοι που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις, είναι τριών διαστάσεων με το μήκος τους όμως κατά τον διαμήκη άξονα "Z" να είναι σχετικά μικρό σε σχέση με την διάμετρο του αγωγού. Η ανάλυση πραγματοποιείται σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain) στο επίπεδο "X-Y" ενώ τα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη δεν έχουν εξάρτηση από το μήκος στον άξονα "Z".

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το πρόγραμμα ABAQUS το οποίο επιτρέπει τον πλήρη καθορισμό των συνοριακών συνθηκών στην ανάλυση, ενώ υπάρχει δυνατότητα διαμόρφωσης όλων των ιδιοτήτων του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί

για τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Οι αναλύσεις του φαινομένου γίνονται αρχικά διδιάστατα, καθώς έτσι υπάρχει σημαντικό κέρδος χρόνου δεδομένου του μειωμένου φόρτου υπολογισμών που πρέπει να γίνουν ώστε να προκύψουν τα αποτελέσματα. Το υπολογιστικό κέρδος αυτό ενισχύεται περαιτέρω με την ανάλυση ενός τεταρτημρίου της διατομής. Επειδή ισχύει η διπλή συμμετρία τα αποτελέσματα που θα προκύψουν μπορούν να αναχθούν σε ολόκληρη την διατομή χωρίς την ύπαρξη σφάλματος. Όπως γίνεται αντιληπτό από την Εικόνα 8 οι δακτύλιοι υφίστανται μεγάλες παραμορφώσεις που σημαίνει ότι δημιουργούνται γεωμετρικές μη γραμμικότητες κατά την πλαστική του κατάρρευση. Χρησιμοποιώντας την εντολή "nlgeom" σε κάθε "step" (τμήμα ανάλυσης) καθορίζονται τα βήματα με τα οποία θα προχωρήσει η μη γραμμική ανάλυση.



Εικόνα 9: Αναπαράσταση μοντέλου διδιάστατης ανάλυσης στο ABAQUS

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ

Στην παρούσα εργασία, όλες οι αναλύσεις και τα αντίστοιχα αποτελέσματά τους θα αφορούν δυο διαφορετικούς αγωγούς. Οι δυο αυτοί αγωγοί είναι κυκλικής διατομής, ίδιου υλικού οι οποίοι διαφέρουν μόνο στα γεωμετρικά τους στοιχεία, τα οποία έχουν επιλεγεί για να συμπίπτουν με αυτά που χρησιμοποιούνται πιο συχνά σε εφαρμογές σε μεγάλα βάθη.

Το υλικό που χρησιμοποιείται στους αγωγούς είναι αγωγός X-65 και αντιστοιχεί σε έναν χάλυβα υψηλής αντοχής ο οποίος χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε υποθαλάσσιους

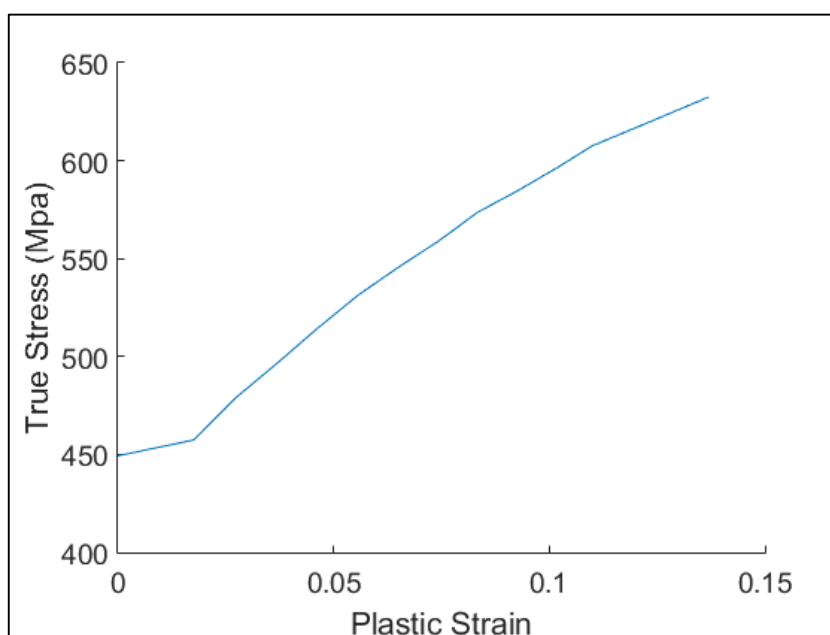
αγωγούς, εξαιτίας της αντοχής του, της ολκιμότητας και στην αντοχή του στην διάβρωση που προκαλεί η έκθεσή του στην θάλασσα [10].

Για το χάλυβα X-65 το μέτρο ελαστικότητας είναι $E=210$ GPa, ο λόγος του Poisson είναι $\nu=0.3$ και το ονομαστικό όριο διαρροής του είναι 450 MPa. Οι αναλύσεις αφορούν όμως, συμπεριφορά με ανελαστικές παραμορφώσεις που σημαίνει ότι το πρόβλημα είναι μη γραμμικό ως προς το υλικό και χρειάζεται ένα κατάλληλο μοντέλο για την πλαστική συμπεριφορά του υλικού. Το μοντέλο αυτό είναι αυτό της πλαστικότητας Von Mises με ισοτροπική κράτωση και κάνει χρήση του διαγράμματος πραγματικής τάσης με την λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση της μονοαξονικής καμπύλης του υλικού. Οι συντεταγμένες των σημείων της καμπύλης υλικού εισάγονται στο ABAQUS και συσχετίζονται με τις ονομαστικές τάσεις παραμορφώσεις ως:

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_{ln}^p = \ln(1 + \varepsilon) - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (2.2)$$

Όπου ε_{ln}^p είναι η λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση, σ_{true} είναι η πραγματική τάση, σ και ε είναι η ονομαστική τάση και παραμόρφωση αντίστοιχα και E είναι το μέτρο ελαστικότητας. Η καμπύλη ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του υλικού που εισάχθηκε στο ABAQUS φαίνεται στο παρακάτω γράφημα No 2.



Γράφημα 2: Αναπαράσταση πραγματικής τάσης- πλαστικής παραμόρφωσης για το υλικό X-65

- Αγωγός I

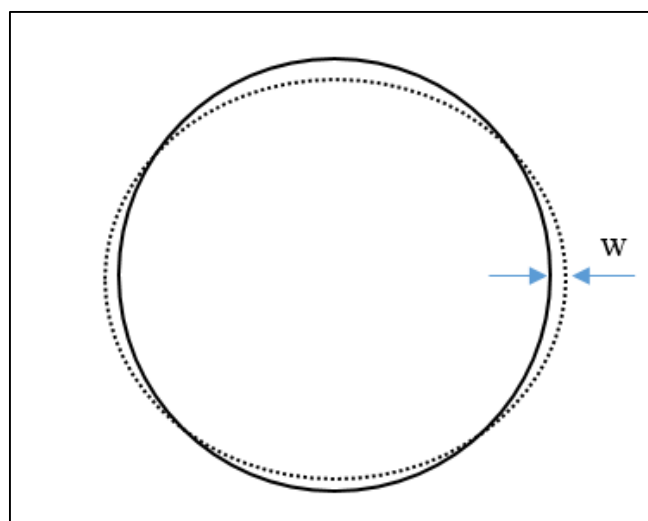
Ο αγωγός I έχει εξωτερική διάμετρο $D=32$ in (812.8mm) και πάχος $t=1.53$ in (39mm) και χρησιμοποιείται σε βάθη μέχρι 2200 m.

- Αγωγός II

Ο αγωγός II έχει διάμετρο $D=36$ in (925.4mm) και πάχος $t=1.07$ in (27.2mm) ο οποίος χρησιμοποιείται σε βάθη μέχρι 800 m.

2.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΑΤΕΛΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΙΕΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

Η αρχική ατέλεια σε έναν αγωγό αποτελεί την κύρια αιτία που οδηγεί στην ύβωση μιας διατομής και μετέπειτα στην διάδοσή της στον υπόλοιπο αγωγό. Στα στάδια που ακολουθεί ο αγωγός από την κατασκευή του μέχρι και την πόντισή του είναι ασφαλές να υποθεθεί πως θα υπάρχει τουλάχιστον μια διατομή στο μήκος του, η οποία θα έχει μια μικρή ατέλεια. Οι ατέλειες έχουν διάφορες μορφές όπως είναι οι ατέλειες γεωμετρικής φύσεως, ατέλειες λόγω ανισοτροπίας του υλικού και ατέλειες λόγω μεταβολής πάχους περιφερειακά στον αγωγό. Στην παρούσα εργασία, θα μελετηθούν ατέλειες γεωμετρικής φύσεως. Οι ατέλειες αυτές προκαλούν μια οβαλότητα στον αγωγό, ο οποίος δεν έχει πλέον τέλεια κυκλική διατομή. Το μέγεθος της ατέλειας αυτής ορίζεται με τον λόγο w/R , όπου w είναι η μέγιστη παραμόρφωση από την αρχική "τέλεια" γεωμετρία όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: Αναπαράσταση γεωμετρικής ατέλειας/οβαλότητας

Λόγω ελέγχων που γίνονται στους αγωγούς πριν την εγκατάστασή τους μπορεί να ειπωθεί με ασφάλεια πως οι ατέλειες που συναντιούνται σε λειτουργικούς αγωγούς ανήκουν σε ένα εύρος τιμών του w/R μέχρι της τιμής 1 %. Στην ανάλυση που ακολουθεί μελετάται το πόσο η μεταβολή του λόγου w/R επηρεάζει την πίεση κατάρρευσης του αγωγού.

2.3.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ-ΠΛΕΓΜΑ-ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

- Μοντέλο

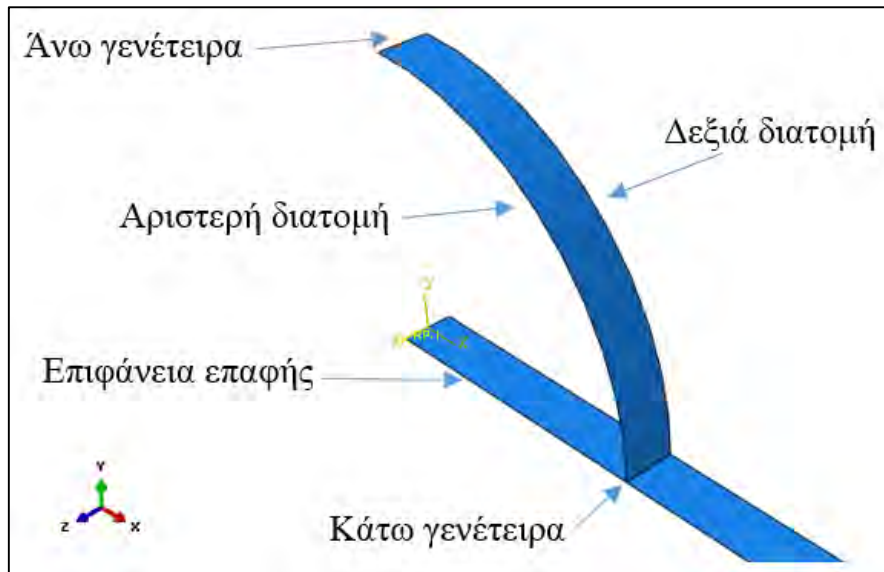
Η ανάλυση αφορά τους αγωγούς I και II, οπότε η διάμετρος και το πάχος τους είναι αυτή που ορίστηκε στο κεφάλαιο 2.2. Στον διαμήκη άξονα και για τους δυο αγωγούς το μήκος είναι 20mm ενώ το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το X-65 που περιγράφεται από το Γράφημα 2.

- Πλέγμα

Για την αριθμητική προσομοίωση των αγωγών χρησιμοποιούνται τετρακομβικά, μη γραμμικά, ελαστοπλαστικά, πεπερασμένα στοιχεία κελύφους, μειωμένης ολοκλήρωσης τύπου S4R. Στο μοντέλο, σχεδιάστηκε η διατομή με βάση την μέση διάμετρο $\left(\frac{D_{out}+D_{in}}{2}\right)$ και η κατανομή του πάχους γίνεται ομοιόμορφα στην πάνω και κάτω πλευρά της διατομής μέσω της εντολής Shell Section, με την επιλογή Middle Surface. Το πλέγμα αποτελείται από 246 κόμβους, με 6 κατά τον διαμήκη άξονα και 41 ανά διατομή, ενώ κατά το πάχος το ABAQUS χρησιμοποιεί 5 σημεία ολοκλήρωσης.

- Συνοριακές συνθήκες

Στο αρχικό βήμα της μη γραμμικής ανάλυσης, δηλώνονται συνοριακές συνθήκες στην άνω και στην κάτω γενέτειρα καθώς και στην αριστερά ή και δεξιά διατομή.



Εικόνα 11: Αναπαράσταση ακμών εφαρμογής συνοριακών συνθηκών

Στη άνω γενέτειρα έχουμε συμμετρία ως προς τον άξονα x , και οι κόμβοι που βρίσκονται σε αυτήν ανήκουν στο επίπεδο $y-z$. Λόγω της συμμετρίας κατά την κίνηση στο χώρο δεσμεύονται 3 από τους 6 βαθμούς ελευθερίας των κόμβων αυτών. Αυτοί είναι η μετατόπιση κατά τον άξονα x ($U_x=0$) καθώς και οι στροφές γύρω από τους άξονες x και y ($U_Ry=U_Rx=0$).

Στην κάτω γενέτειρα αντίστοιχα, οι κόμβοι της ανήκουν στο επίπεδο $x-z$ και έχουν συμμετρία ως προς τον y . Λόγω της συμμετρίας, οι 3 βαθμοί ελευθερίας που δεσμεύονται είναι η κίνηση κατά τον άξονα y ($U_y=0$) και οι στροφές γύρω από τους άξονες x και z ($U_Rx=U_Rz=0$).

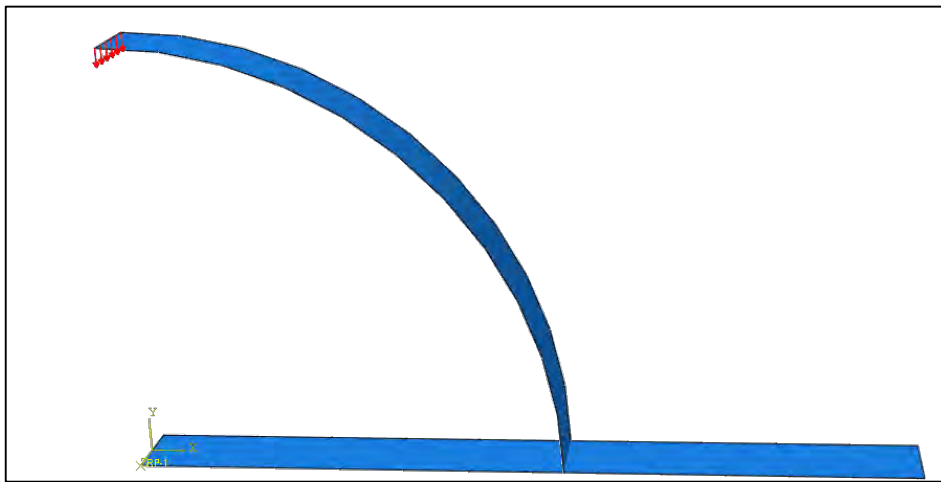
Στην αριστερή διατομή, οι κόμβοι έχουν συμμετρία ως προς τον άξονα z και δεσμεύεται η κίνηση κατά τον z ($U_z=0$) και οι στροφές κατά τον x και τον y ($U_Rx=U_Ry=0$).

Για την δεξιά διατομή ισχύουν τα ίδια με την αριστερή.

Η επιφάνεια επαφής ορίζεται στο ABAQUS με την εντολή Analytical Rigid Surface και προσομοιώνει ένα άκαμπτο σώμα που βρίσκεται στον επίπεδο $x-z$. Στην επιφάνεια αυτή δεσμεύονται και οι 6 βαθμοί ελευθερίας οπότε είναι αδύνατο να μετακινηθεί κατά την διάρκεια της ανάλυσης ($U_x=U_y=U_z=U_Rx=U_Ry=U_Rz=0$). Κάνοντας χρήση της εντολής Interactions δημιουργείται μια συσχέτιση της εσωτερικής επιφάνειας του

δακτυλίου με την επιφάνεια του άκαμπτου σώματος. Η συσχέτιση απαγορεύει στην εσωτερική επιφάνεια να διαπεράσει την άκαμπτη, καθώς αυτή δηλώνει επίσης την συμμετρία ως προς τον άξονα y . Όταν δηλαδή, ο δακτύλιος συναντήσει την επιφάνεια επαφής, ουσιαστικά προσομοιώνεται η επαφή του με το αντιδιαμετρικό κομμάτι του που δεν φαίνεται στην ανάλυση.

Στο δεύτερο βήμα της ανάλυσης, δημιουργείται η ατέλεια στον δακτύλιο. Στους κόμβους της άνω γενέτειρας επιβάλλεται μια νέα συνοριακή συνθήκη που τους μετατοπίζει παράλληλα στον άξονα y κατά μια δεδομένη τιμή.



Εικόνα 12: Επιβολή παραμόρφωσης στην άνω γενέτειρα του μοντέλου

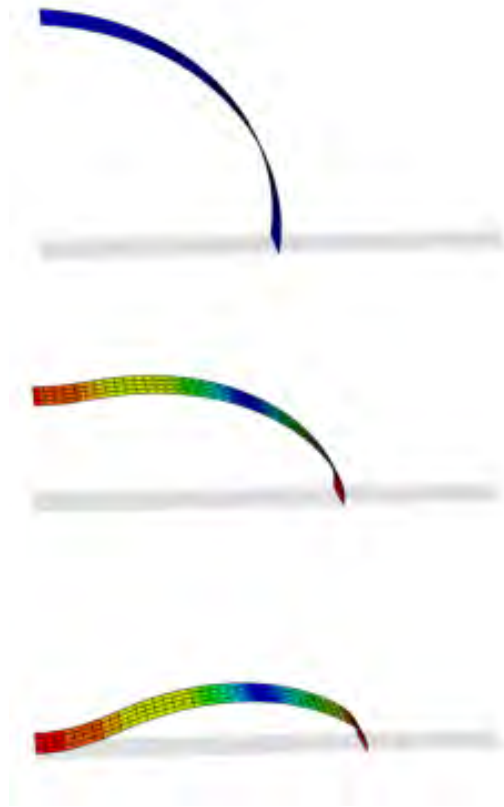
Στο τρίτο βήμα της ανάλυσης γίνεται άρση της επιβολής μετατόπισης και ο δακτύλιος επιστρέφει προς την αρχική του κατάσταση κατά ένα ποσοστό που αναλογεί στην ελαστική παραμόρφωση που μπορεί να πάρει λόγω υλικού. Η εναπομένουσα παραμόρφωση είναι η πλαστική και αποτελεί την τιμή του w που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης, γίνεται φόρτιση της εξωτερικής επιφάνειας με πίεση και γίνεται χρήση της μεθόδου του μήκους τόξου (Riks).

2.3.2 ΜΕΤΑΛΛΥΓΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Εφόσον προϋπάρχει ατέλεια, η εφαρμογή εξωτερικής πίεσης, θα οδηγήσει το δακτύλιο σε αστοχία. Οι αναλύσεις δείχνουν πως αρχικά, η τιμή της πίεσης αυξάνεται πολύ απότομα χωρίς να δημιουργεί μεγάλες μετατοπίσεις. Όταν η τιμή της πίεσης φτάσει την τιμή P_c τότε, ο δακτύλιος αστοχεί και η πίεση αρχίζει να πέφτει ενώ οι

παραμορφώσεις όλο και ενισχύονται. Οι κόμβοι της άνω γενέτειρας μετακινούνται πάνω στον άξονα y και προς το κέντρο του δακτυλίου ενώ οι κόμβοι της κάτω γενέτειρας κινούνται πάνω στον άξονα z και απομακρύνονται από το κέντρο. Αναπαράσταση αυτής της διαδικασίας φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 13: Διαδικασία παραμόρφωσης δακτυλίου υπό ομοιόμορφη εξωτερική πίεση (μεταλυσιμική συμπεριφορά)

2.3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Η διαδικασία που προαναφέρθηκε, ακολουθήθηκε για τις αναλύσεις και για τους δυο αγωγούς. Η παραμετρική μελέτη έγινε για εύρος τιμών w/R από μηδέν μέχρι 1%. Το μέγεθος ατέλειας, w μετριέται από το τέλος του τρίτου βήματος της ανάλυσης και εκφράζει την εναπομένουσα πλαστική παραμόρφωση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τους δυο αγωγούς φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Αγωγός I						
BC (mm)	LPF	Pc (Mpa)	W (mm)	R (mm)	W/R	(W/R)%
-5	0.492537	49.2537	0.0178229	406.4	0.000043856	0.004385556
-6	0.491528	49.1528	0.106118	406.4	0.000261117	0.026111713
-7	0.41336	41.336	0.49457	406.4	0.001216954	0.121695374
-8	0.379477	37.9477	0.973551	406.4	0.002395549	0.239554872
-9	0.349033	34.9033	1.61876	406.4	0.003983169	0.398316929
-10	0.32492	32.492	2.28132	406.4	0.005613484	0.561348425
-11	0.305359	30.5359	2.9816	406.4	0.007336614	0.733661417
-12	0.28771	28.771	3.73134	406.4	0.009181447	0.918144685
-13	0.271252	27.1252	4.53211	406.4	0.011151845	1.115184547
-14	0.257655	25.7655	5.4131	406.4	0.013319636	1.331963583
-15	0.24418	24.418	6.31239	406.4	0.015532456	1.553245571

Πίνακας 1: Αποτελέσματα μεταβολής λόγου w/R στην Pc για τον αγωγό I

Αγωγός II						
BC (mm)	LPF	Pc (Mpa)	W (mm)	R (mm)	W/R	(W/R)%
-10	0.123584	11.616896	0.265225	449.1	0.00059057	0.05906
-11	0.120985	11.37259	0.468226	449.1	0.001042587	0.10426
-12	0.119111	11.196434	0.695782	449.1	0.001549281	0.15493
-13	0.116433	10.944702	0.933354	449.1	0.002078277	0.20783
-14	0.112106	10.537964	1.32955	449.1	0.002960477	0.29605
-15	0.107898	10.142412	2.03776	449.1	0.00453743	0.45374
-16	0.102216	9.608304	2.79811	449.1	0.006230483	0.62305
-17	0.0985894	9.0702248	3.58866	449.1	0.007990782	0.79908
-18	0.0930621	8.5617132	4.39235	449.1	0.009780338	0.97803
-19	0.0915289	8.4206588	5.20328	449.1	0.011586016	1.1586

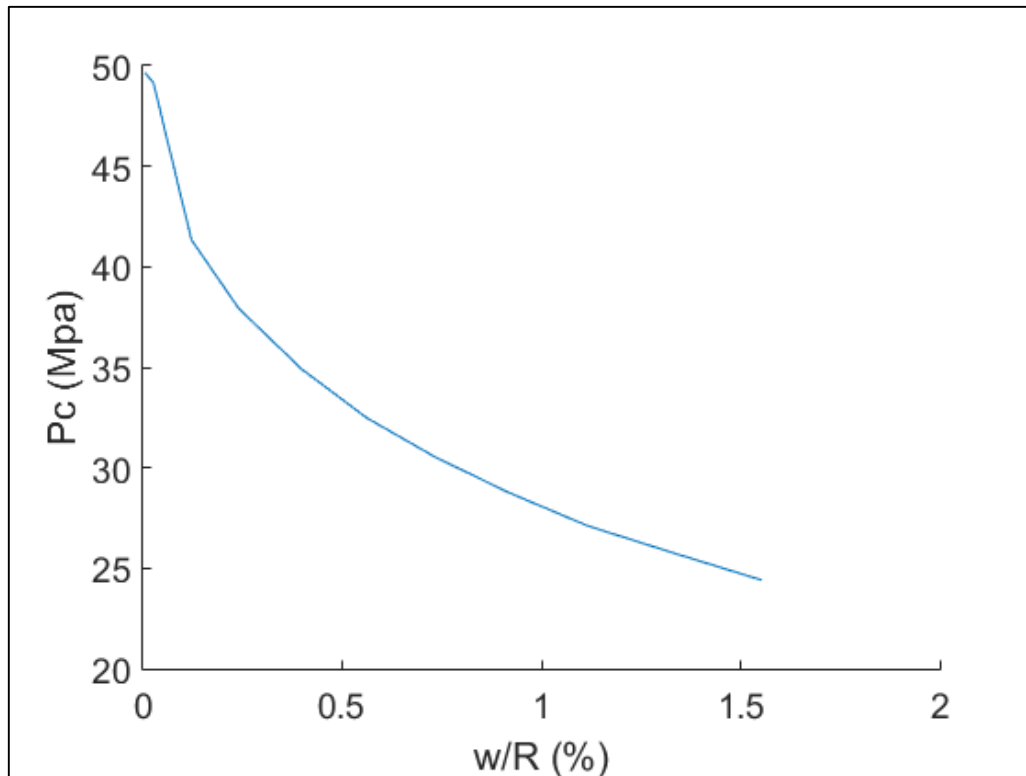
Πίνακας 2: Αποτελέσματα λόγου w/R στην Pc στον αγωγό II

Στους πίνακες αυτούς, η στήλη BC δηλώνει την τιμή της μετατόπισης που τέθηκε στο δεύτερο βήμα της ανάλυσης, στην άνω γενέτειρα σαν συνοριακή συνθήκη (Boundary Condition). Ο LPF είναι ένας συντελεστής που δημιουργεί το ABAQUS που ονομάζεται Load Proportionality Factor και ο οποίος όταν πολλαπλασιαστεί με την τιμή που δόθηκε ως βασικό φορτίο αναφοράς εξωτερικής πίεσης P_{out} δίνει την πραγματική τιμή της πίεσης που εφαρμόζεται στο δακτύλιο. Είναι δηλαδή:

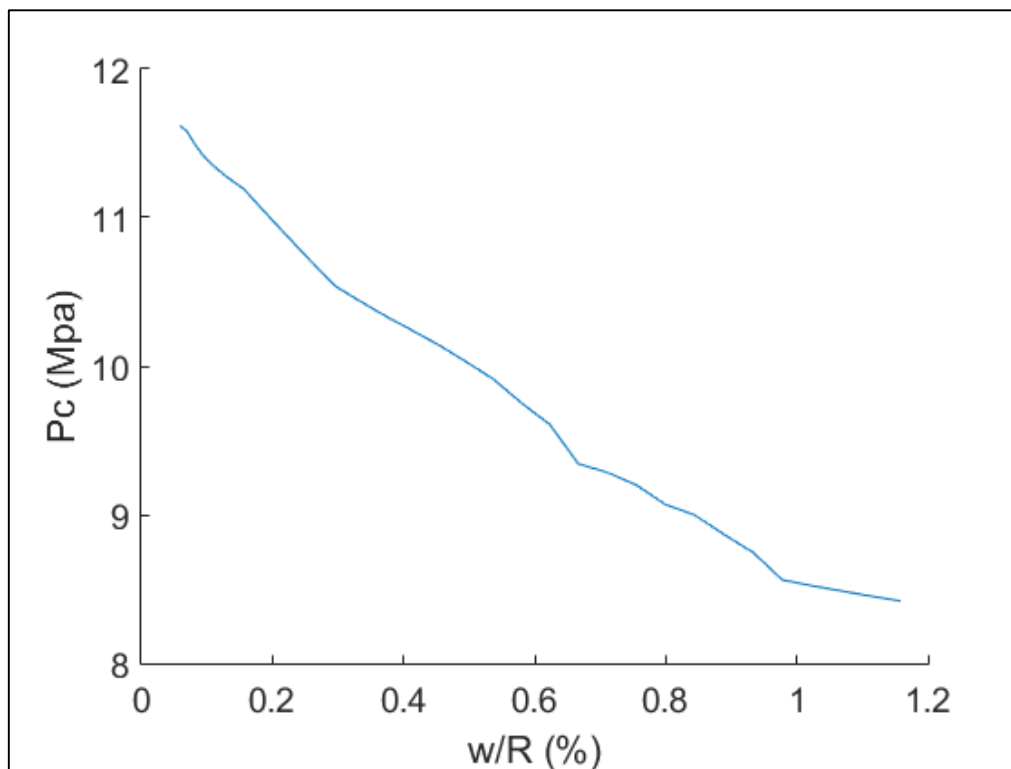
$$P = LPF * P_{out} \quad (2.3)$$

Χρησιμοποιώντας τον μέγιστο συντελεστή LPF για την κάθε ανάλυση βρίσκεται η μέγιστη εφαρμοζόμενη πίεση, δηλαδή η πίεση κατάρρευσης P_c . Η στήλη w δηλώνει την εναπομένουσα πλαστική παραμόρφωση U_y αφού επιτραπεί στον δακτύλιο να

επανέλθει για την αντίστοιχη αρχική μετατόπιση BC. Οι τελευταίες δυο στήλες δίνουν την τιμή του w/R και την ποσοστιαία τιμή του λόγου αυτού αντίστοιχα.



Γράφημα 3:Γραφική αναπαράσταση του λόγου w/R με την P_c για τον αγωγό I



Γράφημα 4:Γραφική αναπαράσταση του λόγου w/R με την P_c για τον αγωγό II

Οι παραπάνω γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων για τους δυο αγωγούς δείχνουν, πως η πίεση κατάρρευσης μικραίνει όσο το μέγεθος της ατέλειας μεγαλώνει. Οι δυο αγωγοί παρουσίασαν την ίδια "μορφή" πτώσης πίεσης, υπό την οποία για σχετικώς μικρή μεταβολή του λόγου w/R υπάρχει σημαντική μεταβολή της P_c , ειδικά για μικρές τιμές του λόγου w/R . Επιπλέον, και στις δυο παραστάσεις παρατηρείται ότι μια ατέλεια της τάξης του $w/R=1\%$ μπορεί να ρίξει την τιμή της πίεσης κατάρρευσης κατά 30-40%.

Από τα παραπάνω, είναι εύκολα κατανοητή η σημασία αποφυγής ατελειών σε αγωγούς. Σε αντίθετη περίπτωση η αντοχή τους μπορεί να μην είναι αυτή που υπολογίσθηκε και αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την αστοχία και την πρόωρη αντικατάσταση τους, που θα σημαίνει περισσότερα έξοδα.

2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

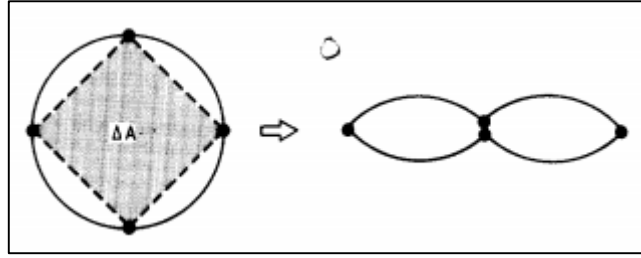
Η πίεση διάδοσης είναι η ελάχιστη πίεση που απαιτείται να ασκηθεί σε έναν αγωγό έτσι ώστε η ύβωση να συνεχιστεί προκαλώντας αστοχία σε μεγάλα μήκη του. Η δυσκολία και το κόστος επιδιόρθωσης μιας τέτοιας βλάβης έχει οδηγήσει σε συντηρητικές μελέτες για τον σχεδιασμό αγωγών με πάχη μέχρι και δυο φορές μεγαλύτερα από ότι χρειάζεται.

Καλή πρόβλεψη της πίεσης διάδοσης από το σχεδιαστικό στάδιο μπορεί να μειώσει αισθητά το κόστος κατασκευής. Η πίεση διάδοσης της ύβωσης είναι σημαντικά μικρότερη της πίεσης κατάρρευσης. Σε μερικές περιπτώσεις η P_p μπορεί να είναι και το 15% της P_c οπότε ο σχεδιασμός ενός αγωγού και ο υπολογισμός του τοιχώματος με βάση αυτή την πίεση είναι πολύ αντισυμβαλτικός.

Στην συνέχεια αναφέρονται κάποιοι προσεγγιστικοί τρόποι εύρεσης της πίεσης διάδοσης και στο Κεφάλαιο 3.4 θα υπολογιστεί η ακριβής τιμή της.

2.4.1 ΜΕΘΟΔΟΣ PALMER & MARTIN

Οι Palmer & Martin ήταν οι πρώτοι που έδωσαν μια απλουστευμένη μέθοδο για τον υπολογισμό της πίεσης διάδοσης [7]. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην θεώρηση ότι ένας δακτύλιος διαμέτρου D , πάχους t , μήκους κατά τον άξονα z b και όριο διαρροής σ_y καταρρέει, εξαιτίας της δημιουργίας τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων στα σημεία $\theta = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ όπως φαίνεται στην Εικόνα 14.



Εικόνα 14: Μηχανισμός κατάρρευσης μέσω πλαστικών αρθρώσεων (Palmer & Martin)

Το έργο της P_p κατά την κατάρρευση του δακτυλίου ισούται με το έργο των εξωτερικών δυνάμεων και είναι:

$$W_{ext} = P_p \Delta V \quad (2.4)$$

Όπου ΔV είναι η μεταβολή του όγκου του δακτυλίου κατά την κατάρρευσή του. Ισχύει ότι:

$$\Delta V = \Delta A * b \quad (2.5)$$

Όπου ΔA είναι η μεταβολή της επιφάνειας όπως αυτή ορίζεται στην Εικόνα 14. Η επιφάνεια αυτή είναι εμβαδό τετραγώνου με πλευρά $R\sqrt{2}$. Οπότε ισχύει ότι:

$$\Delta A = 2R^2 \quad (2.6)$$

Αντικαθιστώντας στην (2.4) προκύπτει ότι τελικά το έργο της πίεσης διάδοσης είναι:

$$W_{ext} = P_p 2R^2 b = P_p \frac{D^2}{2} b \quad (2.7)$$

Αντίστοιχα το έργο των εσωτερικών δυνάμεων W_{int} οφείλεται στις πλαστικές αρθρώσεις. Η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης στις τέσσερις αρθρώσεις είναι:

$$M_p = \sigma_y \frac{bt^2}{4} \quad (2.8)$$

Σε κάθε άρθρωση η συνολική στροφή είναι $\pi - \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2}$ και το συνολικό έργο σε κάθε μια από αυτές είναι:

$$W_{one} = M_p \frac{\pi}{2} \quad (2.9)$$

Οπότε και για τις τέσσερις θα είναι:

$$W_{in} = 4W_{one} = 4M_p \frac{\pi}{2} \quad (2.10)$$

Εξισώνοντας το έργο των εσωτερικών δυνάμεων με το εξωτερικό προκύπτει η εξίσωση των Palmer & Martin όπως αυτή διατυπώθηκε στην εξίσωση (1.7), δηλαδή:

$$P_p = \pi \sigma_y \left(\frac{t}{D} \right)^2 \quad (2.11)$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση (2.11) για του δυο αγωγούς προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα.

- Αγωγός I

Ο αγωγός I έχει εξωτερική διάμετρο $D=812.8\text{mm}$ και πάχος $t=39\text{mm}$ ενώ το όριο διαρροής του X-65 είναι $\sigma_y=450\text{ Mpa}$. Με αντικατάσταση στην (2.11):

$$P_p = \pi 450 \left(\frac{39}{812,8} \right)^2 = 3,25 \text{ Mpa}$$

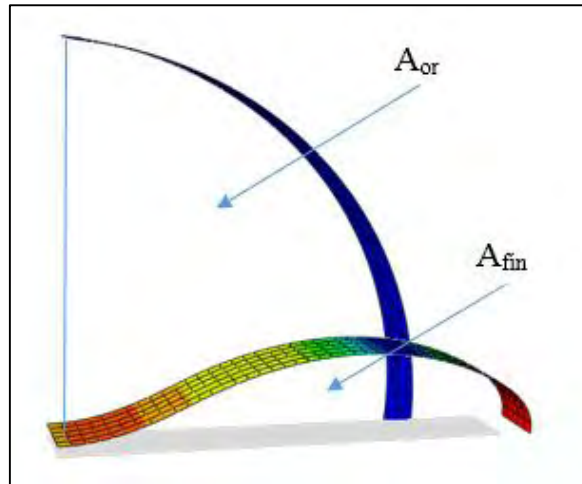
- Αγωγός II

Ο αγωγός I έχει εξωτερική διάμετρο $D=925,4\text{mm}$ και πάχος $t=27,2\text{mm}$ ενώ το όριο διαρροής του X-65 είναι πάλι $\sigma_y=450\text{ Mpa}$. Με αντικατάσταση στην (2.11):

$$P_p = \pi 450 \left(\frac{27,2}{925,4} \right)^2 = 1,22 \text{ Mpa}$$

2.4.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ MAXWELL

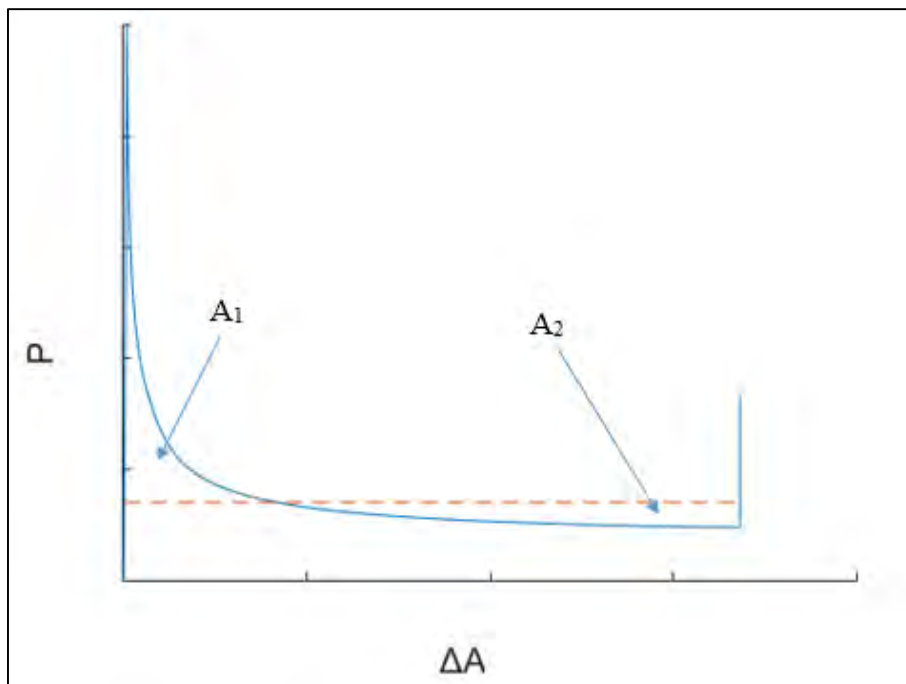
Οι Chater και Hutchinson (1984) [11] συσχέτισαν την αστοχία των δακτυλίων με την διαδιδόμενη ύβωση και πρότειναν μια μέθοδο για τον υπολογισμό της P_p μέσω του δρόμου ισορροπίας (P- ΔA) του δακτυλίου. Το ΔA εκφράζει την μεταβολή της επιφάνειας που ορίζει ο δακτύλιος. Επειδή η μεταβολή της τάσης σε κάθε σημείο της διατομής θεωρείται σχεδόν μονοτονική, μπορεί να θεωρηθεί ότι το έργο της εξωτερικά επιβαλλόμενης πίεσης κατά την παραμόρφωση της διατομής, από την αρχική κατάσταση μέχρι και την τελική της κατάρρευση, εξαρτάται μόνο από αυτές τις δυο καταστάσεις.



Εικόνα 15: Αναπαράσταση επιφάνειας στην αρχική και τελική κατάσταση δακτυλίου

Επειδή η πίεση διάδοσης παραμένει σταθερή σε έναν αγωγό, το έργο της σε μια διατομή του αγωγού είναι:

$$W_{ext} = P_p(A_{or} - A_{fin}) \quad (2.12)$$



Εικόνα 16: Γραφική αναπαράσταση της πίεσης συναρτήσει της μεταβολής επιφάνειας ενός δακτυλίου

Σύμφωνα με την θεώρηση που έγινε, το έργο των εσωτερικών δυνάμεων είναι ίσο με το εμβαδό της γραφικής παράστασης $P-\Delta A$ μεταξύ των σημείων που αντιστοιχούν στην αρχική και στην τελική κατάσταση του δακτυλίου.

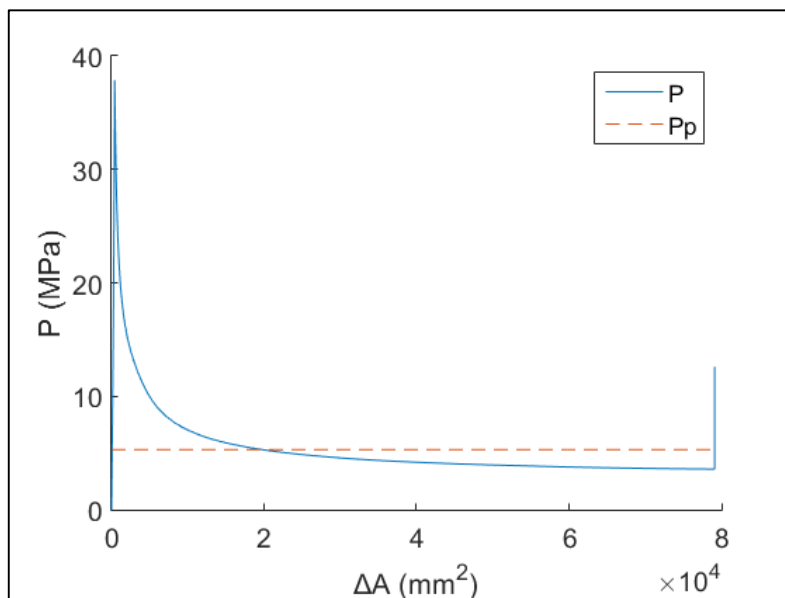
$$W_{in} = \int_0^{\Delta A_{fin}} P d\Delta A \quad (2.13)$$

Εξισώνοντας το εσωτερικό με το εξωτερικό έργο, γίνεται αντιληπτό ότι η πίεση διάδοσης μπορεί να οριστεί χαράζοντας μια οριζόντια γραμμή στο διάγραμμα P-ΔA με τέτοιο τρόπο που τα εμβαδά που ορίζονται από αυτήν και την καμπύλη της πίεσης να είναι ίσα. Δηλαδή με βάση την Εικόνα 16, το $A_1=A_2$ και η γραμμή αυτή ονομάζεται Maxwell Line.

$$P_p = \frac{W_{in}}{\Delta A_{fin}} \quad (2.14)$$

Η εύρεση της Maxwell Line έγινε κάνοντας χρήση κώδικα σε Matlab. Ο κώδικας, λαμβάνει τις συντεταγμένες των κόμβων του δακτυλίου και με ολοκλήρωση βασισμένη στον κανόνα του τραπεζίου υπολογίζει την επιφάνεια που σχηματίζει ο δακτύλιος σε κάθε στιγμή (increment) και με αφαίρεση από την αρχική υπολογίζεται η μεταβολή. Έπειτα, γίνεται ο υπολογισμός της εξίσωσης (2.14) και προκύπτει η πίεση διάδοσης για τους δυο αγωγούς.

- Αγωγός I

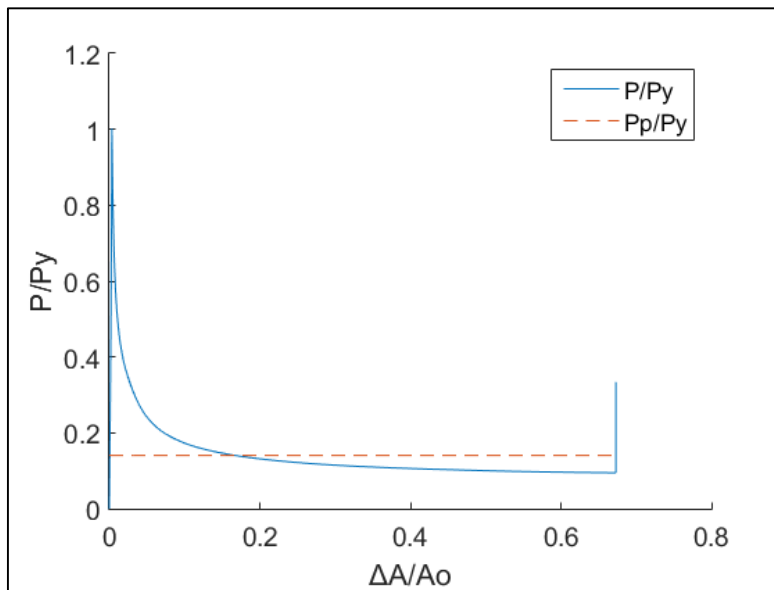


Γράφημα 5: Γραφική αναπαράσταση P-ΔA για τον αγωγό I με την πίεση διάδοσης

Στο παραπάνω, έχει σημειωθεί με διακεκομμένη γραμμή η τιμή της πίεσης διάδοσης για τον αγωγό I η οποία προκύπτει ότι είναι:

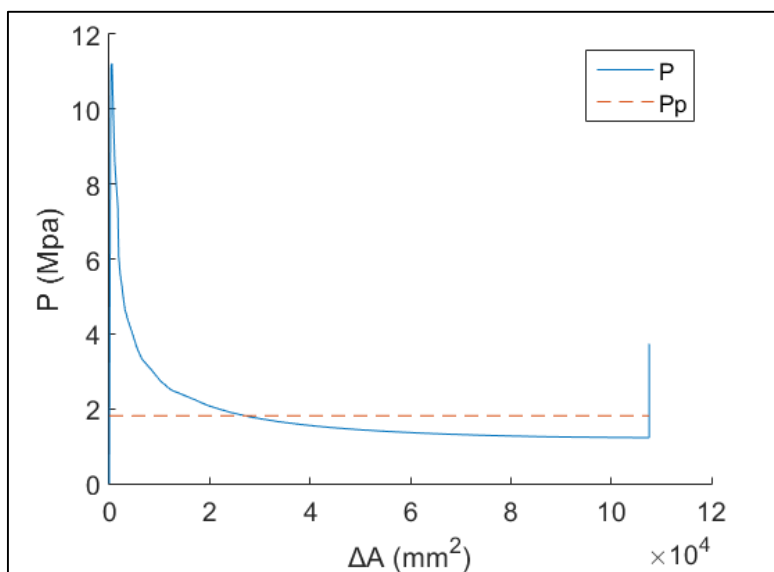
$$P_p = 5,183 \text{ Mpa}$$

Το Γράφημα 5: Γραφική αναπαράσταση P-ΔA για τον αγωγό I με την πίεση διάδοσης
 Γράφημα 5 μπορεί να αδιαστατοποιηθεί διαιρώντας την πίεση που ασκείται στον δακτύλιο με την P_y όπως αυτή ορίστηκε στην εξίσωση (1.3) και την μεταβολή επιφάνειας με την αρχική επιφάνεια A_0 .



Γράφημα 6: Αδιαστατοποιημένη γραφική αναπαράσταση P-ΔA για τον αγωγό I με την πίεση διάδοσης

- Αγωγός II

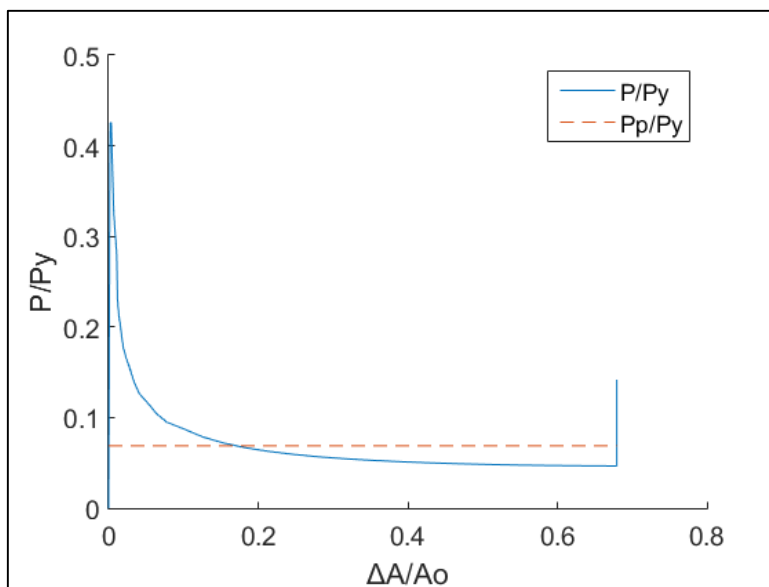


Γράφημα 7: Γραφική αναπαράσταση P-ΔA για τον αγωγό II με την πίεση διάδοσης

Στο Γράφημα 7 έχει σημειωθεί η πίεση διάδοσης με διακεκομμένη που έχει υπολογισθεί με τιμή:

$$P_p = 1,814 \text{ Mpa}$$

Το αντίστοιχο αδιάστατο διάγραμμα είναι:



Γράφημα 8: Αδιάστατοποιημένη γραφική αναπαράσταση P-ΔA για τον αγωγό II με την πίεση διάδοσης

2.4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ

Τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Διδιάστατη ανάλυση	Αγωγός I	Αγωγός II
Maxwell Line	5.183	1.814
Palmer & Martin	3.25	1.22

Πίνακας 3: Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογισμού διάδοσης πίεσης για τους αγωγούς I και II

Η πρώτη παρατήρηση που γίνεται αμέσως είναι πως οι τιμές των δυο μεθόδων διαφέρουν αισθητά μεταξύ τους με την μέθοδο των Palmer & Martin να δείχνει χαμηλότερες τιμές πίεσης διάδοσης και στους δυο αγωγούς σε σχέση με την Maxwell Line. Σημειώνεται όμως ότι η απόκλιση των δυο μεθόδων και για τους δυο αγωγούς είναι της τάξης του 37% στις μεταξύ τους τιμές.

Η διαφορά αυτή των δυο μεθόδων οφείλεται στο γεγονός πως οι Palmer & Martin δεν λαμβάνουν υπόψιν τους την κράτυνση του υλικού. Ένας επίσης βασικός λόγος που η

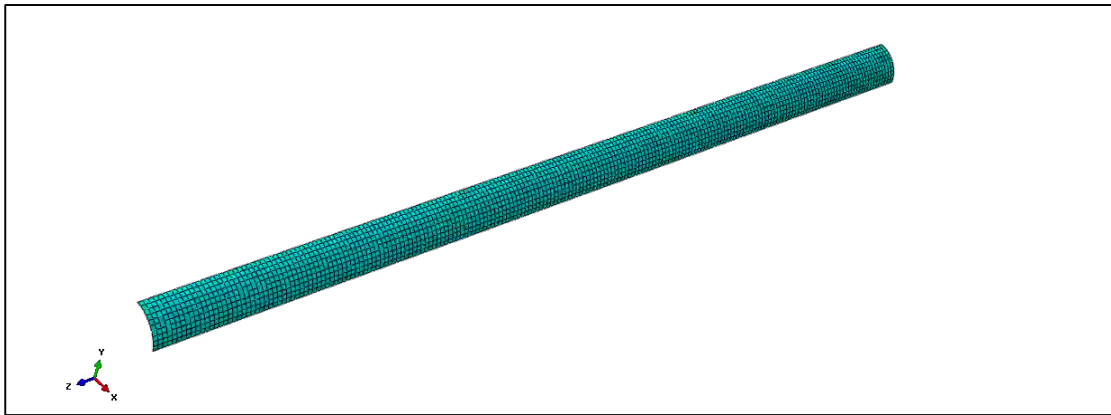
πίεση διάδοσης έχει διαφορετική τιμή στις δυο μεθόδους είναι ότι ο δακτύλιος στα πεπερασμένα στοιχεία πλαστικοποιείται όχι μόνο στα τέσσερα σημεία που υποθέτει η εξίσωση των Palmer & Martin αλλά και σε μια περιοχή γύρω από αυτά.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα φανεί πως η τιμή που δίνει η Maxwell Line είναι πιο κοντά στην ακριβή τιμή που υπολογίζεται με πλήρη τριδιάστατη μελέτη.

3 ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, συνεχίζεται αρχικά η μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την μέγιστη πίεση που πρέπει να ασκηθεί σε έναν αγωγό για να καταρρεύσει. Μετέπειτα υπό πλήρες τριδιάστατο μοντέλο υπολογίζεται η ακριβής τιμή της πίεσης διάδοσης για τους δυο αγωγούς.

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται σε αυτές τις αναλύσεις, έχει την ίδια λογική με αυτή του διδιάστατου μοντέλου ως προς το είδος πλέγματος που χρησιμοποιείται αλλά και ως προς τις συνοριακές συνθήκες που του επιβάλλονται.



Εικόνα 17: Μοντέλο αγωγού για τριδιάστατη ανάλυση

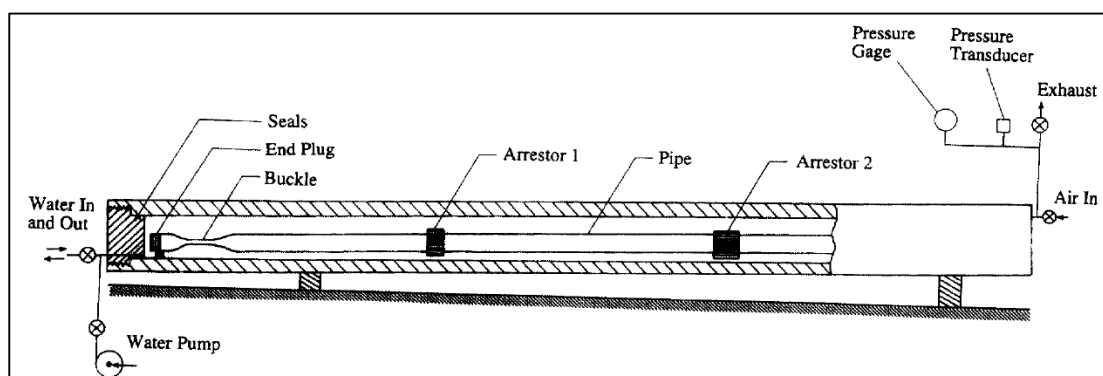
Η μεγάλη του διαφορά έγκειται όπως φαίνεται στην Εικόνα 17 στο μήκος κατά τον άξονα z ως προς το μέγεθος της διατομής του φτάνοντας μέχρι και $L/D=20$. Πάλι χρησιμοποιείται το ένα τέταρτο του αγωγού εφαρμόζοντας διπλή συμμετρία έτσι ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος των αναλύσεων χωρίς να μειώνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

3.1 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥ

Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα αναλυτικά μοντέλα με πεπερασμένα στοιχεία, πραγματοποιούνται πειράματα υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Μια από τις διαφορές των δυο μεθόδων είναι το γεγονός πως οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται στα πειράματα έχουν πεπερασμένο μήκος και δεν είναι πολύ

μεγάλου μήκους όπως δηλώνεται με την επιβολή της συμμετρίας στο αριστερό και δεξί άκρο του αναλυτικού μοντέλου.

Στις πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποίησαν οι Kyriakides, Park και Netto [9] ο αγωγός τοποθετήθηκε σε δοχείο πίεσης, μέγιστης ικανότητας 9000 psi (62 MPa) η οποία ρυθμιζόταν με νερό που γέμιζε πλήρως το δοχείο (volume controlled pressurization). Οι άκρες των αγωγών ήταν πακτωμένες στο δοχείο και δεν μετακινούνται. Ένας άλλος τρόπος συγκράτησης των αγωγών είναι η πάκτωση ενός εκ των δυο άκρων ενώ το άλλο είναι δεσμευμένο με τέτοιο τρόπο που δεν επιτρέπει την παραμόρφωση της διατομής αλλά, επιτρέπει την κίνηση της διατομής κατά τον διαμήκη άξονα z. Με αυτόν τον τρόπο ο αγωγός μπορεί να εφελκυστεί ή να συμπιεστεί λόγω της εξωτερικής πίεσης που του ασκείται. Από εδώ και στο εξής, ο πρώτος τρόπος δέσμευσης του αγωγού, αυτός δηλαδή με τα πακτωμένα άκρα θα ονομάζεται "Μέθοδος Α" ενώ ο δεύτερος "Μέθοδος Β".



Εικόνα 18: Πειραματική διάταξη μέτρησης χαρακτηριστικών πιέσεων αγωγού (Kyriakides, Park, Netto) [9]

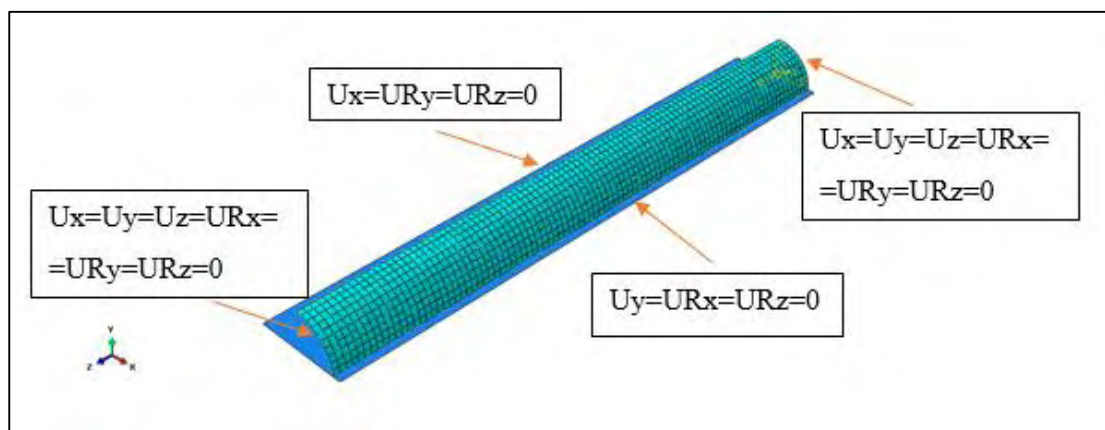
Ακολουθεί παραμετρική μελέτη της μεταβολής της πίεσης κατάρρευσης σε σχέση με το μήκος του αγωγού που χρησιμοποιείται στο πείραμα ορισμένο, ως ο λόγος L/D , όπου D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού. Οι τιμές του λόγου που θα ελεγχθούν είναι για $L/D=(3,5,7,9,11,13,15,20)$. Η μελέτη θα γίνει για τους αγωγούς I και II και για τις δυο μεθόδους συγκράτησης.

3.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ Α

3.1.1.1 ΜΟΝΤΕΛΟ-ΠΛΕΓΜΑ-ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την Μέθοδο Α χρησιμοποιεί τριδιάστατα κυλινδρικά κελύφη με αρκετά μεγάλο μήκος κατά τον διαμήκη άξονα, τα

στοιχεία είναι μειωμένης ολοκλήρωσης τύπου S4R με τους κόμβους τους να τοποθετούνται στην μέση διατομή του αγωγού.



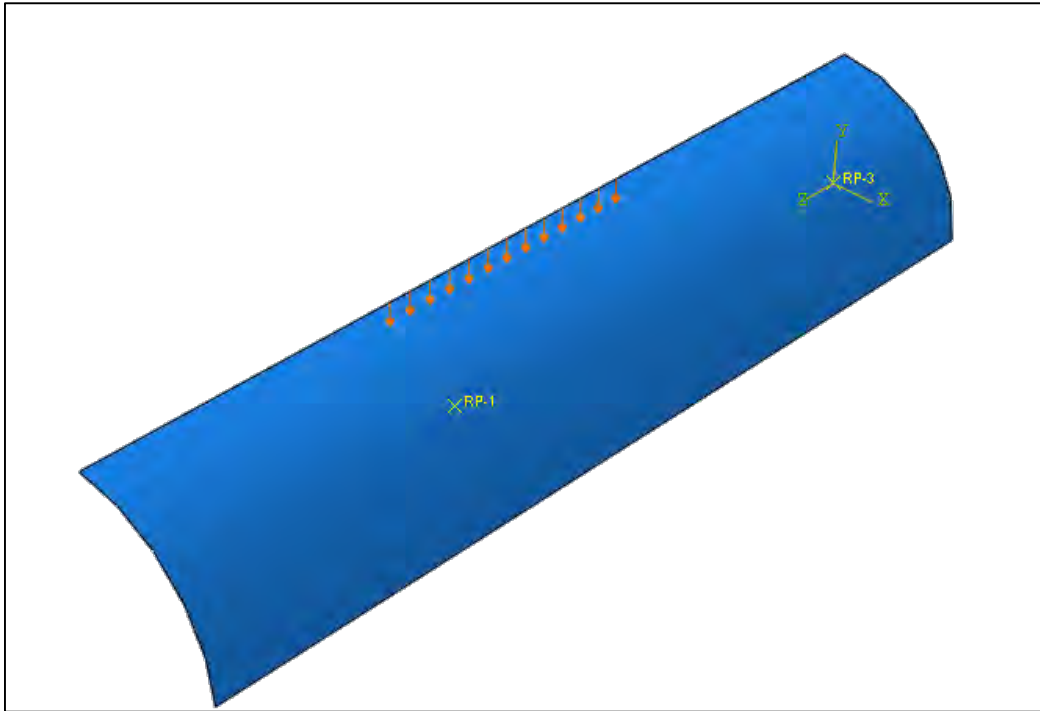
Εικόνα 19: Συνοριακές συνθήκες για την Μέθοδο Α

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 19 στην άνω γενέτειρα του αγωγού εφαρμόζεται συμμετρία ως προς τον άξονα x, στην κάτω γενέτειρα εφαρμόζεται συμμετρία ως προς τον y άξονα ενώ στην αριστερή και δεξιά άκρη είναι δεσμευμένοι όλοι οι βαθμοί ελευθερίας τους.

Όπως και στο κεφάλαιο 2.3.1 η επιφάνεια επαφής είναι πακτωμένη και δεν επιτρέπει στους κόμβους του αγωγού να περάσουν μέσα από αυτήν.

Το μέγεθος των κόμβων παραμένει σταθερό για κάθε ανάλυση οπότε ο συνολικός αριθμός των κόμβων μεγαλώνει όσο μεγαλώνει το μήκος του αγωγού.

Στο πρώτο βήμα της ανάλυσης εφαρμόζονται οι συνοριακές συνθήκες στο μοντέλο. Στο δεύτερο βήμα, δημιουργείται η ατέλεια στον αγωγό. Με βάση τα αποτελέσματα του κεφαλαίου 2.3.3 δημιουργείται μια ατέλεια στους αγωγούς τέτοια ώστε $w/R=0.25\%$. Το ποσοστό επιλέχθηκε λόγω της συχνότητας με την οποία συναντάται στους αγωγούς. Οπότε για τον αγωγό I, η αρχική παραμόρφωση που επιβάλλεται στο δεύτερο βήμα είναι: $U_y = -8 \text{ mm}$ και για τον αγωγό II είναι: $U_y = -13.5 \text{ mm}$. Η μετατόπιση αυτή έγινε στο κέντρο του αγωγού σε μήκος μιας διαμέτρου για τους αγωγούς με μήκος από $L/D=3$ μέχρι $L/D=9$ και από $L/D=11$ μέχρι $L/D=20$, σε μήκος τριών διαμέτρων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι είναι απίθανο η ατέλεια να επηρεάζει μια μόνο διατομή του αγωγού.



Εικόνα 20: Εφαρμοζόμενη μετατόπιση στους κόμβους της άνω γενέτειρας σε αγωγό μήκους $L/D=3$

Στο τρίτο βήμα της ανάλυσης διακόπτεται η μετατόπιση στην άνω γενέτειρα και επιστρέφει η ελαστική παραμόρφωση.

Στο τέταρτο βήμα εφαρμόζεται εξωτερική πίεση στους αγωγούς κάνοντας χρήση της μεθόδου μήκους τόξου (Riks).

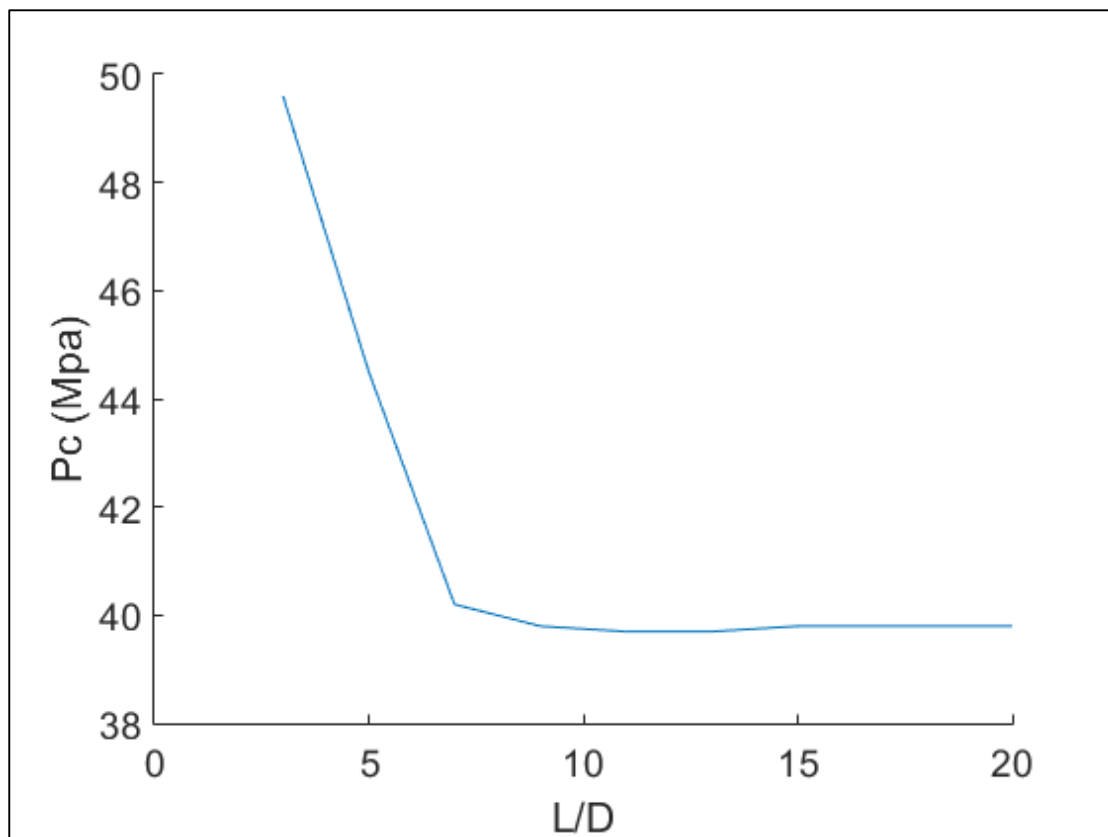
3.1.1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

- Αγωγός I

Για τον αγωγό I προκύπτει ο εξής πίνακας τιμών:

L/D	LPF	P_c
$L/D=3$	0.496	49.6
$L/D=5$	0.445	44.5
$L/D=7$	0.402	40.2
$L/D=9$	0.398	39.8
$L/D=11$	0.397	39.7
$L/D=13$	0.397	39.7
$L/D=15$	0.399	39.9
$L/D=20$	0.398	39.8

Πίνακας 4: Μεταβολή πίεσης κατάρρευσης σε σχέση με την μεταβολή μήκους για τον αγωγό I με την Μέθοδο A



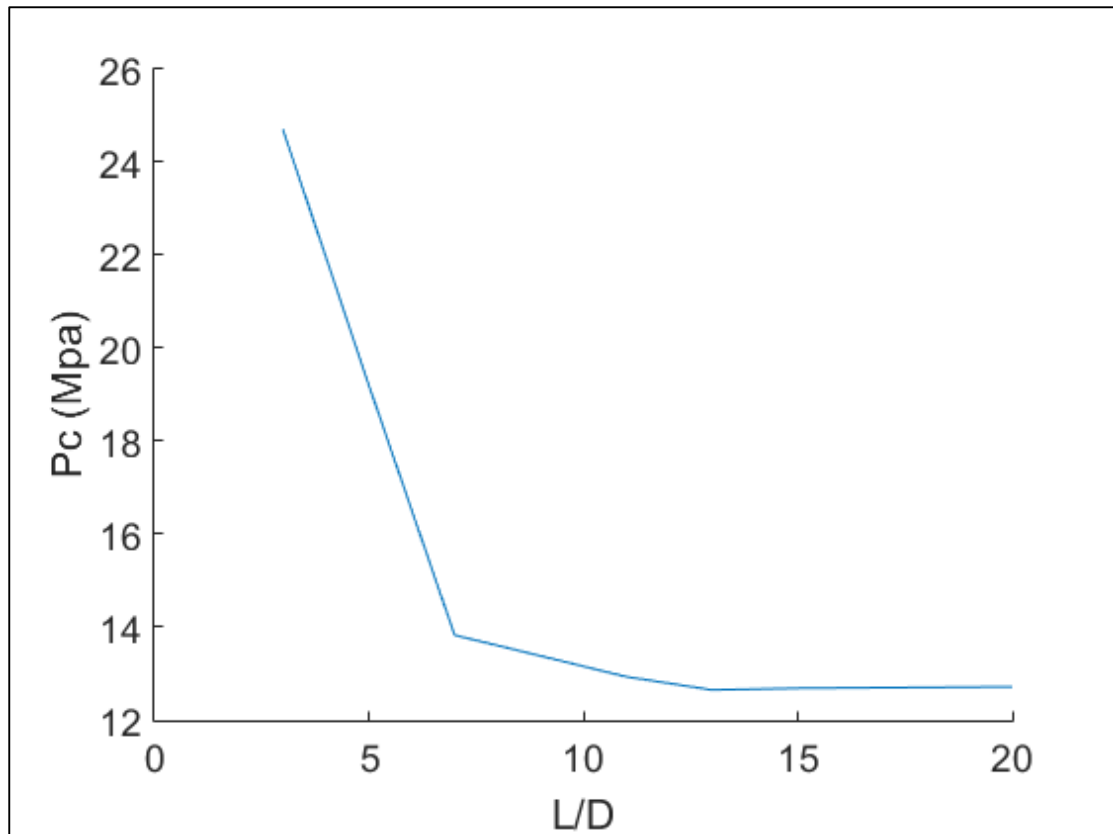
Γράφημα 9: Διάγραμμα P_c - L/D για τον αγωγό I με την Μέθοδο A

- Αγωγός II

Για τον αγωγό II προκύπτει ο εξής πίνακας τιμών:

L/D	LPF	P_c
L/D=3	0.247	24.7
L/D=5	0.192	19.2
L/D=7	0.138	13.8
L/D=9	0.133	13.3
L/D=11	0.129	12.9
L/D=13	0.126	12.6
L/D=15	0.126	12.6
L/D=20	0.127	12.7

Πίνακας 5: Μεταβολή πίεσης κατάρρευσης σε σχέση με την μεταβολή μήκους για τον αγωγό II με την μέθοδο A



Γράφημα. 10: Διάγραμμα P_c - L/D για τον αγωγό II με την Μέθοδο A

3.1.1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Από τα διαγράμματα P_c - L/D προκύπτουν κάποια ενδιαφέροντα συμπεράσματα.

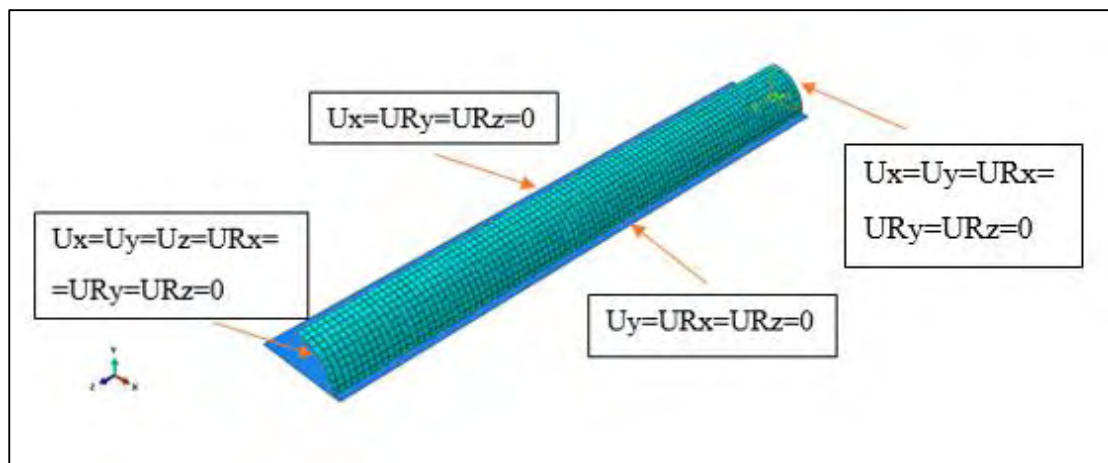
Αυτό που παρατηρείται άμεσα είναι η μεγάλη απόκλιση που έχει η τιμή της πίεσης κατάρρευσης σε μικρά μήκη σε σχέση με μεγάλα. Για $L/D=20$ η P_c είναι το 50-80% της αντίστοιχης για $L/D=3$, οπότε είναι ξεκάθαρη η σημασία της επιλογής που θα γίνει για το μήκος του αγωγού που θα δοκιμαστεί. Παρατηρείται όμως ότι για μήκη $L/D=7$ και πάνω η P_c αρχίζει και σταθεροποιείται χωρίς να επηρεάζεται από την αλλαγή μήκους. Η σταθερή τιμή της P_c για μήκη από $L/D=7$ και πάνω είναι πολύ κοντά στην τιμή που υπολογίστηκε για τους δυο αγωγούς στην διδιάστατη ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου για παραμόρφωση $w/R=0.25\%$.

3.1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ Β

3.1.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ-ΠΛΕΓΜΑ-ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Για την μέθοδο Β το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι ακριβώς το ίδιο με αυτό της μεθόδου Α με μια μικρή αλλαγή στις συνοριακές συνθήκες.

Η μόνη διαφοροποίηση που έχει αυτή η μέθοδος είναι ότι η μια άκρη του αγωγού είναι πακτωμένη, ενώ στην άλλη επιτρέπεται η μετακίνησή της κατά τον διαμήκη άξονα z. Αυτό επιτυγχάνεται συνδέοντας με την εντολή Kinematic Coupling στο ABAQUS τους κόμβους της δεξιάς άκρης του αγωγού με ένα σημείο (Reference Point) που βρίσκεται στην ίδια συντεταγμένη z με την διατομή αυτή και έχει $x=y=0$. Με αυτόν τον τρόπο, οι κόμβοι αυτής της διατομής κινούνται όπως κινείται αυτό το σημείο. Στο σημείο αυτό δεσμεύονται όλοι οι βαθμοί ελευθερίας εκτός από αυτόν που δηλώνει την μετατόπιση στον z.



Εικόνα 21: Συνοριακές συνθήκες για την Μέθοδο Β

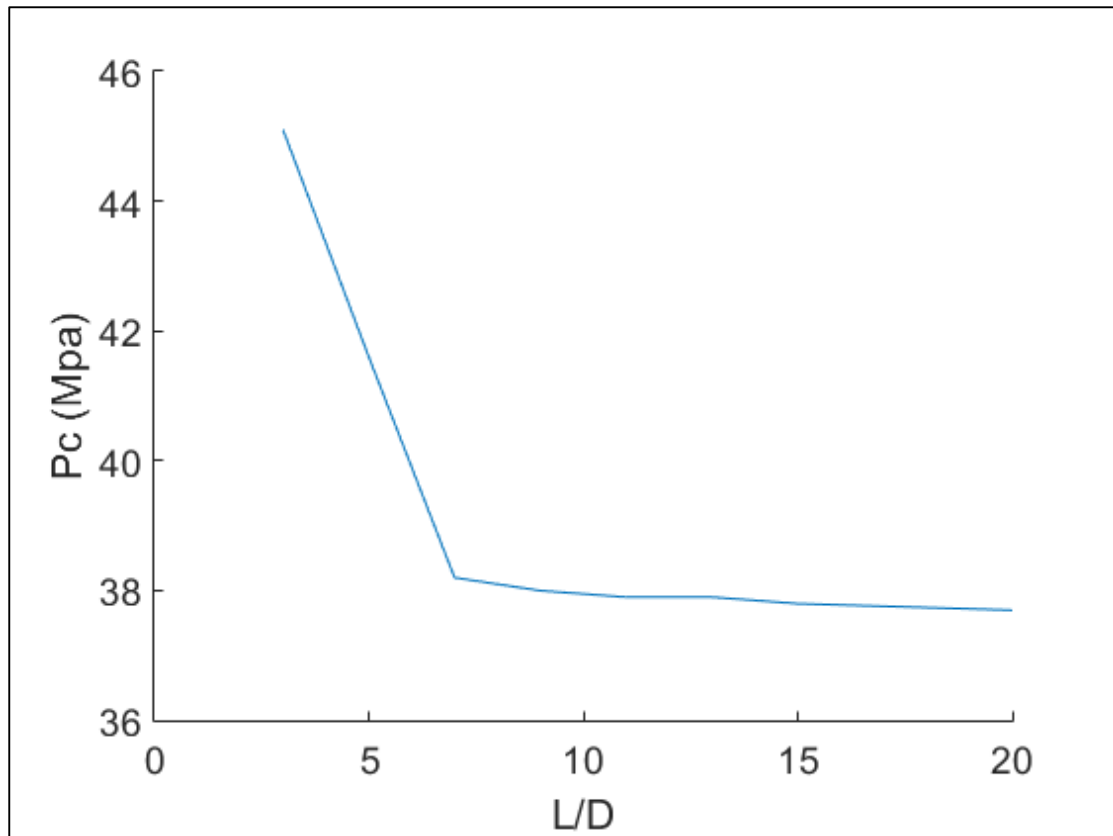
3.1.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

- Αγωγός Ι

Για τον αγωγό Ι προκύπτει ο εξής πίνακας τιμών:

L/D	LPF	Pc
L/D=3	0.451	45.1
L/D=5	0.416	41.6
L/D=7	0.382	38.2
L/D=9	0.38	38
L/D=11	0.379	37.9
L/D=13	0.379	37.9
L/D=15	0.378	37.8
L/D=20	0.377	37.7

Πίνακας 6: Μεταβολή πίεσης κατάρρευσης σε σχέση με την μεταβολή μήκους για τον αγωγό Ι με την Μέθοδο Β



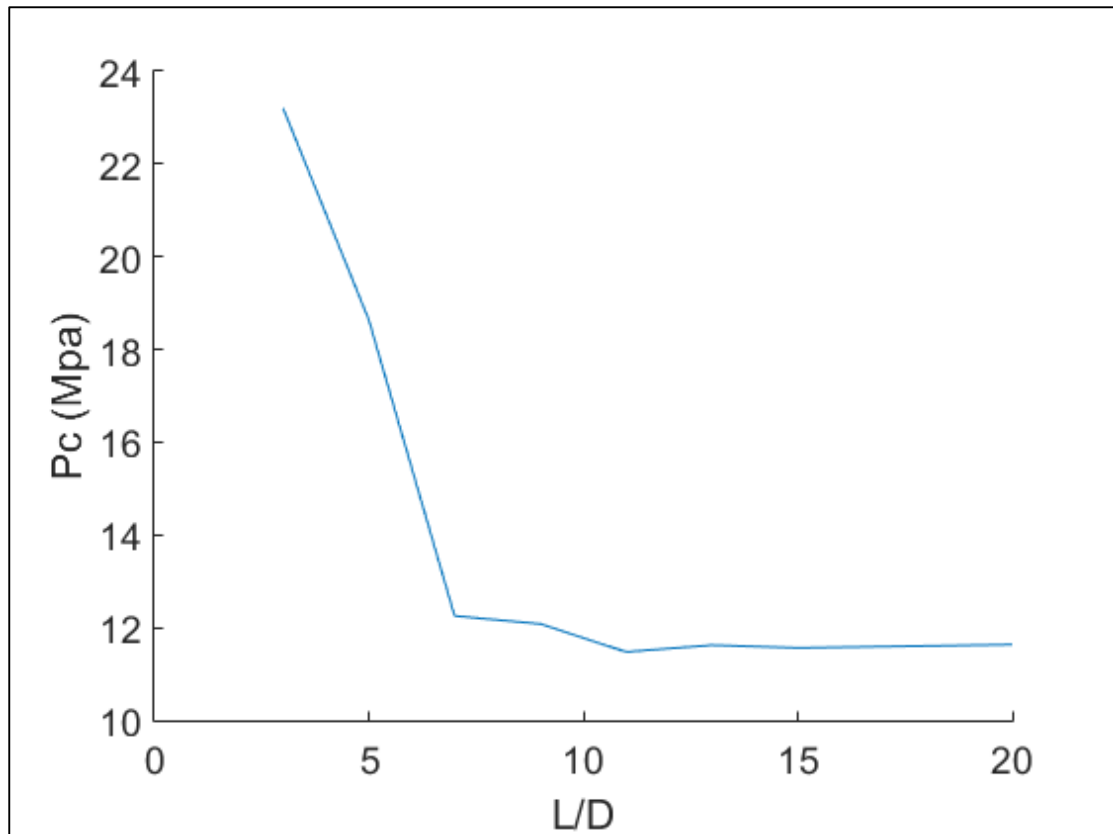
Γράφημα 11: Διάγραμμα P_c - L/D για τον αγωγό I με την Μέθοδο B

- Αγωγός II

Για τον αγωγό I προκύπτει ο εξής πίνακας τιμών:

L/D	LPF	Pc
L/D=3	0.232	23.2
L/D=5	0.186	18.6
L/D=7	0.122	12.2
L/D=9	0.12	12
L/D=11	0.114	11.4
L/D=13	0.116	11.6
L/D=15	0.115	11.5
L/D=20	0.116	11.6

Πίνακας 7: Μεταβολή πίεσης κατάρρευσης σε σχέση με την μεταβολή μήκους για τον αγωγό II με την Μέθοδο B



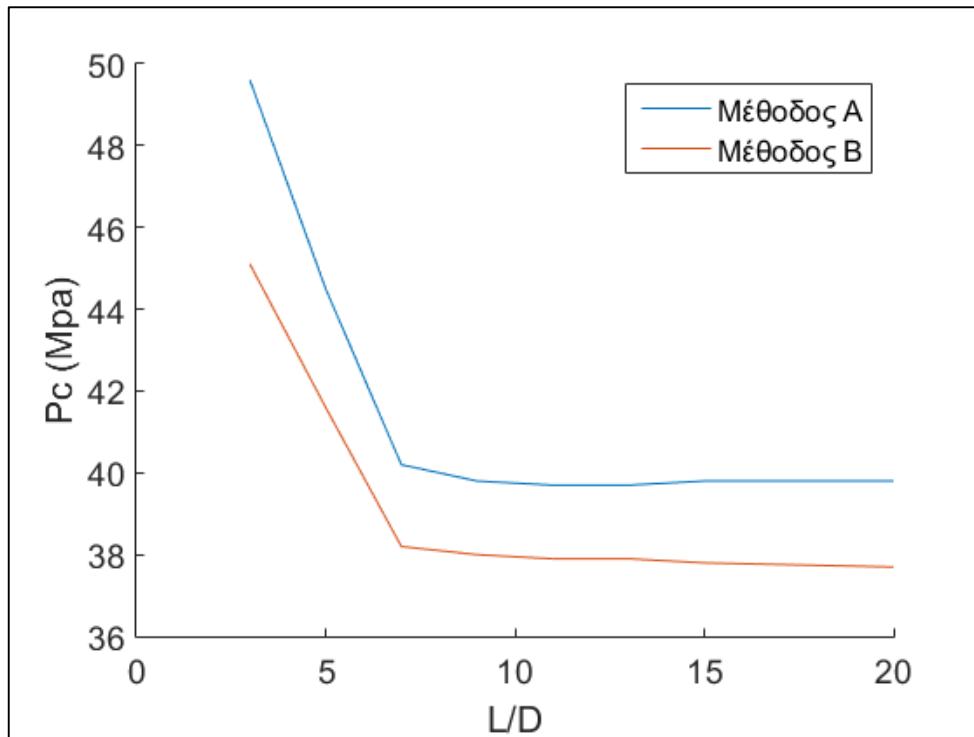
Γράφημα 12: Διάγραμμα P_c - L/D για τον αγωγό II με την Μέθοδο B

3.1.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

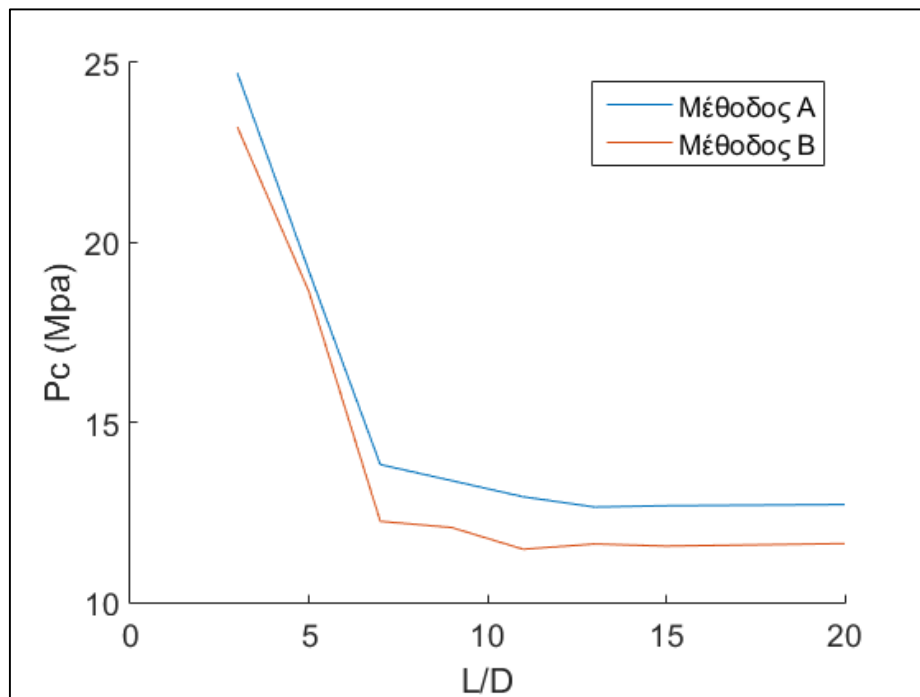
Οι παρατηρήσεις που μπορεί να γίνουν εδώ είναι ίδιες με αυτές που έγιναν για την Μέθοδο Α. Η πίεση κατάρρευσης έχει πολύ μεγάλη τιμή για μικρά μήκη και σταθεροποιείται από μήκη μεγέθους $L/D=7$ και μετά.

3.1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ Α ΚΑΙ Β

Για την καλύτερη εποπτεία της επιρροής των δυο μεθόδων, αναπαρίστανται σε κοινό γράφημα για κάθε αγωγό οι καμπύλες P_c - L/D των δυο μεθόδων όπως φαίνεται στο Γράφημα 13 και στο Γράφημα 14.



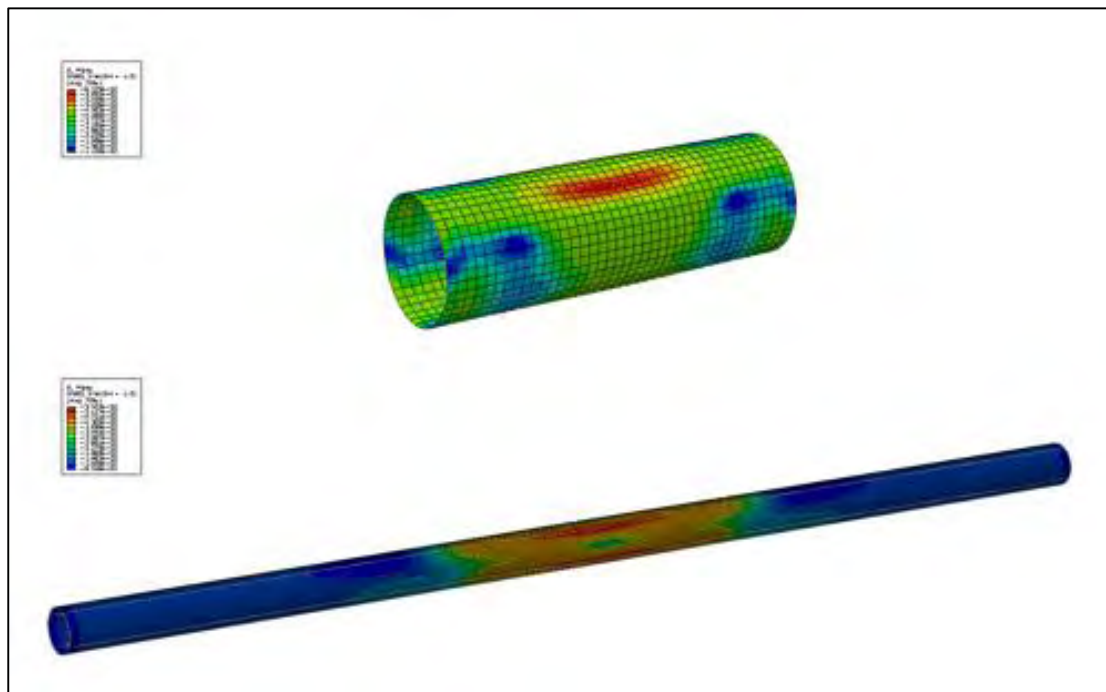
Γράφημα 13: Καμπύλες P_c - L/D για τον αγωγό I των δυο μεθόδων



Γράφημα 14: Καμπύλες P_c - L/D για τον αγωγό II των δυο μεθόδων

Παρατηρείται πως και στους δυο αγωγούς η Μέθοδος B δίνει για όλα τα μήκη που ελέγχθηκαν μικρότερη τιμή για την P_c από ότι η Μέθοδος A. Αυτό φανερώνει πως η πάκτωση και των δυο άκρων του αγωγού, ενισχύουν την αντοχή του και χρειάζεται

μεγαλύτερη πίεση για να αστοχήσει. Επίσης σημαίνει πως η διαμήκης μετατόπιση του αγωγού δεν είναι αμελητέα και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό.



Εικόνα 22: Παραμορφωμένη κατάσταση αγωγού I για μήκη $L/D=3$ & $L/D=20$

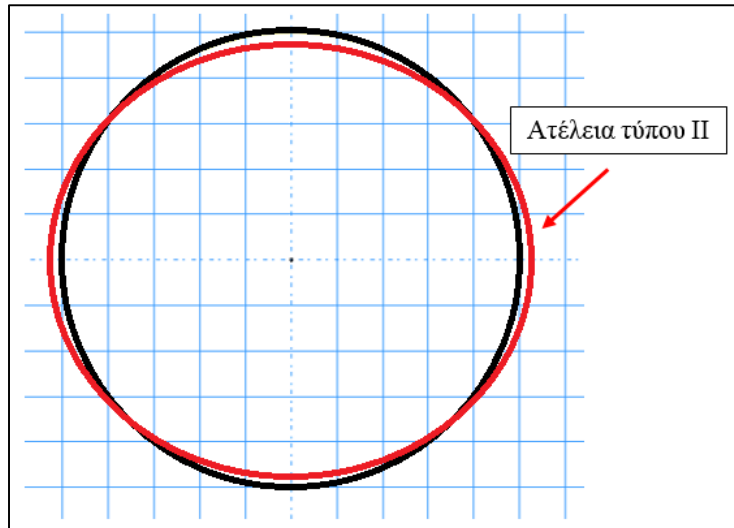
Αξίζει να τονιστεί ότι και στις δυο μεθόδους για μήκη $L/D=7$ και μεγαλύτερα, η τιμή της πίεσης κατάρρευσης σταθεροποιείται. Αυτό είναι σημάδι πως για την λήψη αντικειμενικών αποτελεσμάτων από πειράματα, θα πρέπει όσο είναι δυνατόν να χρησιμοποιούνται μήκη μεγαλύτερα από 7 φορές την διάμετρο του αγωγού.

3.2 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΥΠΟΥ ΑΡΧΙΚΗΣ ΑΤΕΛΕΙΑΣ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Στο κεφάλαιο 2.3 δόθηκε ο ορισμός της ατέλειας ως η απόκλιση λόγω οβαλοποίησης μιας διατομής από την αρχική της κατάσταση. Για την εισαγωγή της ατέλειας στο μοντέλο χρησιμοποιούνται κοινώς δυο τρόποι.

Ο πρώτος τρόπος είναι αυτός που έχει χρησιμοποιηθεί μέχρι τώρα στην εργασία. Η εξαναγκασμένη μετατόπιση κόμβων της άνω γενέτειρας έτσι ώστε να δημιουργηθεί η επιθυμητή πλαστική παραμόρφωση στον αγωγό.

Ο δεύτερος τρόπος είναι, ο υπολογισμός της ατέλειας w με δεδομένο τον επιθυμητό λόγο w/R και ο σχεδιασμός του αγωγού να γίνει με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι διατομές του να είναι ελλειπτικές εξαρχής σε όλο του το μήκος.



Εικόνα 23: Σχέδιο διατομής ατέλειας τύπου II

Από εδώ και στο εξής οι δύο αυτοί τρόποι εισόδου της ατέλειας θα ονομάζονται ατέλειες “Τύπου Ι” και “Τύπου ΙΙ” αντίστοιχα. Η μελέτη που ακολουθεί έχει ως σκοπό να αναγνωρίσει το πώς επηρεάζουν οι δυο αυτοί τύποι ατελειών την πίεση κατάρρευσης καθώς και το πώς μεταβάλλεται αυτή και για τους δυο τύπους ανάλογα με το μήκος του αγωγού.

Για τις αναλύσεις θα γίνει χρήση του μοντέλου που αναλύθηκε προηγουμένως για την Μέθοδο Β. Δηλαδή, η μια άκρη του αγωγού είναι πακτωμένη ενώ η άλλη μπορεί να μετακινηθεί μόνο ως προς τον διαμήκη άξονα.

3.2.1 ΑΤΕΛΕΙΑ ΤΥΠΟΥ Ι

Η ατέλεια τύπου Ι έχει ουσιαστικά τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα με αυτά που προέκυψαν από την ανάλυση που έγινε στο κεφάλαιο 3.1.2.2 για τους αγωγούς Ι και ΙΙ οπότε δεν υπολογίζονται ξανά σε αυτή την παράγραφο.

3.2.2 ΑΤΕΛΕΙΑ ΤΥΠΟΥ ΙΙ

- Αγωγός Ι

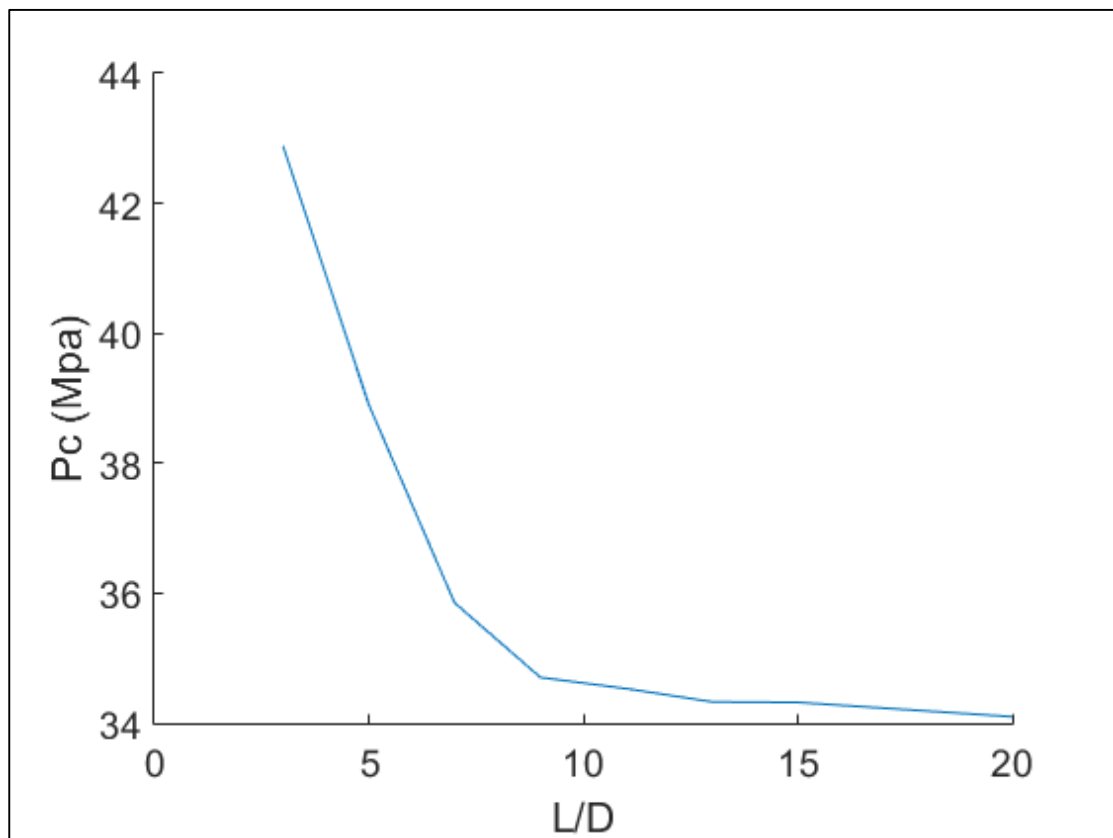
Για τον αγωγό Ι από την Πίνακας για λόγο $w/R=0.25\%$ προκύπτει ότι

$$w = 0.97$$

Η ελλειπτική διατομή που σχεδιάστηκε δίνει τα εξής αποτελέσματα:

L/D	LPF	Pc
L/D=3	0.428	42.8
L/D=5	0.389	38.9
L/D=7	0.358	35.8
L/D=9	0.347	34.7
L/D=11	0.345	34.5
L/D=13	0.343	34.3
L/D=15	0.343	34.3
L/D=20	0.341	34.1

Πίνακας 8: Μεταβολή πίεσης κατάρρευσης σε σχέση με την μεταβολή μήκους για τον αγωγό I με ατέλεια Τύπου II



Γράφημα 15: Καμπύλη Pc-L/D για τον αγωγό I με ατέλεια Τύπου II

- Αγωγός II

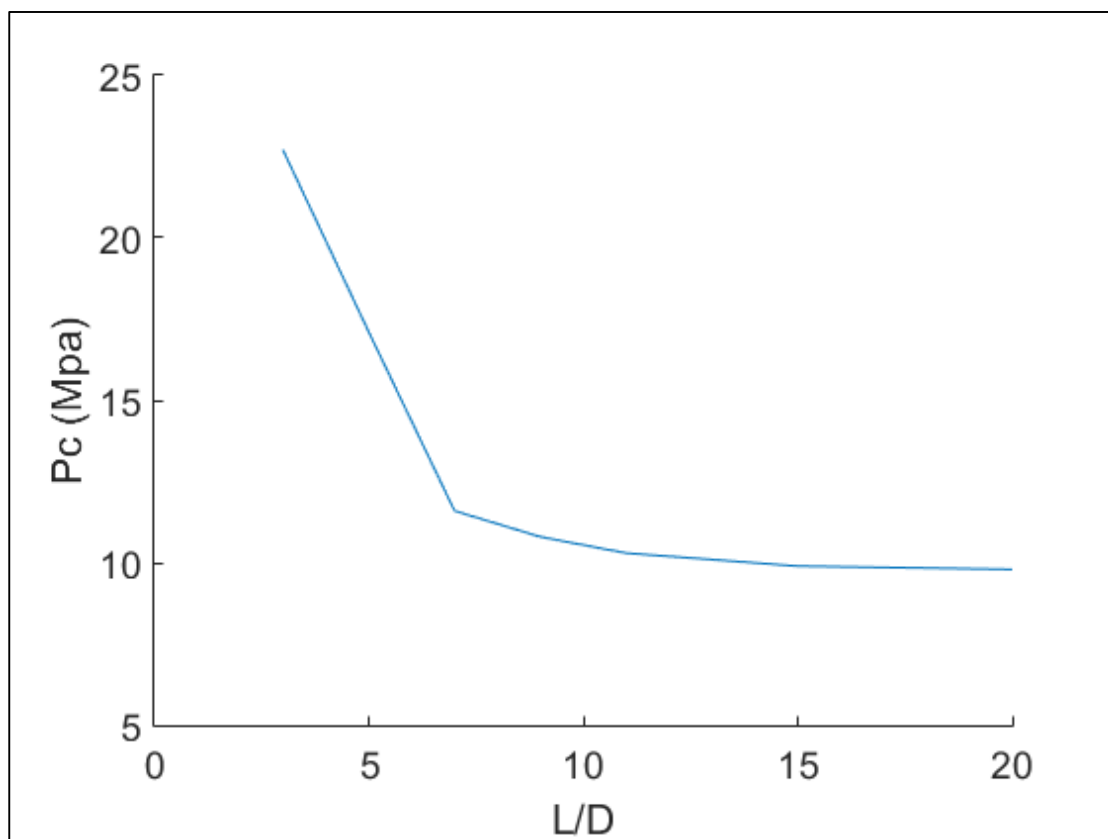
Για τον αγωγό II από την Πίνακας για λόγο $w/R=0.25\%$ προκύπτει ότι

$$w = 1.12$$

Η ελλειπτική διατομή που σχεδιάστηκε δίνει τα εξής αποτελέσματα:

L/D	LPF	Pc
L/D=3	0.227	22.7
L/D=5	0.171	17.1
L/D=7	0.116	11.6
L/D=9	0.108	10.8
L/D=11	0.103	10.3
L/D=13	0.101	10.1
L/D=15	0.099	9.9
L/D=20	0.098	9.8

Πίνακας 9: Μεταβολή πίεσης κατάρρευσης σε σχέση με την μεταβολή μήκους για τον αγωγό II με ατέλεια Τύπου II

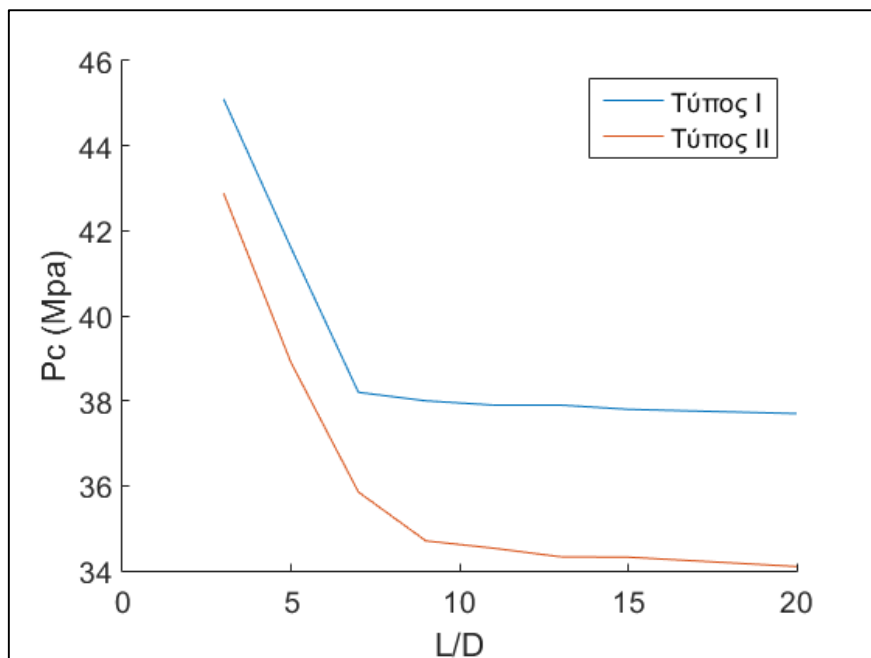


Γράφημα 16: Καμπύλη Pc-L/D για τον αγωγό II με ατέλεια Τύπου II

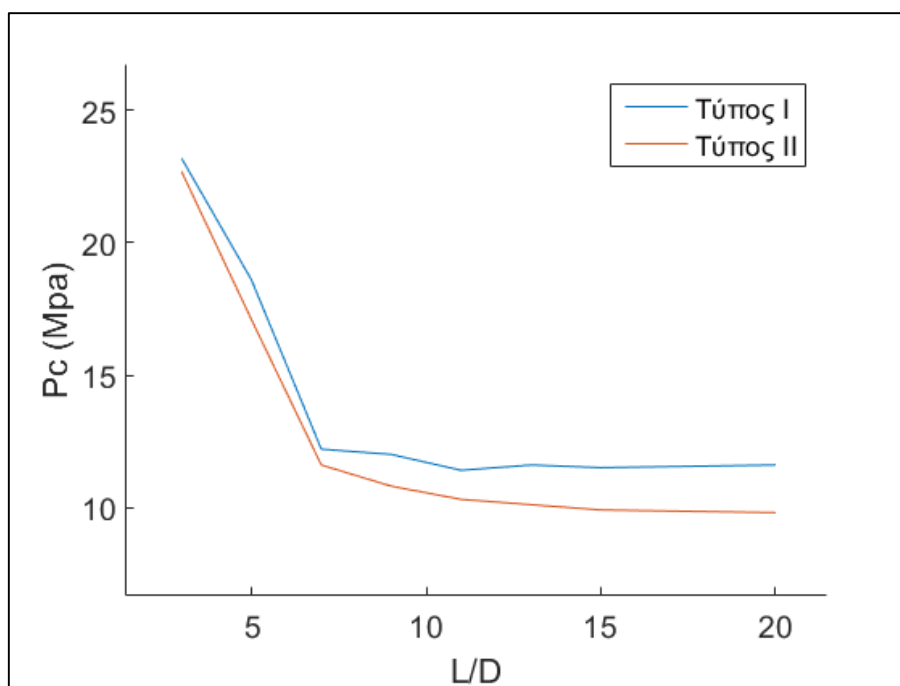
Παρατηρείται από τα αποτελέσματα για τους δυο αγωγούς πως δεν υπάρχει κάποια αισθητή διαφορά ως προς την συμπεριφορά της πίεσης κατάρρευσης με την μεταβολή του μήκους. Στα μικρά μήκη η Pc έχει πολύ μεγάλη τιμή και πάλι από μήκη L/D=7 και μεγαλύτερα, αυτή σταθεροποιείται.

3.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΤΥΠΟΥ Ι ΚΑΙ ΙΙ

Σύγκριση των δυο τύπων ατέλειας μπορεί να γίνει βασιζόμενη στα γραφήματα που ακολουθούν και αναπαριστούν τις καμπύλες P_c - L/D και για τους δυο αγωγούς σε κοινό διάγραμμα για τους τύπους ατελειών Ι και ΙΙ.



Γράφημα 17: Καμπύλες P_c - L/D των δυο τύπων ατελειών για τον αγωγό Ι



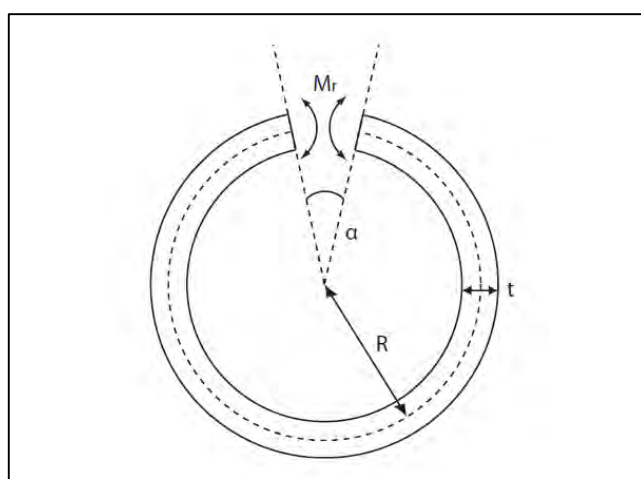
Γράφημα 18: Καμπύλες P_c - L/D των δυο τύπων ατελειών για τον αγωγό ΙΙ

Από τα παραπάνω γραφήματα προκύπτει ότι η πίεση που χρειάζεται να ασκηθεί σε έναν αγωγό με ατέλεια τύπου I για να αστοχήσει είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για αγωγό με ατέλεια τύπου II.

Αν και η ατέλεια τύπου I πλαστικοποιεί ένα μέρος του αγωγού, δημιουργώντας παραμένουσες τάσεις, οι οποίες επιδρούν αρνητικά στην αντοχή του, λόγω εργοσκήρυνσης το υλικό θα έχει μεγαλύτερο όριο διαρροής από ότι προηγουμένως. Το γεγονός αυτό, σε συνεργασία με το γεγονός ότι η ατέλεια τύπου II εφαρμόζεται σε όλο τον αγωγό, σε αντίθεση με την ατέλεια τύπου I η οποία εφαρμόζεται μόνο σε ένα μέρος του, μειώνει αρκετά την αντοχή του. Η επίδραση της ατέλειας στην αντοχή ενός αγωγού παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2.3.

3.3 ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Οι παραμένουσες τάσεις εμφανίζονται στο τοίχωμα του αγωγού κατά οποιαδήποτε κατεργασία μορφοποίησης ή θερμική κατεργασία. Στους υποθαλάσσιους αγωγούς, οι παραμένουσες τάσεις παράγονται κατά την διαδικασία παραγωγής τους στο εργοστάσιο. Υπάρχουν πολλοί τρόποι να μετρηθούν οι παραμένουσες τάσεις σε ένα σώμα εκ των οποίων αρκετές είναι απλές. Για τους αγωγούς ένας απλός τρόπος υπολογισμού των παραμενουσών τάσεων είναι η δημιουργία μιας εγκοπής κατά τον διαμήκη άξονα. Καθώς οι παραμένουσες τάσεις μπορεί να έχουν είτε διεύθυνση που έχει την τάση να εφελκύσει το εξωτερικό τοίχωμα ή να το θλίψει, η εγκοπή είτε θα επιτρέψει στον αγωγό να "ανοίξει" ή να "κλείσει".



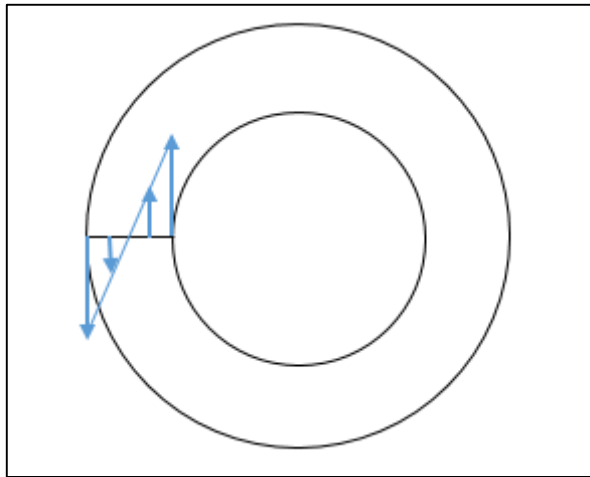
Εικόνα 24: Αναπαράσταση τρόπου υπολογισμού των παραμενουσών τάσεων σε έναν αγωγό

Η γωνία α που θα σχηματιστεί είτε προς τα μέσα είτε προς τα έξω μπορεί να καθορίσει τις παραμένουσες τάσεις στο σώμα μέσω της εξίσωσης:

$$|\sigma_{res}| = \frac{E t}{4\pi R^2} a \quad (3.1)$$

Όπου E, το μέτρο ελαστικότητας, a η γωνία που σχηματίζουν τα άκρα του αγωγού μετά την εγκοπή, t το πάχος του αγωγού και R η ακτίνα του.

Η κατανομή των παραμενουσών τάσεων κατά το πάχος του αγωγού είναι συνεχής όπως φαίνεται στην Εικόνα 25. Οι μέγιστες τιμές των τάσεων παρατηρούνται στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια του αγωγού με αντίθετη φορά, ενώ στην μέση του πάχους οι παραμένουσες τάσεις είναι μηδέν.



Εικόνα 25: Κατανομή παραμενουσών τάσεων σε αγωγό κυκλικής διατομής

Στόχος της ανάλυσης που ακολουθεί είναι η μοντελοποίηση των παραμενουσών τάσεων στους αγωγούς I και II και η εύρεση της επιρροής που έχουν στην πίεση κατάρρευσης τους.

3.3.1 ΜΟΝΤΕΛΟ-ΠΛΕΓΜΑ-ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

- Μοντέλο

Το μοντέλο αυτής της ανάλυσης χρησιμοποιεί το ένα τέταρτο της διατομής των αγωγών με μήκος $L/D=20$. Η ατέλεια εισάγεται στο μοντέλο ως ατέλεια Τύπου I η οποία επιδρά στην άνω γενέτειρα του αγωγού σε μήκος μιας διαμέτρου.

Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται για μεγέθη παραμενουσών τάσεων από 0% του σ_y μέχρι και 100% του σ_y . Οι τάσεις αυτές εισάγονται μέσω του αρχείου `''inp''` του ABAQUS στο πρώτο βήμα της ανάλυσης κάνοντας χρήση της εντολής `''Initial Conditions''`. Σε όλο το μήκος του αγωγού στο πάχος υπάρχουν 5 κόμβοι στο πλέγμα, για να είναι γραμμική η κατανομή των τάσεων θεωρείται ότι στον μεσαίο κόμβο `''3''`

οι παραμένουσες τάσεις είναι μηδέν. Στους κόμβους ``1`` και ``5`` οι οποίοι ανήκουν στην εξωτερική και εσωτερική επιφάνεια αντίστοιχα, δίνεται η μέγιστη τιμή της παραμένουσας τάσης για την οποία γίνεται η μελέτη κάθε φορά, με αντίθετα πρόσημα. Στους κόμβους ``2`` και ``4`` δίνεται το ένα δεύτερο της μέγιστης παραμένουσας τάσης με αντίθετα πρόσημα πάλι. Στην παρούσα μελέτη, έγινε η υπόθεση ότι οι παραμένουσες τάσεις στην εξωτερική επιφάνεια έχουν θετική τιμή οπότε ο αγωγός αν κοπεί στον διαμήκη άξονα θα τείνει να ``ανοίξει``.

- Πλέγμα

Όπως και στις προηγούμενες αναλύσεις, γίνεται χρήση κυλινδρικών κελυφών με τα στοιχεία να είναι μειωμένης ολοκλήρωσης τύπου S4R. Κατά το πάχος όπως αναφέρθηκε, υπάρχουν 5 κόμβοι στους οποίους είναι κατανεμημένες οι παραμένουσες τάσεις. Σε κάθε διατομή του αγωγού υπάρχουν 10 κόμβοι ενώ κατά τον διαμήκη άξονα, τα στοιχεία έχουν μήκος 20mm. Όλοι οι κόμβοι είναι τοποθετημένοι στην μέση επιφάνεια του αγωγού.

- Συνοριακές συνθήκες

Για τους σκοπούς της παρούσας ανάλυσης χρησιμοποιούνται οι ίδιες συνοριακές συνθήκες με αυτές της διδιάστατης ανάλυσης που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2.3.1.

- Στην άνω γενέτειρα του αγωγού εφαρμόστηκε συμμετρία ως προς τον x άξονα.
- Στην κάτω γενέτειρα εφαρμόστηκε συμμετρία ως προς τον y άξονα
- Στην αριστερή και την δεξιά άκρη του αγωγού εφαρμόστηκε συμμετρία ως προς τον z άξονα.
- Στο πρώτο βήμα της ανάλυσης εφαρμόστηκαν οι παραμένουσες τάσεις στα στοιχεία του αγωγού. Στο δεύτερο βήμα, εφαρμόστηκε μετατόπιση στους κόμβους της άνω γενέτειρας σε μήκος μιας διαμέτρου έτσι ώστε να δημιουργηθεί τελικά ατέλεια που να αντιστοιχεί σε λόγο $w/R = 0.25\%$ για κάθε αγωγό. Στο τρίτο βήμα καταργείται η εξαναγκασμένη μετατόπιση και ο αγωγός ισορροπεί με την επιστροφή της ελαστικής παραμόρφωσης. Στο τέταρτο βήμα, ασκείται στον αγωγό ομοιόμορφα κατανεμημένη τάση στην εξωτερική του επιφάνεια και οι υπολογισμοί γίνονται χρησιμοποιώντας την μέθοδο μήκους τόξου Riks.

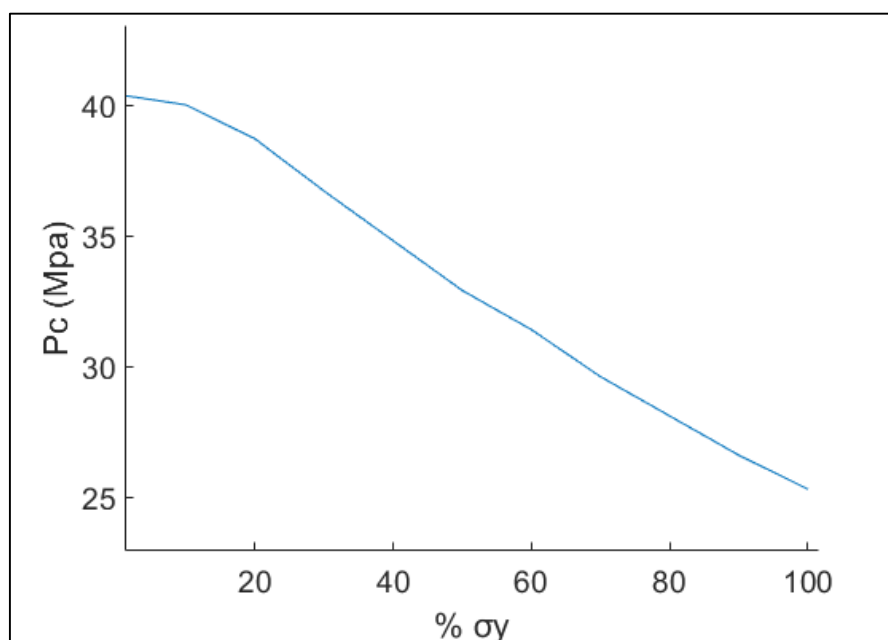
3.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με αύξηση της μέγιστης τιμής των παραμενουσών τάσεων κατά 10% κάθε φορά από 0% του σ_y μέχρι και 100% του σ_y συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες για του δυο αγωγούς.

- Αγωγός I

Residual Stress %	Pc (Mpa)
0% σ_y	40.4
10% σ_y	40
20% σ_y	38.7
30% σ_y	36.7
40% σ_y	34.8
50% σ_y	32.9
60% σ_y	31.4
70% σ_y	29.6
80% σ_y	28.1
90% σ_y	26.6
100% σ_y	25.3

Πίνακας 10: Αποτελέσματα επιρροής παραμενουσών τάσεων στην πίεση κατάρρευσης για τον αγωγό I

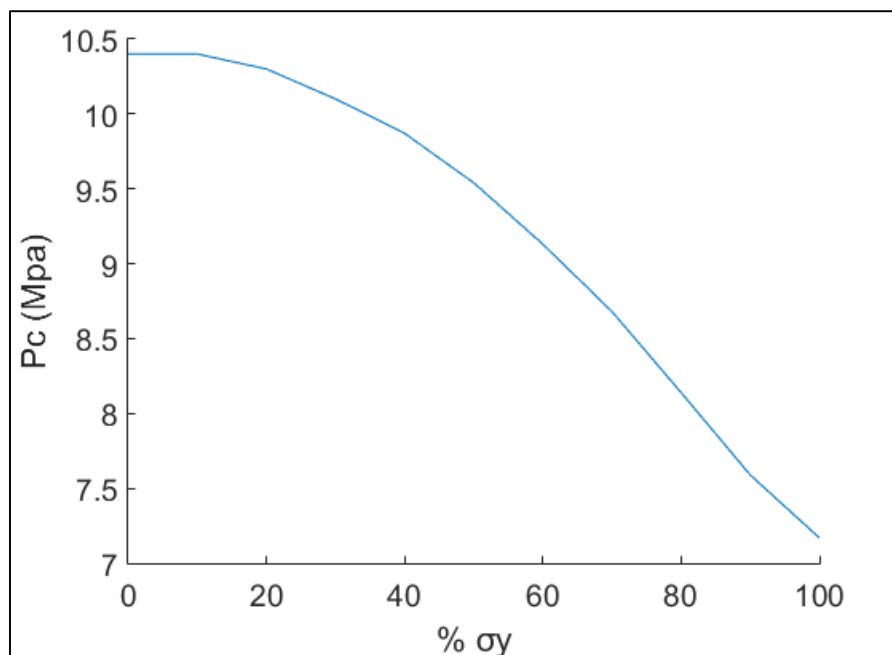


Γράφημα 19: Καμπύλη Pc-% σ_y για τον αγωγό I

- Αγωγός II

Residual Stress %	Pc
0% σ_y	10.4
10% σ_y	10.4
20% σ_y	10.3
30% σ_y	10.1
40% σ_y	9.87
50% σ_y	9.54
60% σ_y	9.13
70% σ_y	8.68
80% σ_y	8.14
90% σ_y	7.59
100% σ_y	7.17

Πίνακας 11: Αποτελέσματα επιρροής παραμενουσών τάσεων στην πίεση κατάρρευσης για τον αγωγό II



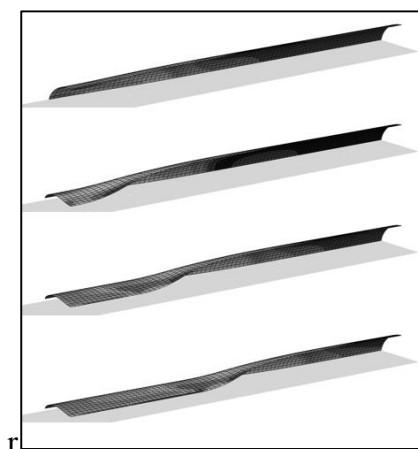
Γράφημα 20: Καμπύλη Pc-% σ_y για τον αγωγό II

Τα αποτελέσματα από το Γράφημα 19 και από το Γράφημα 20 δείχνουν πως το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων σε ένα σώμα έχει μεγάλη σημασία στην αντοχή του. Για μικρά ποσοστά παραμενουσών τάσεων, η πίεση κατάρρευσης δεν επηρεάζεται πολύ και είναι κοντά στην τιμή που βρέθηκε από την διδιάστατη ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο 2.3.3 για την αντίστοιχη ατέλεια. Από 20% του σ_y όμως και μεγαλύτερες παραμένουσες τάσεις, η πίεση κατάρρευσης παρουσιάζει μια σχεδόν γραμμική μείωση και στις δύο περιπτώσεις. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη δεδομένου ότι οι παραμένουσες τάσεις προστίθενται στις ασκούμενες

εξωτερικές με αποτέλεσμα το υλικό να περνάει πιο γρήγορα στην πλαστική ζώνη. Μέχρι το 60% του σ_y η πτώση της πίεσης κατάρρευσης είναι περίπου 10%, ενώ από 60% μέχρι 100% η πίεση κατάρρευσης έχει μειωθεί κατά 30% από την αρχική.

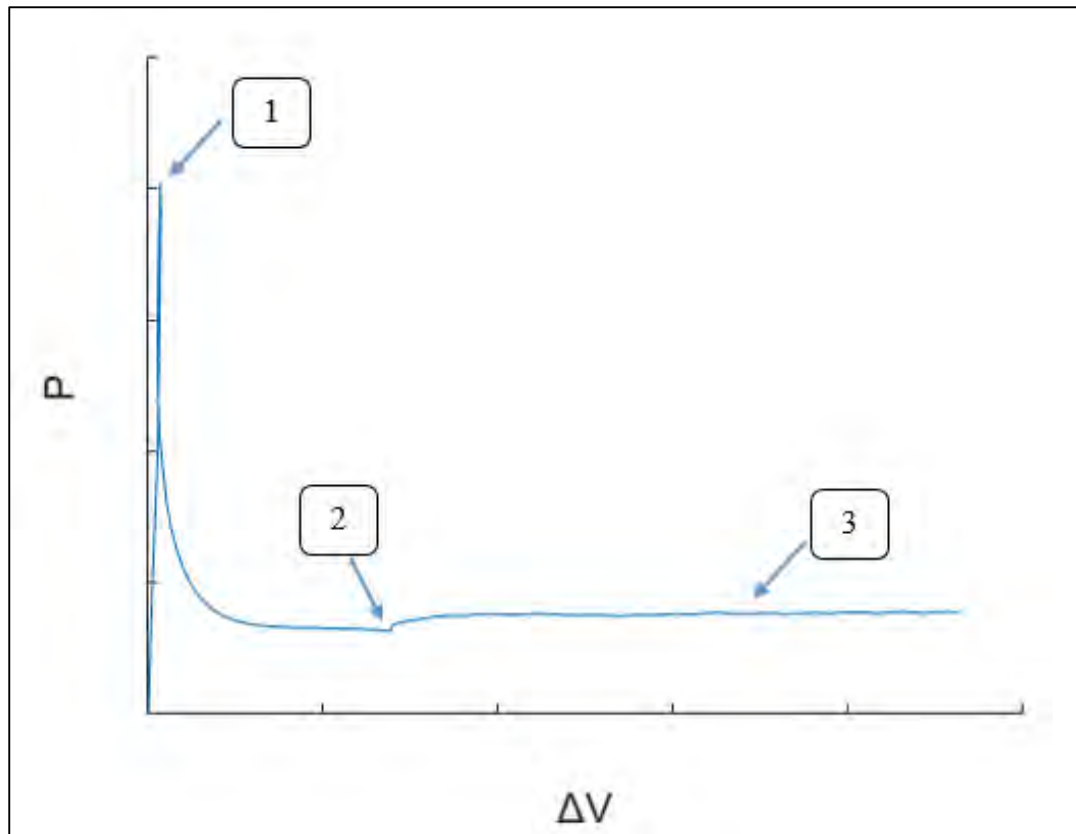
3.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ

Στην ενότητα αυτή, προσομοιώνεται το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης σε υποθαλάσσιους αγωγούς μεγάλου μήκους. Στόχος της ανάλυσης είναι ο υπολογισμός της σταθερής πίεσης διάδοσης η οποία αποτελεί το σημαντικότερο μέγεθος του φαινομένου.



Εικόνα 26: Αναπαράσταση φαινομένου διάδοσης ύβωσης

Για τον προσδιορισμό της πίεσης διάδοσης πρέπει να δημιουργηθεί ένα διάγραμμα πίεσης με την μεταβολή του όγκου που περικλείει ο αγωγός όπως φαίνεται στην Εικόνα 27. Στο διάγραμμα αυτό μπορούν να οριστούν τρία σημεία σημασίας όπως αυτά έχουν σημειωθεί στην εικόνα. Το σημείο "1" αντιστοιχεί στην πίεση κατάρρευσης του αγωγού και το οποίο όπως φαίνεται, συμβαίνει για μικρές μεταβολές όγκου. Στην συνέχεια, η πίεση μειώνεται απότομα καθώς καταρρέει η διατομή που πλαστικοποιήθηκε πρώτη. Η πίεση μειώνεται μέχρι το σημείο "2" στο οποίο η διατομή ακούμπησε την αντιδιαμετρική της και ορίζεται σαν σημείο "πρώτης επαφής". Η πίεση εκεί παρουσιάζει μια μικρή αύξηση, ενώ μετά παραμένει σταθερή όπως φαίνεται στο σημείο "3". Η σταθερή αυτή πίεση ορίζεται σαν την πίεση διάδοσης για τον υπο-μελέτη αγωγό.



Εικόνα 27: Καμπύλη P-ΔV για αγωγό υπό εξωτερική πίεση

Οι Kyriakides και Netto [12] για τον υπολογισμό της μεταβολής του όγκου κατά την διάρκεια της διαδιδόμενης ύψωσης σε ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία έκανα χρήση στοιχείων "hydrostatic fluid elements" τα οποία μπορούν να περιγράψουν τη μεταβολή ενός όγκου μέσα σε ένα δοχείο πίεσης.

Στην παρούσα εργασία, η μεθοδολογία που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της μεταβολής όγκου θα γίνει μέσω της αξιοποίησης των συντεταγμένων των κόμβων του μοντέλου κατά την διάρκεια της ανάλυσης. Από το αρχείο ".inp" του μοντέλου για το ABAQUS χρησιμοποιώντας την εντολή "Node Print", δημιουργείται ένα αρχείο ".dat" μετά το πέρας της ανάλυσης το οποίο περιέχει για όλα τα "increments" που έτρεξε, τις συντεταγμένες όλων των κόμβων του μοντέλου. Με ολοκλήρωση βασισμένη στον κανόνα του τραπεζίου μπορεί να υπολογιστεί η επιφάνεια που σχηματίζουν οι κόμβοι μιας διατομής. Επανάληψη αυτής της διαδικασίας για κάθε διατομή στον αγωγό μπορεί πολλαπλασιασμένη με την απόσταση μεταξύ δυο συνεχόμενων διατομών να δώσει τον όγκο που περικλείεται μέσα σε αυτόν σε ένα increment. Επανάληψη για όλα τα increment της ανάλυσης θα υπολογίσει όλους τους όγκους και αφαίρεση από τον αρχικό θα δώσει την μεταβολή της. Λόγω μεγάλου

υπολογιστικού φόρτου η παραπάνω διαδικασία έχει αυτοματοποιηθεί μέσω κώδικα σε Matlab.

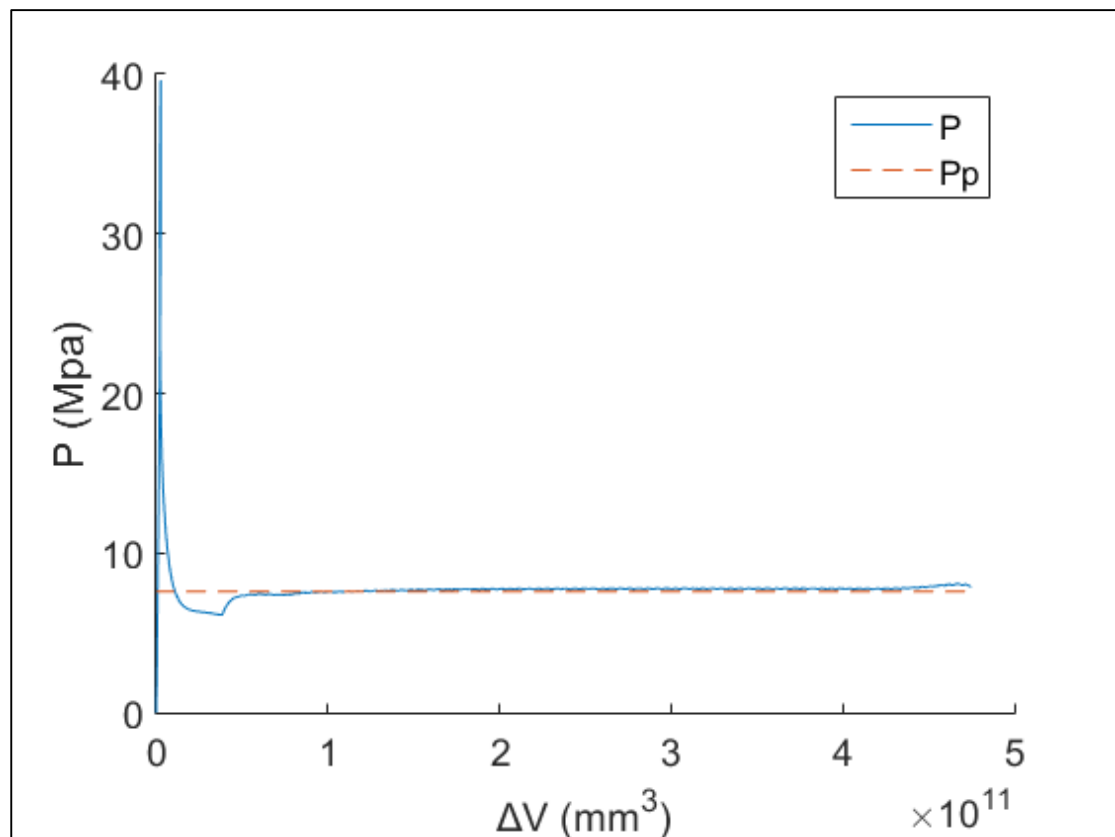
3.4.1 ΜΟΝΤΕΛΟ-ΠΛΕΓΜΑ-ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Το μοντέλο καθώς και το πλέγμα και οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για αυτή την ανάλυση είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο κεφάλαιο 3.3.1 χρησιμοποιώντας όμως μηδενικές παραμένουσες τάσεις.

3.4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

- Αγωγός I

Το διάγραμμα μεταβολής πίεσης σε σχέση με την μεταβολή όγκου για τον αγωγό I είναι:

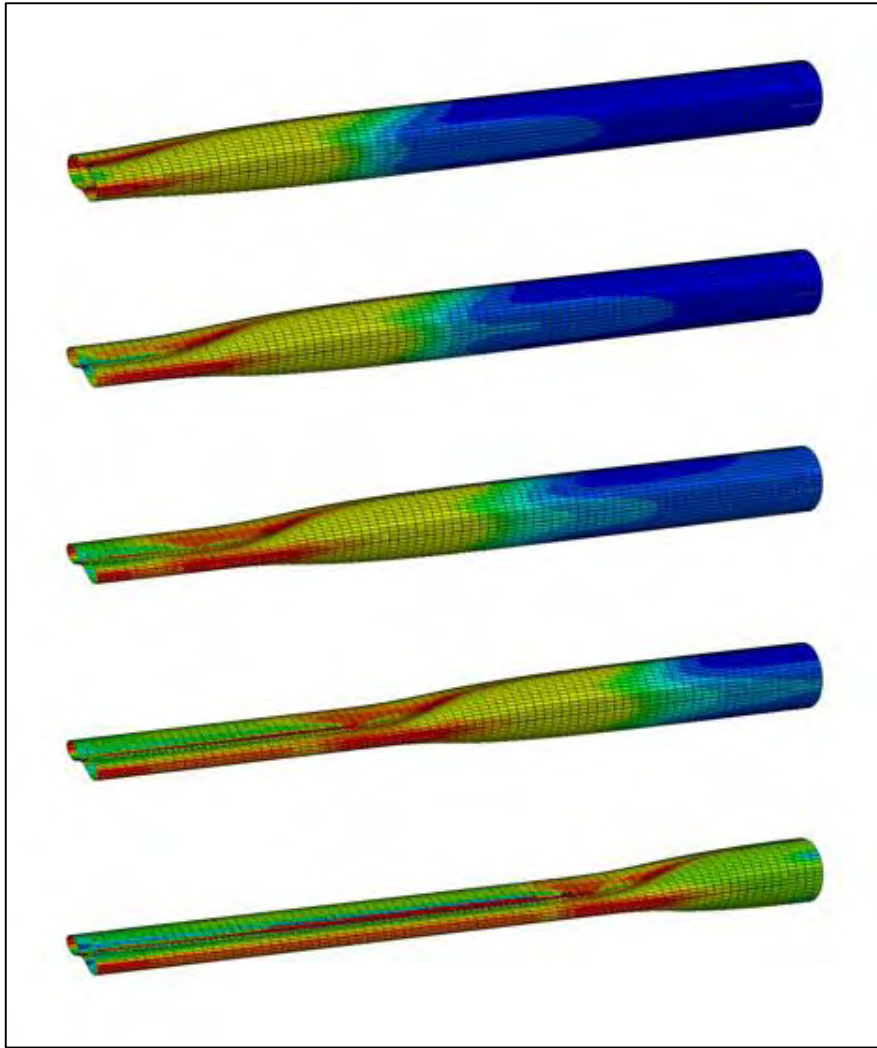


Γράφημα 21: Διάγραμμα P- ΔV για τον αγωγό I

Με βάση τον ορισμό που δόθηκε προηγουμένως προκύπτει ότι για τον αγωγό I ισχύει ότι:

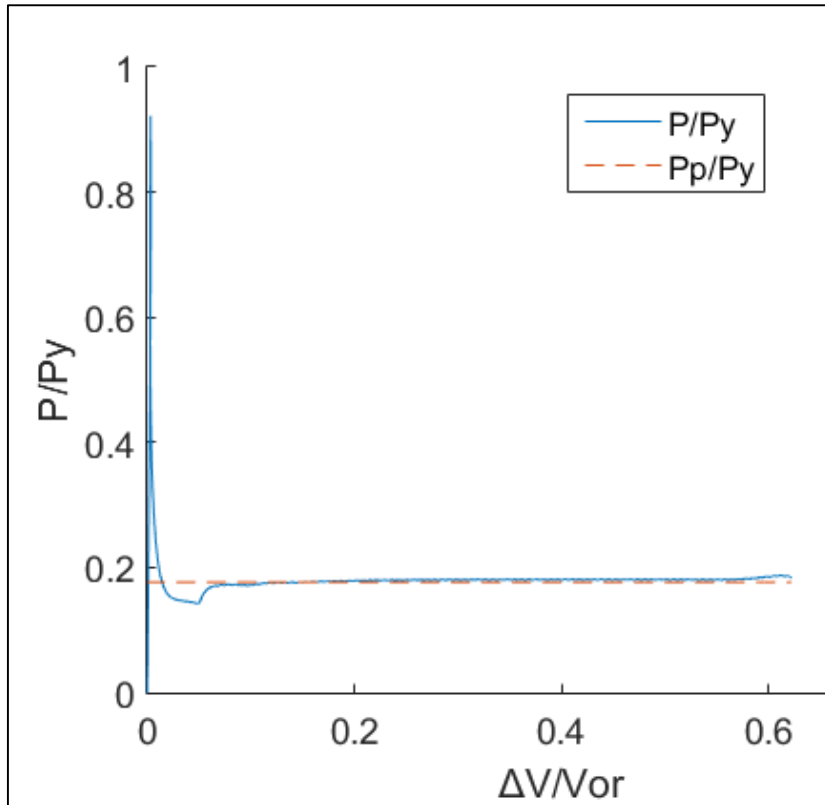
$$P_p = 7.53 \text{ Mpa}$$

Η οποία αναγράφεται και στο διάγραμμα με διακεκομμένη γραμμή.



Εικόνα 28: Διάδοση ύβωσης στον αγωγό I

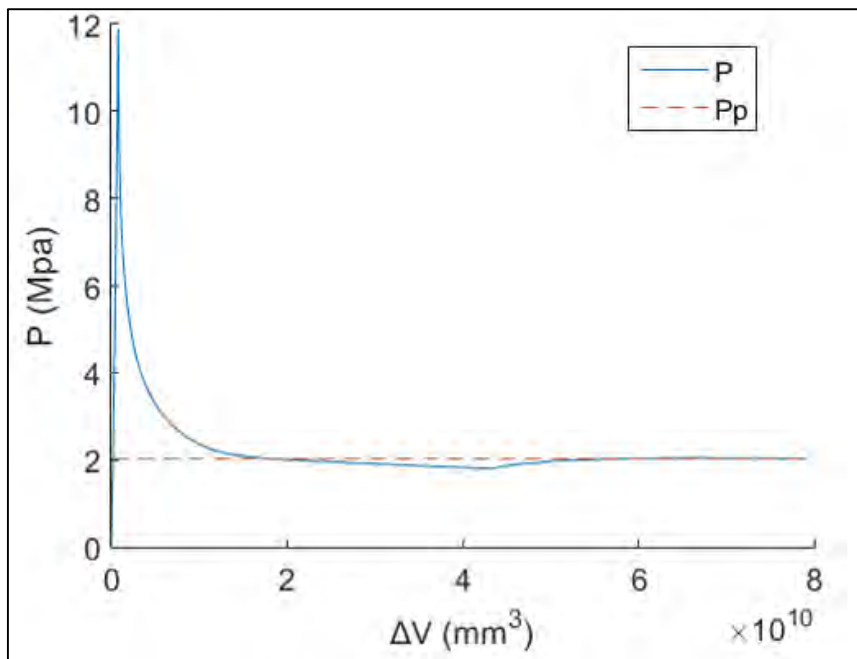
Το Γράφημα 21: Διάγραμμα P- ΔV για τον αγωγό I μπορεί να αδιαστατοποιηθεί διαιρώντας την πίεση με την P_y όπως αυτή ορίζεται από εξίσωση (1.3) η οποία δηλώνει την απαραίτητη εξωτερική πίεση που πρέπει να ασκηθεί στον αγωγό έτσι ώστε να πλαστικοποιηθεί πλήρως. Η μεταβολή όγκου ΔV αδιαστατοποιείται με την διαίρεσή της με τον αρχικό όγκο V_0 που καταλαμβάνει ο δακτύλιος πριν παραμορφωθεί. Το αδιάστατο διάγραμμα που προκύπτει έτσι για τον αγωγό I είναι:



Γράφημα 22: Αδιάστατο διάγραμμα $P/P_{\gamma}-\Delta V/V_o$ για τον αγωγό I

- Αγωγός II

Το διάγραμμα μεταβολής πίεσης σε σχέση με την μεταβολή όγκου για τον αγωγό II είναι:

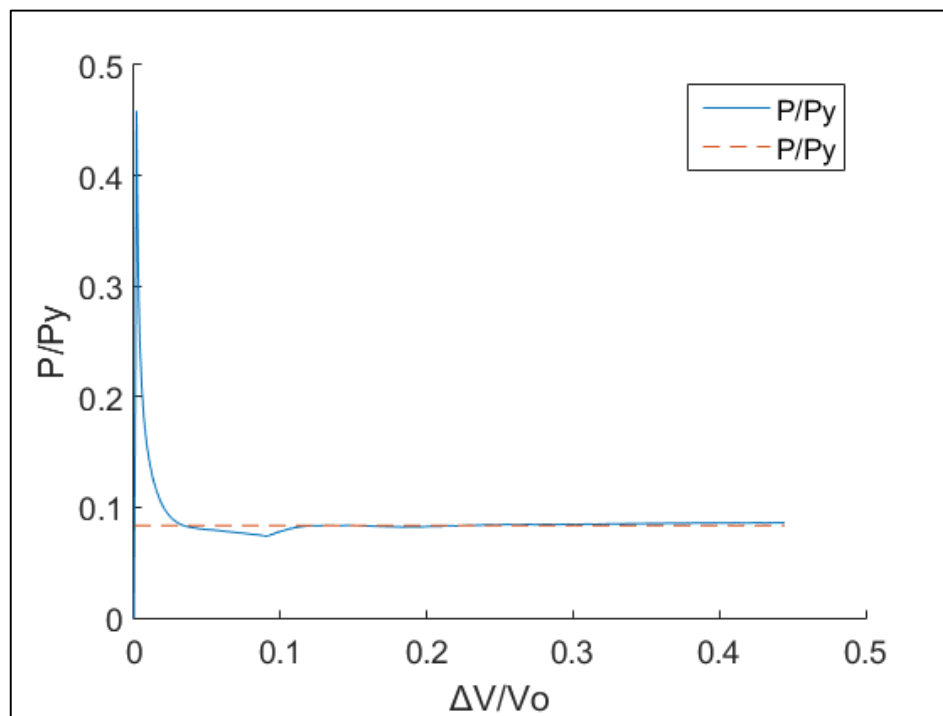


Γράφημα 23: Διάγραμμα $P-\Delta V$ για τον αγωγό II

Η πίεση διάδοσης όπως έχει αυτή χαραχθεί και στο διάγραμμα για τον αγωγό II είναι:

$$P_p = 2,21 \text{ Mpa}$$

Το αντίστοιχο αδιάστατο διάγραμμα είναι:



Γράφημα 24: Αδιάστατο διάγραμμα P/P_y - $\Delta V/V_o$ για τον αγωγό II

3.4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Από τις αναλύσεις που έχουν γίνει στην παρούσα εργασία, έχουν υπολογιστεί οι πιέσεις διάδοσης για τους δυο αγωγούς με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος ήταν χρησιμοποιώντας την εξίσωση των Palmer & Martin, ο δεύτερος χρησιμοποιώντας την μέθοδο της Maxwell Line και ο τρίτος, ο αριθμητικός υπολογισμός τους με πλήρης τριδιάστατη ανάλυση. Στον παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τους δυο αγωγούς.

ΠΙΕΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ			
	PALMER & MARTIN	MAXWELL LINE	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ
ΑΓΩΓΟΣ I	3.25	5.183	7.53
ΑΓΩΓΟΣ II	1.22	1.814	2.21

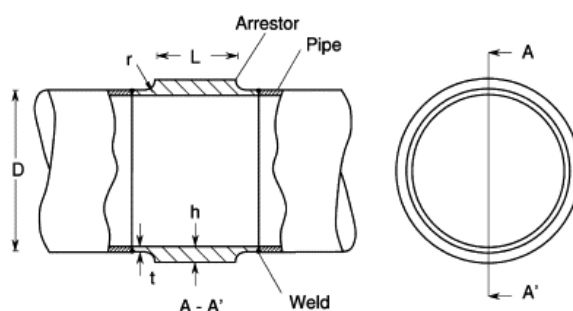
Πίνακας 12: Πίνακας υπολογισμένων πιέσεων διάδοσης για τους αγωγούς I και II

Από τον Πίνακα Πίνακας 12 γίνεται αντιληπτή η διαφορά που έχουν οι διδιάστατοι τρόποι υπολογισμού της πίεσης διάδοσης με την τριδιάστατη. Γνωρίζοντας ότι ο αριθμητικός υπολογισμός είναι ο πιο αντιπροσωπευτικός του φυσικού προβλήματος, η εξίσωση των Palmer & Martin έχει την μεγαλύτερη απόκλιση, το οποίο είναι λογικό δεδομένου του απλοποιημένου μοντέλου που χρησιμοποιεί. Η μέθοδος της Maxwell Line δίνει τιμή διάδοσης πίεσης πιο κοντά στην πρόβλεψη του τριδιάστατου προβλήματος από ότι η εξίσωση Palmer & Martin, αλλά πάλι έχει απόκλιση της τάξης του 25-30%.

Ο λόγος που η Maxwell Line διαφέρει από τον αριθμητικό υπολογισμό είναι ότι σε αυτόν δεν λαμβάνεται η συνεισφορά του έργου των διαμήκων τάσεων και παραμορφώσεων, καθώς υπολογίζονται μόνο οι περιμετρικές τάσεις και παραμορφώσεις στην διατομή. Η απόκλιση αυτή υποδεικνύει τον σημαντικό ρόλο που παίζουν οι διαμήκεις τάσεις στην διάδοση πίεσης, καθώς και την ανάγκη δημιουργίας πλήρους μοντέλου για τις αναλύσεις ώστε να ληφθούν αξιόπιστα αποτελέσματα για την πίεση διάδοσης.

4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ ΥΒΩΣΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο, μελετώνται αναστολείς τύπου "integral" [3] σε αγωγούς οι οποίοι υφίστανται το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1.1.2 οι αναστολείς αυτού του τύπου αποτελούν δακτυλίους με εσωτερική διατομή ίση με την εσωτερική διατομή, όπως με αρκετά μεγαλύτερο πάχος. Το υλικό από το οποίο αποτελούνται είναι το ίδιο με του αγωγού, στον οποίο συγκολλούνται ανά τακτά διαστήματα τα οποία καθορίζονται κυρίως από την βελτιστοποίηση κόστους σε σχέση με την αντοχή. Οι άκρες των αναστολέων οι οποίες συγκολλούνται στον αγωγό είναι ειδικά διαμορφωμένες σε καμπύλη μορφή έτσι ώστε να μειώνεται η συγκέντρωση τάσεων στα σημεία συγκόλλησης.



Εικόνα 29: Γεωμετρία αναστολέα τύπου "Integral"

Σκοπός της ανάλυσης που ακολουθεί είναι η διαστασιολόγηση αναστολέων ανάλογα με τις συνθήκες στις οποίες πρέπει να λειτουργήσουν (βάθος εγκατάστασης, βασικός αγωγός κλπ), ο υπολογισμός της πίεσης ανάρχεσης για τον κάθε αναστολέα και της απόδοσής τους. Επιπλέον, θα γίνει μελέτη αναστολέων που προτείνονται για τα βάθη που λειτουργούν οι αγωγοί I και II ενώ θα γίνει εξολοκλήρου μελέτη, διαστασιολόγηση και ανάλυση νέων αναστολέων για τους δυο αυτούς αγωγούς.

4.1 ΠΡΟΤΥΠΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Για τον σχεδιασμό και την κατασκευή υποθαλάσσιων αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων, έχουν αναπτυχθεί αρκετά πρότυπα τα οποία καθορίζουν τις παραμέτρους των αγωγών. Τα πλέον χρησιμοποιούμενα είναι το αμερικάνικο "API RP 1111" και το νορβηγικό "DNV OS-F101". Τα πρότυπα αυτά διαστασιολογούν αγωγούς οι οποίοι φορτίζονται υπό διάφορες συνθήκες όπως είναι ο συνδυασμός εσωτερικής και εξωτερικής πίεσης ή συνδυασμός εξωτερικής πίεσης και κάμψης. Ο

μεγαλύτερος παράγοντας είναι η εξωτερική πίεση, οπότε τα πρότυπα θα χρησιμοποιηθούν μόνο για εξωτερική φόρτιση, όπως και οι αριθμητικές αναλύσεις.

Σαν δεδομένα θα ληφθούν οι διαστάσεις των αγωγών I και II καθώς και τα βάθη στα οποία αυτοί λειτουργούν.

4.1.1 API RP 1111

Το συγκεκριμένο πρότυπο βασίζεται και λειτουργεί με την θεωρία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 1.

Για φόρτιση σε εξωτερική πίεση, δίνεται η εξής συνθήκη για κατάρρευση του αγωγού:

$$P_o - P_i \leq f_o * P_{cr} \quad (4.1)$$

Όπου P_o είναι η εξωτερική πίεση, P_i η εσωτερική πίεση και f_o είναι συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από τον τρόπο κατασκευής του αγωγού και ισούται με 0.6 για αγωγούς με ραφή και 0.7 για αγωγούς χωρίς ραφή. Το P_c είναι η πίεση κατάρρευσης όπως αυτή δόθηκε από την εξίσωση (1.1)

$$P_{cr} = \frac{P_e P_y}{\sqrt{P_y^2 + P_e^2}} \quad (4.2)$$

Όπου P_e και P_y όπως ορίστηκαν στο κεφάλαιο 1.1.3 προκύπτουν από τις εξισώσεις (1.2) και (1.3).

$$P_e = \frac{2E}{1 - \nu^2} \left[\frac{t}{D} \right]^3 \quad (4.3)$$

$$P_y = 2\sigma_y \frac{t}{D} \quad (4.4)$$

Εφόσον ο αγωγός αντέχει το κριτήριο αστοχίας λόγω εξωτερικής πίεσης επόμενο κριτήριο σχεδιασμού είναι η ανάγκη για αναστολέα ύβωσης. Ανάγκη για αναστολέα ύβωσης θα υπάρχει σε περίπτωση ικανοποίησης της παρακάτω συνθήκης.

$$P_o - P_i \geq f_c * P_p \quad (4.5)$$

Όπου f_c είναι συντελεστής διάδοσης ύβωσης ο οποίος ισούται με 0.8 και P_p είναι η πίεση διάδοσης υπολογισμένη από τον τύπο:

$$P_p = 24\sigma_y \left[\frac{t}{D} \right]^{2.4} \quad (4.6)$$

Για την διαστασιολόγηση του αναστολέα το πρότυπο API 1111 παραπέμπει στην δημοσίευση των Kyriakides, Park και Netto [9] όπου για την απόδοση του αναστολέα προτείνεται η σχέση (1.9):

$$n = \frac{P_{co} - P_p}{P_c - P_p} \quad (4.7)$$

για την οποία θα πρέπει να ισχύει ότι $0 \leq n \leq 1$. Ο αναστολέας θα έχει μηδενική απόδοση εφόσον η πίεση ανάσχεσής του ισούται με την πίεση διάδοσης του αγωγού ενώ, θα έχει την μέγιστη απόδοση ($n=1$) όταν η πίεση ανάσχεσης ισούται με την πίεση κατάρρευσης του αγωγού.

Επιπλέον οι Kyriakides, Park και Netto [9] σε εργασία τους, στηριζόμενοι σε πειραματικά και υπολογιστικά δεδομένα προτείνουν την εξής εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό της πίεσης ανάσχεσης P_{co} :

$$P_{co} = P_p \left[1 + A_1 \left(\frac{\sigma_y}{E} \right)^{0.5} \left(\frac{\sigma_{yA}}{E} \right)^{0.5} \left(\frac{t}{D} \right)^{1.25} \left(\frac{L_A}{t} \right)^{0.8} \left(\frac{h}{t} \right)^{2.5} \right] \quad (4.8)$$

όπου σ_{yA} είναι το όριο διαρροής του υλικού του αναστολέα, L_A είναι το μήκος του αναστολέα και h το πάχος του ενώ το A_1 είναι συντελεστής ο οποίος ισούται με 667,6. Συνδυάζοντας τις (4.7) και (4.8) προκύπτει ο παρακάτω εμπειρικός τύπος για τον υπολογισμό της απόδοσης του αναστολέα:

$$n = \frac{A_1 \left(\frac{\sigma_y}{E} \right)^{0.5} \left(\frac{\sigma_{yA}}{E} \right)^{0.5} \left(\frac{t}{D} \right)^{1.25} \left(\frac{L_A}{t} \right)^{0.8} \left(\frac{h}{t} \right)^{2.5}}{\left(\frac{P_c}{P_p} - 1 \right)} \quad (4.9)$$

Η σχέση αυτή θα πρέπει να χρησιμοποιείται για αναστολές απόδοσης $n \leq 0,7$. Για δεδομένο αγωγό και δεδομένη επιθυμητή απόδοση η σχέση (4.9) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσει το πάχος ή το μήκος του αναστολέα, καθώς μια εκ των δυο μεταβλητών θα πρέπει να προσδιοριστεί από τον σχεδιαστή βάσει οι οικονομικών ή κατασκευαστικών κριτηρίων.

4.1.2 DNV OS-F101

Το νορβηγικό πρότυπο ακολουθεί παρόμοια λογική με το αμερικάνικο πρότυπο ορίζοντας αρχικά μια συνθήκη για την κατάρρευση του αγωγού.

$$P_e - P_{min} \leq \frac{P_c}{\gamma_m \gamma_{sc}} \quad (4.10)$$

Όπου P_e είναι η εξωτερική πίεση, P_{min} είναι η ελάχιστη δυνατή εσωτερική πίεση, P_c είναι η πίεση κατάρρευσης, γ_m είναι συντελεστής υλικού, γ_{sc} είναι συντελεστής ζώνης ασφαλείας (Χαμηλή=1.04, Μεσαία=1.14, Υψηλή=1.26). Η πίεση κατάρρευσης υπολογίζεται από την σχέση :

$$(P_c - P_{el})(P_c^2 - P_p^2) = P_c P_{el} P_p f_o \frac{D}{t} \quad (4.11)$$

Όπου :

$$P_{el} = \frac{2E}{1 - \nu^2} \left[\frac{t}{D} \right]^3 \quad (4.12)$$

$$P_p = f_y 2 \alpha_{fab} \frac{t}{D} \quad (4.13)$$

$$f_o = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} \quad (4.14)$$

Όπου α_{fab} είναι ο συντελεστής κατασκευής ($\alpha_{fab} = 1$ αν δεν έχει ραφή συγκόλλησης ο αγωγός, $\alpha_{fab} = 0.93$ αν έχει), f_o είναι ο συντελεστής οβαλότητας της διατομής και δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερος του 0.5%. Το f_y είναι ένας συντελεστής που ορίζεται ως η χαρακτηριστική αντοχή του υλικού και υπολογίζεται από την σχέση:

$$f_y = \sigma_y \alpha_u \quad (4.15)$$

που α_u είναι συντελεστής ισχύος του υλικού και λαμβάνεται ως 0,96.

Το κριτήριο που δηλώνει την ανάγκη για ενσωμάτωση αναστολέα στον αγωγό ορίζεται ως:

$$P_e - P_{min} \leq \frac{P_{pr}}{\gamma_m \gamma_{sc}} \quad (4.16)$$

όπου η πίεση διάδοσης P_{pr} υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_{pr} = 35 f_y \alpha_{fab} \left(\frac{t}{D} \right)^{2.5} \quad (4.17)$$

Ο σχεδιασμός του αναστολέα είναι βασισμένος στην παρακάτω συνθήκη όπου πρέπει να ισχύει ότι:

$$P_e \leq \frac{P_x}{1.1 \gamma_m \gamma_{sc}} \quad (4.18)$$

όπου P_x είναι η πίεση ανάσχεσης του αναστολέα η οποία υπολογίζεται από:

$$P_x = P_{pr} + (P_{pr,BA} - P_{pr}) \left[1 - \text{EXP} \left(-20 \frac{t * L_{BA}}{D^2} \right) \right] \quad (4.19)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση, $P_{pr,BA}$ είναι η πίεση διάδοσης για αγωγό με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αναστολέα η οποία βρίσκεται από την εξίσωση (4.17) και L_{BA} είναι το μήκος του αναστολέα.

Διαμορφώνοντας τα επιθυμητά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αναστολέα πρέπει να σχεδιαστεί ένας αναστολέας ο οποίος θα ικανοποιεί την συνθήκη (4.18)

4.2 ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΑΡΧΟΝΤΟΣ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ

Στην παρούσα ενότητα, θα γίνει αριθμητική ανάλυση ενός αναστολέα που χρησιμοποιείται σε αγωγούς που έχουν τα χαρακτηριστικά του αγωγού Ι. Συγκεκριμένα θα δημιουργηθεί μοντέλο για τον αγωγό και τον αναστολέα, το οποίο θα

επιβληθεί σε εξωτερική πίεση ούτως ώστε να μετρηθεί η πίεση ανάσχεσής του. Η τιμή αυτή, έπειτα θα συγκριθεί με τις αντίστοιχες προβλέψεις από το αμερικάνικο και το νορβηγικό πρότυπο που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

4.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ-ΠΛΕΓΜΑ-ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

- Μοντέλο

Το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί σε αυτή την ανάλυση για τον αγωγό I έχει μήκος 10D μέχρι τον αναστολέα και μήκος 10D μετά τον αναστολέα έτσι ώστε να επιτραπεί στη διαδιδόμενη ύβωση να τον προσπεράσει. Όπως και στις προηγούμενες αναλύσεις και εδώ ισχύει η διπλή συμμετρία οπότε θα μελετηθεί το ένα τέταρτο της διατομής του αγωγού και του αναστολέα προς μείωση του υπολογιστικού κόστους.

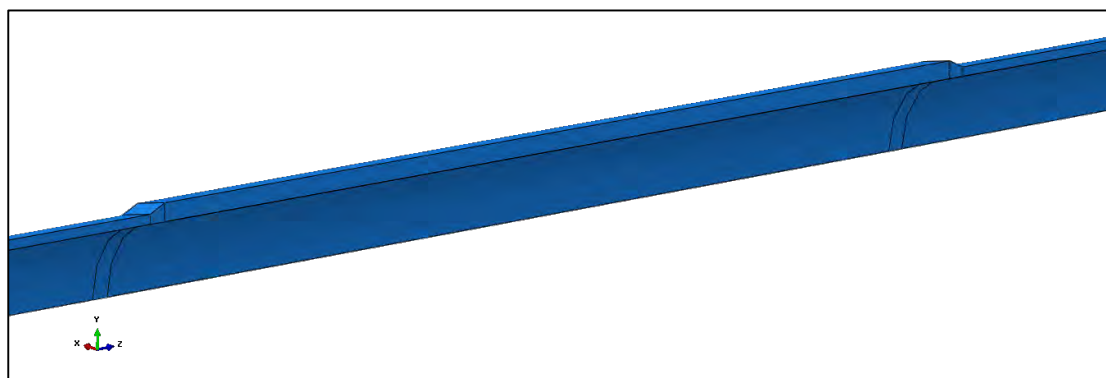
Στο μοντέλο εισάγονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αναστολέα που είναι:

$$L_{BA} = 4100mm$$

$$h = 74mm$$

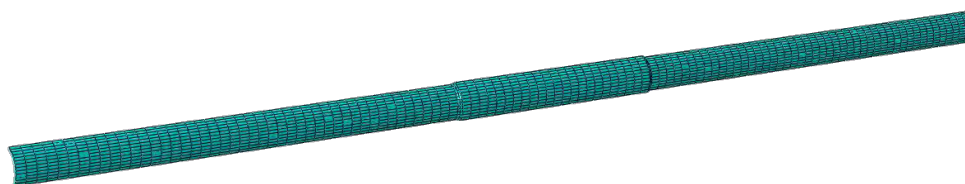
- Πλέγμα

Η συγκεκριμένη ανάλυση έχει μια διαφορά ως προς τις προηγούμενες όσον αφορά το πλέγμα και αυτή έγκειται στο γεγονός πως τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο δεν είναι στοιχεία κελύφους αλλά οκτακομβικά στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης τύπου C3. Ο λόγος για αυτό είναι ότι για την ορθή μελέτη του αναστολέα πρέπει να μοντελοποιηθεί και η διαμόρφωση που υπάρχει στην άκρη του αναστολέα η οποία μειώνει γραμμικά την διάμετρο του αναστολέα σε αυτήν του αγωγού όπως φαίνεται και στην Εικόνα 30. Αυτό επιτρέπει την ευκολότερη και καλύτερη συγκόλληση ενώ μειώνει και την συγκέντρωση τάσεων.



Εικόνα 30: Μοντελοποίηση διαμορφώσεων άκρων αναστολέα

Κατά το πάχος του αγωγού και του αναστολέα έχουν χρησιμοποιηθεί 5 στοιχεία, 14 στοιχεία στην διατομή και 300 στοιχεία κατά μήκος του μοντέλου.



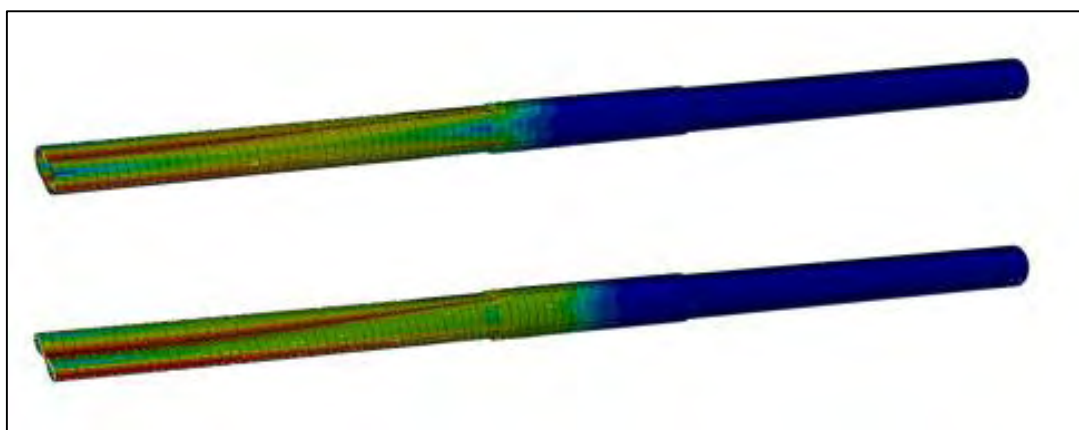
Εικόνα 31: Πλέγμα μοντέλου ανάλυσης δεδομένου αναστολέα για τον αγωγό I

- Συνοριακές συνθήκες

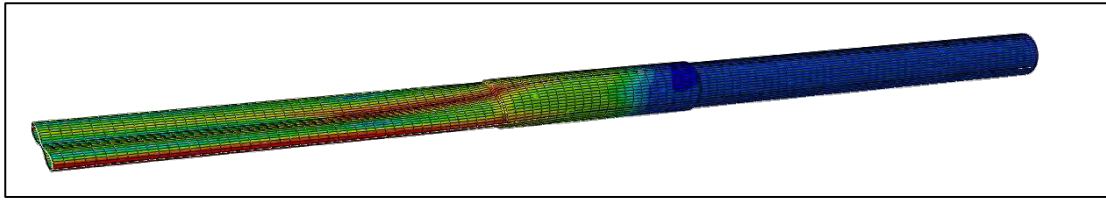
Οι συνοριακές συνθήκες αυτού του μοντέλου είναι ίδιες με αυτές του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν για την διδιάστατη ανάλυση όπως αυτές αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2.3.1. Η ατέλεια που εισάγεται στον αγωγό είναι τύπου I (3.2) η οποία εφαρμόζεται σε μήκος τριών διαμέτρων στην άνω γενέτειρα του μοντέλου.

4.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο μοντέλο του αγωγού ασκήθηκε εξωτερική πίεση η οποία αρχικά οδήγησε στην κατάρρευση του τμήματος του αγωγού που είχε την ατέλεια και μετέπειτα ξεκίνησε η διάδοση της ύβωσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 32. Η διαδιδόμενη ύβωση μετά από ένα χρονικό διάστημα συναντά τον αναστολέα και αναστέλλεται.

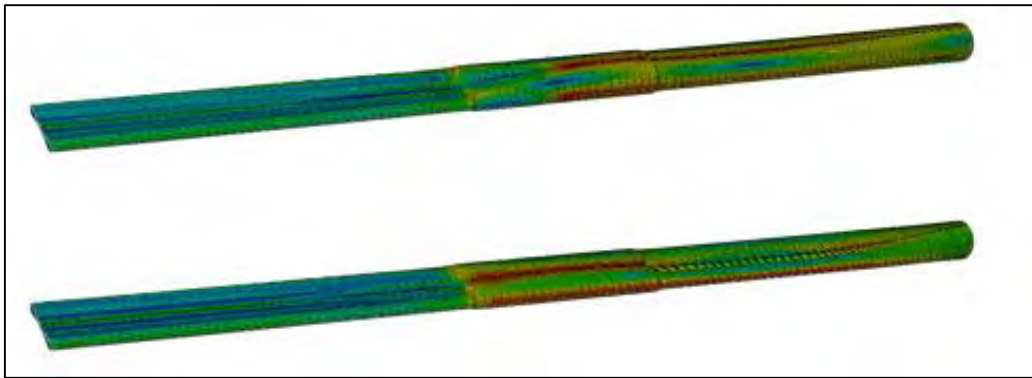


Εικόνα 32: Κατάρρευση αγωγού και διάδοση ύβωσης για δεδομένο αναστολέα για τον αγωγό I

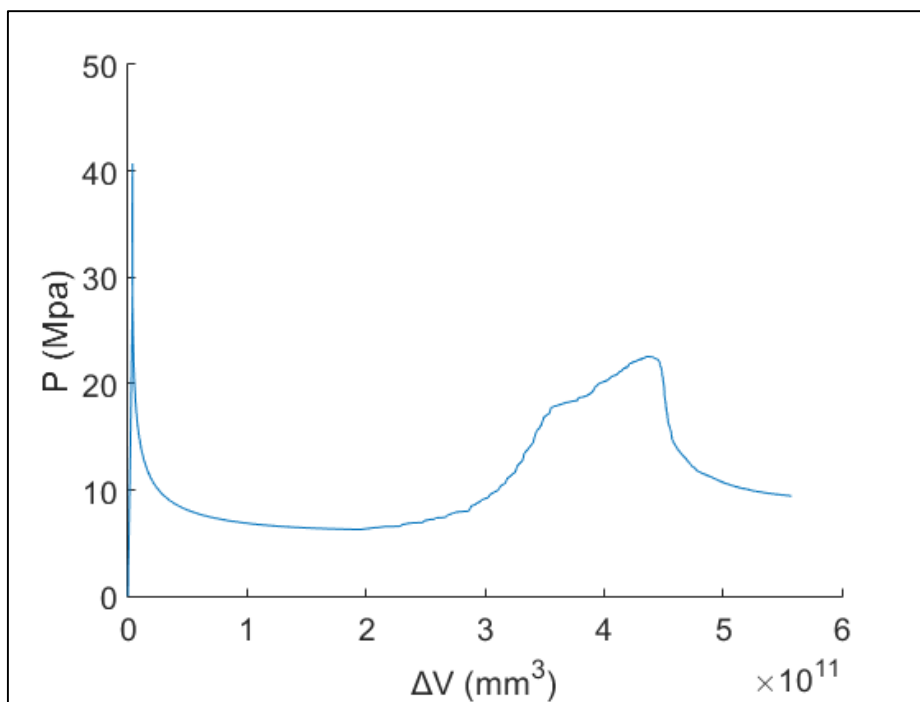


Εικόνα 33: Αναστολή ύβωσης

Αύξηση της πίεσης, οδηγεί στην παραμόρφωση του αναστολέα και στην ανάσχεσή του με την ύβωση να περνάει στον αγωγό και να διαδίδεται μέχρι την πλήρη αστοχία του. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με αυτή που ακολουθήθηκε στο κεφάλαιο 3.4.2 για την παραγωγή του διαγράμματος P- ΔV για τον αγωγό προκύπτει το Γράφημα 25.



Εικόνα 34: Ανάσχεση αναστολέα και διάδοση της ύβωσης στον αγωγό I

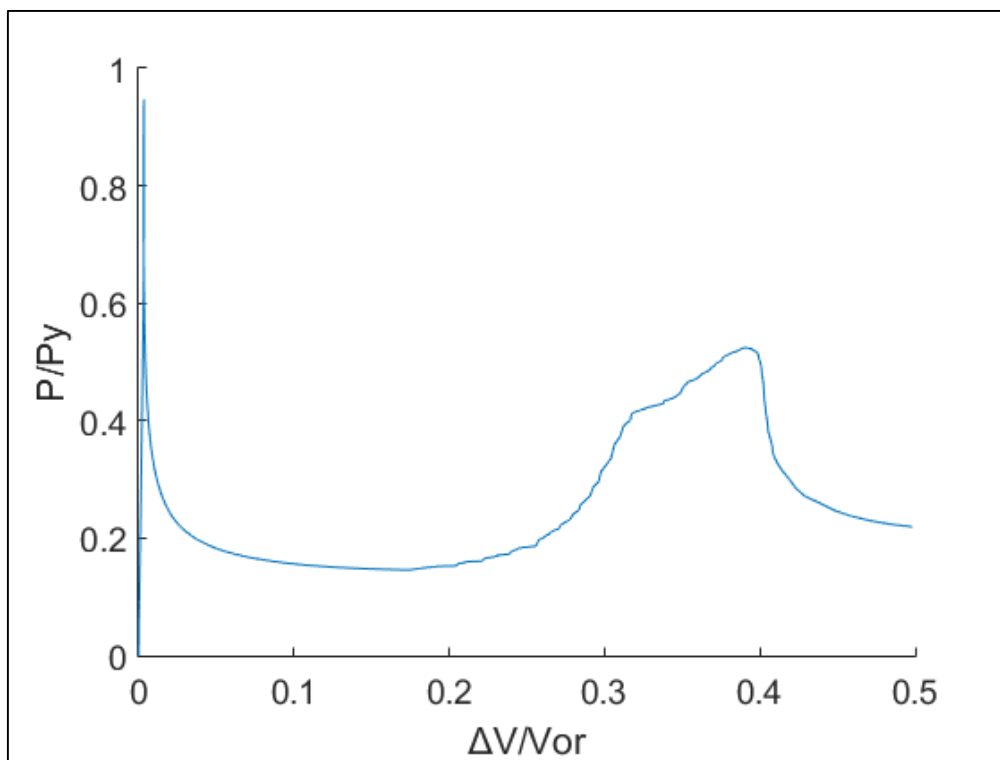


Γράφημα 25: Διάγραμμα πίεσης με μεταβολή όγκου μοντέλου με δεδομένο αναστολέα για τον αγωγό I

Από το παραπάνω γράφημα παρατηρείται ότι στην αρχή η μεταβολή της πίεσης συμπεριφέρεται όπως και στο μοντέλο υπολογισμού της διάδοσης πίεσης, το οποίο σημαίνει ότι η πίεση αυξάνεται απότομα μέχρι να καταρρεύσει η πρώτη διατομή. Ανάλογη απότομη πτώση της πίεσης ακολουθεί με αυτήν να σταθεροποιείται σχεδόν στην τιμή της διάδοσης πίεσης. Ο λόγος που δεν παραμένει σταθερή η πίεση όπως στο Γράφημα 21 είναι επειδή ενεργοποιείται άμεσα ο αναστολέας, που οδηγεί σε αυτήν την σταδιακή ξανά αύξηση της πίεσης. Η παρατήρηση πως η πίεση κατάρρευσης και η πίεση διάδοσης είναι συμβατές με τις προηγούμενες αναλύσεις επαληθεύει την αξιοπιστία του παρόντος μοντέλου. Απότομη αύξηση της πίεσης συναντάται όταν η ύβωση φτάσει τον αναστολέα και μειώνεται όταν αυτή τον ξεπεράσει. Η μέγιστη πίεση που παρατηρείται σε αυτό το τμήμα του διαγράμματος αντιστοιχεί στην πίεση ανάσχεσης του αναστολέα, η οποία είναι:

$$P_{co} = 22.53 \text{ Mpa}$$

Το διάγραμμα μπορεί να αδιαστατοποιηθεί όπως και στο κεφάλαιο 3.3.2 και να πάρει την παρακάτω μορφή.



Γράφημα 26: Αδιάστατο διάγραμμα $P/P_y - \Delta V/V_{or}$ για δεδομένο αναστολέα για τον αγωγό I

4.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΠΡΟΤΥΠΑ API ΚΑΙ DNV

Ακολουθεί, σύγκριση των αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου με πεπερασμένα στοιχεία με τα αποτελέσματα που δίνουν τα πρότυπα για τον δεδομένο αναστολέα για τον αγωγό I.

Σαν δεδομένα για τα πρότυπα λήφθηκαν τα στοιχεία του ακόλουθου πίνακα:

Βάθος (m)	2200
σ_y (MPa)	448
E (MPa)	206000
D (mm)	812.8
t (mm)	39
LBA (mm)	4100
h (mm)	74

Πίνακας 13: Δεδομένα για υπολογισμούς από τα πρότυπα API και DNV

Για τον υπολογισμό της εξωτερικής πίεσης που ασκείται σε έναν υποθαλάσσιο αγωγό το μόνο που χρειάζεται να είναι γνωστό είναι το βάθος στο οποίο βρίσκεται και υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$P = \rho * g * H \quad (4.20)$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του νερού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και H το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο αγωγός. Από τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαια 4.1.1 και 4.1.2 προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

API		DNV	
Po	21.56	Pe	21.56
Pi	0.1	Pmin	0.1
Pγ	42.99	Pp	41.27
Pe	50	PeI	50
Pc	32.6	Pc	34.8
Pp	7.34	Ppr	7.59
		Pp,BA	30.62
Pco	56.52	Px	30.62

Πίνακας 14: Αποτελέσματα πιέσεων σε MPa για τον δεδομένο αναστολέα για τον αγωγό I

Συγκριτικά με τα αριθμητικά αποτελέσματα, παρατηρείται πως η πίεση κατάρρευσης που υπολογίζουν τα δυο πρότυπα είναι αισθητά χαμηλότερη από αυτήν που υπολογίζεται από τα μοντέλα μέχρι τώρα, αλλά μπορεί να οφείλεται στην ατέλεια που θεωρούν τα δυο πρότυπα. Αυτή η πίεση κατάρρευσης που υπολογίζεται από τα πρότυπα αντιστοιχεί σε ατέλεια $w/R=0.5\%$ από τον Πίνακα 1 για τον αγωγό I. Η πίεση διάδοσης είναι και από τα δυο πρότυπα πολύ κοντά μεταξύ τους, ενώ αυτή που υπολογίζεται από το DNV είναι ακριβώς ίση με την πίεση διάδοσης που υπολογίζουν τα αριθμητικά μοντέλα.

Η μεγαλύτερη απόκλιση, υπάρχει στην πίεση ανάσχεσης του αναστολέα η οποία υπολογίζεται από το API ως διπλάσια της τιμής που υπολογίζεται από το αριθμητικό μοντέλο, ενώ το DNV παρουσιάζει καλύτερη ακρίβεια ως προς την αριθμητική λύση η οποία είναι 8 MPa λιγότερη από αυτή. Η απόκλιση που παρουσιάζει το API μπορεί να οφείλεται στη χρήση της εξίσωσης (4.8) η οποία πρέπει να χρησιμοποιείται για αναστολείς που η απόδοσή τους όπως ορίζεται από την (4.9) είναι μικρότερη του 0.7. Με αντικατάσταση των αποτελεσμάτων από το API προκύπτει ότι η απόδοση αυτού του αναστολέα είναι:

$$n = 1.94$$

Αυτό σημαίνει πως η χρήση της εξίσωσης (4.8) δεν συνιστάται σε αυτή την περίπτωση, διότι είναι σημαντικά μεγαλύτερη της τιμής 0.7.

Αξίζει να σημειωθεί πως οι διαστάσεις που προτείνονται για τον αναστολέα δεν ικανοποιούν την συνθήκη (4.18).

Αντίστοιχη σύγκριση για την πίεση διάδοσης, αποκαλύπτει πως τα δυο πρότυπα έχουν πολύ ικανοποιητική ακρίβεια με το API να έχει απόκλιση 10% και το DNV 3% από την τιμή που προκύπτει από το αριθμητικό μοντέλο.

Σύγκριση των τιμών της πίεσης κατάρρευσης που υπολογίζουν τα πρότυπα δείχνει πως και οι δυο τιμές είναι 20% χαμηλότερες από τις τιμές που δίνουν τα πεπερασμένα στοιχεία. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στους συντελεστές ασφαλείας που εισάγουν τα πρότυπα ούτως ώστε ο σχεδιασμός να γίνει με θεωρητική αντοχή του αγωγού μικρότερη από την πραγματική για επιπλέον αξιοπιστία.

4.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ-ΠΡΟΤΑΣΗ ΝΕΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ

Έχει γίνει μια αρκετά εκτενής αναφορά μέχρι τώρα στον τρόπο σχεδιασμού αναστολέων, ενώ μέσω της προηγούμενης ενότητας έχει προσδιοριστεί η ακρίβεια των προτύπων και οι περιορισμοί του. Σε αυτό το κομμάτι της εργασίας, θα σχεδιαστούν αναστολείς για τους αγωγούς I και II με τη χρήση του προτύπου DNV, το οποίο δεν έχει κάποιο περιορισμό στην εφαρμογή των εξισώσεων που χρησιμοποιεί. Οι αναστολείς που θα προκύψουν θα μοντελοποιηθούν με μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων και θα αναλυθούν όπως στο κεφάλαιο 4.2.

4.3.1 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΙΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ DNV OS-F101_2012_08

- Αγωγός I

Δεδομένα για τον αγωγό I είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του και το θαλάσσιο βάθος λειτουργίας του. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.19) γίνεται δοκιμή διαφόρων μηκών και παχών για τον αναστολέα με σκοπό να ικανοποιηθεί η συνθήκη (4.18).

Από αυτήν προκύπτει ότι ο αναστολέας πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

$$L_{BA} = 2400mm$$

$$h = 78mm$$

Για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτά η πίεση ανάσχεσης του αναστολέα υπολογίζεται ως:

$$P_x = 29.09 Mpa$$

- Αγωγός II

Όπως και στον αγωγό I, με βάση την εξίσωση (4.19) προσδιορίστηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αναστολέα για να ικανοποιείται η συνθήκη (4.18), τα οποία προέκυψαν να είναι:

$$L_{BA} = 2500mm$$

$$h = 60mm$$

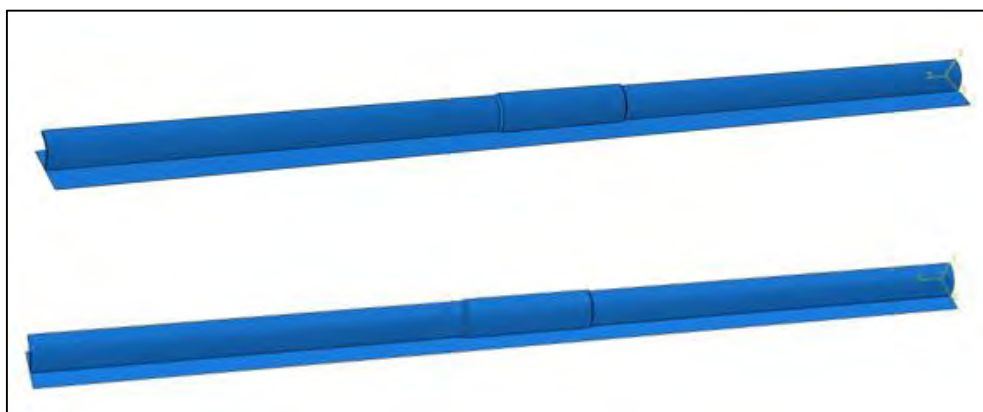
για αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά η πίεση ανάσχεσης του αναστολέα υπολογίζεται ότι είναι:

$$P_x = 13,23 Mpa$$

Το μήκος του επιλεγμένου αναστολέα, αν και φαινομενικά μεγάλο οφείλεται στην μεγάλη διάμετρο που έχει ο αγωγός.

4.3.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ-ΠΛΕΓΜΑ-ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Στην αριθμητική ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκε ακριβώς το ίδιο πλέγμα και συνοριακές συνθήκες και μοντέλο με εξαίρεση την γεωμετρία του αναστολέα με αυτό που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4.2.1, οπότε παραλείπεται η επανάληψή τους εδώ.

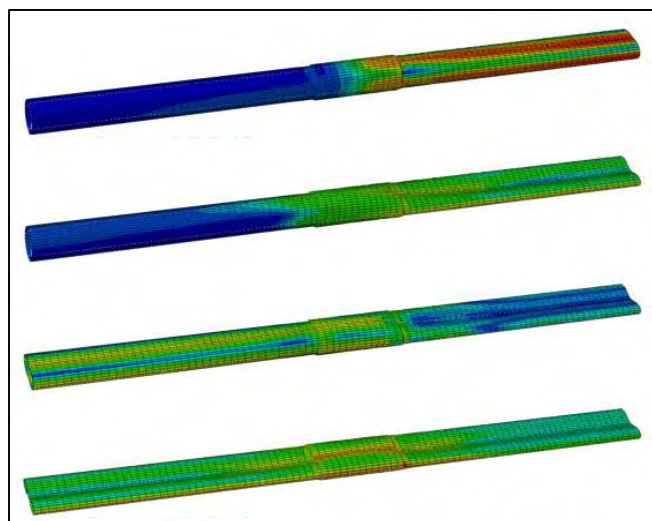


Εικόνα 35: Μοντέλα αναστολέων για τον αγωγό I (πάνω) και για τον αγωγό II (κάτω)

4.3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

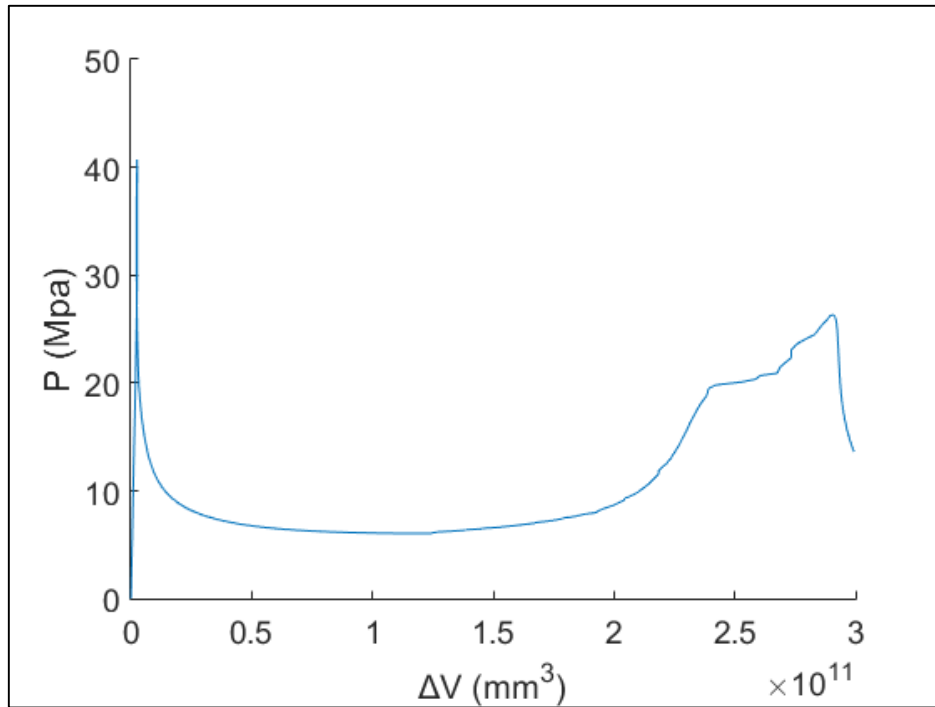
- Αγωγός I

Η συμπεριφορά του αγωγού και του αναστολέα ήταν η αναμενόμενη και παρομοιάζει αυτή που παρουσιάστηκε με τον δεδομένο αναστολέα για τον αγωγό I.

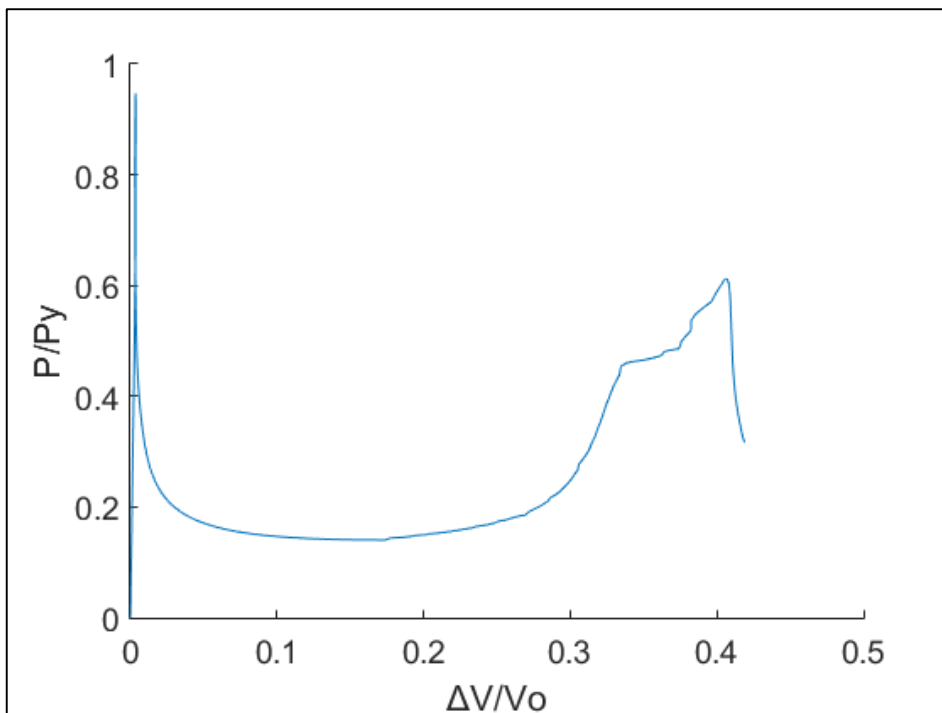


Εικόνα 36: Διάδοση της ύψωσης, ανάσχεσή της και υπερπήδηση αναστολέα για τον αγωγό I

Το διάγραμμα πίεσης μεταβολής όγκου για το μοντέλο αυτό είναι:



Γράφημα 27: Διάγραμμα $P-\Delta V$ για τον αγωγό I με τον νέο αναστολέα



Γράφημα 28: Αδιάστατο διάγραμμα $P/P_y-\Delta V/V_o$ για τον αγωγό I με τον νέο αναστολέα

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η πίεση ανάσχεσης του αναστολέα είναι:

$$P_x = 26,32 \text{ Mpa}$$

Το πρότυπο DNV είχε δώσει, $P_x = 29,09 \text{ Mpa}$ οπότε πάλι υπάρχει μια διαφορά μεταξύ των δυο τιμών. Για την πίεση ανάσχεσης που υπολογίστηκε αριθμητικά, η απόδοση του αναστολέα με βάση την εξίσωση (4.7) είναι:

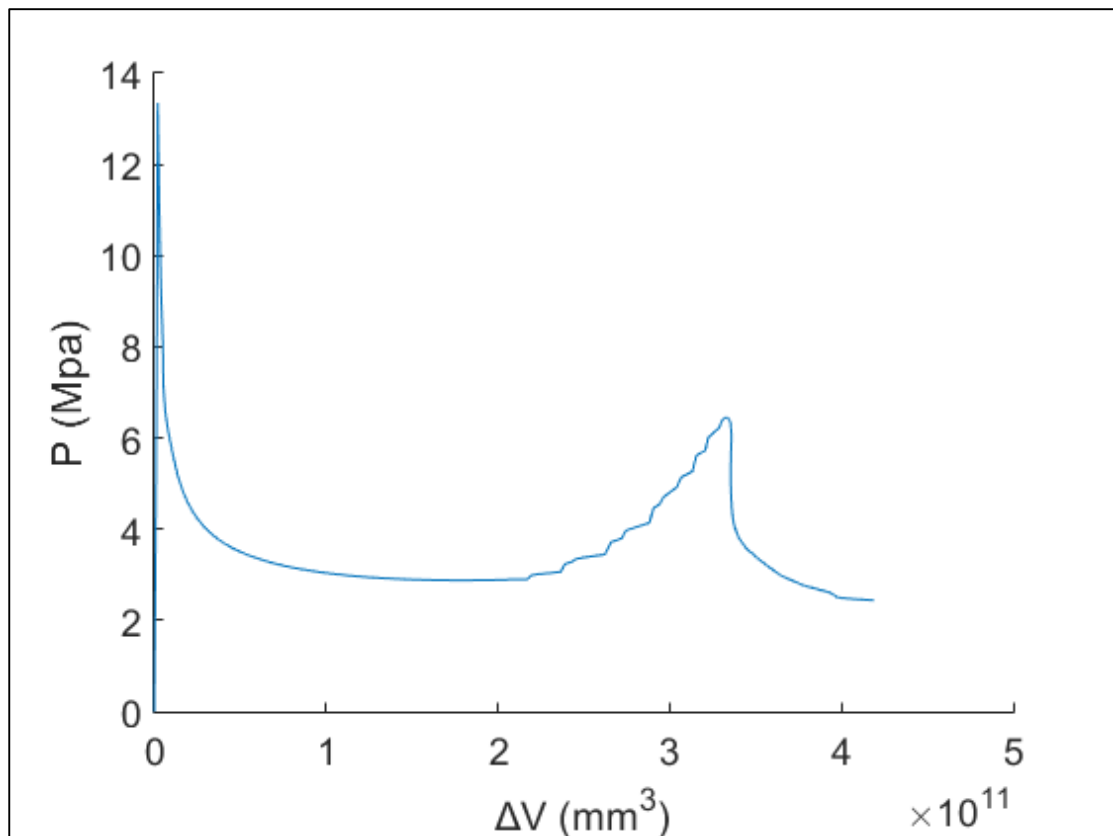
$$n = 0.67$$

Η οποία είναι μεγαλύτερη του προτεινόμενου αναστολέα ο οποίος είχε απόδοση:

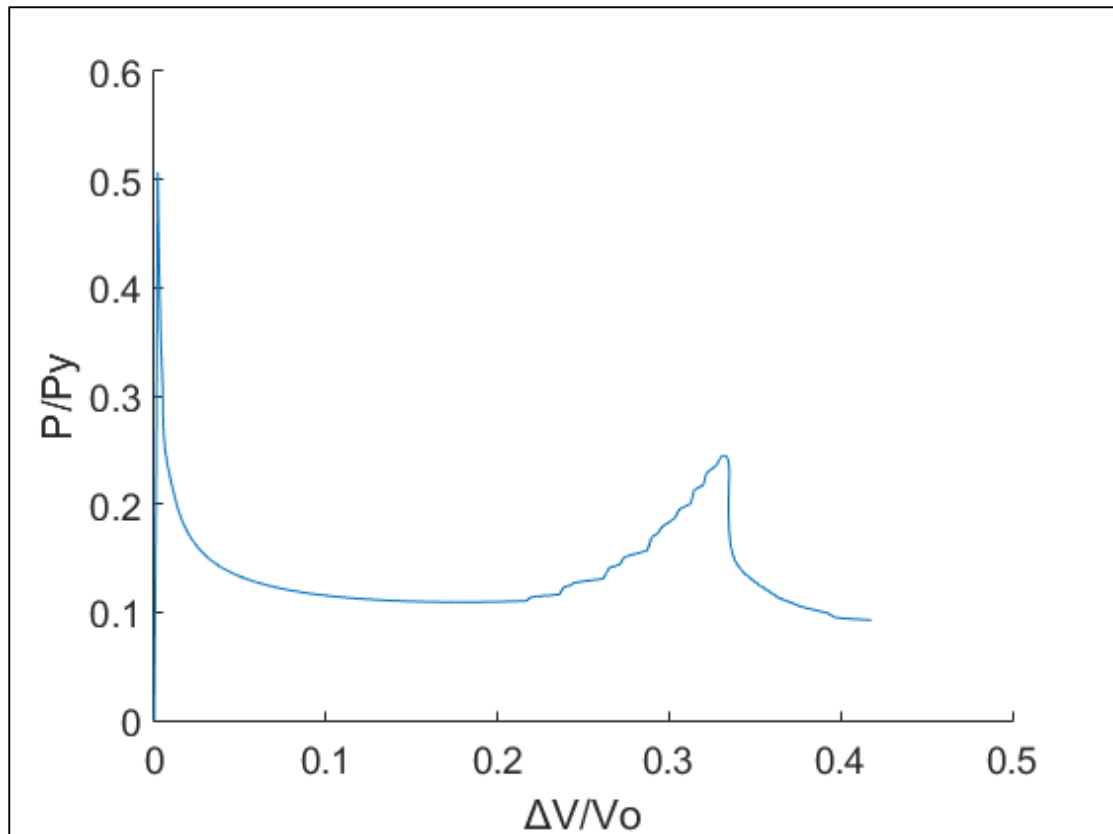
$$n = 0.45$$

- Αγωγός II

Το διάγραμμα πίεσης-μεταβολής όγκου για τον αγωγό II είναι:



Γράφημα 29: Διάγραμμα P - ΔV για τον αγωγό II με τον νέο αναστολέα



Γράφημα 30: Αδιάστατο διάγραμμα $P/P_y - \Delta V/V_o$ για τον αγωγό II με τον νέο αναστολέα

Από το διάγραμμα προκύπτει για τον νέο αναστολέα ότι:

$$P_x = 6,42 \text{ Mpa}$$

Το πρότυπο DNV είχε υπολογίσει $P_x = 13,23 \text{ Mpa}$ οπότε για μια ακόμα φορά παρατηρείται αυτή η απόκλιση μεταξύ των τιμών που παράγονται από το πρότυπο και από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Η απόδοση του νέου αναστολέα για τον αγωγό II είναι:

$$n = 0.48$$

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας εξήχθησαν πολλά χρήσιμα συμπεράσματα για το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης σε υποθαλάσσιους αγωγούς και της αναστολής της. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS και όλες οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για δυο αγωγούς ίδιου υλικού, διαφορετικής γεωμετρίας, οι οποίοι είναι υπονήφιοι για πραγματικές υποθαλάσσιες εφαρμογές (800m και 2200m αντίστοιχα).

Αρχικά, μέσω διδιάστατων αναλύσεων προσομοιώθηκε η επίδραση των ατελειών στην αντοχή των υποθαλάσσιων αγωγών. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι ατέλειες έχουν ίσως την σημαντικότερη επιρροή στην πίεση κατάρρευσης (P_c) του αγωγού, καθώς μικρή αύξηση της ατέλειας μπορεί να μειώσει δραματικά την αντοχή σε πίεση του αγωγού.

Ακολούθησε μια πρώτη δοκιμή υπολογισμού της πίεσης διάδοσης χρησιμοποιώντας την εμπειρική εξίσωση των Palmer & Martin (1975) και την μέθοδο της Maxwell Line που πρότειναν οι Chater & Hutchinson (1984). Διαπιστώθηκε πως η εξίσωση των Palmer & Martin απέχει αρκετά από την πραγματική τιμή, καθώς θεωρεί πλαστικοποίηση τεσσάρων σημείων της διατομής μόνο, ενώ δεν λαμβάνει υπόψη την κράτυνση του υλικού. Η Μέθοδος της Maxwell Line αν και πιο κοντά στην πραγματική τιμή, επειδή δεν λαμβάνει υπόψη το έργο λόγω διαμήκων τάσεων και επομένως υπολογίζει μικρότερη τιμή για την πίεση διάδοσης.

Στις τριδιάστατες αναλύσεις αρχικά μελετήθηκε το πώς επηρεάζει το μήκος και οι συνοριακές συνθήκες του αγωγού την πίεση κατάρρευσής του, προσομοιώνοντας αντίστοιχες πειραματικές διατάξεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν, πως η παγίωση της κίνησης και των δυο άκρων του αγωγού ενισχύει την αντοχή του, καθώς δεν του επιτρέπει να παραμορφωθεί ελεύθερα οπότε οι πιέσεις που λαμβάνονται ως αντοχές δεν είναι αντιπροσωπευτικές της πραγματικής κατάστασης. Ταυτόχρονα, τα αποτελέσματα έδειξαν πως μόνο από μήκη $L/D=7$ και μεγαλύτερα μπορούν να εξαχθούν ακριβή αποτελέσματα, καθώς μικρότερα μήκη θα δώσουν πολύ μεγαλύτερη αντοχή από την πραγματική.

Τα ανωτέρω δυο συμπεράσματα είναι σημαντικά για την κατασκευή σχετικών πειραματικών διατάξεων, για εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων για την μέγιστη πίεση.

Ακολούθως μελετήθηκε η επίδραση που έχει ο τρόπος εισαγωγής της ατέλειας στο αριθμητικό μοντέλο καθώς και στα αποτελέσματα της πίεσης που προκύπτουν. Από αυτή την ανάλυση βρέθηκε ότι, ο σχεδιασμός του αγωγού με ενσωματωμένη την ατέλεια σε όλο του το μήκος συνεπάγεται μία αντοχή κατώτερη από την πραγματική. Αυτό το αποτέλεσμα συμπίπτει με την επιρροή που έχει η ατέλεια στην πίεση κατάρρευσης όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για την επίδραση που μπορεί να έχουν στην πίεση αντοχής οι παραμένουσες τάσεις στους αγωγούς από την κατασκευή τους. Προέκυψε ότι για μικρές παραμένουσες τάσεις η επίδραση θα μπορούσε να θεωρηθεί και αμελητέα ενώ για μεγάλες παραμένουσες τάσεις, μεγαλύτερες του 60% του ορίου διαρροής, η αντοχή του αγωγού υποβαθμίζεται αισθητά.

Στην συνέχεια, δημιουργήθηκε πλήρες τριδιάστατο μοντέλο αγωγού μεγάλου μήκους, με σκοπό να υπολογιστεί με ακρίβεια η πίεση διάδοσης, η οποία είναι και η σημαντικότερη τιμή πίεσης για την περιγραφή του φαινομένου, μέσω της χάραξης του αντίστοιχου διαγράμματος πίεσης-όγκου (P-ΔV).

Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας, δόθηκε έμφαση στην αναστολή του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης και στον σχεδιασμό αναστολέων τύπου "integral", χρησιμοποιώντας τα δυο πιο κοινά πρότυπα (API και DNV) για την διαστασιολόγησή τους. Με βάση τον αναστολέα που έχει προταθεί για τον αγωγό I σε πραγματική εφαρμογή, κατασκευάστηκε μοντέλο αγωγού-αναστολέα στο οποίο επιβλήθηκε πίεση. Η πίεση ανάλυσης που υπολογίστηκε, συγκρίθηκε με τις τιμές που έδωσαν τα δυο πρότυπα όπου και φάνηκε πως το νορβηγικό πρότυπο DNV, δίνει καλύτερη πρόβλεψη για την πίεση ανάλυσης στον υπόψη αναστολέα από το αμερικάνικο πρότυπο API.

Αναλύσεις έγιναν, στους αγωγούς I και II, με αναστολείς διαστασιολογημένους βάσει του προτύπου DNV για τον καθένα. Το συμπέρασμα που εξάχθηκε από αυτές ήταν πως τα πρότυπα φαίνεται ότι υπερεκτιμούν την πίεση ανάλυσης του αναστολέα και πιθανόν να οδηγήσουν στην ανεπιθύμητη αστοχία ενός αγωγού του οποίου ο αναστολέας είχε σχεδιαστεί οριακά με βάση αυτά.

Τα παραπάνω συμπεράσματα οδηγούν την ανάγκη για διεξαγωγή πειραμάτων ώστε να προσδιοριστεί με ακρίβεια η συμπεριφορά των αγωγών και των αναστολέων ύβωσης λαμβάνοντας υπόψη τις παρατηρήσεις που έγιναν στο τρίτο κεφάλαιο σχετικά με τις πειραματικές διαδικασίες.

Εφόσον η πραγματοποίηση πειραμάτων κριθεί αδύνατη, (κυρίως λόγω κόστους) η ανάπτυξη ενός πλήρους τριδιάστατου μοντέλου, το οποίο θα συμπεριλαμβάνει όσο το δυνατόν περισσότερες παραμέτρους, είναι η μόνη λύση η οποία μπορεί να δώσει αρκετά ακριβή αποτελέσματα σε σχέση με την μηχανική συμπεριφορά και αντοχή σε πίεση ενός χαλύβδινου αγωγού.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Lehmköster και T. Schröder, «World Ocean Review,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://worldoceanreview.com/wp-content/downloads/wor3/WOR3_chapter_1.pdf.
- [2] H. & T. G. F. Clauss, «Offshore pipe laying operation - Interactions of vessel motions and pipeline dynamic stresses,» Technical University of Berlin, Berlin, 1992.
- [3] T. Park και S. Kyriakides, «ON THE PERFORMANCE OF INTEGRAL BUCKLE ARRESTORS FOR OFFSHORE PIPELINES,» Pergamon, Austin, 1996.
- [4] S. Kyriakides και C.D. Babcock, «On the "Slip-On" Buckle Arrestors for Offshore Pipelines,» JOURNAL OF PRESSURE VESSEL TECHNOLOGY, 1980.
- [5] S. Kyriakides και C. Babcock, «"The Spiral Arrestor" - A New Buckle Arrestor Design for Offshore Pipelines,» Journal of Energy Resources Technology, 1982.
- [6] C. Langner, «Design of deepwater pipelines,» TNO-IWECO 30th Anniversary Symposium on Underwater Technology, Hague, 1984.
- [7] A. Palmer και J.H. Martin, «Buckle Propagation in Submarine Pipelines,» Nature, 1975.
- [8] T. Netto και S. Estefen, «Buckle Arrestors for Deepwater Pipelines,» Elsevier, Rio de Janeiro, 1995.
- [9] K. S., T.D.-Park και T.A. Netto, «On the design of integral buckle arrestors for offshore pipelines,» Elsevier, Austin, 1998.
- [10] R. Vera, Fabrizio Vinciguerra και margarita Bagnara, «Comparative Study of the Behavior of API 5L-X65 Grade Steel and ASTM A53-B Grade Steel against Corrosion in Seawater».

- [11] E. Chater και J.W. Hutchinson, «On the Propagation of Bulges and Buckles,» Journal of Applied Mechanics, 1984.
- [12] S. Kyriakides και T.A. Netto, «On the dynamics of propagation buckles in pipelines,» Elsevier, 1999.
- [13] J. L. Tassoulas, «Buckles and Pipelines,» Offshore Observations, Austin, 1979.
- [14] DNV-OS-F101, «Submarine Pipeline Systems,» 2012.
- [15] R. Klein, «The Trans Adriatic Pipeline Project,» Pipeline Technology Conference , 2008.
- [16] H.-G. Hillenbrand και Christian Schuff, «DEEP SEA - HIGH TECH, COLLAPSE RESISTANT PIPES FOR THE SOUTHSTREAM OFFSHORE PROJECT,» Pipeline Technology Conference, Mülheim, 2015.
- [17] API 1111, «Design, Construction, Operation and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design),» American Petroleum Institute, 1999.