

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Διπλωματική εργασία

Αριθμητική Προσομοίωση της Αντοχής Χαλύβδινων
Υποθαλάσσιων Αγωγών σε
Εξωτερική Πίεση με Πεπερασμένα Στοιχεία

Επιμέλεια: Δημήτριος Ντοάς



Υπεβλήθη για την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2021

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας μου, καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, κ. Σπύρο Καραμάνο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την αμέριστη στήριξη του όποτε χρειάστηκε κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Ευχαριστώ τους διδακτορικούς φοιτητές του εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών που χωρίς τη βοήθεια αυτών θα ήταν εξαιρετικά δύσκολη η εκμάθηση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Φυσικά ένα μεγάλο ευχαριστώ σε ολόκληρη την οικογένεια μου που ήταν με κάθε τρόπο δίπλα μου στα πέντε χρόνια φοίτησης μου σε οτιδήποτε και αν χρειάστηκα με την αγάπη που μου έδειχναν σε κάθε δυσκολία. Τέλος, θέλω να πω ένα τεράστιο ευχαριστώ σε όλους μου τους φίλους που ήταν δίπλα μου σε κάθε χαρά αλλά και σε κάθε δυσκολία όλα αυτά τα χρόνια της κοινής φοιτητικής μας ζωής.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	2
1.Εισαγωγή.....	5
1.1.Πρόλογος.....	5
1.2.Αντοχή του σωλήνα σε εξωτερική πίεση	6
2.Περιγραφή του αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης	13
2.1.Περιγραφή.....	13
2.2.Αποτελέσματα	17
3.Επίδραση βασικών παραμέτρων στην αντοχή σε εξωτερική πίεση.....	47
3.1.Αρχική οβαλότητα στο σωλήνα.....	48
3.2.Ανισοτροπία του υλικού.....	53
3.3.Παραμένουσες τάσεις στον σωλήνα.....	57
3.4.Γενικευμένη επίπεδη παραμόρφωση	61
4. Ring pipe collapse και παρουσίαση συσκευής μελέτης.....	67
4.1. Ring pipe collapse	67
4.2. Περιγραφή συσκευής	68
5.Συμπεράσματα.....	73
Παράρτημα	75
Βιβλιογραφία	78

1.Εισαγωγή

1.1.Πρόλογος

Στις μέρες μας οι υδρογονάνθρακες παίζουν σημαντικό ρόλο τόσο στην βιομηχανική παραγωγή όσο και στο ενεργειακό ισοζύγιο. Παραδείγματα από την καθημερινή ζωή αποτελούν τα καύσιμα και το φυσικό αέριο που χρησιμοποιούμε για την παραγωγή ενέργειας. Όπως γνωρίζουμε, όλα αυτά βρίσκονται στο φλοιό της γης είτε ως κοιτάσματα είτε ως πετρώματα. Μάλιστα, το μεγαλύτερο τους ποσοστό βρίσκεται σε υποθαλάσσια πεδία και όχι σε χερσαία πεδία. Στην πλειοψηφία των εξορύξεων, οι χώρες που έχουν ζήτηση για τους συγκεκριμένους πόρους βρίσκονται αρκετά μακριά από αυτές τις χώρες που γίνεται η εξόρυξή τους. Έτσι, η μεταφορά γίνεται με μια σειρά από αγωγούς εκατοντάδων χιλιομέτρων. Πολλές φορές αυτό το δίκτυο των αγωγών είναι υποθαλάσσιο. Ήδη υπάρχει ένα εκτεταμένο δίκτυο υποθαλάσσιων αγωγών, το οποίο στο μέλλον αναμένεται η περαιτέρω επέκτασή του.

Η αξιοπιστία και η δομική ακεραιότητα των αγωγών αυτών είναι αναγκαία και από οικονομικής πλευράς αλλά και από περιβαλλοντικής άποψης. Η εγκατάσταση και η λειτουργία τους αποτελούν έργα στρατηγικής σημασίας και έχουν συνήθως διακρατικό χαρακτήρα. Επιπροσθέτως, αποτελούν έργα μεγάλης κλίμακας και επένδυσης. Επίσης, ένα πιθανό ατύχημα μπορεί να προκαλέσει σημαντική περιβαλλοντική καταστροφή.

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί υποβάλλονται σε εξωτερική υδροστατική πίεση λόγω της παρουσίας του βάθους του νερού. Η πίεση αυτή είναι αρκετά μεγάλη και ικανή να προκαλέσει την κατάρρευση του αγωγού ιδιαίτερα σε μεγάλα βάθη. Για την επιλογή του σωστού πάχους και υλικού για τον αγωγό ώστε να υπάρχει δομική ακεραιότητα αυτή η πίεση θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ασχολούμαστε με τη δομική ακεραιότητα των υποθαλάσσιων αγωγών υπό ισχυρή εξωτερική πίεση. Πιο συγκεκριμένα θα ασχοληθούμε στο πώς επιδρούν πιθανές ατέλειες του αγωγού στη δομική ακεραιότητα. Τέτοιου είδους ατέλειες μπορεί να είναι η απόκλιση από το τέλειο κυκλικό σχήμα, η οποία δημιουργείται είτε κατά τη διαδικασία της κατασκευής του αγωγού στο εργοστάσιο ή στο πεδίο είτε λόγω χτυπημάτων κατά τη μεταφορά τους. Ατέλεια μπορεί να θεωρηθεί και η ανισοτροπία που παρουσιάζει το υλικό, ή ακόμα οι παραμένουσες τάσεις που έχουν εισαχθεί από την κατεργασία διαμόρφωσης και συγκόλλησης στο εργοστάσιο ή στο πεδίο. Το κύριο εργαλείο για την ανάλυση όλων αυτών είναι η προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία και στην παρούσα εργασία θα γίνει με τη βοήθεια του προγράμματος ABAQUS.

Τέλος, θα ασχοληθούμε με το «ring pipe collapse» που ουσιαστικά πρόκειται για τη μελέτη της αντοχής εξωτερική πίεσης των σωλήνων αυτών,

κόβοντας ένα δακτύλιο από αυτούς και υποβάλλοντάς το σε μία μηχανική δοκιμή εξωτερικής πίεσης. Θα περιγραφεί ο σχεδιασμός μιας συσκευής που βοηθάει στη μελέτη των συγκεκριμένων δακτυλίων.

1.2. Αντοχή του σωλήνα σε εξωτερική πίεση

Μία από τις βασικές παραμέτρους στον δομικό σχεδιασμό αγωγών είναι η αντοχή του σωλήνα στην εξωτερική πίεση. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ένας σωλήνας αποτελείται από μια σειρά από επιμέρους δακτυλίους συμπεριφέρονται δομικά με τον ίδιο τρόπο. Επικρατούν δηλαδή συνθήκες επίπεδης έντασης.

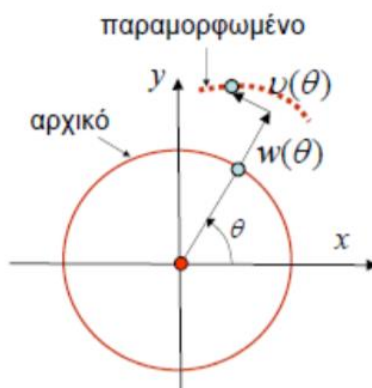
Θα μελετήσουμε αρχικά το λυγισμό ελαστικών δακτυλίων. Έστω, λεπτότοιχος ελαστικός δακτύλιος με μέση διάμετρο D και πάχος t . Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος έχει μέτρο ελαστικότητας E και λόγο Poisson ν . Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε μπορεί να θεωρηθεί διδιάστατο με εξωτερική πίεση P η οποία είναι πάντα κάθετη στην περιφέρεια του δακτυλίου (αρχικώς και στην παραμορφωμένη κατάσταση). Από τη θεωρία (Καραμάνος, Σπόρος Α.2003. Σημειώσεις Μαθήματος Μη-Γραμμική Ανάλυση Κατασκευών Ευστάθεια) γνωρίζουμε ότι ο δακτύλιος αρχικά συρρικνώνεται ομοιόμορφα. Η μετατόπιση του σε κάθε σημείο της περιφέρειας είναι ίση με:

$$w_0(\theta) = \frac{-P}{E t} R^2 \quad (1)$$

ακτινικά, και:

$$u_0 = 0 \quad (2)$$

εφαπτομενικά. Αυτό αποτελεί και την προλυγισμική κατάσταση του δακτυλίου.



Σχήμα 1 Αναπαράσταση των μετατοπίσεων

Η περιμετρική τάση που εμφανίζεται στην προλυγισμική κατάσταση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\sigma_{\theta} = \frac{-P D}{2 t} \quad (3)$$

Για τον υπολογισμό όμως της πίεσης κατάρρευσης σε ένα σωλήνα μεγάλου μήκους πρέπει να θεωρήσουμε επίπεδη παραμόρφωση. Σε αυτή την περίπτωση ο νόμος του Hooke παίρνει τη μορφή:

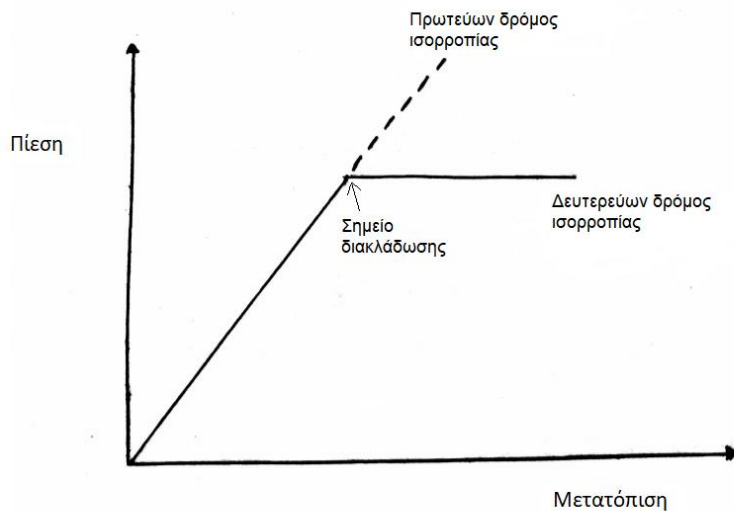
$$\sigma_{\theta} = \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_{\theta} \quad (4)$$

επειδή $\varepsilon_{\chi}=0$.

Αντιμετωπίζουμε ένα πρόβλημα δομικής ευστάθειας ή λυγισμού. Έχουμε δηλαδή μια κρίσιμη τιμή της πίεσης η οποία αν ξεπεραστεί μπορεί να επιτρέψει μια λύση που ξεφεύγει από την «τετριμμένη» προλυγισμική λύση της μηχανικής των υλικών που παρουσιάσαμε ανωτέρω, δηλαδή την ομοιόμορφη συμπίεση και του ενός προλυγισμικού δρόμου ισορροπίας. Αυτή η λύση θα μας δώσει μια διακλάδωση στον αρχικό προλυγισμικό δρόμο ισορροπίας. Με τη γραμμική θεωρία της ελαστικής ευστάθειας έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε αυτή την τιμή της πίεσης χωρίς όμως να μπορούμε να προβλέψουμε τι θα συμβεί στο δακτύλιο μετά το λυγισμό. Η τιμή λοιπόν της πίεσης όπου το σύστημα μας αποκτά και δευτερεύοντα δρόμο ισορροπίας ονομάζεται κρίσιμη πίεση και υπολογίζεται από τη σχέση (Καραμάνος, Σπύρος Α.2003. Σημειώσεις Μαθήματος Μη-Γραμμική Ανάλυση Κατασκευών Ευστάθεια):

$$P_{cr} = 2E \frac{\left(\frac{t}{D}\right)^3}{(1-\nu^2)} \quad (5)$$

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό το μέγιστο φορτίο λυγισμού εξαρτάται από τη γεωμετρία του δακτυλίου (λόγος D/t) και από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο (μέτρο ελαστικότητας E και ο λόγος Poisson). Αφού υποστεί λυγισμό, ο δακτύλιος χάνει το κυκλικό του σχήμα και παίρνει ένα σχήμα μορφής οβάλ. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται και οβαλοποίηση (ovalization).



Σχήμα 2 Δρόμοι ισορροπίας

Από το διάγραμμα του Σχήματος 2 φαίνεται ο πρωτεύων δρόμος ισορροπίας και ο δευτερεύων δρόμος ισορροπίας που τέμνει τον πρωτεύων στην κρίσιμη πίεση, ως ένα διάγραμμα της πίεσης συναρτήσει της αξονικής μετατόπισης. Σύμφωνα με τη γραμμική θεωρία της ευστάθειας, ενώ το φορτίο παραμένει σταθερό στο δευτερεύων δρόμο ισορροπίας έχουμε σημαντική αύξηση των μετατοπίσεων.

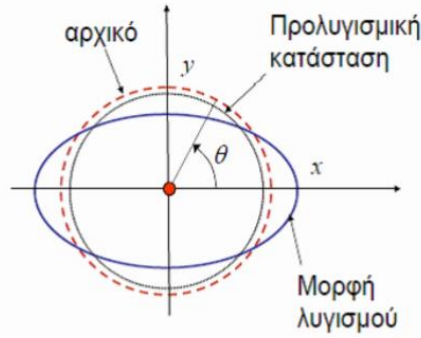
Για να προσδιορίσουμε τις μετατοπίσεις αφού ο δακτύλιος υποστεί κατάρρευση λόγω λυγισμού θα εφαρμόσουμε τη θεωρία της διαταραχής. Με αυτή τη θεωρία δίνουμε μια πολύ μικρή αρχική ατέλεια στο δακτύλιο. Άλλωστε δεν είναι δυνατόν κατά την παραγωγή να δημιουργηθεί τέλειος κυκλικός δακτύλιος. Αν υπήρχε, η λύση του θα ήταν ο πρωτεύων δρόμος ισορροπίας. Με τη μέθοδο αυτή έχουμε ένα μη-γραμμικό πρόβλημα ισορροπίας. Οι μετατοπίσεις που αναπτύσσονται στο δακτύλιο κάνοντας την ανωτέρω θεώρηση τη στιγμή που προκύπτει κατάρρευση λόγω του λυγισμού ακτινικά και εφαπτομενικά υπολογίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$w_1 = A \cos 2\theta \quad (6)$$

$$u_1 = -\frac{A}{2} \sin 2\theta \quad (7)$$

όπου A είναι μια αυθαίρετη σταθερά.

Η συνολική μετατόπιση υπολογίζεται από το άθροισμα της προλυγισμικής κατάστασης (εξισώσεις (1),(2)) με τη μεταλυγισμική κατάσταση (εξισώσεις (6),(7)).



Σχήμα 3 Μορφή λυγισμού

Όπως ήδη γνωρίζουμε από τη μηχανική των κατασκευών η καμπτική ροπή μίας κατασκευής τύπου δοκού(ευθύγραμμης ή καμπύλης) δίνεται από τον τύπο:

$$M = E I k \quad (8)$$

όπου k είναι η καμπυλότητα και I η ροπή αδρανείας, και εκφράζονται στους παρακάτω τύπους.

$$k = \frac{u' - w''}{R^2} \quad (9)$$

$$I = \frac{t^3}{12} \quad (10)$$

Η συνολική τάση που θα αναπτυχθεί στον δακτύλιο μετά το λυγισμό θα είναι άθροισμα της τάσης λόγω πίεσης και της τάσης λόγω καμπτικής ροπής λόγω της οβαλοποίησης και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\sigma_{\theta} = -P \frac{D}{2t} \pm \frac{18}{R^2} \frac{A}{t^2} \cos 2\theta \quad (11)$$

Για να ισχύει όλη η θεωρία που έχει παρουσιαστεί μέχρι στιγμής θα πρέπει τη στιγμή που συμβαίνει ο λυγισμός να βρισκόμαστε στην ελαστική περιοχή. Από τη θεωρία των λεπτότοιχων η τιμή της πίεσης που απαιτείται για να έχουμε πλαστική διαρροή υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Py = 2 \frac{\sigma_y t}{D} \quad (12)$$

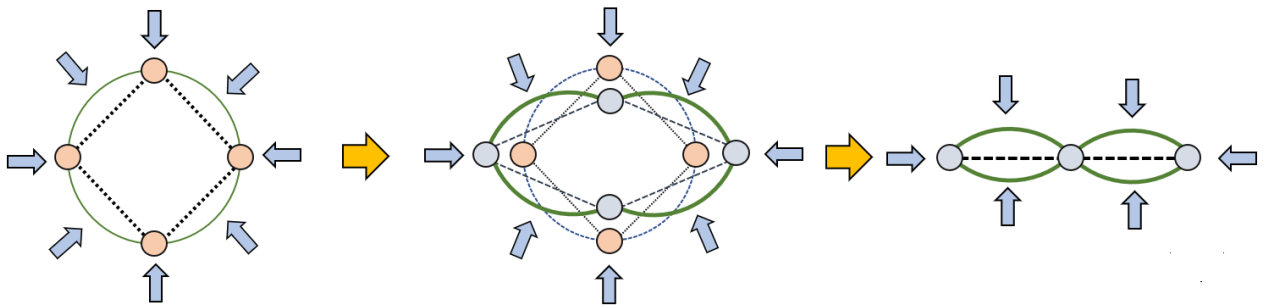
όπου σ_y το όριο διαρροής της διατομής του δακτυλίου. Η συνθήκη που θέτουμε για να ισχύει ο ελαστικός λυγισμός είναι:

$$P_{cr} \leq P_y \quad (13)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (5), (12) και (13) καταλήγουμε στην αναγκαία συνθήκη για αστοχία του δακτυλίου λόγω ελαστικού λυγισμού, η οποία είναι:

$$\frac{D}{t} \geq \sqrt{\frac{E/(1 - \nu^2)}{\sigma_y}} \quad (14)$$

Από τον τύπο της μέγιστης τάσης στην εξίσωση (11) παρατηρούμε ότι η τάση αυτή παίρνει τις μέγιστες τιμές της για $\theta=0$ ή $\pi/2$ ή $3\pi/2$. Σε αυτές τις θέσεις θα έχουμε τις πρώτες πλαστικοποιήσεις του υλικού. Όσο συνεχίζει να αυξάνει η τιμή της πίεσης αυτές οι διατομές του δακτυλίου στις θέσεις αυτές θα συμπεριφέρονται σαν πλαστικές αρθρώσεις. Οι αρθρώσεις αυτές ευνοούν την επιπλέον παραμόρφωση του δακτυλίου ως και την κατάρρευσή του.

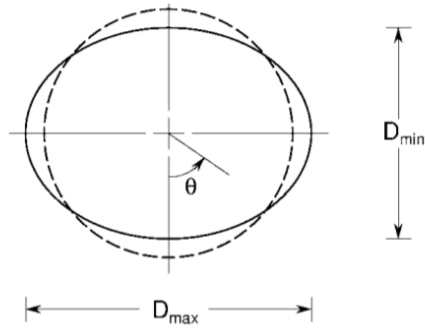


Σχήμα 4 Πλαστικές αρθρώσεις πριν και μετά την κατάρρευση

Από τον τύπο:

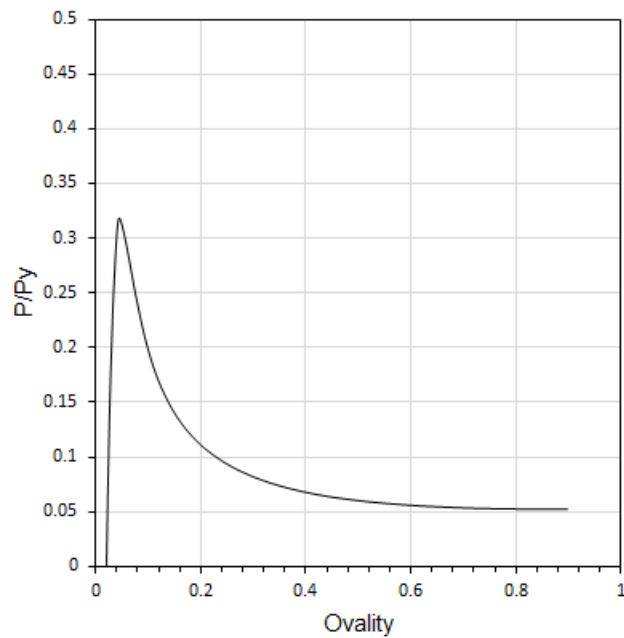
$$o\nu = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \quad (15)$$

μπορώ να ποσοτικοποιήσω πόσο οβάλ είναι ο δακτύλιος.

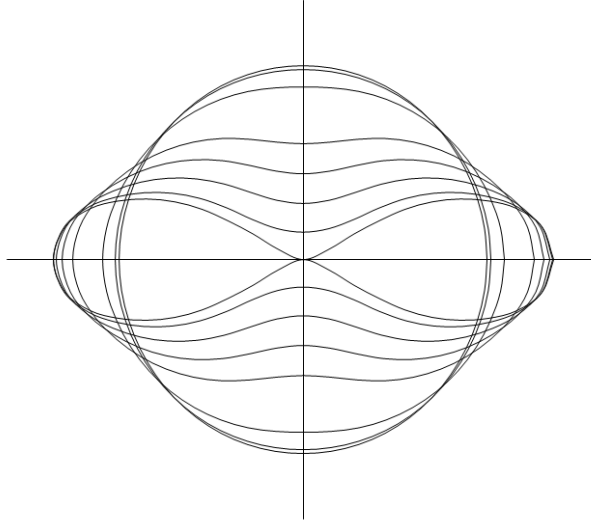


Σχήμα 5 Παραμορφωμένη διατομή δακτυλίων

Με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων εξετάζουμε πως επιδρούν στην αντοχή του δακτυλίου οι πλαστικές αρθρώσεις μετά την κατάρρευσή του. Στο παρακάτω διάγραμμα P-ον παρουσιάζεται μια ενδεικτική περίπτωση.



Σχήμα 6 Παράδειγμα γραφήματος P-ον



Σχήμα 7 Τρόπος λογισμού του σωλήνα

Όπως βλέπουμε από το διάγραμμα του σχήματος 6 η πίεση φτάνει σε μία μέγιστη τιμή και στη συνέχεια η αντοχή του δακτυλίου πέφτει κατακόρυφα λόγω των πλαστικών αρθρώσεων και της δημιουργίας ενός μηχανισμού κατάρρευσης. Η αρχική οβαλότητα συγκαταλέγεται σε μια από τις βασικές γεωμετρικές ατέλειες των δακτυλίων. Αυτή παίζει σημαντικό ρόλο στην αντοχή του δακτυλίου σε εξωτερική πίεση.

2.Περιγραφή του αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

2.1.Περιγραφή

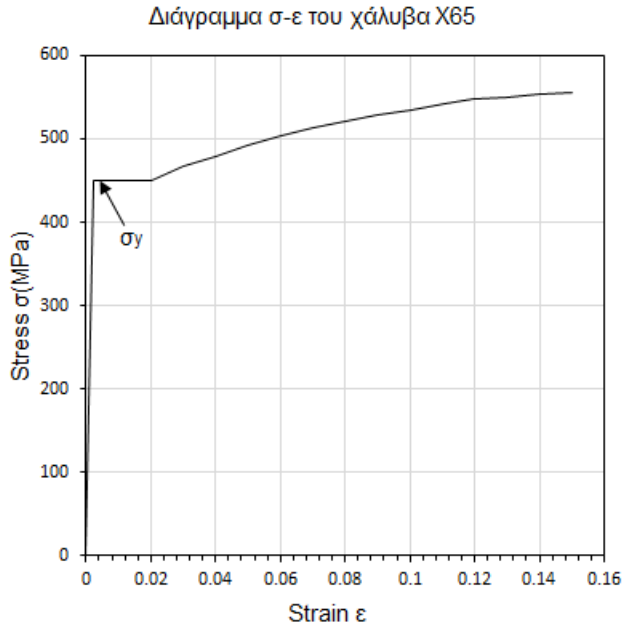
Η ανάλυση των τάσεων ενός μεταλλικού αγωγού είναι αρκετά δύσκολο να γίνει αναλυτικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως για αγωγούς με σημαντικό πάχος η παραπάνω ανάλυση που παρουσιάσαμε, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση, αλλά δεν επαρκεί για την πλήρη κάλυψη του φαινομένου. Επιπλέον τα φαινόμενα λυγισμού που εξετάζουμε έχουν ως συνέπεια μεγάλες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις στην ελαστοπλαστική περιοχή. Για να το μελετήσουμε λοιπόν θα χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα μη-γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

Η ανάλυση ξεκινάει με τη δημιουργία ενός διοδιάστατου μοντέλου κυκλικού δακτυλίου. Ο δακτύλιος έχει εξωτερική διάμετρο $D=610$ mm (24 ίντσες) και το πάχος του ισούται με $t=20$ mm. Σε αυτό το μοντέλο το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε είναι χάλυβας grade X65 με μέτρο ελαστικότητας $E=210$ GPa, λόγο Poisson $\nu=0.3$ και όριο διαρροής $\sigma_y=450$ MPa. Ως πρώτο βήμα δημιουργήθηκε το διάγραμμα σ - ϵ του υλικού χρησιμοποιώντας ένα ζεύγος τιμών τάσης-παραμόρφωσης. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές τάσης και παραμόρφωσης.

Stress(σ)	Strain(ϵ)(%)
0.00	0.000
449.39	0.214
449.48	0.999
449.55	1.997
466.22	3.002
478.92	4.004
491.73	4.996
503.34	5.996
512.34	7.004
520.24	8.000
529.51	8.995
534.95	9.997
541.40	11.053
547.39	11.951
550.36	12.968
553.32	13.994
556.29	15.029

Πίνακας 1 Τιμές ονομαστική τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης

Παρακάτω παρουσιάζουμε και το διάγραμμα σ - ϵ που δημιουργούν τα παραπάνω ζεύγη τιμών.



Σχήμα 8 Διάγραμμα σ-ε

Οι παραπάνω τιμές δεν εισάγονται άμεσα στο ABAQUS. Απαιτείται να δώσουμε στο πρόγραμμα την πραγματική τάση και τη λογαριθμική παραμόρφωση με βάση τα σημεία που έχουμε παρουσιάσει στον ανωτέρω πίνακα. Οι τύποι που χρησιμοποιούμε για την μετατροπή είναι οι εξής:

$$\sigma_T = \sigma (1 + e)$$

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

όπου

σ_T : η πραγματική τάση

e : η ανηγμένη παραμόρφωση

σ : η ονομαστική τάση

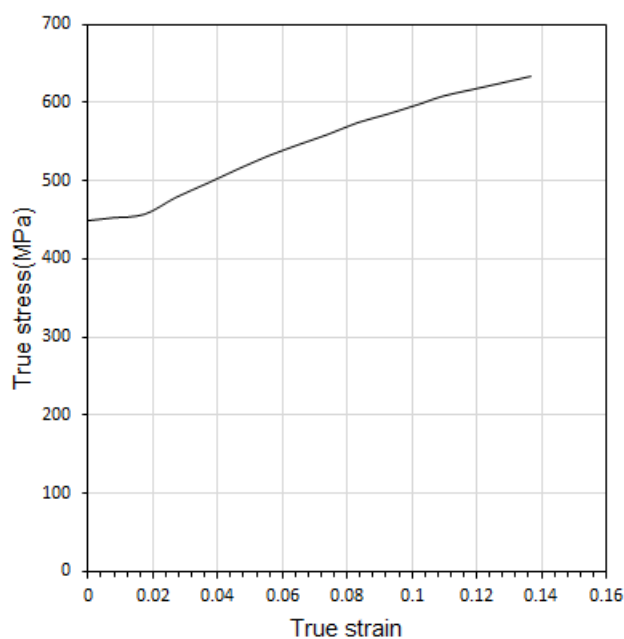
ε_{ln}^p : το πλαστικό μέρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης

Στον πίνακα κατωτέρω παρουσιάζονται οι τιμές που χρησιμοποιούμε στο ABAQUS.

True stress(σ_T)	Plastic strain(ϵ_{Pln})(%)
449.39	0.00
452.98	0.78
457.47	1.76
478.95	2.73
496.60	3.69
514.50	4.63
531.38	5.57
545.70	6.51
558.90	7.43
573.67	8.34
584.43	9.25
596.63	10.20
596.63	10.20
607.60	11.00
615.85	11.90
624.15	12.80
632.50	13.70

Πίνακας 2 Τιμές πραγματικής τάσης-πλαστικής παραμόρφωσης

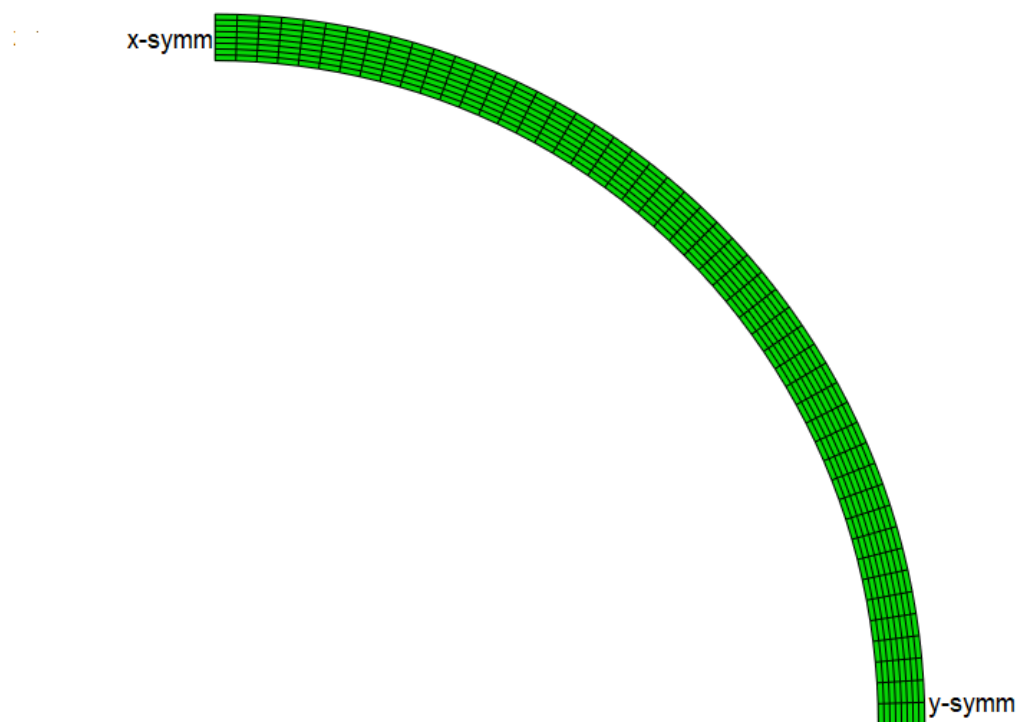
Παρακάτω παρουσιάζεται και το διάγραμμα του Πίνακα 2.



Σχήμα 9 Διάγραμμα σ - ϵ πραγματικής τάσης-πλαστικής λογαριθμικής παραμόρφωσης που εισάγεται στο ABAQUS

Για την κατασκευή του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων θα εκμεταλλευτούμε τη διπλή συμμετρία του προβλήματος. Αυτό μας οδηγεί στη μελέτη ενός τετατοκυκλίου καθώς έχουμε συμμετρία και ως προς τον x άξονα και ως προς τον y άξονα. Χρησιμοποιούμε τις εντολές x-symm και y-symm που διαθέτει το ABAQUS. Η εντολή x-symm εμποδίζει το μοντέλο να μετατοπίζεται

κατά τον άξονα y καθώς και τις στροφές ως προς τον x και z ($U_1=UR_1=UR_3=0$). Αντίστοιχα η y -symm εμποδίζει τη μετατόπιση κατά τον x άξονα και τις στροφές κατά τον y και z άξονα ($U_2=UR_2=UR_3=0$). Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων με τη συμμετρία που αναλύσαμε παραπάνω.



Σχήμα 10 Συμμετρία του προβλήματος

Σημαντικό είναι να τοποθετήσουμε έναν περιορισμό στο επίπεσο $y=0$ ώστε να εμποδίσει το σωλήνα να ξεπεράσει την ακτίνα του κατά το λυγισμό. Δηλαδή, το ανώτατο σημείο της εσωτερικής επιφάνειας του μοντέλου πρέπει να εμποδιστεί να περάσει στο κάτω μέρος όπου θα «ανεβεί» η πλαστική άρθρωση που θα έχει δημιουργηθεί στο κάτω μέρος.

Όπως αναφέραμε παραπάνω στο παράδειγμα αυτό, ο δακτύλιος έχει εξωτερική διάμετρο $D=610$ mm και πάχος $t=20$ mm. Επομένως, ο λόγος D/t είναι 30.5. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να προσδώσουμε μια αρχική ατέλεια στο δακτύλιο. Αυτό θα γίνει σε τρία βήματα. Στο πρώτο βήμα, επιβάλλουμε μια μικρή μετατόπιση στο πάνω μέρος του δακτυλίου ώστε να κατέβει λίγο η κατασκευή. Την ίδια μετατόπιση την εφαρμόζω και στο κάτω δεξιό άκρο της κατασκευής ώστε να μετακινηθεί πιο δεξιά. Στο δεύτερο βήμα, αφαιρώ τη μετατόπιση που είχα εφαρμόσει και παρατηρώ ότι έχω μια μικρή επαναφορά. Στο τρίτο και τελευταίο βήμα, εφαρμόζω την εξωτερική πίεση για την παραμόρφωση του δακτυλίου με τη μέθοδο του Riks.

Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων που υιοθετήσαμε στη μελέτη αποτελείται από 400 στοιχεία, 8 κατά το πάχος του αγωγού και 50 κατά την

περιφέρεια του. Τα στοιχεία του πλέγματος είναι τετραεδρικά και επίπεδης έντασης. Όσο πιο μεγάλο είναι το πλήθος των στοιχείων(δηλαδή όσο μικρό είναι το μέγεθος του στοιχείου) τόσο καλύτερη είναι η ανάλυσή μας. Το αρνητικό της χρήσης πολλών στοιχείων όμως εντοπίζεται στο υπολογιστικό κόστος που θα έχω όσο αφορά το χρόνο που θα χρειαστεί η ανάλυση.

2.2.Αποτελέσματα

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιάσουμε και θα εξηγήσουμε τα αποτελέσματα που εξαγάγαμε για την εξωτερική πίεση σε σχέση με την οβαλότητα του μοντέλου καθώς και σε σχέση με το εμβαδόν που περικλείεται από τον σωλήνα. Επιπλέον, θα συγκρίνουμε τα ίδια αποτελέσματα για διαφορετικούς λόγους D/t , ο οποίος αποτελεί μία σημαντική παράμετρο στη μελέτη μας. Θα κάνουμε μία πρώτη εκτίμηση για την επιρροή που έχουν οι συγκεκριμένες ατέλειες στην εξωτερική πίεση που ασκούμε στον δακτύλιο.

Από το ABAQUS εξάγουμε τον παράγοντα LPF(load proportionality factor). Μέσω αυτού, εξετάζουμε πόσο μεταβάλλεται η πίεση σε κάθε increment(βήμα) της ανάλυσης. Για το φορτίο δώσαμε την τιμή πίεσης αναφοράς 1. Οι διαστάσεις είναι όλες σε χιλιοστά οπότε το φορτίο της πίεσης θα υπολογίζεται σε MPa. Για την αρχική ατέλεια όπως περιγράψαμε προηγουμένως, επιβάλλουμε μια αρχική μετατόπιση με τιμή 15mm. Μετά την αποφόρτιση η μετατόπιση παίρνει τιμή 6.40 .

Στη συνέχεια θα πρέπει να υπολογίσουμε την οβαλότητα του μοντέλου η οποία δίνεται από τον τύπο που έχουμε παρουσιάσει και ανωτέρω:

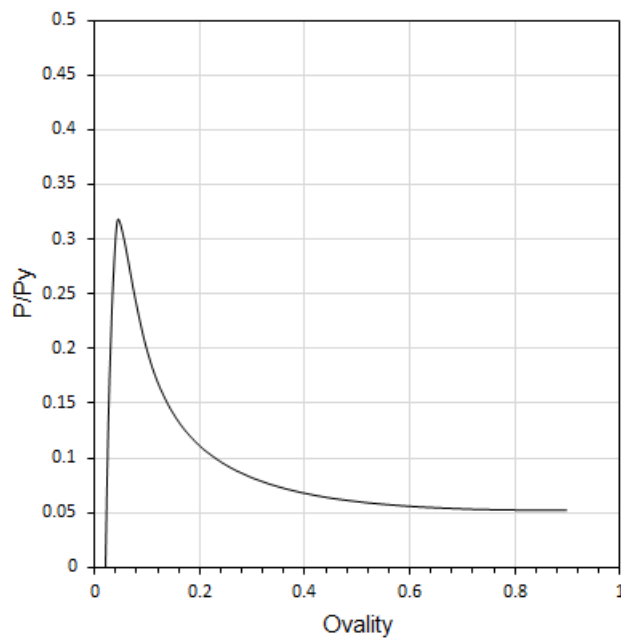
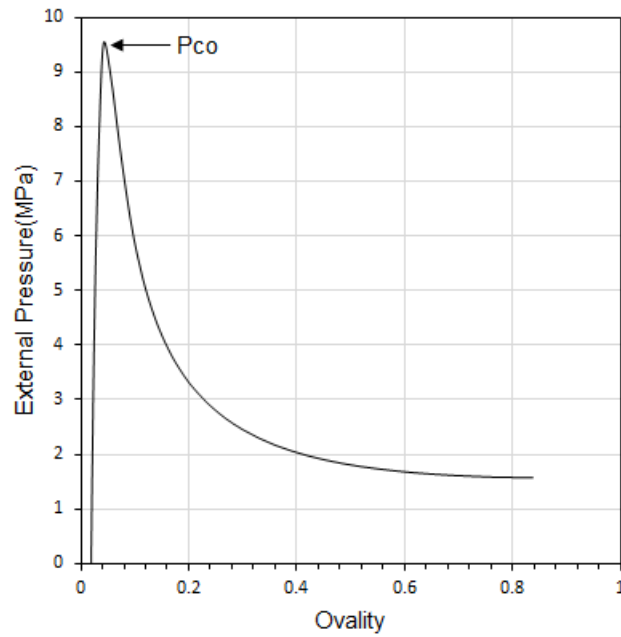
$$OV = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}}$$

όπου:

$$D_{max} = (D + 2 * u_x)$$

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

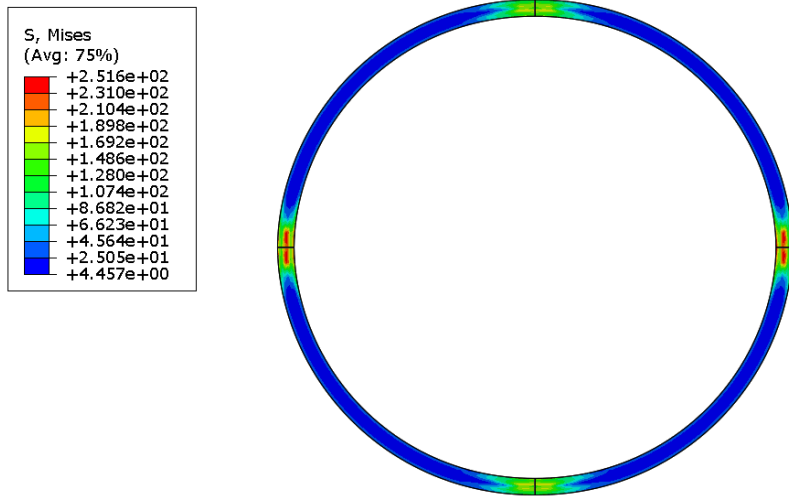
Τα u_x, u_y αναφέρονται στους κόμβους στα άκρα του μοντέλου μας στον x και y άξονα αντίστοιχα(στις θέσεις $\theta=0$ και $\theta=\pi/2$). Με αυτόν τον τρόπο σε κάθε increment βρίσκουμε οβαλότητα και φτιάχνουμε το διάγραμμα. Για τη συγκεκριμένη τιμή αρχικής οβαλότητας 2% η μέγιστη τιμή της πίεσης ισούται με 9.53 MPa.



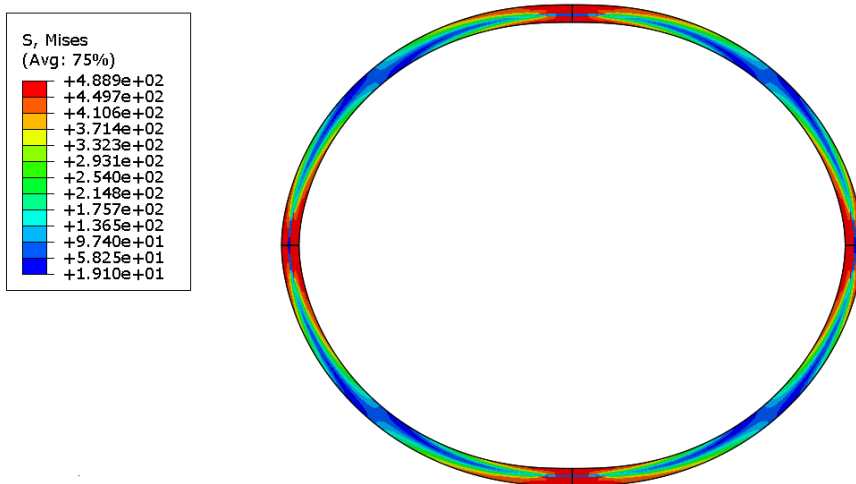
Σχήμα 11 (α) Διάγραμμα πίεσης-οβαλότητας για $D/t=30$ και (β) Αδιάστατο διάγραμμα πίεσης-οβαλότητας για $D/t=30$

Η αρχική οβαλότητα που δίνουμε είναι 2%.

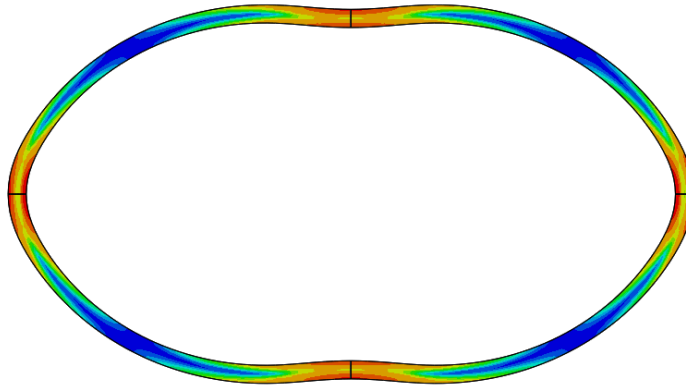
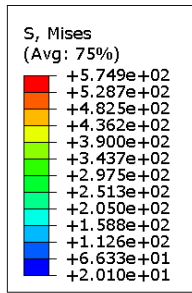
Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να παρουσιάσουμε σε διαφορετικές χρονικές στιγμές(increments) την πορεία κατάρρευσης του δακτυλίου.



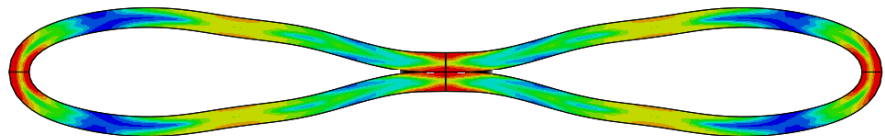
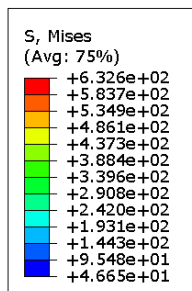
Σχήμα 12 Ο δακτύλιος πριν την επιβολή του εξωτερικού φορτίου. Οι τάσεις που έχουν δημιουργηθεί αφορούν την επιβολή της αρχικής ατέλειας(D/t=30)



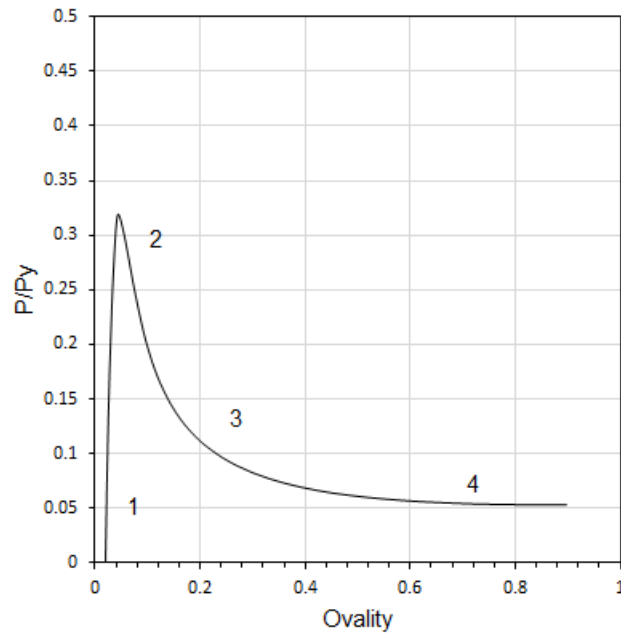
Σχήμα 13 Ο δακτύλιος αφού επιβληθεί η εξωτερική πίεση, τη στιγμή του λυγισμού(μέγιστη πίεση) (D/t=30)



Σχήμα 14 Ο δακτύλιος κατά τη φάση της κατάρρευσής του και την ενεργοποίηση του μηχανισμού κατάρρευσης($D/t=30$)

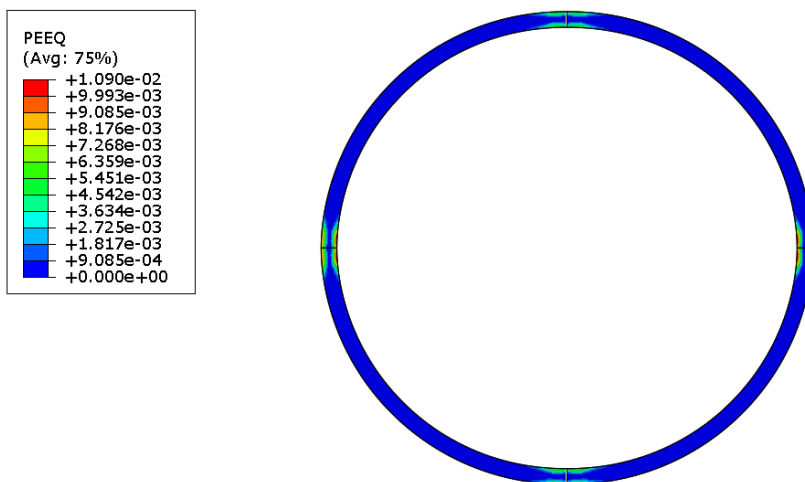


Σχήμα 15 Ο δακτύλιος μετά την ολική του κατάρρευση($D/t=30$)

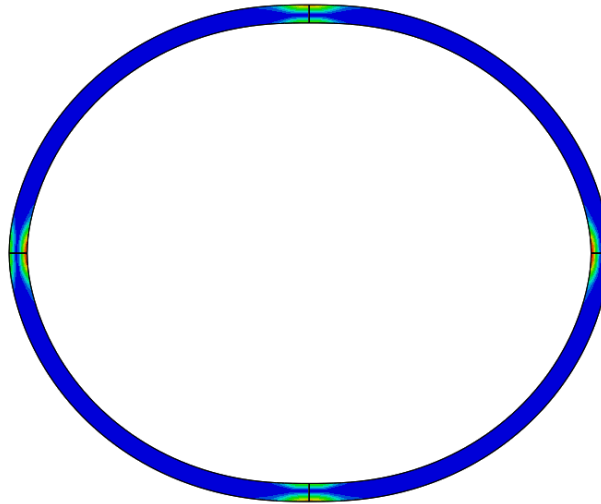
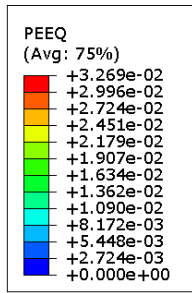


Σχήμα 16 Διάγραμμα πίεσης-οβαλότητας όπου επισημαίνονται οι θέσεις των παραμορφωμένων καταστάσεων

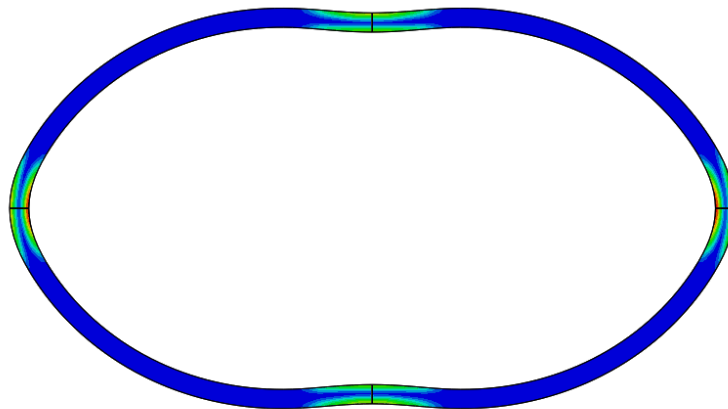
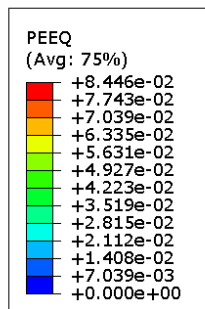
Στους αριθμούς 1,2,3,4 που παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 16 αντιστοιχούν οι θέσεις παραμορφωμένων καταστάσεων των Σχημάτων 12,13,14,15.



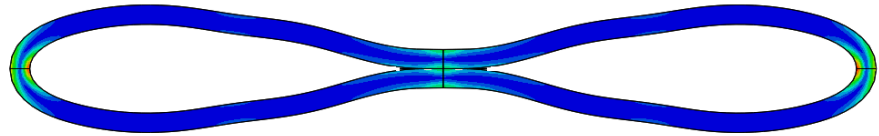
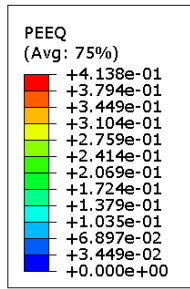
Σχήμα 17 Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση στον δακτύλιο πριν την εφαρμογή του εξωτερικού φορτίου (D/t=30)



Σχήμα 18 Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση μετά την επιβολή της εξωτερικής πίεσης($D/t=30$)

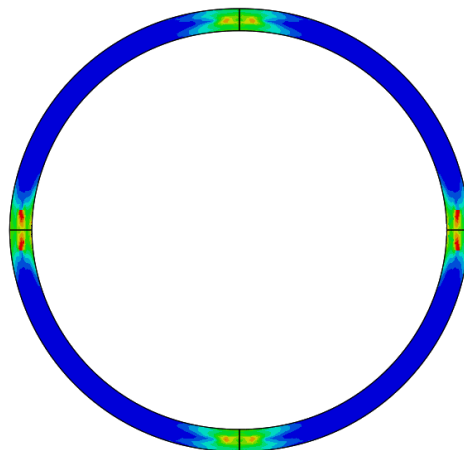
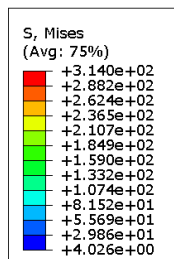


Σχήμα 19 Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση κατά τη φάση της κατάρρευσης του δακτυλίου($D/t=30$)

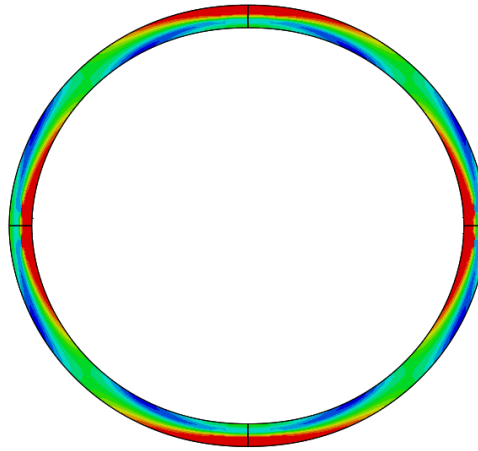
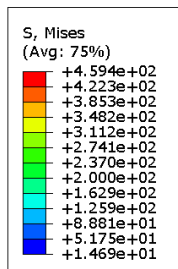


Σχήμα 20 Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση μετά την ολική του κατάρρευση(D/t=30)

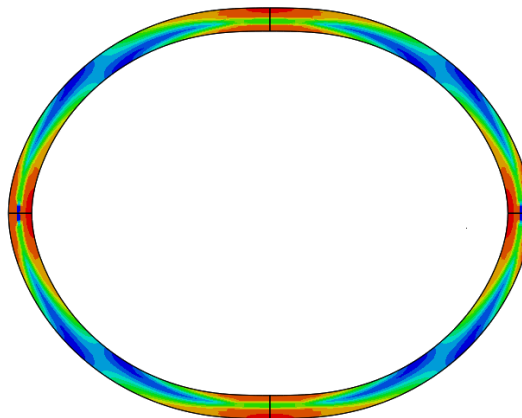
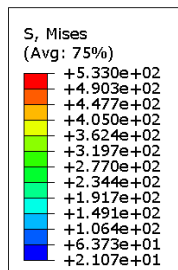
Και στην περίπτωση των Σχημάτων 17-20 οι παραμορφωμένες καταστάσεις αντιστοιχούν σε αυτές που παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 16. Παρατηρούμε την δημιουργία των τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων όπως αναμέναμε να συμβεί από την ανάλυση των εξισώσεων που έχουμε παρουσιάσει ανωτέρω. Σε όλη την υπόλοιπη διατομή δεν έχουμε πλαστικές παραμορφώσεις καθώς έχουμε κάνει θεώρηση για πάχος τέτοιο ώστε να μην υπάρξει πλαστική διαρροή σε αυτό. Δηλαδή, με την εφαρμογή του τύπου 14 υπολογίσαμε σε τι πάχος δε θα συνέβαινε πλαστική διαρροή στο υλικό αλλά μόνο το φαινόμενο του λυγισμού. Κάτωθι θα παρουσιάσουμε τα αντίστοιχα σχήματα και για λόγους D/t που ισούνται με 20 και 40.



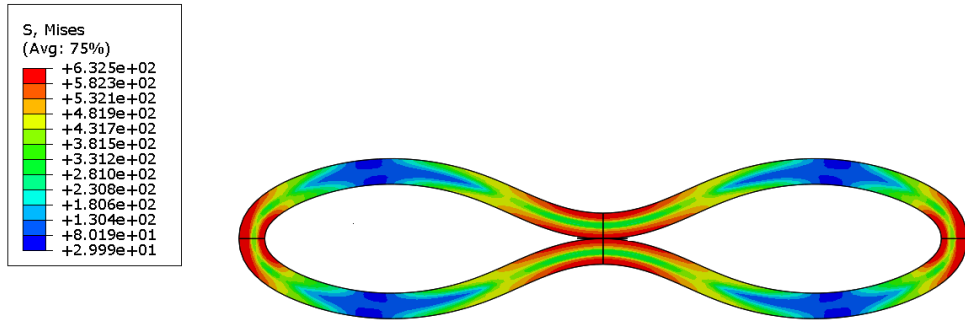
Σχήμα 21 Ο δακτύλιος πριν την επιβολή του εξωτερικού φορτίου. Οι τάσεις που έχουν δημιουργηθεί αφορούν την επιβολή της αρχικής ατέλειας(D/t=20)



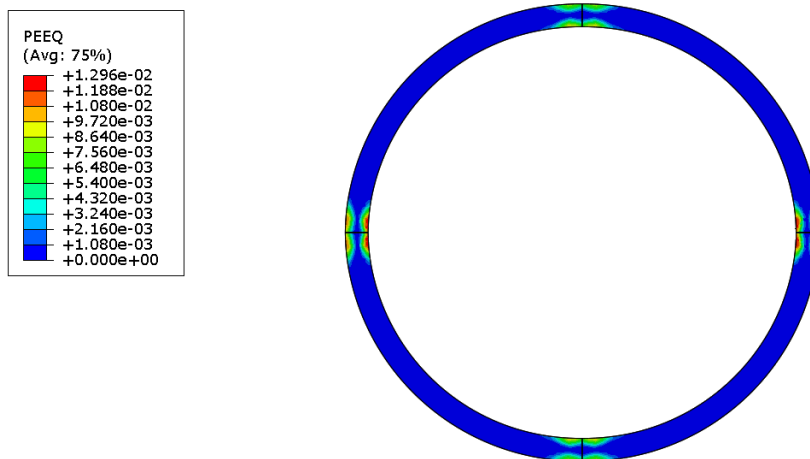
Σχήμα 22 Ο δακτύλιος αφού επιβληθεί η εξωτερική πίεση, τη στιγμή του λυγισμού(μέγιστη πίεση) ($D/t=20$)



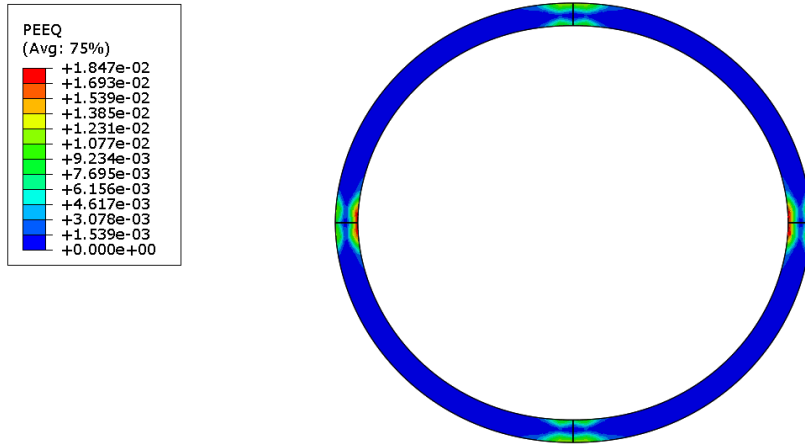
Σχήμα 23 Ο δακτύλιος κατά τη φάση της κατάρρευσής του και την ενεργοποίηση του μηχανισμού κατάρρευσης($D/t=20$)



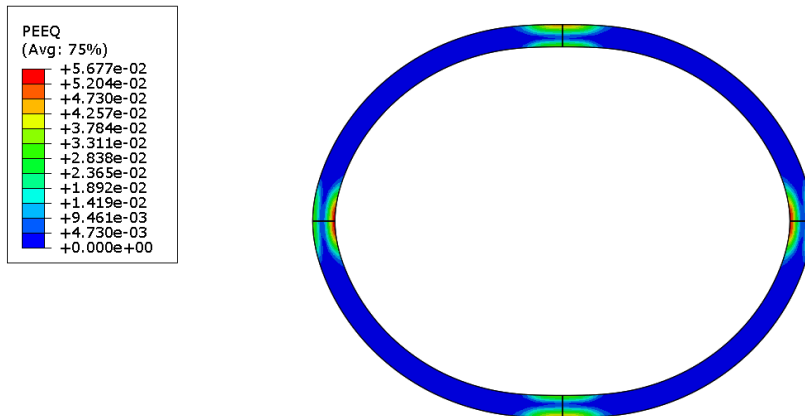
Σχήμα 24 Ο δακτύλιος μετά την ολική του κατάρρευση(D/t=20)



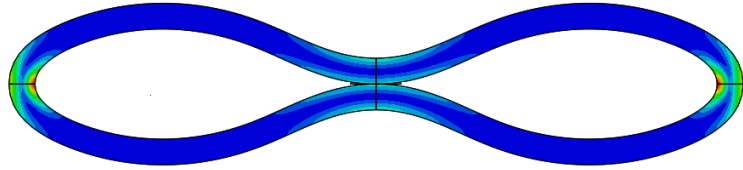
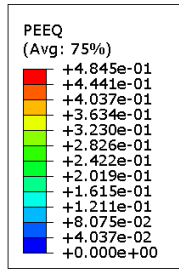
Σχήμα 25 Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση στον δακτύλιο πριν την εφαρμογή του εξωτερικού φορτίου (D/t=20)



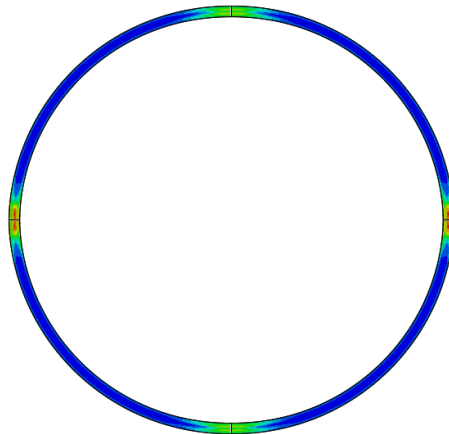
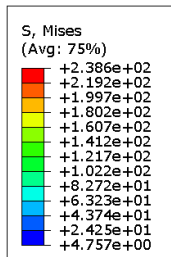
Σχήμα 26 Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση μετά την επιβολή της εξωτερικής πίεσης($D/t=20$)



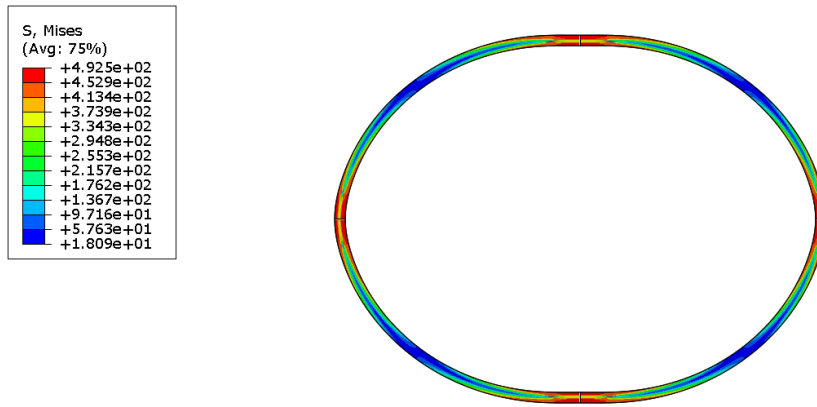
Σχήμα 27 Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση κατά τη φάση της κατάρρευσης του δακτυλίου($D/t=20$)



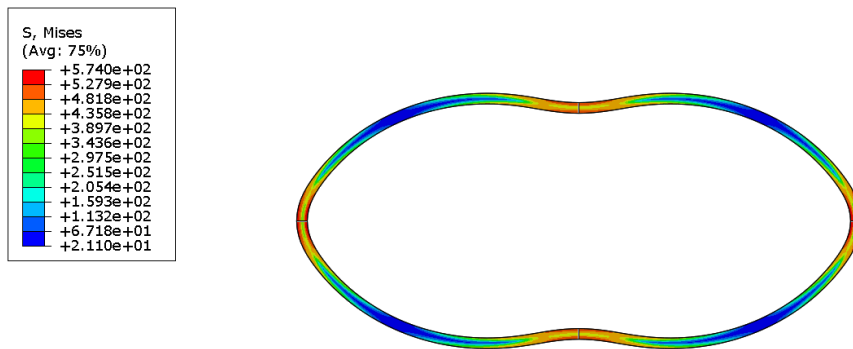
Σχήμα 28 Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση μετά την ολική του κατάρρευση($D/t=20$)



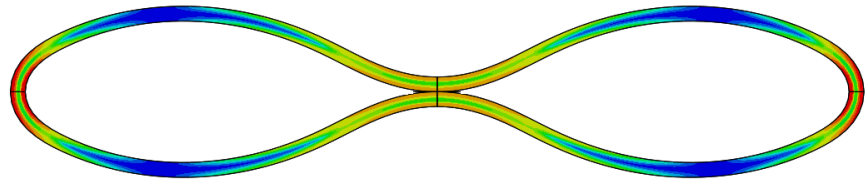
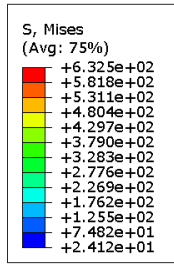
Σχήμα 29 Ο δακτύλιος πριν την επιβολή του εξωτερικού φορτίου. Οι τάσεις που έχουν δημιουργηθεί αφορούν την επιβολή της αρχικής ατέλειας($D/t=40$)



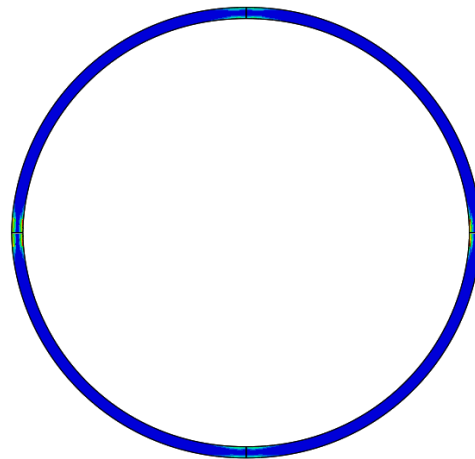
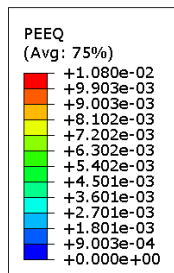
Σχήμα 30 Ο δακτύλιος αφού επιβληθεί η εξωτερική πίεση, τη στιγμή του λυγισμού(μέγιστη πίεση) ($D/t=40$)



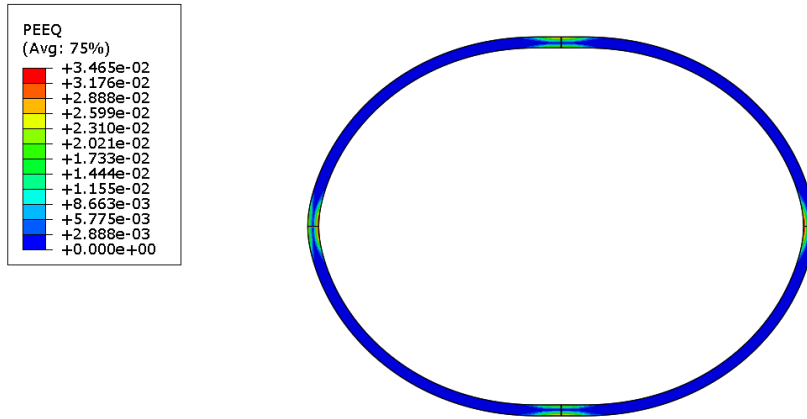
Σχήμα 31 Ο δακτύλιος κατά τη φάση της κατάρρευσής του και την ενεργοποίηση του μηχανισμού κατάρρευσης($D/t=40$)



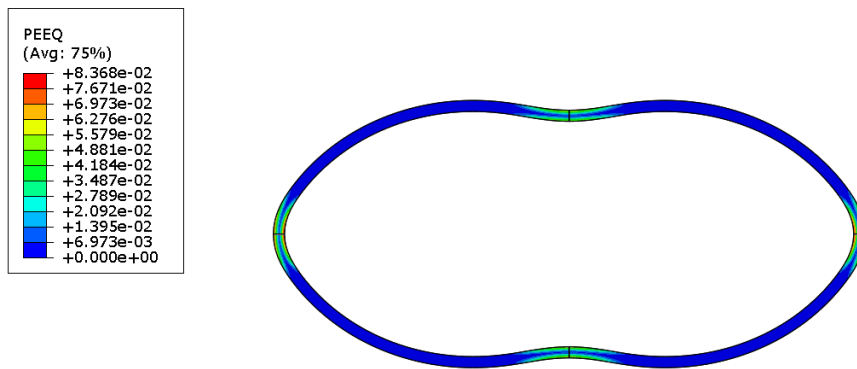
Σχήμα 32 Ο δακτύλιος μετά την ολική του κατάρρευση ($D/t=40$)



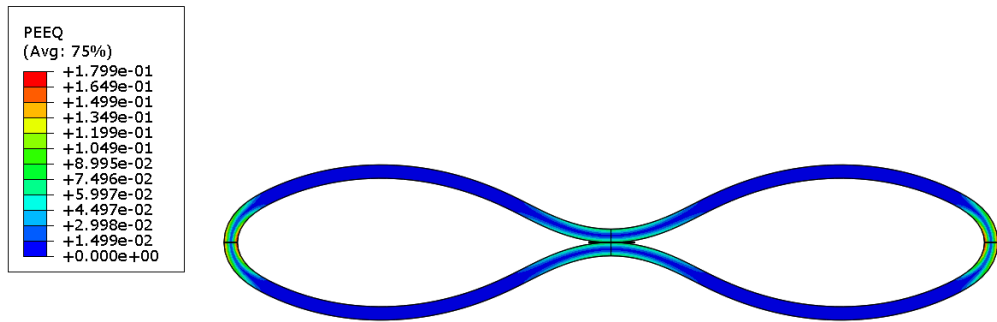
Σχήμα 33 Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση στον δακτύλιο πριν την εφαρμογή του εξωτερικού φορτίου ($D/t=40$)



Σχήμα 34 Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση μετά την επιβολή της εξωτερικής πίεσης($D/t=40$)

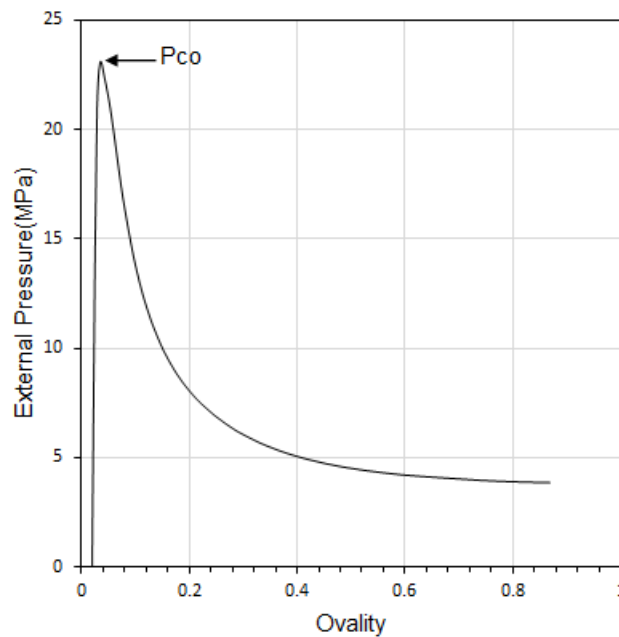


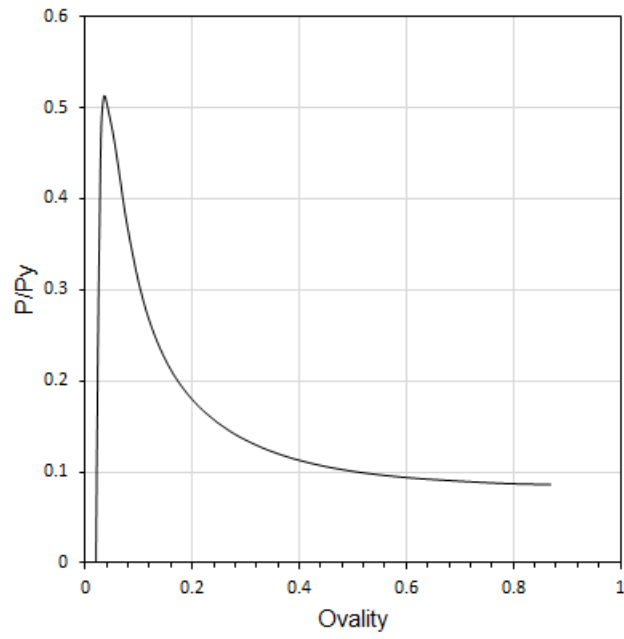
Σχήμα 35 Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση κατά τη φάση της κατάρρευσης του δακτυλίου($D/t=40$)



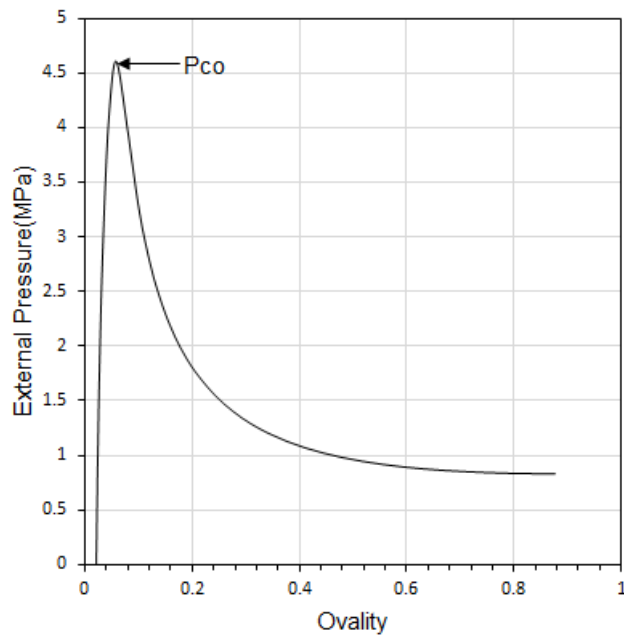
Σχήμα 36 Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση μετά την ολική του κατάρρευση(D/t=40)

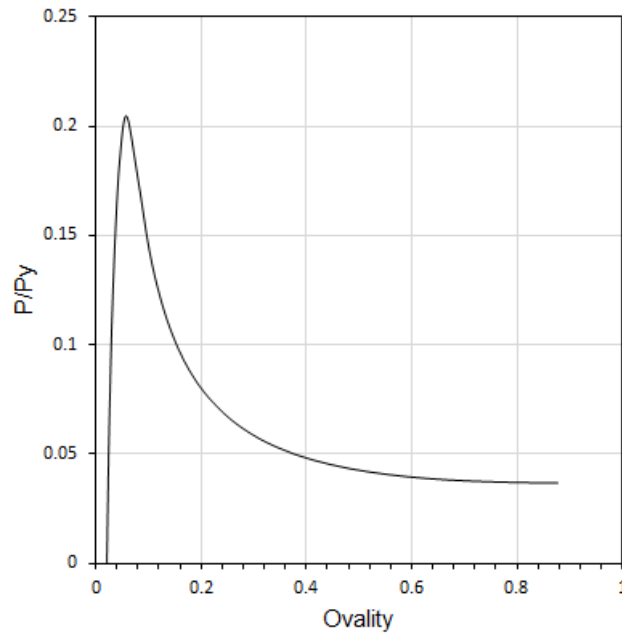
Στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης που αφορά την μεταβολή της πίεσης με την οβαλότητα θα επαναλάβουμε την ίδια διαδικασία για διαφορετικούς λόγους D/t, και πιο συγκεκριμένα για λόγο ίσο με 20 και για λόγο ίσο με 40. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



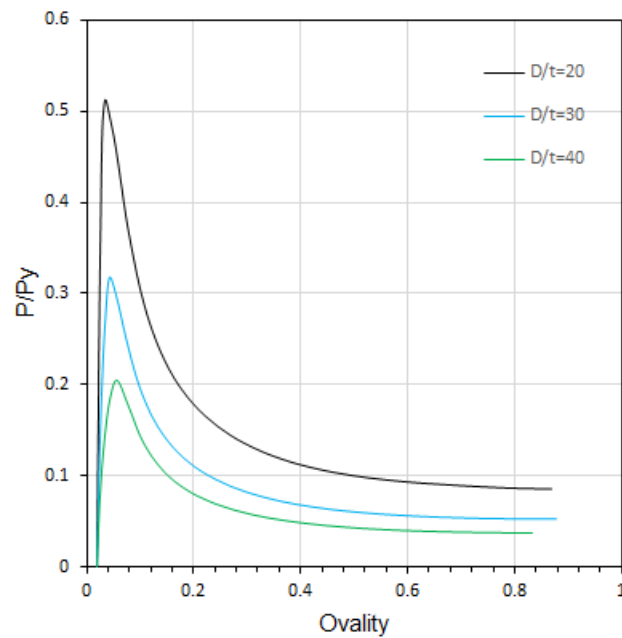


Σχήμα 37 (α) Διάγραμμα πιεσης-οβαλότητας για $D/t=20$ και (β) Αδιάστατο διάγραμμα πιεσης-οβαλότητας για $D/t=20$



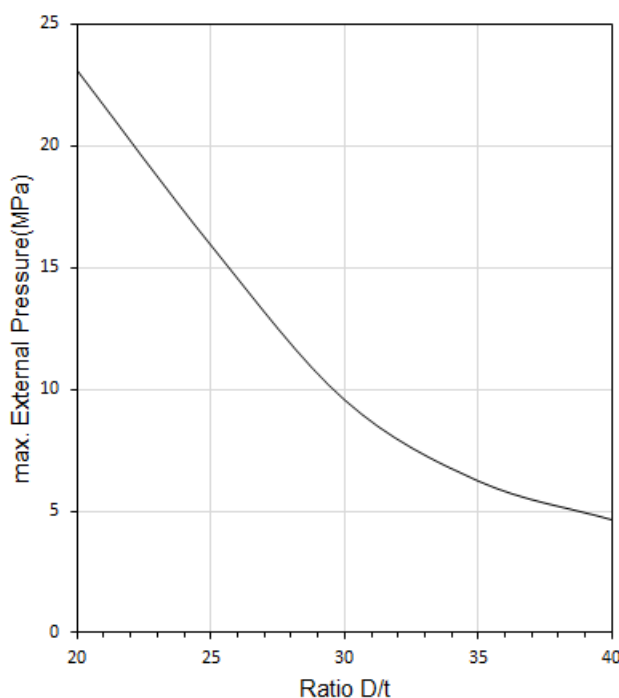


Σχήμα 38 (α) Διάγραμμα πίεσης-οβαλότητας για $D/t=40$ και (β) Αδιάστατο διάγραμμα πίεσης-οβαλότητας για $D/t=40$



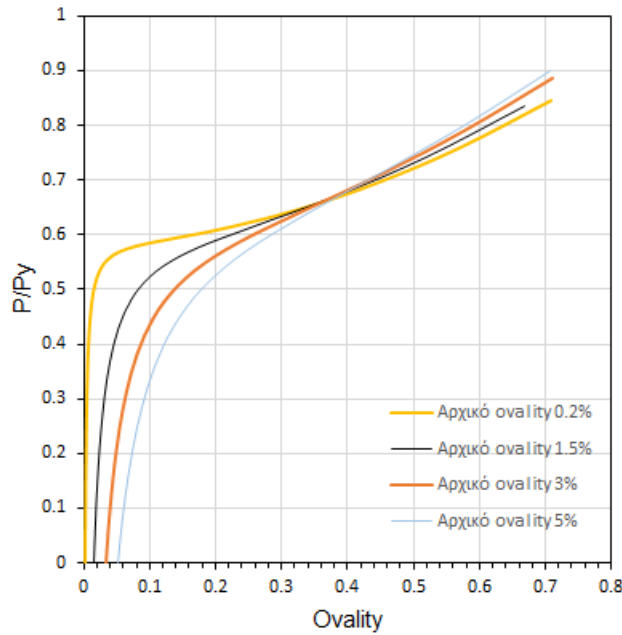
Σχήμα 39 Σύγκριση αδιάστατης πίεσης-οβαλότητας για διαφορετικούς λόγους D/t
Και στις τρεις περιπτώσεις εφαρμόσαμε την κατάλληλη τιμή της μετατόπισης
ώστε να έχουμε την ίδια αρχική οβαλότητα 2%. Αυτό που παρατηρούμε είναι

πως, όσο αυξάνεται ο λόγος D/t μειώνεται η τιμή της μέγιστης πίεσης. Στο κάτωθεν διάγραμμα βλέπουμε τον τρόπο με τον οποίο μειώνεται η πίεση.



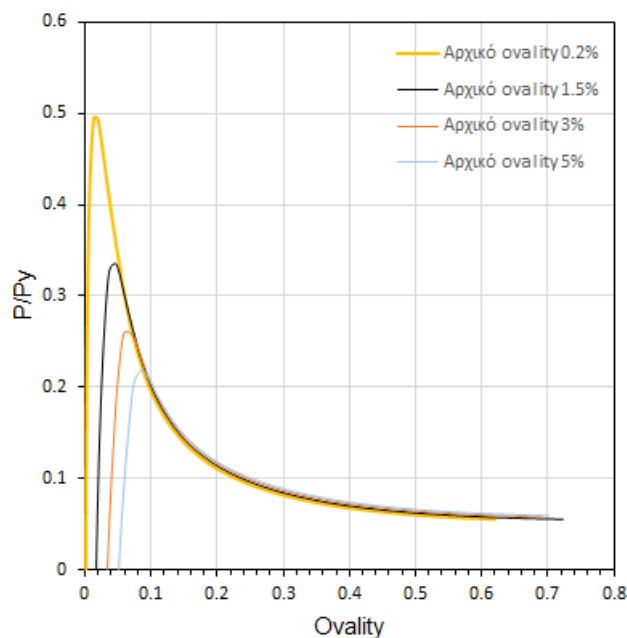
Σχήμα 40 Διάγραμμα που δείχνει τη μεταβολή της μέγιστης πίεσης σε σχέση με το λόγο D/t

Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να παρουσιάσουμε αποτελέσματα με δεδομένο ότι έχουμε δακτύλιο από ελαστικό υλικό και να συγκρίνουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα με δακτυλίους από ελαστοπλαστικό υλικό, για θεωρητικούς σκοπούς και για να εξετάσουμε αν τα αποτελέσματά μας ταιριάζουν με τη θεωρία που έχουμε παρουσιάσει. Το ζητούμενο σε αυτήν τη θεώρηση είναι το πώς θα προσδώσουμε την αρχική ατέλεια. Με τον τρόπο που έχουμε περιγράψει παραπάνω δε γίνεται να επιτευχθεί η ατέλεια καθώς έχοντας μόνο ελαστικό υλικό μόλις αφαιρέσουμε τη μετατόπιση αυτό αυτόματα θα επαναφερθεί στην αρχική του θέση. Για να το πετύχουμε δίνουμε από την αρχή σχήμα οβάλ. Με αυτόν τον τρόπο εισάγουμε την αρχική οβαλότητα. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τέσσερις περιπτώσεις αρχικής οβαλότητας. Η ανάλυση έγινε για σωλήνα με το λόγο D/t να ισούται με 30.



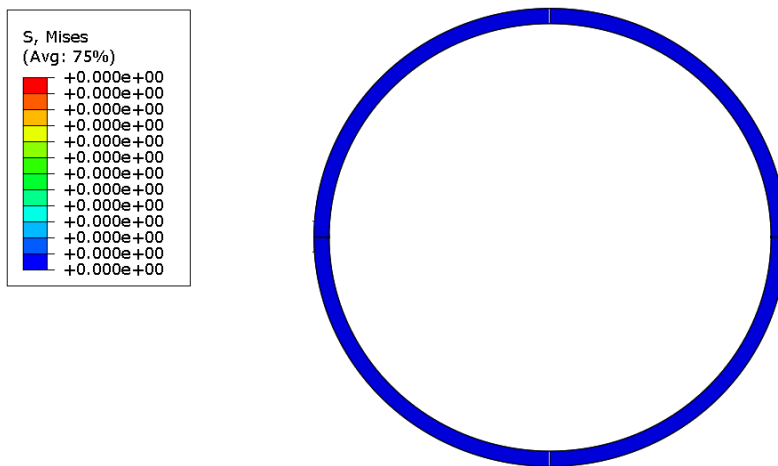
Σχήμα 41 Αδιάσπαστο διάγραμμα πίεσης-οβαλότητας που δείχνει πως συμπεριφέρεται ελαστικά ο αγωγός με λόγο $D/t=30$ για διαφορετικές αρχικές οβαλότητες

Για να είναι πιο ορθή η σύγκριση θα παρουσιάσουμε για τις αντίστοιχες αρχικές οβαλότητες πως θα συμπεριφερθεί ο σωλήνας εάν έχουμε ελαστοπλαστικό υλικό.

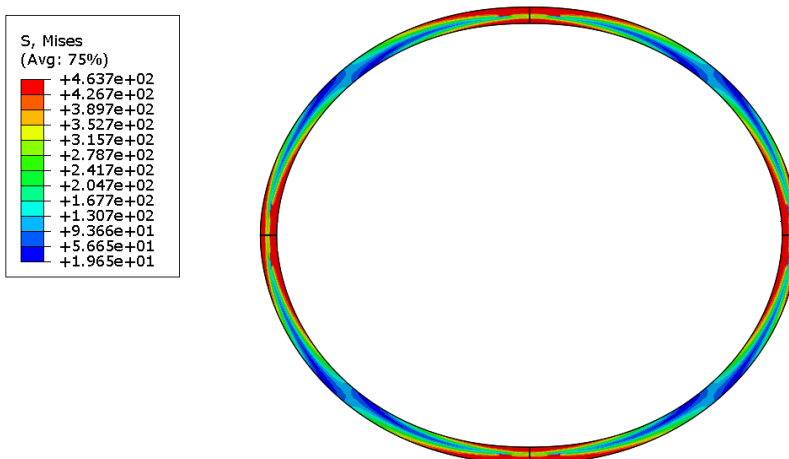


Σχήμα 42 Αδιάσπαστο διάγραμμα πίεσης-οβαλότητας που δείχνει πως συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά ο αγωγός με λόγο $D/t=30$ για διαφορετικές αρχικές οβαλότητες

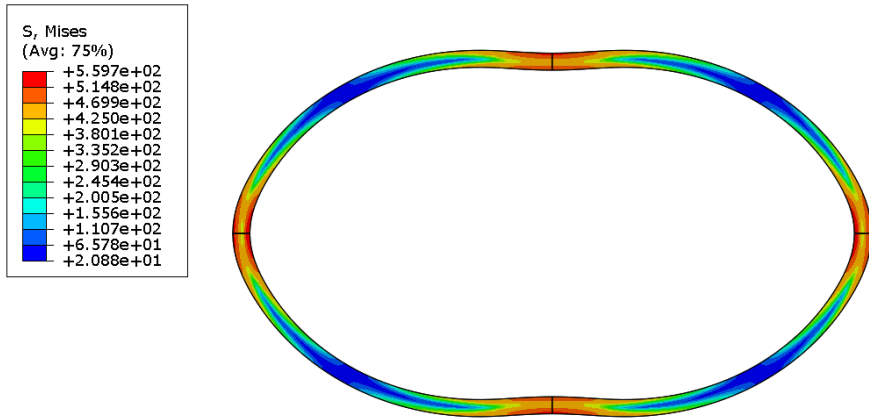
Στο διάγραμμα του Σχήματος 41 η πίεση είναι διαιρεμένη με την πίεση διαρροής του συγκεκριμένου αγωγού ώστε να έχουμε συγκρίσιμα αποτελέσματα. Αυτό που παρατηρούμε είναι αυτό το οποίο αναμέναμε. Η πίεση αυξάνει καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης. Δεν έχουμε την ίδια συμπεριφορά με έναν ελαστοπλαστικό δακτύλιο, όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 42, όπου το φορτίο αυξάνεται μέχρι μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια με την αύξηση της οβαλότητας μειώνεται. Κάτωθι παρουσιάζονται τα αντίστοιχα Σχήματα 12-15 και 17-20 για την περίπτωση που έχω γεωμετρική ατέλεια στον αγωγό.



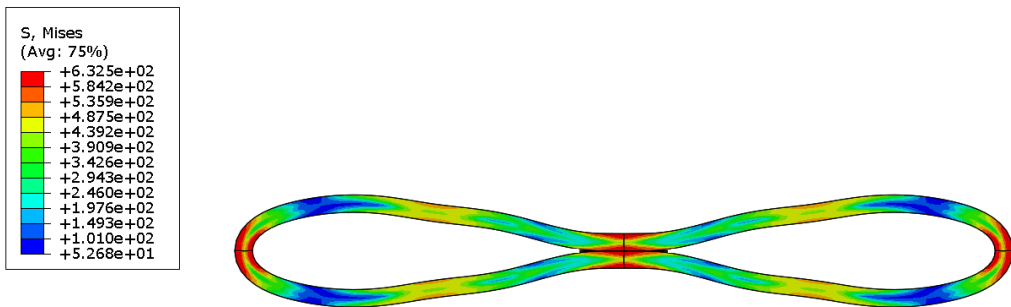
Σχήμα 43 Ο δακτύλιος πριν την επιβολή του εξωτερικού φορτίου. Δεν έχουμε αρχικές τάσεις λόγω ότι έχω γεωμετρική ατέλεια ($D/t=30$)



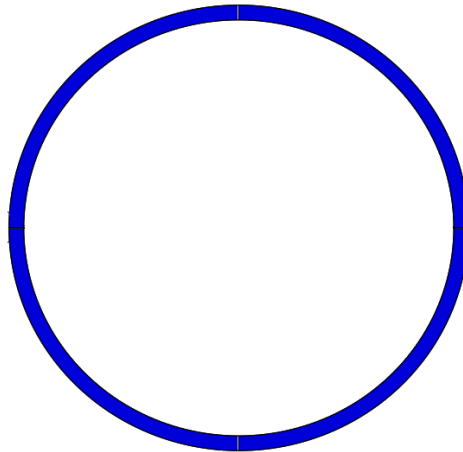
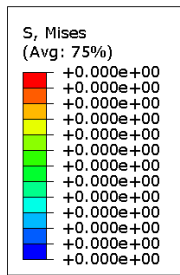
Σχήμα 44 Ο δακτύλιος αφού επιβληθεί η εξωτερική πίεση, τη στιγμή του λυγισμού(μέγιστη πίεση) ($D/t=30$)



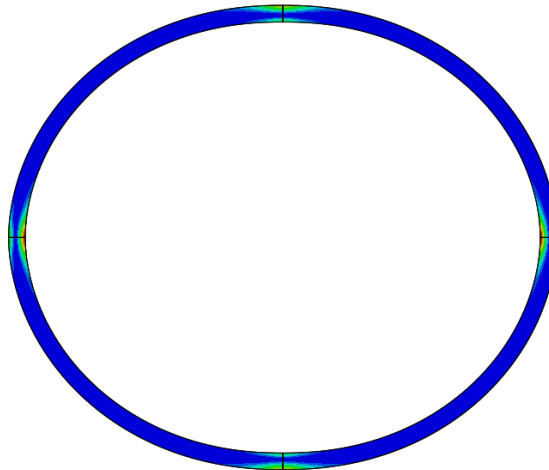
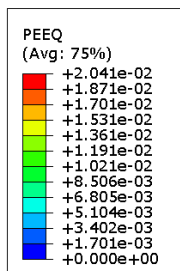
Σχήμα 45 Ο δακτύλιος κατά τη φάση της κατάρρευσής του και την ενεργοποίηση του μηχανισμού κατάρρευσης(D/t=30)



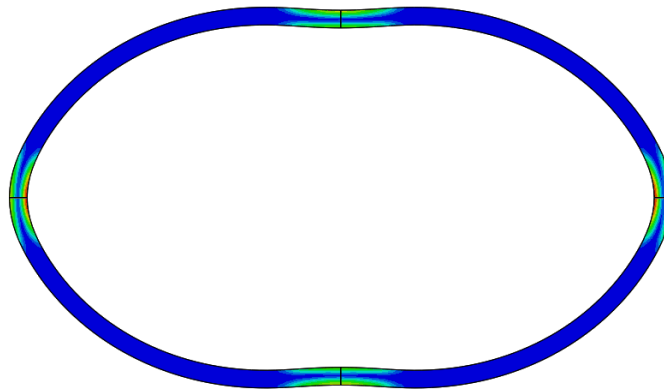
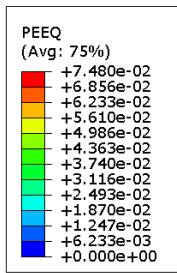
Σχήμα 46 Ο δακτύλιος μετά την ολική του κατάρρευση(D/t=30)



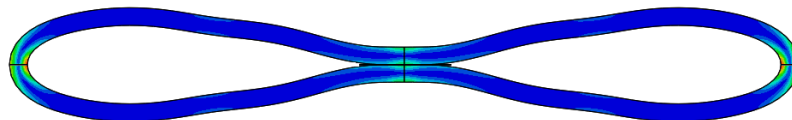
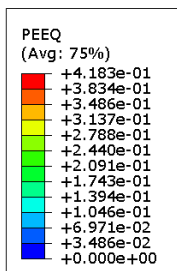
Σχήμα 47 Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση στον δακτύλιο πριν την εφαρμογή του εξωτερικού φορτίου. Δεν έχουμε καμία τιμή λόγω γεωμετρικής ατέλειας ($D/t=30$)



Σχήμα 48 Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση μετά την επιβολή της εξωτερικής πίεσης ($D/t=30$)



Σχήμα 49 Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση κατά τη φάση της κατάρρευσης του δακτυλίου(D/t=30)

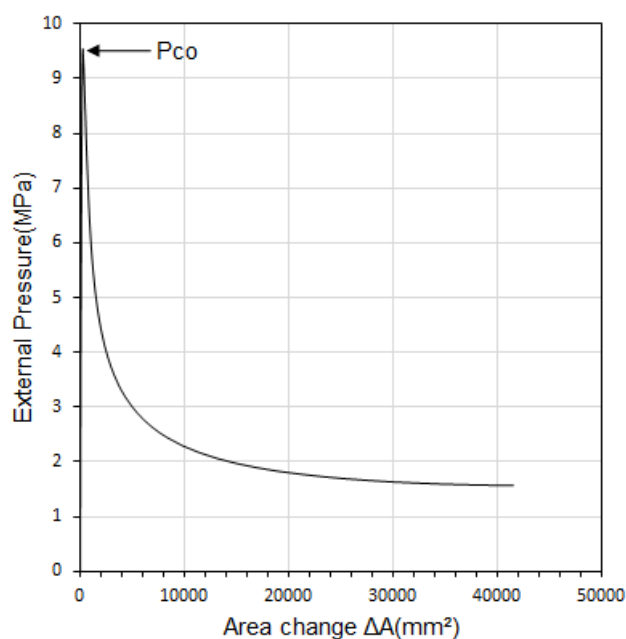


Σχήμα 50 Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση μετά την ολική του κατάρρευση(D/t=30)

Σημαντικό είναι επίσης να εξετάσουμε τη συμπεριφορά της πίεσης σε σχέση με τη μεταβολή του εμβαδού που έχουμε. Ο άμεσος υπολογισμός του εμβαδού μέσω του προγράμματος ABAQUS δεν είναι δυνατός. Εντούτοις το πρόγραμμα μας δίνει τα x και y του κάθε σημείου για κάθε χρονική στιγμή της ανάλυσης, και πρόκειται για πολύ μεγάλο αριθμό δεδομένων να επεξεργαστεί χειροκίνητα. Δημιουργήθηκε λοιπόν η ανάγκη για αυτοματοποίηση αυτής της διαδικασίας.

Χρησιμοποιώντας το προγραμματιστικό περιβάλλον του excel καταφέραμε να αναπαράγουμε τα συγκεκριμένα διαγράμματα πίεσης-εμβαδού για διαφορετικούς λόγους D/t . Χρησιμοποιήσαμε τον κανόνα του τραπεζιού, μια απλή αλλά αποτελεσματική μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης. Ουσιαστικά δηλαδή θεωρήσαμε πως στο κάθε ένα σημείο η σύνδεση του με τα

επόμενα γίνεται γραμμικά. Οπότε με γραμμική παρεμβολή καταφέραμε να υπολογίσουμε τη μεταβολή του εμβαδού ΔA για κάθε χρονική στιγμή της ανάλυσης μας.



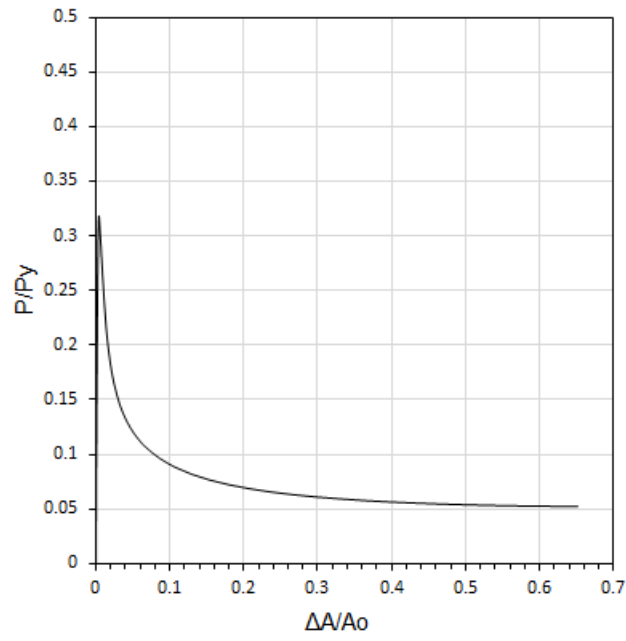
Σχήμα 51 Διάγραμμα P- ΔA για λόγο $D/t=30$

Χρήσιμο είναι να μετατρέψουμε τους άξονες σε αδιάστατη μορφή. Αυτό θα πραγματοποιηθεί διαιρώντας κάθε τιμή της πίεσης με την πίεση διαρροής που έχουμε στον δακτύλιο, P_y . Το ΔA θα το διαιρέσουμε με το αρχικό εμβαδόν του τεταρτοκυκλίου το οποίο δίνεται από τον τύπο:

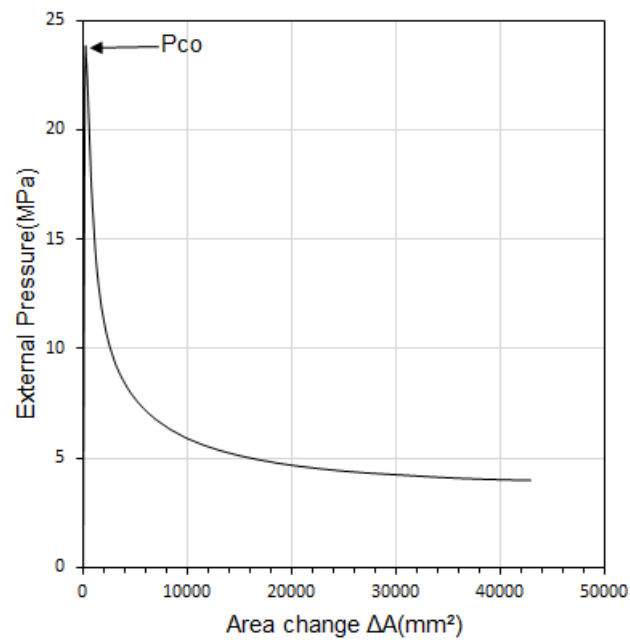
$$A = \pi \cdot r^2 / 4$$

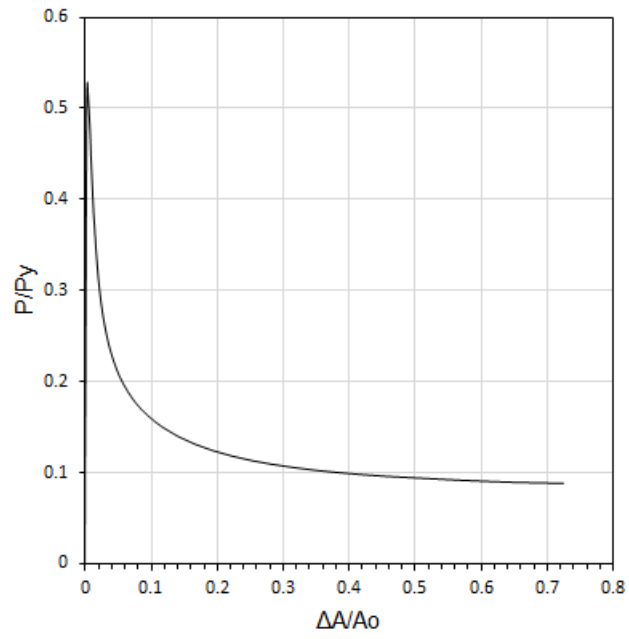
όπου r η εσωτερική ακτίνα του τεταρτοκυκλίου.

Παρατηρούμε από το διάγραμμα πως η πίεση φτάνει σχετικά γρήγορα στην μέγιστη τιμή της για ΔA 4%. Στη συνέχεια έχουμε απότομη πτώση της, όπως είχαμε παρατηρήσει και στο διάγραμμα της πίεσης με την οβαλότητα, μέχρι που καταλήγει να μειώνεται με πιο αργό ρυθμό σε προχωρημένο μεταλυγισμικό στάδιο.

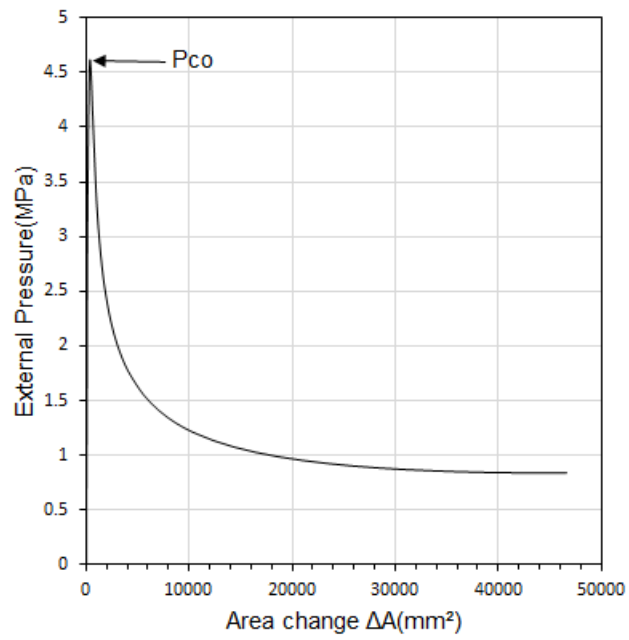


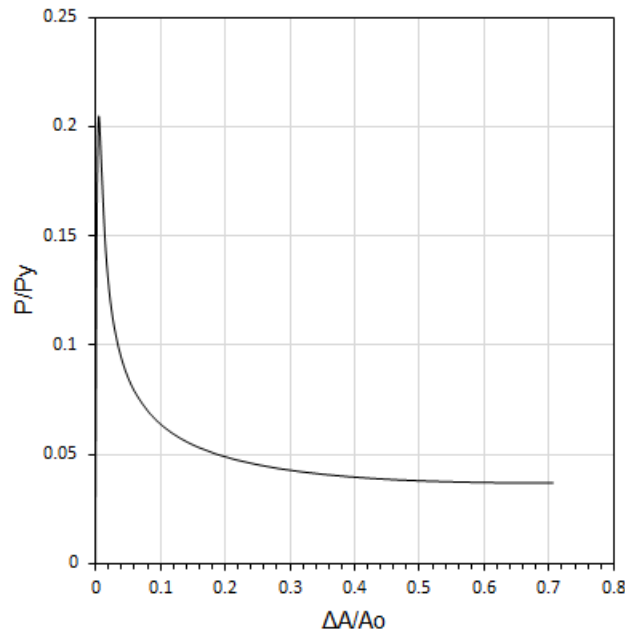
Σχήμα 52 Αδιάστατη μεταβολή πίεσης με το εμβαδό για λόγο $D/t=30$





Σχήμα 53 (α) Διάγραμμα P- ΔA για λόγο $D/t=20$ και (β) Αδιάστατη μεταβολή πίεσης με το εμβαδό για λόγο $D/t=20$





Σχήμα 54 (α) Διάγραμμα P-ΔA για λόγο D/t=40 και (β) Αδιάστατη μεταβολή πίεσης με το εμβαδό για λόγο D/t=40

Αυτό που παρατηρούμε και στα τρία διαγράμματα είναι πως η μεταβολή του εμβαδού είναι παρόμοια για τους λόγους D/t που εξετάσαμε. Αυτό που μεταβάλλεται είναι η μέγιστη τιμή της πίεσης όπως είχαμε αναφέρει και προηγουμένως.

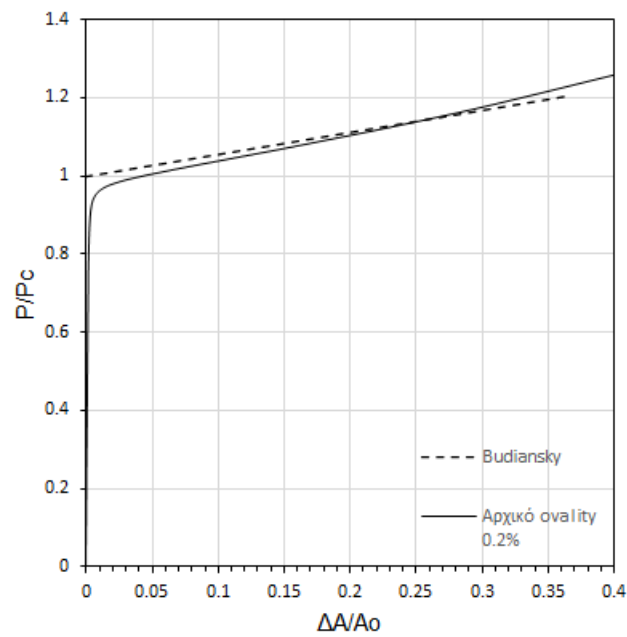
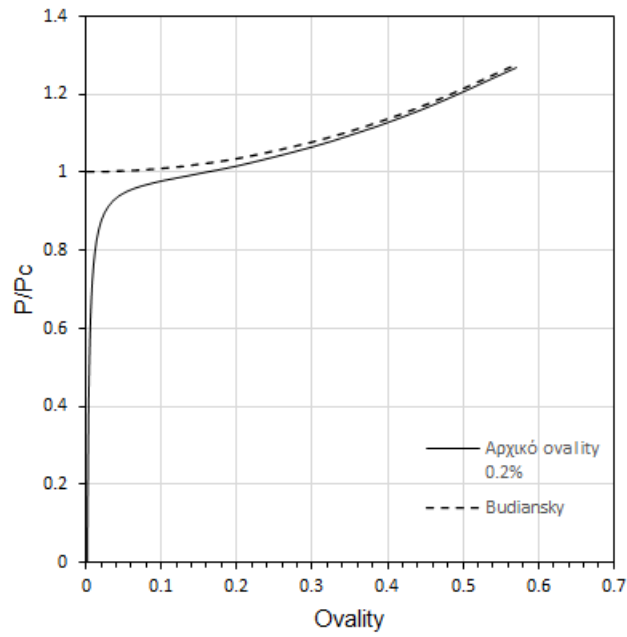
Έχοντας κάνει όλες τις ανωτέρω αναλύσεις είναι σκόπιμο να αναφερθούμε στη θεωρία του Budiansky, ο οποίος ασχολήθηκε εξολοκλήρου με τον ελαστικό λυγισμό δακτυλίων. Πρόκειται για μία ασυμπτωτική μέθοδο και οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση μας ήταν οι εξής :

$$P/P_c = 1 + (27/32)\xi^2$$

και

$$P/P_c = 1 + (9/16)(\Delta A/A_0)$$

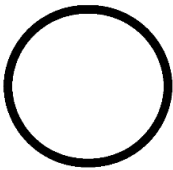
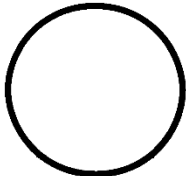
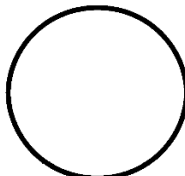
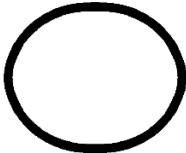
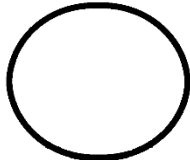
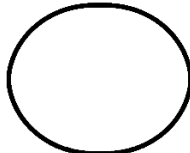
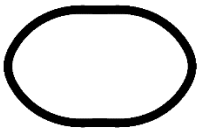
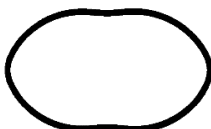
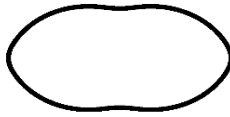









Στα διαγράμματα που ακολουθούν συγκρίναμε τη θεώρηση του Budiansky σύμφωνα με τους ανωτέρω τύπους με τη θεώρηση που έχουμε κάνει εμείς προηγουμένως στην παρούσα διπλωματική για την εύρεση της οβαλότητας καθώς και για τη μεταβολή του εμβαδού.



Σχήμα 55 (α) Αδιάστατο διάγραμμα πίεσης - ovality βασιζόμενοι στον τύπο του Budianski και (β) Αδιάστατο διάγραμμα πίεση-μεταβολής εμβαδού βασιζόμενοι στον τύπο του Budiansky

Από το διάγραμμα του Σχήματος 55α παρατηρούμε πως η επίλυση του Budionsky με τη δική μας θεώρηση όσο έχουμε αύξηση της οβαλότητας οι καμπύλες ταυτίζονται. Στο διάγραμμα τους Σχήματος 55β παρατηρούμε πως η για λόγο $\Delta A/A_0$ ίσο με 0.25 η θεώρηση μας τέμνει την επίλυση Budiansky και όσο αυξάνεται ο λόγος τη ξεπερνάει.

Έχοντας αναλύσει την συμπεριφορά του σωλήνα σε σχέση με την πίεση και την αντίστοιχη παραμόρφωση της διατομής, και πριν εξετάσουμε πως επηρεάζουν διάφορες ατέλειες την αντοχή του δακτυλίου, είναι χρήσιμο να παρουσιάσουμε τον τρόπο με τον οποίο αστοχούν οι τρεις παραπάνω περιπτώσεις δακτυλίων.

$D/t=20$	$D/t=30$	$D/t=40$
		
		
		
		
		
		

Πίνακας 3 Διαδοχικά στάδια κατάρρευσης των παραπάνω περιπτώσεων δακτυλίων

3.Επίδραση βασικών παραμέτρων στην αντοχή σε εξωτερική πίεση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε την επίδραση που έχουν κάποιες αρχικές ατέλειες του υλικού στην ανάλυση μας. Πιο συγκεκριμένα, μας ενδιαφέρει πώς αυτές οι ατέλειες επιδρούν στην τιμή της μέγιστης πίεσης κατάρρευσης.

Αυτές οι ατέλειες μπορεί να είναι διάφορων μορφών. Μια μορφή ατέλειας μπορεί να προκληθεί λόγω μιας αρχικής επιβαλλόμενης τιμής μετατόπισης. Ατέλεια μπορεί να δημιουργείται από την ανισοτροπία που παρουσιάζει το υλικό που χρησιμοποιούμε. Επίσης, ατέλεια μπορεί να αποτελούν τάσεις οι οποίες έχουν παραμείνει στο δακτύλιο από τις κατεργασίες που έχει υποστεί πριν τη χρήση του. Αυτά είναι κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα ατελειών. Για τη μελέτη των ατελειών έχουν γίνει στο παρελθόν πειράματα με σκοπό την κατανόηση για το πώς επιδρούν στην κατασκευή (Kyriakides, S Kat Corona, E. 2007. Mechanics of offshore pipelines) και έχουμε και τρόπους εντοπισμού τους και υπολογισμού τους.

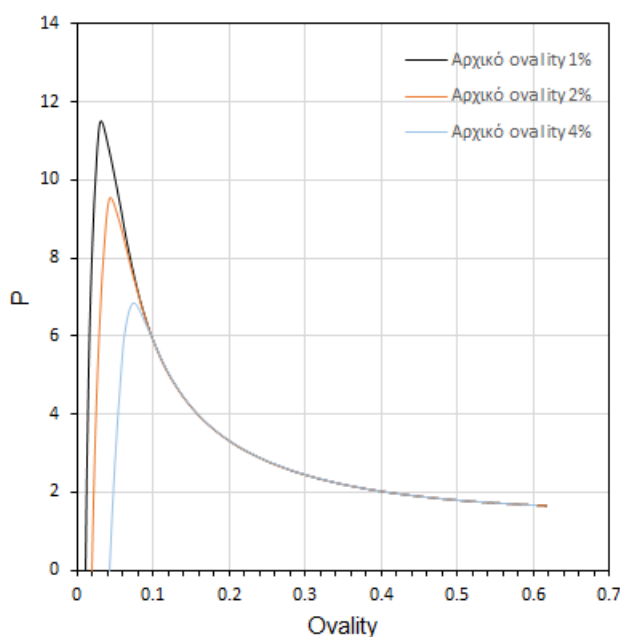
Εξωτερικά καμπικά ή αξονικά φορτία έχουν επίδραση στην μέγιστη πίεση ενός αγωγού. Αυτό σημαίνει πως, αν παράλληλα με την εξωτερική πίεση πάνω στον αγωγό ασκούνται κάμψη, εφελκυσμός ή θλίψη, η κρίσιμη τιμή της πίεσης επηρεάζεται.

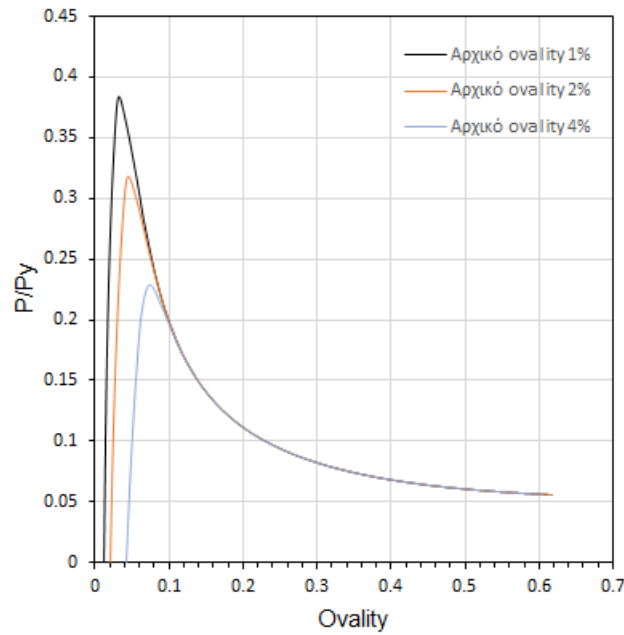
Την επίδραση που έχουν οι αρχικές ατέλειες στην μέγιστη πίεση του αγωγού θα τις εξετάσουμε με τη βοήθεια του προγράμματος ABAQUS. Θεωρούμε το ίδιο δισδιάστατο πρόβλημα με την ίδια γεωμετρία και υλικό και κάθε φορά εφαρμόζουμε και μελετάμε την εκάστοτε ατέλεια.

3.1. Αρχική οβαλότητα στο σωλήνα

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει κανένας σωλήνας δεν υπάρχει χωρίς κάποια γεωμετρική ατέλεια, είτε αυτή έχει προκύψει από προηγούμενες, κατεργασίες είτε κατά τη μεταφορά του, είτε στη φάση της κατασκευής στο πεδίο. Επομένως λοιπόν η αρχική ατέλεια μορφής οβαλότητας ενός σωλήνα αποτελεί και μία από τις σημαντικότερες αιτίες που επηρεάζουν την εξωτερική πίεση που δέχεται ο σωλήνας.

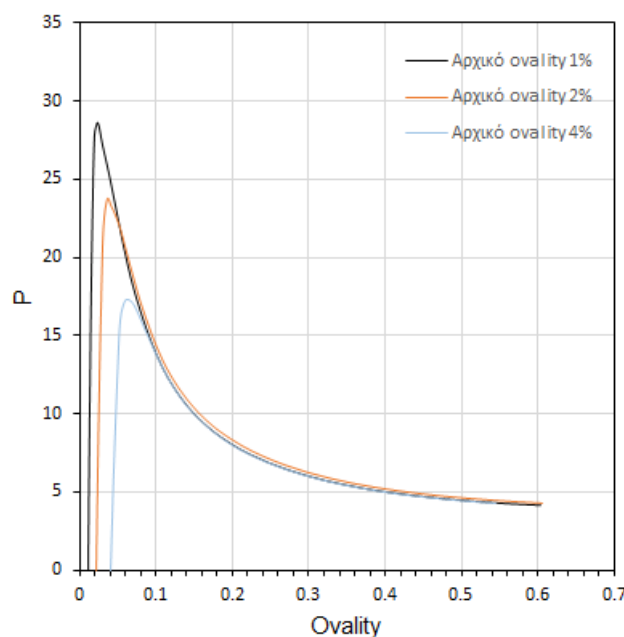
Μελετήσαμε τρία διαφορετικά μεγέθη αρχικής ατέλειας μορφής οβαλότητας, με 1%, με 2% όπου είναι και οι αναλύσεις που έχουμε κάνει ανωτέρω στην παρούσα εργασία και με 4%. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται αυτές οι περιπτώσεις για αγωγό με λόγο D/t να είναι ίσο με 30.

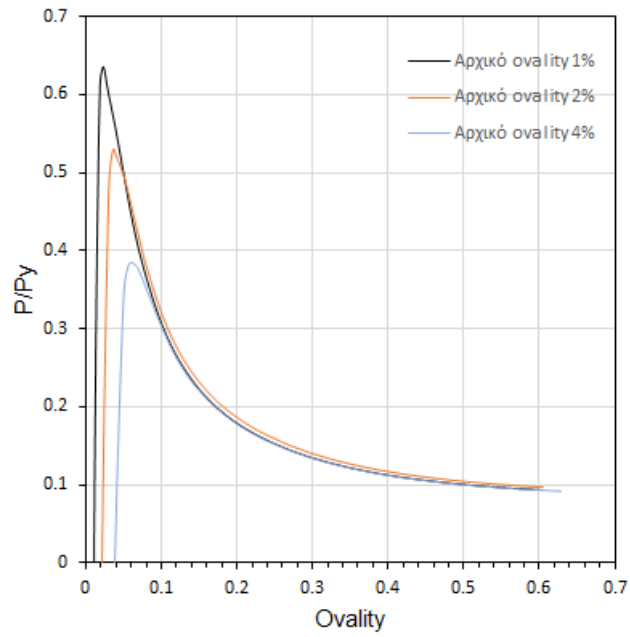




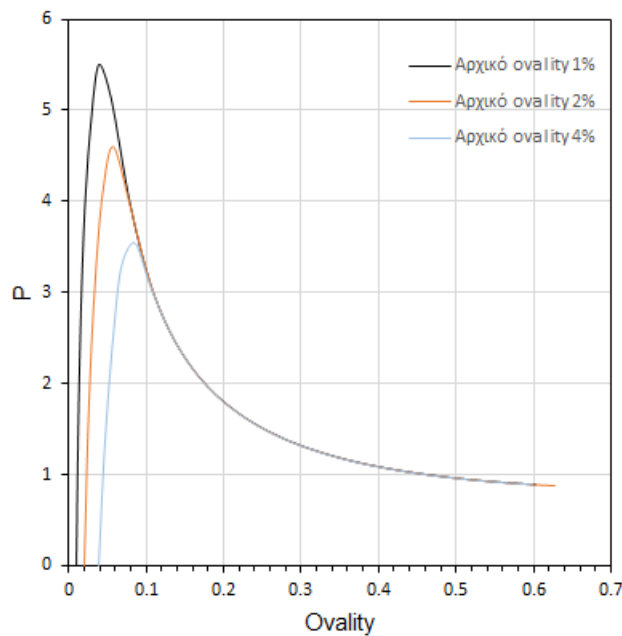
Σχήμα 56 α) Διαφορετικά μεγέθη αρχικής ovality για λόγο $D/t=30$ και β) Αδιάστατο διάγραμμα πίεσης-οβαλότητας για διαφορετικά μεγέθη αρχικής ovality για λόγο $D/t=30$

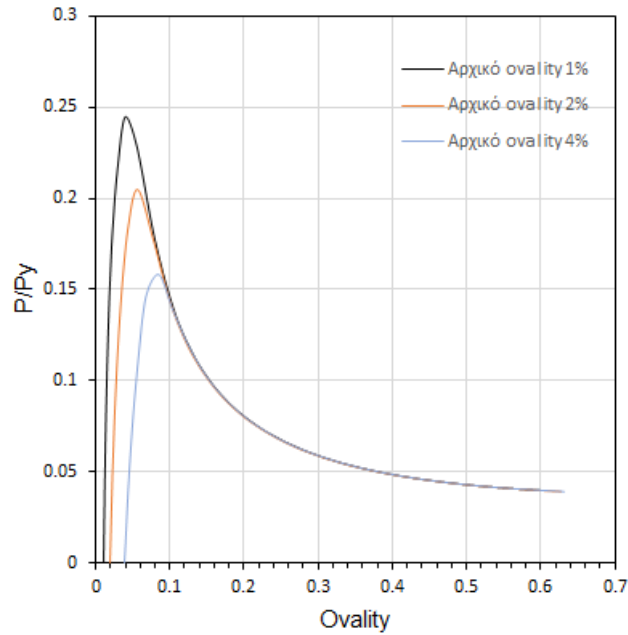
Αυτό που παρατηρούμε από το διάγραμμα του Σχήματος 56 είναι πως όσο αυξάνεται η αρχική ατέλεια μορφής οβαλότητας τόσο μειώνεται η αντοχή του σωλήνα σε εξωτερική πίεση, καθώς βλέπουμε ότι η τιμή της κρίσιμης πίεσης λυγισμού μειώνεται αισθητά. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε παρόμοια διαγράμματα και για διαφορετικούς λόγους D/t ώστε να έχουμε μία πιο πλήρη εικόνα της επιρροής της αρχικής ατέλειας μορφής οβαλότητας.





Σχήμα 57 (α) Διαφορετικά μεγέθη αρχικής ovality για λόγο $D/t=20$ και (β) Αδιάστατο διάγραμμα πίεσης-οβαλότητας για διαφορετικά μεγέθη αρχικής ovality για λόγο $D/t=20$

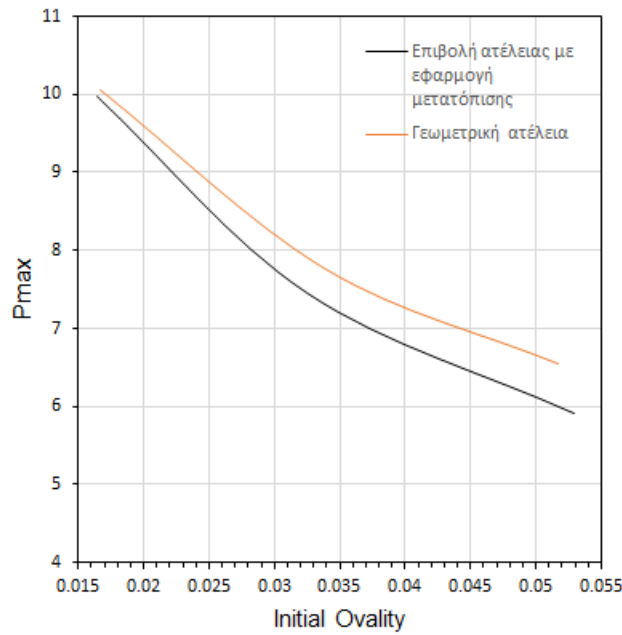




Σχήμα 58 (α) Διαφορετικά μεγέθη αρχικής ovality για λόγο $D/t=40$ και (β) Αδιάστατο διάγραμμα πίεσης-οβαλότητας για διαφορετικά μεγέθη αρχικής ovality για λόγο $D/t=40$

Και για τους τρεις διαφορετικούς λόγους D/t αυτό που παρατηρούμε είναι πως όσο αυξάνεται η αρχική ατέλεια, η κρίσιμη πίεση κατάρρευσης μειώνεται αισθητά.

Στα διαγράμματα των Σχημάτων 56-58 η ατέλεια υποβλήθηκε στο σωλήνα με δυναμικό τρόπο μέσω εξωτερικής μετατόπισης. Στο διάγραμμα του Σχήματος 42 υποβάλλαμε από την αρχή γεωμετρική ατέλεια μορφής οβάλ. Στο σχήμα που ακολουθεί τέθηκε σύγκριση του μέγιστου φορτίου της πίεσης των δύο αυτών περιπτώσεων σε σχέση με την αρχική ατέλεια μορφής οβαλότητας.



Σχήμα 59 Διάγραμμα μέγιστης τιμής της πίεσης-αρχικής οβαλότητας

Από το διάγραμμα του Σχήματος 59 εξάγουμε το συμπέρασμα πως όταν επιβληθεί η αρχική ατέλεια μέσω μετατόπισης, δηλαδή με δυναμικό τρόπο, οι μέγιστες τιμές της πίεσης στο σωλήνα έχουν μικροτέρα τιμή σε σχέση με τις μέγιστες τιμές της πίεση όταν έχω γεωμετρική ατέλεια μορφής οβάλ. Επομένως, είναι μεγαλύτερη η επίδραση της ατέλειας που οφείλεται στην εφαρμογή κάποιας μετατόπισης σε σχέση με την περίπτωση της γεωμετρικής ατέλειας.

3.2.Ανισοτροπία του υλικού

Ανισοτροπία σε ένα υλικό σημείο έχω όταν σε διαφορετικές κατευθύνσεις μέσα στο υλικό έχω διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Αποτελεί μία σημαντική αρχική ατέλεια.

Στους χάλυβες που χρησιμοποιούνται στους αγωγούς μας ενδιαφέρει ο λόγος μεταξύ του ορίου διαρροής κατά την περιμετρική και αξονική διεύθυνση του. Η εργοσκήρυνση στο στάδιο της παραγωγής είναι ο παράγοντας στον οποίο οφείλεται αυτή η διαφορά στο όριο διαρροής. Ο λόγος που μοντελοποιεί την ανισοτροπία δίνεται από τον τύπο:

$$R_{ij} = \frac{\bar{\sigma}_{ij}}{\sigma_y}$$

όπου σ_{ij} το όριο διαρροής το οποίο παίρνουμε πειραματικά σε κάθε κατεύθυνση και σ_y το γνωστό μας όριο διαρροής για την πλαστικοποίηση του μετάλλου εάν δεν υπήρχε η ανισοτροπία.

Για την περιγραφή της ανισοτροπίας χρησιμοποιούμε το κριτήριο διαρροής του Hill. Αυτό αποτελεί γενίκευση του κριτηρίου κατά von Mises. Το κριτήριο αυτό εκφράζεται σε σχέση με τον τανυστή των τάσεων σε καρτεσιανές συντεταγμένες:

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

όπου F,G,H,L,M,N είναι σταθερές και

$$f(\boldsymbol{\sigma}) \leq \sigma'$$

όπου σ' είναι το νέο όριο διαρροής στην περιμετρική διεύθυνση. Ο υπολογισμός τους γίνεται μέσω πειραμάτων και ορίζονται ως εξής:

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right)$$

$$G = \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} \right)$$

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} \right)$$

$$L = \frac{3}{2R_{23}^2}$$

$$M = \frac{3}{2R_{13}^2}$$

$$N = \frac{3}{2R_{12}^2}$$

Ισχύει ότι $\tau_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$. Επομένως καταλήγουμε στις έξι παραμέτρους που απαιτούνται για τον προσδιορισμό του κριτηρίου διαρροής κατά Hill. Αυτές είναι οι εξής (πρόκειται για τα R_{ij} που έχουμε αναφέρει προηγουμένως):

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

Πρέπει να δώσουμε τιμές στις σταθερές F,G,H,L,M,N οι οποίες θα πρέπει να παίρνουν θετικές τιμές, ώστε οι έξι τιμές που απαιτούνται για τον προσδιορισμό του κριτηρίου του Hill και παρουσιάζονται ανωτέρω να έχουν θετικό πρόσημο. Σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να καταλήξουμε σε αρνητικές τιμές και αυτό θα έχει σαν συνέπεια να έχουμε αρνητικό υπόριζο, κάτι το οποίο φυσικά και δεν είναι αποδεκτό.

Θυμίζουμε ότι έχουμε υιοθετήσει το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που έχουμε περιγράψει στο κεφάλαιο 2 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, για τον υπολογισμό της συγκεκριμένης ανισοτροπίας θα εισάγουμε την παράμετρο S η οποία δίνεται από τον τύπο:

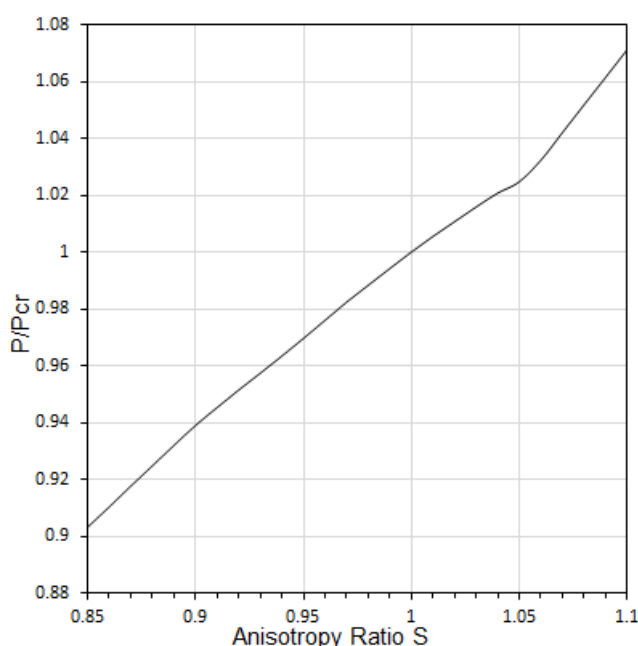
$$S = \frac{\sigma_{\theta,y}}{\sigma_{\chi,y}}$$

όπου $\sigma_{\theta,y}$ είναι το όριο διαρροής κατά την περιφερική διεύθυνση και $\sigma_{\chi,y}$ το όριο διαρροής κατά το μήκος του αγωγού.

Για να μπορέσουμε να μελετήσουμε την ανισοτροπία στο ABAQUS θα πρέπει να θεωρήσουμε ένα νέο κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων με αρχή των αξόνων το κέντρο της διατομής. Αυτό το σύστημα το συνδυάζουμε με το υλικό και έτσι το ABAQUS θα θεωρεί τις ιδιότητες του υλικού μας μέσω αυτού

του καινούριου συστήματος. Με αυτό τον τρόπο θα μας δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα με βάση την ανωτέρω ανάλυσή μας. Με την εντολή *POTENTIAL ορίζουμε τις παραμέτρους R_{ij} στο καινούριο πλέον κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων. Έχω ότι $\sigma_{xy} = 450 \text{ MPa}$, δηλαδή το όριο διαρροής αναφοράς του υλικού. Στην παράμετρο S θα δώσω τιμές από το 0.85 μέχρι το 1.1. Οι υπόλοιπες παράμετροι του R_{ij} θα πάρουν την τιμή 1.

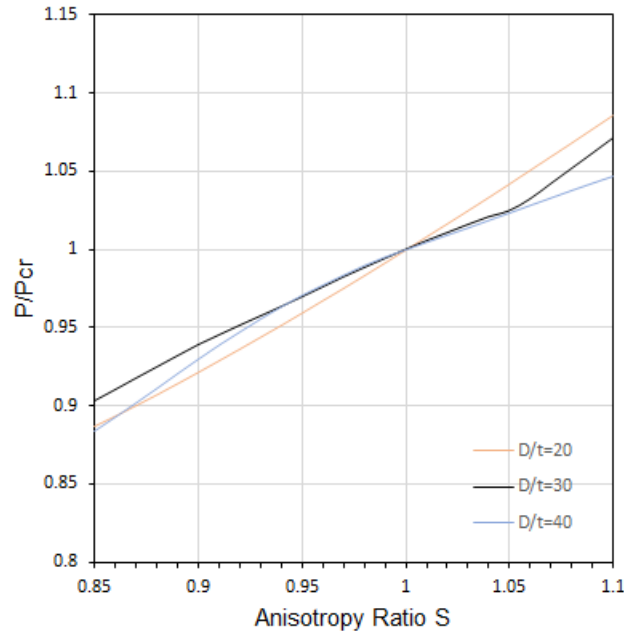
Με τη βοήθεια του ABAQUS και των πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζω την κρίσιμη τιμή της πίεσης για διάφορες τιμές της ανισοτροπίας και τη συγκρίνω με την κρίσιμη τιμή της πίεσης όταν δεν είχα ανισοτροπία στο υλικό. Με τα αποτελέσματα που πήραμε κατασκευάσαμε το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 60 Επιρροή της ανισοτροπίας στην αντοχή του υλικού για $D/t=30$

Παρατηρώντας το διάγραμμα του Σχήματος 60 καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η ανισοτροπία έχει σημαντικές επιπτώσεις στην πίεση κατάρρευσης του σωλήνα. Ανάλογα με τις τιμές της ανισοτροπίας έχω είτε αύξηση είτε μείωση της αντοχής του σωλήνα. Για ανισοτροπία μεγαλύτερη της μονάδας αυξάνεται το όριο αντοχής στην περιφερική διεύθυνση οπότε έχω καλύτερη αντοχή στην εξωτερική πίεση.

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για διαφορετικούς λόγους D/t . Τα αποτελέσματα που καταλήξαμε φαίνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 61.

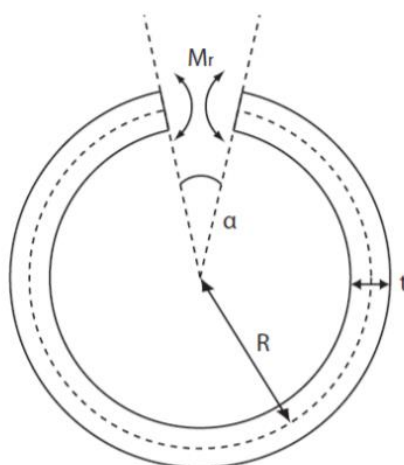


Σχήμα 61 Επιρροή της ανισοτροπίας στην αντοχή του υλικού για διάφορες τιμές του λόγου D/t

Από το διάγραμμα του Σχήματος 61 εξάγουμε κάποια ενδιαφέροντα συμπεράσματα τα οποία αναμέναμε από τη θεωρία και τα πειράματα που έχουν γίνει γύρω από την ανισοτροπία. Για τιμές του λόγου ανισοτροπίας μικρότερες της μονάδας, για λόγους D/t ίσους με 20 και 40 παρατηρούμε πως οι τιμές είναι πολύ κοντά, ενώ για λόγο D/t ίσο με 30 η επίδραση είναι μικρότερη. Όσο πλησιάζουμε το λόγο ίσο με 1 παρατηρούμε ότι για λόγο $D/t=40$ η επίδραση είναι μικρότερη. Αντίθετα, όταν ο λόγος ανισοτροπίας παίρνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας όσο ο λόγος D/t αυξάνει η αντοχή του σωλήνα στην εξωτερική πίεση γίνεται χειρότερη. Για λόγο D/t ίσο με 20 η αντοχή είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αντοχή για λόγο D/t ίσο με 40, ενώ για λόγο D/t ίσο με 30 βρίσκεται στο ενδιάμεσο των προηγούμενων δύο.

3.3. Παραμένουσες τάσεις στον σωλήνα

Οι παραμένουσες τάσεις παρουσιάζονται στα τοιχώματα του σωλήνα όταν αυτός παρασκευάζεται σε κάποιο σωληνοργείο. Παραμένουσες τάσεις έχω και σε σωλήνες με ραφή αλλά και σε σωλήνες χωρίς. Σε αυτούς με ραφή είναι μεγαλύτερες και αυτό οφείλεται στο γεγονός πως οι διαφορές στη θερμοκρασία είναι αρκετά μεγάλες και πως πετυχαίνω σύνδεση των άκρων ενός ελάσματος. Σε αυτούς χωρίς ραφή παραμένουσες τάσεις έχουμε από προηγούμενες κατεργασίες στις οποίες έχει υποβληθεί ο σωλήνας. Για να μετρήσουμε τις παραμένουσες έχουν αναπτυχθεί πολλοί τρόποι, είτε πολύ απλοί είτε πιο περίπλοκοι. Ο πιο απλός τρόπος είναι κάνοντας μια τομή στο τοίχωμα ενός τυχαίου δακτυλίου του σωλήνα μπορώ.

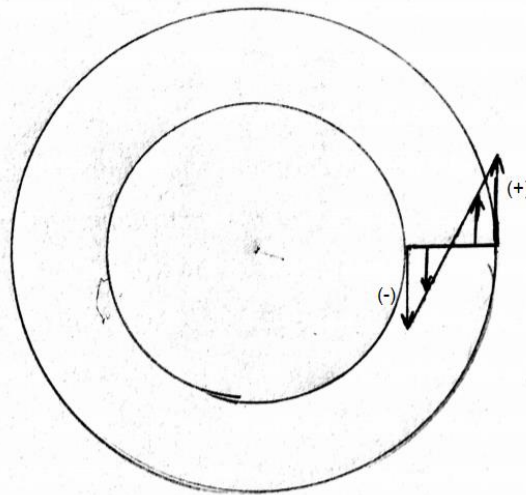


Σχήμα 62 Τρόπος μέτρησης των παραμενουσών τάσεων

Αυτός ο δακτύλιος, μετά την τομή θα έχει μια τάση είτε να «ανοίξει» είτε να «κλείσει». Αυτό εξαρτάται από την κατανομή που έχουν οι τάσεις στο δακτύλιο μας. Μετρώντας τη γωνία που σχηματίστηκε στην τομή υπολογίζουμε τη μέγιστη τιμή των παραμενουσών τάσεων μέσω του τύπου:

$$|\sigma_{res}| = \frac{E t}{4\pi R} a$$

Θεωρώ πως έχω συνεχές προφίλ τάσεων και γραμμικό μεταβαλλόμενο κατά το πάχος. Η τιμή στο μέσο του πάχους είναι μηδέν και μέγιστες τιμές έχω πάνω στις επιφάνειες του αγωγού.



Σχήμα 63 Κατανομή των τάσεων

Οι τάσεις μπορεί να είναι είτε θετικές/εφελκυστικές που συμβολίζονται ως (+) στο Σχήμα 63 είτε αρνητικές/θλιπτικές που συμβολίζονται ως (-) στο Σχήμα 63. Αυτό εξαρτάται από το εάν τείνει να «ανοίξει» ή να «κλείσει» η τομή στο τοίχωμα.

Για να προσομοιώσουμε τις παραμένουσες τάσεις στο ABAQUS χρησιμοποιούμε το μοντέλο το οποίο έχουμε περιγράψει προηγουμένως, δηλαδή με εξωτερική διάμετρο $D=610$ mm και πάχος $t=20$ mm. Θα δουλέψουμε στο δισδιάστατο μοντέλο με μία αρχική οβαλότητα 2% η οποία επιβάλλεται με την εφαρμογή αρχικής μετατόπισης. Το πλέγμα είναι το ίδιο και θα έχουμε στοιχεία επίπεδης έντασης ώστε η σύγκριση να είναι στοχευμένη και συνεπής με τα αντίστοιχα προηγούμενα αποτελέσματα.

Με βάση το πλέγμα που έχουμε χρησιμοποιήσει (8 στοιχεία κατά το πάχος και 50 κατά την περιφέρεια) παρουσιάζεται μια δυσκολία να προσθέσουμε σε κάθε ένα στοιχείο χειροκίνητα τις αντίστοιχες παραμένουσες τάσεις. Πρέπει λοιπόν να βρούμε έναν συστηματικό τρόπο να δώσουμε στο κάθε ένα στοιχείο την τιμή της τάσης με βάση το προφίλ τάσεων που έχουμε παρουσιάσει στο Σχήμα 63.

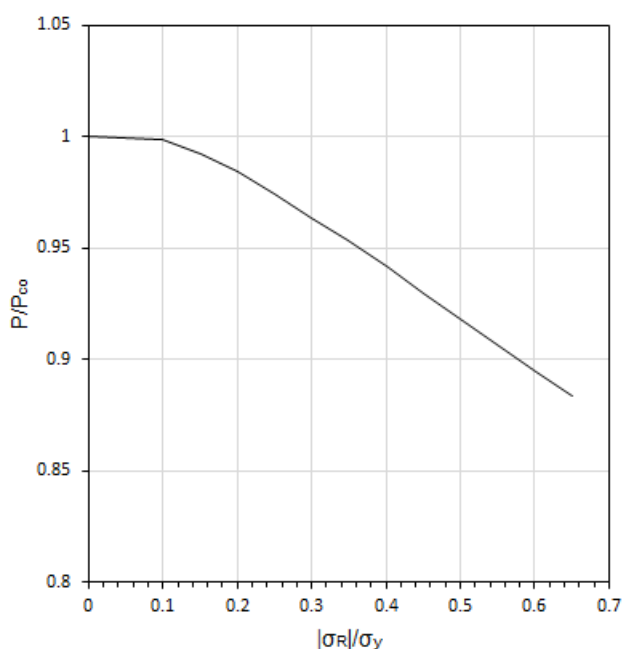
Θα περιγράψουμε τη διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε με στόχο την εισαγωγή των παραμενουσών τάσεων, θεωρώντας γραμμική μεταβολή κατά το πάχος παραμένουσες τάσεις. Αρχικά, αυτό που πρέπει να κάνουμε είναι να χρησιμοποιήσουμε το Assembly και να δημιουργήσουμε τα sets τα οποία θα απαιτηθούν ώστε να εισάγουμε τις τιμές της παραμένουσας τάσης που επιθυμούμε. Στη συνέχεια δημιουργούμε το job και από το inp file που έχουμε βρούμε τα sets που δημιουργήσαμε, και τοποθετούμε στα sets την τιμή που επιθυμούμε, ξεκινώντας από την μέγιστη θλιπτική στην εσωτερική διάμετρο και

φτάνοντας μέχρι την μέγιστη εφελκυστική στην εξωτερική διάμετρο. Ο τύπος πάνω στον οποίο στηριχθήκαμε ώστε να γίνει η ανάλυση είναι ο εξής:

$$S_r = \frac{|\sigma_{res}|}{\sigma_y}$$

όπου σ_{res} είναι η μέγιστη τιμή των παραμενουσών τάσεων πριν ασκήσουμε την εξωτερική πίεση στο δακτύλιο και $\sigma_y=450$ MPa είναι το ονομαστικό όριο διαρροής του υλικού. Με αυτή την παράμετρο εκφράζουμε το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων με αδιάστατο τρόπο. Ουσιαστικά δηλώνει πόσο μεγάλη είναι η τιμή των παραμενουσών τάσεων σε σχέση με το όριο διαρροής.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα που πήραμε για διάφορες τιμές της παραμέτρου S_r για τον σωλήνα με λόγο D/t ίσο με 30.

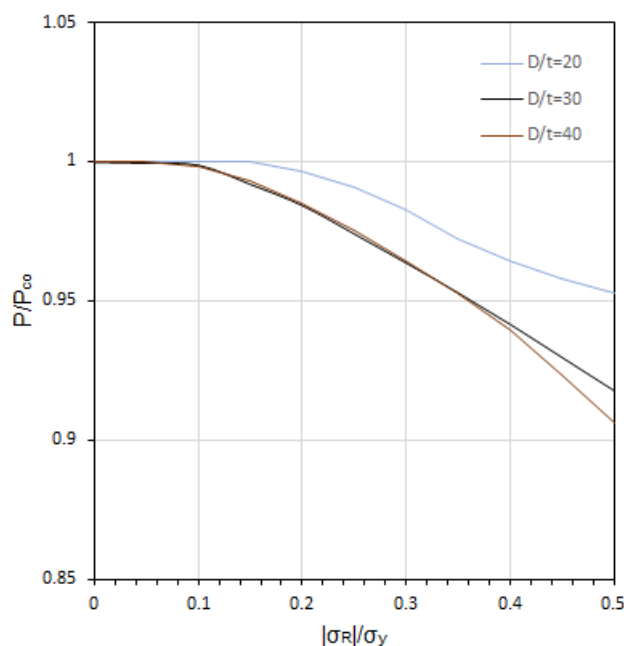


Σχήμα 64 Επίδραση των παραμενουσών τάσεων σε δακτύλιο με λόγο $D/t=30$

Παρατηρούμε ότι για την ίδια γεωμετρία του σωλήνα οι παραμένουσες τάσεις έχουν επιρροή στην αντοχή του σωλήνα. Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε ότι όσο αυξάνονται οι παραμένουσες τάσεις η αντοχή του σωλήνα σε εξωτερική πίεση μειώνεται και ο σωλήνας μας καταρρέει σε μικρότερη πίεση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως οι παραμένουσες τάσεις προστίθενται στις τάσεις που δημιουργούνται λόγω εξωτερικής πίεσης και επομένως οι μέγιστες τάσεις ξεπερνούν πιο γρήγορα το όριο διαρροής και έτσι έχουμε την κατάρρευση του δακτυλίου σε μικρότερη κρίσιμη πίεση.

Χρήσιμο είναι να συγκρίνουμε και την επιρροή που έχουν οι παραμένουσες τάσεις και για άλλους λόγους D/t όπως έχουμε εξετάσει και στις

προηγούμενες μορφές ατελειών. Στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται αυτή η σύγκριση.



Σχήμα 65 Επίδραση των παραμενουσών τάσεων σε δακτύλιο για διαφορετικούς λόγους D/t

Από το διάγραμμα τους Σχήματος 65 αυτό που παρατηρούμε είναι πως όσο μικρότερος είναι ο λόγος D/t τόσο μικρότερη γίνεται και η επίδραση των παραμενουσών τάσεων στην αντοχή του σωλήνα. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι για λόγο D/t ίσο με 20 η επίδραση των παραμενουσών τάσεων είναι μικρότερη σε σύγκριση με τους λόγους D/t 30 και 40 όπου έχουμε σχεδόν παρόμοια συμπεριφορά με μικρότερη επίδραση να παρουσιάζεται για λόγο D/t ίσο με 30.

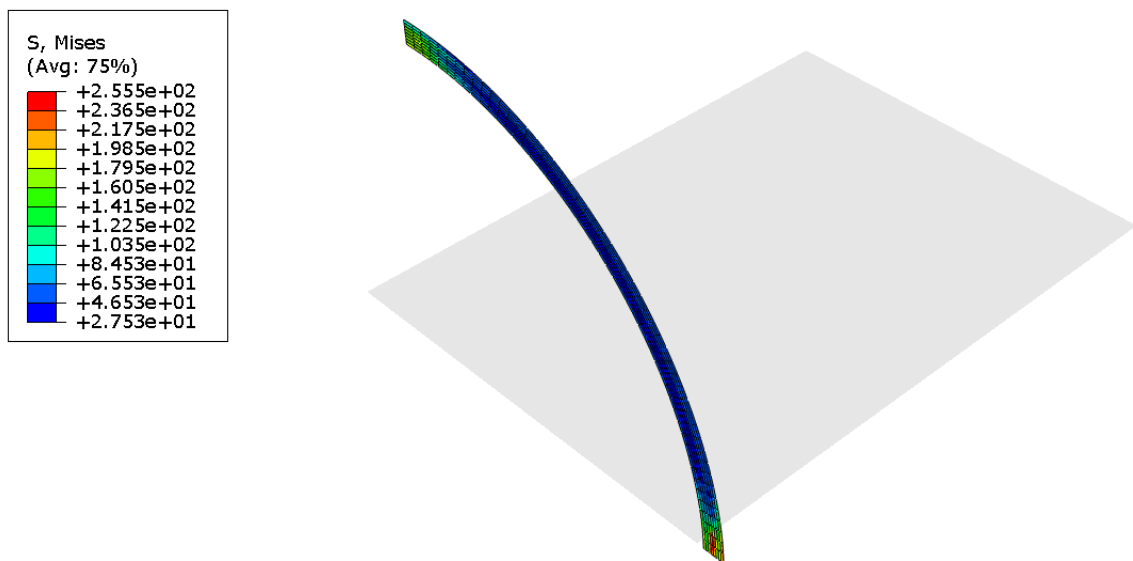
3.4.Γενικευμένη επίπεδη παραμόρφωση

Μέχρι τώρα όλες οι αναλύσεις που έχουμε πραγματοποιήσει έγιναν με την υπόθεση πως έχουμε δακτυλίους με επίπεδη ένταση. Αυτό αφορά την επιβολή εξωτερικής πίεσης και μόνον, ως φόρτισης. Αν θέλουμε να προσθέσουμε μία αξονική δύναμη στον δακτύλιο και να εξετάσουμε πως αυτή η δύναμη επιδρά στην κρίσιμη πίεση κατάρρευσης τότε χρειαζόμαστε ένα μοντέλο γενικευμένης επίπεδης έντασης.

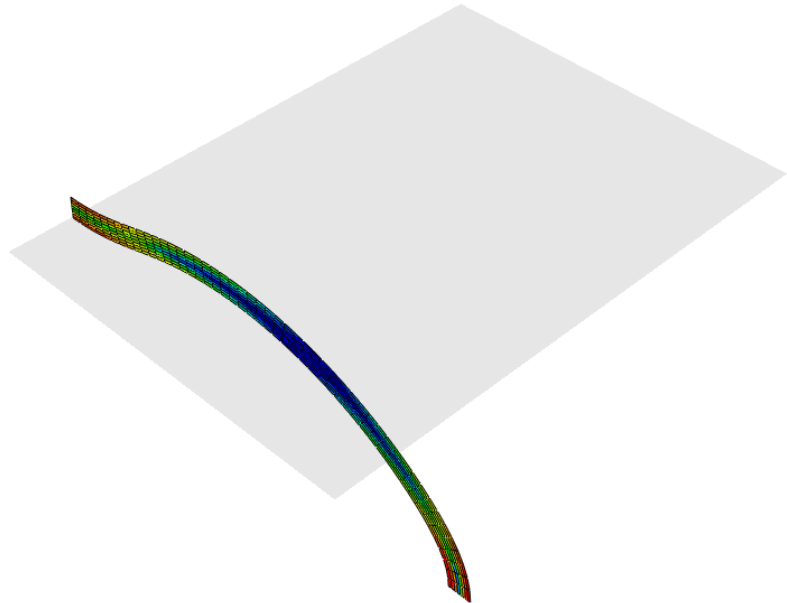
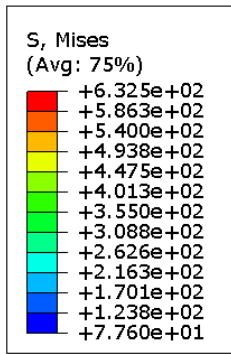
Υπολογίζουμε αρχικώς ποια είναι η μέγιστη τιμή της δύναμης που μπορεί να ασκηθεί στο μοντέλο πριν φτάσουμε στην πλαστικοποίησή του. Ο προσδιορισμός της μέγιστης δύναμης γίνεται από τον τύπο:

$$F_y = \sigma_y * A$$

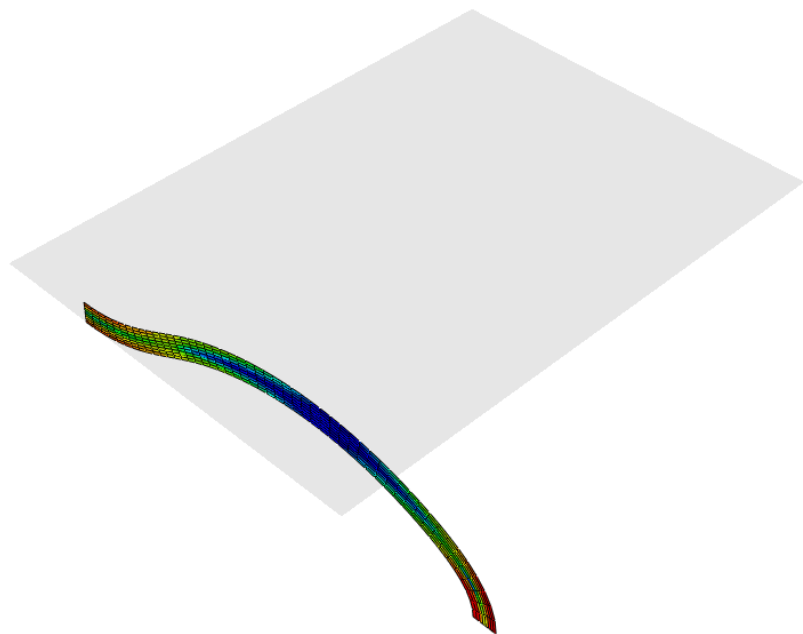
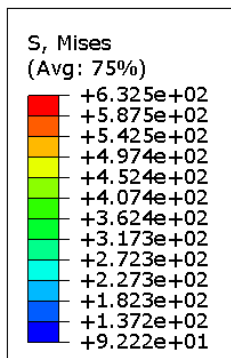
όπου σ_y είναι το όριο διαρροής του υλικού και $A = \pi(r_{out}^2 - r_{in}^2)$ το εμβαδόν της διατομής του σωλήνα. Πρέπει να προσέξουμε ότι η δύναμη που πρέπει να θεωρήσουμε στο αντίστοιχο μοντέλο είναι το $\frac{1}{4}$ της συνολικής καθώς αναφερόμαστε σε ένα τεταρτοκύκλιο. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε το μοντέλο στο ABAQUS σε διάφορες χρονικές στιγμές.



Σχήμα 66 Αμέσως μετά την εφαρμογή της εξωτερικής πίεσης για τιμή 0.1 της συνολικής αξονικής δύναμης και για λόγο $D/t=30$

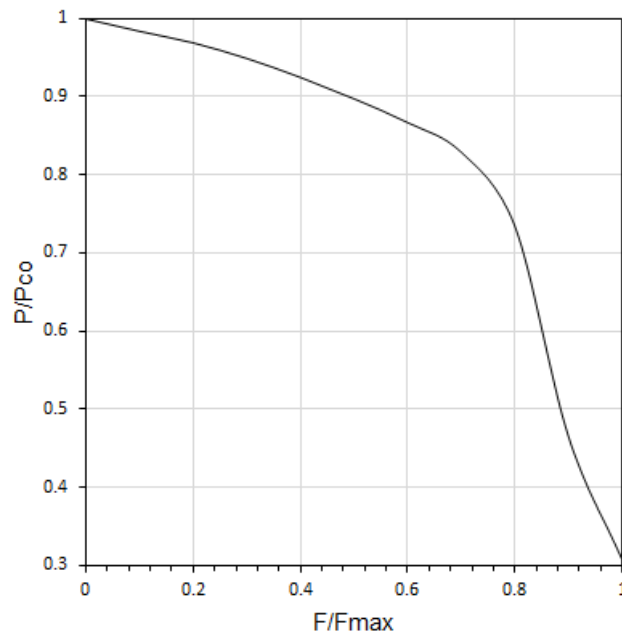


Σχήμα 67 Κατάρρευση του δακτυλίου για τιμή 0.1 της συνολικής αξονικής δύναμης και για λόγο $D/t=30$



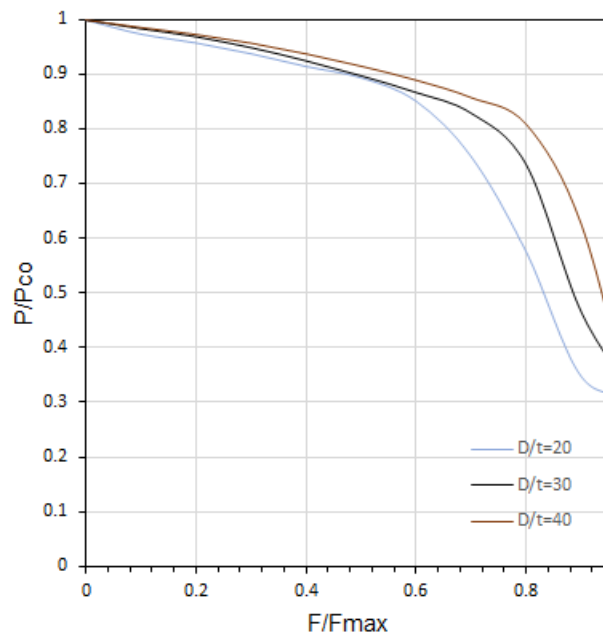
Σχήμα 68 Ολική κατάρρευση του δακτυλίου για τιμή 0.1 της συνολικής αξονικής δύναμης και για λόγο $D/t=30$

Εφαρμόζοντας λοιπόν διάφορα επίπεδα αξονικής δύναμης παίρνουμε το παρακάτω διάγραμμα για τη μέγιστη πίεση που αντέχει ο σωλήνας.



Σχήμα 69 Διάγραμμα πίεσης με αξονική δύναμη για λόγο $D/t=30$

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 68 η αντοχή του σωλήνα μειώνεται όσο η αξονική δύναμη αυξάνει προς τη μέγιστη τιμή της πριν την πλαστική διαρροή. Θα παρουσιάσουμε το διάγραμμα και για άλλους λόγους D/t .



Σχήμα 70 Διάγραμμα πίεσης με αξονική δύναμη για διάφορους λόγους D/t

Από το διάγραμμα του Σχήματος 69 βλέπουμε πως όσο αυξάνει η αξονική δύναμη, θεωρώντας τιμές μέχρι περίπου το 0.9 της δύναμης διαρροής, η επίδρασή της είναι μικρότερη όσο ο λόγος D/t αυξάνει. Επιπρόσθετα όσο πλησιάζουμε στην πλαστική περιοχή, δηλαδή στην εφαρμογή την μέγιστης δύναμης διαρροής, η αντοχή του σωλήνα επηρεάζεται όλο και περισσότερο από την αξονική δύναμη.

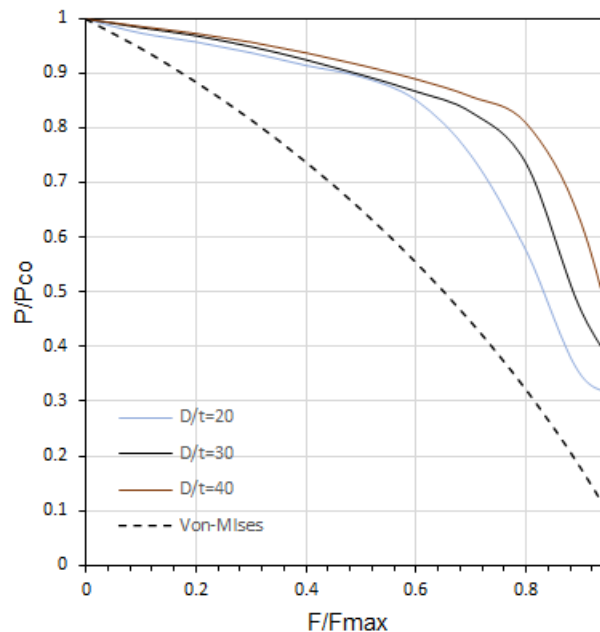
Στηριζόμενοι στη θεωρία του Von-Mises προσεγγίζουμε και θεωρητικά το ζήτημα της αξονικής δύναμης και μπορούμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματά μας από το διάγραμμα του Σχήματος 60. Ο τύπος του Von-Mises είναι ο εξής:

$$\sigma_x^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_x \sigma_\theta = \sigma_y^2$$

όπου σ_x η τάση που οφείλεται στην εφαρμογή της αξονικής δύναμης και σ_θ η τάση που έχω στο σωλήνα. Διαιρώντας με το όριο διαρροής σ_y θα καταλήξουμε στο εξής αποτέλεσμα:

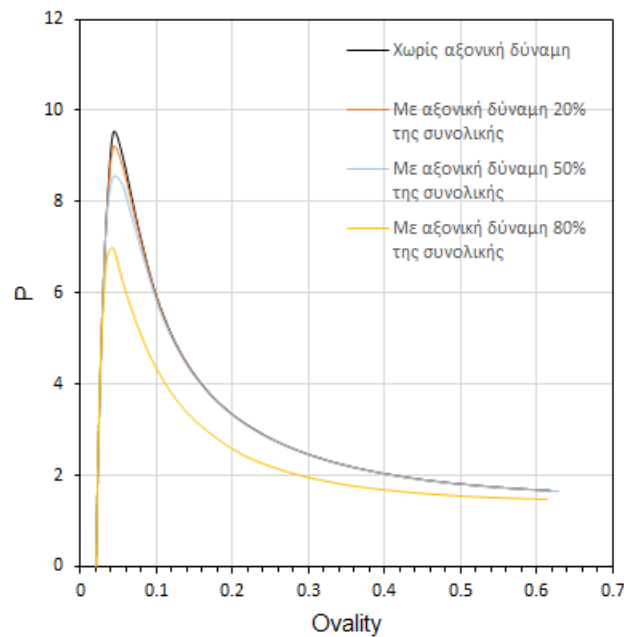
$$(T/T_y)^2 + (P/P_c)^2 - (T/T_y)(P/P_c) = 1$$

Θεωρούμε πως το P_c είναι ανάλογο του ορίου διαρροής σ_y . Επιπλέον, θεωρούμε ότι η τάση σ_θ με βάση τον Von-Mises μειώνεται λόγω της παρουσίας της αξονικής δύναμης. Το (-) που έχει ο τύπος το αντικαθιστούμε με (+) καθώς μόνο τότε έχουμε ότι όσο ο λόγος (T/T_y) αυξάνεται ο λόγος (P/P_c) μειώνεται. Παρατηρούμε πως πρόκειται για την απλή επίλυση μιας δευτεροβάθμιας εξίσωσης. Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 71 συγκρινόμενα με αυτά του Σχήματος 70 παρατηρούμε ότι ο Von-Mises είναι αρκετά συντηρητικός.



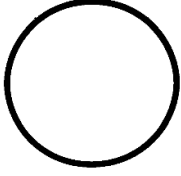
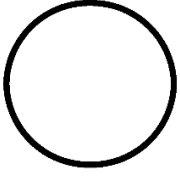
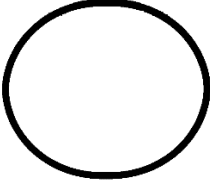
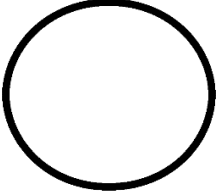
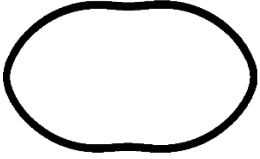
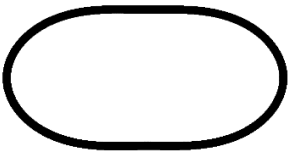
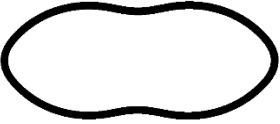





Σχήμα 71 Ανάλυση Von-Mises

Χρήσιμο είναι να συγκρίνουμε και τα διαγράμματα της πίεσης με την οβαλότητα του σωλήνα για διαφορετικές τιμές της αξονικής δύναμης.



Σχήμα 72 Διάγραμμα πίεσης-οβαλότητας για διάφορες τιμές της αξονικής δύναμης με λόγο $D/t=30$

Τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουμε από το διάγραμμα του Σχήματος 72 είναι πως όσο αυξάνεται η τιμή της αξονικής δύναμης σε σχέση με τη δύναμη διαρροής η τιμή της μέγιστης πίεσης κατάρρευσης μειώνεται όπως άλλωστε έχουμε δείξει και στο διάγραμμα του Σχήματος 69.

Χωρίς αξονική δύναμη	Με αξονική δύναμη στο 0.8 της συνολικής δύναμης διαρροής
	
	
	
	
	
	

Πίνακας 4 Διαδοχικά στάδια κατάρρευσης με την επιβολή και χωρίς την επιβολή αξονικής δύναμης για λόγο $D/t=30$

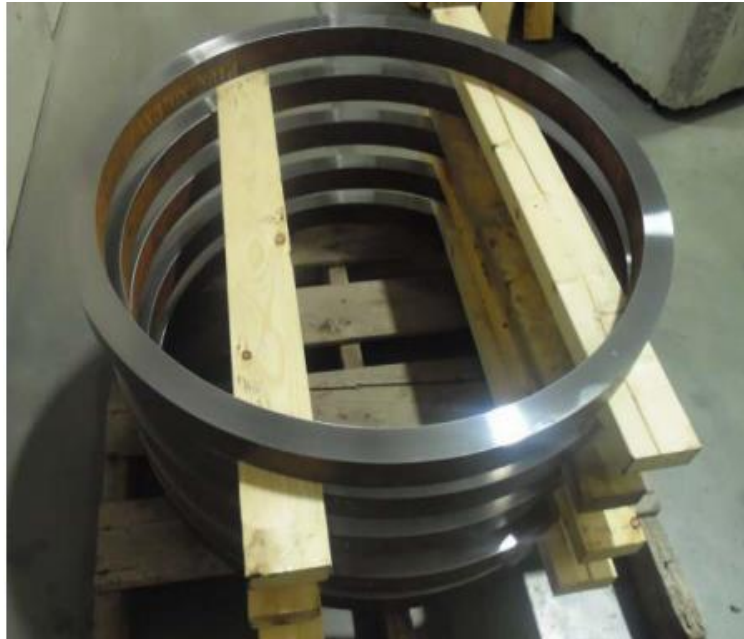
4. Ring pipe collapse και παρουσίαση συσκευής μελέτης

Όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως ο κυρίαρχος τρόπος για την κατάρρευση των αγωγών σε μεγάλα βάθη είναι ο λυγισμός λόγω των μεγάλων εξωτερικών υδροστατικών πιέσεων που ασκούνται στα βάθη αυτά. Για να μπορέσουμε να πιστοποιήσουμε τον κατάλληλο συνδυασμό διαμέτρου, πάχους τοιχώματος και υλικού, σε ένα μεγάλο project υποθαλάσσιων αγωγών πρέπει να γίνουν δοκιμές σε ένα μεγάλο εύρος αγωγών. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό είναι πολύ δύσκολο αν όχι αδύνατο να μελετήσεις πειραματικά έναν ολόκληρο αγωγό. Στην παρούσα διπλωματική ασχοληθήκαμε με το ring pipe collapse, για το οποίο θα συζητήσουμε εκτενώς στη συνέχεια, το οποίο αποτελεί έναν τρόπο μελέτης των αγωγών.

4.1. Ring pipe collapse

Πρόκειται για μία μέθοδο η οποία μας βοηθάει να εκτιμήσουμε κάτω από ποια τιμή της πίεσης θα καταρρεύσει ο αγωγός που εξετάζουμε. Σε αυτή τη μέθοδο κόβουμε έναν δακτύλιο από το τέλος του αγωγού, γιατί είναι πιο εύκολη η πρόσβαση στο σημείο αυτό, με μήκος που δεν ξεπερνάει τα 50 mm. Τοποθετούμε τον δακτύλιο αυτό σε μία συσκευή και εφαρμόζουμε εξωτερική πίεση μέχρι να παρατηρήσουμε το λυγισμό του, οπότε και διακόπτουμε τη διαδικασία.

Θα παρουσιάσουμε συνοπτικά πως λειτουργεί η συσκευή αυτή. Αποτελείται από δύο μέρη όπου ανάμεσα σε αυτά τοποθετείται ο δακτύλιος που θέλουμε να μελετήσουμε και συγκρατούνται με κοχλίες. Η πίεση εφαρμόζεται περιμετρικά του αγωγού. Δίνουμε όλο και περισσότερη πίεση μέχρι να παρατηρήσουμε το λυγισμό. Στόχος μας λοιπόν είναι να παρουσιάσουμε το σχεδιασμό της συγκεκριμένης συσκευής αλλά και των εξαρτημάτων που αποτελούν αυτή.



Εικόνα 1 Δακτύλιοι έτοιμοι για την τοποθέτησή τους στη συσκευή (Πηγή: Selker IntecSea ISOPE)

4.2. Περιγραφή συσκευής

Η εν λόγω συσκευή αποτελείται από τα εξής εξαρτήματα, η αναλυτική περιγραφή των οποίων θα γίνει στη συνέχεια :

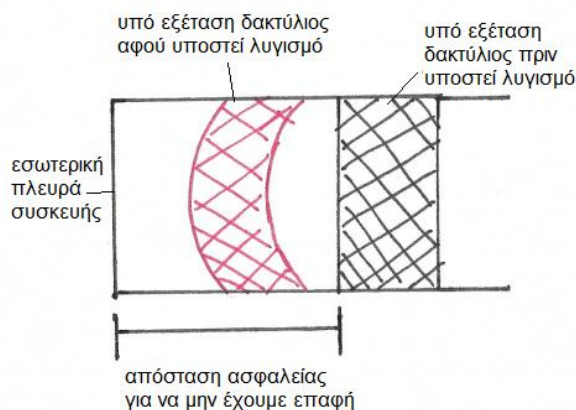
- δύο δακτυλίους
- κοχλίες
- στεγανωτικά υλικά (O-rings)
- εισόδους για την υδροστατική πίεση
- μετρητικά όργανα

Στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι οι αναλύσεις πάνω στις οποίες στηριχθήκαμε και βασιστήκαμε για να παρουσιάσουμε το σχεδιασμό της συσκευής έγιναν για σωλήνες με εξωτερική διάμετρο 813 mm και πάχους τοιχώματος 30 mm. Αυτοί άλλωστε είναι και από τους μεγαλύτερους και παχύτερους στη συγκεκριμένη βιομηχανία αγωγών.

Οι δύο δακτύλιοι αποτελούν και τα δύο βασικά μέρη της συγκεκριμένης συσκευής. Έχουν εξωτερική διάμετρο 870 mm και μήκος 15 cm ο κάθε ένας. Επομένως, η συσκευή μας έχει συνολικό πάχος 30 cm. Το υλικό που επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε είναι ανοξείδωτος χάλυβας. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγουμε σε σημαντικό βαθμό το πρόβλημα της διάβρωσης του μετάλλου λόγω της συχνής επαφής του με το νερό που θα χρησιμοποιούμε για την επιβολή της υδροστατικής πίεσης και ουσιαστικά την προσομοίωση με τις

συνθήκες του περιβάλλοντος όπου τοποθετούνται οι συγκεκριμένοι αγωγοί που εξετάζουμε.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που πρέπει να ληφθεί υπόψιν και αντιμετωπίσαμε κατά το σχεδιασμό της συσκευής είναι τι αποστάσεις θα έχουμε στα εσωτερικά τοιχώματα της συσκευής με τον δακτύλιο που βρίσκεται υπό εξέταση. Μας ενδιαφέρει για να μην υπάρξει επαφή του δακτυλίου καθώς λυγίζει με τη συσκευή, τουλάχιστον όσον αφορά την πλευρά όπου αυξάνεται η διάμετρος.



Σχήμα 73 Σχέδιο της συσκευής πριν και μετά το λυγισμό του δακτυλίου

Με βάση τις αναλύσεις που εκτελέσαμε η απόσταση που θα έχουμε μεταξύ του υπό εξέταση δακτυλίου και της συσκευής για να μην έχουμε επαφή καθώς λυγίζει είναι της τάξης του 2% της εξωτερικής διαμέτρου του δακτυλίου. Με τη βοήθεια του προγράμματος ABAQUS κάνοντας δοκιμές σε δακτυλίους με τη γεωμετρία που έχουμε παρουσιάσει προηγουμένως, δηλαδή εξωτερική διάμετρο 813 mm και πάχους τοιχώματος 30 mm και με μία αρχική οβαλότητα 0.5%, παρατηρήσαμε ότι η εξωτερική διάμετρος αυξάνει κατά 1.5% από την στιγμή που ασκείται η μέγιστη πίεση και έχουμε λυγισμό μέχρι μια κοντινή τιμή της πίεσης όπου και θα σταματήσει η διαδικασία. Για μεγαλύτερη ασφάλεια η απόσταση μεταξύ της συσκευής και του υπό εξέταση δακτυλίου είναι 2% της εξωτερικής διαμέτρου του δακτυλίου.

Οι κοχλίες χρησιμοποιούνται για να ενώσουν και να συγκρατήσουν ενωμένους τους δύο εξωτερικούς δακτυλίους κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής. Για υλικό επιλέγουμε και εδώ ανοξείδωτο χάλυβα ώστε να αποφύγουμε πιθανά προβλήματα διάβρωσης. Η διάμετρος του κάθε κοχλία είναι 51 mm. Χρησιμοποιούμε διαμπερή κοχλίες, δηλαδή έχουν μήκος 30mm ώστε να είναι αρκετά στιβαρή η συγκράτηση. Σύμφωνα με τις αναλύσεις ο αριθμός των κοχλιών που θα χρειαστούν για να τοποθετηθούν σε όλη τη διάμετρο της συσκευής είναι 12.

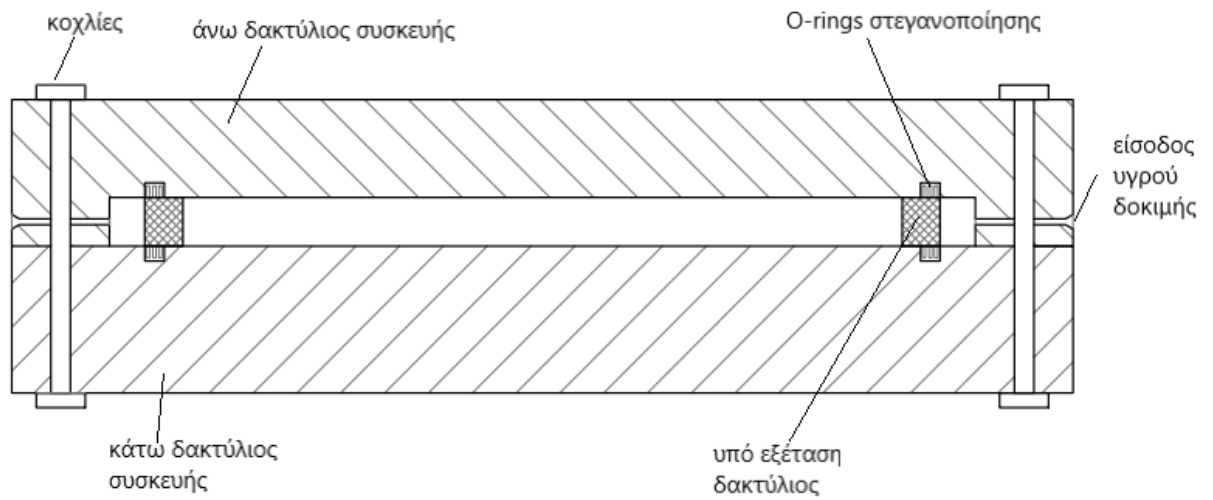
Ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα που κληθήκαμε να αντιμετωπίσουμε ήταν με ποιον τρόπο θα γίνει η στεγανοποίηση του υλικού κατά την έγχυση του νερού. Αυτό μας ενδιαφέρει καθώς αν τυχόν εισέλθει νερό στο εσωτερικό δεν έχει κανένα νόημα να συνεχίσουμε την πειραματική διαδικασία. Για να μπορέσουμε να πετύχουμε τη στεγανοποίηση δημιουργήσαμε κάποιες εγκοπές πάνω και κάτω από τον υπό εξέταση δακτύλιο στις οποίες τοποθετούνται τα O-rings, δηλαδή οι δακτύλιοι στεγανοποίησης. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται κάποια υλικά τα οποία προτείνουμε και χρησιμοποιούνται για στεγανοποίηση σε εφαρμογές στις οποίες έχουμε επιβολή μεγάλων τιμών πιέσεων.

Υλικό
Buna(Nitrile)
HNBR
EPDM
FKM
FFKM

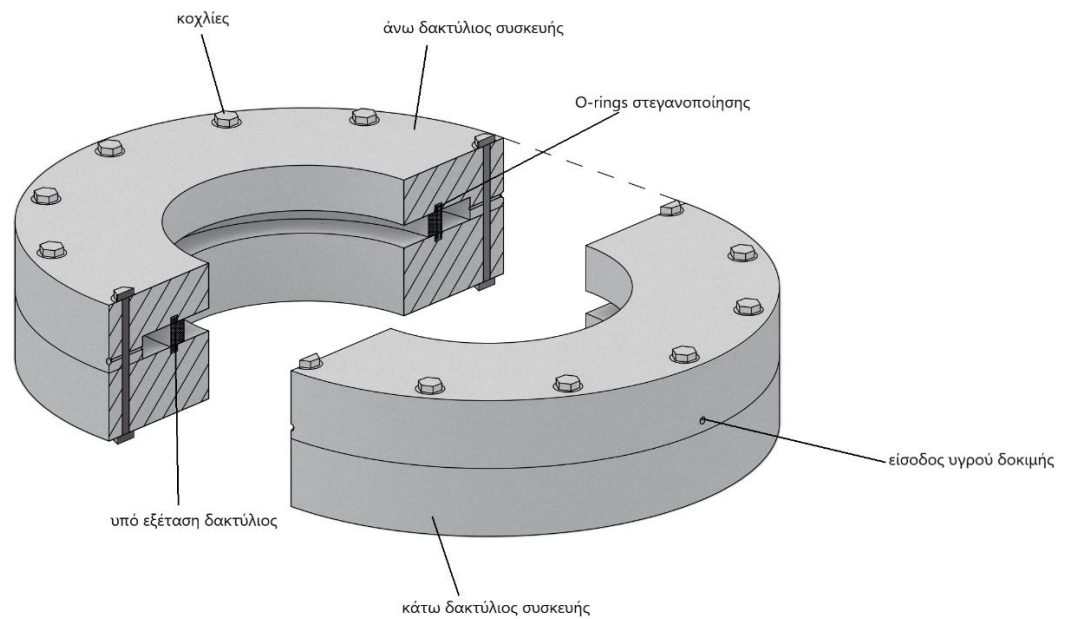
Πίνακας 5 Προτάσεις υλικών για την επίτευξη της στεγανοποίησης

Σε κάθε εγκοπή χρειαζόμαστε 2 ή 3 δακτύλιους στεγανοποίησης. Επιπλέον, ένα πρόβλημα είναι η τριβή που θα αναπτυχθεί μεταξύ των δακτυλίων αυτών και του υπό εξέταση δακτυλίου κατά τη μετατόπισή του όταν επέλθει ο λυγισμός. Οι μετατοπίσεις που αναπτύσσονται είναι πολύ μικρές και δεν ξεπαιρνούν σε μέγεθος τα 4 mm. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως μπορούμε να αγνοήσουμε την τριβή μεταξύ των, διότι η τιμή που θα πάρει η τριβή θα είναι εξίσου πολύ μικρή.

Τέλος, δημιουργούμε εγκοπές πάνω στην επιφάνεια της συσκευής ώστε να μπορέσουμε να επιβάλουμε την υδροστατική πίεση. Η υδροστατική πίεση επιβάλλεται με την έγχυση νερού.



Σχήμα 74 Η τομή της συσκευής που αναλύσαμε παραπάνω



Σχήμα 75 3D σχέδιο της συσκευής που αναλύσαμε παραπάνω

Για τη μέτρηση ακτινικών μετατοπίσεων, η μελέτη των οποίων είναι σημαντική, μπορούν να τοποθετηθούν στην εσωτερική πλευρά της συσκευής

γραμμικά ποτενσιόμετρα. Η εγκατάσταση αυτών μπορεί να γίνει σε τέσσερις περιφερειακές τοποθεσίες. Αυτό που μπορεί να επιτευχθεί με την μέτρηση των μετατοπίσεων είναι η κατασκευή διαγραμμάτων πίεσης-οβαλότητας. Οι συγκεκριμένες καμπύλες βοηθούν στη συγκριτική αξιολόγηση ολόκληρου του αγωγού που ένας δακτύλιος αυτού έχει υποστεί την ανωτέρω διαδικασία.



Εικόνα 2 Η μορφή της συσκευής(Πηγή: Selker IntecSea ISOPE)

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς υποθαλάσσιων αγωγών υπό την επίδραση εξωτερικής υδροστατικής πίεσης. Εστίασαμε σε διάφορες ατέλειες που μπορούν να υπάρξουν στους αγωγούς αυτούς και εξετάσαμε την επίδραση που έχουν στην αντοχή του αγωγού στην εξωτερική πίεση. Επιπλέον, προτείναμε το σχεδιασμό μιας συσκευής που μας βοηθάει στη πειραματική μελέτη των αγωγών αυτών.

Αρχικά, για να μπορέσει ο αναγνώστης να αποκτήσει μια επαφή με το αντικείμενο έγινε μια συνοπτική παρουσίαση της θεωρίας ελαστικού λυγισμού δακτυλίων υπό εξωτερική πίεση σε συνθήκες επίεσης παραμόρφωσης. Δείχνουμε ουσιαστικά πως προσδιορίζουμε θεωρητικά την κρίσιμη τιμή της πίεσης λυγισμού P_{cr} .

Στη συνέχεια ασχοληθήκαμε με την προσομοίωση και τη μελέτη της επίδρασης των αρχικών ατελειών στην αντοχή του δακτυλίου. Η ανάλυση βασίστηκε στη θεώρηση ενός δι-διάστατου ελαστικού δακτυλίου από χάλυβα X65. Εκμεταλλευτήκαμε τη διπλή συμμετρία του προβλήματος και αναλύσαμε μόνο το ένα τεταρτημόριό του.

Η πρώτη ατέλεια με την οποία ασχολήθηκαμε ήταν αυτή της αρχικής οβαλότητας. Αυτή αποτελεί ίσως την πιο σημαντική καθώς δεν υπάρχει αγωγός που να μην έχει κάποια αρχική ατέλεια μορφής οβαλότητας. Είδαμε λοιπόν πως όσο αυξάνεται η αρχική οβαλότητα τόσο περισσότερο μειώνεται η αντοχή του αγωγού σε εξωτερική πίεση και καθίσταται πιο εύκολο να πραγματοποιηθεί η κατάρρευση αυτού.

Στη συνέχεια, μελετήσαμε την επίδραση της ανισοτροπίας του ορίου διαρροής του υλικού στην περιμετρική διεύθυνση σε σύγκριση με την αξονική διεύθυνση. Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήξαμε ήταν πως μπορεί να προκληθεί μεταβολή κατά 10% περίπου στην οριακή πίεση. Αυτό αλλάζει και εξαρτάται ανάλογα με την τιμή του λόγου ανισοτροπίας.

Μια επιπλέον σημαντική ατέλεια που μελετήσαμε ήταν η επίδραση των παραμενουσών τάσεων. Αυτή η επίδραση όπως προέκυψε ήταν εμφανώς μικρότερη από τις προηγούμενες ατέλειες αλλά όχι αμελητέα.

Η τελευταία ατέλεια που μελετήθηκε ήταν η επίδραση στον αγωγό μιας αξονικής δύναμης. Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήξαμε ήταν πως όσο πλησιάζει η αξονική δύναμη να ταυτιστεί με την τιμή της δύναμης διαρροής η αντοχή του αγωγού επηρεάζεται όλο και περισσότερο από αυτήν. Επίσης, παρατηρήθηκε πως σε μεγάλους λόγους D/t όσο αυξάνει η τιμή της αξονικής δύναμης η επίδρασή της στην αντοχή του αγωγού είναι μικρότερη.

Τέλος, ασχολούμενοι με αγωγούς εξωτερικής διαμέτρου 813 mm προτείναμε έναν σχεδιασμό για τη συσκευή μελέτης των αγωγών καθώς και των επιμέρους τμημάτων που την αποτελούν.

Παράρτημα

- 1) Κάτωθι παρουσιάζεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε στο excel για τη δημιουργία των διαγραμμάτων πίεσης-εμβαδού .

```
Sub Calculations()
```

```
Dim temparea As Long
```

```
Dim sumarea As Long
```

```
numofcolumns = Sheets("Run").Cells(5, 3)
```

```
pairs = Sheets("Run").Cells(6, 3)
```

```
numofrows = Sheets("Run").Cells(7, 3)
```

```
For m = 4 To numofrows
```

```
sumarea = 0
```

```
temparea = 0
```

```
i = numofcolumns
```

```
For j = 1 To pairs
```

```
    If j < pairs Then
```

```
        x1 = Sheets("Data").Cells(m, i - 1)
```

```
        y1 = Sheets("Data").Cells(m, i)
```

```
        x2 = Sheets("Data").Cells(m, i - 4)
```

```
        y2 = Sheets("Data").Cells(m, i - 3)
```

```
    Else
```

```
        x1 = Sheets("Data").Cells(m, i - 1)
```

```
        y1 = Sheets("Data").Cells(m, i)
```

```
        x2 = 0
```

```
        y2 = 0
```

```
    End If
```

```
temparea = ((y1 + y2) * (x2 - x1)) / 2
```

```
sumarea = sumarea + temparea
```

```
i = i - 3
```

Next j

Sheets("Data").Cells(m, numofcolumns + 2) = sumarea

Next m

Sheets("Data").Cells(3, numofcolumns + 2) = "AreaSize"

End Sub

Φυσικά οι στήλες που φαίνονται εξαρτώνται από τον τρόπο τοποθέτησης των δεδομένων στο φύλλο εργασίας του excel. Στην εικόνα παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα του excel ώστε να γίνει κατανοητό στον αναγνώστη πιο εύκολα ο κώδικας.

Noble 1			Noble 10		Noble 19		Noble 28		Noble 37				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
x	y		x	y		x	y		x	y		x	y
271.213	4.169E-37		270.907	8.18299		270.465	16.3805		269.706	24.5792		268.709	32.7319
271.239	-3.671E-35		270.932	8.18243		270.49	16.3794		269.731	24.5776		268.734	32.7297
271.264	2.247E-37		270.958	8.18188		270.515	16.3783		269.756	24.5759		268.759	32.7275
271.303	-5.477E-35		270.996	8.18105		270.554	16.3767		269.794	24.5734		268.796	32.7241
271.362	7.175E-37		271.055	8.17982		270.612	16.3743		269.852	24.5698		268.854	32.7192
271.451	1.070E-36		271.144	8.17801		270.701	16.3707		269.94	24.5644		268.94	32.712
271.587	2.276E-36		271.28	8.17535		270.836	16.3655		270.074	24.5564		269.073	32.7013
271.797	6.470E-39		271.489	8.17133		271.044	16.3578		270.28	24.5447		269.277	32.6858
272.122	-1.020E-35		271.814	8.1655		271.368	16.3462		270.602	24.5271		269.595	32.6624
272.637	1.326E-37		272.332	8.15693		271.885	16.3258		271.113	24.4964		270.101	32.6258
273.519	1.720E-38		273.234	8.13313		272.782	16.2795		271.995	24.441		270.969	32.5566
274.432	1.960E-37		274.149	8.11116		273.691	16.2406		272.896	24.3847		271.859	32.4833
275.341	-4.531E-38		275.057	8.09289		274.593	16.2053		273.789	24.3324		272.741	32.4156
276.686	-1.122E-37		276.404	8.06942		275.932	16.1599		275.115	24.2615		274.048	32.3223
278.693	7.190E-37		278.409	8.0295		277.925	16.0796		277.091	24.1432		275.994	32.1723
281.727	2.435E-37		281.439	7.96177		280.933	15.9467		280.067	23.946		278.924	31.9203
286.344	-1.708E-37		286.043	7.86759		285.491	15.7617		284.564	23.6676		283.349	31.5547
290.791	-6.740E-38		290.484	7.80709		289.903	15.6267		288.927	23.4453		287.638	31.2471

Εικόνα 3 excel για την κατανόηση του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για το εμβαδόν

- 2) Όσον αφορά τις παραμένουσες παρακάτω παρουσιάζω τι γράφουμε στο input αρχείο. Φτιάχνουμε λοιπόν σεντ αρχείων που δίνουμε τάσεις όπως φαίνεται παρακάτω αμέσως μετά το κομμάτι των συνοριακών συνθηκών:

```
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS  
ονομασία set, s1=, s2=, s3=, s12=
```

όπου στις θέσεις των s1, s2, s3, s12 βάζουμε κατευθείαν την τιμή της τάσης που θέλουμε

Βιβλιογραφία

Kyriakides, S και Corona,E. 2007. Mechanics of offshore pipelines vol. 1. Oxford : Elsevier, 2007

Ruud Selker, Pedro M.C. Ramos and Ping Liu INTECSEA Delft, The Netherlands

Καραμάνος, Σπύρος Α. 2003. Σημειώσεις Μαθήματος Μη- Γραμμική Ανάλυση Κατασκευών Ευστάθεια . Βόλος : Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Alastair Walker, Peter Roberts and Jayden Chee. DEVELOPMENTS IN TESTING AND MANUFACTURE OF THICK-WALLED PIPE

Parker Hannifin. O-ring Handbook, O-ring division Europe

C. Langner, «Design of deepwater pipelines,» TNO-IWECO 30th Anniversary Symposium on Underwater Technology, Hague, 1984.

J. Lehmköster και . T. Schröder, «World Ocean Review,»

F101, DNV OS. 2012. Submarine pipeline systems.

Rocket Seals est 1956, HIGH PRESSURE O-RINGS

Marko Rubber & Plastics, High Pressure O-Ring Material Selection Guide

BERNARD BUDIANSKY, Theory of Buckling and Post-Buckling Behavior of Elastic Structures