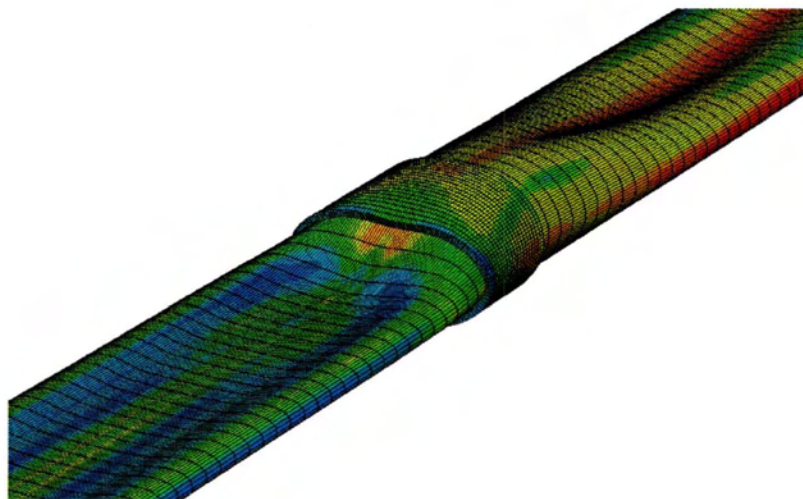


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Αντοχή και Μηχανική Συμπεριφορά Υποθαλάσσιων Αγωγών σε  
Εξωτερική Πίεση

Επιμέλεια: Παναγιώτης Αμαργιανός



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

**ΒΟΛΟΣ 2014**



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

Αριθ. Εισ.: 13303/1  
Ημερ. Εισ.: 04-11-2014  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ  
2014  
ΑΜΑ

© 2014 Παναγιώτης Αμαργιανός

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

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Σπύρος Καραμάνος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

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

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



## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Σπύρο Καραμάνο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο και Αλέξη Κερμανίδη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Ευχαριστώ τους μεταπτυχιακούς φοιτητές που με βοήθησαν στην εκμάθηση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Ευχαριστώ, ιδιαίτερα τους φίλους μου για την ηθική υποστήριξη τους, για τις καλές στιγμές σε όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου Αιμίλιο και Γεωργία για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια καθώς και στον αδερφό μου Αλέξανδρο για την υποστήριξη του.

Παναγιώτης Αμαργιανός.

## Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή .....	7
1.1Πρόλογος .....	7
1.2 Αντοχή σωλήνα σε εξωτερική πίεση .....	11
Ελαστικός λυγισμός δακτυλίων .....	11
Μετα-λυγισμική ανελαστική συμπεριφορά – αρχική ατέλεια.....	15
2. Αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης.....	20
2.1 Περιγραφή των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.....	20
Μοντέλο προσομοίωσης δι- διάστατων δακτυλίων .....	20
Τρι-διάστατο μοντέλο για την προσομοίωση της διαδιδόμενης ύβωσης .....	25
2.2 Αρχικά αποτελέσματα για δακτύλιο με εξωτερική πίεση .....	29
2.3 Αρχικά αποτελέσματα για διαδιδόμενη ύβωση .....	35
3.Επιρροή Βασικών Παραμέτρων στην Αντοχή σε Εξωτερική Πίεση .....	49
3.1 Επίδραση της αρχικής ατέλειας μορφής οβάλ .....	50
3.2 Μεταβολή Πάχους Αγωγού κατά την περιφέρεια .....	56
3.3 Η Επίδραση των Παραμενουσών Τάσεων .....	61
3.4 Επίδραση της Ανισοτροπίας του Υλικού.....	66
3.5 Η επίδραση της καμπύλης σ-ε του υλικού .....	71
4. Διαδιδόμενη Ύβωση και η Αναστολή της.....	74
Αριθμητικός Υπολογισμός του $\Delta V$ .....	74
Μελέτη Αναστολέα Ύβωσης τύπου integral.....	78
5. Συμπεράσματα.....	92
Παράρτημα .....	95
Βιβλιογραφία.....	100



## **1.Εισαγωγή**

### **1.1Πρόλογος**

Οι σημερινές ανάγκες της παραγωγής, ενέργειας αλλά και προϊόντων, στηρίζονται ακόμα σε μεγάλο μέρος τους στους υδρογονάνθρακες. Υγρά καύσιμα και το φυσικό αέριο που χρησιμοποιούμε για την παραγωγή ενέργειας, είναι παραδείγματα στην καθημερινή μας ζωή. Ως γνωστόν, οι υγροί υδρογονάνθρακες και το φυσικό αέριο είναι αποθηκευμένοι στο φλοιό της γης είτε ως πετρώματα είτε ως κοιτάσματα. Μεγάλο μέρος εκ των κοιτασμάτων βρίσκεται όχι σε χερσαία πεδία, αλλά σε υπεράκτια. Αυτό το γεγονός καθώς και ότι οι χώρες που γίνονται οι εξορύξεις μπορεί να απέχουν αρκετά από αυτές που υπάρχει η ζήτηση, καθιστούν τους αγωγούς μεταφοράς υδρογονανθράκων αναγκαίους για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων και με συνεχή παροχή. Σε πολλές περιπτώσεις ένα μέρος αυτών των αγωγών είναι υποθαλάσσιο. Ήδη υπάρχει πολύ εκτεταμένο δίκτυο υποθαλάσσιων αγωγών σε όλο τον κόσμο ενώ κατασκευάζονται ή πρόκειται να κατασκευαστούν αρκετά εκατοντάδες χιλιόμετρα ακόμα.

Η οικονομική σημασία των αγωγών αυτών είναι πολύ μεγάλη. Έτσι η αξιοπιστία τους και η δομική τους ακεραιότητα είναι αναγκαία, δεδομένου ότι η εγκατάσταση και λειτουργία αυτών των «δρόμων» μεταφοράς ενέργειας και πρώτης ύλης, είναι στρατηγικής σημασίας και μεγάλης κλίμακας έργα αρκετών εκατομμυρίων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ασχολούμαστε με την δομική ακεραιότητα των υποθαλάσσιων αγωγών. Σε κατάσταση λειτουργίας αυτοί οι αγωγοί υποβάλλονται σε φόρτιση εξωτερικής πίεσης, έτσι επικεντρωνόμαστε στην πίεση κατάρρευσης του αγωγού και στο φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης. Ασχολούμαστε επίσης και με τους αναστολείς του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης. Μελετούμε επίσης και την επίδραση που μπορεί να έχουν οι κατασκευαστικές και άλλες ατέλειες στην αντοχή του αγωγού. Ατέλειες μπορεί να είναι η απόκλιση από το τέλειο κυκλικό σχήμα που περιμένουμε να έχει η διατομή του λόγω κατασκευής ή λόγω κάποιου χτυπήματος κατά την μεταφορά ή τοποθέτηση. Ατέλεια μπορεί να είναι η ανισοτροπία που μπορεί να παρουσιάζει το υλικό του αγωγού, επίσης το

πάχος του αγωγού μπορεί να μεταβάλλεται κατά την περιφέρεια και αυτό είναι ένα είδος ατέλειας. Το κύριο εργαλείο ανάλυσης που θα χρησιμοποιήσουμε είναι η προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία.

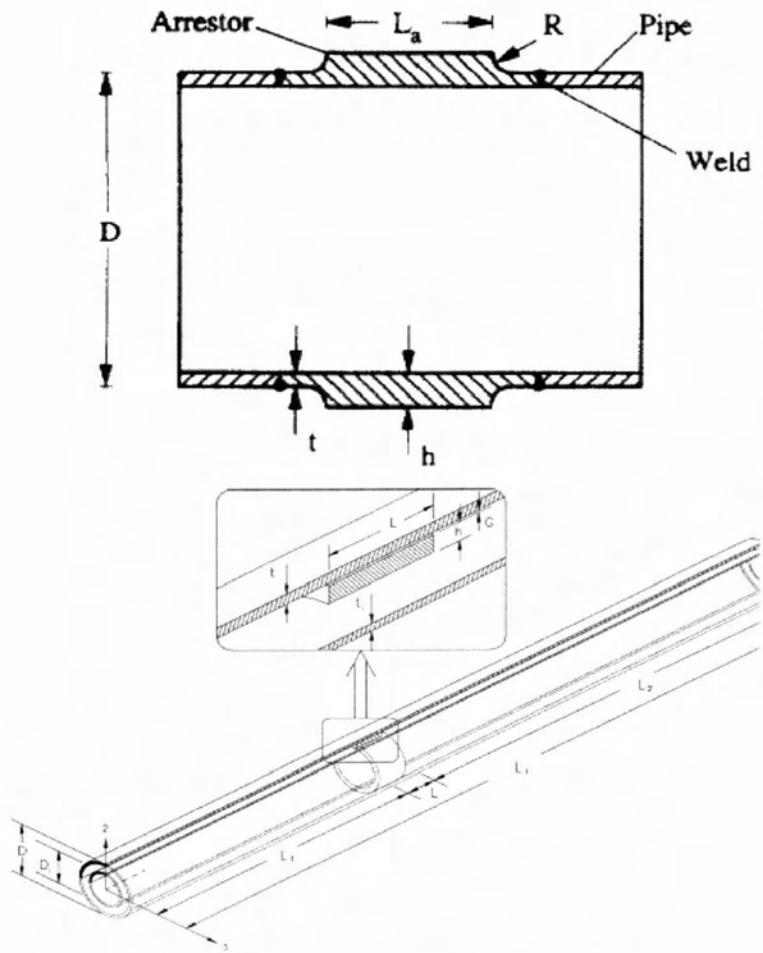
Ένας υποθαλάσσιος αγωγός υποβάλλεται σε εξωτερική πίεση λόγω της υδροστατικής πίεσης του νερού, ιδιαίτερα σε μεγάλα βάθη (π.χ.1000 μ.) αυτή η πίεση είναι αρκετά μεγάλη ώστε να προκαλέσει κατάρρευση του αγωγού. Έτσι, ο σχεδιασμός του αγωγού πρέπει να λαμβάνει υπόψη την πίεση αυτή, δηλαδή πρέπει να επιλεγεί το πάχος του αγωγού και το υλικό του ώστε να είμαστε σίγουροι για τη δομική του ακεραιότητα.

Η σχεδίαση ενός αγωγού που θα ποντιστεί σε μεγάλο βάθος είναι αρκετά σύνθετη. Θα πρέπει να ληφθούν υπόψη ακόμα αρκετοί παράγοντες ώστε να έχουμε μια αξιόπιστη κατασκευή, να υπολογιστούν οι ανοχές της κατασκευής στις ατέλειες που μπορεί να έχει το υλικό ή η γεωμετρία της κατασκευής. Επίσης ο αγωγός να αντέχει τα δομικά φορτία και την πίεση στην διαδικασία πόντισης και εγκατάστασής του οι οποίες με την σειρά τους μπορεί να προκαλέσουν κατασκευαστικά ελαττώματα, που υποβαθμίζουν την αντοχή του αγωγού.

Η βασική ιδιαιτερότητα των υποθαλάσσιων αγωγών σε μεγάλο βάθος είναι ότι η αστοχία τους, δηλαδή η κατάρρευση μιας διατομής του αγωγού, δεν είναι τοπική αλλά αν η υδροστατική πίεση είναι μεγαλύτερη από μια συγκεκριμένη τιμή, η αστοχία διαδίδεται κατά το μήκος του αγωγού με μεγάλη ταχύτητα, αυτό είναι το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης. Η διαδιδόμενη ύβωση μπορεί να καταστρέψει πολύ μεγάλα τμήματα του αγωγού με ότι αυτό συνεπάγεται για το κόστος επιδιόρθωσης και το χρόνο επισκευής. Όπως είπαμε το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται όταν η τιμή της εξωτερικής πίεσης αποκτήσει μια συγκεκριμένη τιμή η οποία καλείτε Πίεση διάδοσης της ύβωσης. Αυτή η χαρακτηριστική πίεση είναι περίπου το 15% της πίεσης κατάρρευσης του αγωγού, επομένως αν η αστοχία λάβει χώρα σε μεγάλο βάθος η διάδοση της πίεσης θα σταματήσει μόνον αν η πίεση του νερού πέσει σημαντικά, δηλαδή αν το βάθος στο οποίο είναι ποντισμένος ο αγωγός δεν μειωθεί αρκετά κάτι που μπορεί να συνεπάγεται πολλά χιλιόμετρα μήκους. Όμως η σχεδίαση του αγωγού με βάση την αντοχή στην διάδοση της

ύβωσης σημαίνει κατακόρυφη αύξηση του κόστους, αφού θα πρέπει να αυξήσουμε πολύ το πάχος του και να χρησιμοποιήσουμε υλικά με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες που κατά κανόνα είναι πιο ακριβά. Έτσι, προτιμούμε να σχεδιάζουμε τους αγωγούς με βάση την πίεση κατάρρευσης και να χρησιμοποιούμε κατάλληλες νευρώσεις για την αναστολή του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης και τον περιορισμό του σε σχετικά μικρό μήκος του αγωγού, τους ονομαζόμενους «αναστολείς ύβωσης» (arrestors).

Στο σχήμα 1 βλέπουμε διάφορα είδη αναστολέων που έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές, με τη σειρά: integral arrestor, slip-on arrestor, spiral arrestor.



U.S. Patent Dec. 21, 1982 Sheet 2 of 4 4,364,692

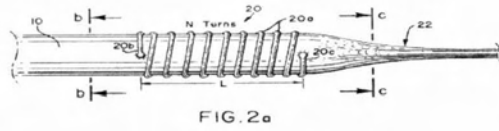


FIG. 2a

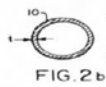


FIG. 2b



FIG. 2c

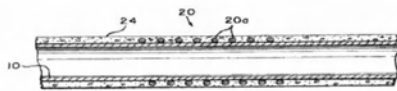


FIG. 3

Σχήμα 1. Διάφοροι τύποι αναστολέων

## 1.2 Αντοχή σωλήνα σε εξωτερική πίεση

Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, η αντοχή σε φόρτιση εξωτερικής πίεσης είναι από της πιο βασικές παραμέτρους στο σχεδιασμό υποθαλάσσιων αγωγών. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε στοιχεία από τη μηχανική και το σχεδιασμό των αγωγών σε αυτού του είδους την φόρτιση.

### Ελαστικός λυγισμός δακτυλίων

Οι λεπτότοιχοι δακτύλιοι αποτελούν μια απλουστευμένη θεώρηση ενός σωλήνα μεγάλου μήκους<sup>1</sup> υπό συνθήκες επίπεδης έντασης. Αρχικά θα ασχοληθούμε με τον λυγισμό ελαστικών δακτυλίων. Θεωρούμε λεπτότοιχο ελαστικό δακτύλιο διαμέτρου  $D$  και πάχους  $t$ , το πρόβλημά μας είναι δι- διάστατο, και το φορτίο είναι εξωτερική ομοιόμορφη πίεση μέτρου  $P$ . Η εξωτερική πίεση είναι πάντοτε κάθετη στην περιφέρεια του δακτυλίου και πάντα στο επίπεδο του δακτυλίου.

Από την θεωρία της ελαστικότητας λεπτότοιχων κυλίνδρων εύκολα μπορούμε να παρατηρήσουμε πως για να ισορροπεί ο δακτύλιος θα πρέπει να συρρικνώνεται ελαστικά και ομοιόμορφα με μετατόπιση σε κάθε σημείο της περιφέρειάς του ίση με:

$$w_0(\theta) = \frac{-P}{E t} R^2 \quad (1.2.1)$$

στην ακτινική διεύθυνση και

$$u_0 = 0 \quad (1.2.2)$$

στην εφαπτομενική διεύθυνση.

---

<sup>1</sup> Μπορούμε να υποθέσουμε ότι ένας σωλήνας αποτελείται από διατομές δακτυλίων στη σειρά. Ο αναγνώστης μπορεί να βρει πιο αναλυτικά τη θεωρία και για λεπτότοιχους δακτυλίους στη βιβλιογραφία που παρατίθεται.





**Σχήμα 1 Σχηματική αναπαράσταση των μετατοπίσεων**

Η τάση που θα εμφανιστεί σύμφωνα με τη θεωρία λεπτότοιχων κυλίνδρων είναι η :

$$\sigma_{\theta} = \frac{-P D}{2 t} \quad (1.2.3)$$

Το συγκεκριμένο πρόβλημα τίθεται ως ένα πρόβλημα λυγισμού. Αυτό σημαίνει ότι όταν η πίεση αυξηθεί πάνω από κάποια τιμή, η λύση μας θα ξεφύγει από αυτή την τετριμμένη γραμμική λύση που προβλέπει η κλασική μηχανική των υλικών, δηλαδή την ομοιόμορφη συμπίεση του δακτυλίου, και θα εμφανίσει μια διακλάδωση. Η γραμμική θεωρία της ελαστικής ευστάθειας, μας επιτρέπει να βρούμε τη διακλάδωση αυτή στο δρόμο ισορροπίας του δακτυλίου μας. Η τιμή της πίεσης όπου το σύστημα μεταβαίνει από τον πρωτεύοντα στον δευτερεύοντα δρόμο ισορροπίας του δακτυλίου μας ονομάζεται κρίσιμο φορτίο λυγισμού και δίνεται από τη σχέση:

$$P_{cr} = 2 E (t/D)^3 \quad (1.2.4)$$

Μετά το λυγισμό και τη μετάβαση στο δευτερεύοντα δρόμο ισορροπίας, ο δακτύλιος δεν παραμένει κυκλικός αλλά η μορφή που λαμβάνει είναι οβάλ (παρόμοιο με μια έλλειψη). Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε ότι από την εξίσωση για το κρίσιμο φορτίο, η τιμή της πίεσης λυγισμού του δακτυλίου εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και από το λόγο  $t/D$  στην τρίτη δύναμη. Αυτό σημαίνει ότι σωλήνες από το ίδιο υλικό και τον ίδιο λόγο  $t/D$  καταρρέουν κάτω από

την ίδια πίεση, αν και μπορεί να έχουν διαφορετικό πάχος  $t$  και διαφορετική διάμετρο  $D$  μεταξύ τους.

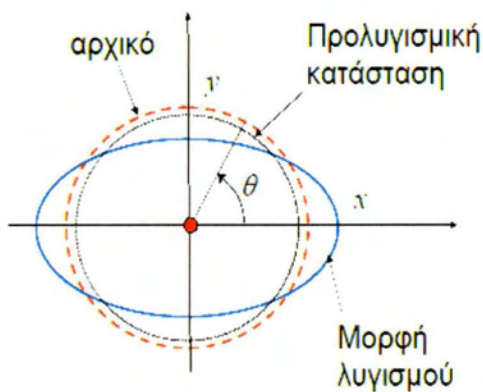
Αμέσως μετά το λυγισμό οι μετατοπίσεις κατά την ακτινική και εφαπτομενική κατεύθυνση του δακτυλίου δίνονται από τις σχέσεις (1.2.5) και (1.2.6) αντίστοιχα.

$$w_1 = A \cos 2\theta \quad (1.2.5)$$

$$u_1 = -\frac{A}{2} \sin 2\theta \quad (1.2.6)$$

όπου  $A$  είναι μια αυθαίρετη σταθερά.

Για να υπολογίσω τη συνολική μετατόπιση θα πρέπει να προσθέσω στην μεταλυγισμική λύση την προλυγισμική μετατόπιση, όπως δίνεται από τις αντίστοιχες εξισώσεις.



**Σχήμα 2 οβάλ μορφή του λυγισμού**

Η καμπτική ροπή που αναπτύσσεται στα τοιχώματα του δακτύλιου μετά το λυγισμό δίνεται σύμφωνα με τη μηχανική των υλικών από τη σχέση:

$$M = E I k \quad (1.2.7)$$

όπου  $I$  η ροπή αδράνειας του δακτυλίου και  $k$  η καμπυλότητα.

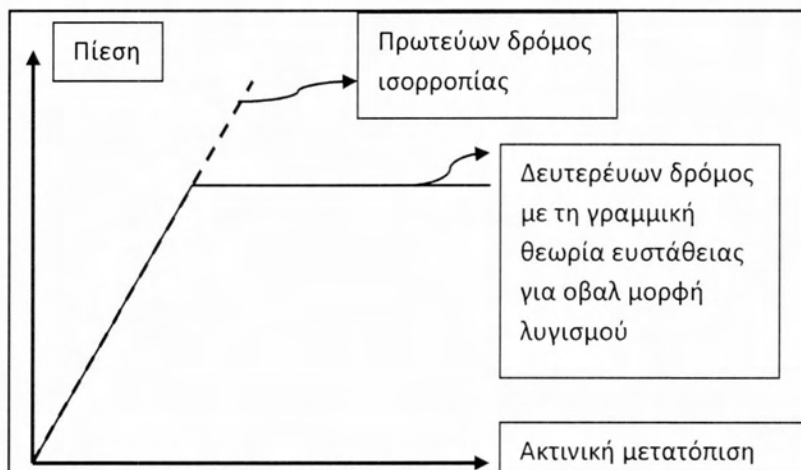
$$k = \frac{u' - w''}{R^2} \quad (1.2.8)$$

$$I = \frac{t^3}{12} \quad (1.2.9)$$

Επομένως, η τάση που θα αναπτύσσεται μετά το λυγισμό στον δακτύλιό μας θα είναι το άθροισμα της τάσης λόγω πίεσης και της τάσης λόγω της καμπτικής ροπής. Καταλήγουμε στη σχέση:

$$\sigma_{\theta} = -P \frac{D}{2t} \pm \frac{18}{R^2} \frac{A}{t^2} \cos 2\theta \quad (1.2.10)$$

Όπως είδαμε προηγουμένως ο πρωτεύων δρόμος ισορροπίας σχεδιασμένως σε ένα διάγραμμα πίεσης – ακτινικής μετατόπισης θα είναι μια ευθεία σύμφωνα με την σχέση (1.2.1). Ο δευτερεύων δρόμος ισορροπίας σύμφωνα με την γραμμική θεωρία της ευστάθειας θα τέμνει τον πρωτεύοντα στο σημείο της διακλάδωσης. Σημειώνεται ότι μετά την κατάρρευση του δακτυλίου χωρίς να έχουμε αύξηση φορτίου έχουμε αύξηση των μετατοπίσεων. Οπότε το διάγραμμα πίεσης-μετατόπισης θα έχει την εξής μορφή:



**Σχήμα 3 Ποιοτικό διάγραμμα πίεσης- ακτινικής μετατόπισης για ελαστικό σωλήνα**

Σε όλα τα ανωτέρω, θεωρήσαμε ότι ο δακτύλιος βρίσκεται σε κατάσταση επίπεδης έντασης, για να περιγράψουμε όμως την κατάρρευση διατομής σωλήνα μεγάλου μήκους πρέπει να κάνουμε την υπόθεση επίπεδης παραμόρφωσης. Στην κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης ο νόμος του Hooke για το ελαστικό υλικό στην περιμετρική διεύθυνση θα γίνει :

$$\sigma_{\theta} = \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_{\theta} ,$$

διότι  $\varepsilon_x = 0$  στην αξονική διεύθυνση. Αποδεικνύεται εύκολα ότι όλες οι προηγούμενες σχέσεις ισχύουν με  $\frac{E}{1-\nu^2}$  αντί για  $E$ .

Το ερώτημα που τίθεται για όλα αυτά είναι, το αν ισχύει η παραπάνω θεωρία σε κάθε περίπτωση. Για να ισχύει θα πρέπει να είμαστε στην ελαστική περιοχή πριν το λυγισμό. Από τη θεωρία λεπτότοιχων κυλίνδρων η πίεση που απαιτείται για την πλαστικοποίηση της διατομής είναι σύμφωνα με τη σχέση (1.2.3),

$$P_y = 2 \frac{\sigma_y t}{D}$$

όπου  $\sigma_y$  το όριο διαρροής του υλικού του δακτυλίου. Άρα θέλουμε να ισχύει η ανισότητα

$$P_{cr} \leq P_y$$

Μετά τις πράξεις καταλήγουμε εύκολα στην ακόλουθη συνθήκη για να ισχύει η ελαστική θεωρία του λυγισμού :

$$\frac{D}{t} \geq \sqrt{\frac{E/(1-\nu^2)}{\sigma_y}} \quad (1.2.4)$$

Παράδειγμα για αγωγό από χάλυβα grade X65 με μέτρο ελαστικότητας  $E=210\text{GPa}$ ,  $\nu=0.3$  και όριο διαρροής  $\sigma_y = 450\text{MPa}$  προκύπτει πως η ελαστική θεωρία ισχύει για τιμή του λόγου  $D/t$  μεγαλύτερη από 21.6.

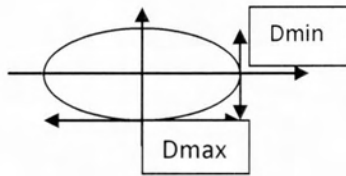
### Μετα-λυγισμική ανελαστική συμπεριφορά - αρχική ατέλεια

Σύμφωνα με τη σχέση (1.2.4) μετά τον λυγισμό, οι μέγιστες τάσεις στον δακτύλιο εμφανίζονται στις θέσεις  $\theta=0, \frac{\pi}{2}, \pi, 3\frac{\pi}{2}$ . Σε αυτές τις θέσεις θα έχουμε την πρώτη πλαστικοποίηση του υλικού μας. Με συνεχιζόμενη αύξηση του φορτίου, αφού πλαστικοποιηθούν πλήρως οι διατομές σε εκείνα τα σημεία, οι διατομές συμπεριφέρονται σαν πλαστικές αρθρώσεις που ευνοούν την περαιτέρω παραμόρφωση του δακτυλίου ως την τελική κατάρρευση.

Από τη θεωρία μας, για να εξάγουμε τα αποτελέσματα που χρησιμοποιήσαμε, δουλέψαμε με την θεωρία της διαταραχής. Δηλαδή, λύσαμε το πρόβλημα

θεωρώντας πως ο δακτύλιος δεν είναι ένας τέλειος κυκλικός δακτύλιος αλλά παρεκκλίνει από αυτόν κατά μια απειροστή ποσότητα. Αν ήταν απολύτως τέλειος αυτό που θα παίρναμε ως λύση είναι ο πρωτεύον δρόμος ισορροπίας. Στην πραγματικότητα όμως, δεν υπάρχει κάτι τέτοιο όπως τέλειος δακτύλιος οπότε θεωρούμε πως υπάρχει μια αρχική ατέλεια στον δακτύλιο. Έτσι το πρόβλημά μας γίνεται ένα μη-γραμμικό πρόβλημα ισορροπίας, δηλαδή για κάθε τιμή του  $P$  υπάρχει και τιμή για τα  $u$ ,  $w^2$ , δηλαδή τις μετατοπίσεις της περιφέρειας του δακτυλίου. Επίσης, αν ο δακτύλιος έχει ένα μη-κυκλικό σχήμα μπορώ να «μετρήσω» πόσο οβάλ είναι αν εισάγω την παράμετρο  $\nu$ .

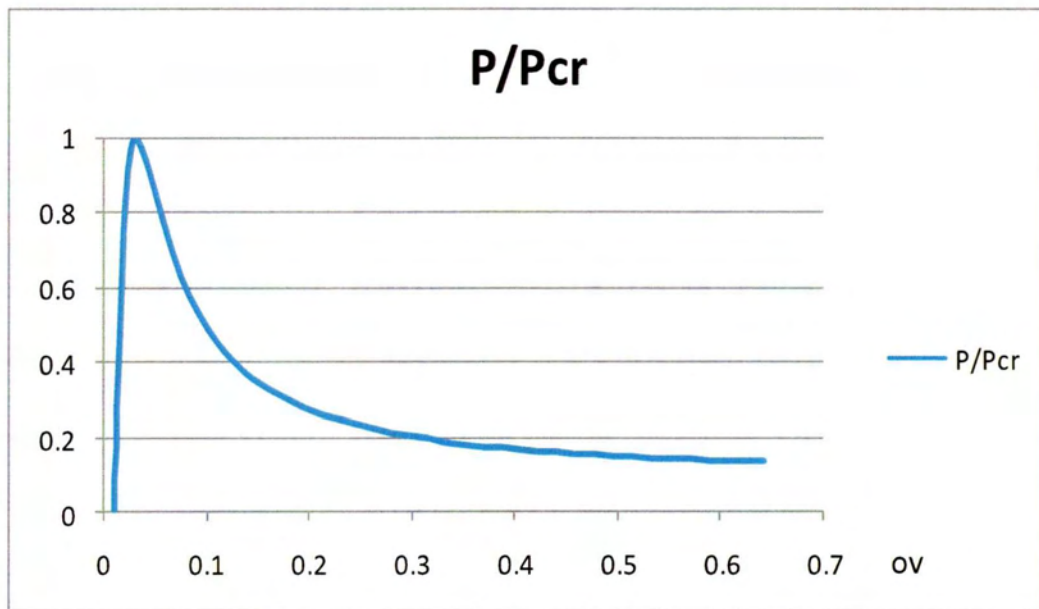
$$\nu = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \quad (1.2.12)$$



Προφανώς η μεταλυγισμική κατάσταση για μεγάλες παραμορφώσεις απαιτεί μια πιο σύνθετη ανάλυση. Χρησιμοποιώντας μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων, μπορούμε να εξετάσουμε την επίδραση που έχουν στην αντοχή και οι πλαστικές αρθρώσεις που δημιουργούνται μετά την κατάρρευση του δακτυλίου. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα P- $\nu$  στο σχήμα 5.

<sup>2</sup> Το προηγούμενο πρόβλημα ήταν ένα πρόβλημα ιδιοτιμών.





**Σχήμα 4** Διάγραμμα κανονικοποιημένης πίεσης με την παράμετρο οβαλοποίησης

Όπως βλέπουμε στο σχήμα 5 μετά από την μέγιστη πίεση στην κορυφή της καμπύλης η αντοχή του δακτυλίου πέφτει κατακόρυφα λόγω των πλαστικών αρθρώσεων που δημιουργούνται μετά το λυγισμό. Όπως θα δούμε και στη συνέχεια, αυτή η γεωμετρική ατέλεια (αρχική «οβαλότητα») του δακτυλίου/αγωγού παίζει σπουδαίο ρόλο στην αντοχή σε εξωτερική πίεση.

Με βάση τη θεωρία που αναλύσαμε ανωτέρω αλλά και αρκετά πειραματικά αποτελέσματα, έχουν αναπτυχθεί πρότυπα για την κατασκευή των υποθαλάσσιων αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων. Δυο ευρέως χρησιμοποιούμενα πρότυπα είναι το RP 1111 του Αμερικάνικου Ινστιτούτου Πετρελαίου (API) και το Νορβηγικό πρότυπο DNV OS F-101. Παρόλο που στο σχεδιασμό υποθαλάσσιων αγωγών πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλές παράμετροι για να έχουμε αξιοπιστία έναντι πιθανής αστοχίας, η κύρια παράμετρος δομικού σχεδιασμού είναι η αντοχή σε εξωτερική πίεση. Ας δούμε ένα παράδειγμα της χρήσης των προτύπων για αυτού του είδους τη φόρτιση.

Έστω ότι θέλουμε να σχεδιάσουμε ένα αγωγό που να αντέχει σε εξωτερική πίεση 15 MPa (βάθος 1500μ) και με εξωτερική διάμετρο  $D=36$  in ( δηλαδή  $D= 914.4$  mm). Έστω επίσης ότι το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε είναι ένας X65 χάλυβας με

όριο διαρροής  $\sigma_y = 450 \text{ MPa}$  (65 ksi). Θα βρούμε την μέγιστη εξωτερική πίεση με βάση τις δυο προδιαγραφές που αναφέραμε.

#### API RP1111

Από το συγκεκριμένο πρότυπο API RP 1111 για τον υπόψη αγωγό και για σχεδιασμό για φόρτιση εξωτερικής πίεσης, έχουμε την εξής φόρμουλα<sup>3</sup>:

$$(P_o - P_i) \leq f_o P_c$$

όπου  $P_o$  η εξωτερική πίεση (εδώ 15 Mpa) ,  $P_i$  η εσωτερική πίεση (εδώ μηδέν) και  $f_o$  συντελεστής που εξαρτάτε από τον τρόπο κατασκευής του αγωγού. Είναι ίσος με 0.7 για αγωγούς χωρίς ραφή, 0.6 για συγκολλητούς αγωγούς. Το  $P_c$  που είναι και η πίεση κατάρρευσης δίνεται από τον εξής τύπο:

$$P_c = \frac{P_y P_{el}}{\sqrt{P_y^2 + P_{el}^2}} \quad (1.2.13)$$

όπου:

$$P_y = 2\sigma_y \frac{t}{D}$$

είναι η πίεση για την πλαστικοποίηση της διατομής του δακτυλίου.

και

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

είναι η πίεση κατάρρευσης σύμφωνα με την ελαστική θεωρία.

Συνήθως αγωγοί με διάμετρο 36 in είναι συγκολλητοί αγωγοί οπότε θα θεωρήσουμε την παράμετρο  $f_o=0.6$ , έτσι από τις παραπάνω σχέσεις ο μόνος άγνωστος είναι το πάχος  $t$  του αγωγού. Από τους ανωτέρω τύπους προκύπτει:  $t=1.5$  in,  **$t=3.81$  cm**, που αντιστοιχεί σε λόγο  $D/t=24$ .

<sup>3</sup> API RP 1111, κεφάλαια 4.3.2 και 4.3.2.1

DNVS OS- F101

Από το πρότυπο DNV OS- F101 η εξίσωση που υπολογίζει την πίεση κατάρρευσης του αγωγού από εξωτερική πίεση, είναι η εξής<sup>4</sup>:

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

όπου:

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

$$P_p = \sigma_y \cdot a \cdot \frac{2t}{D}$$

και

$$f_o = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} ,$$

με  $f_o \geq 0.005$

Στο συγκεκριμένο πρότυπο λαμβάνεται υπόψη η αρχική ατέλεια μέσω του συντελεστή  $f_o$ . Παρατηρήστε ότι η παράμετρος  $f_o$  είναι αντίστοιχη της παραμέτρου της οβαλότητας που παρουσιάσαμε προηγουμένως.

Ο παράγοντας  $a$  εξαρτάται από τον τρόπο κατασκευής του αγωγού. Το  $\sigma_y$  είναι το όριο διαρροής του υλικού. Εμείς επιλέγουμε  $a=0.85$  που αντιστοιχεί σε συγκολλητούς αγωγούς<sup>5</sup>, ενώ το  $f_o$  θεωρήθηκε ως το ελάχιστο δυνατό δηλαδή 0.005 (0.5%). Επομένως ο μόνος άγνωστος είναι το πάχος  $t$ . Λύνοντας ως προς  $t$  τις παραπάνω εξισώσεις παίρνουμε  $t=1.23$  in ή σε εκατοστά  **$t=3.15$ cm**, με  $D/t=29.4$ .

<sup>4</sup> Βλέπε πρότυπο DNV OS-F101, κεφάλαιο 5 σελίδα 73

<sup>5</sup> Βλέπε πρότυπο DNV OS-F101, πίνακα 5-5 ,σελίδα 69, κεφαλαίου 5.



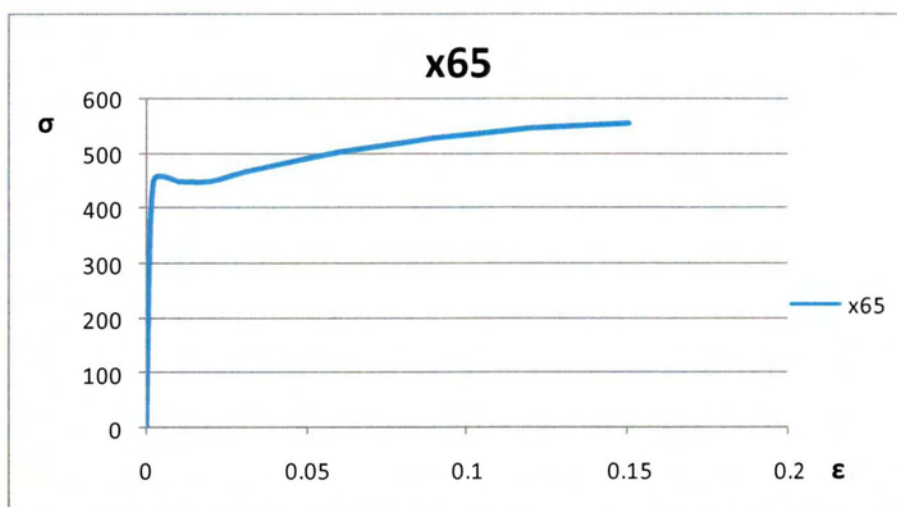
## 2. Αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης

Η μελέτη της επίδρασης μιας αρχικής ατέλειας σε έναν μεταλλικό αγωγό είναι αρκετά απαιτητική ώστε να γίνει αναλυτικά καθώς για αγωγούς διατομής με σημαντικό πάχος δεν ισχύουν οι θεωρίες που παρουσιάσαμε προηγούμενα. Επίσης η λυγισμική συμπεριφορά συνεπάγεται μεγάλες παραμορφώσεις στην ελαστοπλαστική περιοχή. Επομένως θα χρησιμοποιήσουμε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για να εξάγουμε αριθμητικά αποτελέσματα. Στη μελέτη μας θα χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα μη – γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

### 2.1 Περιγραφή των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων

#### Μοντέλο προσομοίωσης δι- διάστατων δακτυλίων

Για να ξεκινήσουμε τη μελέτη μας στην επίδραση των ατελειών στην αντοχή του αγωγού σε εξωτερική πίεση θα εργαστούμε με ένα δι- διάστατο μοντέλο κυκλικού δακτυλίου. Το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε σε αυτό το μοντέλο είναι χάλυβας grade X65 με μέτρο ελαστικότητας  $E=210 \text{ GPa}$  , όριο διαρροής  $\sigma_y = 450 \text{ MPa}$  και λόγο Poisson  $\nu = 0.3$ . Η καμπύλη του υλικού φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 5:



Σχήμα 5 Διάγραμμα τάσης –παραμόρφωσης χάλυβα X65

Το ABAQUS για να προσομοιώσει την ελαστο-πλαστική συμπεριφορά του υλικού απαιτεί να δώσουμε μια σειρά σημείων για την πραγματική τάση και την λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση που δίνονται σε σχέση με την ονομαστική τάση  $\sigma$  και παραμόρφωση  $e$ , από τους τύπους :

$$\sigma_T = \sigma (1 + e) \quad (2.1.1)$$

$$\varepsilon_{ln}^p = \ln(1 + e) - \frac{\sigma_T}{E} \quad (2.1.2)$$

όπου

$\sigma_T$ : η πραγματική τάση

$e$ : η ανοιγμένη παραμόρφωση

$\sigma$ : η ονομαστική τάση

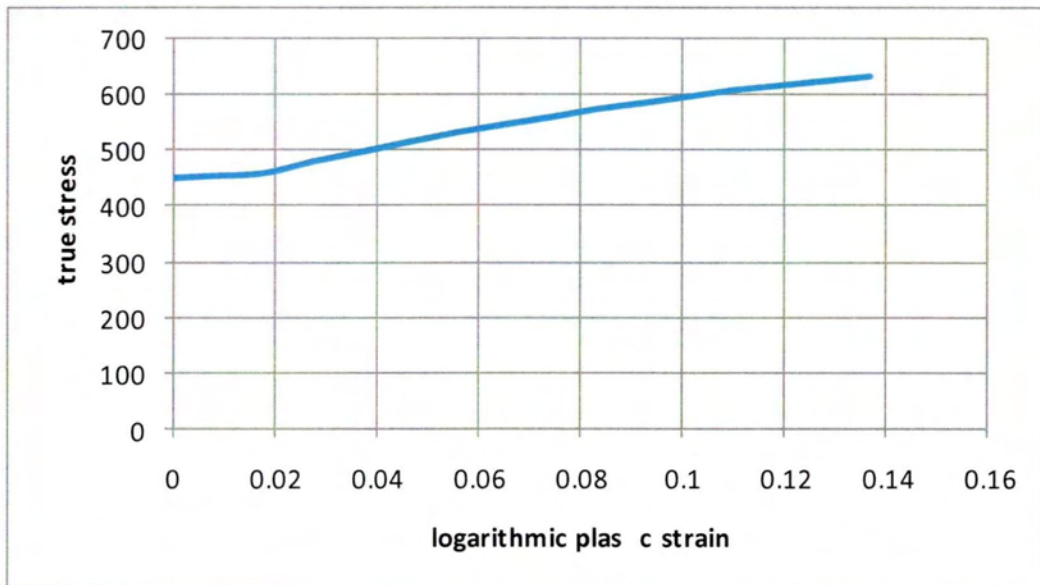
$\varepsilon_{ln}^p$  : το πλαστικό μέρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης

Ο παρακάτω πίνακας δίνει τις τιμές των τάσεων και των αντίστοιχων παραμορφώσεων

True stress ( $\sigma_T$ )	plas c strain ( $\epsilon_{ln}^p$ )	Strain( $\epsilon$ )	Stress ( $\sigma$ )
		0	0
449.397	0	0.002142	449.397
452.985	0.00779	0.009997	449.4835
457.47	0.0176	0.019975	449.5578
478.95	0.0273	0.030023	466.2221
496.6	0.0369	0.040046	478.9276
514.5	0.0463	0.049958	491.7328
531.378	0.0557	0.059959	503.3419
545.7	0.0651	0.070043	512.3463
558.9	0.0743	0.08	520.2457
573.667	0.0834	0.08995	529.5062
584.43	0.0925	0.09997	534.9474
596.625	0.102	0.110534	541.402
607.6	0.11	0.119513	547.3874
615.85	0.119	0.129678	550.3575
624.15	0.128	0.139936	553.3245
632.5	0.137	0.150287	556.2885

**Σχήμα 6 Πίνακας τιμών τάσης - παραμόρφωσης**

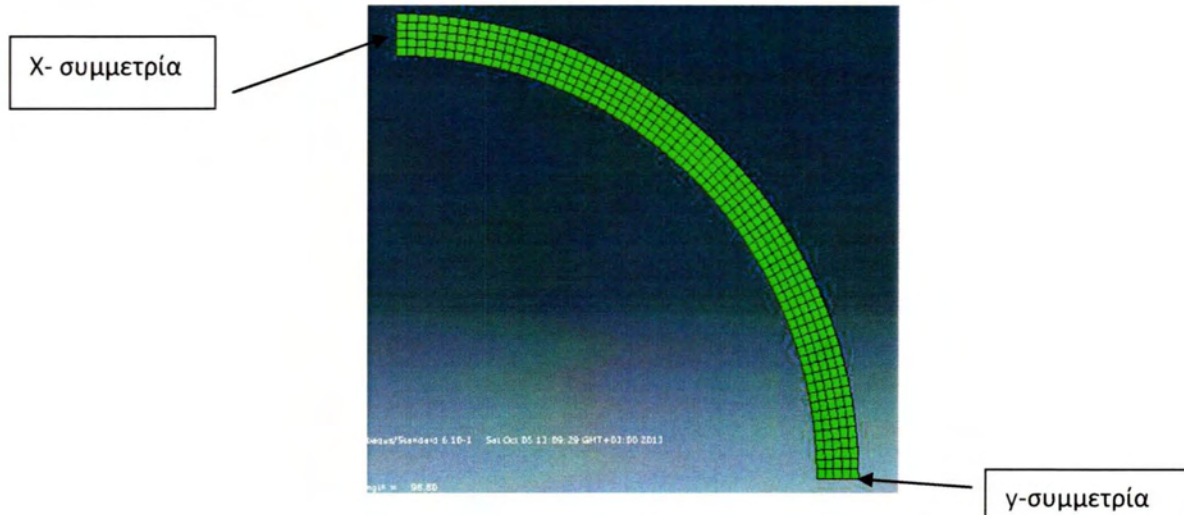
Εισάγουμε στο πρόγραμμα τις παραπάνω τιμές για την πλαστική συμπεριφορά του υλικού. Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε το αντίστοιχο διάγραμμα.



**Σχήμα 7 Διάγραμμα πραγματικής τάσης – λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης**

Στη συνέχεια να κατασκευάζουμε το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Εκμεταλλευόμενοι τη διπλή συμμετρία του προβλήματος θα χρειαστεί να μελετήσουμε μόνο ένα τεταρτοκύκλιο του δακτυλίου, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Στην αριστερή παρειά του τεταρτοκυκλίου μας το πρόβλημα παρουσιάζει συμμετρία κατά τον άξονα των  $x$ , και στην κάτω δεξιά παρειά έχουμε συμμετρία στον άξονα  $y$ . Οπότε χρησιμοποιούμε αντίστοιχα τις εντολές `x-symm` και `y-symm` του ABAQUS. Η εντολή `x-symm` δεσμεύει τη μετατόπιση κατά τον  $y$  άξονα και τις στροφές ως προς τους άξονες  $x$  και  $z$  δηλαδή έχουμε  $U1=UR1=UR3=0$ . Σε πλήρη αντιστοιχία η `y-symm` δίνει στις συνοριακές συνθήκες τις τιμές  $U2=UR2=UR3=0$ . Έτσι το πρόβλημά μας θα πάρει τη μορφή ενός δι - διάστατου τεταρτοκυκλίου με τις συνοριακές συνθήκες όπως βλέπουμε στο σχήμα 8





**Σχήμα 8 Το δι-διάστατο μοντέλο**

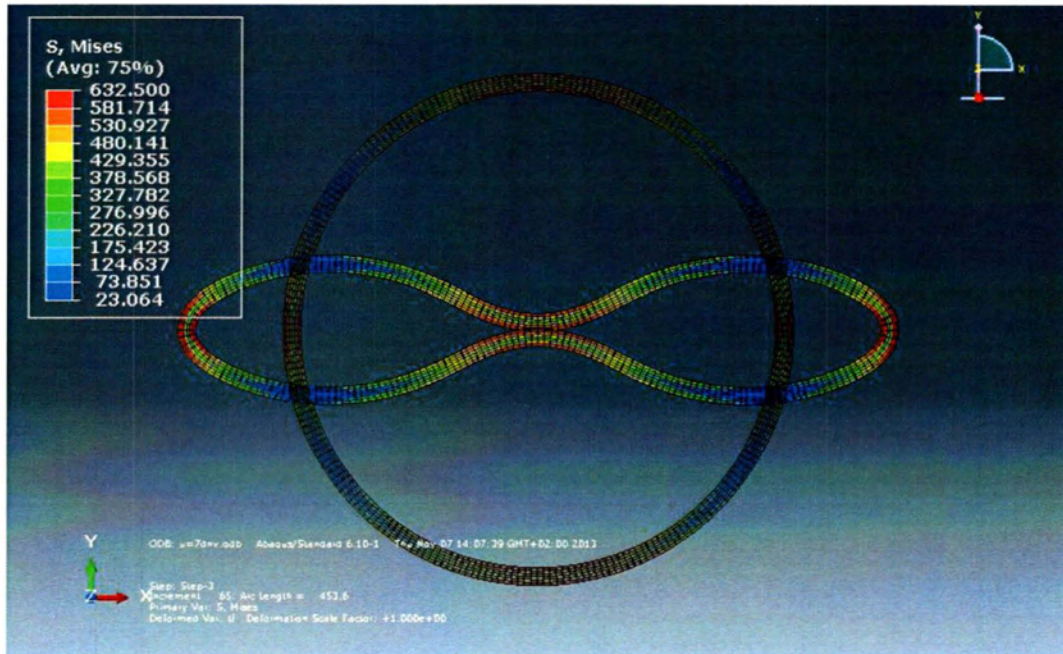
Στο παράδειγμα αυτό οι διαστάσεις του δακτυλίου είναι διάμετρος  $D=914.4\text{mm}$  και πάχος  $t=30.1\text{mm}$ , επομένως ο λόγος  $D/t$  είναι 30.31. Η φόρτιση που θα επιβάλουμε στο δακτύλιο είναι πίεση στην εξωτερική του επιφάνεια. Όμως επειδή στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν τέλει σωλήνες, πρέπει να επιβάλλουμε μια αρχική ατέλεια στο μοντέλο που μελετάμε. Για αυτό το λόγο η ανάλυσή μας αποτελείται από τρία βήματα. Στο πρώτο βήμα επιβάλλουμε μια αρχική μετατόπιση στον πάνω αριστερά κόμβο του μοντέλου ώστε με αυτό τον τρόπο να μεταβάλλουμε λίγο τη γεωμετρία του μέσω μικρών πλαστικών παραμορφώσεων. Στο δεύτερο βήμα άρουμε την μετατόπιση και αφήνουμε τον δακτύλιο να επανέλθει ελαστικά προκαλώντας όμως μια μικρή πλαστική παραμόρφωση. Στο τρίτο βήμα επιβάλλεται η εξωτερική πίεση και αφήνουμε το δακτύλιο να παραμορφωθεί με την μέθοδο του Riks<sup>6</sup>.

Το πλέγμα που θα χρησιμοποιήσουμε αποτελείται από 360 στοιχεία, 6 κατά το πάχος του δακτυλίου και 60 κατά την περιφέρεια του τεταρτοκυκλίου. Τα στοιχεία που θα χρησιμοποιήσουμε σε όλα τα μοντέλα αυτού του τύπου είναι στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης, CPS4R δηλαδή τετρα-κομβικά και μειωμένης ολοκλήρωσης.

Τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα φαίνονται στο σχήμα 9 βλέπουμε ότι συμφωνεί με τη με τη θεωρία μας. Παρατηρούμε επίσης ότι η μέγιστη τάση

<sup>6</sup> Η μέθοδος Riks ή μέθοδος μήκους τόξου παρουσιάστηκε από τον Riks το 1979.

εμφανίζεται εκεί που περιμέναμε δηλαδή σε τέσσερα ισαπέχοντα σημεία δημιουργώντας έτσι τις τέσσερις πλαστικές αρθρώσεις.



**Σχήμα 9 Ο παραμορφωμένος δακτύλιος από το υπολογιστικό πρόγραμμα**

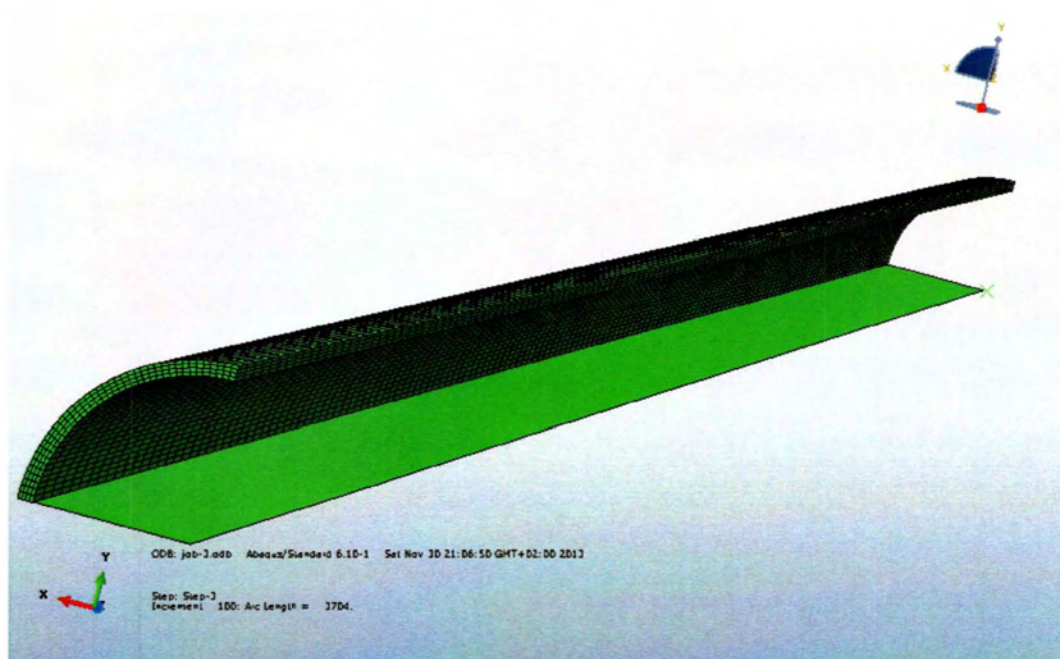
### **Τρι-διάστατο μοντέλο για την προσομοίωση της διαδιδόμενης ύβωσης**

Το δι-διάστατο μοντέλο που παρουσιάσαμε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν πρόκειται για τη μελέτη του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης. Αυτό διότι, ενώ στη μελέτη της αντοχής σε εξωτερική πίεση αρκεί η ανάλυση μιας διατομής του αγωγού, το φαινόμενο της ύβωσης συνεπάγεται την διαδοχική κατάρρευση γειτονικών διατομών ενός αγωγού. Είναι ένα φαινόμενο τρι-διάστατο. Για να μελετήσουμε αποτελεσματικά αυτό το φαινόμενο θα πρέπει να θεωρήσουμε ένα τρι-διάστατο μοντέλο του αγωγού.

Η βασική ιδέα για την κατασκευή αυτού του μοντέλου παραμένει ίδια με προηγουμένως, δηλαδή, να εκμεταλλευτούμε όσο γίνεται τη συμμετρία που παρουσιάζει το πρόβλημά μας, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες.



Έτσι, αντιστοίχως με τα προηγούμενα αναπτύσσουμε ένα 3D- παραμορφώσιμο μοντέλο αξιοποιώντας την διπλή συμμετρία του αγωγού, δηλαδή θεωρούμε το ένα τεταρτημόριο του αγωγού όπως φαίνεται στο σχήμα 10.



**Σχήμα 10 Το τρι-διάστατο μοντέλο του σωλήνα**

Όπως φαίνεται στο σχήμα 10 προσθέσαμε μια αναλυτική επιφάνεια που έχει τα χαρακτηριστικά άκαμπτου σώματος στο x-z επίπεδο. Η προσθήκη αυτή έγινε για να προσομοιώσει την επαφή των δυο εσωτερικών επιφανειών του αγωγού μετά την κατάρρευσή του. Κατά την κατάρρευση, η επιφάνεια του αγωγού που βρίσκεται πάνω από το x-z επίπεδο έρχεται σε επαφή με την συμμετρική της στο x-z επίπεδο, προσθέτοντας αυτή την επιφάνεια εξομοιώνουμε αυτή την επαφή κατά την κατάρρευση χωρίς να χρειαστεί να κατασκευάσουμε ένα μοντέλο ολόκληρου του αγωγού. Για να είμαστε σίγουροι ότι αυτή η επιφάνεια δεν θα μετακινηθεί κατά την ανάλυση, δεσμεύσαμε ένα σημείο αναφοράς στην επιφάνεια ως προς όλες τις μετατοπίσεις και στροφές. Με αυτόν τον τρόπο όλα τα σημεία της επιφάνειας αποκτούν τις ίδιες ιδιότητες με το σημείο αναφοράς. Επίσης πρέπει να σημειώσουμε ότι δώσαμε στην αναλυτική επιφάνεια και την εσωτερική επιφάνεια του αγωγού ιδιότητες απλής επαφής επιφανειών, δηλαδή τα στοιχεία που αποτελούν το σωλήνα μας δεν μπορούν να διαπεράσουν την αναλυτική επιφάνεια.

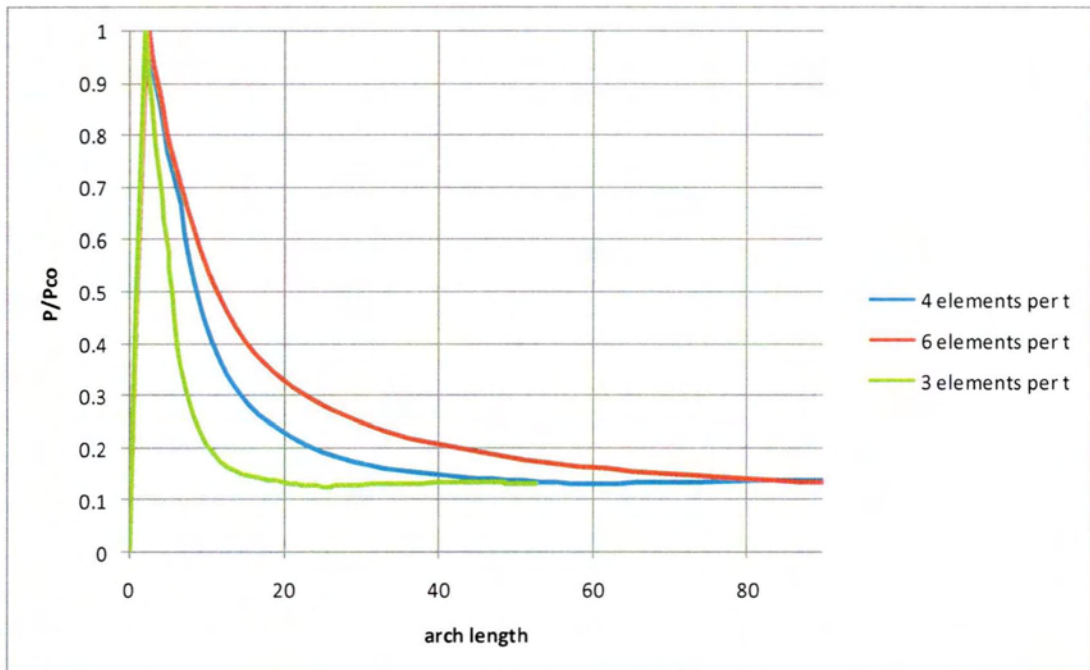
Τα βήματα της ανάλυσης του τρι –διάστατου μοντέλου είναι τα ίδια με αυτά της ανάλυσης του δακτυλίου. Αρχικά επιβάλλουμε μια μετατόπιση σε ένα κόμβο της ακραίας διατομής για τη δημιουργία αρχικής ατέλειας στη γεωμετρία του αγωγού, στο δεύτερο βήμα αποδεσμεύουμε την μετατόπιση αυτή ώστε ο αγωγός να επανέλθει ελαστικά αφήνοντας μια παραμένουσα παραμόρφωση και τέλος στο τρίτο βήμα επιβάλλουμε την εξωτερική πίεση με την μέθοδο Riks.

#### Υπολογιστικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

Σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την ακρίβεια της ανάλυσής μας είναι η πυκνότητα του πλέγματος. Ιδιαίτερα τα στοιχεία κατά το πάχος του αγωγού, θέλουμε να είναι επαρκή σε αριθμό ώστε να έχουμε ακρίβεια στα αποτελέσματά μας. Όμως αν θεωρήσουμε μεγάλο πλήθος στοιχείων ανεβαίνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος αφού ο αγωγός μας έχει και μεγάλο μήκος, της τάξης των 20 διαμέτρων.

Έγιναν αναλύσεις για τρία διαφορετικά μοντέλα, ένα μοντέλο με τρία στοιχεία κατά το πάχος  $t$  , ένα με τέσσερα και ένα με έξι. Αναμένουμε πως όσο πιο πυκνό το πλέγμα τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια θα έχουμε στους υπολογισμούς μας. Με αυτά τα μοντέλα μπορούμε να χαράξουμε τις καμπύλες για την πίεση ανά βήμα της ανάλυσης, για να έχουμε ένα ενιαίο μέτρο σύγκρισης κανονικοποιήσαμε την πίεση όπως βλέπουμε και στο διάγραμμα του σχήματος 11.





**Σχήμα 11 Διάγραμμα κανονικοποιημένης πίεσης ανα βήμα ανάλυσης**

Παρατηρούμε ότι όλες οι καμπύλες συγκλίνουν σχεδόν στο ίδιο όριο, όμως οι καμπύλες για τα τέσσερα στοιχεία και τα έξι στοιχεία κατά το πάχος είναι πιο κοντά μεταξύ τους από ότι αυτή με τα τρία στοιχεία κατά το πάχος. Επομένως, λόγω του υπολογιστικού κόστους αλλά χωρίς να χάνουμε ιδιαίτερα στην ακρίβεια της λύσης επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε τέσσερα στοιχεία κατά το πάχος του τοιχώματος. Κατά το μήκος του αγωγού, στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιούμε 130 στοιχεία και 40 στοιχεία κατά την περιφέρεια του τεταρτοκυκλίου. Συνολικά το μοντέλο μας αποτελείται από 20800 8 κομβικά στοιχεία, μειωμένης ολοκλήρωσης, τύπου C3D8R.

## 2.2 Αρχικά αποτελέσματα για δακτύλιο με εξωτερική πίεση

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η μελέτη του δι-διάστατου δακτυλίου μπορεί να μας δώσει πολλές πληροφορίες για την αντοχή του αγωγού σε εξωτερική πίεση, ιδιαίτερα όταν γνωρίζουμε ότι ο αγωγός μας δεν είναι τέλειος αλλά λόγω της κατασκευής ή της τοποθέτησής του μπορεί να περιέχει ατέλειες. Για μια πρώτη εκτίμηση της επιρροής των ατελειών, μπορούμε εξετάσουμε το μοντέλο για τον δακτύλιο που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2.1.

Από το ABAQUS μπορούμε να παρατηρήσουμε τον παράγοντα LPF (load prorog onality factor) δηλαδή το πόσο μεγαλώνει η πίεση σε κάθε βήμα της ανάλυσης μας. Οι διαστάσεις που σχεδιάσαμε το μοντέλο είναι σε χιλιοστά (mm). Για το φορτίο δώσαμε τιμή μεγέθους 1. Έτσι αυτό το φορτίο της πίεσης που θα μετρήσουμε στο τέλος είναι  $P = lpf * 1$  σε διαστάσεις MPa ( $\frac{N}{mm^2} = MPa$ ). Για να δημιουργήσουμε την αρχική ατέλεια όπως περιγράψαμε επιβάλλαμε μια αρχική κατακόρυφη μετατόπιση στον πάνω αριστερά κόμβο ίση με 10 mm.

Για βρούμε το δρόμο ισορροπίας, τώρα, θα πρέπει να υπολογίσουμε το ovality (ov), έτσι σύμφωνα με τον τύπο (1.2.12):

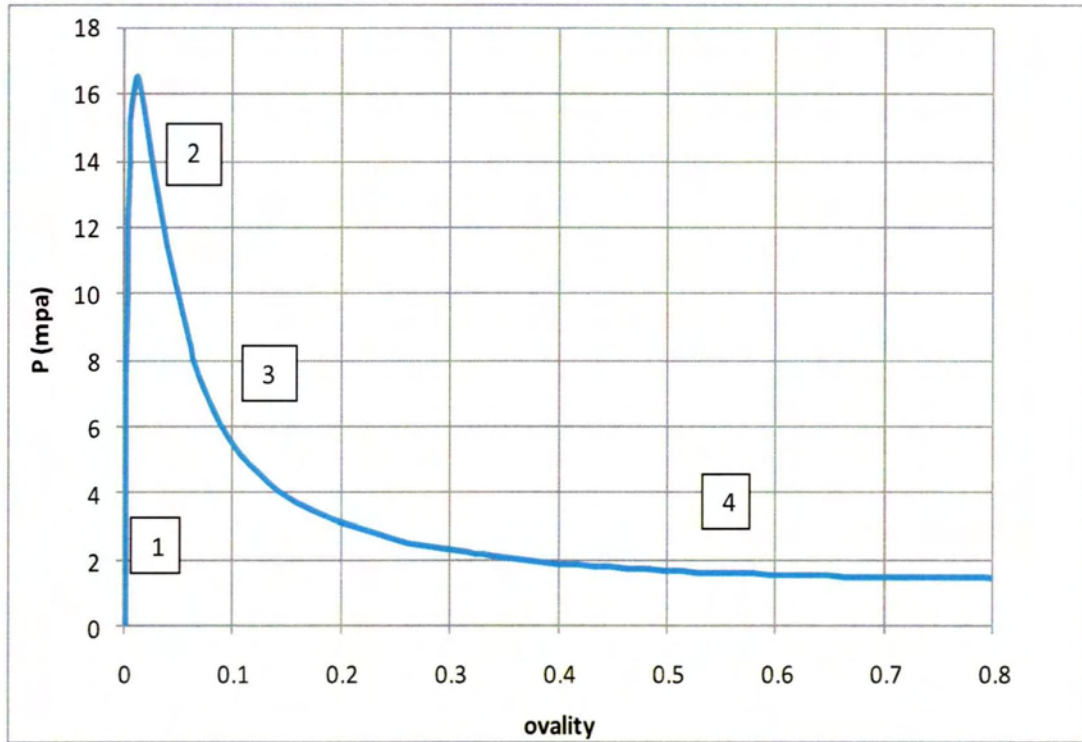
$$ov = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}}$$

όπου:

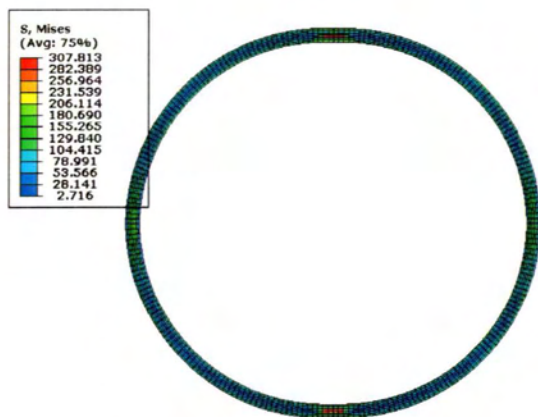
$$D_{max} = (D + 2 * u_x)$$

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

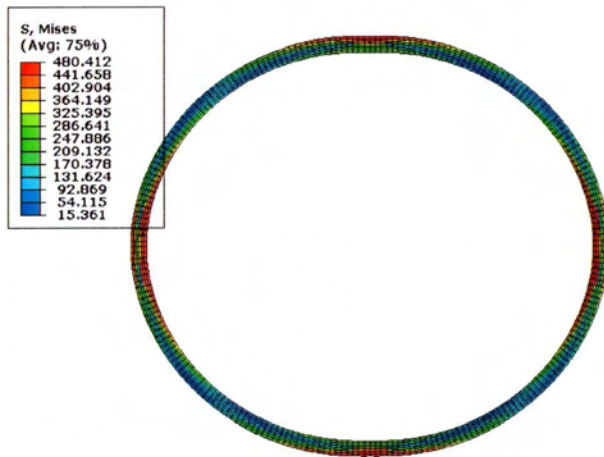
οι μετατοπίσεις  $u_x, u_y$  αναφέρονται στις μετατοπίσεις των κόμβων που βρίσκονται στις παρίες του μοντέλου μας στο x και y άξονα αντίστοιχα. Έτσι υπολογίζουμε την τιμή της παραμέτρου ov σε κάθε increment, οπότε χαράζουμε και το αντίστοιχο διάγραμμα του σχήματος 12. Τα σχήματα 13 ως 16 αντιστοιχούν ποιοτικά στην παραμορφωμένη κατάσταση του δακτυλίου στις θέσεις 1,2,3,4 όπως φαίνονται στο σχήμα 12.



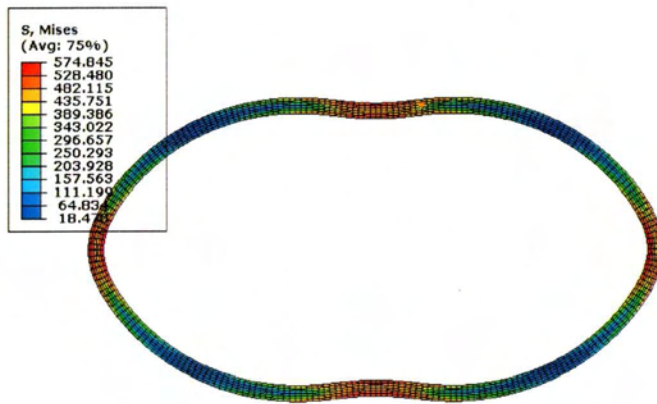
Σχήμα 12 Ο δρόμος ισορροπίας για το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων



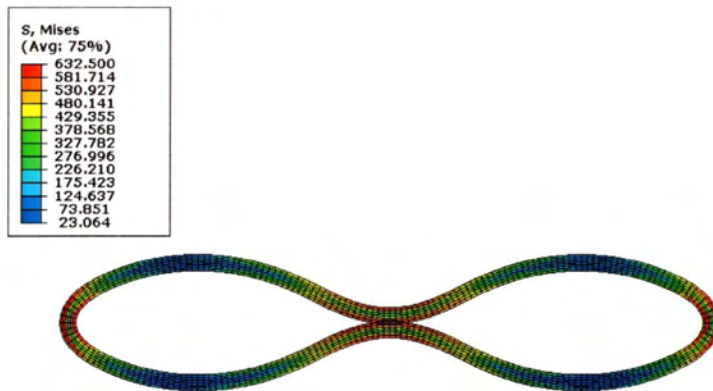
Σχήμα 13 Θέση 1 το μοντέλο πριν την επιβολή της εξωτερικής πίεσης



Σχήμα 14 Θέση 2 με την αύξηση της πίεσης παραμορφώνεται η διατομή του αγωγού

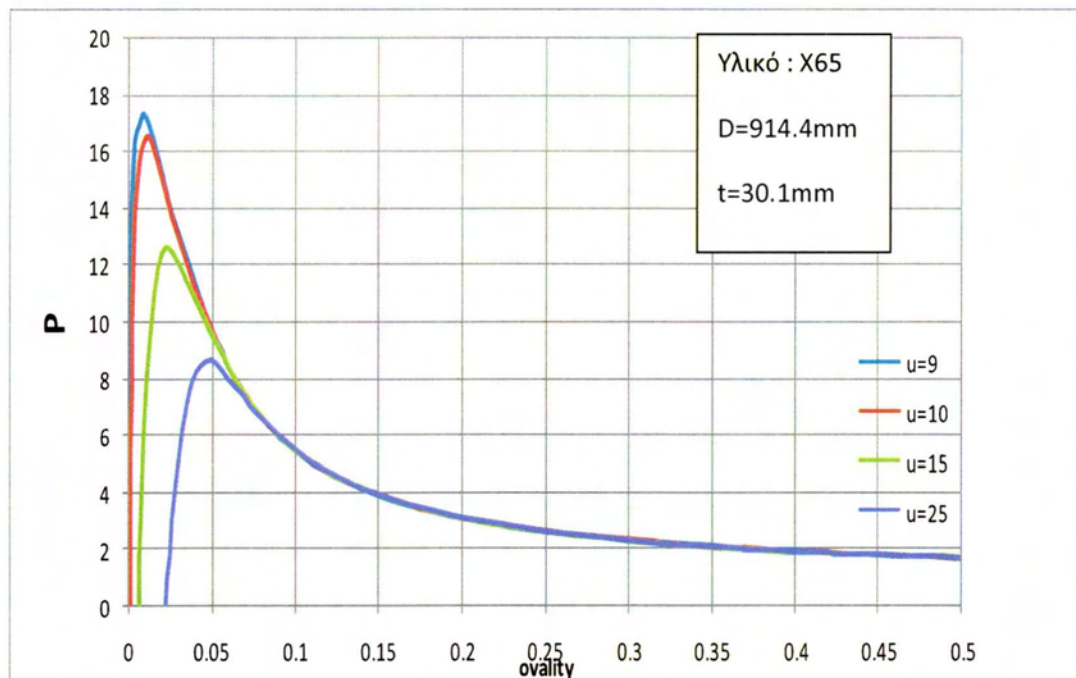


Σχήμα 15 Θέση 3 η διατομή έχει καταρρεύσει και έχουμε τη δημιουργία των τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων.



Σχήμα 16 Θέση 4 το μοντέλο έχει πλήρως καταρρεύσει

Τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι για τη συγκεκριμένη αρχική μετατόπιση, η μέγιστη πίεση που μπορεί να αντέξει ο σωλήνας είναι 16.8 MPa. Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία και για άλλες τιμές της αρχικής μετατόπισης λαμβάνουμε τους αντίστοιχους δρόμους ισορροπίας και τις αντίστοιχες μέγιστες πιέσεις.

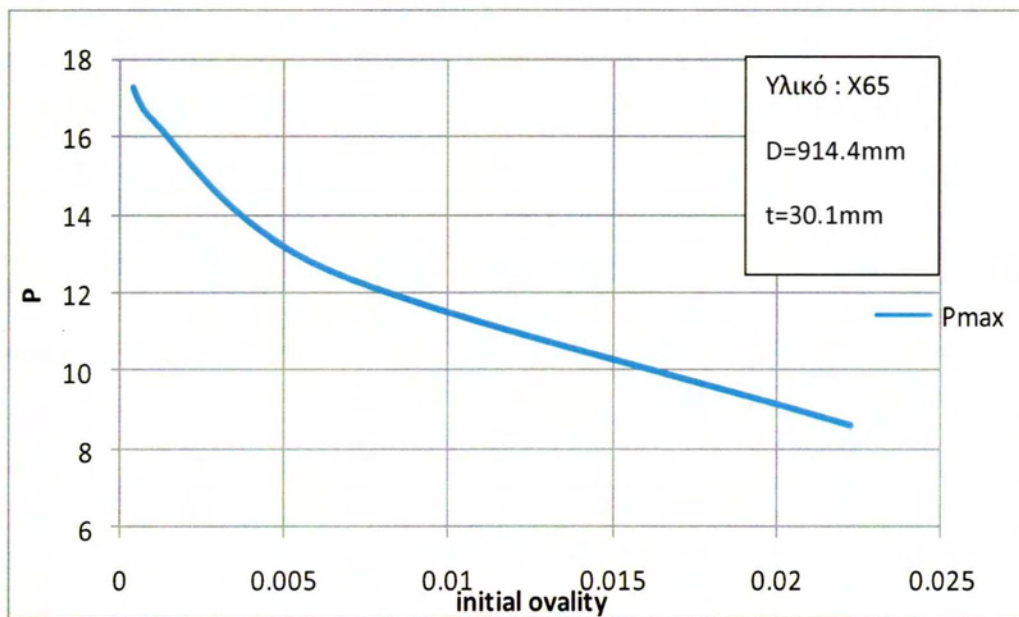


Σχήμα 17 Διαγράμματα P-ον για διάφορες τιμές της αρχικής μετατόπισης

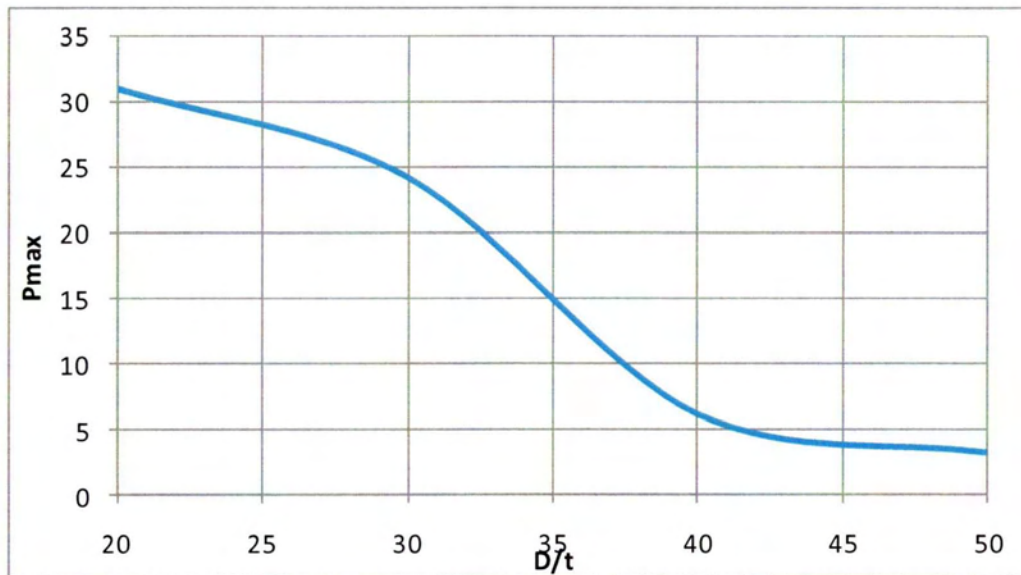


Παρατηρούμε πως όσο μεγαλώνει η τιμή της αρχικής μετατόπισης, η αντοχή σε εξωτερική πίεση του αγωγού μειώνεται, διότι όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική μετατόπιση που επιβάλλουμε για τη δημιουργία ατέλειας τόσο μεγαλύτερες είναι οι πλαστικές παραμορφώσεις (μόνιμες) που λαμβάνει αρχικά ο δακτύλιός μας .

Από το διάγραμμα του σχήματος 17, αντιλαμβανόμαστε πως υπάρχει μια σύνδεση ανάμεσα στην πίεση κατάρρευσης και την αρχική ατέλεια μορφής οβάλ που έχει ο αγωγός. Αν χαράξουμε το αντίστοιχο διάγραμμα με βάση τους υπολογισμούς θα δούμε ότι η μέγιστη πίεση που αντέχει ο αγωγός πέφτει σημαντικά καθώς αυξάνεται η αρχική «οβαλότητα».



**Σχήμα 18 Διάγραμμα οριακής πίεσης με την ατέλεια μορφής οβάλ**

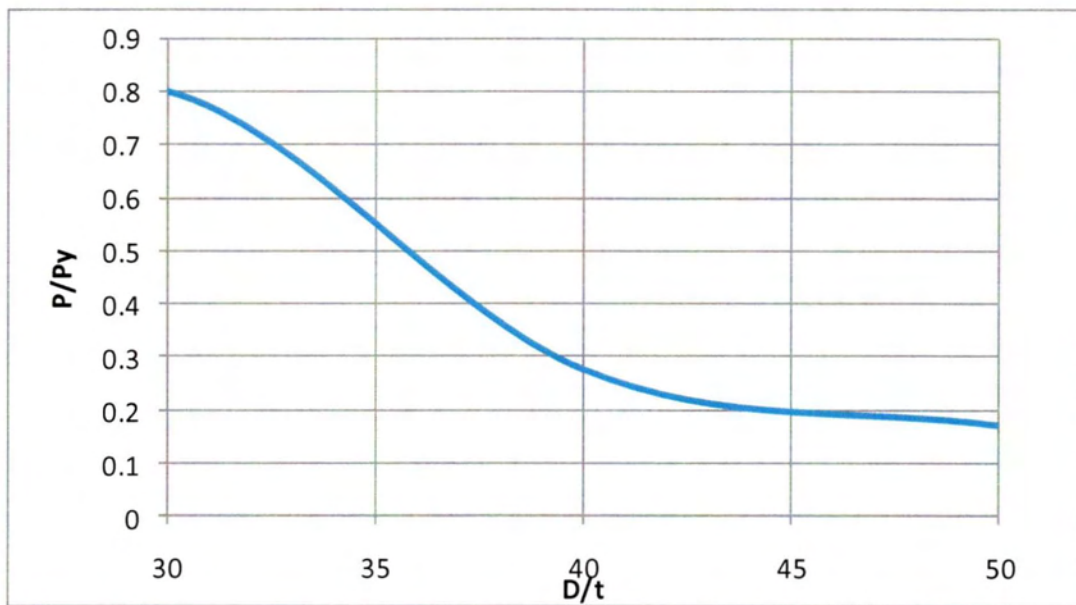


**Σχήμα 19 Μεταβολή της οριακής πίεσης σε σχέση με το λόγο D/t**

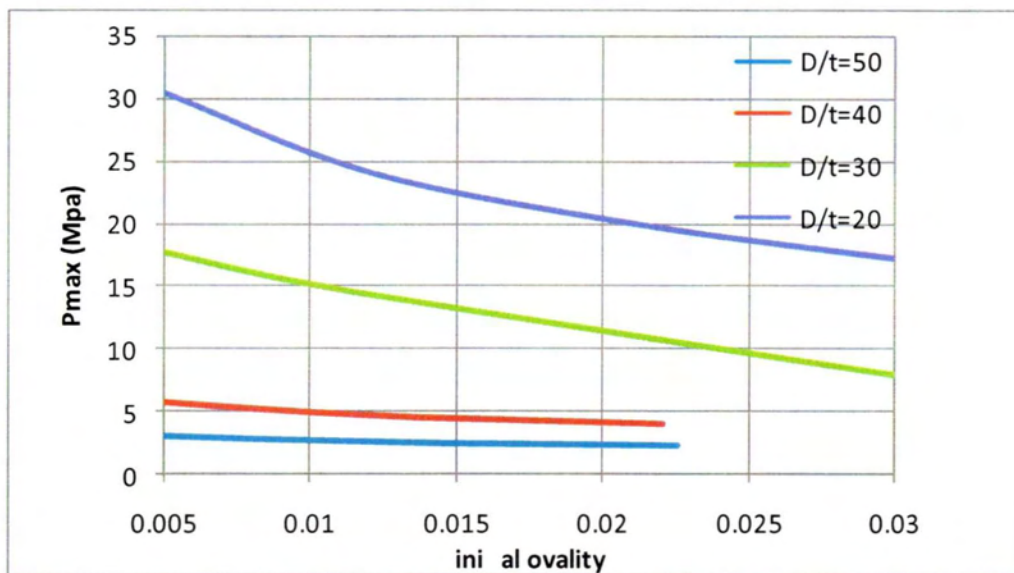
Ο λόγος D/t, επηρεάζει σημαντικά τιμή της πίεσης κατάρρευσης όπως προβλέπει και η θεωρία μας. Τα αριθμητικά αποτελέσματα για διαφορετικούς λόγους D/t και την ίδια αρχική ατέλεια (0.5%), δίνουν το διάγραμμα που φαίνεται στο σχήμα 19. Για το συγκεκριμένο υλικό η πίεση πλαστικοποίησης της διατομής  $P_y$ , εξαρτάται από το λόγο D/t οπότε το προηγούμενο διάγραμμα κανονικοποιημένο ως προς αυτή την πίεση δίνει το διάγραμμα του σχήματος 20 που δείχνει για συγκεκριμένο υλικό και αρχική οβαλότητα 0.5% το λόγο της πίεσης κατάρρευσης προς τη θεωρητική πίεση πλαστικοποίησης της διατομής,

$$P_y = 2 \sigma_y \frac{t}{D}$$

Εργαζόμενοι με τον ίδιο τρόπο μπορούμε να εξετάσουμε την συμπεριφορά αγωγών σε εξωτερική πίεση για διάφορες τιμές του λόγου D/t.



Σχήμα 20 Διάγραμμα  $P/P_y - D/t$



Σχήμα 21 Η επίδραση της αρχικής ατέλειας μορφής οβάλ στην αντοχή σε εξωτερική πίεση για διάφορες τιμές του λόγου  $D/t$

### 2.3 Αρχικά αποτελέσματα για διαδιδόμενη ύβωση

Η διαδιδόμενη ύβωση σε αγωγούς υπό εξωτερική πίεση είναι ένα φαινόμενο που λαμβάνει χώρα μετά την πλήρη κατάρρευση μιας διατομής του σωλήνα



προκαλώντας μια προοδευτική αστοχία. Το φαινόμενο ξεκινάει από μια διατομή που έχει ήδη καταρρεύσει υπό την εξωτερική πίεση και διαδίδεται και προς τις δυο κατευθύνσεις του αγωγού εφόσον η τιμή της εξωτερικής πίεσης έχει τιμή μεγαλύτερη από κάποιο όριο. Η ελάχιστη τιμή της πίεσης για την οποία διαδίδεται η ύβωση ονομάζεται πίεση διάδοσης της ύβωσης (Propaga on pressure-  $P_p$ ). Η δυσκολία και το κόστος επιδιόρθωσης μιας τέτοιας βλάβης που μπορεί να προκαλέσει μεγάλο σε μήκος, έχουν οδηγήσει σε συντηρητικές μελέτες με πάχος αγωγού 1.5 με 2 φορές μεγαλύτερο από αυτό που χρειάζεται ώστε να αντέχει ο αγωγός στην εξωτερική πίεση.<sup>7</sup> Έτσι είναι σημαντικό να έχουμε μια καλή πρόβλεψη για την ελάχιστη πίεση στην οποία εμφανίζεται το εν λόγω φαινόμενο, καθώς και ένα κατάλληλο σχεδιασμό του αγωγού που θα μπορούσε να μειώσει το κόστος της κατασκευής σημαντικά.

Η πίεση διάδοσης της ύβωσης  $P_p$  είναι σημαντικά μικρότερη από την πίεση κατάρρευσης  $P_{max}$ . Σε μερικές περιπτώσεις η  $P_p$  μπορεί να είναι και το 15% της πίεσης κατάρρευσης, γι αυτό και ο σχεδιασμός ενός αγωγού και η επιλογή του τοιχώματος με βάση αυτή την πίεση είναι πολύ δαπανηρός.

Για την πρόβλεψη της πίεσης διάδοσης έχουν προταθεί διάφοροι τύποι κατά καιρούς. Οι πρώτες πειραματικές μελέτες έγιναν από τους Johns et. al και Mesloh et. al. (1976) που πρότειναν την εξής εμπειρική σχέση:

$$\frac{P_p}{\sigma_y} = 6 \left( \frac{2t}{D} \right)^2 \quad (2.3.1)$$

Μια αντίστοιχη αναλυτική σχέση για το υπολογισμό της πίεσης διάδοσης πρότειναν οι Palmer και Mar n (1975) θεωρώντας έναν απλό πλαστικό μηχανισμό κατάρρευσης της διατομής του αγωγού με τέσσερις πλαστικές αρθρώσεις:

$$P_p = \pi \sigma_y \left( \frac{t}{D} \right)^2 \quad (2.3.2)$$

<sup>7</sup> Pasqualino, I. P. και Estefen, S. F. 2001. *A non linear analysis of the buckle propaga on problem in deepwater pipelines*. Rio de Janeiro : Interna onal journal of solids and structures, 2001. 38.

Στη συνέχεια οι Kyriakides και Babcock (1980) πρότειναν την ακόλουθη εμπειρική σχέση η οποία βασίστηκε κυρίως σε πειραματικά αποτελέσματα:

$$\frac{P_p}{\sigma_y} = \left[ 10.7 + 0.54 \left( \frac{E_t}{\sigma_y} \right) \right] \left( \frac{t}{D} \right)^{2.25} \quad (2.3.3)$$

όπου  $E_t$  το εφαπτομενικό μέτρο σκλήρυνσης του υλικού.

Οι ίδιοι, στηριζόμενοι σε επιπλέον πειραματικά αποτελέσματα σε χαλύβδινους και αλουμινένιους σωλήνες πρότειναν την επίσης εμπειρική σχέση:

$$P_p = A \sigma_y \left( \frac{t}{D} \right)^\beta \quad (2.3.4)$$

Τα A και β είναι σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό, τυπικά θα αναφέρουμε για χάλυβα  $A=14.5$ ,  $\beta=2.254$  και για αλουμίνιο  $A=11.3$ ,  $\beta=2.281$ .<sup>8</sup>

Εμείς θα μελετήσουμε την διαδιδόμενη ύβωση με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, σύμφωνα με το τρι- διάστατο μοντέλο που περιγράψαμε σε προηγούμενη ενότητα.

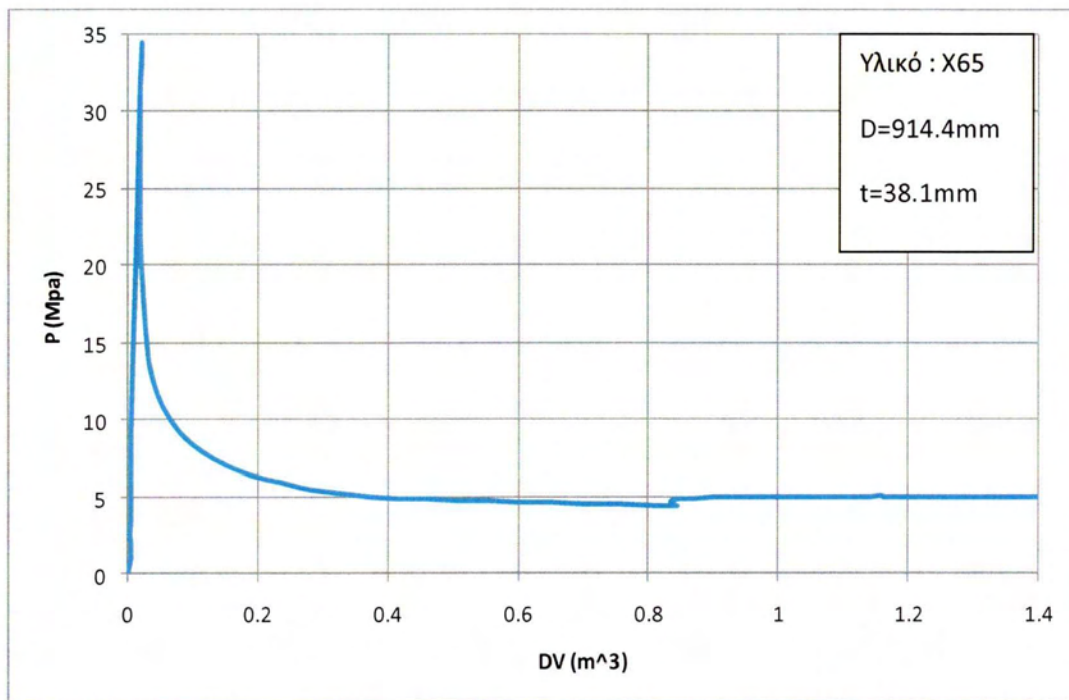
Για το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης η σημαντικότερη παράμετρος είναι η τιμή της πίεσης διάδοσης. Σε ένα αγωγό μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε πόση είναι αλλά και πώς παραμορφώνεται ο αγωγός.

Καθώς ο αγωγός μας αρχίζει να παραμορφώνεται, μεταβάλλεται ο όγκος που εσωκλείει. Αυτή η μεταβολή του όγκου είναι μια μονοτονικώς μεταβαλλόμενη παράμετρος και αποτελεί μια κατάλληλη παράμετρο ώστε να περιγράψουμε πόσο έχει παραμορφωθεί ο σωλήνας μας αφού η οβάλ διατομή δεν είναι κατάλληλη παράμετρος για να περιγράψει ολόκληρο τον σωλήνα αλλά μόνο μια διατομή του.

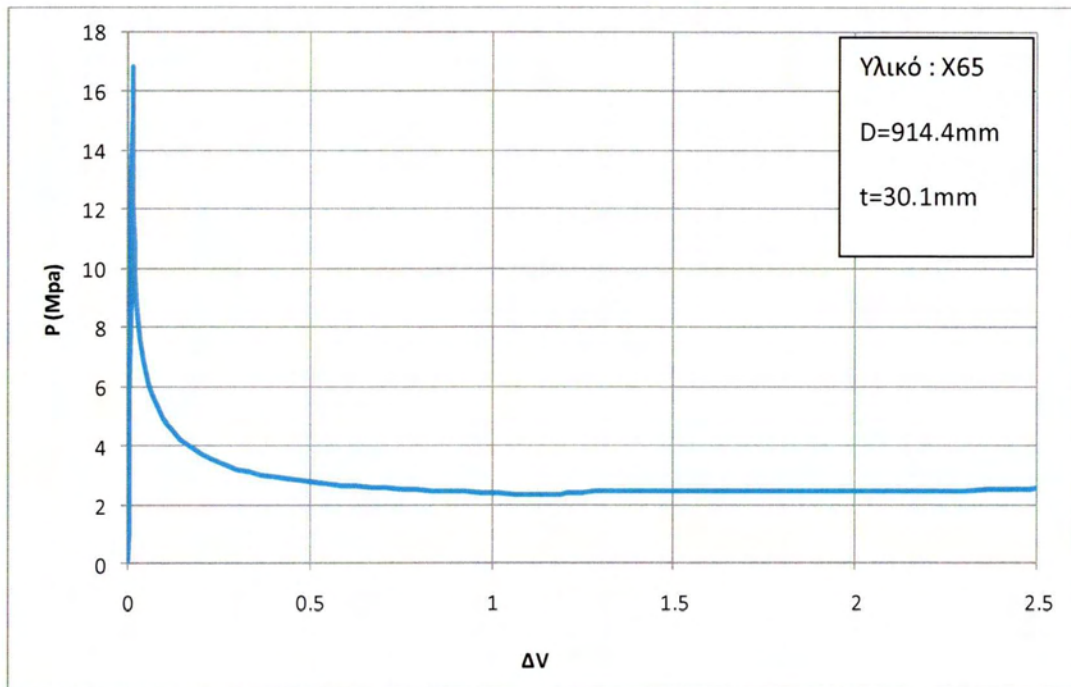
Ο υπολογισμός του όγκου γίνεται αριθμητικά όπως θα περιγράψουμε σε επόμενο κεφάλαιο. Από το μοντέλο αριθμητικής προσομοίωσης μπορούμε να χαράξουμε το δρόμο ισορροπίας για τον αγωγό, δηλαδή το διάγραμμα της πίεσης σε σχέση με τη

<sup>8</sup> Nogueira, Andre C. και Tassoulas, John L. 1994. *Finite element analysis of buckle propaga on in pipelines under tension*. Austin, Texas : Elsevier science ltd.

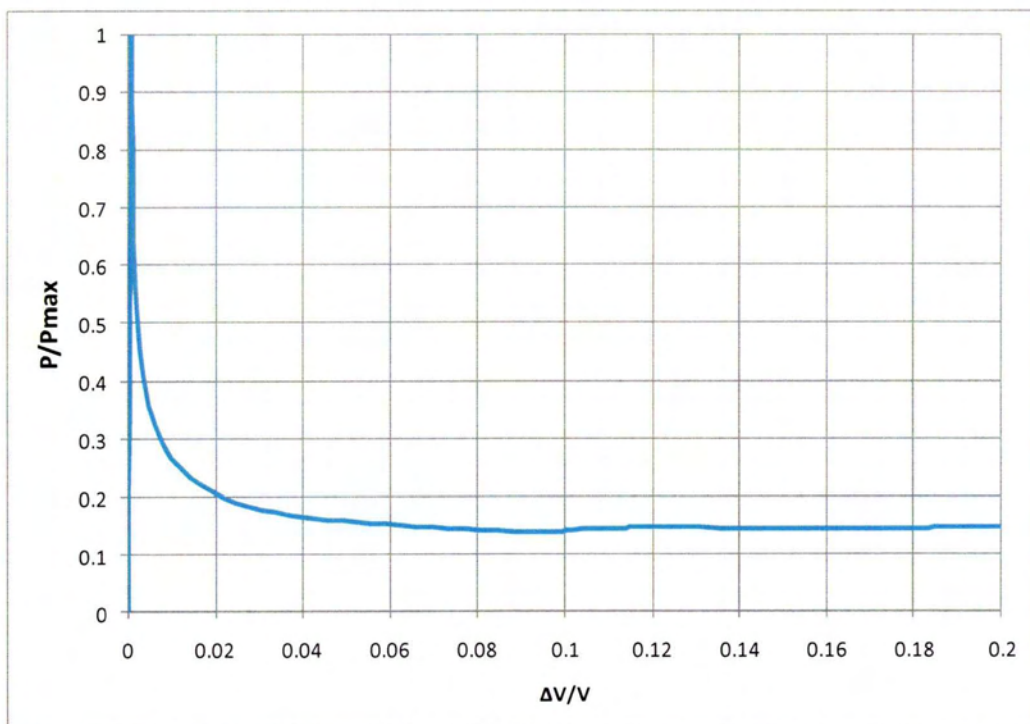
μεταβολή του όγκου. Αυτό φαίνεται στα σχήματα 22 και 23 για δύο αγωγούς διαμέτρου 36 in και πάχη 38.1mm και 30.1mm αντίστοιχα.



Σχήμα 22 Διάγραμμα πίεσης- μεταβολής ογκου (P-  $\Delta V$ ) για αγωγό διατομής με διάμετρο 914.4 mm και πάχος 38.1mm.



Σχήμα 23 Διάγραμμα πίεσης- μεταβολής ογκού (P-  $\Delta V$ ) για αγωγό διατομής με διάμετρο 914.4 mm και πάχος 38.1mm.



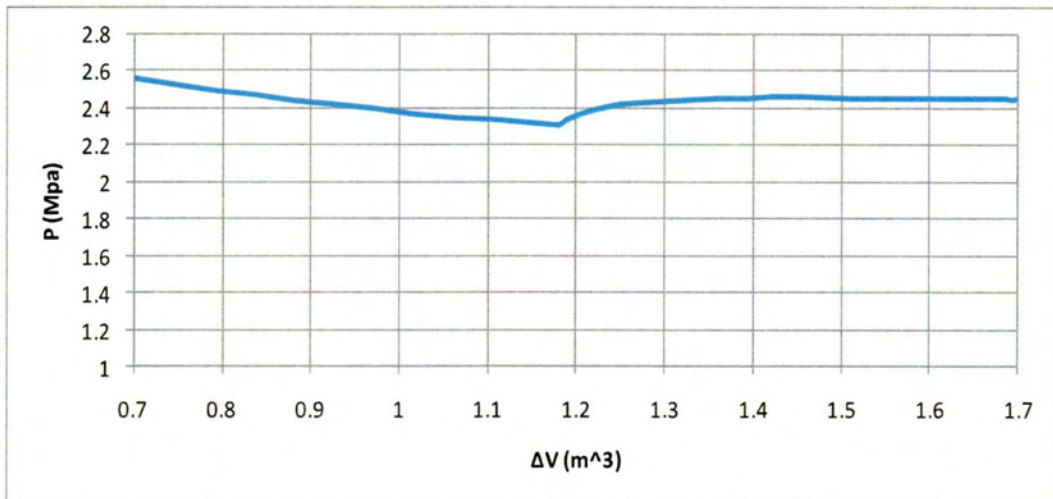
Σχήμα 24 Κανονικοποιημένο διάγραμμα πίεσης – μεταβολής ογκού

Αν κανονικοποιήσουμε το διάγραμμα ως προς τη πίεση κατάρρευσης  $P_{max}$  και ως προς τον αρχικό όγκο του αγωγού μας θα λάβουμε την μορφή του διαγράμματος που φαίνεται στο σχήμα 24.

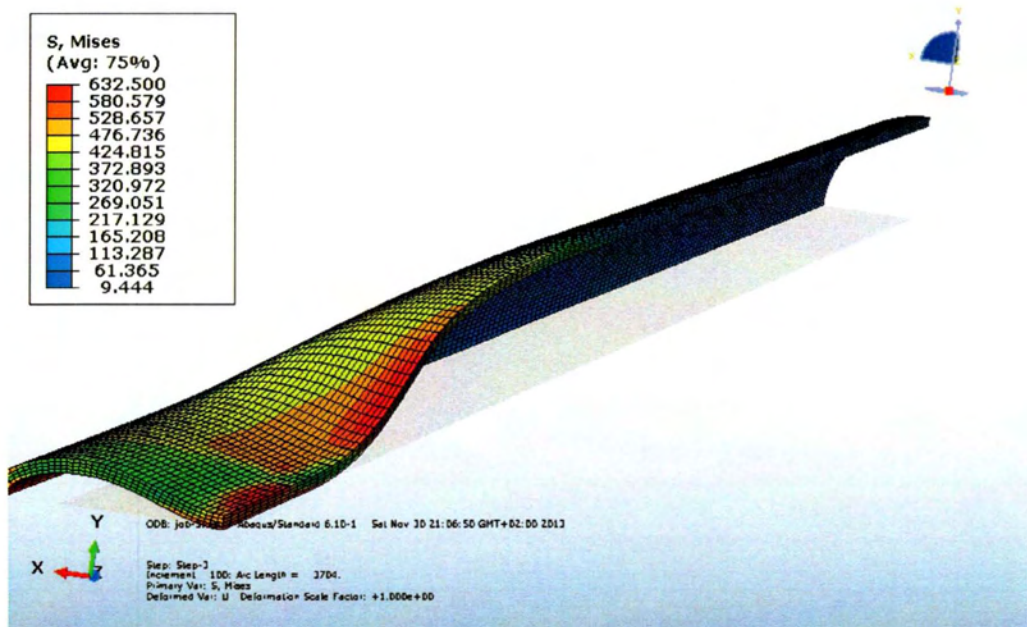
Σε όλα τα προηγούμενα διαγράμματα παρατηρούμε ότι μετά την μέγιστη πίεση, η πίεση πέφτει απότομα ως ένα ορισμένο σημείο και στη συνέχεια αφού αυξηθεί λίγο η τιμή της παραμένει σταθερή. Το σημείο αυτό που αυξάνει λίγο η πίεση είναι το σημείο στο οποίο έχουμε την πρώτη επαφή μεταξύ των εσωτερικών τοιχωμάτων του αγωγού, ενώ η σταθερή μετέπειτα πίεση αυτή αντιστοιχεί στην Πίεση Διάδοσης ( $P_p$ ) της ύβωσης. Όπως φαίνεται στο σχήμα 24 η πίεση διάδοσης για το συγκεκριμένο είναι το 14.6% της πίεσης κατάρρευσης ( δηλαδή 2.457 MPa) για τον αγωγό DnV και 14.6% της πίεσης κατάρρευσης ( δηλαδή 5.05 MPa) για τον αγωγό API. Από την εξίσωση του Palmer (2.3.2) ο αγωγός DNV έχει  $P_p = 1.53 \text{ Mpa}$  και ο αγωγός API  $P_p = 2.45 \text{ Mpa}$  , αποτελέσματα που διαφέρουν σημαντικά από αυτά που παίρνουμε από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Ο λόγος για αυτή την απόκλιση είναι ότι στη σχέση που εξήγαγε ο Palmer δεν λαμβάνονται υπόψη οι αξονικές παραμορφώσεις που λαμβάνει ο σωλήνας κατά την κατάρρευσή του οδηγώντας έτσι σε μικρότερες τιμές της προβλεπόμενης πίεσης διάδοσης.

Μπορούμε να διακρίνουμε καλύτερα αυτή τη μεταβολή της πίεσης αν εστιάσουμε στην συγκεκριμένη περιοχή του δρόμου ισορροπίας στο γραφήμα 25.





Σχήμα 25 Μεταβολή της πίεσης κατά το σημείο πρώτης επαφής των εσωτερικών τοιχωμάτων του αγωγού.



Σχήμα 26 Το παραμορφωμένο σχήμα του αγωγού κατά την διαδιδόμενη ύβωση (Propaga on Pro le).

Σε αυτό το σημείο παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα από το δι- διάστατο και τρι- διάστατο μοντέλο με πάχος αγωγού σύμφωνα με αυτό που υπολογίσαμε με το

πρότυπο DNV (πάχος 30.1 mm) δίνουν την ίδια πίεση κατάρρευσης  $P_{max} = 16.8$  MPa, αφού και στις δυο περιπτώσεις η αρχική ατέλεια προκλήθηκε με αρχική μετατόπιση ίδιου μέτρου 10mm.

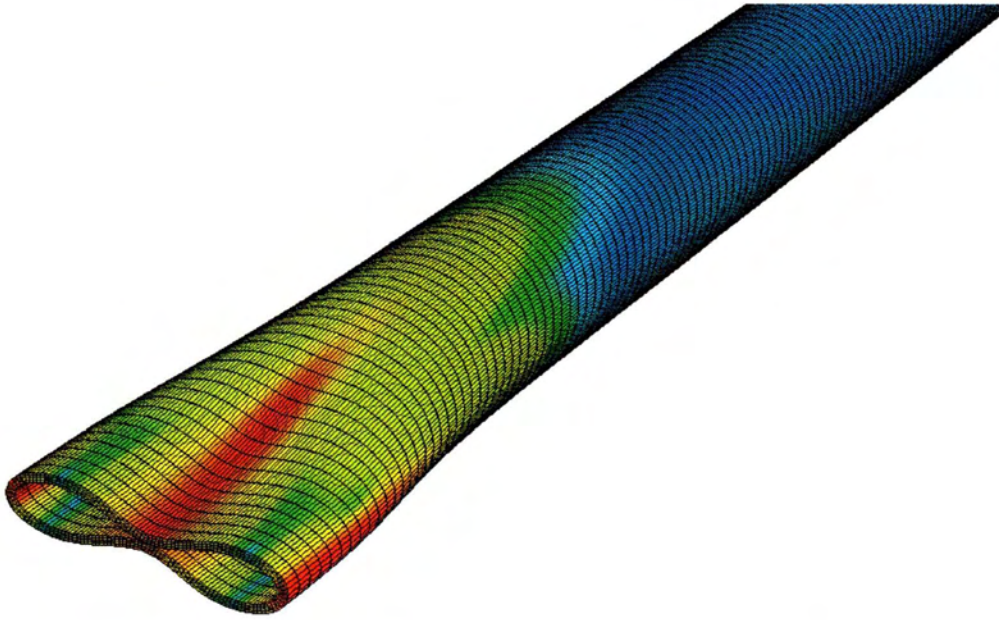
Πρόκειται για μια επαλήθευση ότι όντως η μελέτη μιας διατομής αγωγού με την μορφή του δι-διάστατου δακτυλίου που περιγράψαμε δίνει ακριβή αποτελέσματα για την αντοχή σωλήνα σε φόρτιση εξωτερικής πίεσης, δηλαδή για την τιμή του  $P_{max}$ .

Επομένως μπορούμε να μελετήσουμε την επίδραση που έχουν οι διάφορες κατασκευαστικές ατέλειες ενός αγωγού στην αντοχή του σε εξωτερική πίεση μελετώντας μόνο μια διατομή του αγωγού και όχι όλο το σωλήνα κάτι που σημαίνει μεγάλη οικονομία στο υπολογιστικό κόστος έναντι ενός πλήρους τρι- διάστατου μοντέλου.

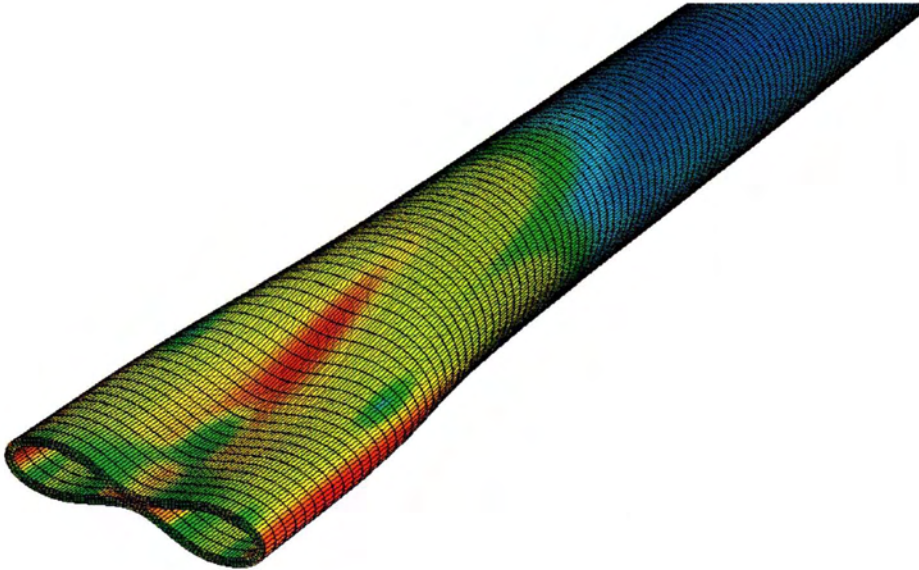
Εντούτοις, για τη μελέτη του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης είναι αναγκαία η χρήση τρι-διάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

Στα σχήματα 27 και 28 παρατηρούμε το προφίλ της διάδοσης της ύβωσης όπως αυτή προκύπτει από την προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων.

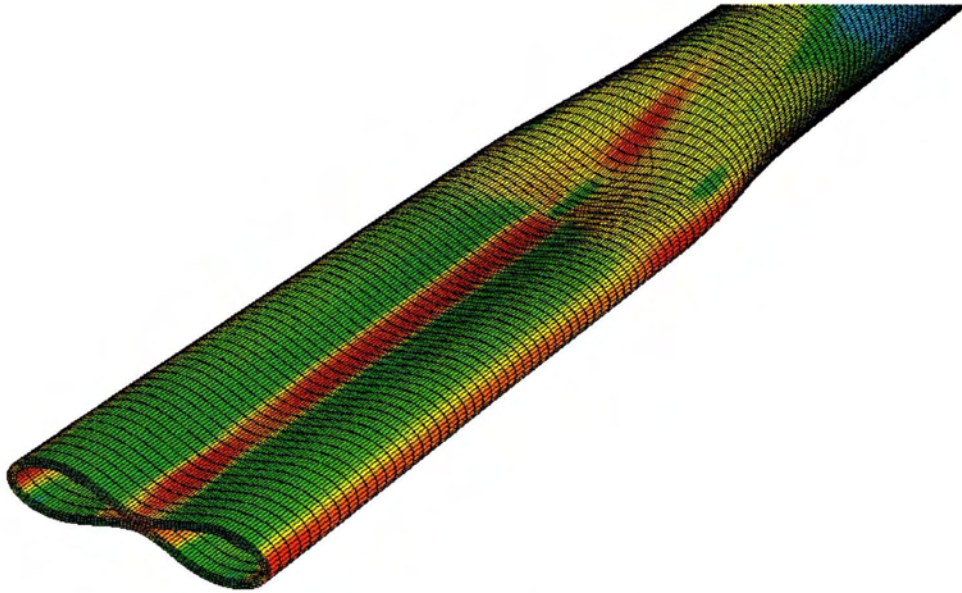
Επίσης στο σχήμα 29 φαίνεται το προφίλ της διάδοσης της ύβωσης όπως αυτή θα προκύψει σε μια πραγματική κατάσταση όπου η ύβωση διαδίδεται και προς τις δύο διευθύνσεις του αγωγού.



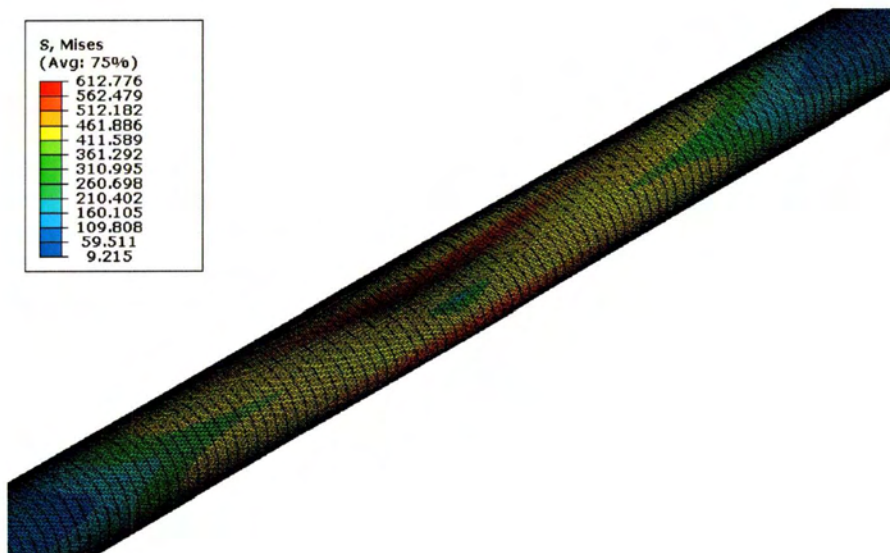
Σχήμα 27 Σημείο πρώτης επαφής εσωτερικού τοιχώματος κατά την διάδοση της ύβωσης.

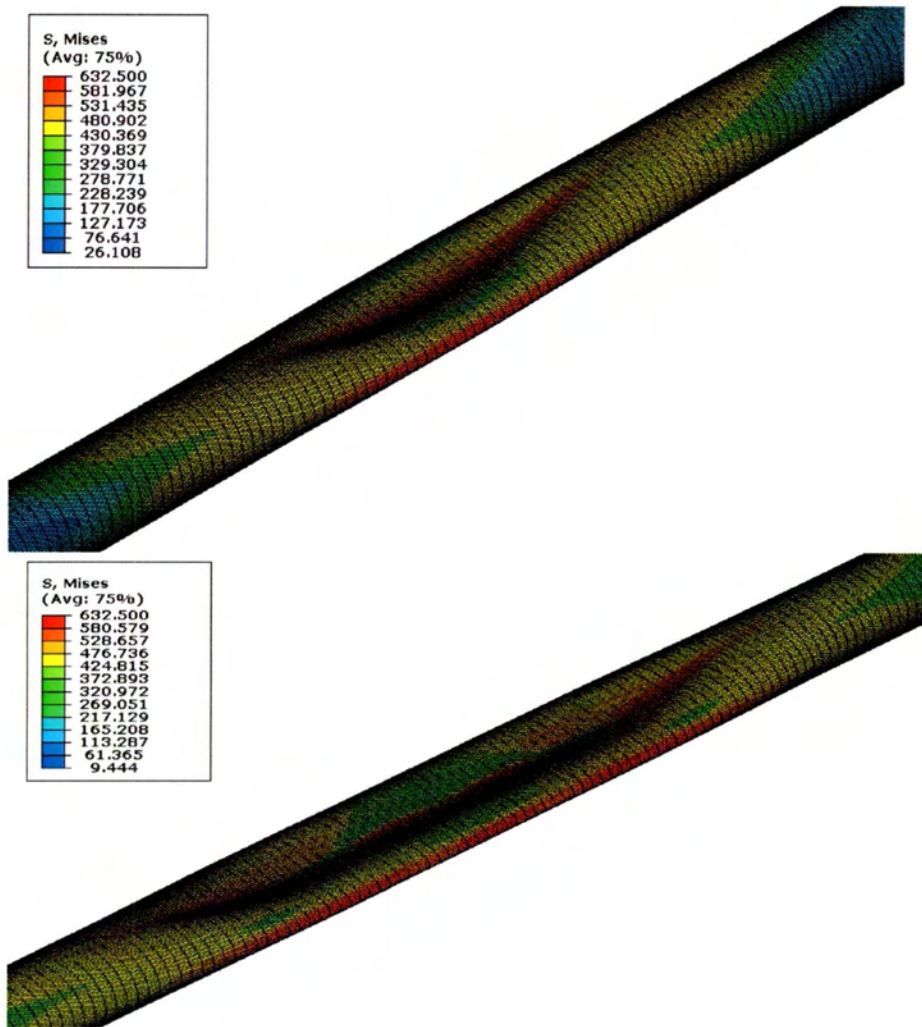






Σχήμα 28 Διάδοση της ύβωσης στον αγωγό, προφίλ της παραμόρφωσης του αγωγού.



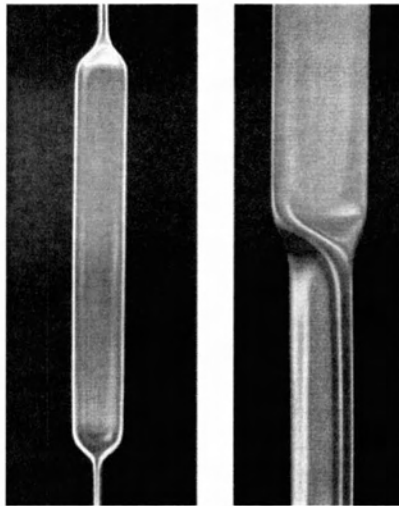


Σχήμα 29 Αριθμητική προσομοίωση του φαινομένου της διάδοσης της ύβωσης. Διάδοση και προς τις δύο κατευθύνσεις του αγωγού.

Σημαντικό είναι να υπογραμμίσουμε ότι η τιμή της πίεσης διάδοσης  $P_p$ , είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή της πίεσης κατάρρευσης  $P_{max}$ , δηλαδή της πίεσης που λάβαμε υπόψη στο σχεδιασμό του αγωγού σε εξωτερική πίεση. Για αγωγούς ποντισμένους σε μεγάλα βάθη αυτό σημαίνει ότι η ύβωση, αν δημιουργηθεί, μπορεί να διαδίδεται για αρκετά χιλιόμετρα μέχρι η υδροστατική πίεση στο αναγκαίο βάθος, να γίνει μικρότερη της πίεσης διάδοσης, μέχρι δηλαδή να μειωθεί αρκετά το βάθος που βρίσκεται ο αγωγός. Για να περιορίσουμε την πιθανότητα μιας τέτοιας καταστροφής χιλιομέτρων αγωγού, είτε σχεδιάζουμε τον αγωγό με βάση της πίεση διάδοσης, κάτι εξαιρετικά αντι οικονομικό, είτε, χρησιμοποιούμε ειδικές

διατάξεις για να σταματήσουμε την ύβωση, τους λεγόμενους «αναστολείς». Οι αναστολείς είναι δακτυλιοειδείς νευρώσεις που τοποθετούνται ανά τμήματα αγωγού, έχουν αυξημένη δυσκαμψία και εμποδίζουν της διάδοση του φαινομένου. Με τους αναστολείς θα ασχοληθούμε αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

Η ταχύτητα που διαδίδεται η ύβωση είναι μια συνάρτηση της εξωτερικής πίεσης που δέχεται ο αγωγός. Για τιμές της πίεσης ίση με την  $P_p$ , η ύβωση διαδίδεται με σχεδόν μηδενική ταχύτητα. Οι Kyriakides και Ne ο διεξήγαγαν μια σειρά από πειράματα για να προσδιορίσουν τη πίεση και την ταχύτητα της διάδοσης. Κατά τα πειράματα που διεξήγαγαν παρατήρησαν ότι αν κατά τη διάδοση της ύβωσης η εξωτερική πίεση είναι αρκετά υψηλή, κοντά στο 90% της πίεσης κατάρρευσης του αγωγού τότε το επίπεδο κατά το οποίο καταρρέουν οι διατομές του αγωγού ενδεχομένως να αλλάζει προσανατολισμό κατά 90 μοίρες και συνεχίζεται έτσι η διάδοση της ύβωσης για κάποιο μήκος του αγωγού. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ip- op<sup>9</sup>.



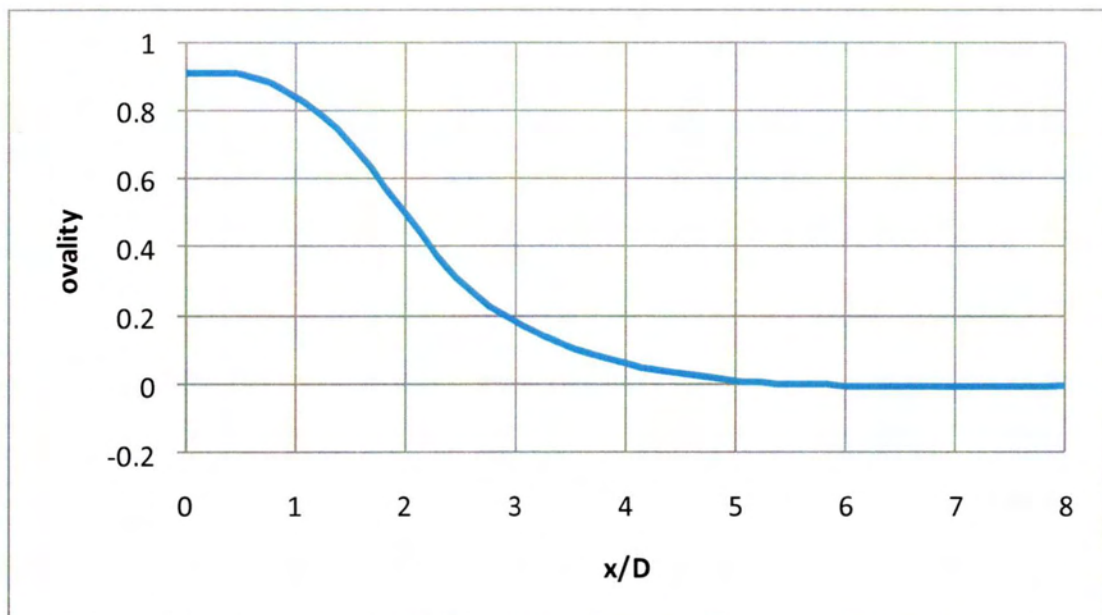
Σχήμα 30 Αλλαγή επιπέδου κατάρρευσης της διατομής κατά την διάδοση της ύβωσης (φαινόμενο ip- op).

<sup>9</sup> Kyriakides, S και Ne ο, T.A. 1999. On the dynamics of propagating buckles in pipelines. *International journal of solids and structures*. Elsevier, vol, 37.

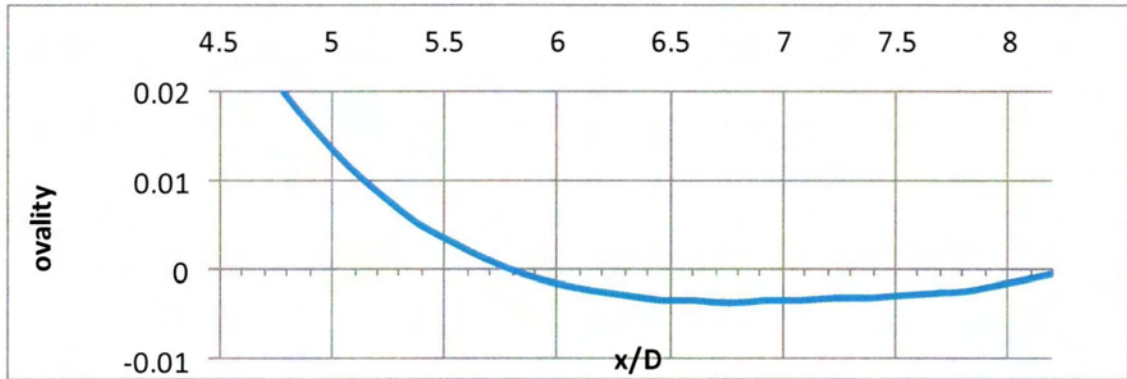


Η κατάρρευση της πρώτης διατομής του αγωγού έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνει την παραμόρφωση και στις γειτονικές διατομές με αποτέλεσμα να καταρρέουν και αυτές σε χαμηλότερη πίεση, έτσι δημιουργείτε ένα «προφίλ οβαλότητας» κατά το μήκος του αγωγού κατά την εξέλιξη του φαινομένου της ύβωσης. Μέσα από το υπολογιστικό μας πρόγραμμα μπορούμε να εξάγουμε το αντίστοιχο διάγραμμα για τον υπόψη αγωγό.

Παρατηρούμε στο σχήμα 32 ότι όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο πρώτης επαφής κατά την διεύθυνση διάδοσης της ύβωσης οι διατομές είναι πλήρως κυκλικές. Στην δευτερη ανάγνωση του διαγράμματος αν εστιάσουμε σε μια περιοχή που ελαχιστοποιείται η παραμόρφωση παρατηρούμε ότι μια ζώνη αρνητικής οβαλότητας προπορεύεται της ύβωσης. Επίσης η μέγιστη αρνητική τιμή της οβαλότητας εμφανίζεται σε μια απόσταση 6.5 διαμέτρων περίπου από το σημείο πρώτης επαφής.



**Σχήμα 31 Προφίλ «οβαλότητας» κατά μήκος του αγωγού( κανονικοποιημένο με τη διάμετρο του αγωγού).**



Σχήμα 32 Διάγραμμα παραμέτρου οβαλοποίησης της διατομής κατά το μήκος του αγωγού.

### 3.Επιρροή Βασικών Παραμέτρων στην Αντοχή σε Εξωτερική Πίεση

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε την επιρροή των αρχικών ατελειών στην οριακή αντοχή ενός σωλήνα (δηλαδή στην πίεση κατάρρευσης  $P_{max}$  ) που υποβάλλεται σε εξωτερική πίεση. Έχουμε ήδη εξετάσει στα προηγούμενα κεφάλαια ότι οι αρχικές ατέλειες έχουν σημαντική επίδραση στην αντοχή σε εξωτερική πίεση.

Είδαμε επίσης κάποια αποτελέσματα για την αρχική ατέλεια που προκαλείται λόγω μιας αρχικής επιβαλλόμενης μετατόπισης σε ένα σημείο της διατομής του σωλήνα. Όμως οι ατέλειες μπορεί να έχουν και άλλες μορφές, όπως είναι η ανισοτροπία του υλικού, ή η μεταβολή του πάχους του αγωγού κατά την περιφερειακή έννοια. Έχουν γίνει πειράματα για την μελέτη της επίδρασης αυτών των ατελειών<sup>10</sup> και έχουν αναπτυχθεί τρόποι εντοπισμού και μέτρησής τους.

Επίδραση στην τιμή της οριακής πίεσης ενός αγωγού έχουν και τυχόν εξωτερικά καμπτικά ή αξονικά φορτία που μπορεί να δέχεται ένας αγωγός π.χ. κατά την πόντισή του. Δηλαδή αν παράλληλα με την εξωτερική πίεση, ο αγωγός υπόκειται σε κάμψη, εφελκυσμό ή θλίψη, η τιμή της οριακής πίεσης  $P_{max}$  επηρεάζεται. Στην παρούσα εργασία θεωρούμε ότι η μόνη φόρτιση στον αγωγό μας είναι η εξωτερική πίεση.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα μελετήσουμε την επίδραση που έχουν οι αρχικές ατέλειες στην τιμή του  $P_{max}$ , με τη βοήθεια ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Θεωρούμε και εδώ, ένα δι- διάστατο μοντέλο που αντιστοιχεί σε διατομή ενός αγωγού με την ανάλογη ατέλεια.

---

<sup>10</sup> Kyriakides, S και Corona,E. 2007. *Mechanics of o shore pipelines vol. 1*. Oxford : Elsevier, 2007.

### 3.1 Επίδραση της αρχικής ατέλειας μορφής οβάλ

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάσαμε αρχικά αποτελέσματα για την επίδραση της ατέλειας μορφής οβάλ στην συμπεριφορά ενός αγωγού σε εξωτερική πίεση. Η παράμετρος οβαλοποίησης μιας διατομής του σωλήνα που ορίζεται ως ακολούθως:

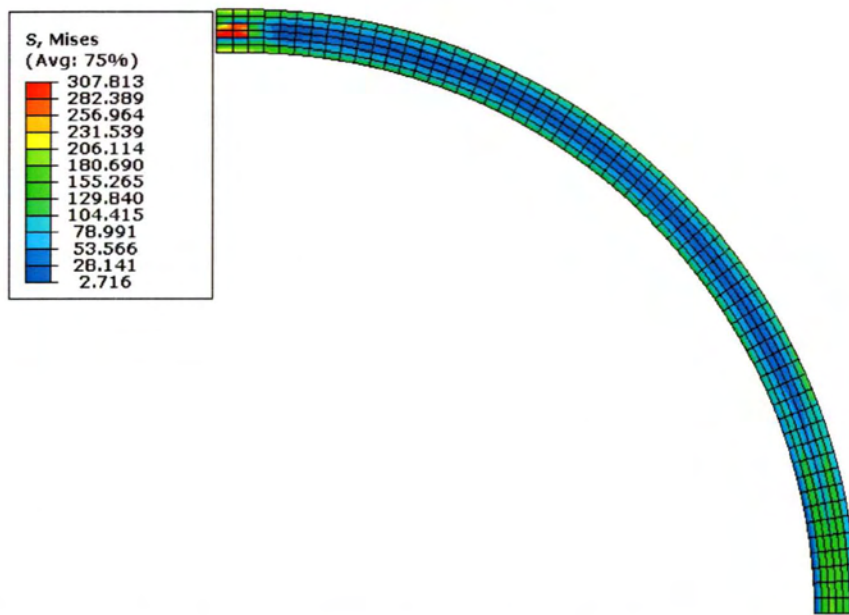
$$ov = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}}$$

είναι σημαντική για την ανάλυσή μας.

Αρχικό σχήμα οβάλ μπορεί να αποκτήσει ένας αγωγός είτε λόγω της κατασκευής του είτε λόγω μόνιμων παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια της ζωής του από κάποια εξωτερική φόρτιση (εξωτερικό χτύπημα) ή κατά τη διάρκεια της πόντισής του αγωγού όπου ο σωλήνας μας υφίσταται σημαντικές μηχανικές καταπονήσεις. Σε κάθε περίπτωση είναι λογικό να υποθέσουμε ο σωλήνας μας έχει μια διατομή η οποία έστω και σε μικρό βαθμό είναι οβάλ.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήσαμε στο κεφάλαιο 2 για τη δημιουργία της αρχικής ατέλειας ήταν να υποθέσουμε μια αρχική μετατόπιση σε ένα κόμβο του δακτυλίου ώστε να παραμορφωθεί ελαστο-πλαστικά και στη συνέχεια να αφήσουμε το μοντέλο μας να επανέλθει ελαστικά σε μια ελαφρώς παραμορφωμένη θέση από την αρχική. Αυτό προσομοιώνει την περίπτωση που ο αγωγός δέχεται ένα χτύπημα. Με αυτή τη διαδικασία αναγκαστικά εισάγουμε στο μοντέλο κάποιες αρχικές παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις όπως βλέπουμε και στο σχήμα 33.





**Σχήμα 30 Κατανομή της τάσης von Mises, μετά την επιβολή της μετατόπισης στον άνω κόμβο και την αποφότση.**

Με αυτή τη μεθοδολογία εισάγουμε παραμένουσες τάσεις στο μοντέλο μας ενώ δεν μπορούμε να πετύχουμε την οβάλ μορφή που επιθυμούμε καθώς ελέγχουμε μόνο την τιμή της αρχικής μετατόπισης, όχι το συνολικό σχήμα της διατομής.

Εναλλακτικά, μπορούμε να παρακάμψουμε και τα δυο αυτά στάδια της ανάλυσης αν στο μοντέλο μας δώσουμε ένα ελλειπτικό σχήμα εξ αρχής.

Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να θεωρήσουμε την όποια αρχική οβαλότητα επιθυμούμε χωρίς να εισάγουμε παραμένουσες τάσεις στο πρόβλημα, αποσυνδέοντας έτσι την αρχική γεωμετρία από τις αρχικές τάσεις.

Για να βρούμε τους άξονες της έλλειψης αρκεί να λύσουμε την κάτωθι

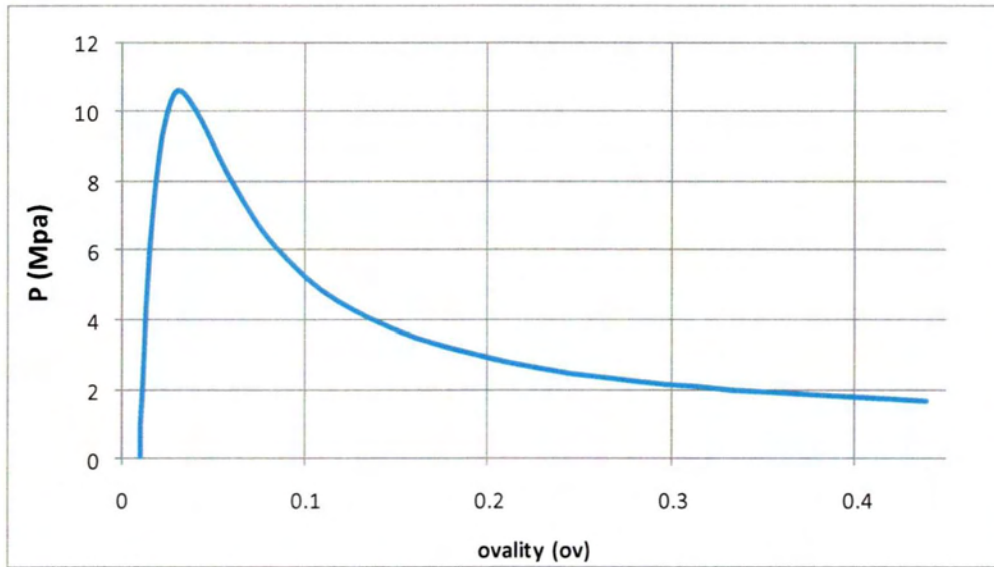
$$ov = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}}$$

αν βάλουμε την επιθυμητή τιμή του παράγοντα  $ov$  και  $D_{max}=914.4\text{mm}$  που είναι και η μέγιστη τιμή της διαμέτρου που μελετάμε. Το πάχος της διατομής είναι 30.1 mm.

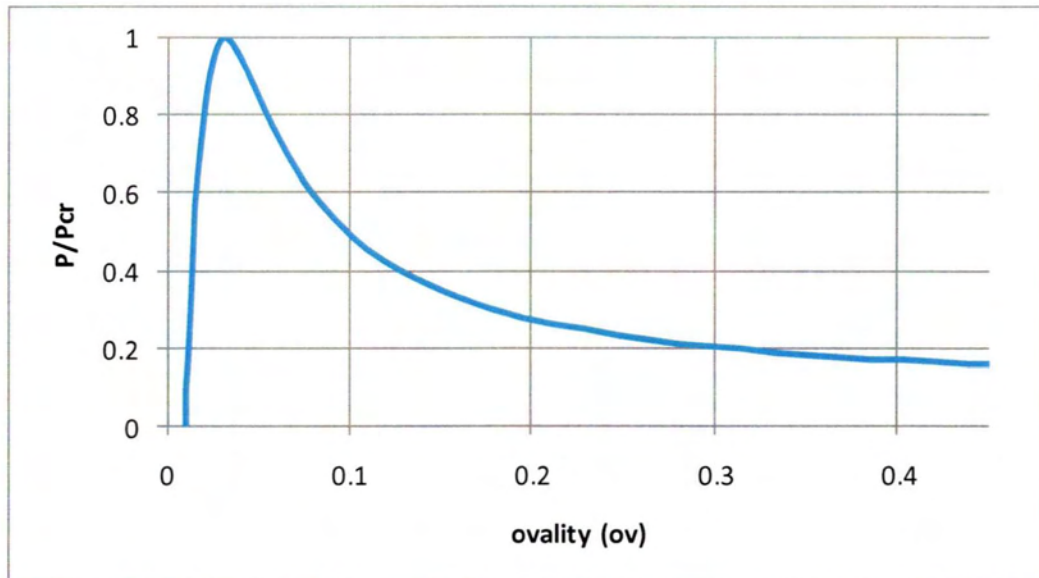
Το μοντέλο στην περίπτωση θα είναι παρόμοιο με αυτό που έχουμε ήδη περιγράψει και αποτελείται από το ένα τέταρτο μιας έλλειψης με 360 στοιχεία CPS4R και τις

ίδιες συνοριακές συνθήκες που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2 . Η ανάλυση διεξάγεται σε ένα βήμα όπου επιβάλλουμε εξωτερική πίεση με τη μέθοδο του Riks.

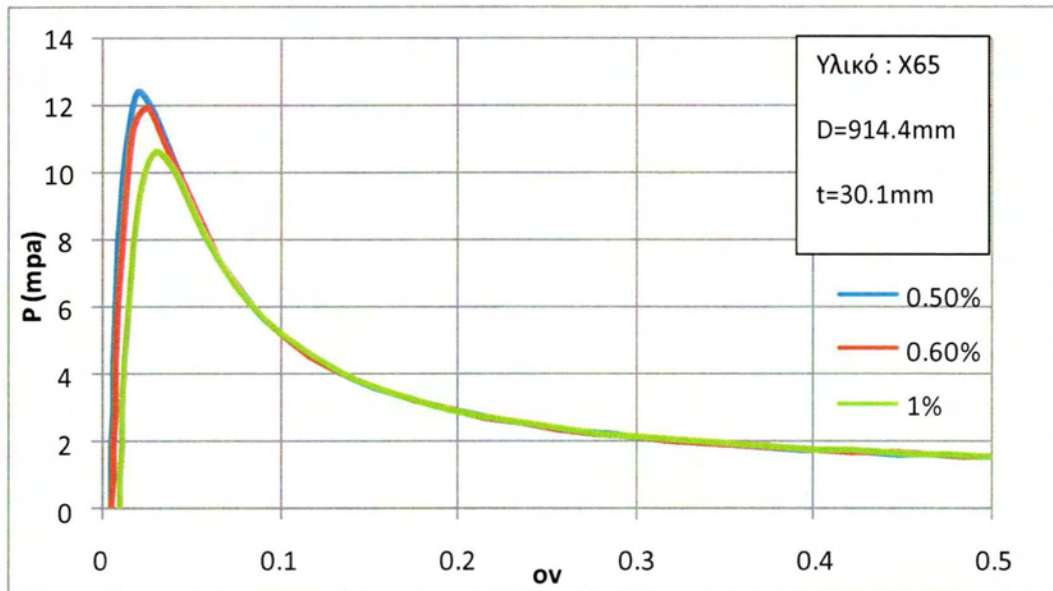
Με τα αποτελέσματα της ανάλυσης, μπορούμε να χαράξουμε τα διαγράμματα πίεσης - ovaliza on για διάφορες τιμές της αρχικής ατέλειας σχήματος οβάλ.



**Σχήμα 31** Διάγραμμα P-ov για αγωγό με αρχική οβαλότητα 1% πάχος 30.1 mm μέγιστης διαμέτρου 914.4mm και υλικού X65.

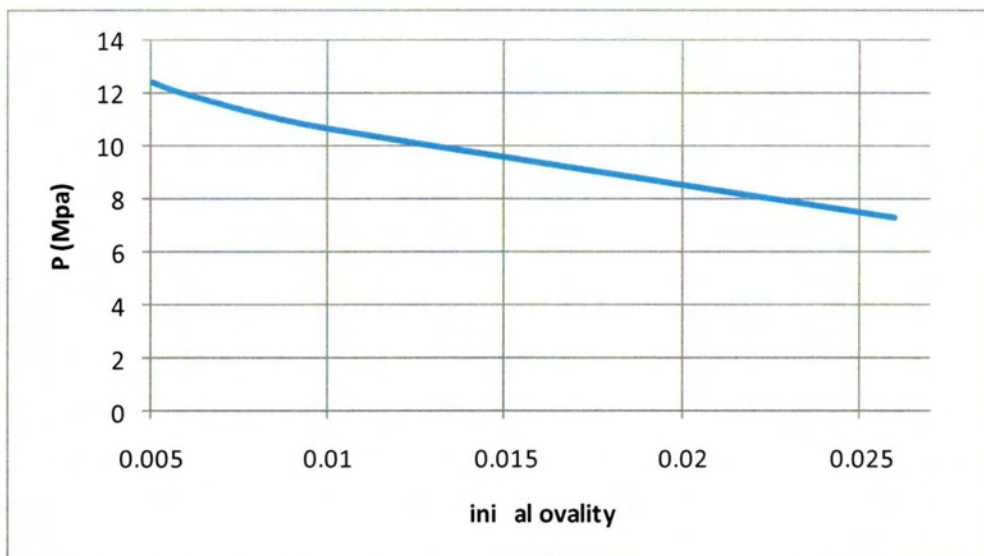


**Σχήμα 32** Το προηγούμενο διάγραμμα κανονικοποιημένο ως προς την πίεση κατάρρευσης.



**Σχήμα 33 Οι δρόμοι ισορροπίας για διάφορες τιμές της αρχικής οβαλότητας**

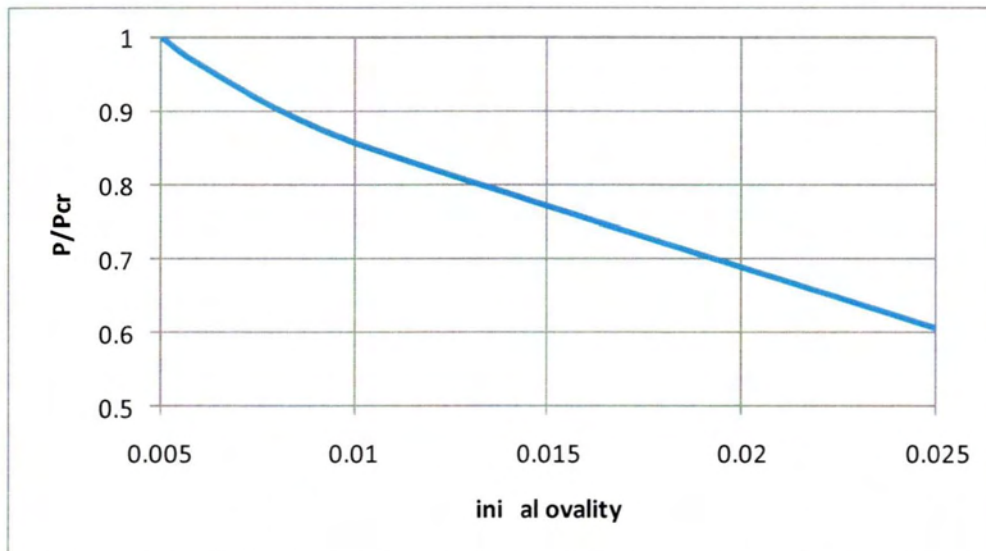
Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, προκύπτει από το διάγραμμα του σχήματος 36 η τιμή της οριακής πίεσης εξαρτάται από την τιμή της αρχικής οβαλότητας της διατομής του αγωγού. Σύμφωνα με την ανάλυση με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που μόλις παρουσιάσαμε προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα του σχήματος 37 που δείχνει τη σχέση της οριακής πίεσης με την αρχική οβάλ ατέλεια:



**Σχήμα 34 Διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης πίεσης με την αρχική οβαλότητα της διατομής**



Κανονικοποιώντας το παραπάνω διάγραμμα έχουμε μια καλύτερη εικόνα για την μείωση της αντοχής του αγωγού. Παρατηρούμε ότι η πτώση της οριακής πίεσης είναι πολύ σημαντική ακόμα και για μικρές τιμές της αρχικής οβαλότητας.



**Σχήμα 35 Κανονικοποιημένο διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης πίεσης με την αρχική οβαλότητα της διατομής**

Από το σχήμα 38 προκύπτει ότι ενδέχεται να υπάρχει μέχρι και 40% υποβάθμιση της αντοχής λόγω της αρχικής ατέλειας σχήματος οβάλ του αγωγού μου για τιμές αρχικής οβαλότητας 2%. Ακόμα και για 1% αρχική οβαλότητα η πίεση μπορεί να υποβαθμιστεί κατά 15% από αυτή της οριακής πίεσης για αρχική οβαλότητα 0.5%. Πρέπει να σημειώσουμε ότι αυτή η σημαντική υποβάθμιση της οριακής πίεσης λόγω αυτής της ατέλειας είναι σημαντική και τα αντίστοιχα πρότυπα σχεδίασης αγωγών την λαμβάνουν υπόψη. Το πρότυπο DNV δέχεται ως ελάχιστη τιμή για αρχική ατέλεια της διατομής σε σχήμα οβάλ 0.5%.

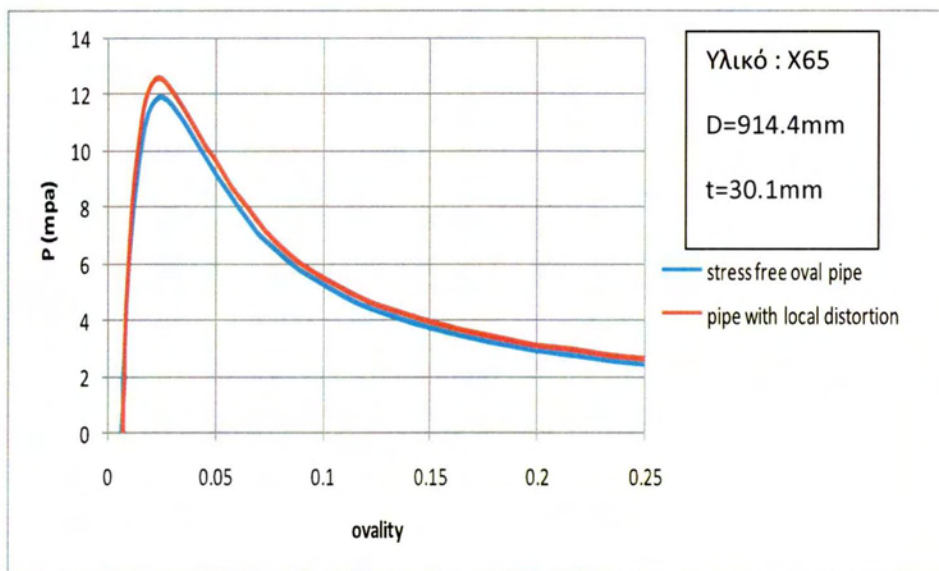
Σκόπιμο είναι να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα από αυτό το μοντέλο με τα αποτελέσματα από το μοντέλο στο οποίο επιβάλλουμε αρχική μετατόπιση στο πρόβλημα για τη δημιουργία της αρχικής ατέλειας και που περιγράψαμε εκτενώς στο κεφάλαιο 2.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί έχουμε χαράξει τους δρόμους ισορροπίας για τα δυο μοντέλα. Και στις δυο περιπτώσεις θεωρούμε ίδια τιμή της αρχικής οβαλότητας 0.6%. Στην πρώτη περίπτωση την θεωρήσαμε με την μέθοδο που περιγράψαμε στο

κεφάλαιο 2 (επιβολή δηλαδή της αρχικής μετατόπισης σε ένα κόμβο του μοντέλου και αποφόρτιση) ενώ στην άλλη περίπτωση θεωρούμε την ατέλεια με αρχικό σχήμα οβάλ.

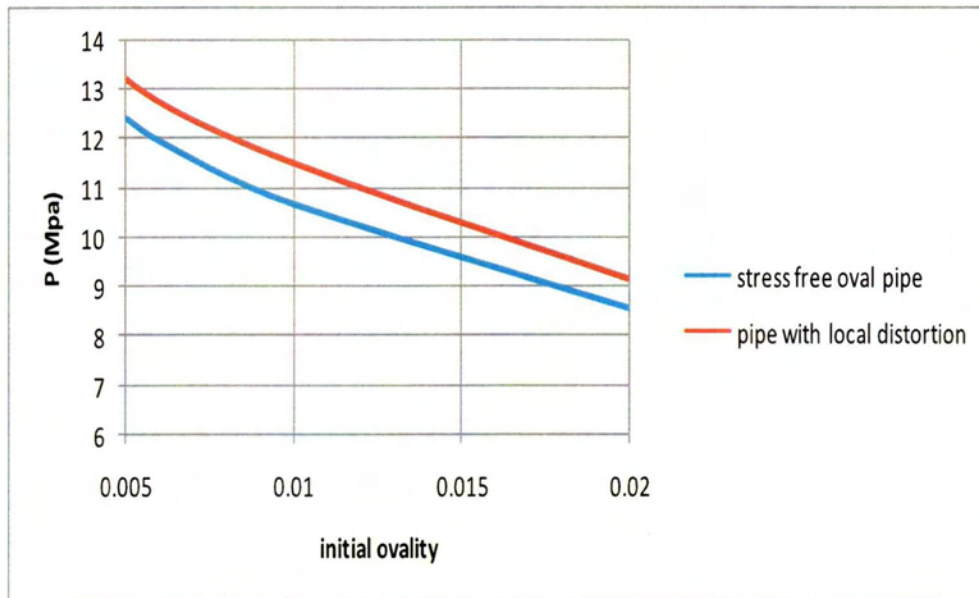
Στο διάγραμμα 39 Παρατηρούμε ότι αυτή η διαφορά στην οριακή πίεση  $P_{max}$  δεν είναι σημαντική στις δυο περιπτώσεις.

Αυτή η διαφορά οφείλεται στις πλαστικές παραμορφώσεις και τις παραμένουσες τάσεις που εισάγονται με την επιβολή της συγκεντρωμένης μετατόπισης.



Σχήμα 36 Οι δρόμοι ισορροπίας των δυο μοντέλων για ίδια αρχική οβαλότητα.





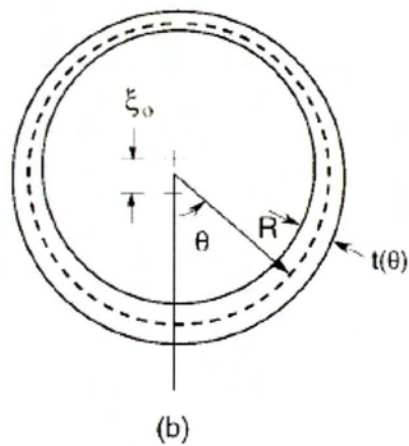
Σχήμα 37 Διάγραμμα οριακής πίεσης σε σχέση με την αρχική ατέλεια οβάλ σχήματος.

### 3.2 Μεταβολή Πάχους Αγωγού κατά την περιφέρεια

Ένα ακόμα είδος ατέλειας που επηρεάζει σημαντικά την αντοχή ενός αγωγού σε εξωτερική πίεση είναι η μεταβολή το πάχους του αγωγού κατά την περίμετρό του. Οι διαφορές αυτές στο πάχος δεν αλλάζουν σημαντικά συνήθως για μήκος αγωγού 10 διαμέτρων<sup>11</sup>. Τέτοιου είδους κατασκευαστικές ατέλειες είναι εντονότερες σε αγωγούς χωρίς ραφή, αλλά μπορούν να εμφανιστούν σε αρκετούς αγωγούς λόγω διάβρωσης των εσωτερικών τοιχωμάτων του αγωγού. Επίσης μπορούμε να εξιδανικεύσουμε αυτή την ατέλεια ως μια εκκεντρότητα της εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας του αγωγού. Η ατέλεια αυτή θεωρώντας κυκλικό σχήμα για την εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από την παράμερο:

$$\varepsilon = \frac{(t+\xi o)-(t-\xi o)}{2t} = \frac{\xi o}{t} \quad (3.2.1)$$

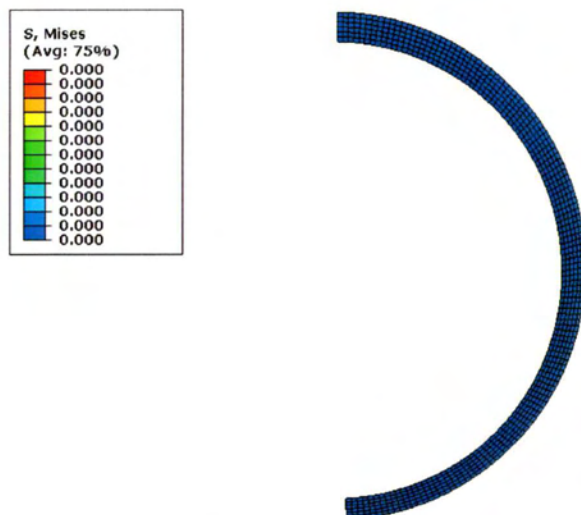
<sup>11</sup> Kyriakides, S και Corona, E. 2007. *Mechanics of offshore pipelines vol. 1*. Oxford : Elsevier, 2007.



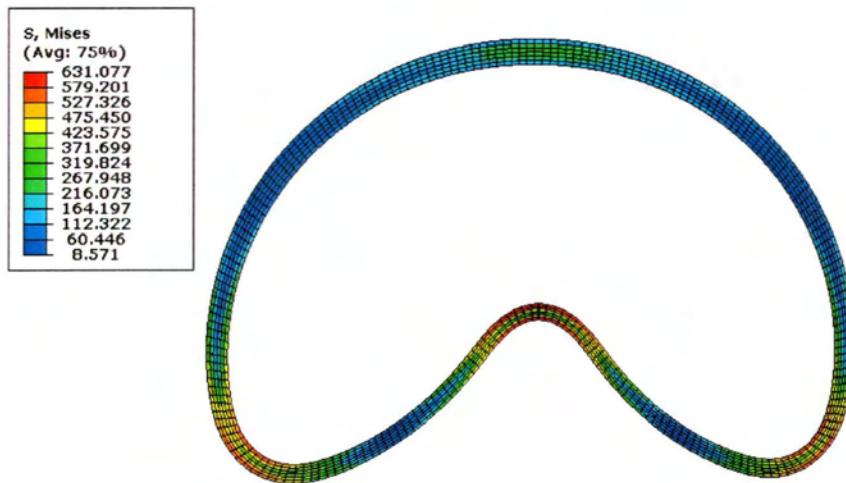
**Σχήμα 38** Σχηματική αναπαράσταση της παραμέτρου  $\xi_0$ .

όπου  $\xi_0$  είναι η απόσταση των κέντρων των κύκλων της εξωτερικής και εσωτερικής περιφέρειας του τοιχώματος του αγωγού.

Αξιοποιώντας την συμμετρία του προβλήματος απαιτείται να μελετήσουμε το μισό μόνο πρόβλημα, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Επομένως χρησιμοποιούμε τη μορφή του μοντέλου που φαίνεται στο σχήμα 42. Ο τύπος και ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιούμε είναι αυτός που χρησιμοποιήσαμε και στα προηγούμενα παραδείγματα με 4 CPS4R στοιχεία κατά το πάχος και 120 στοιχεία κατά την περιφέρεια.



**Σχήμα 39** Το απαρομορφωτο μοντέλο.

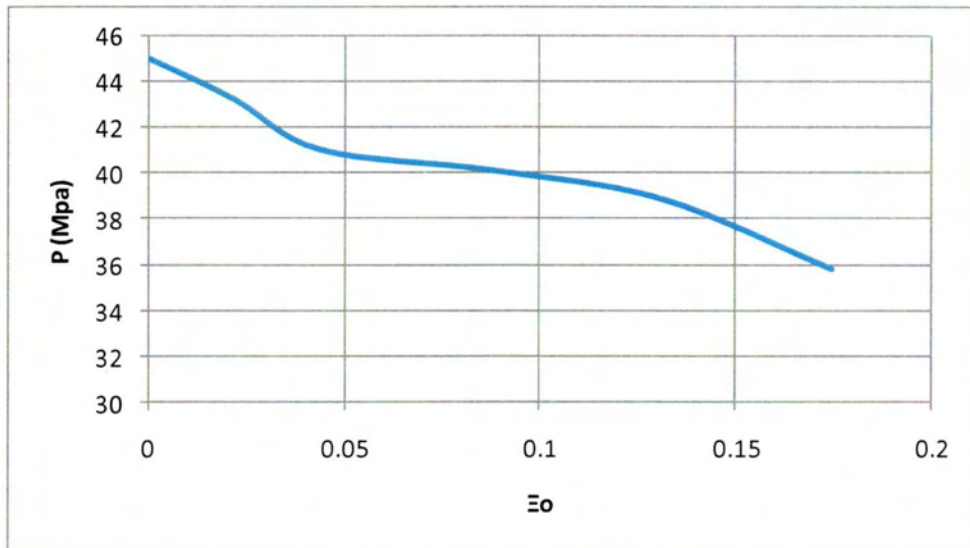


**Σχήμα 40 Η διατομή που μελετάμε αφού έχει ήδη καταρρεύσει.**

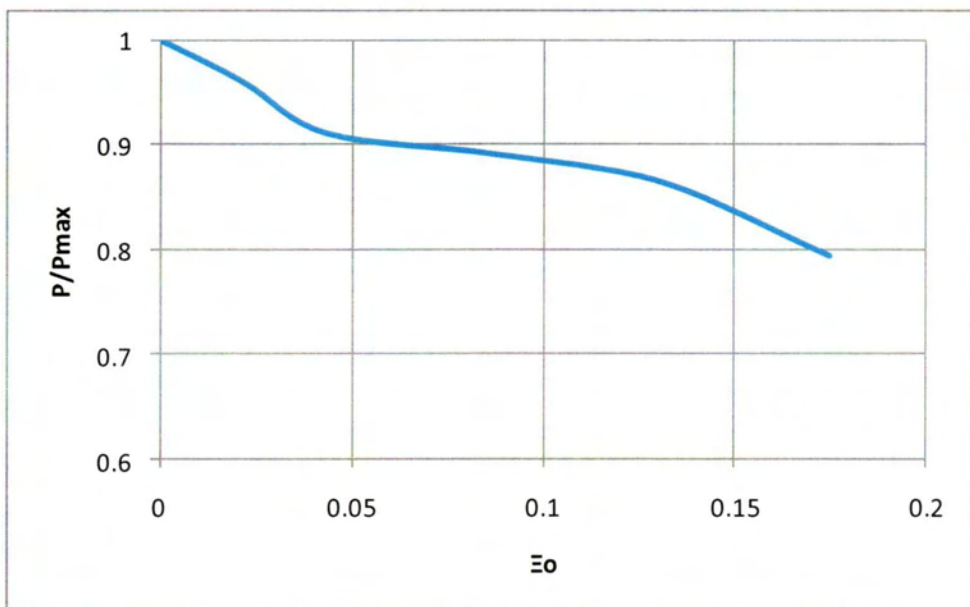
Στο σχήμα 43 φαίνεται η μεταλυγισμική γεωμετρία του παραμορφωμένου σωλήνα.

Παρατηρούμε πως στην περίπτωση αυτή έχω διαφορετική εικόνα της παραμορφωμένης, δηλαδή δεν έχω διπλή συμμετρία αλλά η συμμετρία είναι μόνο κατά τον άξονα  $\gamma$ .

Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία της ανάλυσης για διάφορες τιμές του  $\Xi$  τα αποτελέσματα συνοψίζονται στο διάγραμμα του σχήματος 44 που δείχνει την μεταβολή της οριακής πίεσης με την τιμή του  $\Xi$  για αγωγό με εξωτερική διάμετρο 914.4mm, λόγο  $D/t=20$  και όριο διαρροής 450 MPa.



Σχήμα 41 Διάγραμμα P-  $\Xi_o$  για διατομή με  $D/t=20$

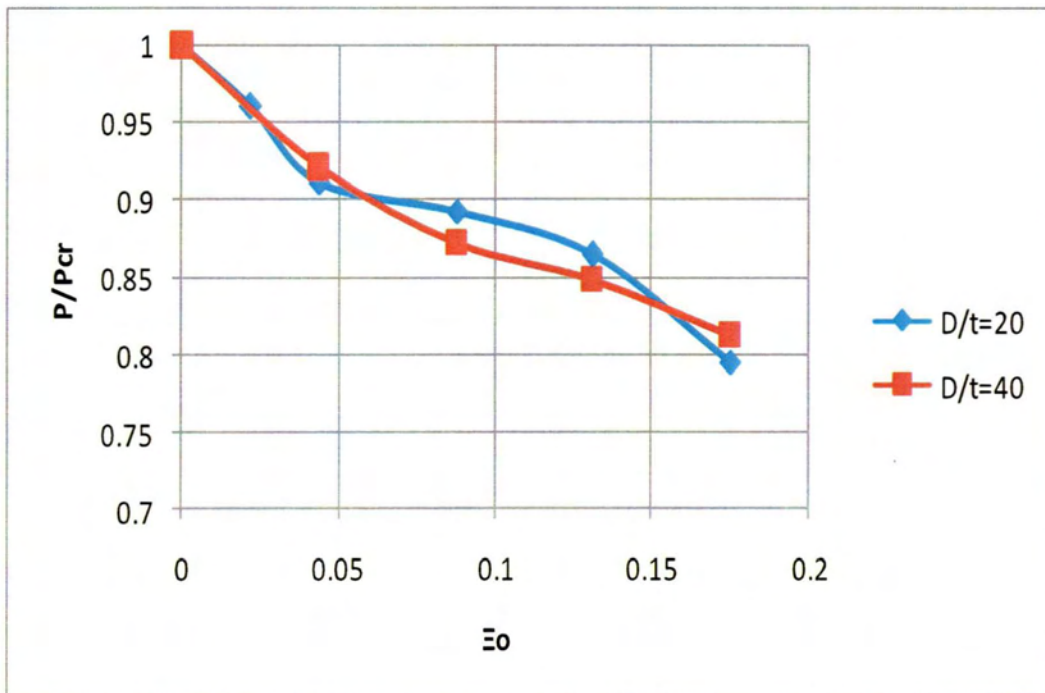


Σχήμα 42 Το ίδιο διάγραμμα κανονικοποιημένο, όπου διακρίνουμε καλύτερα πόσο υποβαθμίζεται η αντοχή σε σχέση με την παράμετρο  $\Xi$ .

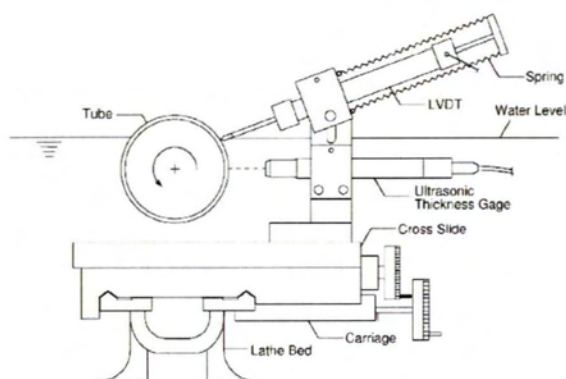
Αντιστοίχως μπορούμε να χαράξουμε και αντίστοιχα διαγράμματα για διαφορετικούς λόγους  $D/t$  (Σχήμα 46). Οι καμπύλες που προκύπτουν από τα αριθμητικά αποτελέσματα έχουν παρόμοια συμπεριφορά ως προς την μείωση της αντοχής του αγωγού παρατηρούμε ότι μπορούμε να έχουμε μέχρι και 20% μικρότερη οριακή πίεση όταν η εκκεντρότητα είναι της τάξης του 0.15.



Συμπεραίνουμε ότι η συγκεκριμένη ατέλεια έχει επίδραση στην αντοχή του αγωγού σε εξωτερική πίεση. Η μείωση είναι αισθητή για μεγάλες τιμές της εκκεντρότητας οπότε δεν μπορεί να θεωρηθεί ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στο σχεδιασμό του αγωγού αν δεν ξεπερνά κάποια όρια. Επίσης, είναι μια ατέλεια που μπορεί να συνυπάρχει με την ατέλεια που μελετήσαμε στην προηγούμενη παράγραφο οπότε και μπορεί να δράσει αθροιστικά.



Σχήμα 43 Μείωση της αντοχής σε σχέση με την ατέλεια πάχους για δυο τιμές του λόγου  $D/t$ .

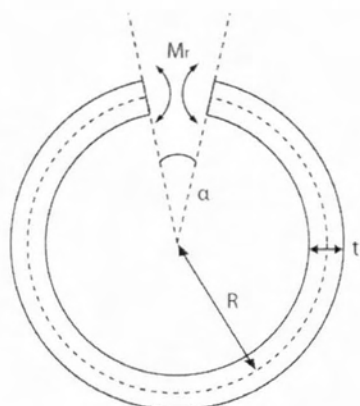


Σχήμα 44 Διάταξη μέτρησης ατελειών σε αγωγού.



### 3.3 Η Επίδραση των Παραμενουσών Τάσεων

Οι παραμένουσες τάσεις εμφανίζονται στο τοίχωμα του σωλήνα κατά το στάδιο της παρασκευής του στο σωληνοργείο. Είτε είναι αγωγός με ραφή είτε χωρίς υπάρχουν πάντα παραμένουσες τάσεις, οι οποίες όμως έχουν μεγαλύτερες τιμές σε αγωγούς με ραφή, διότι κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης έχω μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές και σύνδεση των άκρων ενός ελάσματος. Έχουν αναπτυχθεί ειδικές τεχνικές μέτρησης των παραμενουσών τάσεων, μερικές από τις οποίες είναι σχετικά απλές. Για να τις μετρήσουμε, απομονώνουμε ένα δακτύλιο από το σωλήνα, στον οποίο κάνουμε μια τομή στο τοίχωμα όπως φαίνεται στο σχήμα 48. Λόγω των παραμενουσών τάσεων θα έχει την τάση να «ανοίξει» ή να «κλείσει» ανάλογα από την κατανομή των παραμενουσών τάσεων .

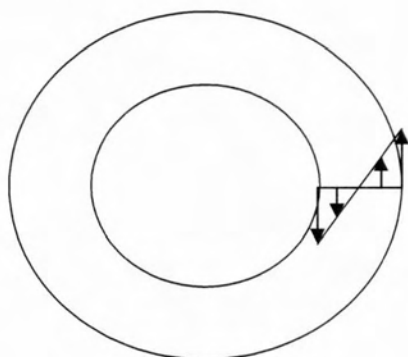


**Σχήμα 45 Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου μέτρησης των παραμενουσών τάσεων**

Μετρώντας την γωνία που «άνοιξε» ή «έκλεισε» στη τομή του δακτυλίου μπορούμε να εκτιμήσουμε την μέγιστη τιμή των παραμενουσών τάσεων χρησιμοποιώντας τη σχέση :

$$|\sigma_{res}| = \frac{E t}{4\pi R} \alpha \quad (3.3.1)$$

Το προφίλ των τάσεων κατά το πάχος του αγωγού μπορεί να θεωρηθεί συνεχές, γραμμικό, με τιμή μηδεν στο μέσο του πάχους και μέγιστες τιμές στις επιφάνειες του αγωγού.



**Σχήμα 46 προφίλ  
παραμενουσών τάσεων**

Οι τάσεις στην εξωτερική (ή αντίστοιχα στην εσωτερική) επιφάνεια μπορεί να είναι θετικές/εφελκυστικές (αν ο δακτύλιος τείνει να «ανοίξει») ή αρνητικές/θλιπτικές (αν ο δακτύλιος τείνει να «κλείσει»). Οπότε με τη σχέση (3.3.1) μπορούμε να υπολογίσουμε με αρκετή αξιοπιστία τη μέγιστη τιμή των παραμενουσών τάσεων.

Για να προσομοιώσουμε την επίδραση που έχουν οι παραμένουσες τάσεις στην αντοχή του σωλήνα σε εξωτερική πίεση, θα θεωρήσουμε το μοντέλο που αναπτύξαμε στο κεφάλαιο 3.1. Αυτό είναι με το δι-διάστατο μοντέλο ελλειπτικού δακτυλίου με αρχική οβάλ διατομή 0.5% και πάχος 30.1 mm. Θα χρησιμοποιήσουμε, επίσης, τα ίδια στοιχεία επίπεδης έντασης, και τον ίδιο αριθμό στοιχείων για να έχουμε άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Η εισαγωγή των παραμενουσών τάσεων γίνεται ως εξής:

Γνωρίζουμε πως έχουμε έξι στοιχεία κατά το πάχος με ένα σημείο ολοκλήρωσης ανά στοιχείο, επομένως, για να έχουμε ένα προφίλ τάσεων παρόμοιο με το πραγματικό, θα πρέπει να δώσουμε στο κάθε στοιχείο την κατάλληλη τιμή των παραμενουσών τάσεων που θα έπρεπε να είχε το στοιχείο σύμφωνα με την παραδοχή για το γραμμικό προφίλ των τάσεων. Μια δυσκολία έγκειται στο ότι τα πεπερασμένα στοιχεία με τα οποία δουλεύουμε δέχονται τις παραμένουσες τάσεις

μόνο στο καθολικό σύστημα θα πρέπει να στρέψουμε τον τανυστή των τάσεων κατά την κατάλληλη γωνία σε κάθε σημείο χρησιμοποιώντας τις κλασικές σχέσεις για το μετασχηματισμό των τάσεων από τη Μηχανική των Υλικών. Επειδή είναι μεγάλος ο αριθμός των στοιχείων η διαδικασία προγραμματίζεται ώστε να αυτοματοποιηθεί<sup>12</sup>.

Μετά την εισαγωγή των παραμενουσών τάσεων, η ανάλυση προχωρά με δυο βήματα, το πρώτο δεν έχει εξωτερικό φορτίο ώστε για να ισορροπήσουν οι τάσεις στο εσωτερικό του σωλήνα και στο δεύτερο επιβάλουμε εξωτερική πίεση με τη μέθοδο Riks.

Εισάγουμε επίσης την παράμετρο των παραμενουσών τάσεων

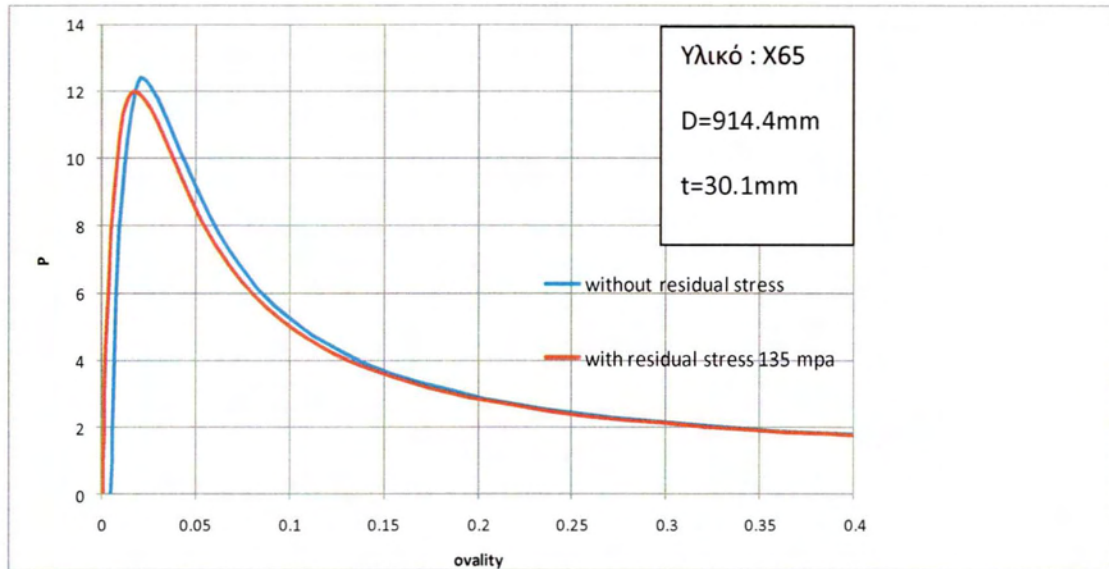
$$S_r = \frac{|\sigma_{res}|}{\sigma_y} \quad (3.3.2)$$

όπου  $\sigma_y = 450$  MPa είναι το όριο διαρροής του υλικού, το  $\sigma_{res}$  είναι η μέγιστη τιμή των παραμενουσών τάσεων. Η παράμετρος  $S_r$  εκφράζει με αδιάστατο τρόπο το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων

Η παράμετρος  $S_r$  δηλώνει πόσο μεγάλη είναι η μέγιστη τιμή των παραμενουσών τάσεων σε σχέση με το όριο διαρροής του υλικού.

Το σχήμα 50 δείχνει το δρόμο ισορροπίας για ένα σωλήνα με διάμετρο 914.4 mm , πάχος 30.1 mm και υλικό με όριο διαρροής 450 MPa, με και χωρίς παραμένουσες τάσεις, έτσι όπως προκύπτει από τα αριθμητικά αποτελέσματα.

<sup>12</sup> Ο αναγνώστης μπορεί να διαβάσει ένα παράδειγμα τέτοιου προγράμματος στο Παράρτημα της εργασίας.

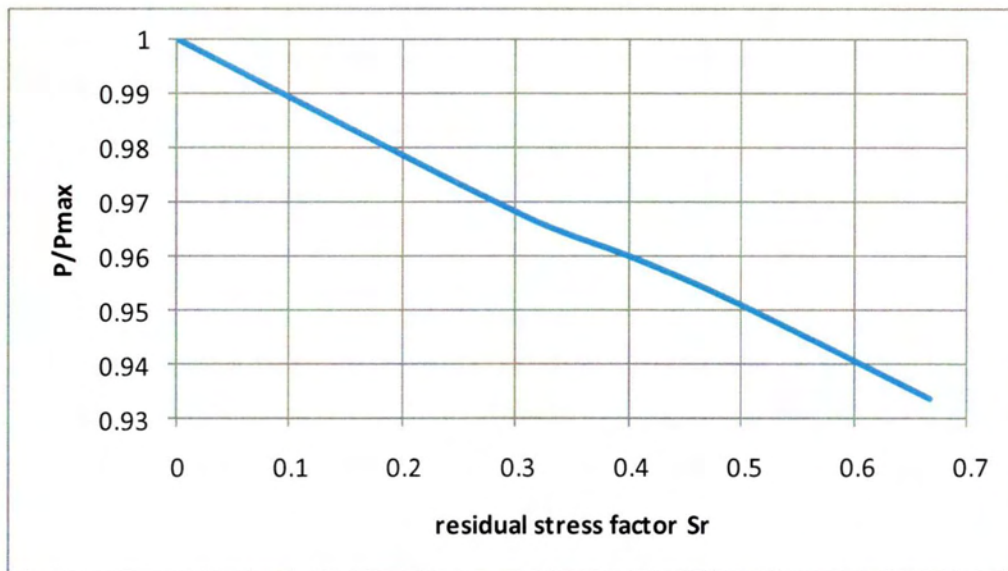


**Σχήμα 47 Δρόμοι ισορροπίας για ένα μοντέλο χωρίς παραμένουσες τάσεις και με παραμένουσες τάσεις.**

Παρατηρούμε ότι με την ίδια αρχική γεωμετρία του αγωγού, οι παραμένουσες τάσεις έχουν επίδραση στην αντοχή σε εξωτερική πίεση.

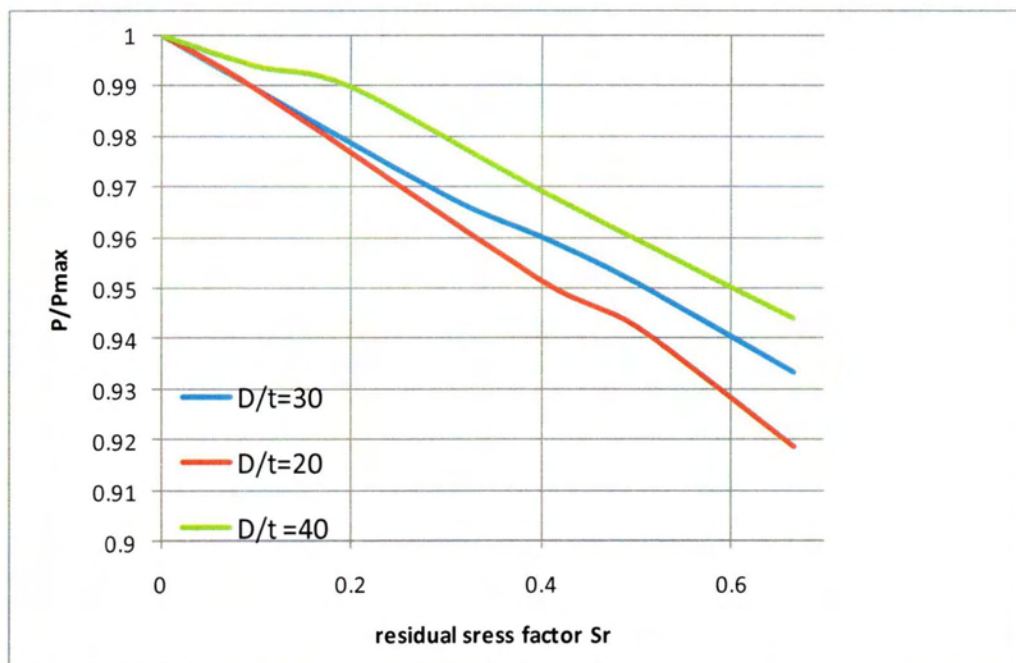
Η διατομή μας καταρρέει σε μικρότερη πίεση αφού με τις παραμένουσες τάσεις το υλικό περνά στην πλαστική ζώνη ταχύτερα. Συγκεκριμένα, οι τάσεις λόγω εξωτερικής πίεσης προστίθεται στις παραμένουσες, επομένως οι συνολικές τάσεις στη διατομή μας ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού υπό μικρότερη εξωτερική πίεση, μειώνοντας έτσι την αντοχή του αγωγού σε εξωτερική πίεση.

Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία αυτή για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $S_r$  μπορούμε να πάρουμε τα διαγράμματα των σχημάτων 51,52.



**Σχήμα 48**  $D/t=30$ , Βλέπουμε πως υποβαθμίζεται η αντοχή σε εξωτερική πίεση

Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία και για άλλους λόγους  $D/t$  εξετάζουμε την επίδραση που έχουν οι παραμενουσες τάσεις σε διάφορα πάχη αγωγών.



**Σχήμα 49** Επίδραση των παραμενουσών τάσεων για διάφορους λόγους  $D/t$ .

Από το διάγραμμα του σχήματος 52 συμπεραίνουμε ότι όσο αυξάνεται το πάχος του σωλήνα τόσο μεγαλώνει και η επίδραση των παραμενουσών τάσεων. Η επίδραση των παραμενουσών τάσεων δεν είναι ιδιαίτερα έντονη, η πτώση της οριακής πίεσης είναι λιγότερο από 10% ακόμα και όταν η παράμετρος  $S$  είναι πάνω από 0.6.



### 3.4 Επίδραση της Ανισοτροπίας του Υλικού

Ένα υλικό εμφανίζει ανισοτροπία, όταν έχει διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες σε διαφορετικές κατευθύνσεις μέσα στο υλικό.

Σε χαλύβδινους σωλήνες, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται σε υποθαλάσσιους αγωγούς μας ενδιαφέρει η διαφορά που παρουσιάζει το όριο διαρροής του υλικού κατά την περιμετρική και αξονική διεύθυνση του σωλήνα. Αυτή η διαφορά στο όριο διαρροής ανάμεσα στις δυο αυτές διευθύνσεις οφείλεται συνήθως σε εργοσκήρυνση κατά τη διαδικασία παραγωγής του σωλήνα.

Αυτή η συμπεριφορά του υλικού, δηλαδή, η ανισοτροπία ως προς το όριο διαρροής μπορεί να μοντελοποιηθεί αν εισάγουμε τους λόγους της ανισοτροπίας του ορίου

$$\text{διαρροής } R_{ij} = \frac{\overline{\sigma}_{ij}}{\sigma_y} \quad (3.4.1)$$

όπου  $\overline{\sigma}_{ij}$  το όριο διαρροής που μετράμε πειραματικά σε κάθε κατεύθυνση, και  $\sigma_y$  το όριο διαρροής που θα είχαμε αν το υλικό δεν παρουσίαζε ανισοτροπία δηλαδή το όριο διαρροής αναφοράς που δίνουμε για την πλαστικότητα του μετάλλου.

Για να περιγράψουμε την πλαστικότητα ενός μεταλλικού υλικού με ανισοτροπία στο όριο διαρροής μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την συνάρτηση διαρροής του Hill<sup>13</sup> που αποτελεί μια απλή επέκταση της συνάρτησης του von Misses. Εκφράζοντας τις συνιστώσες του τανυστή των τάσεων σε καρτεσιανές συντεταγμένες το κριτήριο του Hill θα έχει τη μορφή:

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

όπου F,G,H,L,M,N σταθερές που προσδιορίζονται με κατάλληλα πειράματα στο υλικό και ορίζονται ως εξής:

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

<sup>13</sup> Για περισσότερες λεπτομέρειες πάνω στη συγκεκριμένη μεθοδολογία θα μπορούσε κάποιος να ανατρέξει στο ABAQUS documenta on.

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

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

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

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

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

Θυμίζουμε ότι ισχύει  $\tau_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$  οπότε καταλήγουμε ότι οι έξι παράμετροι που απαιτούνται για τον ορισμό του κριτηρίου του Hille είναι οι εξής (με τη σειρά που ζητούνται):

$$\frac{\bar{\sigma}_{11}}{\sigma_y}, \quad \frac{\bar{\sigma}_{22}}{\sigma_y}, \quad \frac{\bar{\sigma}_{33}}{\sigma_y}, \quad \frac{\bar{\sigma}_{12}}{\tau_y}, \quad \frac{\bar{\sigma}_{13}}{\tau_y}, \quad \frac{\bar{\sigma}_{23}}{\tau_y}$$

Όλες αυτές οι τιμές πρέπει να είναι θετικές. Αν όλες οι σταθερές F,G,H,L,M,N είναι θετικές τότε η συνάρτηση διαρροής είναι καλώς ορισμένη αν όμως μια ή περισσότερες είναι αρνητικές τότε υπάρχει η πιθανότητα να έχω αρνητική τιμή κάτω από τη ρίζα της συνάρτησης έτσι πρέπει να είμαστε αρκετά προσεκτικοί στο τι τιμές θα δώσουμε.

Για να μελετήσουμε τώρα πάνω στο μοντέλο μας την επίδραση αυτής της ατέλειας θα ορίσουμε την παράμετρο

$$s = \frac{\sigma_{\theta y}}{\sigma_{\chi y}}$$

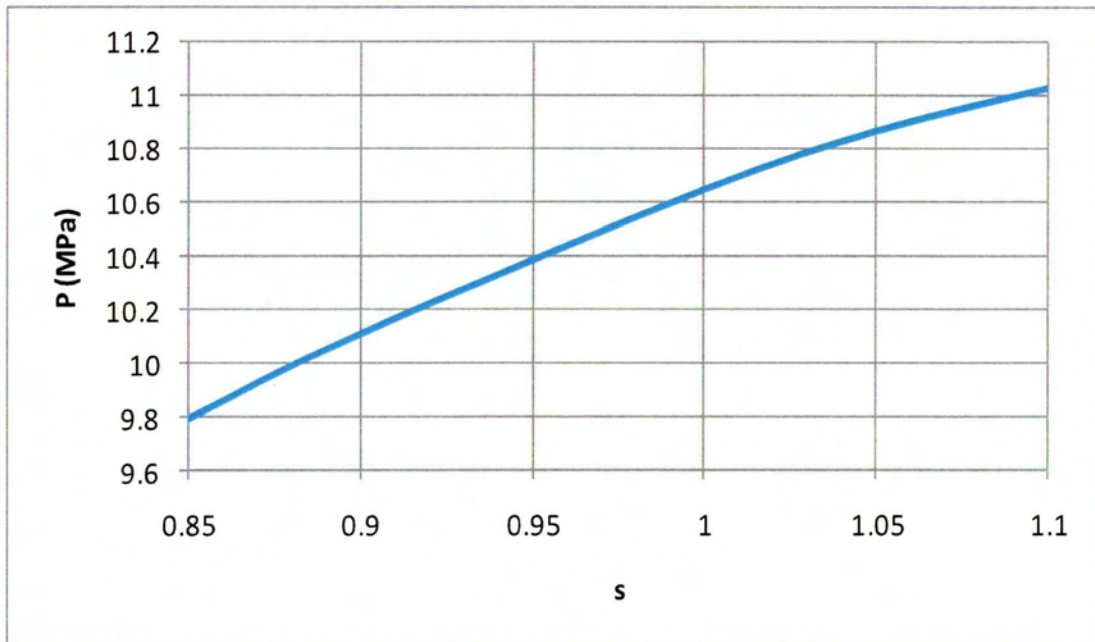
όπου το  $\sigma_{\theta y}$  το όριο διαρροής κατά την περιφερική κατεύθυνση και  $\sigma_{\chi y}$  το όριο διαρροής κατά το μήκος του αγωγού.

Ο σωλήνας είναι αυτός που έχουμε θεωρήσει και στα προηγούμενα κεφάλαια με την ίδια γεωμετρία  $D=36\text{in}$ ,  $t=30.1\text{mm}$  και αρχική οβαλότητα 1%, συνοριακές συνθήκες,. Στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων προσθέτουμε ένα νέο κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων με αρχή των αξόνων το κέντρο της διατομής του αγωγού. Αυτό το σύστημα θα το συνδυάζουμε με το υλικό μας, δηλαδή το ABAQUS θα «βλέπει» τις ιδιότητες του υλικού μέσα από το καινούριο σύστημα συντεταγμένων, έτσι, θα μας δώσει την κατευθυντικότητα του υλικού με βάση τα όσα έχουμε πει πιο πάνω.

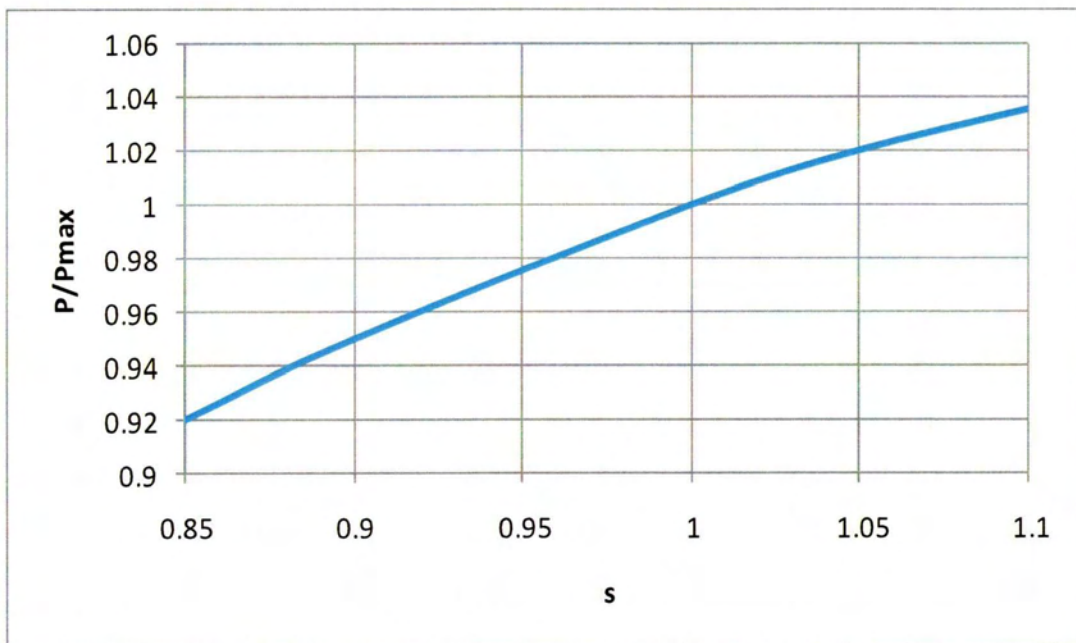
Χρησιμοποιώντας την εντολή \*POTENTIAL στο ABAQUS δίνουμε τις παραμέτρους  $R_{ij}$  στο κυλινδρικό πια σύστημα συντεταγμένων. Αν θεωρήσουμε ως αναφορά το  $\sigma_{xy} = 450 \text{Mpa}$ , ίδιο δηλαδή με το όριο διαρροής που χρησιμοποιήσαμε στα προηγούμενα προβλήματα θα δώσουμε στην παράμετρο  $s$  τιμές που κυμαίνονται από 0.85 μέχρι 1.1.

Αφού μελετώ μόνο την ανισοτροπία μεταξύ αξονικής και περιμετρικής διεύθυνσης οι υπόλοιπες σταθερές της ανισοτροπίας  $R_{ij}$  μπορούν να πάρουν τιμή μονάδα.

Με την ανάλυση πεπερασμένων υπολογίζω τις τιμές της οριακής πίεσης για διάφορες τιμές της ανισοτροπίας και κατασκευάζω το αντίστοιχο διάγραμμα για την επίδραση που έχει η συγκεκριμένη ατέλεια στην αντοχή του αγωγού σε εξωτερική πίεση (σχήμα 53).



Σχήμα 50 Μεταβολή της οριακής πίεσης για διάφορες τιμές της ανισοτροπίας  $s$ .



Σχήμα 51 επίδραση της ανισοτροπίας του υλικού στην αντοχή του αγωγού.

Από τα παραπάνω σχήματα διαπιστώνουμε ότι η ανισοτροπία μπορεί να έχει αξιοσημείωτες επιπτώσεις στην αντοχή ενός αγωγού. Παρατηρούμε επίσης ότι ανάλογα με την τιμή του λόγου  $s$  υπάρχει θετική ή αρνητική επίδραση στην αντοχή σε εξωτερική πίεση του αγωγού. Συγκεκριμένα για τιμές του  $s$  μεγαλύτερες της μονάδας σημαίνει ότι έχω υψηλότερο όριο διαρροής στην περιφερειακή κατεύθυνση και αυτό δικαιολογεί την αύξηση της αντοχής σε εξωτερική πίεση.



### 3.5 Η επίδραση της καμπύλης σ-ε του υλικού

Έχουμε ήδη αναφερθεί στο γεγονός ότι το όριο διαρροής του υλικού καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το αν θα έχω πλαστική η ελαστική κατάρρευση. Η μορφή της καμπύλης τάσης- παραμόρφωσης του υλικού παίζει και αυτή ρόλο στην αντοχή σε εξωτερική πίεση του σωλήνα

Μια καμπύλη προσεγγίζεται συχνά από σχέσεις της μορφής  $\sigma = E\varepsilon^n$  επιλέγοντας κατάλληλους συντελεστές ώστε να ταιριάζει η καμπύλη που θα πάρουμε στα πειραματικά δεδομένα. Μια πιο αντιπροσωπευτική σχέση που χρησιμοποιείται συχνά είναι η σχέση Ramberg-Osgood:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[ 1 + \frac{3}{7} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{n-1} \right] \quad (3.5.1)$$

όπου:

E: το μέτρο ελαστικότητας, δηλαδή η κλίση της καμπύλης στο ελαστικό μέρος

$\sigma_0$ : η τάση που παίρνουμε από το σημείο τομής της καμπύλης του υλικού μας και μιας ευθείας με κλίση ίση με το  $0.7 E$ .

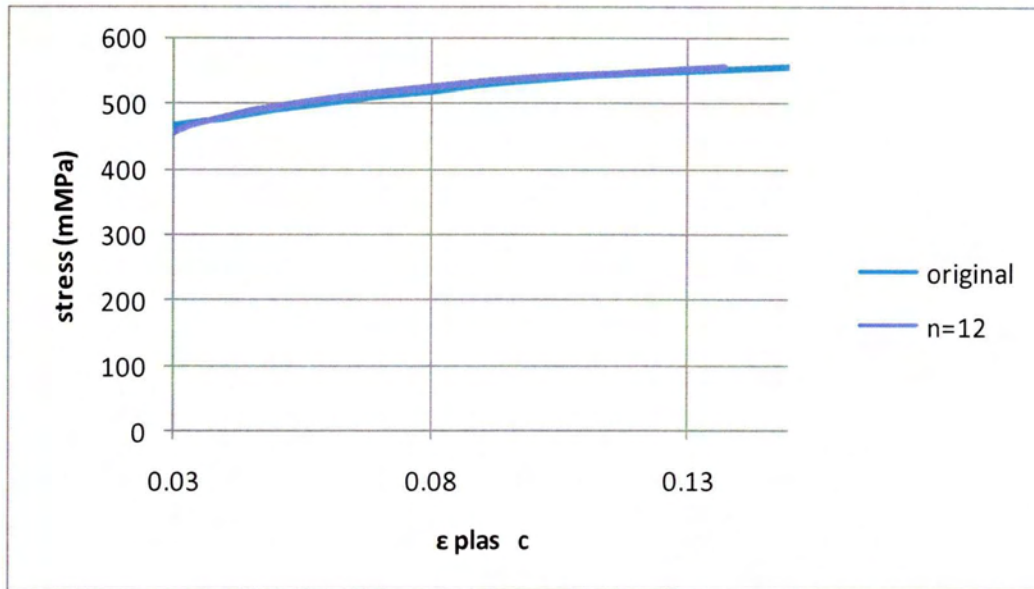
Μια εκτίμηση του n μπορούμε να πάρουμε από την κλίση της καμπύλης που προκύπτει αν σχεδιάσουμε την ποσότητα  $\log \left( \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \right)$  με την  $\log \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)$ .

Έτσι θα προκύψει η καμπύλη του υλικού μας από τα πειραματικά δεδομένα αν προσαρμόσουμε τα σγ και n (συνήθως κατά λίγο) κατάλληλα στη σχέση (3.5.1).

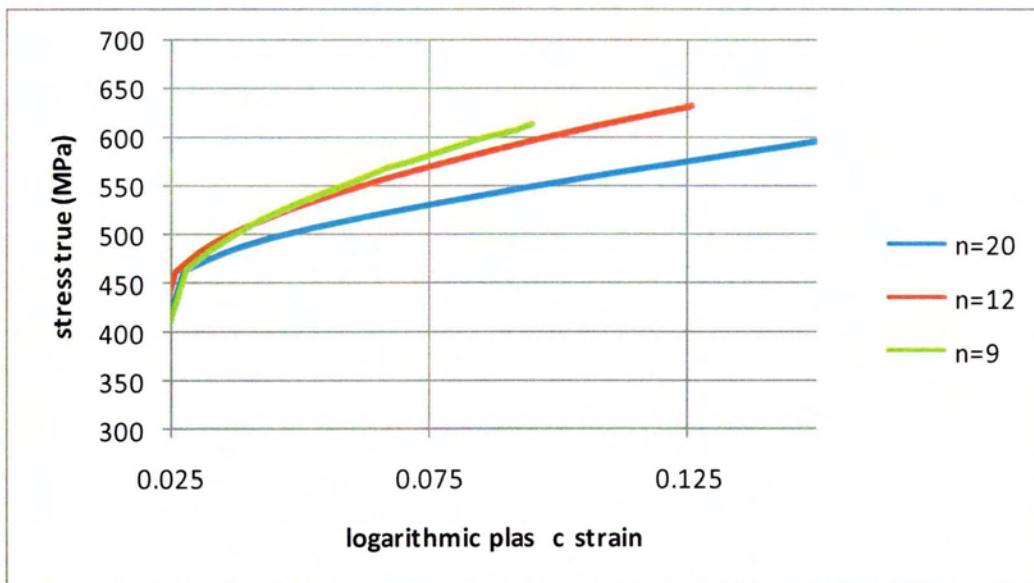
Αν θεωρήσουμε ότι τα αποτελέσματα από μετρήσεις αντιστοιχούν στην καμπύλη υλικού που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 2 τότε μπορούμε να πάρουμε διαφορετικές μορφές της καμπύλης σ-ε του χάλυβα X65 χρησιμοποιώντας τη σχέση Ramberg -Osgood και προσαρμόζοντας κατάλληλα τα n και  $\sigma_0$ .

Στο σχήμα 3.5.2 βλέπουμε πως με τη σχέση 3.5.1 παίρνουμε πολύ καλό «ταίριασμα» για σγ=460 και n=12.

Αν αλλάξουμε την τιμή του  $n$  τότε θα μπορούμε να πάρουμε και άλλες καμπύλες  $\sigma$ - $\epsilon$  που αντιστοιχούν στο ίδιο υλικό, όπως παρατηρούμε στο σχήμα 55.



Σχήμα 52 Συγκριση της καμπύλης που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 2 και αυτής που προκύπτει για  $\sigma_y=460$  και  $n=12$ .



Σχήμα 53 Καμπύλες τάσεις παραμόρφωσης που προέκυψαν για διάφορες τιμές του  $n$ .

Χρησιμοποιώντας αυτές τις καμπύλες του υλικού μπορούμε με την προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία να έχουμε αριθμητικά αποτελέσματα για την επίδραση έχει μια τέτοια αλλαγή στο διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης, στην αντοχή σε εξωτερική πίεση ενός αγωγού. Τα μοντέλα που συγκρίνουμε είναι με την ίδια αρχική οβαλότητα 2%, κάθε φορά για  $n=12$  και  $n=20$

D/t	P <sub>max</sub> ,n=12	P <sub>max</sub> ,n=20	Διαφορά %
30	9.5	10.7	11.2%
40	3.9	4.01	2.7%
50	2.17	2.19	2%

**Σχήμα 54 Πίνακας σύγκρισης αποτελεσμάτων για την πίεση κατάρρευσης για  $n=12$ ,  $n=20$ .**

Παρατηρούμε είναι ότι η καμπύλη του υλικού επηρεάζει τη συμπεριφορά του αγωγού μας. Βλέπουμε ότι για μικρότερες τιμές του λόγου D/t η επίδρασή της φτάνει και το 11.2% ενώ, όσο ο λόγος D/t μεγαλώνει, η επίδραση της καμπύλης του υλικού στην αντοχή του αγωγού μικραίνει αισθητά.

#### 4. Διαδιδόμενη Ύβωση και η Αναστολή της

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την μελέτη της διαδιδόμενης ύβωσης και της αναστολής της μέσω των *integral buckle arrestors*, που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2. Για την μελέτη μας αυτή θα θεωρήσουμε ακριβώς το ίδιο μοντέλο τριδιάστατου αγωγού που περιγράψαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο διαμέτρου 36 in πάχους 30.1 mm και μήκος μοντέλου 20 διαμέτρων. Στο μοντέλο θα κάνουμε τις απαραίτητες προσαρμογές για να συμπεριλάβουμε και τον αναστολέα.

Έχουμε αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο πως για να χαράξουμε το δρόμο ισορροπίας σε ένα μοντέλο σωλήνα υπό εξωτερική πίεση θα χρειαστούμε να παρατηρούμε μια συνεχώς αύξουσα ποσότητα που να χαρακτηρίζει τη μεταβολή της γεωμετρίας του σωλήνα. Αυτό το ρόλο μπορεί να παίξει η μεταβολή του όγκου που περικλείει ο αγωγός.

#### Αριθμητικός Υπολογισμός του $\Delta V$

Οι Kyriakides και Ne o χρησιμοποίησαν για την περιγραφή της μεταβολής του όγκου, σε μια προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων *hydrostatic fluid elements* που μπορούν να περιγράψουν τη μεταβολή ενός όγκου μέσα σε ένα δοχείο πίεσης.<sup>14</sup>

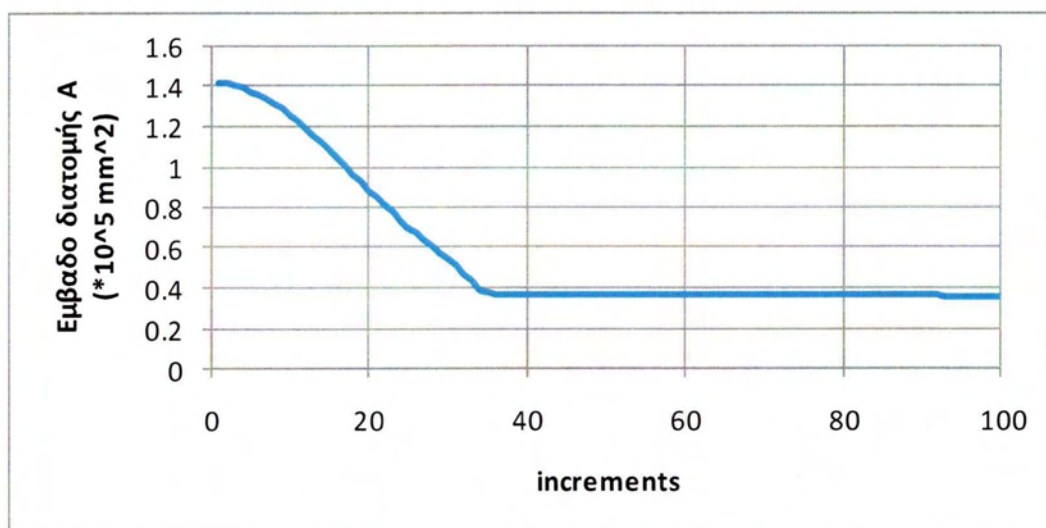
Μια άλλη μεθοδολογία είναι να περιγράψει κανείς, τη μεταβολή του όγκου χρησιμοποιώντας της μετατοπίσεις των κόμβων του μοντέλου και ολοκληρώνοντας αριθμητικά. Αυτή τη μέθοδο θα χρησιμοποιήσουμε στη δική μας ανάλυση.

Για να υπολογίσουμε την επιφάνεια που περιγράφεται από μια διατομή του σωλήνα χρησιμοποιούμε μια μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης με δεδομένα στον  $x$  και  $y$  άξονα τις συντεταγμένες των κόμβων της εσωτερικής επιφάνειας μιας διατομής. Όσο περισσότεροι οι κόμβοι τόσο μεγαλύτερη και η ακρίβεια που μπορούμε να πετύχουμε.

<sup>14</sup> Kyriakides, S και Ne o, T.A. 1999. On the dynamics of propagating buckles in pipelines. *International journal of solids and structures*. Elsevier, vol, 37.

Έτσι δημιουργούμε ένα πίνακα με στήλες όσες είναι και οι κόμβοι ενώ οι σειρές θα αποτελούν τις συντεταγμένες  $x$  και  $y$  σε κάθε βήμα. Ο όγκος υπολογίζεται με αριθμητική ολοκλήρωση στο Matlab, εξ αιτίας της ευκολίας που παρέχει τόσο στο χειρισμό δεδομένων (σε σχέση με το Excel) όσο και στην αριθμητική ολοκλήρωση. Γνωρίζοντας τις συντεταγμένες των κόμβων σε κάθε βήμα της ανάλυσης, δημιουργούμε ένα πίνακα 504 γραμμών (252 βήματα για τις δυο συντεταγμένες  $x$  και  $y$ ) και στήλες όσοι οι κόμβοι που χρησιμοποιούμε. Με μια επαναληπτική διαδικασία στο Matlab μπορούμε να υπολογίσουμε το εμβαδό της διατομής σε κάθε βήμα.

Συγκεκριμένα, δημιουργούμε διανύσματα με τις συντεταγμένες κάθε κόμβου και υπολογίζουμε το εμβαδό της διατομής για κάθε ένα από τα 252 βήματα της ανάλυσης χρησιμοποιώντας για την αριθμητική ολοκλήρωση την εντολή `trapz` η οποία αντιστοιχεί σε ολοκλήρωση με τον κανόνα του τραπεζίου<sup>15</sup>.



**Σχήμα 55 η μεταβολή του εμβαδού της πρώτης διατομής σε σχέση με τα βήματα της ανάλυσης**

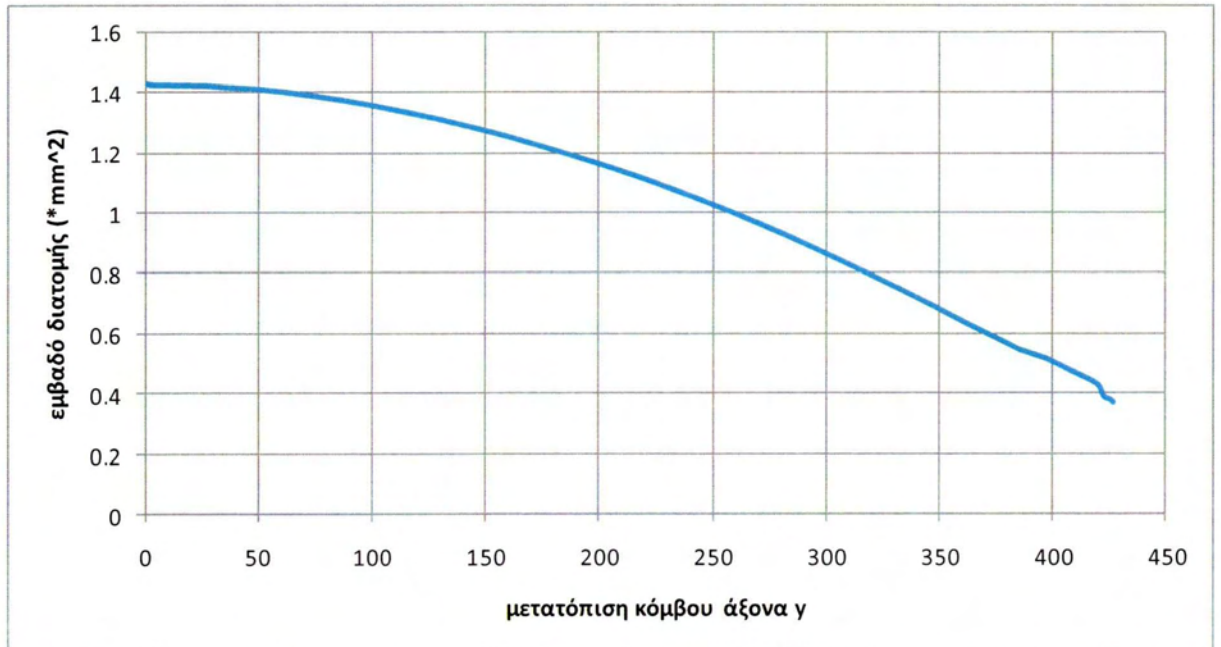
Το διάγραμμα του σχήματος 58 αναφέρεται στην πρώτη διατομή η οποία καταρρέει και πρώτη. Παρατηρούμε ότι σε ένα συγκεκριμένο βήμα της ανάλυσης το εμβαδό

<sup>15</sup> Για περισσότερες λεπτομέρειες όσο αφορά το προγραμματισμό αλλά και την μέθοδο ολοκλήρωσης ο αναγνώστης μπορεί να δει το βιβλίο που παραθέτουμε στη βιβλιογραφία.



σταματά να μεταβάλλεται και αυτό είναι το σημείο πρώτης επαφής του εσωτερικού τοιχώματος του σωλήνα.

Τώρα μπορούμε να συνδυάσουμε τη μεταβολή του εμβαδού της διατομής με την μετατόπιση του κόμβου στην άνω γενέτειρα του. Έτσι έχουμε και το αντίστοιχο διάγραμμα του σχήματος 59.



**Σχήμα 56 Διάγραμμα Εμβαδού διατομής με την μετατόπιση του κόμβου.**

Κάθε διατομή του σωλήνα κατά το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης καταρρέει όπως και η προηγούμενή της, επομένως, με βάση το παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να υπολογίσουμε το εμβαδό κάθε διατομής ευκολότερα, εφόσον το μόνο που απαιτείται να γνωρίζουμε είναι η μετατόπιση του κόμβου της διατομής, που βρίσκεται στην άνω γενέτειρα του αγωγού.

Ο όγκος ενός σωλήνα μπορεί να βρεθεί ολοκληρώνοντας την εξίσωση της επιφάνειας κατά το μήκος του σώματος.

$$V = \int_{A_0}^{A_1} A(x) dx$$

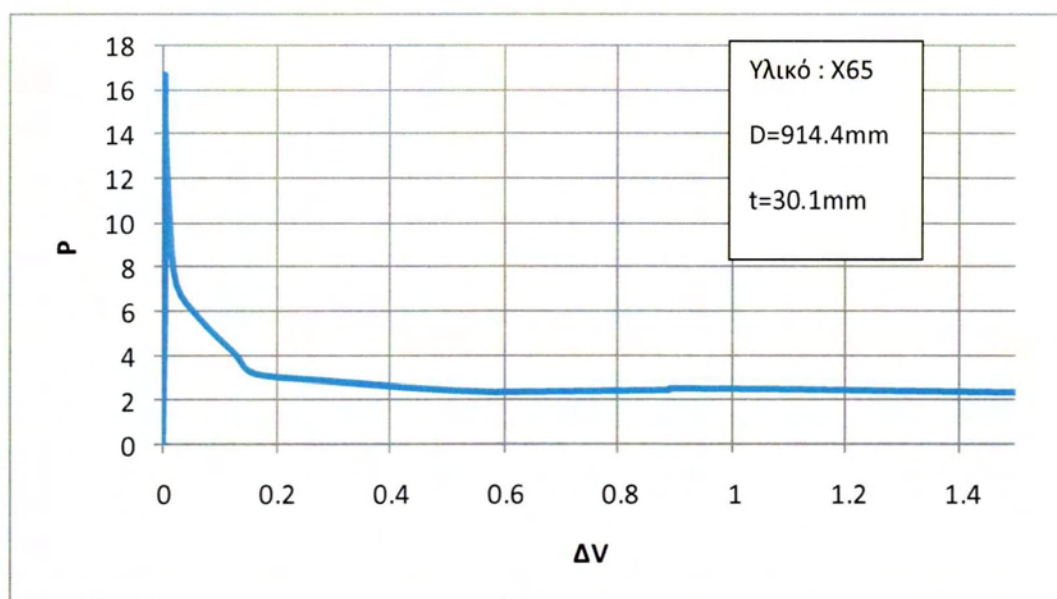
όπου  $A(x)$  είναι η συνάρτηση του εμβαδού της επιφάνειας κατά το μήκος του σωλήνα.

επομένως, μπορούμε να υπολογίσουμε τον όγκο που εσωκλείει ο αγωγός εφαρμόζοντας τον κανόνα του τραπεζίου αυτή τη φορά κατά το μήκος αφού έχουμε διαθέσιμες τις τιμές του εμβαδού της διατομής σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα 4.2, επομένως:

$$V = \sum_1^n (A_n + A_{n+1})h/2$$

όπου το «βήμα»  $h$  είναι η απόσταση μεταξύ γειτονικών διατομών, δηλαδή ίσο στην περίπτωση μας με το μέγεθος των στοιχείων στην αξονική διεύθυνση (εδώ  $h=173.736\text{mm}$ ).

Επομένως, μπορούμε να χαράξουμε τον δρόμο ισορροπίας για τον αγωγό μας, γνωρίζοντας τον όγκο που εσωκλείει ο αγωγός σε κάθε βήμα ,μπορούμε να υπολογίσουμε εύκολα τη μεταβολή του όγκου από την αρχική του κατάσταση(  $\Delta V$  σε  $\text{m}^3$ ).



Σχήμα 57 Ο δρόμος ισορροπίας για τον αγωγό.

Στο σχήμα 60 παρατηρούμε πως η πίεση φτάνει στην κατώτερη τιμή της για  $\Delta V=0.6 m^3$ . Στη συνέχεια η τιμή της πίεσης αυξάνει λίγο και μετά μένει σταθερή η τιμή της, αυτή είναι η πίεση διάδοσης της ύβωσης όπως έχουμε ήδη αναφέρει.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα μελετήσουμε τις διατάξεις που χρησιμοποιούμε για να σταματήσουμε τη διάδοση της ύβωσης, δηλαδή τους αναστολείς της ύβωσης (buckle arrestors).

Οι αναστολείς είναι τμήματα του αγωγού με μεγαλύτερο πάχος και τοποθετούνται σε τακτά διαστήματα στους αγωγούς (60 -180 μ είναι μια τυπική τιμή<sup>16</sup>) εγκλωβίζοντας την ύβωση (αν αυτή δημιουργηθεί) σε αυτό το διάστημα. Η αύξηση τοπικά του πάχους αυξάνει την αντοχή στην εξωτερική πίεση του αγωγού και την πίεση διάδοσης μεγαλώνει δηλαδή την δυσκαμψία του αγωγού και εγκλωβίζει την αστοχία μεταξύ δυο αναστολέων δηλαδή σε ένα τμήμα του αγωγού. Υπάρχουν αρκετοί τύποι αναστολέων, μερικοί από αυτούς είναι οι τύπου slip-on, οι τύπου spiral και οι τύπου integral. Όπως είπαμε η βασική ιδέα για τους αναστολείς είναι να αυξήσουμε τοπικά τη δυσκαμψία (δηλαδή το πάχος) του αγωγού. Οι αναστολείς τύπου slip-on είναι μεταλλικοί δακτύλιοι συγκολλημένοι εσωτερικά στον αγωγό, οι αναστολείς τύπου spiral είναι δακτύλιοι τυλιγμένοι σε σπείρα και συγκολλημένοι στον αγωγό, οι αναστολείς τύπου integral είναι τμήματα αγωγού με μεγαλύτερο πάχος και την ίδια εσωτερική διάμετρο με τον αγωγό συγκολλημένα κατά το μήκος του. Από αυτούς για μεγαλύτερα βάθη προτιμάται ο αναστολέας τύπου integral, ενώ με επιτυχία σε μικρότερα βάθη έχει χρησιμοποιηθεί ο αναστολέας τύπου Slip-on.

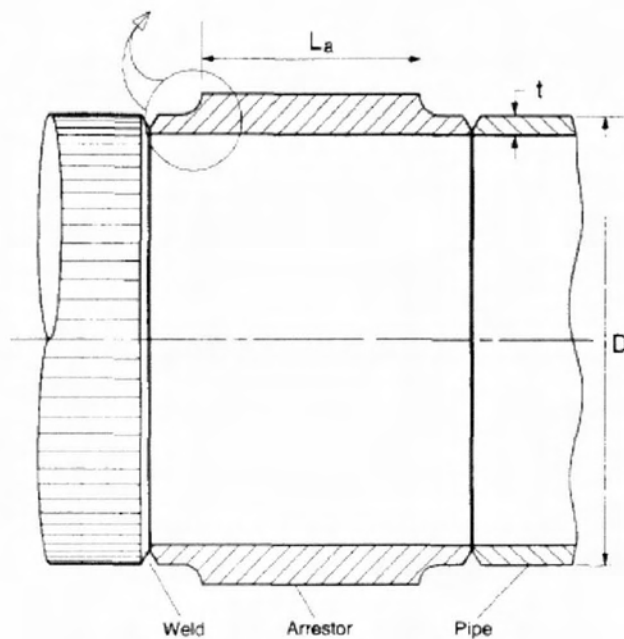
Από όλα τα είδη των αναστολέων θα μελετήσουμε τον αναστολέα τύπου integral.

### **Μελέτη Αναστολέα Ύβωσης τύπου integral.**

Ο αναστολέας τύπου integral αποτελεί ουσιαστικά ένα τμήμα αγωγού μικρού μήκους με εσωτερική διάμετρο ίδια με τον αγωγό, αλλά με σημαντικά μεγαλύτερο πάχος. Ο αναστολέας integral είναι συγκολλημένος κατά μήκος του αγωγού σε

<sup>16</sup> Kyriakides,S και Park T.D. 1997. *On the performance of integral Buckle arrestors for o shore pipelines*. Aus n, Texas : Elsevier Science Ltd.

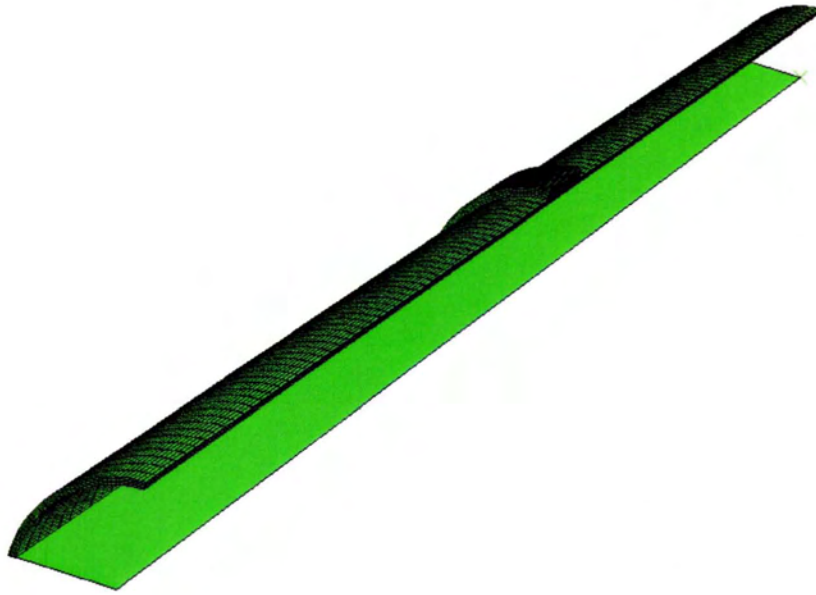
τακτά διαστήματα. Ο αναστολέας λόγω του πάχους του αγωγού προσθέτει στο κομμάτι του αγωγού που είναι εγκατεστημένος, σημαντικά περισσότερη δυσκαμψία έναντι της παραμόρφωσης της διατομής. Επομένως για να διαδοθεί η ύβωση πέρα από τον αναστολέα απαιτείται η εξωτερική πίεση να λάβει τιμή σημαντικά μεγαλύτερη της πίεσης διάδοσης (propagation pressure  $-P_p$ ), η πίεση που χρειάζεται η ύβωση για να «περάσει» από τον αναστολέα ονομάζεται Cross-over Pressure  $-P_{co}$  και εξαρτάται από το υλικό αλλά και από τη γεωμετρία του αναστολέα.



Σχήμα 58 Γεωμετρία και εγκατάσταση του Integral arrestor.

Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούμε για την μελέτη της αναστολής της ύβωσης φαίνεται στο σχήμα 62.

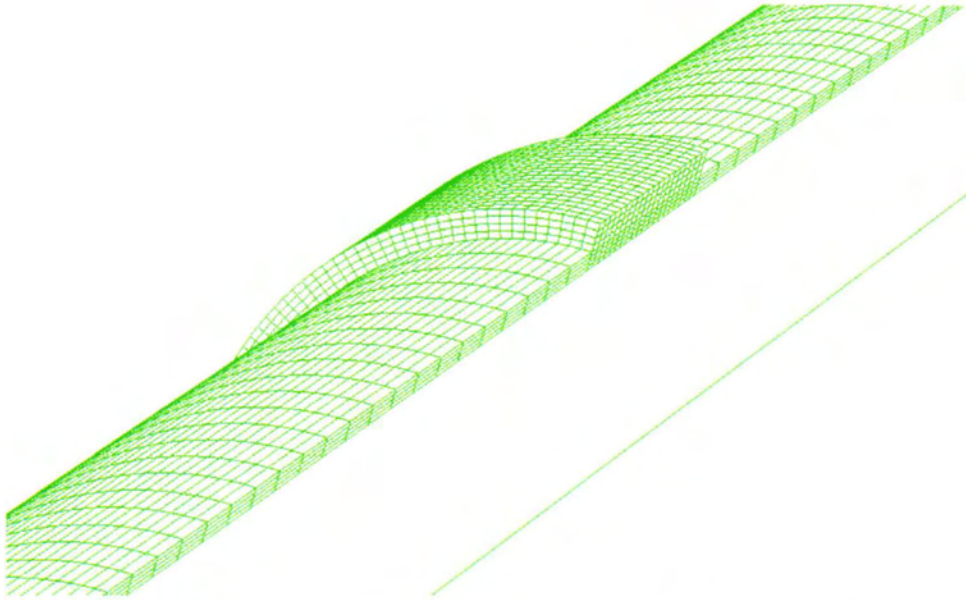




**Σχήμα 59 Το μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε για την ανάλυσή μας.**

Το μοντέλο έχει πλήρη αντιστοιχία στοιχείων, υλικών, γεωμετρίας, συνοριακών συνθηκών με το μοντέλο που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2 απλώς είναι σημαντικά πιο μακρύ ώστε να μπορεί να αναπτυχθεί το φαινόμενο μετά τον αναστολέα. Η αρχική μετατόπιση που δίνουμε στον κόμβο για να δημιουργήσουμε την ατέλειά μας είναι 10 mm. Παρατηρούμε ότι το μοντέλο αυτό αποτελείται από 4 στοιχεία κατά το πάχος 50 στοιχεία κατά το μήκος και στις δυο πλευρές του αναστολέα, ενώ στον αναστολέα πυκνώνω το πλέγμα με 20 στοιχεία κατά το μήκος του και 8 κατά το πάχος του. Στην περιφέρεια ο αριθμός των στοιχείων είναι σταθερός και ίσος με 40.

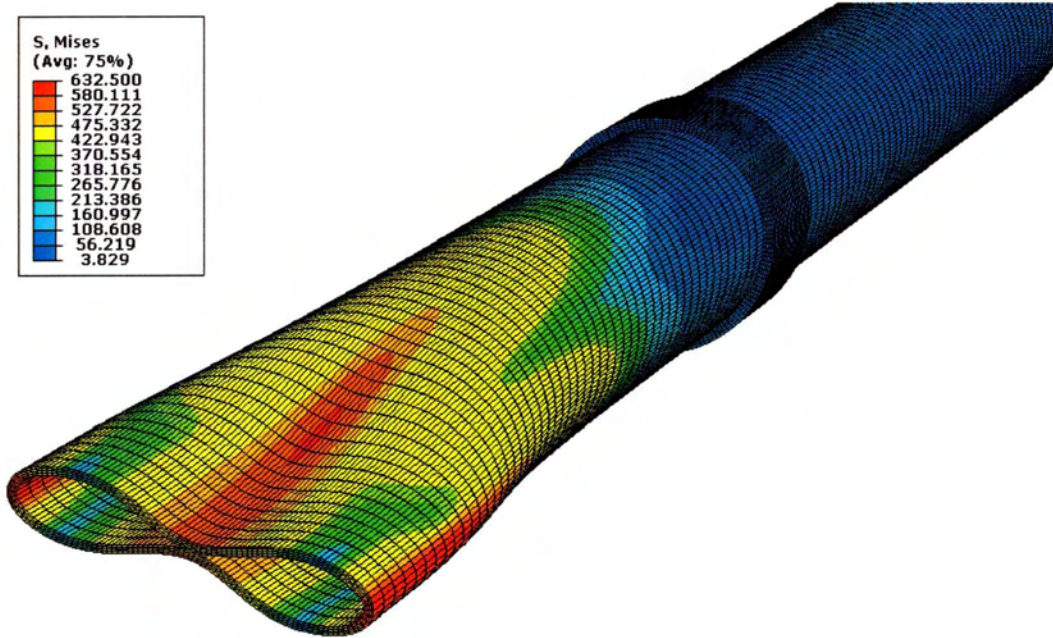




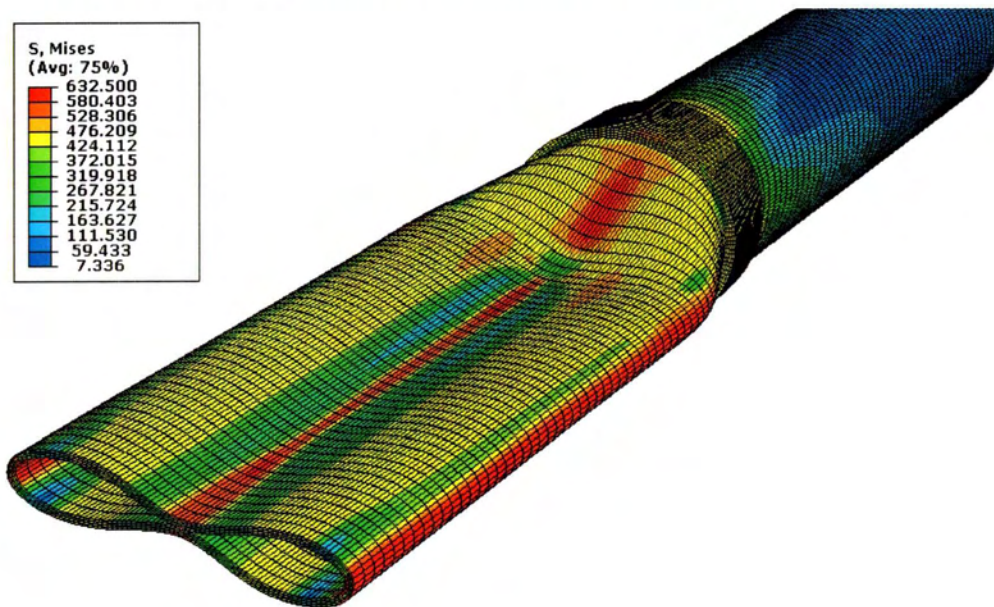
**Σχήμα 60 Το πλέγμα πυκνώνει στην περιοχή του αναστολέα**

Τα κυριότερα γεωμετρικά στοιχεία ενός αναστολέα τύπου integral είναι το μήκος του  $L_a$  και το πάχος του  $h$ . Έτσι για το σχεδιασμό ενός αναστολέα οι βασικότεροι παράμετροι σχεδίασης είναι οι λόγοι  $L_a/D$  και  $h/t$ .

Η ανάλυση για ένα μοντέλο αναστολέα με  $L_a/D=1$  και  $h/t=2.5$  και με τον τρόπο που περιγράψαμε προηγουμένως δίνει το διάγραμμα P-Δν, καθώς και μια απεικόνιση της παραμόρφωσης του αναστολέα της ύψωσης στα σχήματα 64-69.

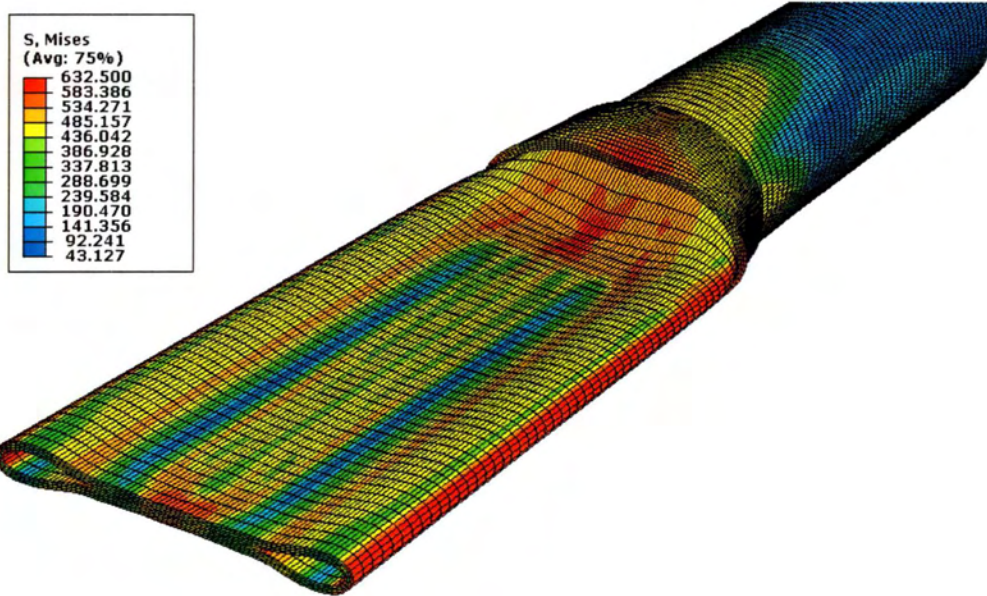


Σχήμα 61 Προσομοίωση της διάδοσης της ύβωσης: Αρχή του φαινομένου

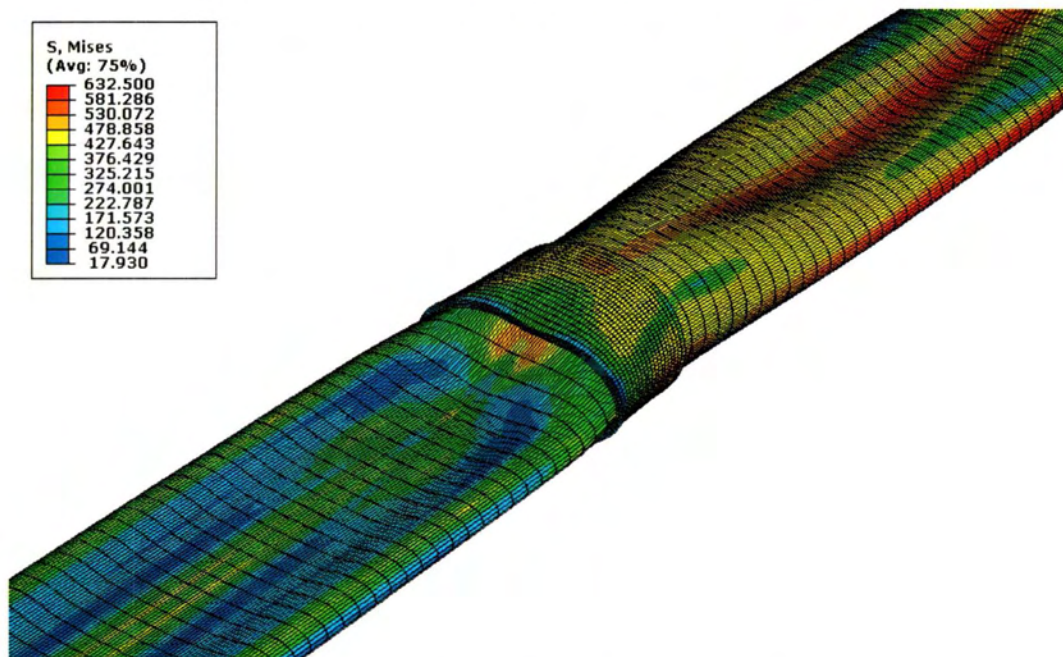


Σχήμα 62 Η ύβωση διαδίδεται μέχρι τον αναστολέα

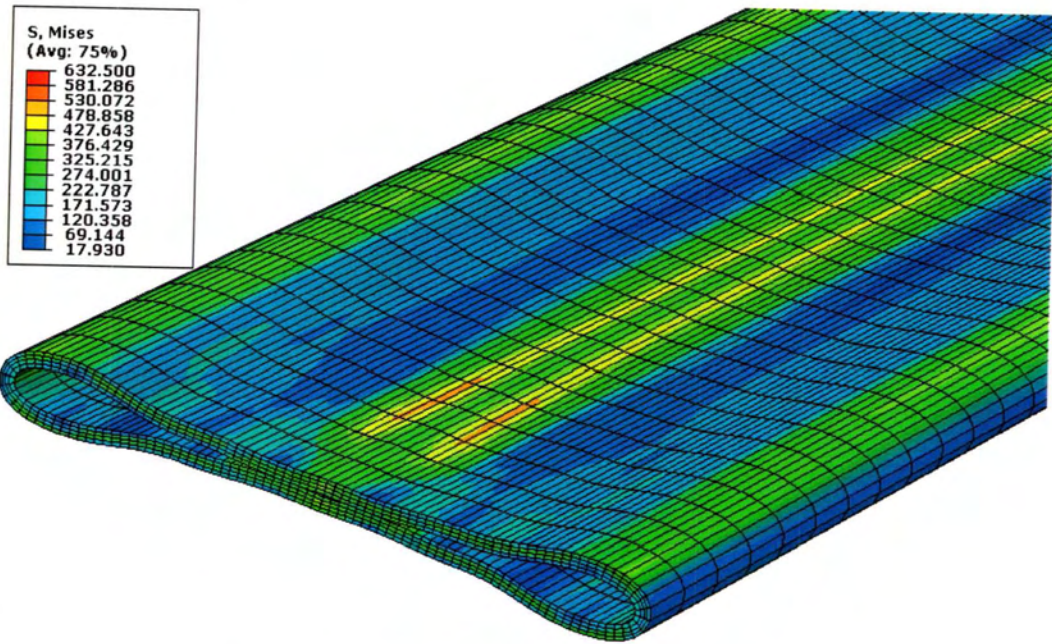




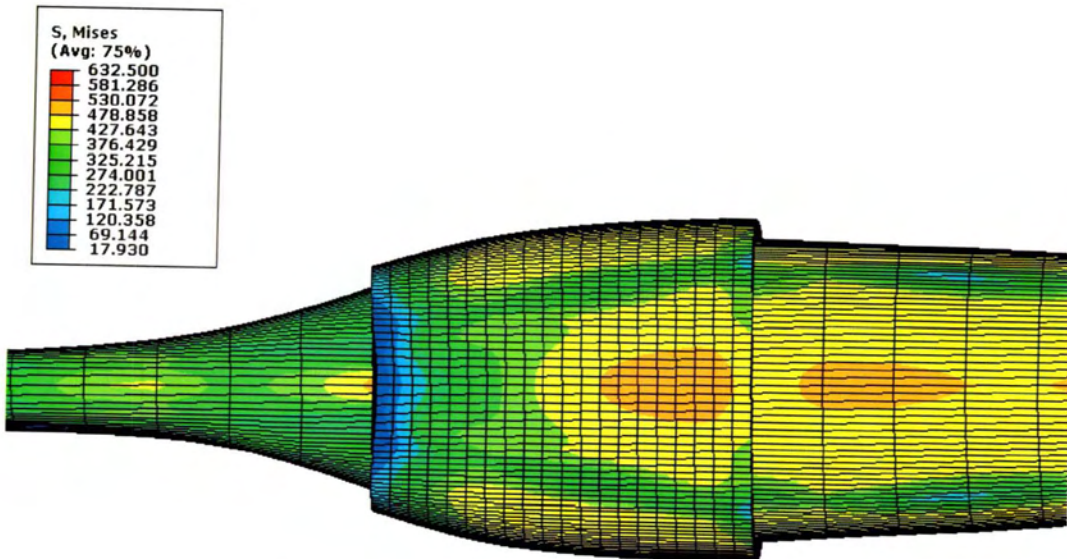
Σχήμα 63 Η ύβωση σταματά στον αναστολέα ενώ περαιτέρω αύξηση της τιμής της εξωτερικής πίεσης ισοπεδώνοντας όλες τις διατομές του αγωγού που έχουν ήδη καταρρεύσει, αυξάνοντας την ένταση στον αναστολέα ανάντη.



Σχήμα 64 Η τιμή της πίεσης αυξάνει, η παραμόρφωση του αγωγού και του αναστολέα αυξάνει. Σε ορισμένη τιμή της πίεσης ( $P_{co}$ ) η ύβωση ξεπερνά τον αναστολέα και συνεχίζει να διαδίδεται κατάντη.



Σχήμα 65 «Ισοπεδωμένες» διατομές του αγωγού ανάντη του αναστολέα.

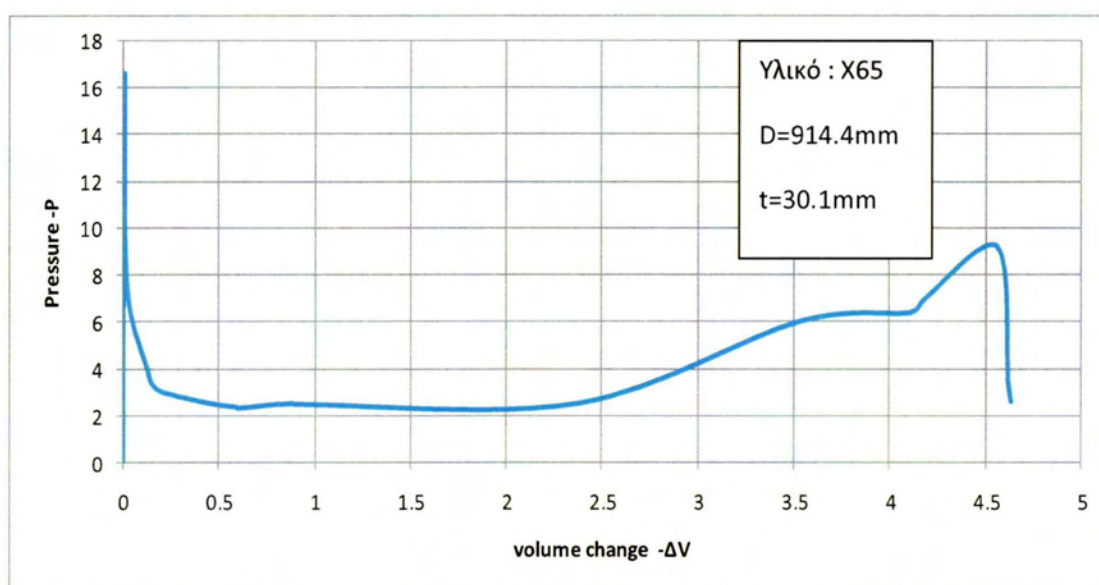


Σχήμα 66 Προφίλ του αναστολέα μετά την αστοχία του .





Σχήμα 67 Παραμορφωμένος αναστολέας μετά από πείραμα (Kyriakides,S και Park T.D. *On the performance of integral Buckle arrestors for offshore pipelines*)



Σχήμα 68 Διάγραμμα P- $\Delta v$  , για το μοντέλο με τον αναστολέα.

Στο διάγραμμα του σχήματος 71, μετά την αρχική διάδοση της ύβωσης, το σημείο όπου η πίεση αρχίζει να αυξάνεται σημαντικά αντιστοιχεί στο σημείο που η ύβωση έχει «φτάσει» στο αναστολέα ο οποίος εμποδίζει την διάδοσή της. Στη συνέχεια με την αύξηση της πίεσης ισοπεδώνονται περαιτέρω οι διατομές του αγωγού ενώ ο αναστολέας συνεχίζει να παραμορφώνεται. παρατηρούμε η πίεση φτάνει σε ένα τοπικό μέγιστο που αντιστοιχεί στην πίεση Cross-over ( πίεση ανάσχεσης) του αναστολέα. Στο παράδειγμά μας, η πίεση ανάσχεσης είναι 9.72MPa.



Όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση ανάσχεσης τόσο καλύτερα τόσο πιο αποτελεσματικός είναι ο αναστολέας να σταματήσει την διάδοση της ύβωσης. Για να ποσοτικοποιήσουμε την αποτελεσματικότητα του αναστολέα, εισάγουμε το λόγο  $e$  όπου,

$$e = \frac{P_{co}}{P_p} \quad (4.1)$$

Ο λόγος  $e$  εκφράζει την αποτελεσματικότητα του αναστολέα και είναι μεγαλύτερος της μονάδας, μας υποδεικνύει πόσο μεγαλύτερη είναι η πίεση ανάσχεσης  $P_{co}$  από την πίεση διάδοσης  $P_p$ .

Επίσης χρησιμοποιείται<sup>17</sup> και το μέγεθος της ανηγμένης αποτελεσματικότητας  $n$ , το οποίο ορίζεται ως ακολούθως:

$$n = \frac{P_{co} - P_p}{P_{max} - P_p} \quad (4.2)$$

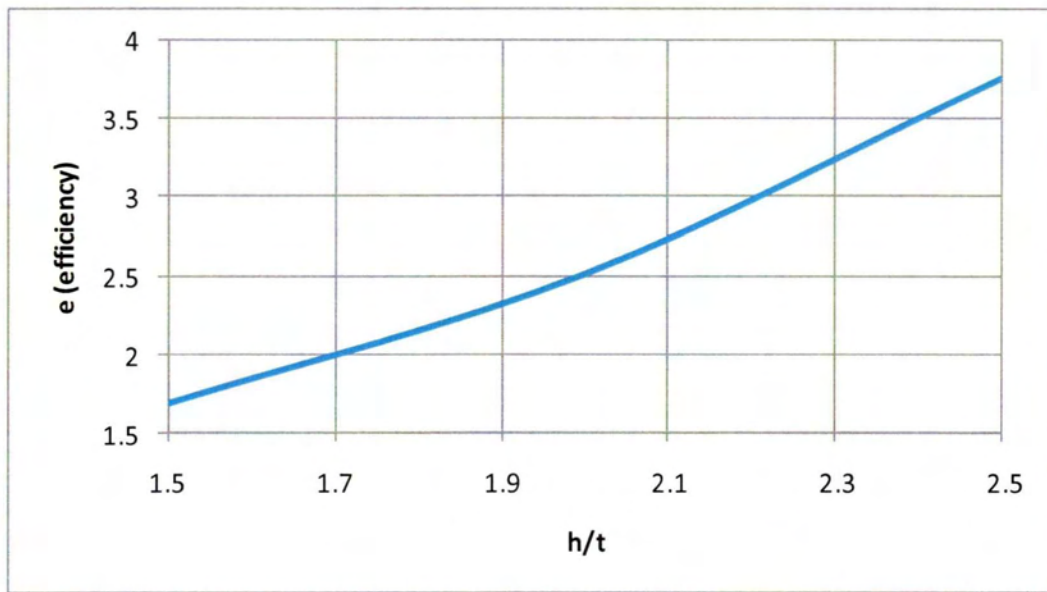
Από τη σχέση 4.2 προκύπτει ότι σε κάθε περίπτωση  $n \leq 1$ .

Έτσι για το υπόψη αγωγό, έχουμε  $e \cong 3.76$  και  $n = 0.473$ . Στη συνέχεια εξετάζεται η επιρροή των παραμέτρων  $L_a/D$  και  $h/t$ .

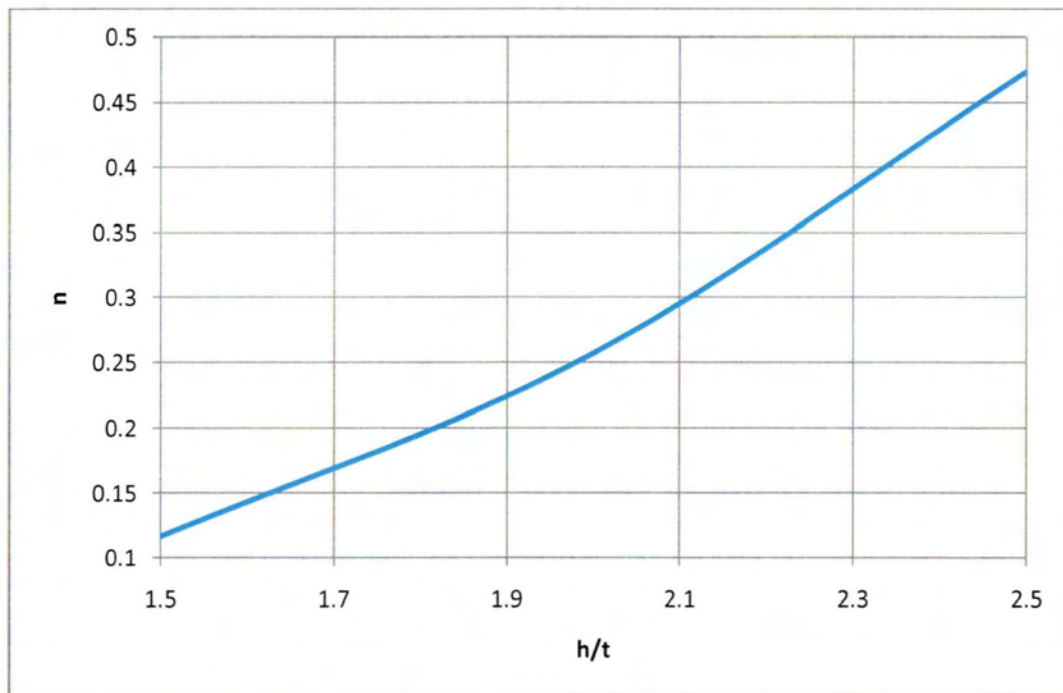
Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία που ακλουθήσαμε προηγουμένως για αναστολείς με διαφορετικό λόγο  $h/t$ , κρατώντας σταθερό το  $L_a/D$  ίσο με τη μονάδα. Από τα αριθμητικά αποτελέσματα<sup>18</sup> δημιουργούμε το διάγραμμα των λόγων αποτελεσματικότητας  $e$ ,  $n$  για διάφορες τιμές του  $L_a/D$  όπως φαίνεται στα σχήματα 72 και 73.

<sup>17</sup> Kyriakides, S και Park T.D. 1997. *On the performance of integral Buckle arrestors for offshore pipelines*. Austin, Texas : Elsevier Science Ltd.

<sup>18</sup> Βλέπε παράρτημα πίνακας 2.1, 2.2.



Σχήμα 69 Μεταβολή της αποτελεσματικότητας του αναστολέα με την αύξηση του λόγου  $h/t$ .

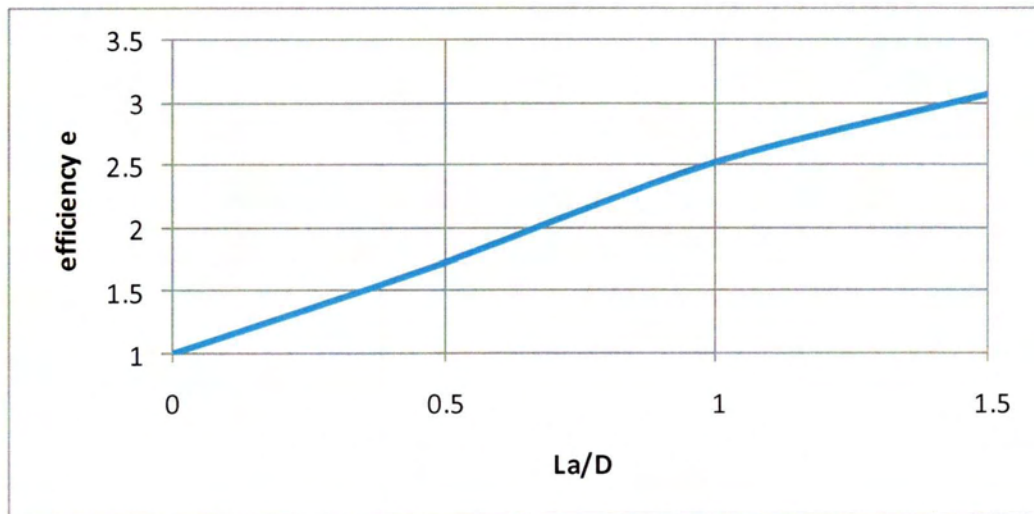


Σχήμα 70 Μεταβολή της ανοιγμένης αποτελεσματικότητας του αναστολέα με το λόγο  $h/t$ .

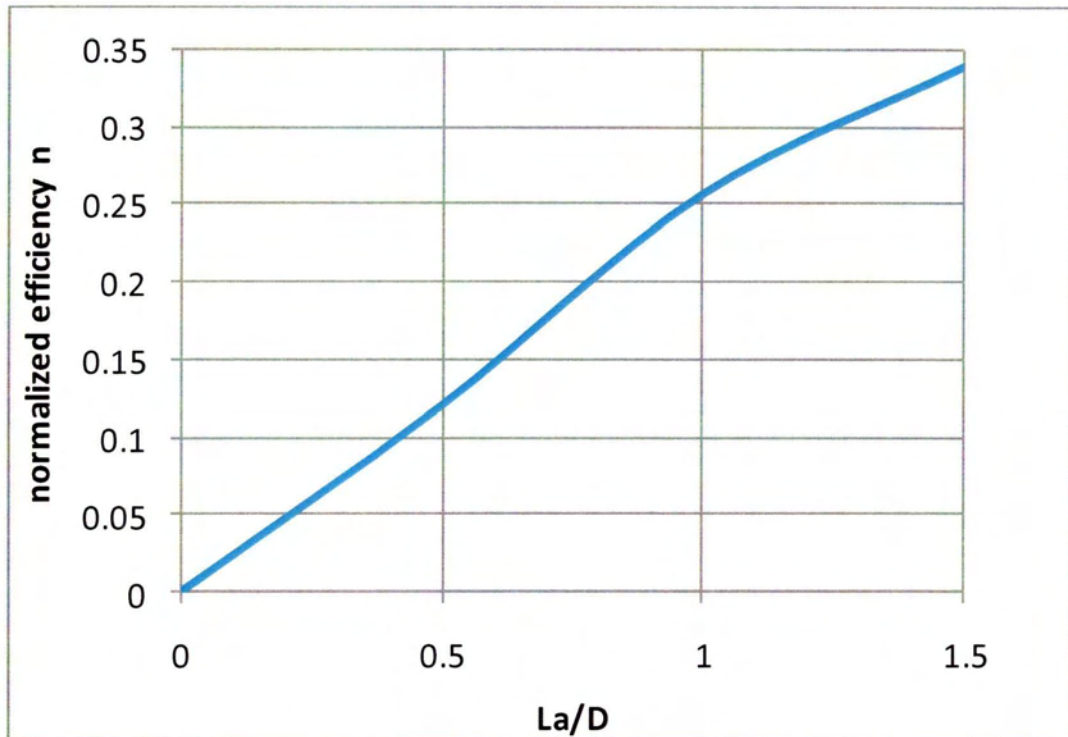
Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι η αύξηση του πάχους του αναστολέα αυξάνει σημαντικά την αποτελεσματικότητά του.

Στη συνέχεια κρατώντας σταθερό το  $h/t$  και ίσο με 2 μεταβάλλουμε τον λόγο  $L_a/D$ , η αποτελεσματικότητα μεταβάλλεται όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα στα σχήματα 73 και 74.

Πάλι παρατηρούμε ότι, η αύξηση του μήκους του αναστολέα έχει θετική επίδραση στην αποδοτικότητά του.



Σχήμα 71 Η μεταβολή της αποτελεσματικότητας του αναστολέα  $e$  με την αύξηση του μήκους.



Σχήμα 72 Μεταβολή της ανηγμένης αποτελεσματικότητας του αναστολέα με την αύξηση του μήκους του.

Σχεδιασμός ενός αναστολέα.

Ο σχεδιασμός του αναστολέα πρέπει να λάβει υπόψη αυτή τη συμπεριφορά των γεωμετρικών παραμέτρων. Οι Kyriakides, et al (1998) σε εργασία τους<sup>19</sup> πρότειναν έναν εμπειρικό τύπο στηριζόμενοι σε πειραματικά αλλά και υπολογιστικά δεδομένα.

$$n \approx A1 \frac{\left[\frac{\sigma_y}{E}\right]^{0.5} \left[\frac{\sigma_{ya}}{E}\right]^2 \left[\frac{L_a}{D}\right]^{1.25} \left[\frac{h}{t}\right]^{2.5}}{\left[\frac{P_{co}}{P_p} - 1\right]} \quad (4.4)$$

όπου η σταθερά  $A1=667.6$ <sup>20</sup>

<sup>19</sup> Kyriakides, S, Park, T.D και Neο, T.A. 1998. *On the design of the integral Buckle arrestors.*

<sup>20</sup> Στο ίδιο.

Για να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα από τη σχέση 4.4 πρέπει να σχεδιάσουμε συντηρητικά ώστε η τιμή του  $n$  να μην ξεπερνάει το 0.7. Επίσης πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι αρχικές ατέλειες σαν και αυτές που περιγράψαμε στο κεφάλαιο ενδέχεται να υπάρχουν και στον αναστολέα μειώνοντας την αντοχή του, επομένως πρέπει να ελεγχτούν πολύ καλά πριν την εγκατάστασή τους στον αγωγό. Για να σχεδιάσουμε αποτελεσματικά έναν αναστολέα πρέπει:

1. να υπολογίσουμε την πίεση κατάρρευσης του αγωγού  $P_{max}$  και την πίεση διάδοσης της ύβωσης με έναν από τους τρόπους που περιγράψαμε.
- 2., να επιλέξουμε το υλικό για τον αναστολέα (steel grade).
3. να επιλέξουμε ένα μήκος  $L_a$  ή ένα πάχος  $h$  για τον αναστολέα. Το πάχος  $h$  πρέπει να είναι μεγαλύτερο από αυτό του αγωγού  $t$  ενώ το μήκος  $L_a$  συνίσταται να είναι πάνω από 0.25D.
4. χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.4 θα μπορούσαμε να σχεδιάσουμε έναν αναστολέα. Για ασφάλεια θα πρέπει να επιβεβαιώσουμε την ορθή σχεδίαση με ένα πείραμα αν είναι δυνατό ή με μια καλή αριθμητική προσομοίωση.

Από τη σχέση (4.4) για σωλήνα και αναστολέα από υλικό με όριο διαρροής 450 ΜΡα, για αναστολέα με λόγο  $h/t$  ίσο με 2.5 και  $L_a/D$  ίσο με 1, λαμβάνουμε  $n=0.49$ . Από το μοντέλο με τα πεπερασμένα στοιχεία υπολογίσαμε  $n=0.46$ .

Όμοια, μπορούμε να σχεδιάσουμε έναν αναστολέα σύμφωνα με το πρότυπο DNN-OS-F101 η πίεση ανάσχεσης  $P_{co}$  ενός αναστολέα δίνεται στο πρότυπο αυτό από τη σχέση (4.5)

$$P_{co} = P_p + (P_{p,BA} - P_{pr}) \left[ 1 - EXP\left(-\frac{20t_2L_{BA}}{D^2}\right) \right] \quad (4.5)$$

όπου:

$L_{BA}$ : το μήκος του αναστολέα

$P_p$ : η πίεση διάδοσης της ύβωσης



$P_{p,BA}$ : η πίεση διάδοσης ύβωσης για σωλήνα με τα χαρακτηριστικά του αναστολέα

$P_p, P_{p,BA}$ , σύμφωνα με το εν λόγω πρότυπο δίνονται από τη σχέση (4.6):

$$P_p = 35 a \sigma_y \left( \frac{t}{D} \right)^{2.5} \quad (4.6)$$

Στο ανωτέρω πρότυπο,  $a$  είναι σταθερά εξαρτάτε από τον τρόπο κατασκευής του σωλήνα. Για παράδειγμα, για σωλήνες που κατασκευάστηκαν με την μέθοδο UOE έχουμε  $a=0.85$ .

Σύμφωνα με τις σχέσεις (4.5) και (4.6) μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα αναστολέα, για παράδειγμα:

Συγκρίνοντας το πρότυπο DNV με το αριθμητικό μοντέλο που παρουσιάσαμε για αγωγό με διάμετρο 914.4 mm, πάχος 30.1 mm και αναστολέα με λόγο  $L_a/D$  ίσο με 1 και  $h/t$  ίσο με 2.5, θα πάρουμε από το πρότυπο:

$$P_{co} = 18.44 \text{ MPa}$$

Από το αριθμητικό μοντέλο προκύπτει ότι  $P_{co} = 9.72 \text{ MPa}$

Το πρότυπο API RP 1111 υπολογίζει την πίεση διάδοσης της ύβωσης από τη σχέση (4.7).

$$P_p = 24 \sigma_y \left( \frac{t}{D} \right)^{2.4} \quad (4.7)$$

Η σχέση 4.7 μας δίνει  $P_p = 2.98 \text{ MPa}$ , από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία βρήκαμε  $P_p = 2.45 \text{ MPa}$ . Ενώ για το σχεδιασμό ενός αναστολέα τύπου integral μας παραπέμπει στο *On the design of the integral Buckle arrestor* των **Kyriakides, S.Park, T.D και Ne ο, T.A.** και στη σχέση 4.4 που ήδη έχουμε παρουσιάσει.

## 5.Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, για να προσομοιώσουμε την μηχανική συμπεριφορά υποθαλάσσιων αγωγών υπό εξωτερική πίεση. Αρχικώς προσομοιώσαμε ατέλειες που μπορεί να υπάρχουν σε αγωγούς μεταφοράς υδρογονανθράκων και εξετάσαμε την επίδραση έχουν στην αντοχή του σωλήνα σε εξωτερική πίεση. Επίσης, μελετήσαμε μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης και τους αναστολές τύπου integral της ύβωσης.

Αρχικά έγινε μια συνοπτική παρουσίαση της θεωρίας ευστάθειας ελαστικού δακτυλίου υπό εξωτερική πίεση σε επίπεδη ένταση, για τον προσδιορισμό της κρίσιμης πίεσης λυγισμού  $P_{cr}$ . Αυτή η θεώρηση μπορεί μας παρέχει μια πρώτη εκτίμηση για την αντοχή σωλήνα σε φόρτιση με εξωτερική πίεση. Επίσης είδαμε με ποιο τρόπο αντιμετωπίζουν την σχεδίαση αγωγού σε εξωτερική πίεση τα πρότυπα DNV-OS-F101 και API RP 1111 που αναφέρονται σε υποθαλάσσιους αγωγούς μεταφοράς υδρογονανθράκων. Τα πρότυπα αυτά χρησιμοποιούν αποτελέσματα από τη θεωρία ελαστο-πλαστικού λυγισμού δακτυλίου, αλλά λαμβάνουν υπόψη και άλλους παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν την αντοχή του αγωγού, όπως είναι για παράδειγμα ο τρόπος παραγωγής του σωλήνα ή οι αρχικές ατέλειες. Τέτοιου είδους παράμετροι και αρχικές ατέλειες έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην αντοχή αγωγού σε εξωτερική πίεση.

Στη συνέχεια προσομοιώσαμε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων τη συμπεριφορά αγωγών για την επίδραση των αρχικών ατελειών στην αντοχή τους. Η ανάλυση βασίζεται στη θεώρηση ενός δι-διάστατου ελαστικού δακτυλίου από χάλυβα X65, για να εκτιμήσουμε την οριακή πίεση του αγωγού. Το μοντέλο μας εκμεταλλευόμενο τη διπλή συμμετρία του προβλήματός μας, προσομοιώνει το δακτύλιο αναλύοντας μόνο το ένα τεταρτημόριο του.

Οι αρχικές ατέλειες που εξετάσαμε είναι: α) η αρχική οβαλότητα που μπορεί να υπάρχει στην διατομή του αγωγού. β) η μεταβολή του πάχους κατά την περιφερική διεύθυνση του αγωγού λόγω κυρίως κατασκευαστικής ατέλειας ή διάβρωσης. γ) οι παραμένουσες τάσεις που ενδεχομένως υπάρχουν στον σωλήνα από την διαδικασία παραγωγής του. δ) η ανισοτροπία στο όριο διαρροής που μπορεί να παρουσιάζει το υλικό κατασκευής του σωληνωτού αγωγού κατά την αξονική με την περιφερική διεύθυνση. ε) η επίδραση που έχει στο σωλήνα η μορφή της καμύλης τάσης – παραμόρφωσης του υλικού.

Από τις ατέλειες που μελετήσαμε, είδαμε ότι την μεγαλύτερη επίδραση στην υποβάθμιση της αντοχής του αγωγού σε εξωτερική πίεση έχει η ατέλεια τύπου οβάλ διατομής του αγωγού. Μικρές τιμές της αρχικής οβαλότητας ακόμα και της τάξης του 1% μπορεί να επιφέρουν μεγάλη μείωση στην αντοχή σε εξωτερική πίεση.

Η ατέλεια μεταβολής του πάχους κατά την περιφέρεια έχει και αυτή σημαντική επίπτωση (μέχρι και 20%) στην οριακή πίεση, όπως επίσης επηρεάζει και τη μορφή του λυγισμού αφού η οποία δεν είναι πλέον συμμετρική και ως προς δυο άξονες κάθετους μεταξύ τους αλλά παρουσιάζει συμμετρία μόνο κατά τον άξονα που είναι παράλληλος στη διεύθυνση της εκκεντρότητας.

Μικρότερη επίδραση –αλλά όχι αμελητέα- στην αντοχή του αγωγού έχουν οι παραμένουσες τάσεις, τις οποίες στην περιμετρική διεύθυνση μπορούμε να εκτιμήσουμε σχετικά εύκολα.

Η ανισοτροπία του ορίου διαρροής του αγωγού στην περιμετρική διεύθυνση σε σχέση με την αξονική μπορεί να προκαλέσει μέχρι και 10% μεταβολή στην οριακή πίεση και ανάλογα με την τιμή του λόγου ανισοτροπίας.

Τέλος, για μικρότερες τιμές του λόγου  $D/t$  σημαντική επίδραση στην αντοχή σε εξωτερική πίεση έχει και η μορφή της καμύλης του υλικού, ενώ για μεγαλύτερες τιμές του  $D/t$  η επίδραση αυτή δεν είναι τόσο μεγάλη.

Στους αγωγούς σε μεγάλα βάθη η κατάρρευση μιας διατομής του μπορεί να προκαλέσει εμφάνιση το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης. Μελετήσαμε το

συγκεκριμένο φαινόμενο μέσω της αριθμητικής προσομοίωσής του με ένα τριδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αναλύοντας μόνο το  $\frac{1}{4}$  του αγωγού εκμεταλλευόμενοι και πάλι τη διπλή συμμετρία του προβλήματος. Η πίεση που είναι αναγκαία για τη διάδοση της ύβωσης  $P_p$  είναι το 15% περίπου της πίεσης κατάρρευσης του αγωγού. Το εν λόγω φαινόμενο αν δεν ανασχεθεί μπορεί να καταστρέψει μεγάλα μήκη αγωγού μέχρι η εξωτερική πίεση να μειωθεί αρκετά ώστε να πέσει κάτω από το επίπεδο της  $P_p$ , και να σταματήσει η διάδοση της αστοχίας.

Για να σταματήσουμε την ύβωση χρησιμοποιούμε τους αναστολείς. Μελετήσαμε τους αναστολείς τύπου integral που είναι σωληνωτά τμήματα με μεγαλύτερο πάχος συγκολλημένα κατά μήκος του υποθαλασσίου αγωγού. Οι αναστολείς αυτοί σχεδιάζονται με κύριες παραμέτρους το μήκος και το πάχος τους. Για να προσδιορίσουμε την αποτελεσματικότητά τους δημιουργήσαμε με το ABAQUS αριθμητικά μοντέλα αγωγών με αναστολείς διαφορετικών διαστάσεων και προσδιορίσαμε σε κάθε περίπτωση την πίεση ανάσχεσης του αναστολέα, δηλαδή την τιμή της εξωτερικής πίεσης που θα πρέπει να υπάρχει ώστε η ύβωση να συνεχίσει την διάδοση της και μετά τον αναστολέα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με την αύξηση του μήκους και του πάχους του αναστολέα έχουμε και αύξηση της πίεσης ανάσχεσης δηλαδή για συγκεκριμένο αγωγό έχουμε την αύξηση της αποδοτικότητας του αναστολέα. Ο σχεδιασμός ενός αναστολέα τύπου integral θα πρέπει να λαμβάνει σοβαρά υπόψη αυτές τις παραμέτρους, με κατάλληλη επιλογή του μήκους και του πάχους του. Για το σχεδιασμό αυτό σε πρακτικό επίπεδο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι διατάξεις του προτύπου DNV-OS-F101 και του προτύπου API RP 1111.



## Παράρτημα

### 1. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FORTRAN ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΣΕΤ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ABAQUS.

```

program residual_stress

!*****

!calculates residual stresses for the 2 -d model for 6 elements per t and 60 elements per
theta

!also creates element sets and initial conditions for abaqus input file

! linear profile stresses with zero middle point and max value at the outer diameter

!*****

implicit none

real(4):: sx, sy, txy, f,ph, pi, sxx,syy, txyx,syn,sym

integer::i,j,nrs=0,nrss=0, k,nrsss=0,l

print*, 'give max value for stress sy at 0 degrees'

read*,sy

syn=sy/2

sym=sy/3

open (10, file='residualstress.txt')

pi=4.*atan(1.)

sx=0., txy=0., f=0., ph=0.

print*, 'no ', 'sx ', 'sy ', 'sxy '

      do l=1,360,1 !make element sets

write(10,*) '*Elset, elset=', 'el',l, ', internal, instance=Part-1-1, generate'

write(10,*) l,',', l,',', '1'

      end do

do i=1,60,1 !1st loop

ph=ph+(1.5*pi/180)

```

```

f=2*Ph
sxx= ((sx+sy)/2)+(((sx-sy)/2)*cos(f))+ txy*sin(f)
      syy=((sx+sy)/2)-(((sx-sy)/2)*cos(f))- txy*sin(f)
      txyx=-(((sx-sy)/2)*sin(f))+txy*cos(f)
nrs=i+300
      write(10,*)'INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS'
      write(10,*) 'el',i,',', sxx,',', syy,',',txyx
      write(10,*)'INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS'
      write(10,*) 'el',nrs,',', -sxx,',', -syy,',',-txyx
      print*,i, sxx, syy,txyx
end do
ph=0.,sxx=0., syy=0., txyx=0.
do j=61,120,1 !2nd loop
      ph=ph+(1.5*pi/180)
      f=2*Ph
nrss= 180+j
      sxx= ((sx+syn)/2)+(((sx-syn)/2)*cos(f))+ txy*sin(f)
      syy=((sx+syn)/2)-(((sx-syn)/2)*cos(f))- txy*sin(f)
      txyx=-(((sx-syn)/2)*sin(f))+txy*cos(f)
      write(10,*)'INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS'
      write(10,*) 'el',j,',', sxx,',', syy,',',txyx
      write(10,*)'INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS'
      write(10,*) 'el',nrss,',', -sxx,',', -syy,',',-txyx
      print*,j, sxx, syy,txyx
end do
sxx=0., syy=0., txyx=0
do k=121,180,1 !LOOP 3

```

```

ph=ph+(1.5*pi/180)

f=2*Ph

sxx= ((sx+sym)/2)+(((sx-sym)/2)*cos(f))+ txy*sin(f)
syy= ((sx+sym)/2)-(((sx-sym)/2)*cos(f))- txy*sin(f)
txyx=-(((sx-sym)/2)*sin(f))+txy*cos(f)

nrsss=k+60

Write(10,*)'INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS'

write(10,*)'el',k,',', sxx,',', syy,',',txyx

Write(10,*)'INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS'

write(10,*)'el',nrsss,',', -sxx,',', -syy,',',-txyx

Print*,k, sxx, syy,txyx

end do

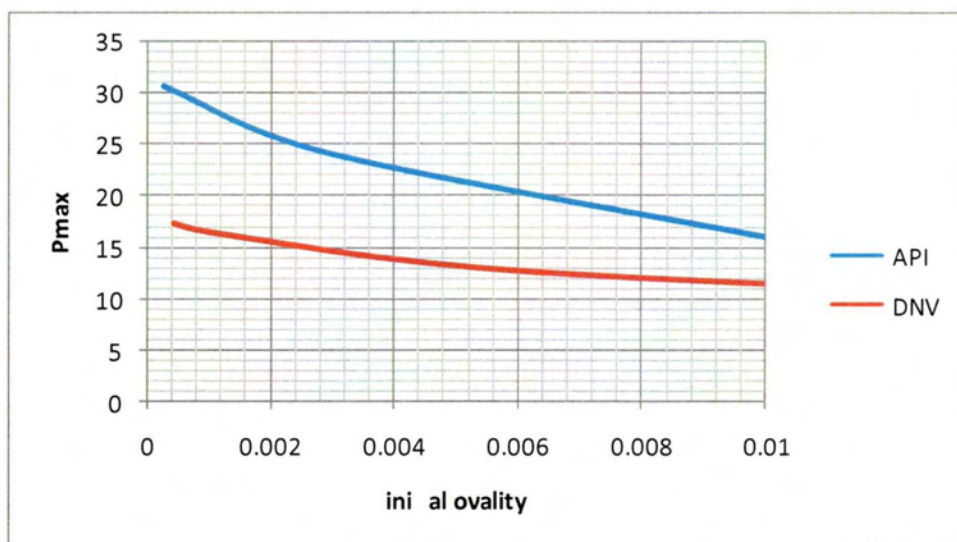
close (10)

end program residual_stress

```

## 2. ΠΙΝΑΚΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στο διάγραμμα παρατηρούμε την συμπεριφορά της πίεσης κατάρρευσης σε σχέση με την αρχική ατέλεια μορφής οβάλ για λόγους D/t σύμφωνα με τα πρότυπα API 1111 και DNV-OS όπως περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.



Σύγκριση μεταξύ των προτύπων API και DNV.

Η διαφορά στις μέγιστες πιέσεις είναι αποτέλεσμα του διαφορετικού πάχους των αγωγών αυτών. Αλλά και στις δυο περιπτώσεις βλέπουμε πως η αντοχή υποβαθμίζεται καθώς μεγαλώνει η αρχική οβαλότητα.

### 2.1 Πίνακας Δεδομένων παραμετρικής ανάλυσης αναστολέων για $L/D$

L/D	Pcr	Pco	Pp	e=Pco/Pp	n=Pco-Pp/Pcr-Pp
0					1
0.5	16.8695	4.15901	2.41363	1.72313486	0.120738496
1	16.8449	6.14	2.44	2.51639344	0.256857042
1.5	16.893	7.33425	2.39257	3.06542755	0.340795411

### 2.2 Πίνακας Δεδομένων παραμετρικής ανάλυσης αναστολέων για $h/t$

h/t	Pcr	Pco	Pp	e	n
1.5	16.9661	4.1284	2.44291	1.689952	0.116055082
2	16.8449	6.14	2.44	2.516393	0.256857042
2.5	16.6633	9.17464	2.44081	3.758851	0.473463507

## 3. ΤΕΧΝΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ABAQUS.

### 3.1 Πως δηλώνουμε αρχικές τάσεις σε ένα μοντέλο.

Από το ABAQUS CAE δεν μπορούμε να δηλώσουμε αρχικές τάσεις σε ένα μοντέλο, για να το πετύχουμε αυτό θα πρέπει να επέμβουμε στο input file του μοντέλου που έχουμε φτιάξει για να εκτελέσουμε μια ανάλυση (job). Έτσι φτιάχνουμε σεντ στοιχεία που θέλουμε να δώσουμε τάσεις όπως βλέπουμε στο παράδειγμα:

Στο κομμάτι του assembly,

```
*Elset, elset={ονομα σεντ} , internal, instance=Part-1-1, generate
```

```
{αρχικό στοιχείο},{τελικό στοιχείο},{βήμα}
```

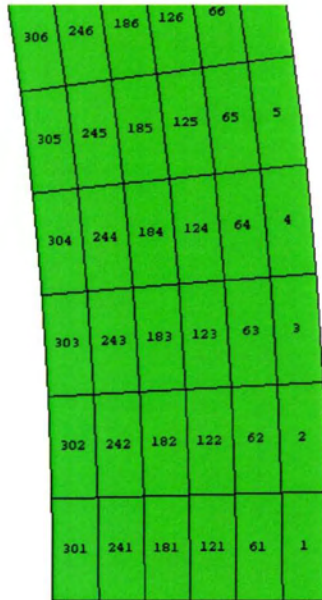
Για να δώσουμε τιμή στις τάσεις γράφουμε στο κομμάτι για τις συνοριακές συνθήκες:

```
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS
```

```
{όνομα σεντ στοιχείων} , {σ11} , {σ22} , {σ12}
```

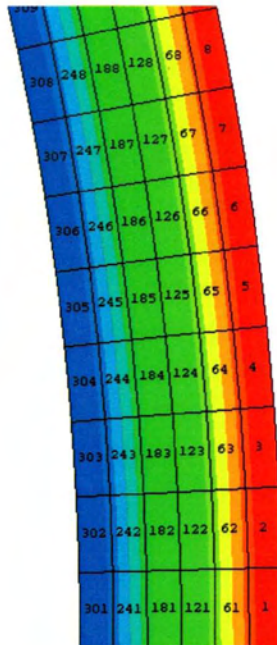
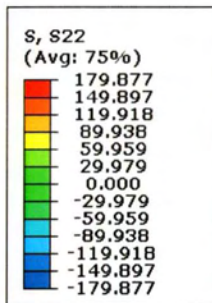


Μπορούμε να δείξουμε την αρίθμηση από το σχήμα που ακολουθεί.



Επομένως δίνουμε στα στοιχεία 1,2,3,4.....κοκ τις τιμές των τάσεων σύμφωνα με το προφίλ που υπολογίσαμε, αλλά με προσοχή έχοντας υπόψη ότι δουλεύουμε στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων.

Έτσι δίνουμε στο μοντέλο μας το προφίλ των επιθυμητών παραμενουσών τάσεων



Παράδειγμα για την κατανομή των παραμενουσών τάσεων στο μοντέλο μας πριν ξεκινήσουμε την ανάλυση.

## Βιβλιογραφία

API. 1999. *Recommended Practice 1111*.

Biran, Andrian και Breiner, Moshe. 2007. *MATLAB 6 ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ*. Θεσσαλονίκη : εκδόσεις Τζιολα, 2007.

F101, DNV OS. 2012. *Submarine pipeline systems*.

Hue, Jianghong και Hoo Fa , Michelle. 2001. *buckle propagation in pipelines with non uniform thickness*. Akron, USA : Pergamon, 2001.

Karamanos, S A και Tassoulas, J L. 1991. *pipeline stability in deep water. 1st national conference on steel structures*. Athens,Greece : s.n., 1991.

Kyriakides,S και Neο,Τ.Α. 1999. *On the dynamics of propagating buckles in pipelines. International journal of solids and structures*. elsevier, vol, 37.

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

Kyriakides, S, ParkT.D και Neο,Τ.Α. 1998. *On the design of the integral Buckle arrestors*. Austin : elsevier, 1998.

Neο,Τ.Α και Estefen, S.F. 1995. *Buckle arrestors for deepwater pipelines*. Oxford : Elsevier Ltd.

Nogueira, Andre C. και Tassoulas, John L. 1994. *Finite element analysis of buckle propagation in pipelines under tension*. Austin, Texas : Elsevier science ltd.

Pasqualino, I. P. και Estefen, S. F. 2001. *A non linear analysis of the buckle propagation problem in deepwater pipelines*. Rio de Janeiro : International journal of solids and structures, 2001. 38.

Kyriakides,S και Park T.D. 1997. *On the performance of integral Buckle arrestors for offshore pipelines*. Austin, Texas : Elsevier Science Ltd.

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



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000123964