



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

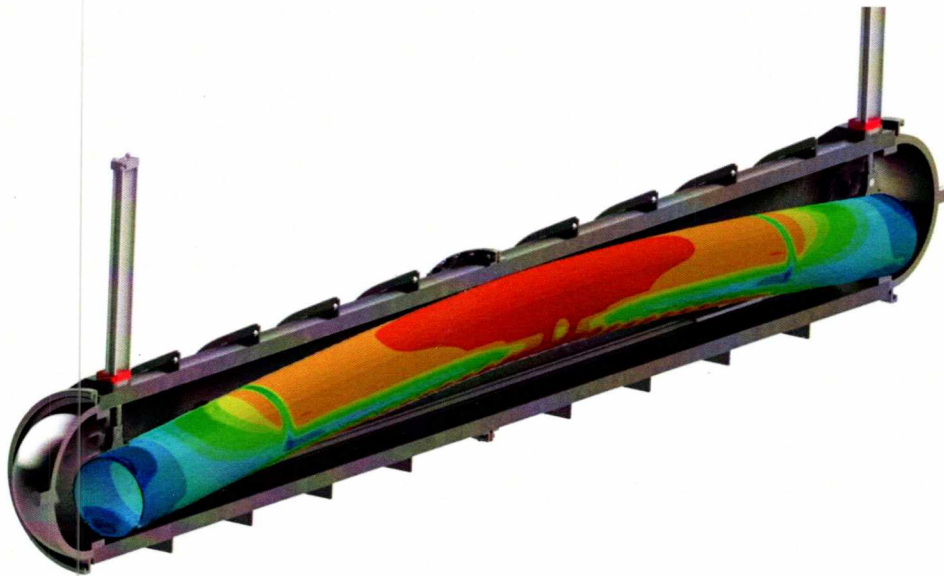
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ  
ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΨΗΣ. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ  
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΧΕΙΟΥ ΠΙΕΣΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ  
ΔΟΚΙΜΩΝ

υπό

ΚΙΑΚΙΔΗΣ ΣΤΑΜΑΤΗΣ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος 2015





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

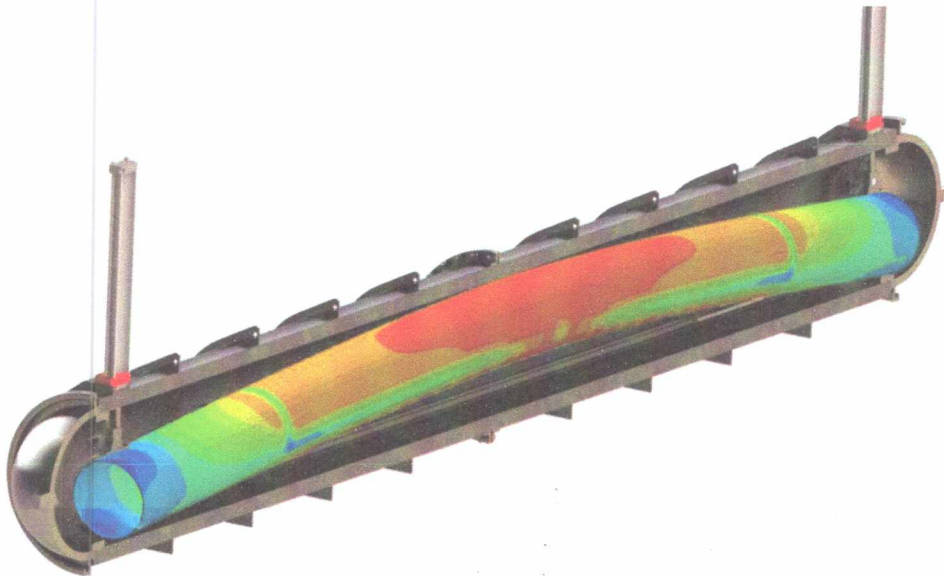
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ  
ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΨΗΣ. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ  
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΧΕΙΟΥ ΠΙΕΣΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ  
ΔΟΚΙΜΩΝ

υπό

ΚΙΑΚΙΔΗΣ ΣΤΑΜΑΤΗΣ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος 2015





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

Αριθ. Εισ.: 14136/1  
Ημερ. Εισ.: 05-10-2017  
Δωρεά: Συγγραφέας  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ  
2015  
ΚΙΑ

© 2015 ΣΤΑΜΑΤΗΣ ΚΙΑΚΙΔΗΣ

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

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

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

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, 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. Αλέξη Κερμανίδη και Άννα Ζερβάκη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου. Επιπρόσθετα, ευχαριστώ τους φίλους μου για τις όμορφες στιγμές που περάσαμε κατά τη διάρκεια των σπουδών μας. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Κατερίνα και Θόδωρο για την ολόψυχη αγάπη και την αδιάκοπη υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια σε όλες τις επιλογές μου και θα ήθελα να τους αφιερώσω την παρούσα εργασία.

Σταμάτης Κιακίδης

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ  
ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΨΗΣ. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ  
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΧΕΙΟΥ ΠΙΕΣΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ  
ΔΟΚΙΜΩΝ

ΣΤΑΜΑΤΗΣ ΚΙΑΚΙΔΗΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2015

**Επιβλέπων Καθηγητής:** Δρ. Σπύρος Καραμάνος, Καθηγητής Υπολογιστικής  
Μηχανικής και Πεπερασμένων Στοιχείων

### Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το θέμα της αντοχής υποθαλάσσιων αγωγών σε υψηλή εξωτερική πίεση και του σχεδιασμού κατάλληλης διάταξης για πειραματικές δοκιμές σε υποθαλάσσιους αγωγούς οι οποίοι υπόκεινται σε συνδυασμένη φόρτιση εξωτερικής πίεσης και κάμψης. Αρχικά, μελετάται η μηχανική συμπεριφορά των αγωγών σε διάφορες περιπτώσεις φορτίσεων και δίνεται έμφαση στο φαινόμενο του λυγισμού αλλά και στην εύρεση του κρίσιμου φορτίου αστοχίας. Στο δεύτερο μέρος επιχειρείται η διαστασιολόγηση των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του δοχείου πίεσης στο οποίο θα διενεργούνται οι συγκεκριμένες δοκιμές.

Αναλυτικότερα, στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μία ανασκόπηση του προβλήματος, αναλύονται οι βασικότεροι τρόποι πόντισης των υποθαλάσσιων αγωγών και παρουσιάζονται οι ήδη υπάρχοντες τρόποι μελέτης του φαινομένου. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 2 παραθέτεται ένα παράδειγμα διαστασιολόγησης υποθαλάσσιου αγωγού σύμφωνα με την αμερικάνικη προδιαγραφή API 1111 και αναλύονται οι δυνάμεις που δέχεται ο αγωγός κατά τη διαδικασία της εγκατάστασής του.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της μηχανικής συμπεριφοράς διδιάστατου μοντέλου μορφής δακτυλίου υπό εξωτερική πίεση ενώ στο Κεφάλαιο 4 εισάγουμε αριθμητικές μεθόδους μελέτης του φαινομένου.

Γίνεται μια συνοπτική εισαγωγή στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων αλλά και στο πρόγραμμα ABAQUS που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και στο Κεφάλαιο 5 ακολουθούν προσομοιώσεις τόσο διδιάστατων όσο και τριδιάστατων μοντέλων υπό εξωτερική πίεση.

Το Κεφάλαιο 6 αφορά την κάμψη σωλήνων και περιλαμβάνει δύο τρόπους φόρτισης που οδηγούν σε αστοχία ενός σωλήνα. Κατά τον πρώτο τρόπο, εφαρμόζεται καθαρή ροπή στα άκρα του σωλήνα ενώ κατά τον δεύτερο, ο οποίος προσομοιώνει καλύτερα τον τρόπο επιβολής κάμψης στο δοχείο πίεσης, ασκούνται εγκάρσια φορτία στις άκρες του σωλήνα, τα οποία σε συνδυασμό με κατάλληλες στηρίξεις προκαλούν κάμψη. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 7 αναλύεται η περίπτωση της συνδυασμένης καταπόνησης αγωγών σε εξωτερική πίεση και κάμψη και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τον σχεδιασμό του δοχείου πίεσης που ακολουθεί.

Τα κεφάλαια που έπονται αφορούν αποκλειστικά την πειραματική διάταξη για δοκιμές σωλήνα σε συνδυασμένη καταπόνηση. Στο κεφάλαιο 8, εστιάζουμε στο κελύφος του δοχείου πίεσης. Διαστασιολογείται το πάχος του με βάση τη προδιαγραφή EN 13445-3:2002 και έπειτα με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων εξετάζονται τέσσερις διαφορετικές γεωμετρικές διατομές του κελύφους (με ή χωρίς ενισχύσεις) αλλά και η μέθοδος του διπλού σωλήνα. Στο Κεφάλαιο 9 μελετώνται οι δυνάμεις στις στηρίξεις του δοχείου πίεσης και οι υδραυλικοί βραχίονες επιβολής των φορτίων, αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται ορισμένες σχεδιαστικές προτάσεις και αντικείμενα προς μελέτη τα οποία δεν μπόρεσαν να μελετηθούν στον περιορισμένο χρόνο της διπλωματικής εργασίας. Τέλος, στο κεφάλαιο 10 παρατίθεται ο πρωταρχικός σχεδιασμός της σύνδεσης του διαιρούμενου κελύφους του δοχείου πίεσης.



## Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή .....	1
1.1	Παρουσίαση προβλήματος .....	1
1.2	Μέθοδοι πόντισης .....	1
1.3	Τρόποι ανάλυσης της συμπεριφοράς των αγωγών .....	4
1.4	Σκοπός της εργασίας .....	6
2.	Διαστασιολόγηση Υποθαλάσσιου Αγωγού .....	7
2.1	Εισαγωγή .....	7
2.2	Γενικά στοιχεία .....	7
2.3	Διαστασιολόγηση σύμφωνα με API 1111 .....	8
2.4	Ανάλυση δυνάμεων κατά την τοποθέτηση .....	10
3.	Αναλυτικός Υπολογισμός Οριακής Αντοχής .....	15
3.1	Εισαγωγή .....	15
3.2	Ελαστική συμπεριφορά δακτυλίου υπό ομοιόμορφη εξωτερική πίεση χωρίς αρχική ατέλεια .....	15
3.3	Ελαστική συμπεριφορά δακτυλίου με αρχική ατέλεια .....	17
3.4	Μεταλυγισμική συμπεριφορά .....	18
3.5	Γραφική αναπαράσταση της συμπεριφοράς .....	21
4.	Προσομοίωση Αγωγού σε Μηχανικές Καταπονήσεις με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων .....	25
4.1	Εισαγωγή .....	25
4.2	Βασικά δεδομένα του προσομοιώματος .....	26
4.2.1	Αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης του μη-γραμμικού προβλήματος ..	26
4.2.2	Υλικό αγωγού .....	26
4.2.3	Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων .....	29
4.2.4	Επεξεργασία αποτελεσμάτων .....	29
5.	Ανάλυση της Συμπεριφοράς Αγωγών σε Εξωτερική Πίεση .....	31
5.1	Μοντέλο μορφής δακτυλίου .....	31
5.2	Τριδιάστατο μοντέλο .....	36
5.3	Αποτελέσματα μοντέλου τριδιάστατης ανάλυσης .....	41
5.4	Συμπεράσματα .....	42
6.	Κάμψη Χαλύβδινων Σωλήνων .....	43
6.1	Εισαγωγή στη κάμψη .....	43
6.2	Αρχική ατέλεια σε καμπτικά φορτία και μοντελοποίηση .....	44
6.3	Αποτελέσματα καθαρής κάμψης σωλήνων .....	47
6.4	Επίδραση του μήκους κύματος της ατέλειας .....	48

6.5	Αριθμητικά αποτελέσματα για καθαρή κάμψη .....	49
6.6	Συμπεράσματα αποτελεσμάτων καθαρής κάμψης .....	52
7.	Συνδυασμένη Καταπόνηση Εξωτερικής Πίεσης και Κάμψης.....	53
7.1	Εισαγωγή στην συνδυασμένη καταπόνηση.....	53
7.2	Μοντέλο με ροπή στα άκρα.....	54
7.3	Αποτελέσματα συνδυασμένης φόρτιση με ροπή στα άκρα.....	54
7.4	Μοντελοποίηση κάμψης με την μέθοδο κάμψης τεσσάρων σημείων .....	58
7.5	Αποτελέσματα συνδυασμένης φόρτισης four-point bending. ....	59
7.6	Αριθμητικά αποτελέσματα .....	63
7.7	Βασικά συμπεράσματα.....	68
8.	Διαστασιολόγηση Πάχους Δοχείου Πίεσης για Μηχανικές Δοκιμές ...	69
8.1	Εισαγωγή .....	69
8.2	Υπολογισμός πάχους κελύφους EN 13445-3 .....	70
8.3	Μοντελοποίηση κυλινδρικού κελύφους σε εσωτερική πίεση .....	73
8.4	Επιρροή των νευρώσεων στην αντοχή.....	75
8.5	Συμπεράσματα .....	79
8.6	Δοχείο διπλού τοιχώματος.....	79
8.7	Πάχος ημισφαιρικών πλευρικών τμημάτων .....	81
9.	Γενική Γεωμετρία και Στηρίξεις Δοχείου Πίεσης .....	83
9.1	Εισαγωγή .....	83
9.2	Υπολογισμοί .....	84
9.3	Υπολογισμοί δυνάμεων και ροπών .....	87
9.4	Υπολογισμός διαδρομής πιστονιού.....	88
9.5	Τοποθέτηση υδραυλικών πρεσών.....	89
9.6	Σχεδιαστικές προτάσεις και αντικείμενα προς μελέτη.....	91
10.	Σύνδεση του Κελύφους .....	95
10.1	Σύνδεση με φλάντζα .....	95
10.2	Σύνδεση με διπλή αρμοκαλύπτρα.....	99
10.3	Σύνδεση με μετωπική φλάντζα.....	104
	Πίνακας Εικόνων.....	105
	Πίνακας Γραφημάτων .....	109
	Πίνακες.....	111
	Βιβλιογραφία .....	113

## 1. Εισαγωγή

### 1.1 Παρουσίαση προβλήματος

Η παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος αρκετές δεκαετίες λόγω των αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων. Η σύγχρονη αναγέννηση του κλάδου ξεκίνησε στις αρχές του 1970, όταν η Βόρεια θάλασσα αποτέλεσε χώρο υπεράκτιας παραγωγής υδρογονανθράκων. Ο κόλπος του Μεξικού ήταν και είναι επίσης μία πολύ σημαντική περιοχή για αυτή τη δραστηριότητα. Από τότε η υπεράκτια βιομηχανία εξαπλώθηκε σε όλο τον κόσμο και εξώθησε στη σταδιακή μετάβαση σε όλο και μεγαλύτερα βάθη. Η εξόρυξη έχει φθάσει να πραγματοποιείται ακόμα και σε νερά βάθους περίπου 2130m, ενώ υπάρχουν σκέψεις και για βάθη που υπερβαίνουν τα 3 ή τα 4 χιλιόμετρα.

Οι αγωγοί είναι αναπόσπαστο κομμάτι της βιομηχανίας υδρογονανθράκων και χρησιμοποιούνται στην εξερεύνηση, γεώτρηση, παραγωγή και μεταφορά των ενεργειακών πόρων. Η εγκατάσταση και η λειτουργία τους σε βαθιά νερά θέτει υψηλές απαιτήσεις αντοχής. Πιο συγκεκριμένα, οι υψηλές πιέσεις που επικρατούν στα βάθη της θάλασσας, οι υψηλές εξωγενείς δυνάμεις (σεισμοί) και οι μεγάλες φορτίσεις που δημιουργούνται κατά την διάρκεια της εγκατάστασης τους σε μεγάλα βάθη συμβάλουν στη δημιουργία ενός σημαντικού αριθμού οριακών καταστάσεων που πρέπει να μελετηθούν.

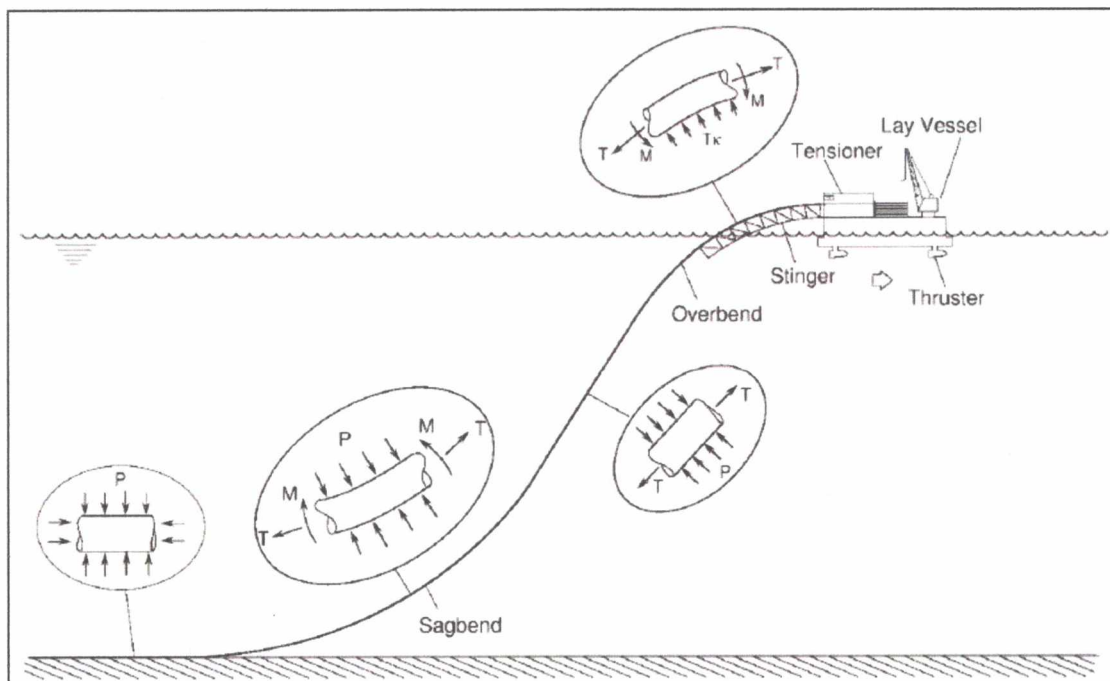
### 1.2 Μέθοδοι πόντισης

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί διαφέρουν σημαντικά από τους χερσαίους, ειδικά στον τρόπο κατασκευής. Κατά τη διάρκεια της πόντισης, ένα μεγάλο μέρος του αγωγού αιωρείται ανάμεσα στο πυθμένα και στον πλοίο εγκατάστασης. Αυτό το κομμάτι αγωγού υπόκειται σε μία πληθώρα καταπονήσεων στατικών και δυναμικών και είναι επιρρεπές σε αστοχία. Μπορούμε να παρατηρήσουμε τρεις περιπτώσεις κάμψης αναλόγως του τρόπου τοποθέτησης και μεταφοράς. Επιπρόσθετα, η πόντιση πραγματοποιείται με τον αγωγό κενό εσωτερικά, ώστε να περιοριστεί το βάρος του και να ελαχιστοποιηθούν τα κόστη μεταφοράς και εγκατάστασης. Οπότε δεν μπορεί να υπάρξει εσωτερική πίεση που να αντισταθμίσει την εξωτερική. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια της πόντισης, σχεδόν κάθε τμήμα του αγωγού υπόκειται για ένα χρονικό

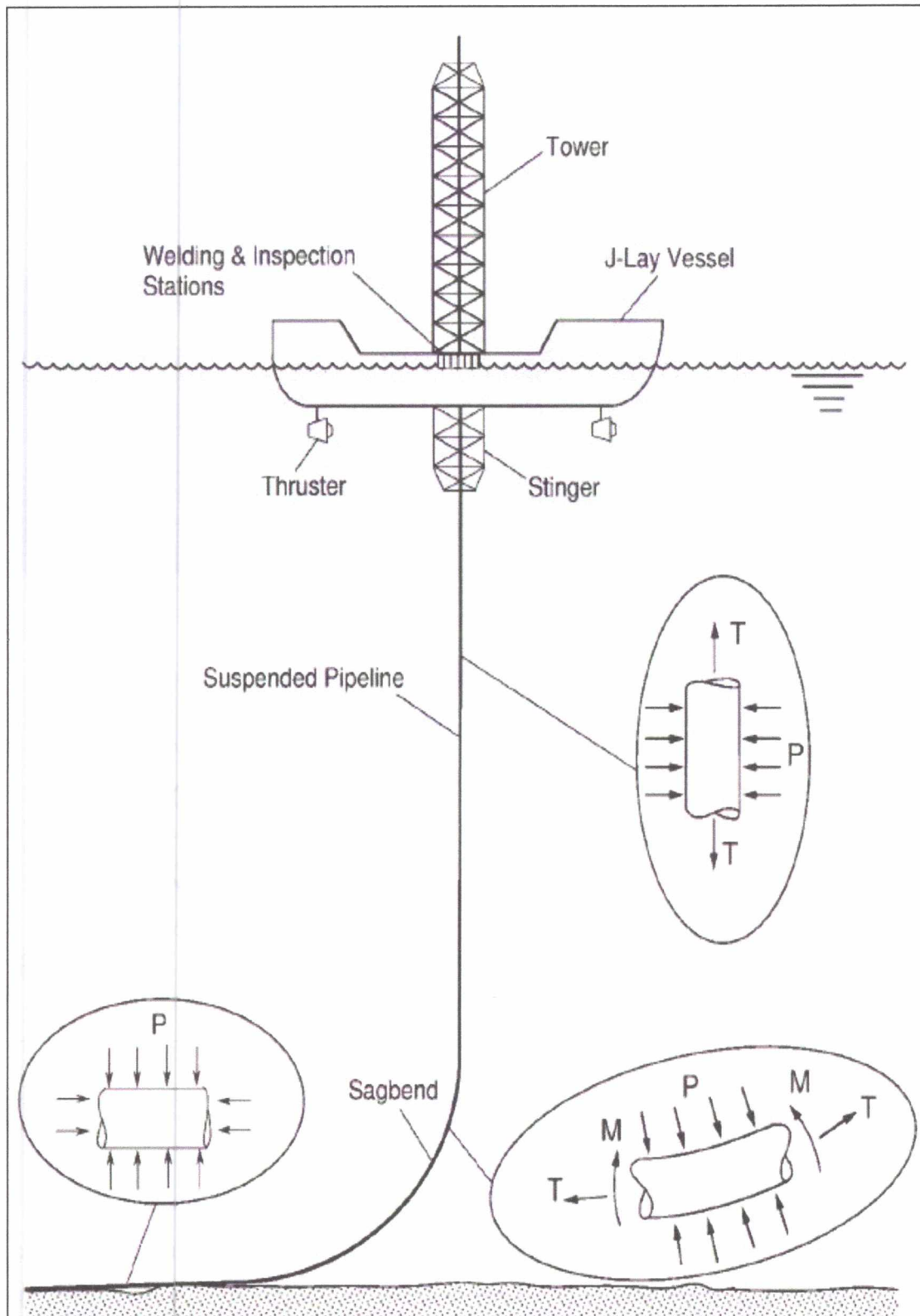


διάστημα, σε ταυτόχρονη συνδυασμένη καταπόνηση κάμψης, εξωτερικής πίεσης και εφελκυσμού.

Δύο είναι οι επικρατέστερες μέθοδοι πόντισης υποθαλάσσιων αγωγών, S-lay και J-lay. Αναλυτικότερα, στην πόντιση του αγωγού με την μέθοδο S-lay είναι εμφανές πως ο αγωγός αποκτά σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις σε δύο ζώνες (Εικόνα 1). Η πρώτη παρατηρείται στο σημείο που ο αγωγός προσεγγίζει τον θαλάσσιο πυθμένα και η δεύτερη όταν εγκαταλείπει το πλοίο. Αντίστοιχα, στη μέθοδο J-lay (Εικόνα 2), η οποία είναι η πλέον ενδεδειγμένη για την πόντιση σε μεγάλα θαλάσσια βάθη, οι πλαστικές παραμορφώσεις είναι έντονες αλλά αποφεύγεται η δεύτερη ζώνη παραμόρφωσης που έχει η μέθοδος S-lay. Τέλος, κατά τη διαδικασία μεταφοράς και πόντισης του αγωγού με την μέθοδο Reeling, ο αγωγός είναι τυλιγμένος σε ένα μεγάλης διαμέτρου τύμπανο (Εικόνα 3). Το τύμπανο περιστρέφεται προκαλώντας το ξετύλιγμα του αγωγού. Στην περίπτωση αυτή οι καμπτικές παραμορφώσεις είναι σημαντικές και δημιουργούνται πριν καν εισέλθει ο αγωγός στο νερό.

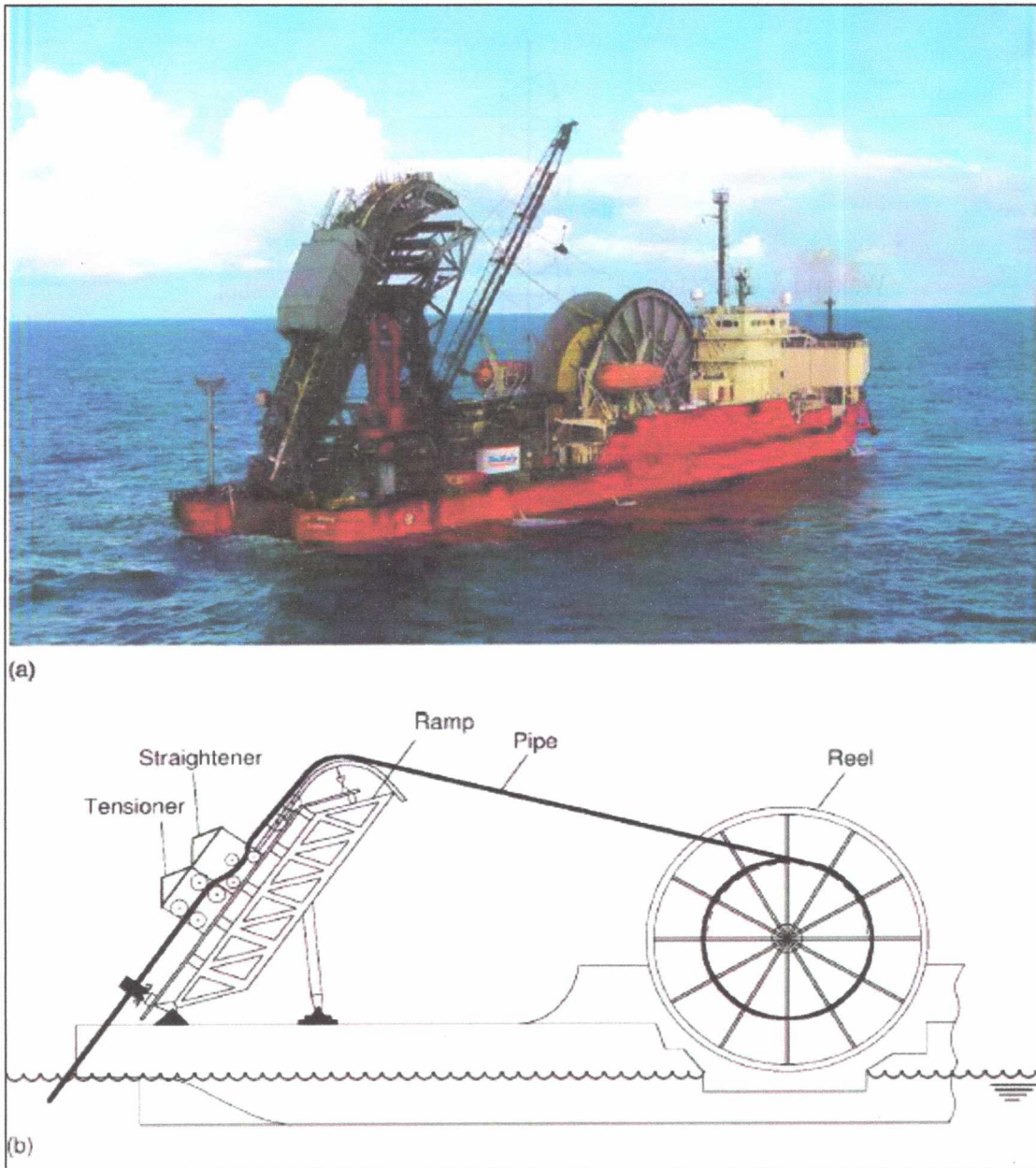


*Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση φορτίσεων σε κάθε ζώνη εγκατάστασης και λειτουργίας με τη μέθοδο εγκατάστασης S-lay, (Kyriakides & Corona, 2007).*



Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση φορτίσεων σε κάθε ζώνη εγκατάστασης και λειτουργίας με την μέθοδο εγκατάστασης J-lay, (Kyriakides & Corona, 2007).





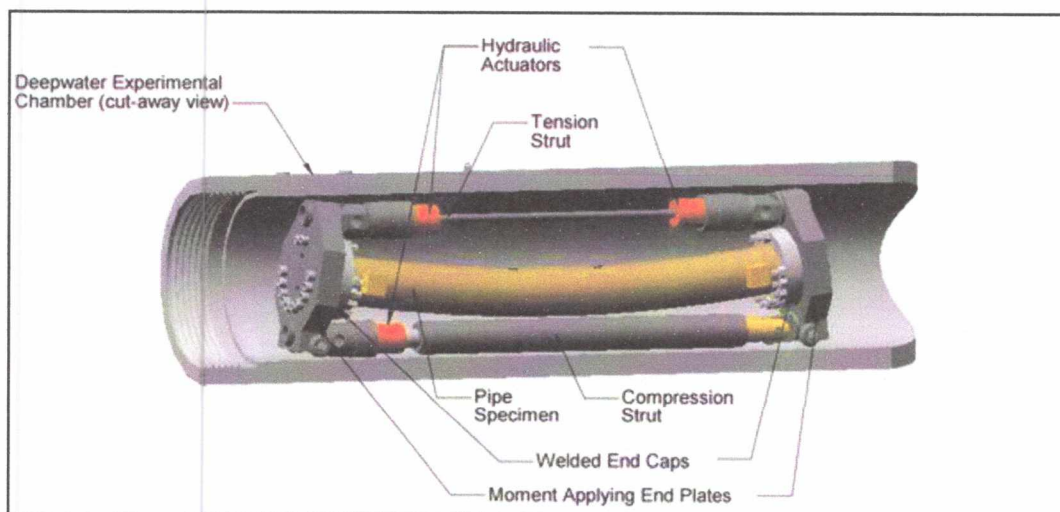
Εικόνα 3: Πλοίο της εταιρίας Technip κατά την εγκατάσταση υποθαλάσσιων αγωγών με τη μέθοδο Reeling (a) φωτογραφία και (b) σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας της μεθόδου Reeling, (Kyriakides & Corona, 2007).

### 1.3 Τρόποι ανάλυσης της συμπεριφοράς των αγωγών

Στις μέρες μας η μελέτη της συμπεριφοράς αυτής γίνεται με δύο τρόπους, υπολογιστικά και πειραματικά. Η πρώτη μέθοδος αποφεύγει κατά κύριο λόγο την αναλυτική προσέγγιση καθώς το φαινόμενο του λυγισμού είναι περίπλοκο και σχεδόν αδύνατο να μελετηθεί με ακρίβεια. Για αυτόν το λόγο και καταφεύγουμε σε αριθμητικές μεθόδους όπως αυτή των πεπερασμένων στοιχείων. Στις αναλύσεις αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως έτοιμα υπολογιστικά προγράμματα στα οποία γίνονται οι προσομοιώσεις. Αναφορικά με την πειραματική μέθοδο, μπορούμε εύκολα να

καταλάβουμε τις πρακτικές δυσκολίες. Οι αγωγοί πρέπει κατά κύριο λόγο να εξετασθούν σε συνδυασμό κάμψης και εξωτερικής πίεσης. Το βασικό πρόβλημα είναι η τάξη μεγέθους των δυνάμεων και πιέσεων που αναφερόμαστε. Οι πιέσεις ξεπερνούν τα 200 bar και η καμπτική ροπή που απαιτείται για τον λυγισμό είναι πολύ υψηλή. Οπότε όχι μόνο πρέπει η πειραματική διάταξη να αντέχει τα μεγέθη αυτά αλλά να έχει και αρκετά μεγάλο μέγεθος ώστε να μπορούν να δοκιμαστούν οι συγκεκριμένοι αγωγοί, που η διάμετρός τους ξεπερνά τα 500mm και φτάνει μέχρι το 1m.

Σε γενικές γραμμές, τα πειράματα που γινόταν μέχρι τώρα περιλάμβαναν μόνο κάμψη ή μόνο εξωτερική πίεση. Ελάχιστες είναι οι περιπτώσεις διατάξεων που πραγματοποιούν συνδυαστική καταπόνηση. Επίσης οι διατάξεις αυτές είτε έχουν αυστηρούς περιορισμούς στην μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση είτε περιορίζουν σημαντικά τη μέγιστη διάμετρο δοκιμίου που μπορούν να δεχτούν. Ενδεικτικά αναφέρουμε τον θάλαμο πίεσης της εταιρείας C-FER (Εικόνα 4). Η μέγιστη πίεση είναι ικανοποιητική φθάνοντας τα 550 bar (αντιστοιχώντας σε βάθος 5500m) αλλά οι διαστάσεις του περιορίζουν τις δυνατότητες του, 10.7m μήκος και 1.22m εσωτερική διάμετρος. Ο χώρος περιορίζεται κυρίως λόγω του τρόπου που ασκείται η κάμψη καθώς ο μηχανισμός βρίσκεται εξ ολοκλήρου στο εσωτερικό του δοχείου. Επίσης όσο μεγαλύτερη απαίτηση υπάρχει για τη διάμετρο του κελύφους, τόσο μεγαλύτερο πάχος τοιχώματος απαιτείται για να αντέχει δεδομένη εσωτερική πίεση.



Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης για μηχανικές δοκιμές αγωγών σε φόρτιση συνδυασμένης κόπωσης εξωτερικής πίεσης και κάμψης, (C-FER Technologies).



## 1.4 Σκοπός της εργασίας

Στόχος τη παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι διττός και περιλαμβάνει α) την ανάλυση αγωγών σε φορτίσεις εξωτερικής πίεσης και κάμψης με πεπερασμένα στοιχεία και β) τον καθορισμό γενικών προδιαγραφών και απαιτήσεων για την κατασκευή ενός δοχείου πίεσης δοκιμών αγωγών σε συνδυασμό κάμψης και εξωτερικής πίεσης. Οι προδιαγραφές αυτές αφορούν κυρίως τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοχείου και προτείνονται λύσεις για επιμέρους στοιχεία και κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Ένας ενδελεχής σχεδιασμός κάθε μηχανολογικού στοιχείου δεν θα μπορούσε να γίνει στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τα σχέδια όμως στο τελευταίο τμήμα της εργασίας προτείνουν λύσεις για ορισμένα πρακτικά θέματα και υποδεικνύονται τα σημεία τα οποία απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση. Το δοχείο αυτό θα καλύπτει τις σύγχρονες ανάγκες της βιομηχανίας υποθαλάσσιων αγωγών χάρη στο μέγεθος του και την εξαιρετικά υψηλή αντοχή του.

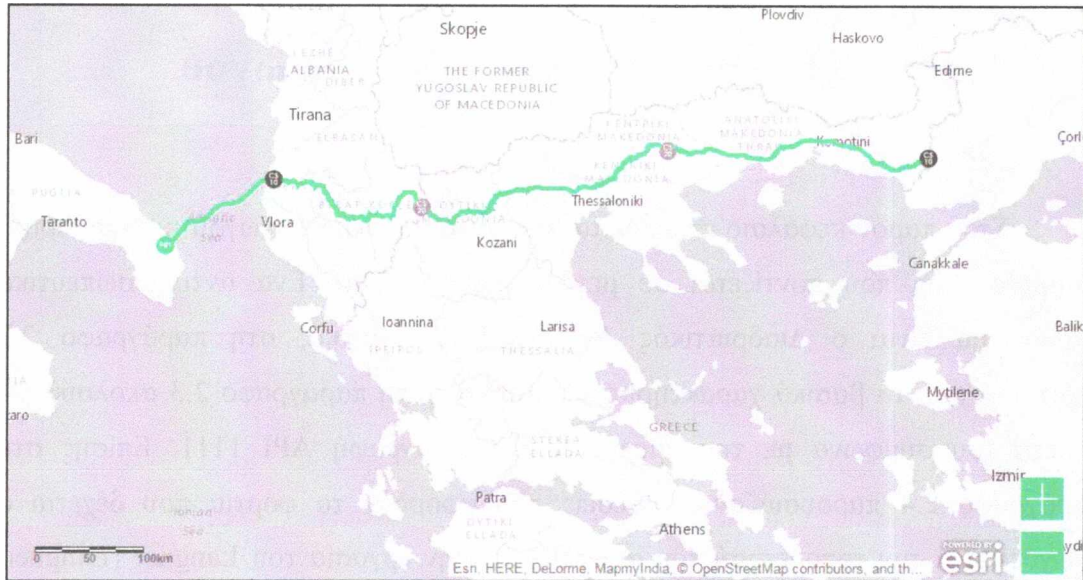
## 2. Διαστασιολόγηση Υποθαλάσσιου Αγωγού

### 2.1 Εισαγωγή

Στον παρόν κεφάλαιο επιχειρείται η διαστασιολόγηση αγωγού με εξωτερική διάμετρο 36in που ποντίζεται σε μεγάλα βάθη, 850m. Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα είναι ο Διαδριατικός Αγωγός TAP. Αρχικά, στη παράγραφο 2.2 περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά του και στη παράγραφο 2.3 ακολουθεί η μελέτη του σύμφωνα με την αμερικάνικη προδιαγραφή API 1111. Επίσης στη παράγραφο 2.4 παρουσιάζονται σχέσεις που αφορούν τα φορτία που δέχεται ο αγωγός κατά την τοποθέτησή του σύμφωνα με την εργασία του Langner (Langner, 1984).

### 2.2 Γενικά στοιχεία

Ο Διαδριατικός Αγωγός (Trans Adriatic Pipeline - TAP) είναι ένα σημαντικό έργο κατασκευής αγωγού φυσικού αερίου ο οποίος θα μεταφέρει φυσικό αέριο από την περιοχή τη Κασπίας στην Ευρώπη. Ο TAP θα διασυνδεθεί με τον αγωγό φυσικού αερίου Ανατολίας (TANAP) στα ελληνοτουρκικά σύνορα και θα διέρχεται από τη Βόρεια Ελλάδα, την Αλβανία και την Αδριατική Θάλασσα προτού καταλήξει στις ακτές της Νότιας Ιταλίας, όπου θα συνδεθεί στο ιταλικό δίκτυο φυσικού αερίου. Το έργο βρίσκεται επί του παρόντος στη φάση της υλοποίησης και έχουν αρχίσει οι μελέτες και οι προετοιμασίες για την κατασκευή του αγωγού, η οποία αναμένεται να ξεκινήσει το 2016. Όταν ολοκληρωθεί η κατασκευή του, ο TAP θα παρέχει την πιο άμεση, λογική και οικονομικά αποδοτική οδό μεταφοράς φυσικού αερίου. Θα ανοίξει τον ζωτικής σημασίας Νότιο Διάδρομο Φυσικού Αερίου για την τροφοδότηση της Ευρώπης, ο οποίος θα έχει μήκος 4.000 km και θα εκτείνεται από την Κασπία Θάλασσα μέχρι την Ευρώπη.



Εικόνα 5: Χάρτης διαδρομής αγωγού TAP από τον Έβρο μέχρι την Ιταλία, ([www.tap-ag.gr](http://www.tap-ag.gr)).

Η διαδρομή του TAP έχει μήκος περίπου 870 km (Εικόνα 5). Το μεγαλύτερο υψόμετρο από το οποίο θα περάσει ο TAP θα είναι τα 1.800 m στα αλβανικά όρη, ενώ το βαθύτερο σημείο που θα υποδεχθεί το υποθαλάσσιο τμήμα θα είναι τα 820 m στην Αδριατική Θάλασσα.

### 2.3 Διαστασιολόγηση σύμφωνα με API 1111

Γνωρίζοντας το μέγιστο βάθος της θαλάσσιας περιοχής στην οποία θα γίνει η τοποθέτηση καθώς και την εξωτερική διάμετρο του σωλήνα, μπορέσαμε να διαστασιολογήσουμε το πάχος του αγωγού σύμφωνα με την αμερικάνικη προδιαγραφή API 1111.

Αρχικά ορίζουμε τα εξής μεγέθη:

Πίεση αστοχίας:

$$P_c = \frac{P_y P_e}{\sqrt{P_y^2 + P_e^2}} \quad (2.1)$$

Πίεση διαρροής:

$$P_y = 2S \left( \frac{t}{D} \right) \quad (2.2)$$



Ελαστική πίεση λυγισμού:

$$P_e = 2E \frac{\left(\frac{t}{D}\right)^3}{(1-\nu^2)} \quad (2.3)$$

όπου:

$E$  = μέτρο ελαστικότητας  
 $\nu$  = λόγος Poisson (0.3 για χάλυβες)  
 $D$  = εξωτερική διάμετρος  
 $t$  = ονομαστικό πάχος  
 $S$  = όριο διαρροής

Ο απαιτούμενος έλεγχος αντοχής σε εξωτερική πίεση είναι ο εξής:

$$(P_o - P_i) \leq f_o P_c \quad (2.4)$$

$P_o$  = εξωτερική πίεση  
 $P_i$  = εσωτερική πίεση  
 $f_o$  = συντελεστής ασφαλείας, όπου:

$f_o$	Μέθοδος Παραγωγής
0.7	άνευ ραφής ή κόλληση με ηλεκτρική αντίσταση
0.6	διπλού βυθισμένου τόξου

Τα στοιχεία του υπό εξέταση αγωγού είναι:

$P_o$ (MPa)	8.5Mpa
$P_i$ (MPa)	1 atm (συνήθως αγνοείται)
$f_o$	0.7

Ο τελικός προσδιορισμός του πάχους προκύπτει έπειτα από επαναληπτική διαδικασία ως εξής:

$P_y$ (MPa)	29.39
$P_e$ (MPa)	15.52
$P_c$ (MPa)	13.72
$t$ (mm)	30
$D/t$	30.48

## 2.4 Ανάλυση δυνάμεων κατά την τοποθέτηση

Όπως έχει προαναφερθεί, η τοποθέτηση ενός υποθαλάσσιου αγωγού αποτελεί το κρίσιμότερο στάδιο για την ασφαλή ή μη λειτουργία του. Θεωρώντας την τυπική πόντιση του αγωγού με την μέθοδο J-lay (Εικόνα 6), μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους εξής τύπους για τους υπολογισμούς σύμφωνα με τις εμπειρικές σχέσεις της εργασίας (Langner, 1984).

Βάρος αγωγού στον αέρα:

$$\bar{W} = (\pi / 4)[\gamma_p(D^2 - D_i^2) + \gamma_c(D_o^2 - D^2)] \quad (2.5)$$

Βάρος αγωγού όταν είναι βυθισμένος:

$$W = \bar{W} + (\pi / 4)(\gamma_i D_i^2 - \gamma_o D_o^2) \quad (2.6)$$

Ακαμψία:

$$B = (\pi E / 64)(D^4 - D_i^4) \quad (2.7)$$

Χαρακτηριστικό μήκος:

$$C = (B / W)^{\frac{1}{3}} \quad (2.8)$$

Παραμόρφωση διαρροής και τυπικού λυγισμού:

$$\varepsilon_y = Y / E \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_b = t / 2D$$

Δύναμη και ροπή διαρροής σωλήνα:

$$T_y = \pi Y D t \quad (2.10)$$

$$M_y = Y D^2 t \quad (2.11)$$

Στις ανωτέρω σχέσεις,

$D_i$  = εσωτερική διάμετρος (mm)

$D_o$  = εξωτερική διάμετρος (mm)

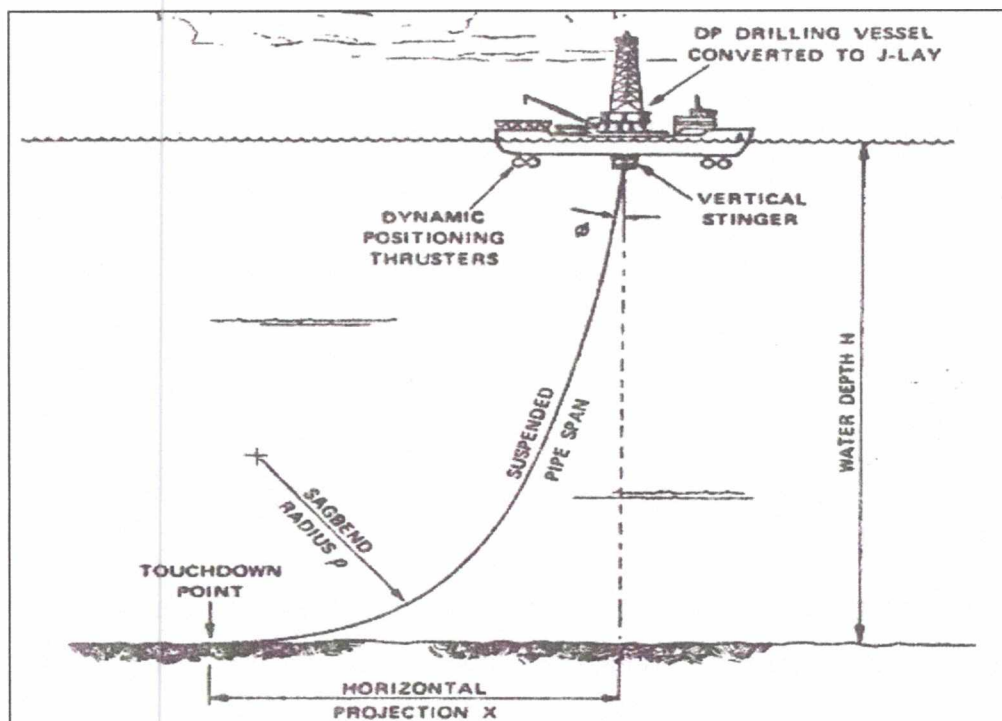
$\gamma_p, \gamma_c, \gamma_o, \gamma_i$  = πυκνότητα αγωγού, επικάλυψης, θαλασσινού νερού και εσωτερικού υγρού αντίστοιχα ( $\text{kg/m}^3$ )

$E$  = μέτρο ελαστικότητας

$D$  = μέση διάμετρος

$t$  = ονομαστικό πάχος (mm)

$Y$  = όριο διαρροής (MPa)



Εικόνα 6: Αναπαράσταση της μεθόδου πόντισης υποθαλάσσιων αγωγών J-lay, (Langner, 1984).

Οι μεταβλητές του αιρούμενου τμήματος του αγωγού δίνονται από τις σχέσεις:

Οριζόντιος εφελκυσμός:

$$T_o = 200 - 600WD \quad (2.12)$$

Μέγιστος στατικός εφελκυσμός:

$$T_1 = T_o + WH + \overline{WH} \quad (2.13)$$

Ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας στο σημείο προσέγγισης του αγωγού στον πυθμένα:

$$\rho / C = \overline{T} + 1.403 / (1 + 0.262\overline{T} + 0.0208\overline{T}^2) \quad (2.14)$$

Μέγιστη παραμόρφωση στο σημείο προσέγγισης του αγωγού στον πυθμένα:

$$\varepsilon_o = D / 2\rho + T_o / Ea \quad (2.15)$$

Μέγιστη παραμόρφωση στο σημείο απομάκρυνσης του αγωγού από το πλοίο:

$$\varepsilon_1 = D / 2\rho + T_1 / Ea \quad (2.16)$$

Βοηθητικές μεταβλητές για τις ανωτέρω εξισώσεις:

$$A = T_o / W$$

$$\overline{T} = A / C$$

$$\overline{K} = WT_o / T_1^2$$

$$\lambda = (B / T_o)^{\frac{1}{2}}$$

$$a = (\pi / 4)(D^2 - D_i^2)$$

$$\overline{H} = \text{ύψος αγωγού που εξέχει από την επιφάνεια της θάλασσας}$$

$$\overline{R} = \text{ακτίνα καμπυλότητας του stinger}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις χρησιμεύουν στην διαστασιολόγηση της καμπυλότητας του stinger αλλά και ευρύτερα της διαδικασίας πόντισης.

Σύμφωνα με τον API 1111, για περίπτωση συνδυασμένης εξωτερικής πίεσης και κάμψης πρέπει να ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} + \frac{(P_o - P_i)}{P_c} \leq g(\delta) \quad (2.17)$$

με

$$\varepsilon \geq f_1 \varepsilon_1$$

$$\varepsilon \geq f_2 \varepsilon_2$$

όπου,

$$g(\delta) = (1 + 20\delta)^{-1}$$

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

$\varepsilon$  = καμπτική παραμόρφωση αγωγού

$\varepsilon_1$  = μέγιστη καμπτική παραμόρφωση αγωγού κατά την εγκατάσταση

$\varepsilon_2$  = μέγιστη καμπτική παραμόρφωση εγκαταστημένου αγωγού

$f_1, f_2$  = συντελεστές ασφαλείας

Δεδομένου των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, της επιβαλλόμενης πίεσης στον αγωγό και τις εξής τιμές για τους συντελεστές ασφαλείας και την οβαλότητα:

$f_1$	2
$f_2$	2
$\delta$	0.5%

καταλήγουμε από τις παραπάνω εξισώσεις πως η ακτίνα καμπυλότητας του stinger πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 200m.





### 3. Αναλυτικός Υπολογισμός Οριακής Αντοχής

#### 3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται ο αναλυτικός υπολογισμός της μηχανικής συμπεριφοράς αγωγού υπό εξωτερική πίεση. Στις παραγράφους 3.1 και 3.2 εξετάζεται το διδιάστατο πρόβλημα μορφής δακτυλίου χωρίς και με αρχική ατέλεια, αντιστοίχως. Στην παράγραφο 3.3 μελετάται η μεταλυγισμική συμπεριφορά του δακτυλίου και στην 3.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μέσω κατάλληλων γραφικών παραστάσεων.

#### 3.2 Ελαστική συμπεριφορά δακτυλίου υπό ομοιόμορφη εξωτερική πίεση χωρίς αρχική ατέλεια

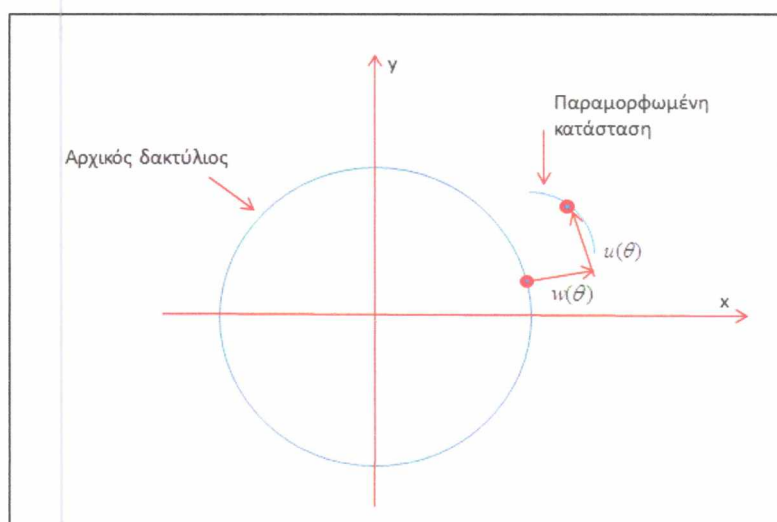
Από την θεωρία ελαστικότητας λεπτότοιχων δακτυλίων προκύπτει ότι ο δακτύλιος υπό εξωτερική πίεση συρρικνώνεται ελαστικά και ομοιόμορφα. Σε κάθε σημείο της περιφέρειάς του υπάρχουν οι εξής μετατοπίσεις (Εικόνα 7):

Ακτινική διεύθυνση:

$$w_o(\theta) = -\frac{PR^2}{EA} \quad (3.1)$$

Εφαπτομενική διεύθυνση:

$$u_o(\theta) = 0 \quad (3.2)$$



Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση των μετατοπίσεων.

Αναφορικά με τις τάσεις που αναπτύσσονται στο τοίχωμα, η τιμή της περιμετρικής (hoop) παρουσιάζεται στην περιφερειακή διεύθυνση και έχει τιμή:

$$\sigma_{\theta} = \frac{PD}{2t} \quad (3.3)$$

Καθώς όμως η πίεση αυξάνεται, ο δακτύλιος σε κάποιο κρίσιμο σημείο επιλέγει ένα δεύτερο δρόμο ισορροπίας καθώς αυτός που ήδη βρίσκεται γίνεται πλέον ασταθής για μεγαλύτερες τιμές πίεσης. Το φαινόμενο ονομάζεται λυγισμός ή δομική αστάθεια και το κρίσιμο φορτίο λυγισμού δίνεται από τον τύπο:

$$P_{cr} = 2E \left( \frac{t}{D} \right)^3 \quad (3.4)$$

Η μορφή που λυγίζει ο δακτύλιος είναι “οβάλ” και δίνεται από την σχέση:

$$w(\theta) = A \cos 2\theta \quad (3.5)$$

Σημειώνουμε πως σε αγωγούς με μεγαλύτερο πάχος, αντικαθιστούμε το μέτρο ελαστικότητας,  $E$  με  $E/(1-\nu^2)$ . Η θεωρία λεπτότοιχων δακτυλίων ισχύει για μεγάλες τιμές του λόγου  $D/t$ . Αγωγοί με μικρό λόγο  $D/t$  πλαστικοποιούνται πριν φτάσουν στο ελαστικό φορτίο αστάθειας (φορτίο λυγισμού). Η τιμή της εξωτερικής πίεσης που απαιτείται για την πλήρη πλαστικοποίησή της διατομής είναι:

$$P_y = 2\sigma_y \frac{t}{D} \quad (3.6)$$

Επομένως για να ισχύει η θεωρία των λεπτότοιχων κελυφών θα πρέπει:

$$P_{cr} \leq P_y \quad (3.7)$$

Ισοδυνάμως:

$$\frac{D}{t} \geq \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad (3.8)$$

Συνεπώς για Χάλυβα X65 με τα εξής χαρακτηριστικά:

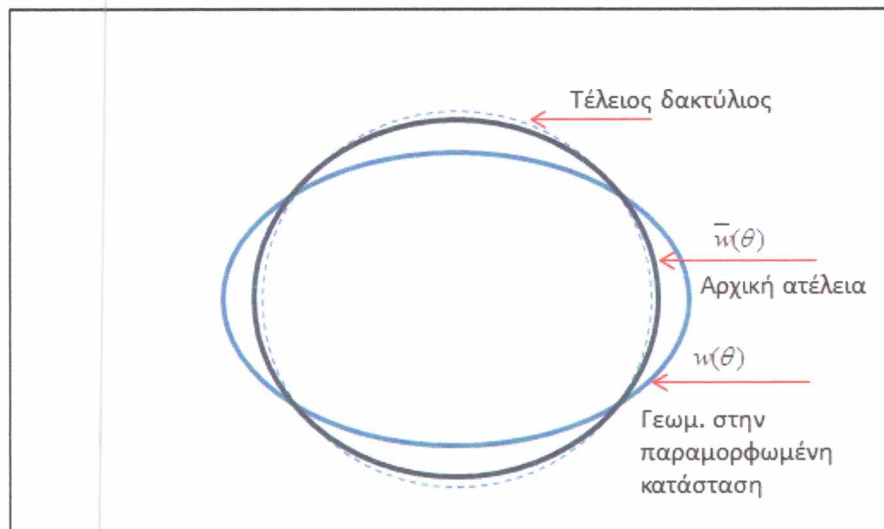
$$E = 210GPa$$

$$\sigma_y = 450MPa$$

$$\nu = 0.3$$

ο οριακός αυτός λόγος  $D/t$  είναι ίσος με 21.6. Δηλαδή για  $D/t < 21.6$ , ο σωλήνας πρώτα θα αστοχήσει λόγω διαρροής, ενώ για  $D/t > 21.6$  η αστοχία θα επέλθει λόγω ελαστικού λυγισμού.

### 3.3 Ελαστική συμπεριφορά δακτυλίου με αρχική ατέλεια



Εικόνα 8: Γραφική απεικόνιση της γεωμετρίας της διατομής αγωγού για τις εξής περιπτώσεις: απουσία ατέλειας, αρχική ατέλεια μορφής οβάλ, παραμορφωμένη κατάσταση.

Θεωρούμε δακτύλιο με αρχική τέλεια της μορφής οβάλ, ως ακολούθως:

$$\bar{W}(\theta) = \bar{\alpha} \cos 2\theta \quad (3.9)$$

όπου,

$\bar{\alpha}$  = εύρος ατέλειας

Υπό την επιβολή εξωτερικής πίεσης η νέα γεωμετρία του δακτυλίου δίνεται από την σχέση:

$$W(\theta) = \left( \frac{1}{P} \right) \bar{W}(\theta) \quad (3.10)$$

$$1 - \frac{P_e}{P}$$

ή

$$W(\theta) = \left( \frac{\bar{\alpha}}{P} \right) \cos(2\theta) \quad (3.11)$$

$$1 - \frac{P_e}{P}$$

Η μέγιστη ακτινική μετατόπιση παρατηρείται για  $\theta = \pm \frac{\pi}{2}, 0, \pi$ :

$$W(\pi/2) = \frac{\bar{\alpha}}{P} = \alpha \quad (3.12)$$

$$1 - \frac{P_e}{P}$$

$$P = \frac{(a - \bar{\alpha})}{\alpha} P_e \quad (3.13)$$

Η ανωτέρω σχέση (3.13) δίνει τη σχέση φορτίου (πίεσης) με εύρος οβάλ σχήματος με την προϋπόθεση ελαστικής συμπεριφοράς του δακτυλίου.

### 3.4 Μεταλυγισμική συμπεριφορά

Στην παρούσα παράγραφο εξετάζουμε την συμπεριφορά του δακτυλίου αφότου επέλθει ο λυγισμός. Ο δακτύλιος θεωρείται διατομή σωλήνα στον οποίο μπορεί να εφαρμοστεί η θεωρία των “πλαστικών αρθρώσεων”. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη θεωρία, οι ζώνες μίας διατομής στις οποίες παρουσιάζεται διαρροή λόγω πλαστικής παραμόρφωσης ονομάζονται πλαστικές αρθρώσεις. Παρόλο που η έκταση των περιοχών της διατομής που συμπεριφέρονται ως πλαστικές αρθρώσεις εξαρτάται από τη γεωμετρία και τη φόρτιση, στις περισσότερες περιπτώσεις θεωρούμε πως οι αρθρώσεις εμφανίζονται σε μεμονωμένα σημεία. Στις περιοχές αυτές, ο δακτύλιος συμπεριφέρεται σαν να είχε αρθρώσεις με τη μόνη διαφορά πως υπάρχει μία σταθερή ροπή αντίστασης  $M_p$ . Τα κρίσιμα σημεία για εμφάνιση

πλαστικών αρθρώσεων είναι αυτά στα οποία παρουσιάζεται η μέγιστη ροπή. Οπότε στην περίπτωση του δακτυλίου με αρχική ατέλεια οβαλότητας και υπό εξωτερική πίεση τα σημεία αυτά βρίσκονται στα σημεία όπου η διάμετρος είναι μέγιστη ή ελάχιστη. Τέλος, για την πλαστική ροπή  $M_p$  ισχύει η σχέση:

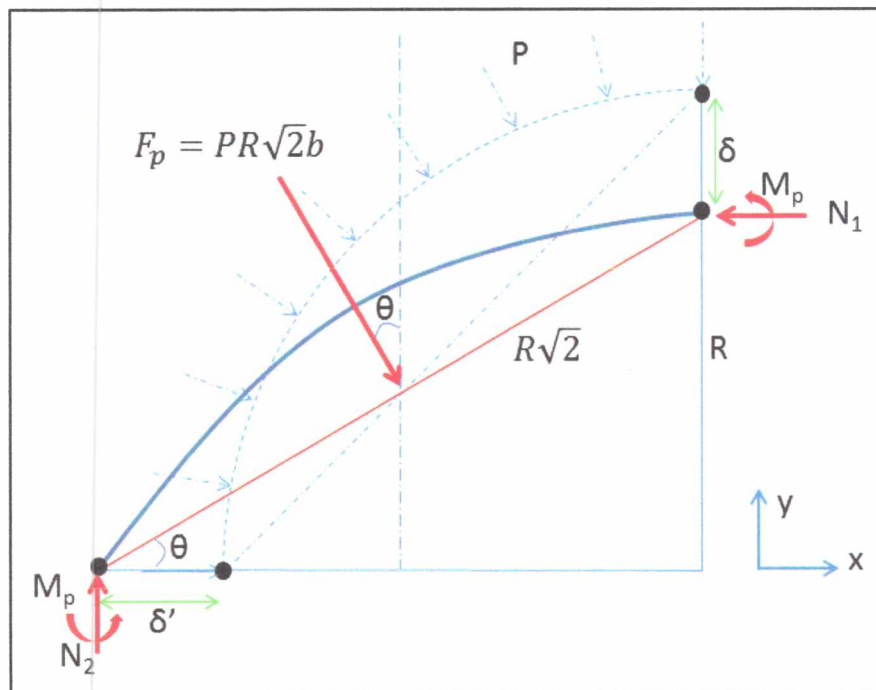
$$M_p = \sigma_y Z \quad (3.14)$$

όπου,

$\sigma_y$  = όριο διαρροής

$Z$  = συντελεστής σχήματος, εξαρτάται από τη διατομή της δοκού

Το ακόλουθο σχήμα αναπαριστά το διάγραμμα ελευθέρου σώματος για ένα τεταρτοκύκλιο της διατομής ενός αγωγού υπό εξωτερική πίεση.



Εικόνα 9: Διάγραμμα ελευθέρου σώματος τεταρτοκύκλιου που υπόκειται σε εξωτερική πίεση.

όπου,

$\delta$  = ακτινική μετατόπιση κόμβου κορυφής

$\delta'$  = ακτινική μετατόπιση αριστερού κόμβου

$R$  = ακτίνα αγωγού

$M_p$  = ροπή στους κόμβους

$N_1, N_2$  = δυνάμεις στους κόμβους

$P$  = εξωτερική πίεση  
 $F_p$  = συνισταμένη πίεση

Η γεωμετρία της παραμορφωμένης κατάστασης:

$$\sin \theta = \frac{R - \delta}{R\sqrt{2}} \quad (3.15)$$

Επίσης από ισορροπία ροπών ως προς τον αριστερό κόμβο:

$$F_p \frac{R\sqrt{2}}{2} - 2M_p - N_1(R - \delta) = 0 \quad (3.16)$$

Η ισορροπία δυνάμεων στον άξονα x δίνει:

$$N_1 - F_p \sin \theta = 0 \Rightarrow N_1 = F_p \left( \frac{R - \delta}{R\sqrt{2}} \right) \quad (3.17)$$

ή αλλιώς

$$F_p R \frac{\sqrt{2}}{2} - 2M_p - F_p \left( \frac{R - \delta}{R\sqrt{2}} \right) (R - \delta) = 0 \quad (3.18)$$

όμως,

$$\begin{aligned} F_p &= PR\sqrt{2}b \\ M_p &= \sigma_y \frac{t^2}{4} b \end{aligned} \quad (3.19)$$

Οπότε καταλήγουμε από τη σχέση (3.16):

$$PR^2b - \sigma_y \frac{t^2}{2} b - Pb(R - \delta)^2 = 0 \quad (3.20)$$

δηλαδή

$$P = \frac{\sigma_y t^2}{2[R^2 - (R - \delta)^2]} = \frac{\sigma_y t^2}{2(2R\delta - \delta^2)} \quad (3.21)$$

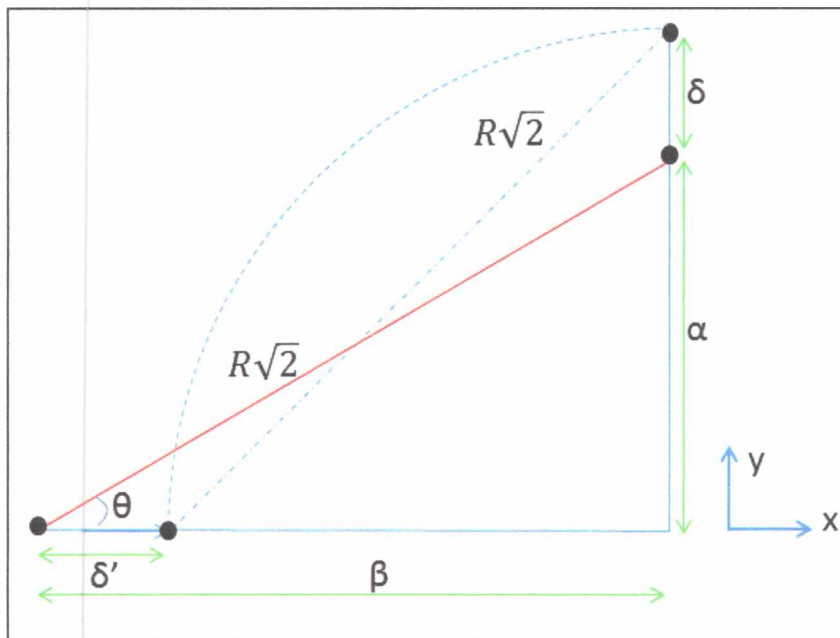


και επομένως

$$P = \frac{\sigma_y t^2}{2\delta(D - \delta)} \quad (3.22)$$

### 3.5 Γραφική αναπαράσταση της συμπεριφοράς

Για να μπορέσουμε να αναπαραστήσουμε γραφικά τα αποτελέσματα της παραπάνω αναλυτικής λύσης ως προς την οβαλότητα, πρέπει να συσχετίσουμε την τελευταία με την μετατόπιση  $\delta$ . Αρχικώς πρέπει να εξετάσουμε την σχέση της οριζόντιας μετατόπισης  $\delta'$  με την κάθετη μετατόπιση  $\delta$ .



Εικόνα 10: Αναπαράσταση γεωμετρικών στοιχείων της παραμορφωμένης και της απαραμόρφωτης κατάστασης τεταρτοκύκλιου υπό εξωτερική πίεση.

Από το πυθαγόρειο θεώρημα ισχύει η σχέση:

$$a^2 + \beta^2 = 2R^2 \quad (3.23)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη που φαίνονται στην Εικόνα 10 στην παραπάνω σχέση,

$$(R - \delta)^2 + \beta^2 = 2R^2 \quad (3.24)$$

$$\beta^2 = 2R^2 - R^2 + 2R\delta - \delta^2 \quad (3.25)$$



$$\beta = \frac{D}{2} \sqrt{1 + \frac{2\delta}{R} - \left(\frac{\delta}{R}\right)^2} \quad (3.26)$$

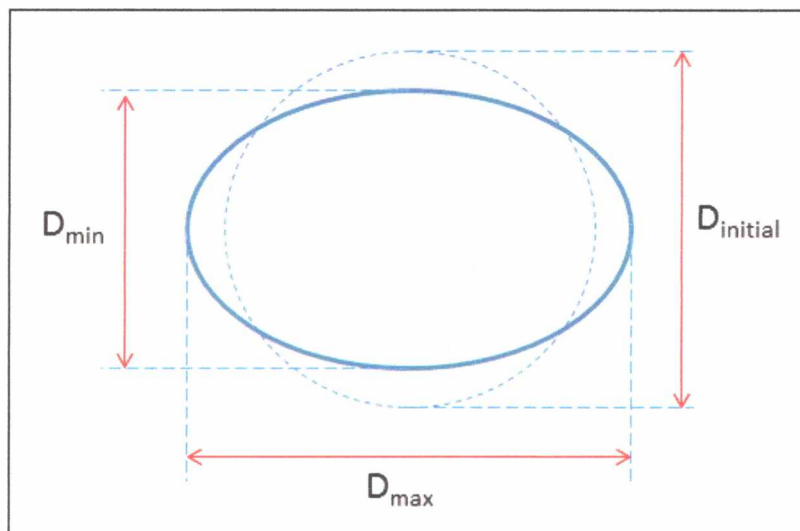
όμως,

$$\delta' = \beta - R \quad (3.27)$$

Άρα

$$\delta' = \frac{D}{2} \sqrt{1 + \frac{2\delta}{R} - \left(\frac{\delta}{R}\right)^2} - \frac{D}{2} \quad (3.28)$$

Επίσης η οβαλότητα μπορεί να οριστεί ως εξής:



Εικόνα 10: Γραφική απεικόνιση της οβαλότητας.

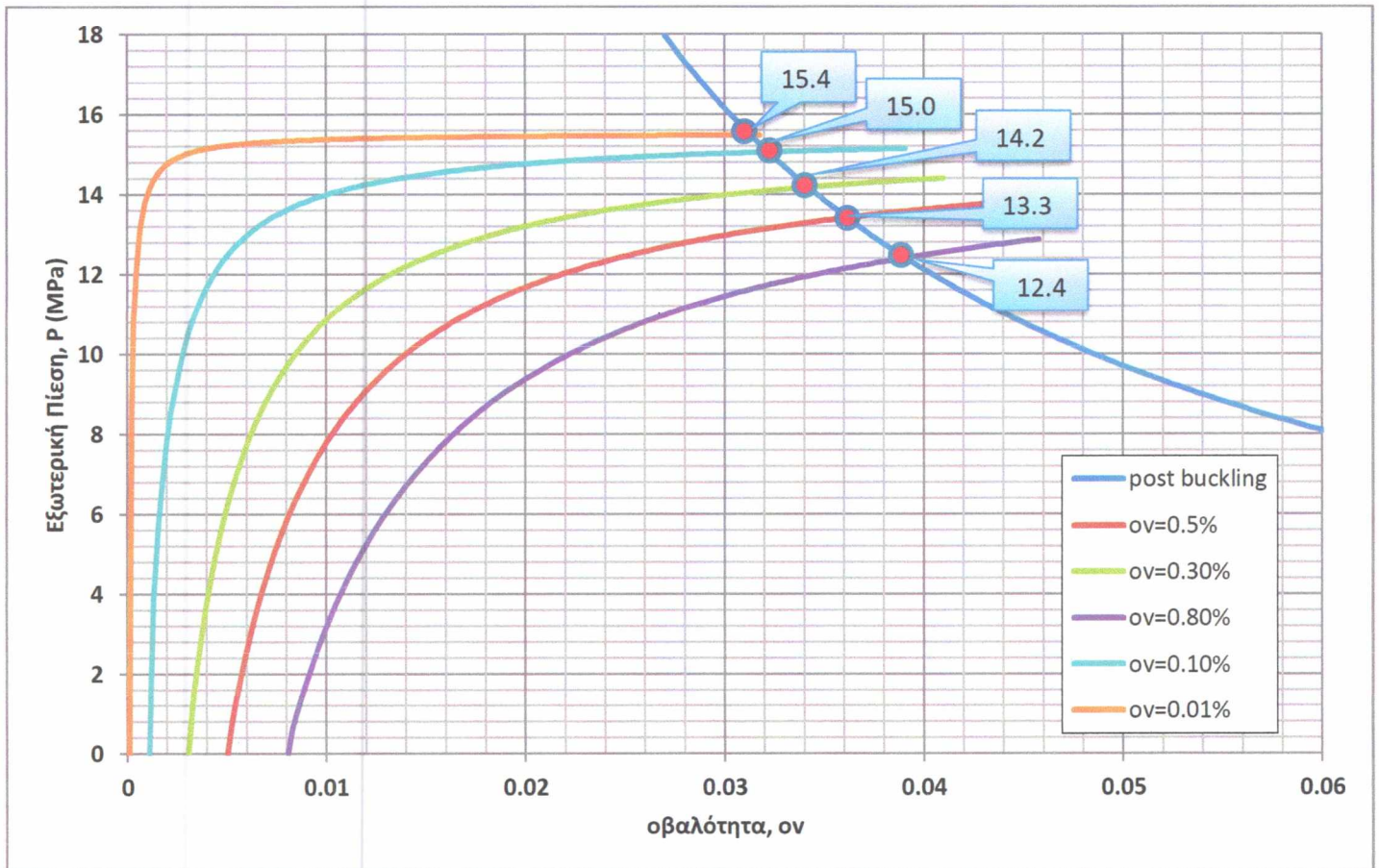
$$ov = \frac{D_{max} - D_{min}}{2D} \quad (3.29)$$

όπου,

$$D_{min} = D - 2\delta \quad (3.30)$$

$$D_{max} = D + 2\delta' \quad (3.31)$$

Έχοντας λοιπόν ορίσει την οβαλότητα σύμφωνα με τις μεταβλητές της αναλυτικής λύσης μπορούμε να παράγουμε το ακόλουθο διάγραμμα. Στο Γράφημα 1 παρατηρούμε την ελαστική συμπεριφορά για διαφορετικές τιμές αρχικής οβαλότητας καθώς και την κοινή μετά-λυγισμική συμπεριφορά όλων των περιπτώσεων. Στον κάθετο άξονα αναγράφεται η τιμή της εξωτερικής πίεσης και στον οριζόντιο η τιμή της οβαλότητας, ον.



Γράφημα 1: Αναπαράσταση της μεταβολής της οβαλότητας αγωγού σε σχέση με την μεταβολή της εξωτερικής πίεσης σύμφωνα με τις σχέσεις της αναλυτικής λύσης.

Στον Πίνακα 1 αναγράφεται η κρίσιμη πίεση αστοχίας για διαφορετικές τιμές αρχικής ατέλειας, εκφρασμένης σε οβαλότητα ( $\sigma$ ) ή μετατόπιση ( $\delta$ ), (Εικόνα 11).

*Πίνακας 1: Σχέση αρχικής ατέλειας οβαλότητας με κρίσιμη εξωτερική πίεση αστοχίας δακτυλίου.*

$\delta(mm)$	$\sigma(\%)$	$P_{max}$
<b>0.045</b>	0.01	<b>12.4</b>
<b>0.45</b>	0.1	<b>13.3</b>
<b>1.38</b>	0.3	<b>14.2</b>
<b>2.28</b>	0.5	<b>15.0</b>
<b>3.65</b>	0.8	<b>15.4</b>

## 4. Προσομοίωση Αγωγού σε Μηχανικές Καταπονήσεις με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

### 4.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα για τη συμπεριφορά αγωγών σε πίεση και άλλες συνδυασμένες καταπονήσεις και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλο εύρος προβλημάτων. Το μειονέκτημά της είναι οι απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα, μειονέκτημα όμως που ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών, καθώς και η εμπειρία του χρήστη.

Οι αναλύσεις της παρούσας εργασίας έγιναν με το πρόγραμμα Abaqus και τα βασικά στάδια για την επίτευξη των μελετών είναι τα εξής:

1. Εισαγωγή της γεωμετρίας της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD ώστε να δημιουργηθεί το τρισδιάστατο μοντέλο.
2. Το μοντέλο διακριτοποιείται σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται pre-processing.
3. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται στο κυρίως πρόγραμμα (solver) το οποίο επιλύει το πρόβλημα.
4. Ανάλυση των αποτελεσμάτων με γραφική απεικόνιση στο μοντέλο των παραμέτρων που μας ενδιαφέρουν (τάσεις, παραμορφώσεις, μετατοπίσεις).

Το υπολογιστικό πρόγραμμα Abaqus δίνει την δυνατότητα εφαρμογής όλων των παραπάνω απαραίτητων ενεργειών.



## 4.2 Βασικά δεδομένα του προσομοιώματος

### 4.2.1 Αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης του μη-γραμμικού προβλήματος

#### *Μέθοδος Riks*

Γεωμετρικώς μη-γραμμικά στατικά προβλήματα συχνά περιλαμβάνουν λυγισμό ή ολοκληρωτική κατάρρευση της κατασκευής. Στα προβλήματα αυτά, στο δρόμο ισορροπίας μπορεί να μειώνεται το φορτίο μετά το λυγισμό ή να έχουμε αντίθετου προσήμου παραμόρφωση. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μία κατάλληλη μέθοδο, όπως η μέθοδος Riks. Ουσιαστικά εισάγουμε σε κάθε βήμα έναν επιπλέον άγνωστο στο πρόβλημά μας καθώς το επιβαλλόμενο φορτίο δεν είναι πλέον δεδομένο. Η μέθοδος ονομάζεται και μέθοδος “μήκος τόξου” καθώς το επόμενο (και ζητούμενο) σημείο πάνω στο δρόμο ισορροπίας υπολογίζεται από την τομή της περιφέρειας ενός υποθετικού κύκλου με κέντρο το τρέχον σημείο ισορροπίας με τον δρόμο ισορροπίας. Η ακτίνα του κύκλου καθορίζεται από το μέγεθος του βήματος που έχουμε επιλέξει.

#### *Διαδικασία Static general*

Αυτή είναι η κλασική μέθοδος βηματικής ανάλυσης και χρησιμοποιείται σε περίπτωση που δεν αναμένουμε μείωση του επιβαλλόμενου φορτίου στο δρόμο ισορροπίας. Ουσιαστικά αντιστοιχεί στην επίλυση με την απλή μέθοδο Newton-Raphson για μη-γραμμικά προβλήματα.

Επίσης, σε κάθε περίπτωση, σε όλες τις αναλύσεις επιλέγουμε και την δυνατότητα NLgeom η οποία υπολογίζει την ισορροπία της κατασκευής στην παραμορφωμένη κατάσταση. Η επιλογή αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις που έχουμε μεγάλες παραμορφώσεις, στις οποίες η γραμμική θεωρία δεν ισχύει.

### 4.2.2 Υλικό αγωγού

Σε όλες τις αναλύσεις χρησιμοποιήσαμε για υλικό τον χάλυβα X65, με μέτρο ελαστικότητας  $E=210$  GPa, λόγο Poisson  $\nu=0.3$  και ονομαστικό όριο διαρροής 450 MPa. Οι αναλύσεις αφορούν συμπεριφορά με ανελαστικές παραμορφώσεις οπότε το πρόβλημά μας είναι μη γραμμικό και πρέπει να θεωρήσουμε ένα μοντέλο για την πλαστική συμπεριφορά του υλικού. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούμε την

πραγματική τάση (true stress) και τη λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση (logarithmic strain) της μονοαξονικής καμπύλης του υλικού.

Το Abaqus απαιτεί μία σειρά ζευγών για την λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση και την πραγματική τάση. Αυτές δίνονται σε σχέση με την ονομαστική τάση και με την ονομαστική παραμόρφωση (Γράφημα 2) σύμφωνα με τους εξής τύπους:

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_{\ln}^p = \ln(1 + \varepsilon) - \frac{\sigma_T}{E} \quad (4.2)$$

όπου,

$\sigma_T$  : πραγματική τάση

$\varepsilon_{\ln}^p$  : λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση

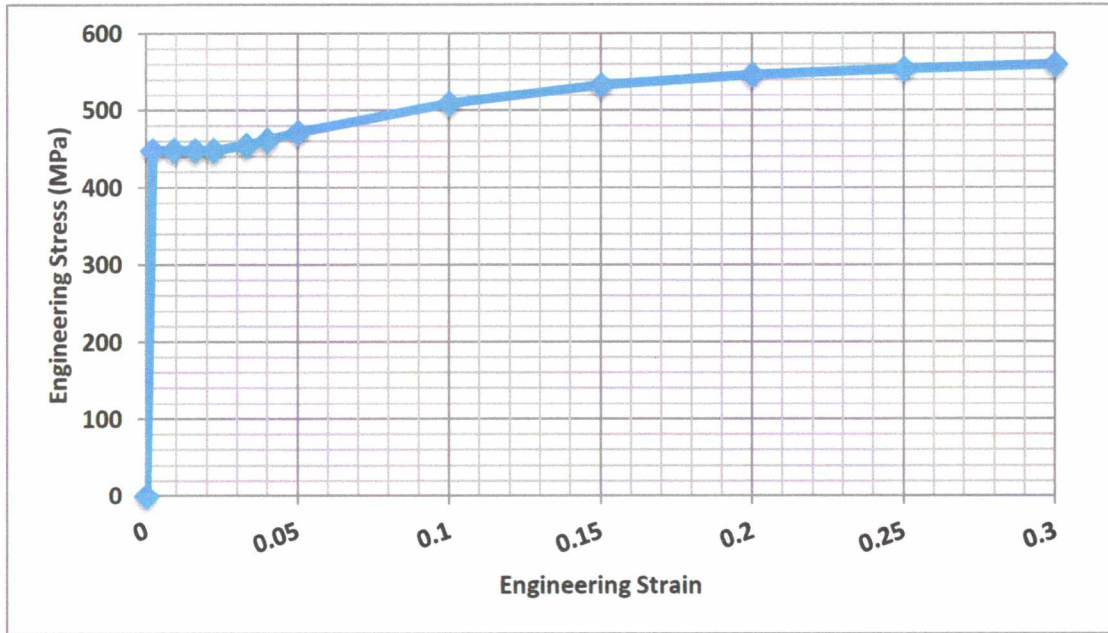
$\varepsilon$  : ονομαστική παραμόρφωση

$\sigma$  : ονομαστική τάση

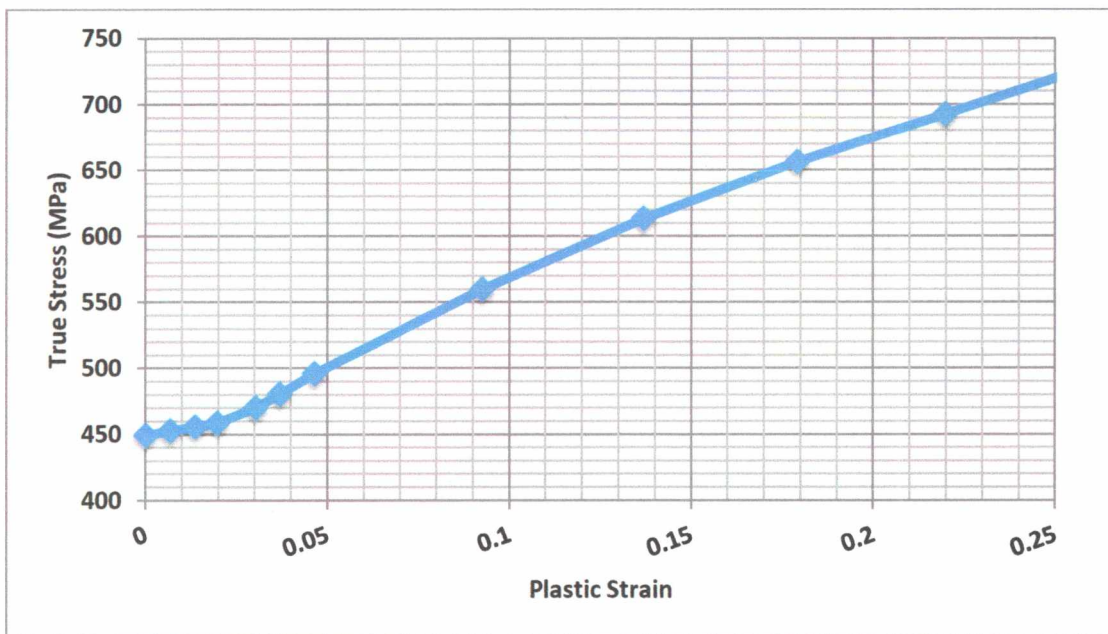
Ακολουθεί ο Πίνακας 2 που περιέχει τα παραπάνω δεδομένα καθώς και διάγραμμα που αναπαριστά την πραγματική τάση και την λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση για το υλικό X65 (Γράφημα 3).

Πίνακας 2: Τάσεις και παραμορφώσεις για χάλυβα X65.

$\varepsilon$ (eng. strain)	$\sigma$ (eng. stress)	$\sigma_T$ (True Strain)	$\varepsilon_{\ln}^p$ Plastic Strain
0.002	448.5	449.4	0.000
0.009	448.5	452.5	0.006
0.016	448.5	455.6	0.013
0.022	448.5	458.4	0.019
0.033	455.0	470.0	0.030
0.040	462.0	480.4	0.036
0.050	472.0	495.6	0.046
0.100	509.0	559.9	0.092
0.150	533.0	612.9	0.136
0.200	547.0	656.4	0.179
0.250	554.0	692.5	0.219
0.300	560.0	728.0	0.258



Γράφημα 2: Διάγραμμα ονομαστικής τάσης - ονομαστικής παραμόρφωσης υλικού X65.

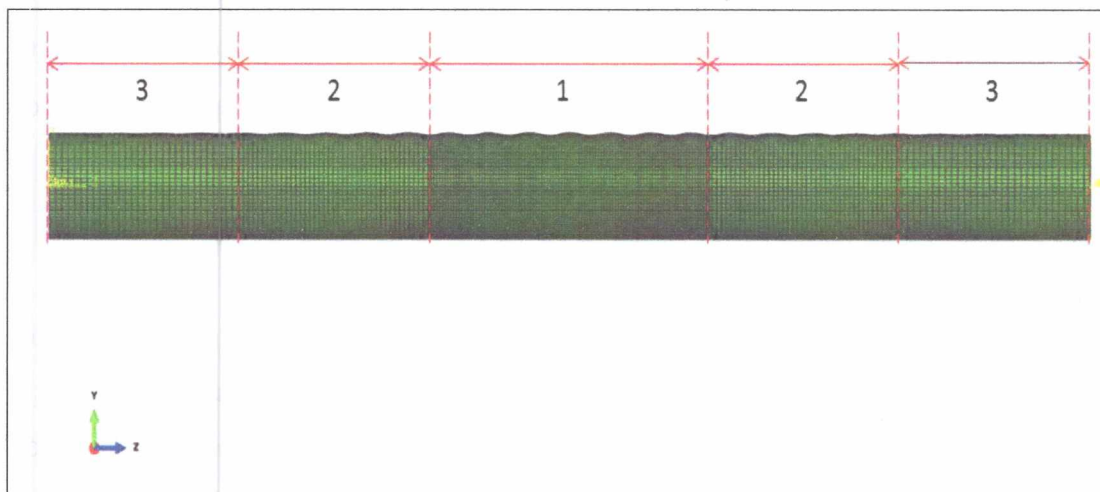


Γράφημα 3: Διάγραμμα πραγματικής τάσης - λογαριθμικής πραγματικής παραμόρφωσης υλικού X65.



### 4.2.3 Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

Η πλειοψηφία των προσομοιώσεων που ακολουθούν αφορά τοπικό λυγισμό του κυλίνδρου είτε υπό εξωτερική πίεση είτε από καμπτικά φορτία. Στις περιπτώσεις των τριδιάστατων μοντέλων μεγάλων διαστάσεων, συνιστάται η πύκνωση του πλέγματος στην περιοχή που μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε τοπικό λυγισμό και η αραίωσή του σε περιοχές που δεν παρατηρούνται γεωμετρικές ασυνέχειες ή σημαντικές παραμορφώσεις. Στα τριδιάστατα μοντέλα των αγωγών επιλέξαμε να χωρίσουμε εικονικά την επιφάνεια του κελύφους με την εντολή “partition” ώστε να έχουμε την δυνατότητα πύκνωσης του πλέγματος στις κρίσιμες περιοχές. Με αυτόν τον τρόπο διατηρήθηκε η υψηλή ακρίβεια της λύσης και περιορίστηκε ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος κάθε προσομοίωσης.



Εικόνα 11: Σχηματική απεικόνιση διακριτοποίησης αγωγού με 3 ζώνες διαφορετικής πυκνότητας.

Στην Εικόνα 11 παρατηρούμε τις διαφορετικές ζώνες πυκνότητας πλέγματος για μία προσομοίωση αγωγού. Η διαίρεση σε πεπερασμένα στοιχεία είναι ομοιόμορφη κατά μήκος του αγωγού για να αποφευχθούν προβλήματα ασυνέχειας αλλά διακρίνουμε τρεις ζώνες περιμετρικής πυκνότητας. Στη ζώνη 1 παρουσιάζεται η μέγιστη πυκνότητα καθώς σε εκείνη την περιοχή αναμένουμε τον τοπικό λυγισμό του αγωγού, στη ζώνη 3 το πλέγμα μας είναι αισθητά πιο αραιό, ενώ στη ζώνη 2 παρατηρείται μία μεταβατική κατάσταση για να μην υπάρχουν απότομες αλλαγές πυκνότητας, οι οποίες ενδέχεται να επηρεάσουν την λύση.

### 4.2.4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Οι αναλύσεις που ακολουθούν πραγματεύονται είτε την φόρτιση αγωγών σε εξωτερική πίεση, είτε σε καθαρή κάμψη είτε σε συνδυασμένη



καταπόνηση. Επομένως, εκτός της γραφικής αναπαράστασης της κατανομής των τάσεων και των παραμορφώσεων στο μοντέλο μας, παρουσιάζουμε με μορφή διαγραμμάτων διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση της εξωτερικής πίεσης, εξετάζουμε την συμπεριφορά της οβαλότητας της μεσαίας διατομής του αγωγού σε σχέση με την επιβαλλόμενη εξωτερική πίεση, ενώ στις άλλες δύο περιπτώσεις, ζητούμενο αποτελεί η καμπυλότητα σε σχέση με τα καμπτικά φορτία. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε τα εξής μεγέθη: οβαλότητα, καμπυλότητα, συντελεστής φορτίου (LPF).

- Οβαλότητα

Το συγκεκριμένο μέγεθος αντιπροσωπεύει τον βαθμό που μία κυκλική διατομή τείνει προς το οβάλ σχήμα και ορίστηκε μαθηματικώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για την ποσοτικοποίηση του από τα αποτελέσματα στο Abaqus εργαζόμαστε ως εξής: υπολογίζουμε την  $D_{max}$  και  $D_{min}$  της διατομής του αγωγού από τις μετατοπίσεις των αντίστοιχων σημείων σε κάθε βήμα.

- Καμπυλότητα

Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται μέσω της στροφής των ακραίων διατομών του αγωγού. Υπολογίζεται εύκολα από τα αποτελέσματα του Abaqus καθώς είναι ο αριθμητικός μέσος των απόλυτων τιμών της περιστροφής των ακραίων διατομών του αγωγού ως προς τον άξονα γύρω από τον οποίο ασκείται η ροπή.

- Συντελεστής φορτίου, LPF

Η μεταβλητή LPF (Load Proportionality Factor) είναι ο συντελεστής του φορτίου που χρησιμοποιεί το Abaqus για την μέθοδο Riks. Ουσιαστικά δείχνει τον πολλαπλασιαστή του φορτίου αναφοράς σε κάθε βήμα της ανάλυσης.

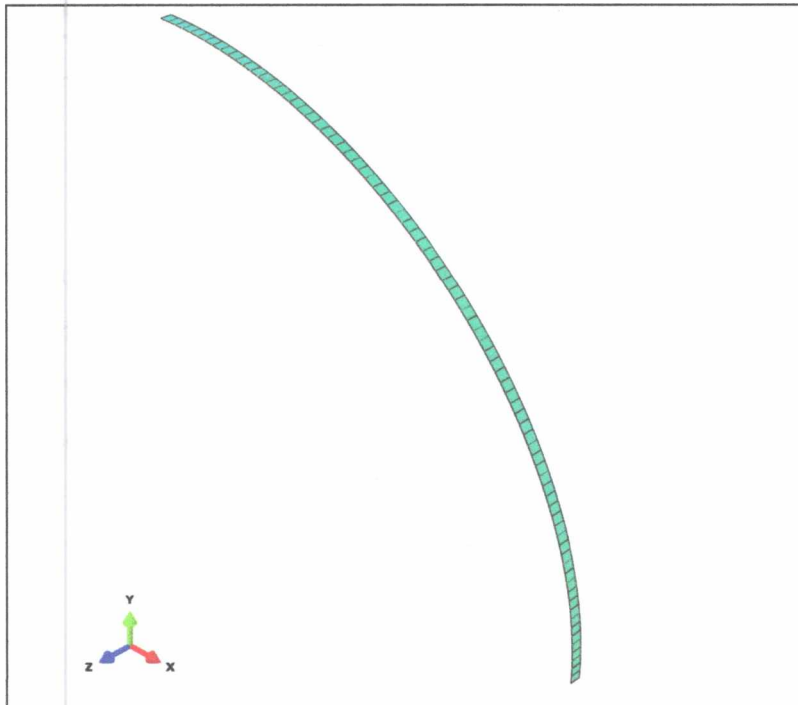
Πρακτικά, η οβαλότητα και η καμπυλότητα συνδέονται με τις μετατοπίσεις  $U_1, U_2, U_3$  και τις περιστροφές  $UR_1, UR_2, UR_3$  χαρακτηριστικών σημείων του μοντέλου και λαμβάνονται από το αρχείο ODB, και ανήκουν στο “field output”, ενώ η παράμετρος LPF ανήκει στο “history output”. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει τις παραπάνω παραμέτρους σε ένα αρχείο του Excel και να παράξει τα επιθυμητά διαγράμματα.

## 5. Ανάλυση της Συμπεριφοράς Αγωγών σε Εξωτερική Πίεση

Στο Κεφάλαιο 5 εξετάζεται αριθμητικά η μηχανική συμπεριφορά αγωγού υπό εξωτερική πίεση. Η παράγραφος 5.1 αναφέρεται σε διδιάστατο αριθμητικό μοντέλο μορφής δακτυλίου ενώ η παράγραφος 5.2 σε τριδιάστατο μοντέλο. Τέλος στις παραγράφους 5.3 και 5.4 παραθέτονται αντιστοίχως, αποτελέσματα και συμπεράσματα.

### 5.1 Μοντέλο μορφής δακτυλίου

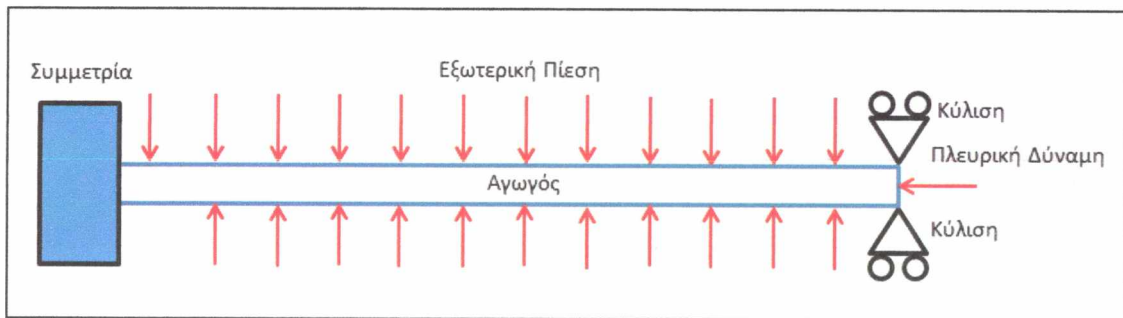
Το πρώτο μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε για την μελέτη της επίδρασης ατέλειας οβαλότητας σε αγωγό με  $D/t = 30.48$  είναι μορφής δακτυλίου (Εικόνα 12), δηλαδή ουσιαστικώς διδιάστατο. Ο σωλήνας είναι αρκετά μακρύς (11m) οπότε στο μεσαίο τμήμα του, μακριά από τα άκρα του μπορεί να θεωρηθεί πως δεν υπάρχει επιρροή των συνοριακών συνθηκών. Επομένως, η μοντελοποίηση μπορεί να γίνει με έναν δακτύλιο μοναδιαίου μήκους και το πρόβλημα να μετατραπεί από τριδιάστατο σε διδιάστατο.



Εικόνα 12: Πλέγμα διδιάστατου μοντέλου δακτυλίου.

Το πρώτο βήμα είναι ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του δακτυλίου. Λόγω ύπαρξης διπλής συμμετρίας, μπορούμε να περιοριστούμε στον σχεδιασμό ενός μόνο τεταρτοκύκλιου, χρησιμοποιώντας κατάλληλες συνοριακές συνθήκες (Εικόνα 13). Στην δεξιά πλευρά του τεταρτοκύκλιου εισάγουμε συμμετρία κατά τον άξονα-y, «y-symm» και στην αριστερή κατά τον άξονα-x, «x-symm». Επίσης, η πλευρά που όλοι οι κόμβοι έχουν z συντεταγμένη ίση με L (χαρακτηριστικό πλάτος δακτυλίου) έχουν συμμετρία ως προς τον άξονα-z, «z-symm». Η προσέγγιση στην αντίστοιχη πλευρά με συντεταγμένη z ίση με 0 είναι διαφορετική. Επειδή ο αγωγός μας θεωρητικά βρίσκεται μέσα στη πειραματική διάταξη και είναι μονωμένος στα δύο άκρα του, δέχεται και μία πλευρική δύναμη που είναι ίση με την ασκούμενη πίεση πολλαπλασιασμένη με την επιφάνεια του άκρου.

$$F_c = P\left(\pi \frac{D^2}{4}\right) \quad (5.1)$$



Εικόνα 13: Γραφική απεικόνιση συνοριακών συνθηκών μοντέλου δακτυλίου υπό φόρτιση εξωτερικής πίεσης.

Για την εισαγωγή του παραπάνω στοιχείου στην ανάλυσή μας, εργαζόμαστε ως εξής: Δημιουργούμε ένα σημείο αναφοράς στο κέντρο της πλευρά με συντεταγμένη z ίση με 0. Έπειτα δημιουργούμε σύζευξη των κόμβων της πλευράς με το σημείο αναφοράς ως προς τις ακόλουθες μετατοπίσεις και περιστροφές (kinematic coupling).

$$\begin{aligned} U_3 &= 0 \\ UR_1 &= 0 \\ UR_2 &= 0 \end{aligned}$$



Επόμενο βήμα είναι ο ορισμός των συνοριακών συνθηκών απευθείας στο προαναφερθέν σημείο αναφοράς. Στο συγκεκριμένο σημείο αφήνουμε ελεύθερο έναν βαθμό ελευθερίας και συγκεκριμένα την μετατόπιση στον z-άξονα, δηλαδή την  $U_3$ , και:

$$U_1 = 0$$

$$U_2 = 0$$

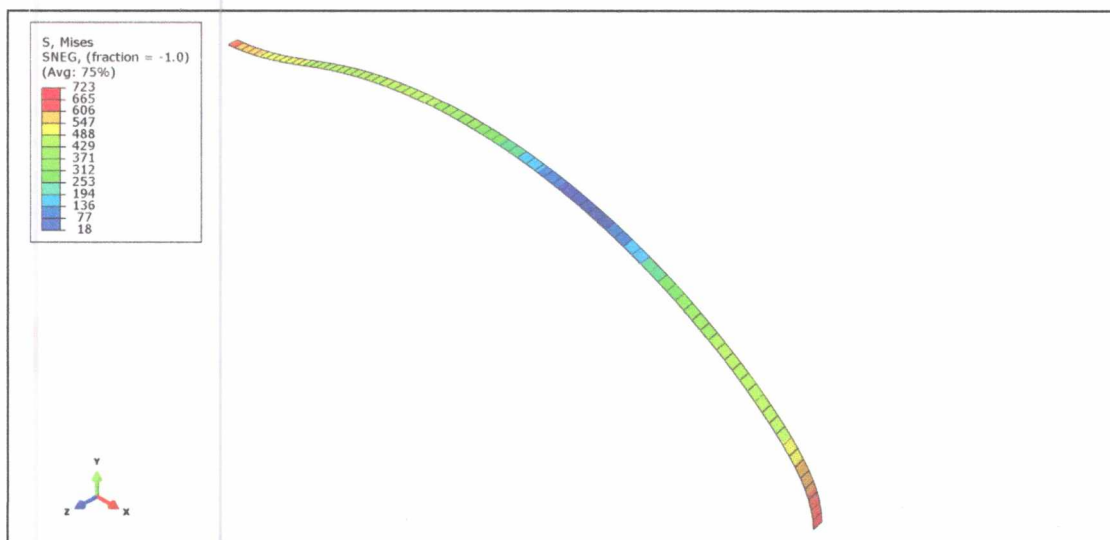
$$UR_1 = 0$$

$$UR_2 = 0$$

$$UR_3 = 0$$

Επιπρόσθετα, στο σημείο αναφοράς εισάγουμε και την πλευρική δύναμη που αναφέραμε με μέτρο:  $F_c = P(\pi \frac{D^2}{4})$  και διεύθυνση τον άξονα z (η φορά είναι θλιπτική).

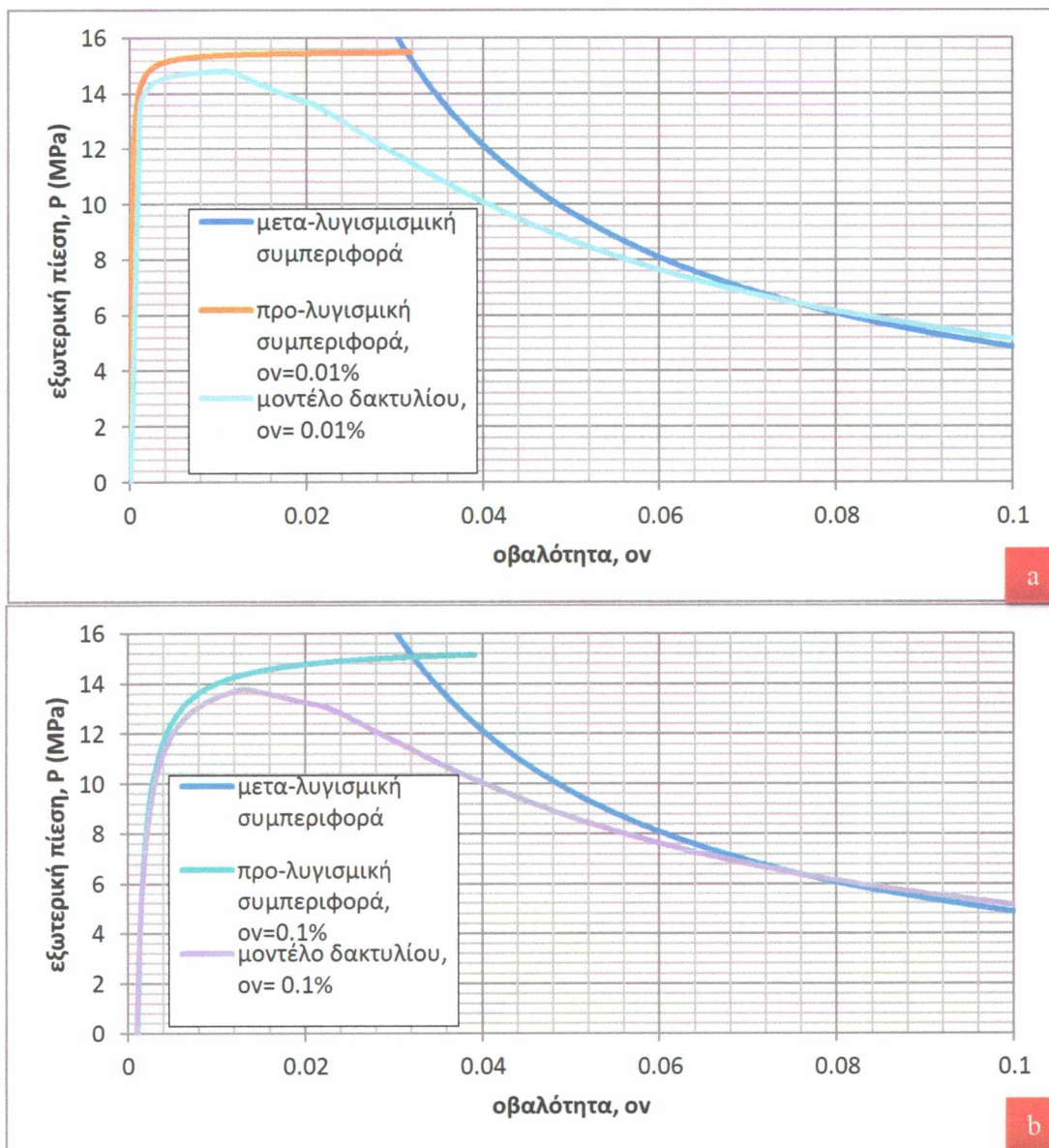
Τέλος εφαρμόζουμε την επιθυμητή πίεση στην εξωτερική επιφάνεια του δακτυλίου. Επιλέξαμε την τιμή 30MPa που είναι προσεγγιστικά ίση με την τιμή  $P_y$ . Το πλέγμα που χρησιμοποιήσαμε αποτελείται από 84 στοιχεία, με 84 κόμβους κατά την περιφέρεια και 2 κατά το μήκος. Τα στοιχεία είναι τύπου S4R (Four node reduced-integration shell elements), δηλαδή τετρα-κομβικά, μειωμένης ολοκλήρωσης τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση λεπτότοιχων κυλίνδρων και αγωγών.

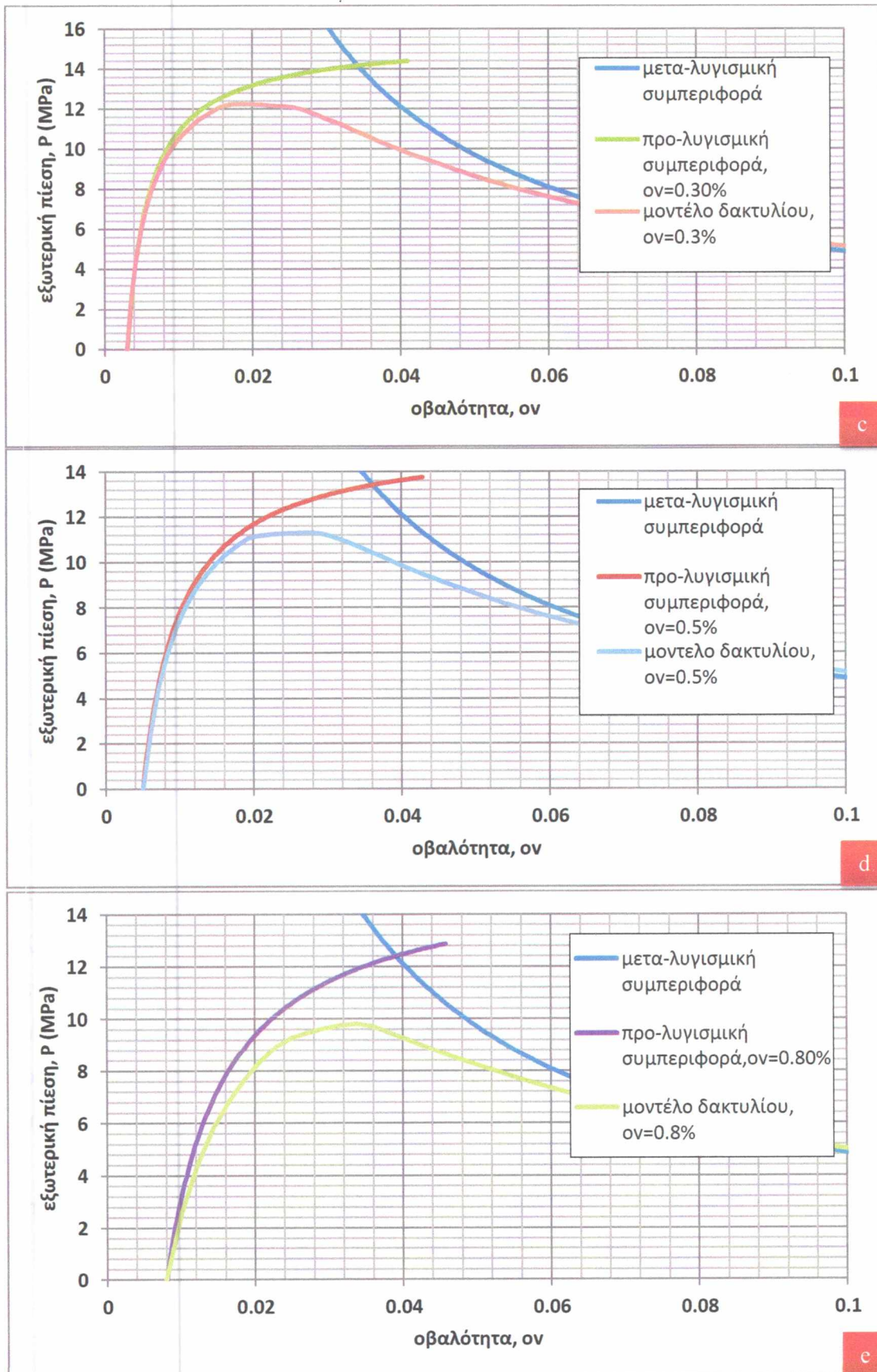


Εικόνα 14: Κατανομή των τάσεων σε διδιάστατο μοντέλο δακτυλίου υπό εξωτερική πίεση.



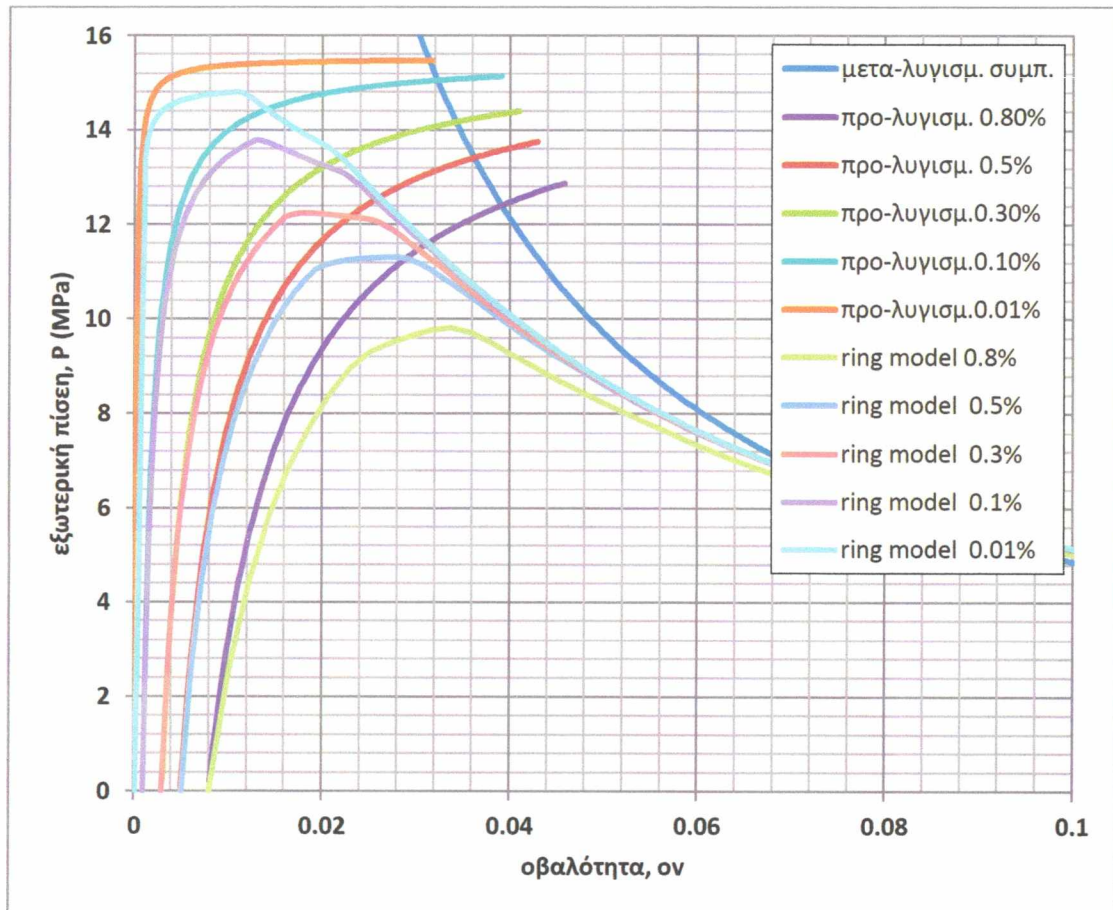
Το Γράφημα 4 αναπαριστά τα αποτελέσματα από τη συμπεριφορά τεταρτοκύκλιων διαφορετικής οβαλότητας σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης που παρουσιάστηκε προηγουμένως ενώ το Γράφημα 5 παραθέτει τα αποτελέσματα συγκεντρωτικά.





Γράφημα 4: Γραφική αναπαράσταση της μεταβολής της οβαλότητας σε σχέση με την εξωτερική πίεση με βάση το αναλυτικό και το διδιάστατο μοντέλο, (α)  $\nu=0.01\%$ , (β)  $\nu=0.1\%$ , (γ)  $\nu=0.3\%$ , (δ)  $\nu=0.5\%$ , (ε)  $\nu=0.8\%$ .

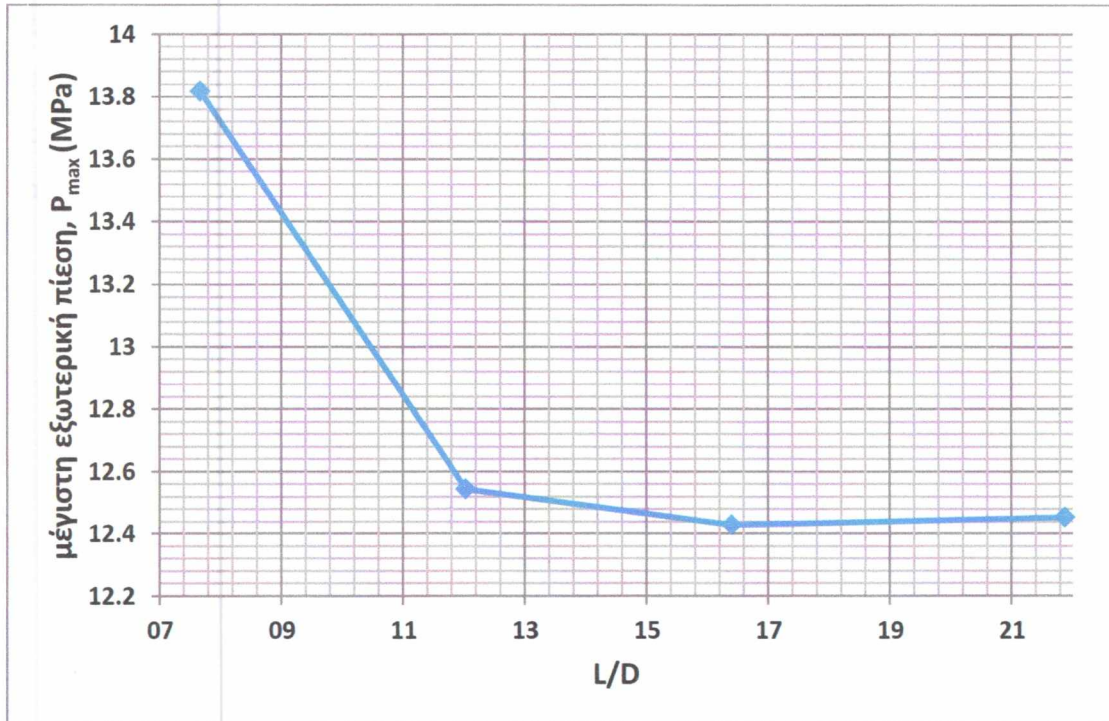




Γράφημα 5: Γραφική αναπαράσταση της μεταβολής της οβαλότητας σε σχέση με την εξωτερική πίεση με βάση το αναλυτικό και το διδιάστατο μοντέλο.

## 5.2 Τριδιάστατο μοντέλο

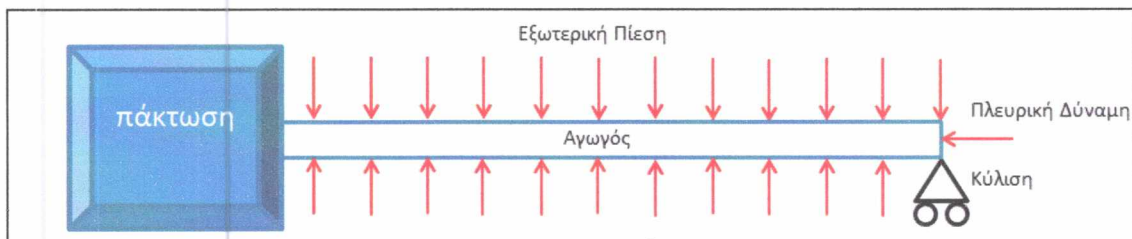
Γνωρίζοντας πλέον αρκετά στοιχεία για την συμπεριφορά του αγωγού υπό εξωτερική πίεση, κρίθηκε σκόπιμη η περαιτέρω μελέτη του φαινομένου με μοντέλο τριών διαστάσεων. Η βασική αρχή σχεδιασμού του μοντέλου είναι ίδια με ορισμένες διαφορές. Αρχικά σχεδιάστηκε η διατομή του αγωγού, με διαφορετικές τιμές αρχικής οβαλότητας και στη συνέχεια επιλέχθηκε το επιθυμητό μήκος. Ένας γενικός κανόνας υποδεικνύει πως όταν το μήκος ξεπερνά σε μέγεθος 10 φορές την τιμή της εξωτερικής διαμέτρου τότε η λύση μας, δηλαδή το οριακό φορτίο πίεσης και η παραμόρφωση, στην κεντρική διατομή του σωλήνα είναι ανεξάρτητη από τις συνοριακές συνθήκες. Στην προκειμένη περίπτωση αποφασίστηκε να ελεγχθεί ο παραπάνω κανόνας και προέκυψε το Γράφημα 6:



Γράφημα 6: Γραφική αναπαράσταση επιρροής της πίεσης αστοχίας αγωγού σε σχέση με το λόγο  $L/D$ , όπου  $L$  και  $D$  είναι το μήκος και η εξωτερική διάμετρος του αγωγού αντίστοιχα.

Με βάση τα ανωτέρω αποφασίστηκε το μήκος του αγωγού να είναι 11m σε όλα τις αναλύσεις, καθώς έτσι εξασφαλίζουμε ανεξαρτησία της λύσης από το μήκος του σωλήνα με το ελάχιστο δυνατό μέγεθος αγωγού.

Στην προκειμένη περίπτωση θεωρούμε μία πάκτωση και μία κύλιση καθώς αυτές θα είναι προσεγγιστικά και οι συνθήκες στήριξης του αγωγού στο δοχείο πίεσης (Εικόνα 15).



Εικόνα 15: Γραφική απεικόνιση συνθηκών τριδιάστατου μοντέλου υπό φόρτιση εξωτερικής πίεσης.

Ο τρόπος επιβολής των παραπάνω συνθηκών απαιτεί τον ορισμό δύο σημείων αναφοράς, ένα στο κέντρο κάθε πλευράς του κυλίνδρου. Τα σημεία αυτά έχουν τις  $x$  και  $y$  συντεταγμένες ίσες με 0 και η  $z$  συντεταγμένη είναι 0 για το σημείο της μίας



πλευράς και 11000mm για το δεύτερο. Έπειτα, δεσμεύονται οι βαθμοί ελευθερίας των κόμβων των δύο πλευρών με τους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας των σημείων αναφοράς. Τέλος ορίζουμε τις επιθυμητές συνοριακές συνθήκες απευθείας στα σημεία αναφοράς, και εφόσον θέλουμε να επιτύχουμε κύλιση και πάκτωση στα δύο άκρα επιβάλλουμε τις εξής συνθήκες:

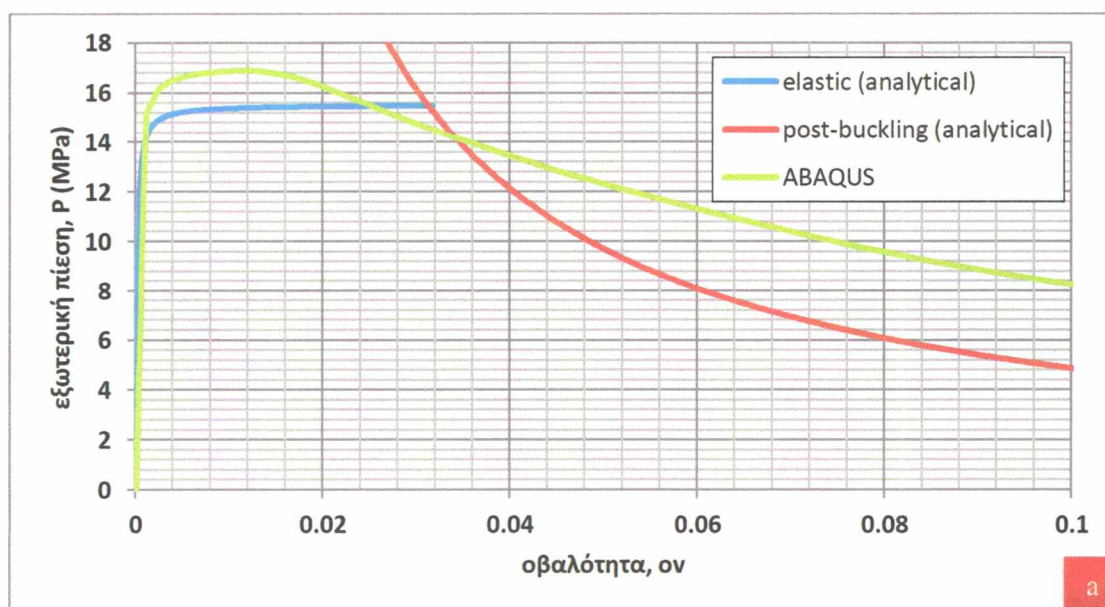
στο ένα σημείο αναφοράς,

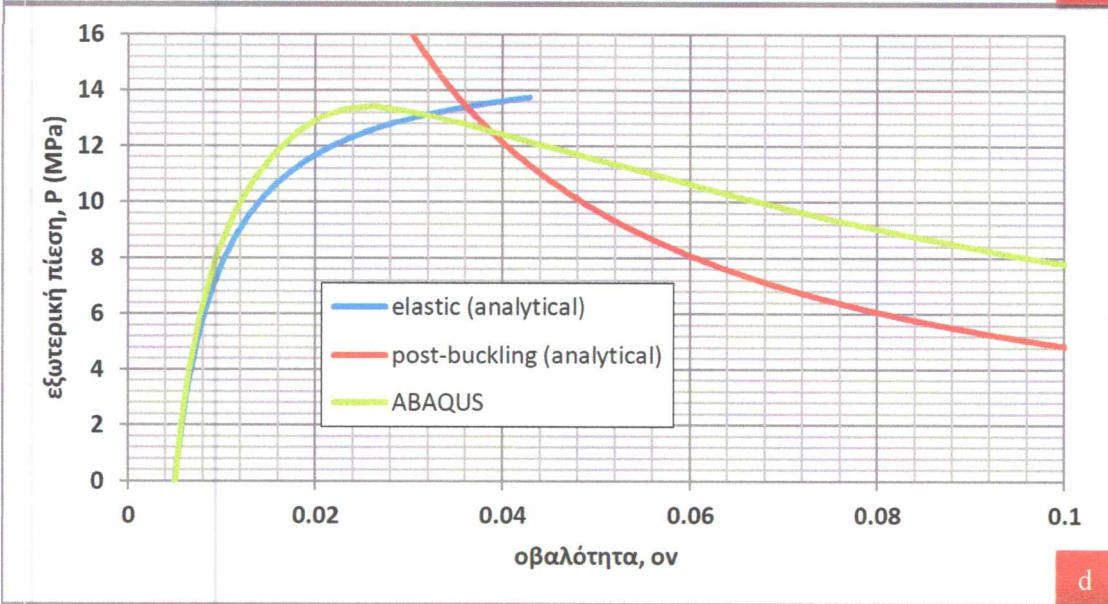
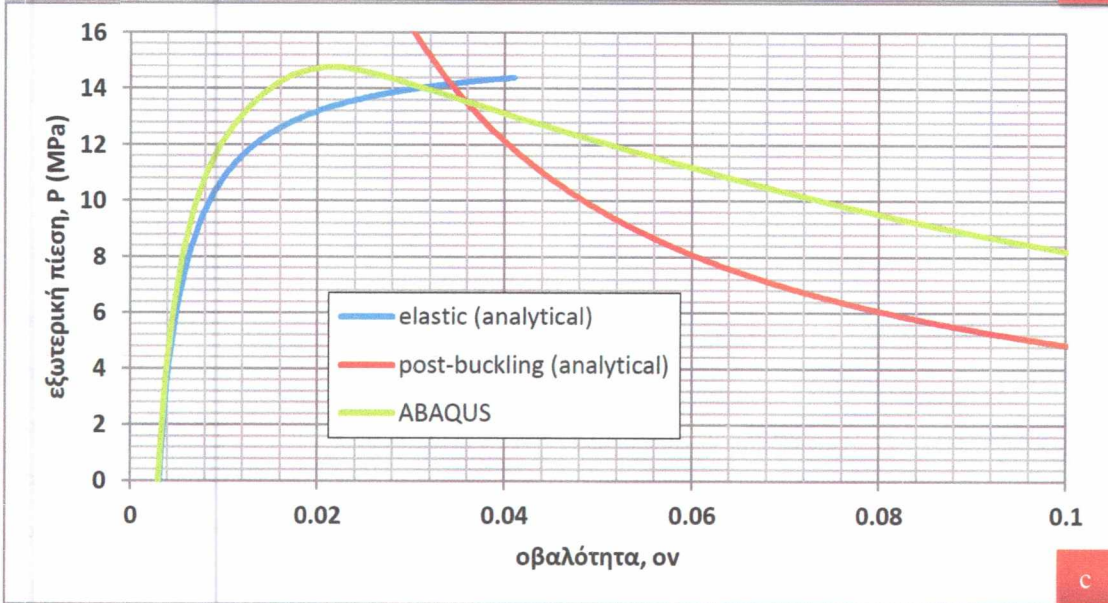
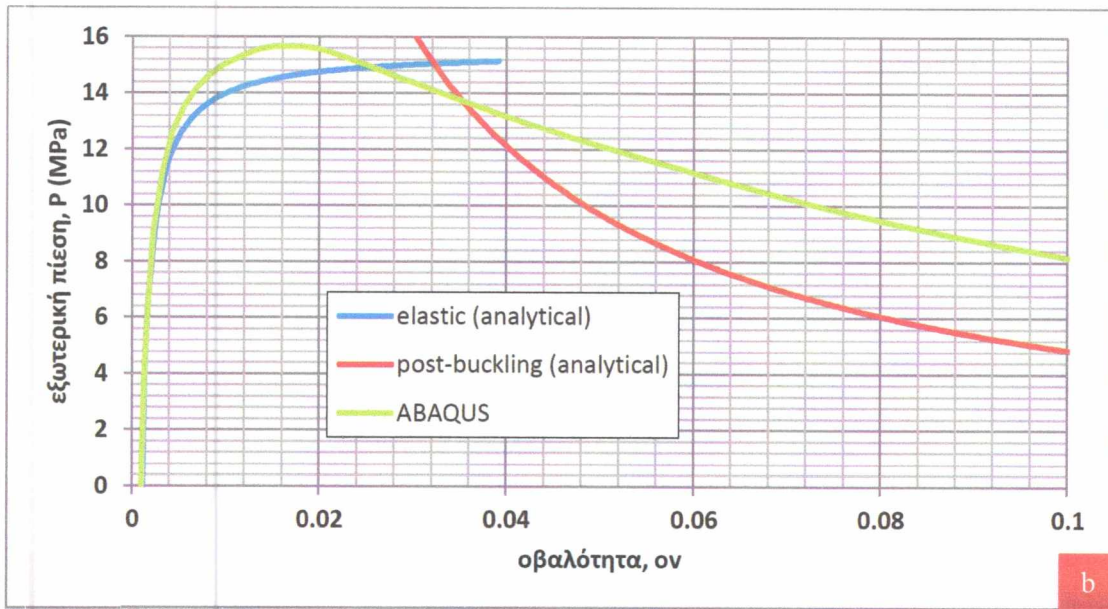
$$\begin{aligned} U_1 &= 0 \\ U_2 &= 0 \\ UR_1 &= 0 \\ UR_2 &= 0 \\ UR_3 &= 0 \end{aligned}$$

στο δεύτερο σημείο αναφοράς,

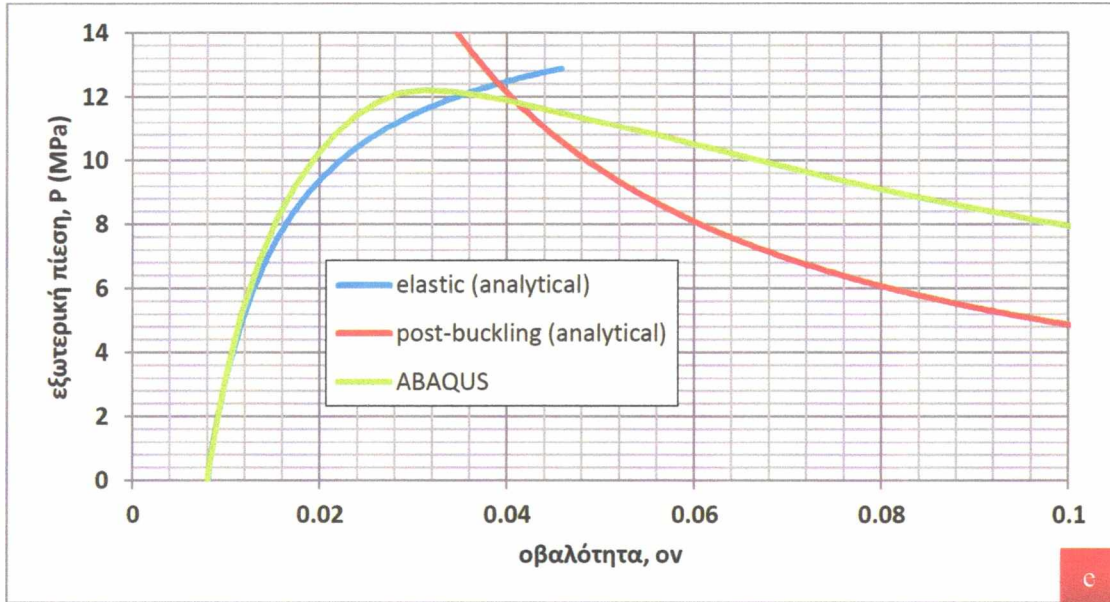
$$\begin{aligned} U_1 &= 0 \\ U_2 &= 0 \\ U_3 &= 0 \\ UR_1 &= 0 \\ UR_2 &= 0 \\ UR_3 &= 0 \end{aligned}$$

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της μελέτης των αγωγών σε φόρτιση εξωτερικής πίεσης.

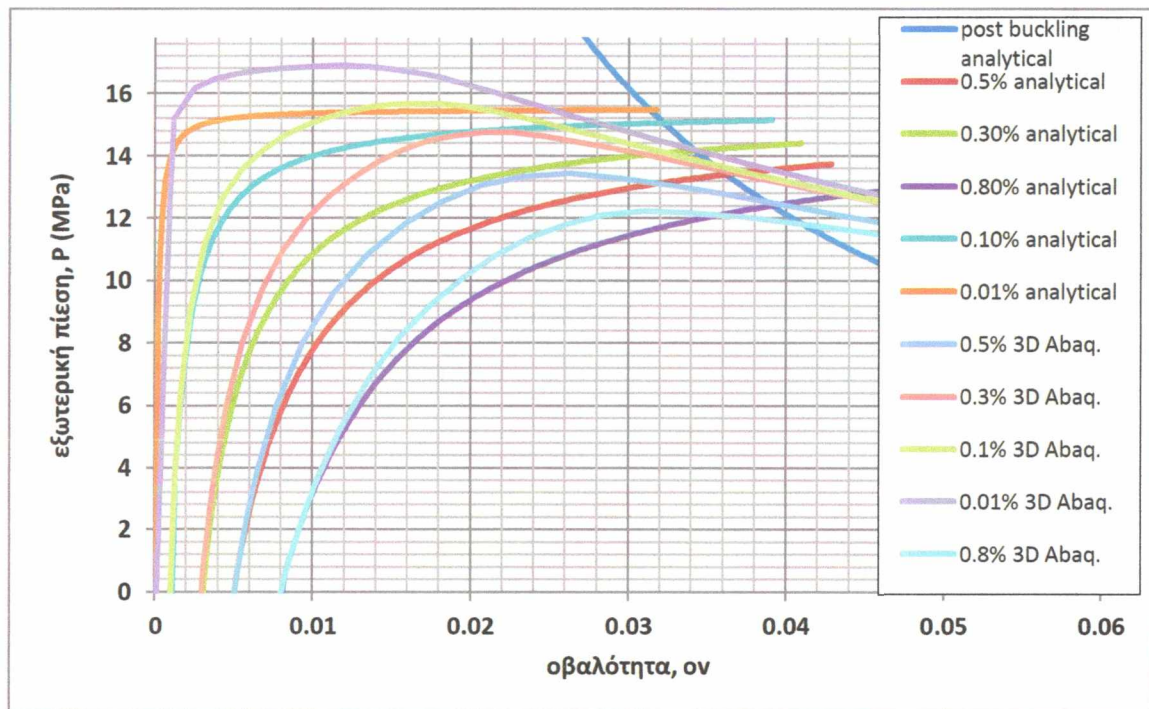








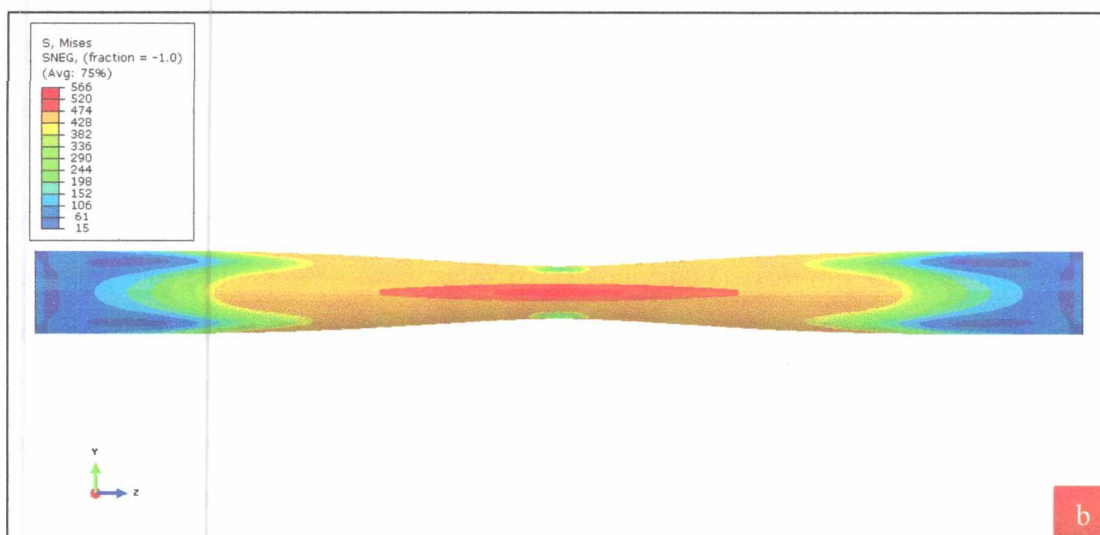
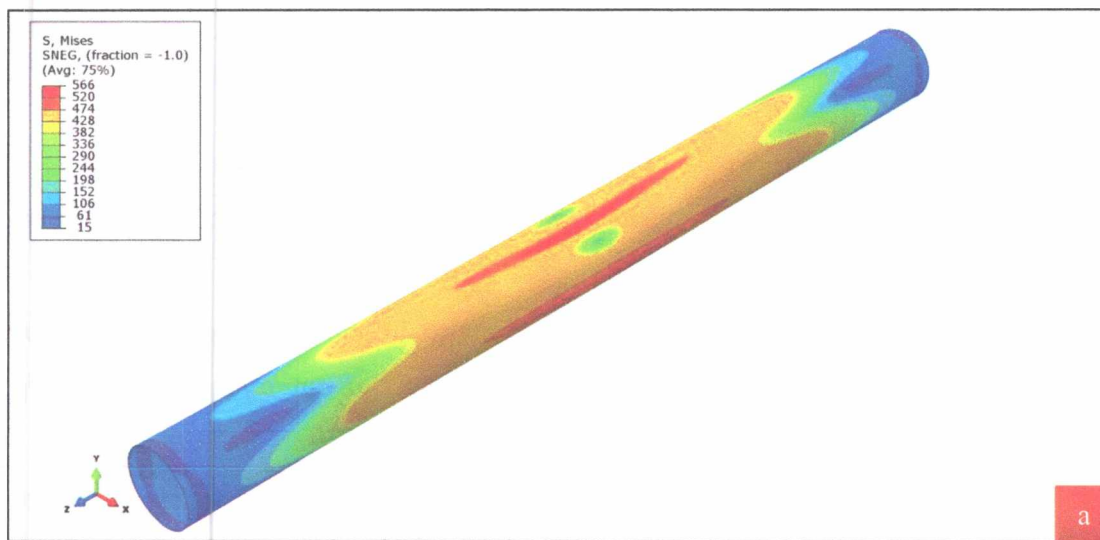
Γράφημα 7: Γραφική αναπαράσταση της μεταβολής της οβαλότητας σε σχέση με την εξωτερική πίεση με βάση το αναλυτικό και το τριδιάστατο μοντέλο, (a)  $\delta_n=0.01\%$ , (b)  $\delta_n=0.1\%$ , (c)  $\delta_n=0.3\%$ , (d)  $\delta_n=0.5\%$ , (e)  $\delta_n=0.8\%$ .



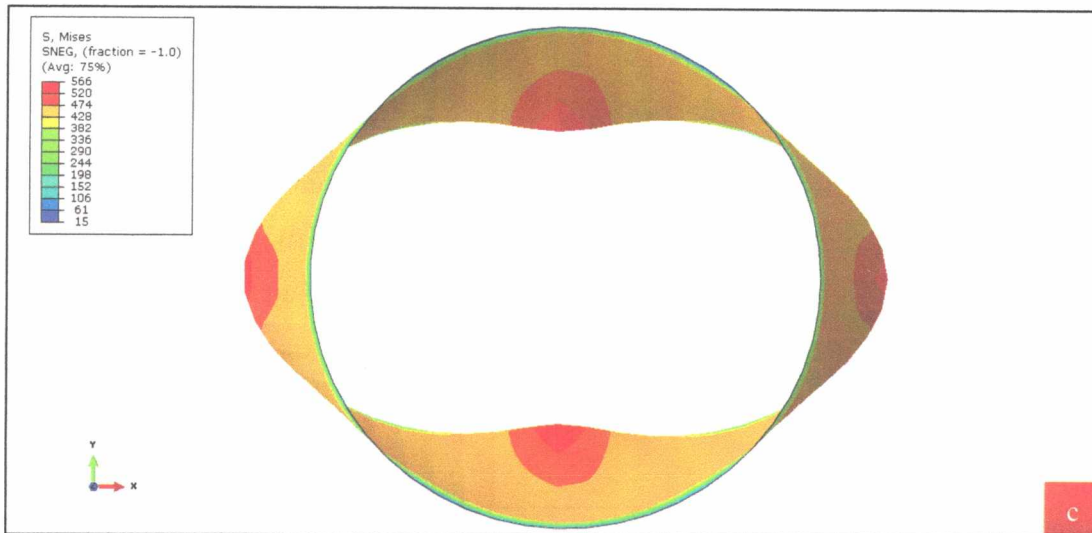
Γράφημα 8: Γραφική αναπαράσταση της μεταβολής της οβαλότητας σε σχέση με την εξωτερική πίεση με βάση το αναλυτικό και το τριδιάστατο μοντέλο (συγκεντρωτικά αποτελέσματα).

### 5.3 Αποτελέσματα μοντέλου τριδιάστατης ανάλυσης

Στην Εικόνα 16 παρατηρούμε την κατανομή των τάσεων αλλά και την αύξηση της παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της σταδιακής αύξησης της εξωτερικής πίεσης. Πιο συγκεκριμένα, είναι εμφανής η εκτεταμένη οβαλοποίηση της διατομής του αγωγού καθώς και οι τέσσερις ζώνες πλαστικοποίησης, οι οποίες λειτουργούν ως πλαστικές αρθρώσεις.







Εικόνα 16: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.8% υπό εξωτερική πίεση, (a) σε προοπτική, (b) σε πλάγια όψη, (c) σε πρόοψη.

#### 5.4 Συμπεράσματα

- Το κρίσιμο φορτίο αστοχίας των αγωγών που υπόκεινται σε εξωτερική πίεση είναι το κρίσιμο φορτίο λυγισμού.
- Η κρίσιμη πίεση επηρεάζεται άμεσα από το μέγεθος της αρχικής ατέλειας μορφής οβάλ. Η μέγιστη (κρίσιμη) πίεση φθίνει με την αύξηση της αρχικής ατέλειας.
- Η αναλυτική λύση υπερεκτιμά την αντοχή του σωλήνα σε σχέση με το διδιάστατο μοντέλο δακτυλίου κυρίως στα στάδια αμέσως πριν και μετά τον λυγισμό (Γράφημα 5) κατά ποσοστό περίπου 15%. Το ποσοστό αυτό μειώνεται όσο μειώνεται η αρχική ατέλεια, αγγίζοντας το 4% για 0.01% αρχική οβαλότητα και αυξάνεται με την αύξησή της, καθώς ανέρχεται στο 31% για 0.8% αρχική οβαλότητα.
- Η αναλυτική λύση υποεκτιμά την αντοχή του σωλήνα σε σχέση με το τριδιάστατο μοντέλο (Γράφημα 8) κατά περίπου 4%, κυρίως για χαμηλές τιμές αρχικής οβαλότητας. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από το γεγονός πως το τριδιάστατο μοντέλο εισάγει επιπλέον αντίσταση στην παραμόρφωση του σωλήνα λόγω παραμόρφωσης ως προς τον διαμήκη άξονά του, η οποία αγνοείται στην αναλυτική μας λύση και στο διδιάστατο μοντέλο.

## 6. Κάμψη Χαλύβδινων Σωλήνων

Στο Κεφάλαιο 6 εξετάζεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η μηχανική συμπεριφορά αγωγού υπό καμπτικά φορτία. Στην παράγραφο 6.1 αναγράφονται ορισμένες γενικές πληροφορίες για το φαινόμενο, ενώ η παράγραφος 6.2 περιλαμβάνει τον τρόπο μοντελοποίησής του και εισαγωγής αρχικής ατέλειας. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης παρουσιάζονται στην παράγραφο 6.3 και έπειτα, στη παράγραφο 6.4 εξετάζεται η επίδραση του μήκους κύματος της ατέλειας στην καμπτική συμπεριφορά. Οι παράγραφοι 6.5 και 6.6 περιλαμβάνουν αποτελέσματα και συμπεράσματα.

### 6.1 Εισαγωγή στη κάμψη

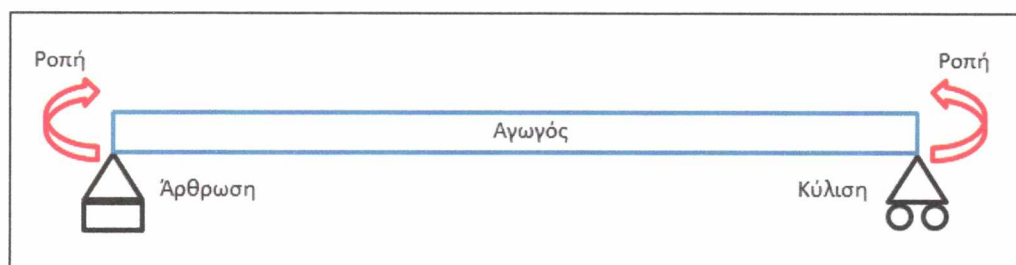
Η κάμψη αποτελεί είδος φόρτισης που εμφανίζεται συχνά τόσο σε υποθαλάσσιους όσο και σε χερσαίους αγωγούς. Στους πρώτους εμφανίζεται κυρίως κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης, πόντισης, και σε πιο σπάνιες περιπτώσεις κατά τη διάρκεια λειτουργίας, ενώ στους χερσαίους κυρίως λόγω ισχυρής μετατόπισης του εδάφους. Η μετατόπιση μπορεί να προκληθεί λόγω κάποιου σεισμού, κατολίσθησης ή από άλλους γεωλογικούς παράγοντες.

Ένας μακρύς σωλήνας που κάμπτεται, εκ πρώτης όψεως συμπεριφέρεται ως δοκός. Η βασική διαφορά όμως ανάμεσα τους έγκειται στο γεγονός ότι η κάμψη σε κυλινδρικό κέλυφος προκαλεί μεταβολές στην οβάλ μορφή της διατομής. Η αύξηση της οβαλότητας του σωλήνα προκαλεί σταδιακή μείωση της καμπτικής ακαμψίας του σωλήνα. Έτσι με αυξανόμενη καμπυλότητα η ροπή οδηγείται σε μία μέγιστη τιμή. Η κατάσταση αυτή αποτελεί μία οριακή κατάσταση της κατασκευής και τα φορτία της ροπής αυτής ονομάζεται οριακό φορτίο κάμψης. Το φαινόμενο διατυπώθηκε και αναλύθηκε για πρώτη φορά από τον Brazier το 1927 και ονομάστηκε φαινόμενο του “Brazier”. (Calladine, 1983)

Όπως και στην περίπτωση της φόρτισης με εξωτερική πίεση, έτσι και στη κάμψη πρέπει να εισάγουμε μία ατέλεια. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, επιλέγουμε ατέλεια μορφής ρυτιδώσεων-πτυχώσεων. Η ύπαρξη παραμενουσών τάσεων ή η ανισοτροπία επιφέρουν εύκολα αρχικές πτυχώσεις πράγμα που καθιστά την χρήση τους απαραίτητη σε αρχικό στάδιο για την εξαγωγή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων. Τίθεται όμως το θέμα επιλογής της κατάλληλης γεωμετρίας αυτών των πτυχώσεων.

## 6.2 Αρχική ατέλεια σε καμπτικά φορτία και μοντελοποίηση

Την απάντηση στο ανωτέρω ερώτημα θα την δώσουμε με κατάλληλο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά κατασκευάζουμε έναν αγωγό χωρίς κάποια ατέλεια πτύχωσης και του επιβάλλουμε συνοριακές συνθήκες κύλισης και άρθρωσης. Στη συνέχεια επιβάλλουμε μοναδιαία και σταθερή ροπή στα άκρα του. Οι συνοριακές συνθήκες και οι αντίστοιχες ροπές επιβάλλονται στα σημεία αναφοράς που βρίσκονται στο κέντρο των δύο πλευρών, με τρόπο ανάλογο με αυτόν της περίπτωσης φόρτισης με εξωτερική πίεση (Εικόνα 17).



Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση συνοριακών συνθηκών σε τριδιάστατο μοντέλο υπό κάμψη.

Δεσμεύουμε πάλι όλους τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων των δύο ακραίων διατομών ώστε να ακολουθούν την κίνηση των κόμβων των αντίστοιχων σημείων αναφοράς. Στη συνέχεια στο ένα σημείο αναφοράς επιβάλλουμε συνθήκες άρθρωσης ως προς τον άξονα z:

$$U_1 = 0$$

$$U_2 = 0$$

$$U_3 = 0$$

$$UR_2 = 0$$

$$UR_3 = 0$$

και στο άλλο συνθήκες κύλισης ως προς τον άξονα z:

$$U_1 = 0$$

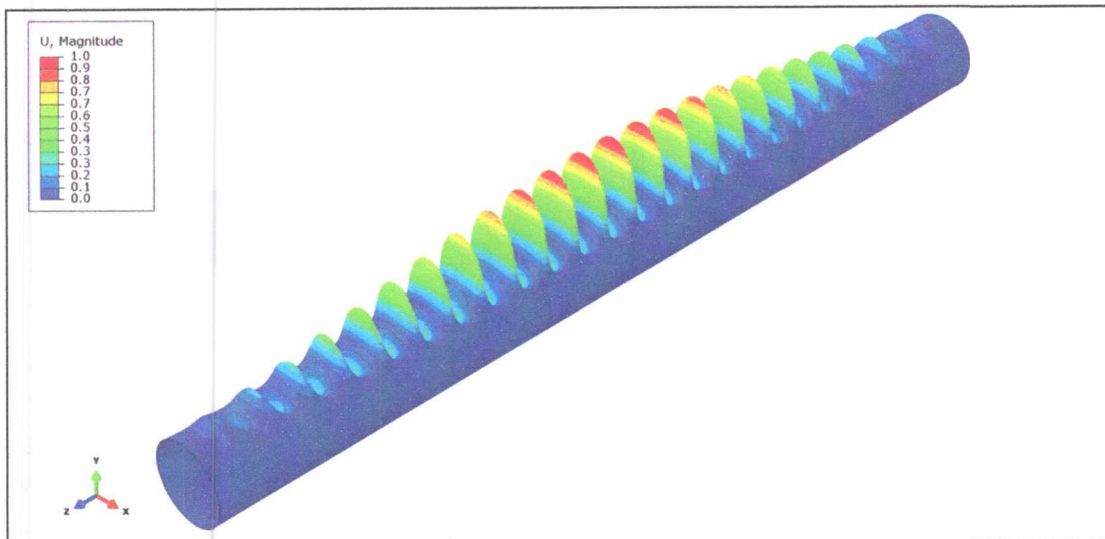
$$U_2 = 0$$

$$UR_2 = 0$$

$$UR_3 = 0$$



Η ροπή που επιβάλλουμε είναι περί τον άξονα z, μοναδιαία σε μέγεθος αλλά ετερόσημη στα δύο σημεία. Επιλέγουμε την επιλογή Buckle για την ανάλυση ιδιοτιμών και ιδιομορφών σε ελαστικό λυγισμό και εξάγουμε 10 ιδιομορφές. Από αυτές εμείς ενδιαφερόμαστε για την πρώτη (Εικόνα 18). Τα υπόλοιπα στοιχεία όπως τα πλέγμα και το υλικό ορίζονται με τρόπο όμοιο με τις υπόλοιπες αναλύσεις.



Εικόνα 18: Σχηματική απεικόνιση ιδιομορφής της πρώτης ιδιοσυχνότητας σωλήνα, εφαρμόζοντας μοναδιαία ροπή στα άκρα του.

Η γεωμετρία της πρώτης ιδιομορφής αντιστοιχεί σε μετατοπίσεις ως προς όλες τις κατευθύνσεις,  $X, Y, Z$  για κάθε κόμβο του μοντέλου μας. Επομένως γνωρίζοντας της συντεταγμένες όλων των κόμβων αλλά και τις μετατοπίσεις τους για κάθε ιδιομορφή, μπορούμε να ορίσουμε την νέα γεωμετρία, η οποία αποτελείται από την αρχική γεωμετρία διαφοροποιημένη κατά ένα μικρό ποσοστό από τη γεωμετρία της ιδιομορφής που επιλέξαμε. Οι συντεταγμένες του τέλειου μοντέλου με αρχική ατέλεια κυματισμών πτύχωσης θα είναι:

$$\underline{X} = \underline{x} + W \cdot \underline{U} \quad (5.2)$$

όπου,

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

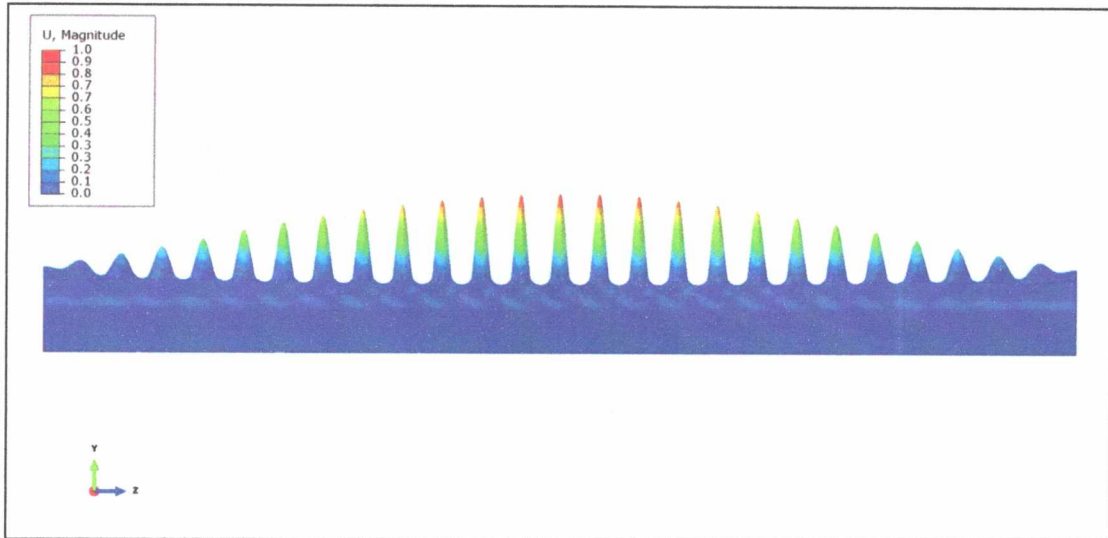
$\underline{X}$  = νέες συντεταγμένες κόμβων

$\underline{x}$  = παλιές συντεταγμένες κόμβων

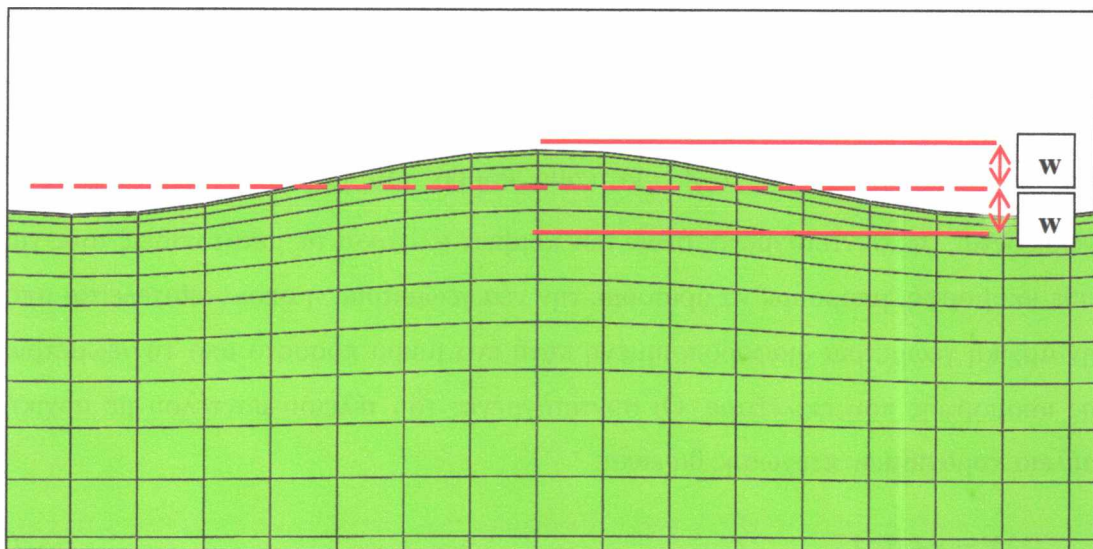
$\underline{U}$  = συντεταγμένες ιδιομορφής



Στη Εξίσωση 6.1 ο συντελεστής  $W$  επιλέγεται έτσι ώστε το μέγεθος της ατέλειας (εύρος του κύματος) να είναι ένα συγκεκριμένο ποσοστό του πάχους του αγωγού (Εικόνα 19).



Εικόνα 19: Σχηματική απεικόνιση ιδιομορφής της πρώτης ιδιοσυχνότητας σωλήνα, εφαρμόζοντας μοναδιαία ροπή στα άκρα του.



Εικόνα 20: Σχηματική απεικόνιση γεωμετρικών χαρακτηριστικών ατέλειας μορφής ρυτιδώσεων.

Στη συνέχεια επεμβαίνουμε στο input file του τέλειου μοντέλου και αντικαθιστούμε τις συντεταγμένες των κόμβων με αυτές του ατελούς σωλήνα που υπολογίσαμε με τον τρόπο που περιγράψαμε παραπάνω. Για τον υπολογισμό των νέων συντεταγμένων με τον τύπο που αναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο υπολογιστικό φύλλο του Excel όπου η γεωμετρία της ιδιομορφής προσαρμοζόταν σε

κάθε τιμή της μεταβλητής  $W$ . Το φύλλο Excel υπολογίζει τα νέα σημεία σε μορφή κατάλληλη για απευθείας αντιγραφή στο νέο input file.

### 6.3 Αποτελέσματα καθαρής κάμψης σωλήνων

Αρχικά ορίζουμε την μέση καμπυλότητα του σωλήνα ως εξής:

$$k = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2L} \quad (5.3)$$

όπου,

$\varphi_1, \varphi_2$  = οι στροφές των δύο σημείων αναφοράς στα δύο άκρα του σωλήνα

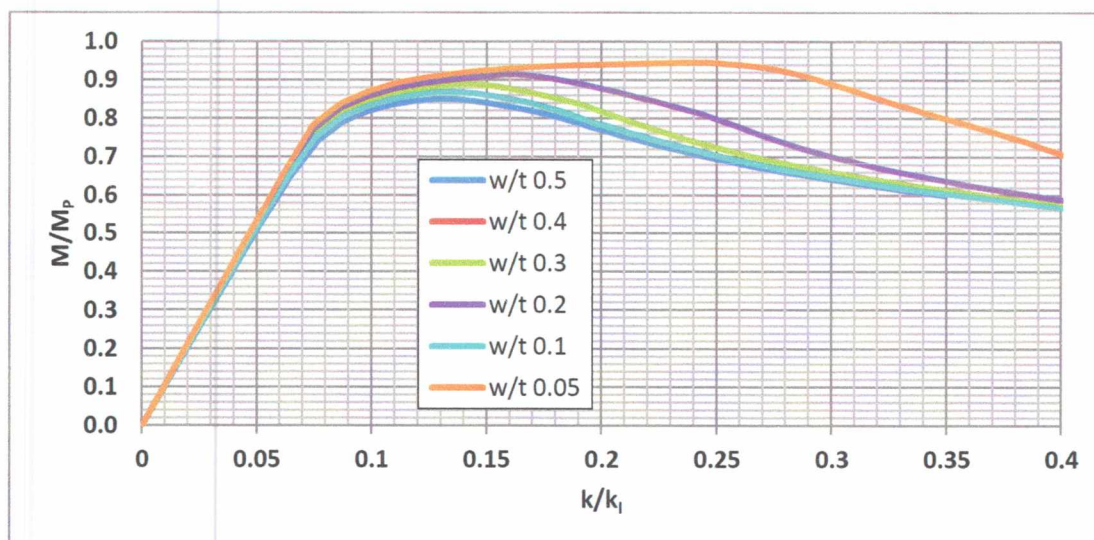
Σε όλα γραφήματα που ακολουθούν η ροπή αδιαστασιοποιείται με την παράμετρο:

$$M_p = \sigma_y D^2 t \quad (5.4)$$

και η καμπυλότητα με την παράμετρο:

$$k_I = \frac{t}{D^2} \quad (5.5)$$

Στο Γράφημα 10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για αγωγό με εξωτερική διάμετρο  $D_{ext} = 914.4mm$  και πάχος  $t = 30mm$  για διάφορες τιμές του συντελεστή  $W$ .



Γράφημα 10: Μεταβολή καμπυλότητας σε σχέση με την επιβαλλόμενη ροπή σε αγωγό διαμέτρου 36in.

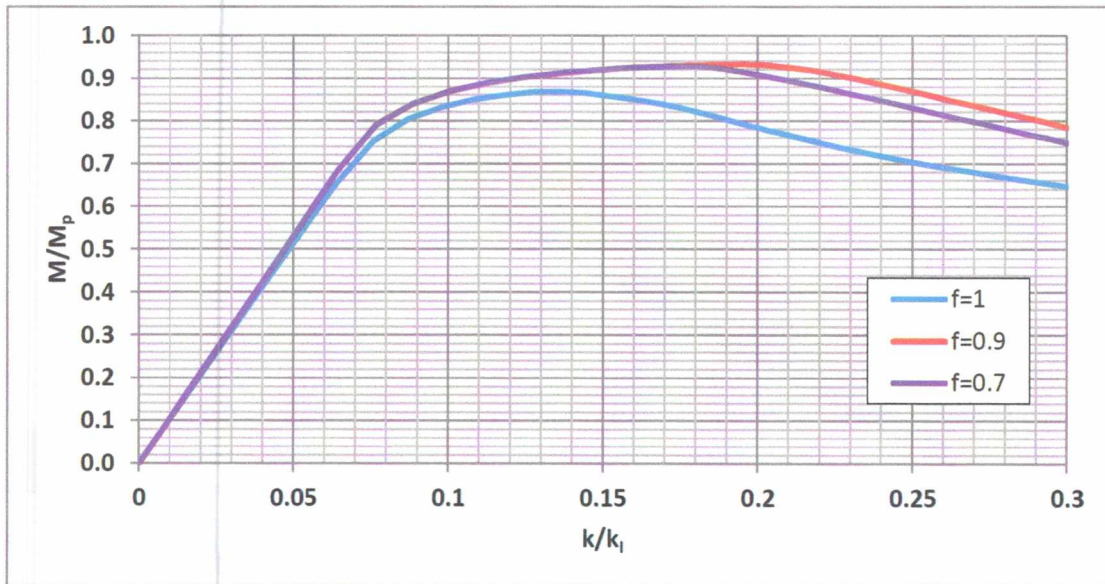
## 6.4 Επίδραση του μήκους κύματος της ατέλειας

Η παραπάνω ανάλυση κρύβει μία μικρή “ασυνέπεια”. Η ανάλυση του Abaqus με την εντολή Buckle για την εξαγωγή των ιδιομορφών είναι ελαστική ενώ η ανάλυση κάμψης είναι ανελαστική. Ουσιαστικά, η γεωμετρία των ιδιομορφών για ανελαστική ανάλυση διαφέρει από την ελαστική ως προς το μήκος κύματος, δηλαδή την απόσταση διαδοχικών πτυχώσεων. Συγκεκριμένα για ελαστοπλαστική ανάλυση, το πραγματικό μήκος κύματος είναι μικρότερο. Σημειώνουμε πως η ελαστοπλαστική ανάλυση ιδιοτιμών είναι πολύ απαιτητική και ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας εργασίας. Για να εξετάσουμε την επιρροή του μήκους κύματος στην καμπτική συμπεριφορά δημιουργήσαμε μοντέλα μεγαλύτερου μήκους από το επιθυμητό (11m), με λόγο αναλογίας  $f$ , όπου

$$f = \frac{11}{\text{εξεταζόμενο\_μήκος}(m)} \quad (5.6)$$

και βρήκαμε τις ιδιομορφές και τις αντίστοιχες μετατοπίσεις των κόμβων. Στη νέα γεωμετρία που δημιουργούσαμε κάθε φορά με τον τρόπο που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη παράγραφο, πολλαπλασιάζαμε την z-συντεταγμένη κάθε κόμβου με τον λόγο αναλογίας  $f (<1)$ , οπότε καταλήγουμε με έναν σωλήνα με συνολικό μήκος πάντοτε ίσο με 11m και μήκος κύματος  $f$  φορές μικρότερο από αυτό της βασικής ιδιομορφής. Το Γράφημα 11 παρουσιάζει την επιρροή που έχει το μήκος κύματος των πτυχώσεων στην αντοχή του αγωγού σε κάμψη.

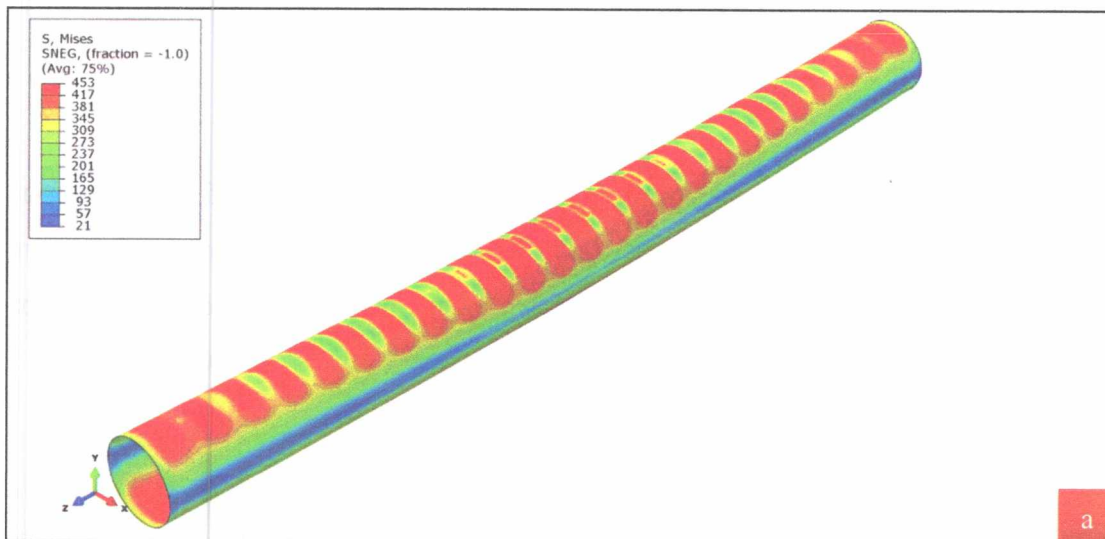




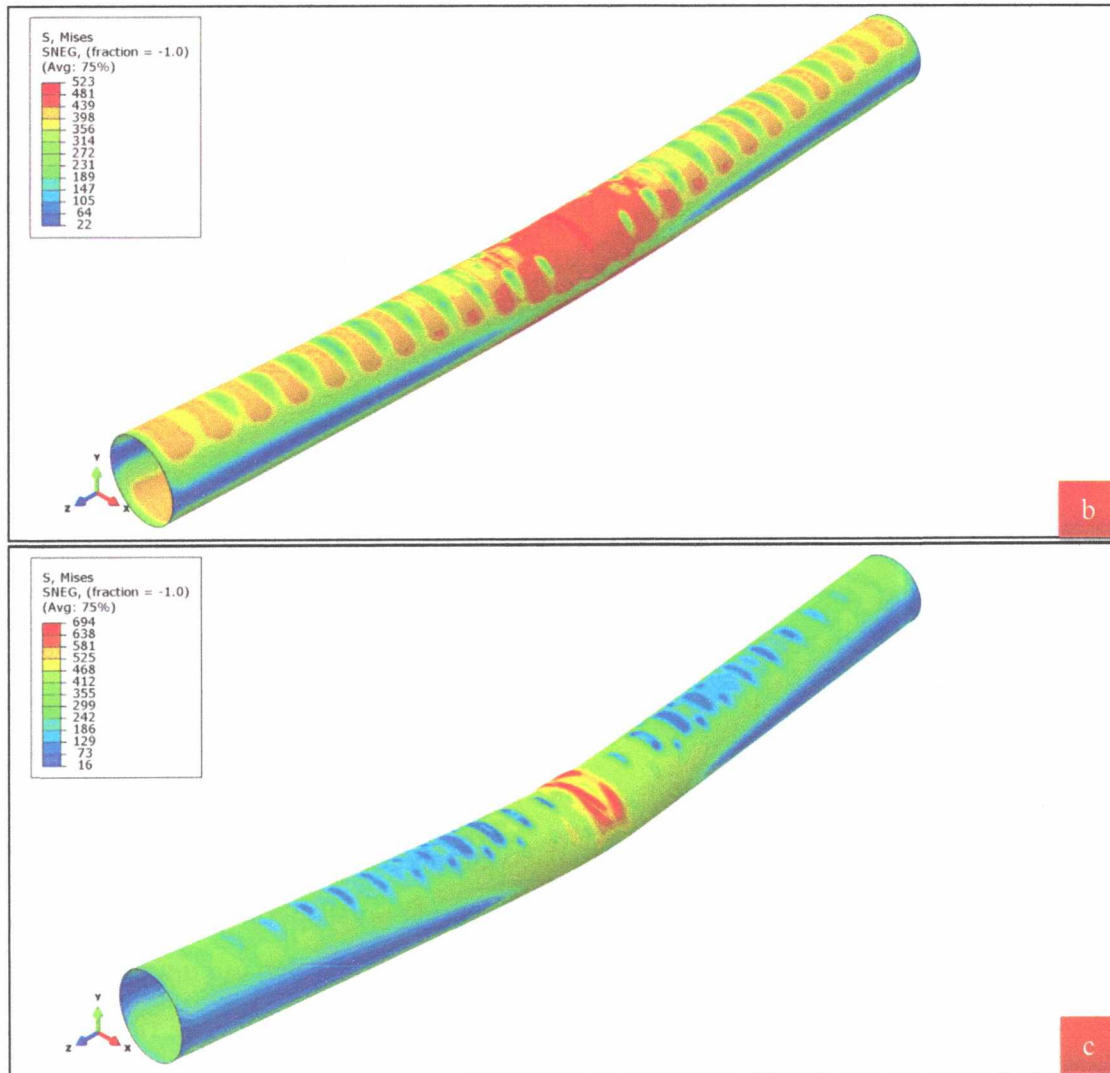
Γράφημα 11: Επιρροή το μήκους κύματος ατέλειας ρυτιδώσεων στην αντοχή αγωγού διαμέτρου 36in σε κάμψη.

### 6.5 Αριθμητικά αποτελέσματα για καθαρή κάμψη

Στις Εικόνες 21 και 22 που ακολουθούν παρουσιάζεται μία αντιπροσωπευτική σύγκριση της συμπεριφοράς αγωγών σε κάμψη για διαφορετικές τιμές αρχικής ατέλειας πτυχώσεων. Επιλέχθηκαν ακραίες τιμές εύρους ατελειών, μία αρκετά έντονη με τιμή συντελεστή  $w=0.5$  και μία με  $w=0.05$ . Στον αγωγό με τις έντονες πτυχώσεις,  $w=0.5$  παρατηρούμε σημαντική συγκέντρωση τάσεων στις κοιλότητες ανάμεσα στις κορυφές των ρυτιδώσεων. Ακολουθεί η τοπική αύξηση της τάσης στο κέντρο του αγωγού και ο λυγισμός του.

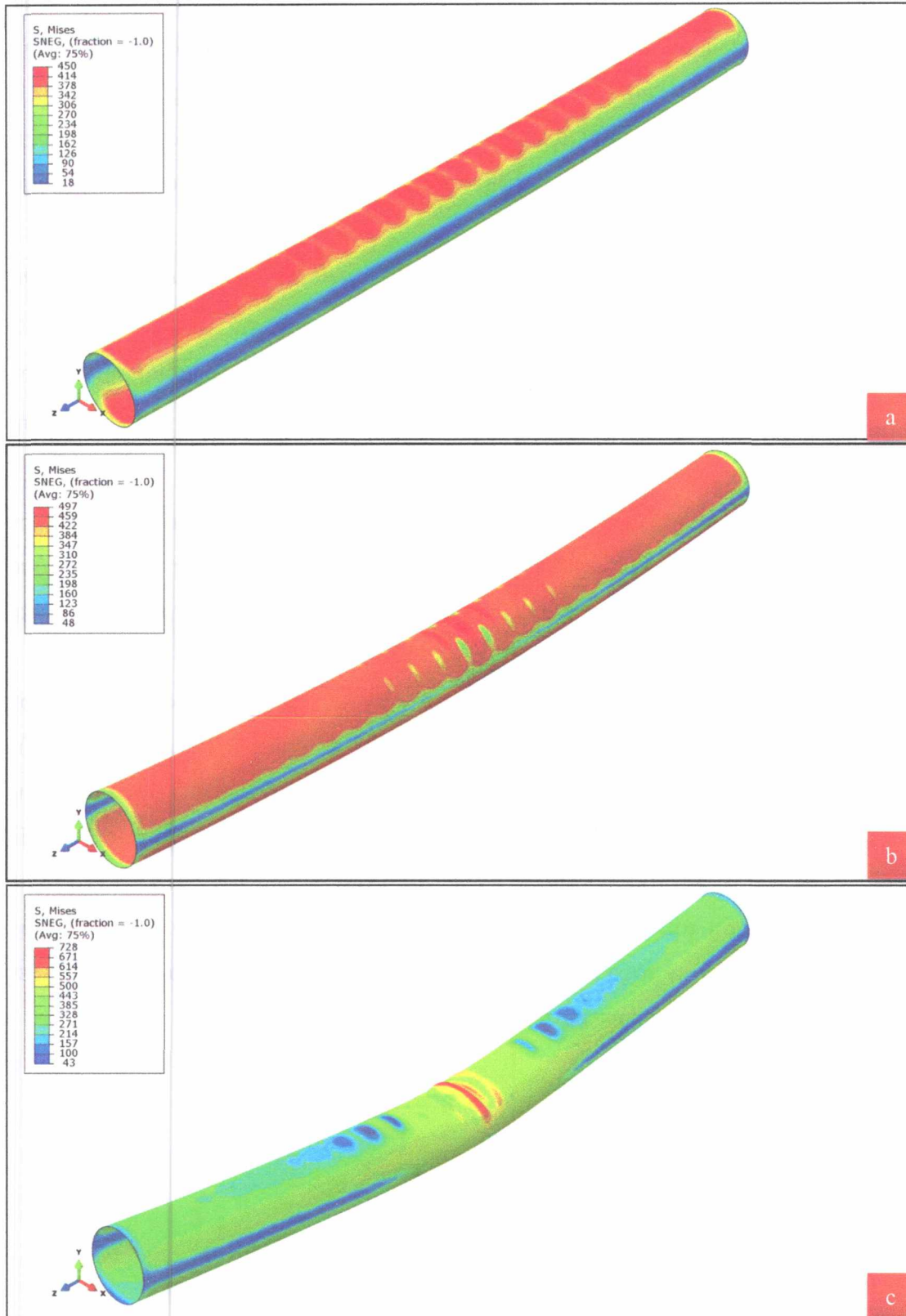






Εικόνα 21: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε αγωγό διαμέτρου 36mm και με ατέλεια ρυτιδώσεων μεγέθους  $W=0.5$  σε κάμψη. (a) Ο αγωγός βρίσκεται στο στάδιο της πλαστικοποίησής του στις περιοχές ανάμεσα στις ρυτιδώσεις. (b) Ο αγωγός βρίσκεται στο στάδιο της συγκέντρωσης των τάσεων στο κεντρικό τμήμα του. (c) Στον αγωγό έχει επέλθει τοπικός λυγισμός.

Παράλληλα, ο τοπικός λυγισμός παρουσιάζεται αργότερα αλλά είναι εμφανώς πιο απότομος στην περίπτωση που  $w=0.05$ . Το άνω τμήμα του αγωγού (θλιβόμενη περιοχή) πλαστικοποιείται πλήρως και ακολουθεί η συγκέντρωση των τάσεων στο κέντρο του αγωγού συντελώντας στην εμφάνιση τοπικού λυγισμού (Εικόνα 22).



Εικόνα 22: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε αγωγό διαμέτρου 36in και με ατέλεια ρυτιδώσεων μεγέθους  $W=0.05$  σε κάμψη. (a) Ο αγωγός βρίσκεται στο στάδιο της πλαστικοποίησής του στις περιοχές ανάμεσα στις ρυτιδώσεις. (b) Ο αγωγός βρίσκεται στο στάδιο της συγκέντρωσης των τάσεων στο κεντρικό τμήμα του. (c) Στον αγωγό έχει επέλθει τοπικός λυγισμός.

## 6.6 Συμπεράσματα αποτελεσμάτων καθαρής κάμψης

1. Η καμπτική απόκριση ενός σωλήνα στην ανελαστική περιοχή παραμόρφωσης διαφοροποιείται από την απόκριση μίας ανελαστικής δοκού, λόγω της οβαλοποίησης των διατομών. Η αύξηση της οβαλότητας προκαλεί μία σταδιακή μείωση στην ακαμψία του σωλήνα, προκαλώντας την εμφάνιση οριακού φορτίου κάμψης και την επακόλουθη κατάρρευση του με τη μορφή του τοπικού λυγισμού.
2. Το υπό εξέταση κυλινδρικό κέλυφος υλικού X65,  $D_{ext} = 914.4mm$ ,  $t = 30mm$  έχει ως οριακή κατάσταση σε κάμψη τον τοπικό λυγισμό. Ο τοπικός λυγισμός στην περίπτωση αυτή προηγείται του οριακού φορτίου κάμψης,  $M_p = \sigma_y D^2 t$ , που υφίσταται μέσω της ύπαρξης γεωμετρικής ατέλειας κυματισμών πτύχωσης.
3. Η ύπαρξη αρχικής ατέλειας με τη μορφή κυματισμών (wrinkles) οδηγεί σε μείωση της αντοχής ενός σωλήνα υπό σταθερή κάμψη. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της αρχικής ατέλειας, τόσο μικρότερο είναι το οριακό φορτίο κάμψης.
4. Τα γραφήματα του κεφαλαίου μας δίνουν μία εποπτική εικόνα του φαινομένου του λυγισμού λόγω κάμψης σε αγωγούς. Επιπλέον, αποτελούν χρήσιμη πληροφορία για τις προσομοιώσεις του επόμενου κεφαλαίου, στις οποίες θα εξετάσουμε περιπτώσεις συνδυασμένης καταπόνησης σε φορτία εξωτερικής πίεσης και κάμψης.
5. Η επίδραση του μήκους κύματος είναι εν μέρει σημαντική αλλά δεν επιδρά σημαντικά στην τάξη μεγέθους των αποτελεσμάτων (Γράφημα 11), οπότε δεν θα μας απασχολήσει περαιτέρω.



## 7. Συνδυασμένη Καταπόνηση Εξωτερικής Πίεσης και Κάμψης

Στο Κεφάλαιο 7 μελετάται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η μηχανική συμπεριφορά αγωγού υπό συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης και κάμψης. Στην παράγραφο 7.1 αναγράφονται γενικές πληροφορίες για το φαινόμενο ενώ οι παράγραφοι 7.2 και 7.3 περιλαμβάνουν τον τρόπο μοντελοποίησης σωλήνα με ροπή στα άκρα του και τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Οι παράγραφος 7.4 εξετάζει την περίπτωση επιβολής κάμψης με την μέθοδο κάμψης τεσσάρων σημείων (four-point bending) και οι παράγραφοι 7.5 και 7.6 περιέχουν τα γραφικά και τα αριθμητικά αποτελέσματα. Τέλος, τα συμπεράσματα αναφέρονται στην παράγραφο 7.7.

### 7.1 Εισαγωγή στην συνδυασμένη καταπόνηση

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί υπόκεινται σε κάμψη με την παρουσία εξωτερικής πίεσης κατά τη διάρκεια εγκατάστασής τους είτε με την μέθοδο S-lay είτε με τη μέθοδο J-lay. Αυτή είναι ακριβώς η κρίσιμη καταπόνηση που θέλουμε να εξετάσουμε με πεπερασμένα στοιχεία και με την βοήθεια της πειραματικής διάταξης που περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο. Στο παρόν κεφάλαιο μελετάμε την μηχανική συμπεριφορά αγωγών σε συνδυασμένη καταπόνηση ώστε να γνωρίζουμε την αναμενόμενη παραμόρφωση τους μέσα στο δοχείο πίεσης. Θα παρουσιάσουμε δύο διαφορετικούς τρόπους προσέγγισης του φαινομένου. Στην πρώτη η ροπή εφαρμόζεται απευθείας στα σημεία αναφοράς στα κέντρα των δύο πλευρών του αγωγού και στη δεύτερη δημιουργούμε συνθήκες four-point bending. Η δεύτερη μέθοδος αποτελεί ακριβή αναπαράσταση των συνθηκών λειτουργίας και του τρόπου επιβολής της ροπής σε μία πειραματική διάταξη. Οι προσομοιώσεις που προηγήθηκαν μας διευκόλυναν να ορίσουμε τα δεδομένα εισόδου στο Abaqus για την περίπτωση συνδυασμένης καταπόνησης. Επίσης από την μέχρι τώρα βιβλιογραφία γνωρίζουμε πως η αλληλουχία των φορτίσεων παίζει σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα. Δηλαδή η κάμψη του αγωγού όταν ακολουθεί την εφαρμογή την εξωτερικής πίεσης, η οποία παραμένει σταθερή, οδηγεί συντομότερα σε αστοχία, παρά η αντίστροφη αλληλουχία (Kyriakides & Corona, 2007).

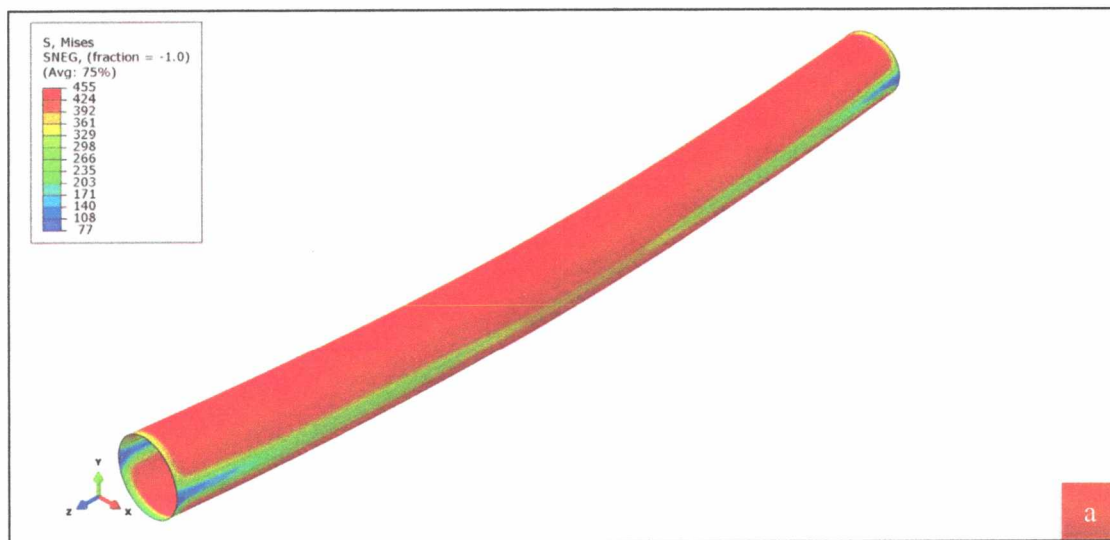


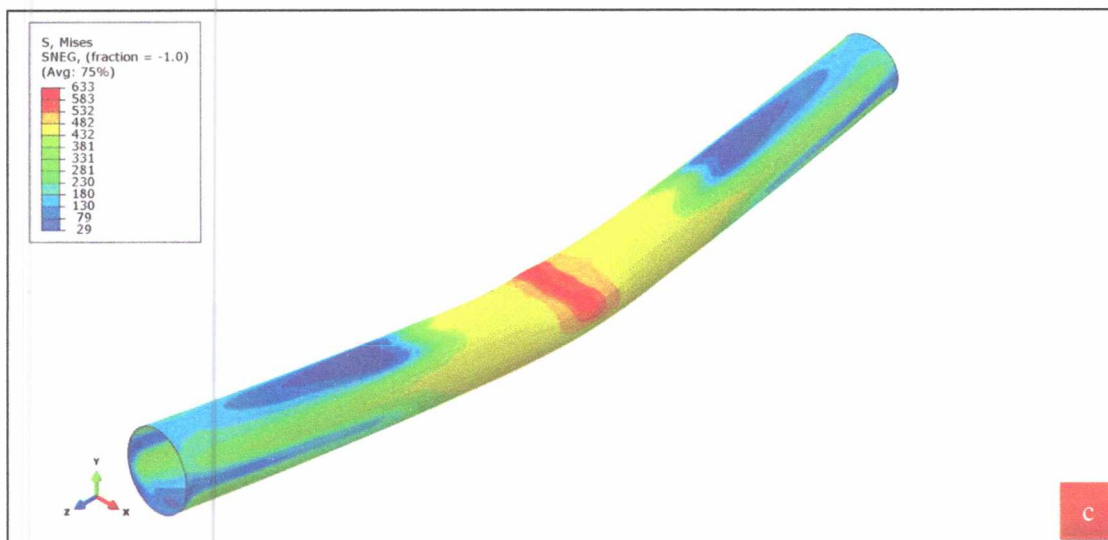
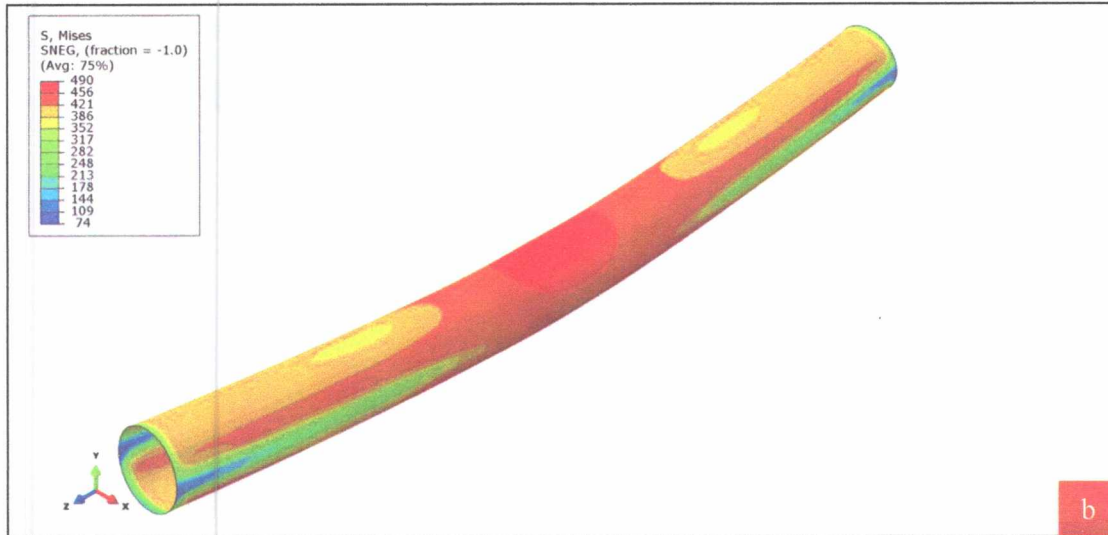
## 7.2 Μοντέλο με ροπή στα άκρα

Ο αγωγός είναι ίδιος με αυτόν που περιγράφηκε και σε προηγούμενες παραγράφους. Οι επιβαλλόμενες συνοριακές συνθήκες είναι ίδιες με αυτές που είχαμε όταν εφαρμόσαμε καθαρή κάμψη. Η βασική διαφορά είναι στην φόρτιση. Αναλυτικότερα, πριν από το βήμα Riks σε κάμψη προηγείται η εφαρμογή της εξωτερικής πίεσης η οποία ορίζεται σε ένα βήμα Static, General. Με αυτόν τον τρόπο η εξωτερική πίεση επιβάλλεται σταδιακά μέχρι την προκαθορισμένη της τιμή και παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια επιβολής της κάμψης.

## 7.3 Αποτελέσματα συνδυασμένης φόρτιση με ροπή στα άκρα

Ακολουθούν γραφήματα που αναπαριστούν την απόκριση του αγωγού στην σταδιακή αύξηση των καμπτικών φορτίων, αφού πρώτα έχει προηγηθεί η φόρτισή του σε εξωτερική πίεση, η οποία και παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της καταπόνησης. Οι συγκεκριμένες εικόνες προήλθαν από την μελέτη αγωγού με αρχική οβαλότητα 0.3% και βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά:  $D_{ext} = 914.4mm$ ,  $t = 30mm$  (Εικόνα 23).

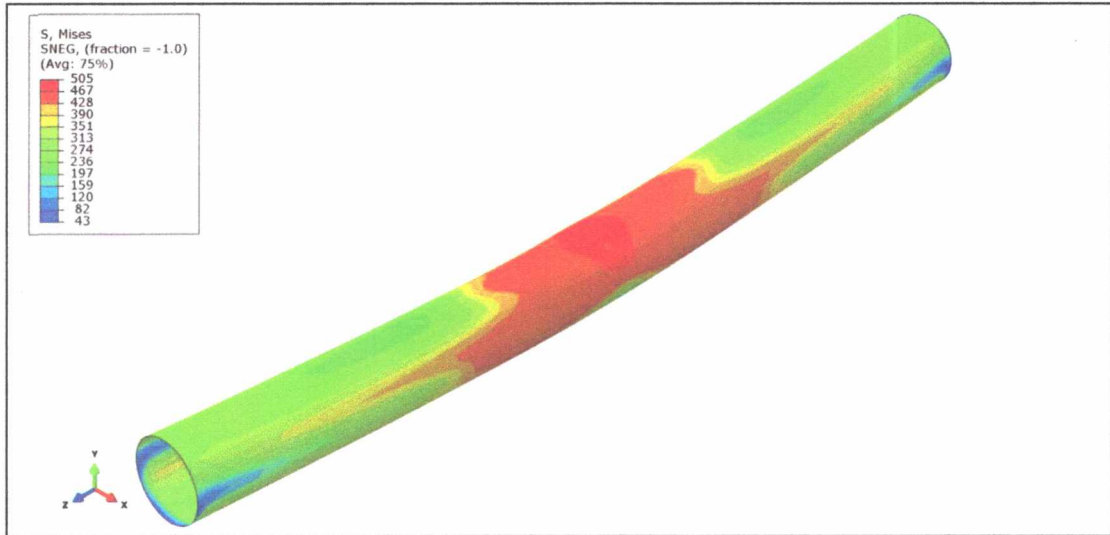




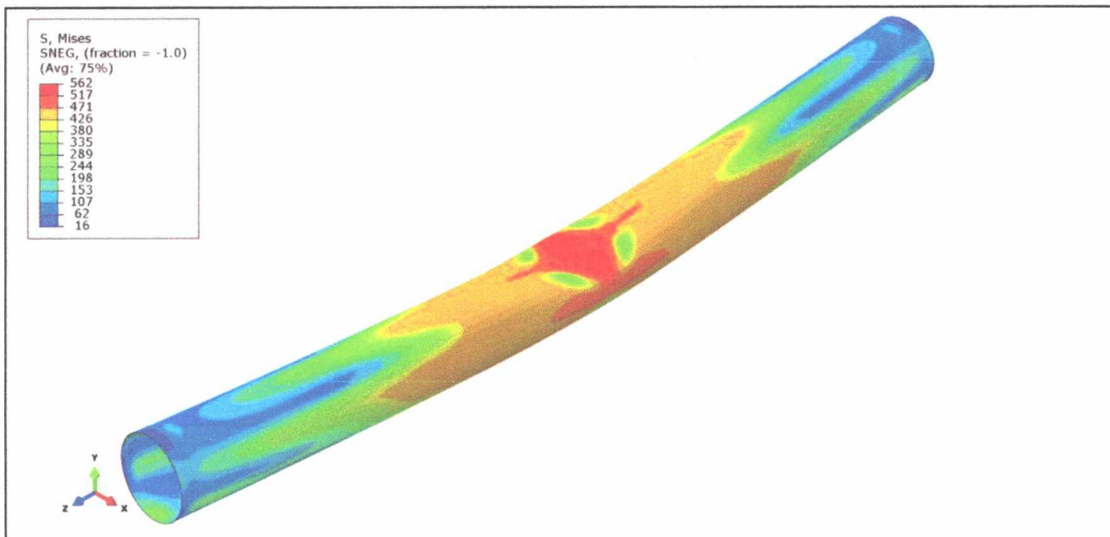
Εικόνα 23: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.3% υπό συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης (3MPa) και κάμψης (a) στο στάδιο της πλήρους πλαστικοποίησης του αγωγού, (b) στο στάδιο της συγκέντρωσης των τάσεων στο μεσαίο τμήμα του αγωγού, (c) στο στάδιο του τοπικού λυγισμού.



Αρχικά, η οβαλότητα της διατομής του αγωγού αυξάνεται λόγω της επιβολής της εξωτερικής πίεσης. Στην συνέχεια ακολουθεί η κάμψη, κατά της οποίας ο αγωγός πλαστικοποιείται πλήρως στο άνω και κάτω μέρος του. Έπεται η συγκέντρωση των τάσεων στο κέντρο του αγωγού και ο τοπικός λυγισμός του. Οι Εικόνες 24 και 25 αποτελούν ενδεικτικές της εντατικής κατάστασης των αγωγών με τιμές αρχικής οβαλότητας 0.8% και 0.01% αντίστοιχα.

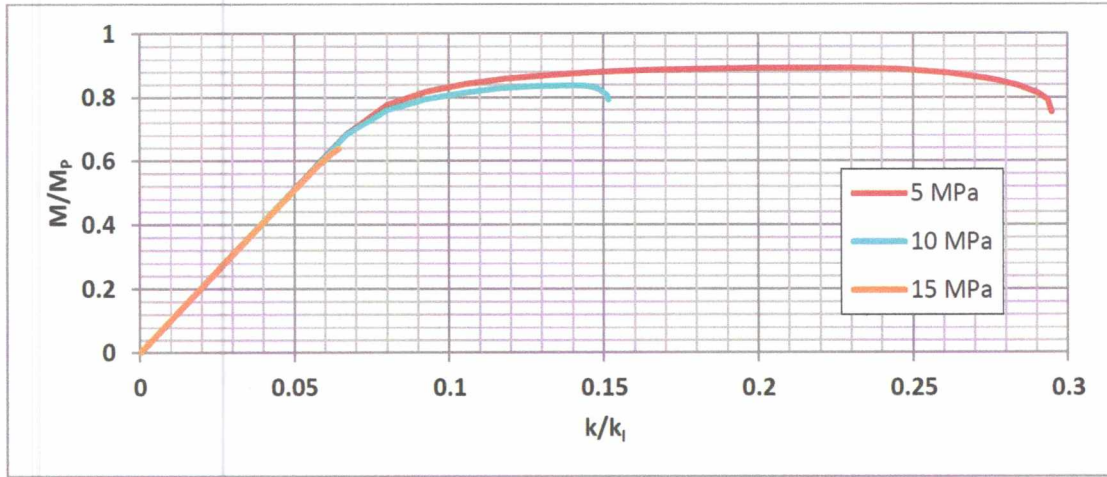


Εικόνα 24: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.8% υπό συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης και κάμψης στο στάδιο του λυγισμού.

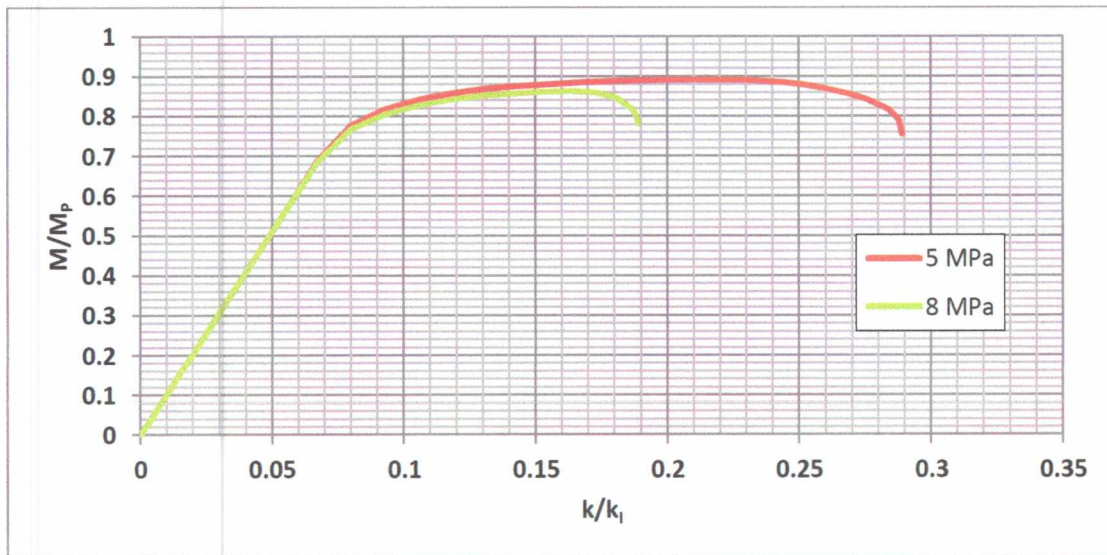


Εικόνα 25: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.01% υπό συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης και κάμψης στο στάδιο του λυγισμού.

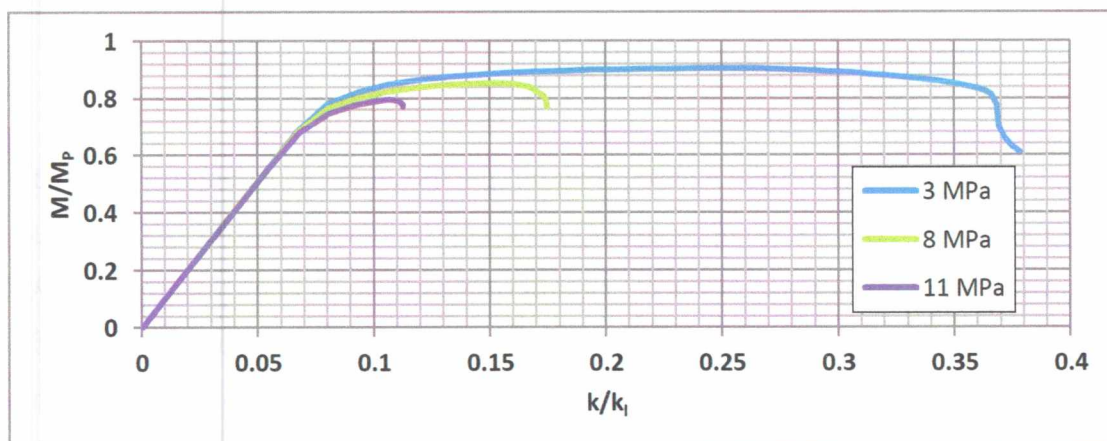




Γράφημα 12: Μεταβολή καμπυλότητας σε σχέση με μεταβολή της επιβαλλόμενης ροπής σε αγωγό διαμέτρου 36mm και αρχικής οβαλότητας 0.01%.

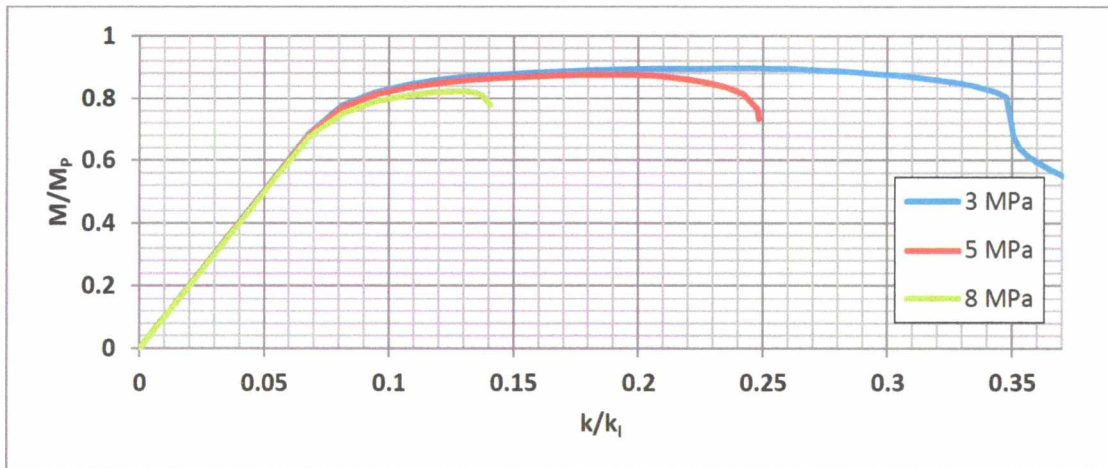


Γράφημα 13: Μεταβολή καμπυλότητας σε σχέση με μεταβολή της επιβαλλόμενης ροπής σε αγωγό διαμέτρου 36mm και αρχικής οβαλότητας 0.1%.

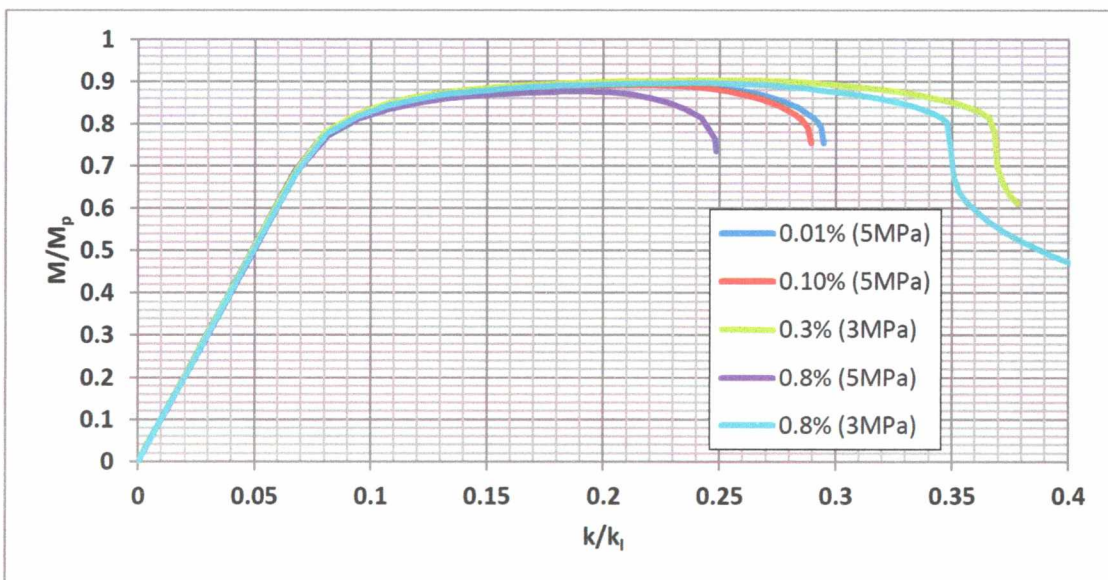


Γράφημα 14: Μεταβολή καμπυλότητας σε σχέση με μεταβολή της επιβαλλόμενης ροπής σε αγωγό διαμέτρου 36mm και αρχικής οβαλότητας 0.3%.





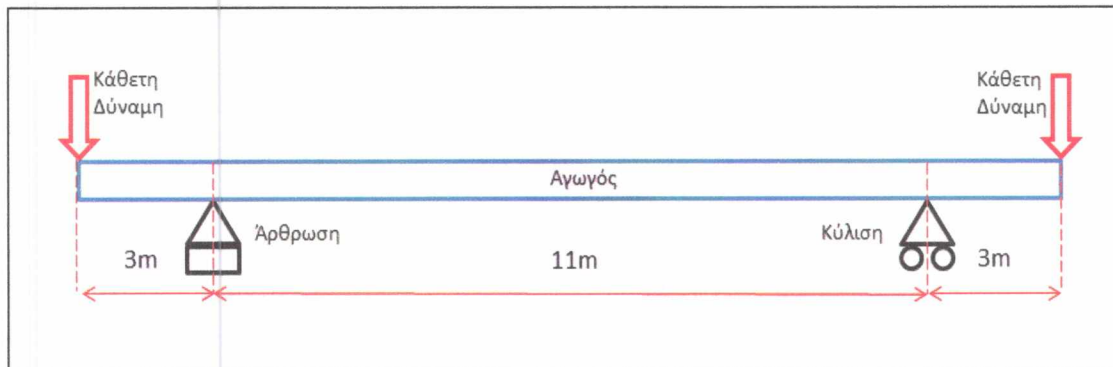
Γράφημα 15: Μεταβολή καμπυλότητας σε σχέση με μεταβολή της επιβαλλόμενης ροπής σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.8%.



Γράφημα 16: Σύγκριση συμπεριφοράς σε κάμψη αγωγού διαμέτρου 36in για διάφορες τιμές αρχικής οβαλότητας.

## 7.4 Μοντελοποίηση κάμψης με την μέθοδο κάμψης τεσσάρων σημείων

Στη περίπτωση αυτή, ο αγωγός είναι μακρύτερος από την επιθυμητή διάσταση (11m) κατά 3m. Αντί για ροπή, εφαρμόζεται εγκάρσια δύναμη στα κέντρα των δυο πλευρών, ενώ οι συνοριακές συνθήκες παραμένουν ίδιες με το προηγούμενο μοντέλο μας. Το γινόμενο της εγκάρσιας δύναμης επί το μήκος του μοχλοβραχίονα, δηλαδή της επέκτασης που σχεδιάσαμε σε κάθε πλευρά του αγωγού, δημιουργεί μία ροπή. Όσο μεγαλύτερος είναι μοχλοβραχίονας τόσο μικρότερη είναι και η απαιτούμενη εγκάρσια δύναμη για την επιβολή δεδομένης ροπής. Το μήκος του αγωγού δεν θα μπορούσε να είναι πολύ μεγάλο γιατί αυτό θα επέφερε και ανάλογη αύξηση του μήκους της πειραματικής διάταξης που θα εξετάσουμε.

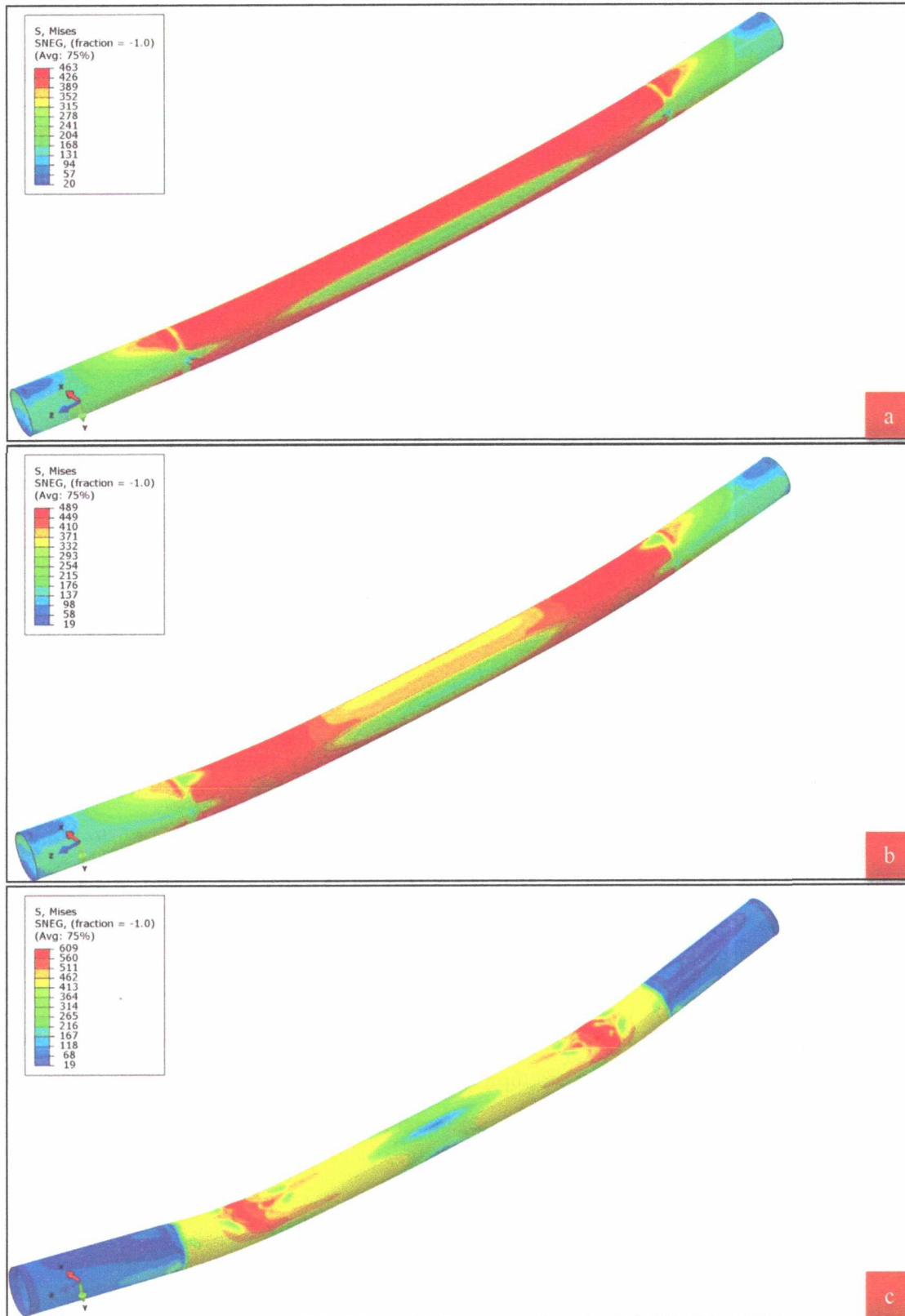


Εικόνα 26: Σχηματική απεικόνιση μεθόδου *four-Point Bending*.

### 7.5 Αποτελέσματα συνδυασμένης φόρτισης *four-point bending*.

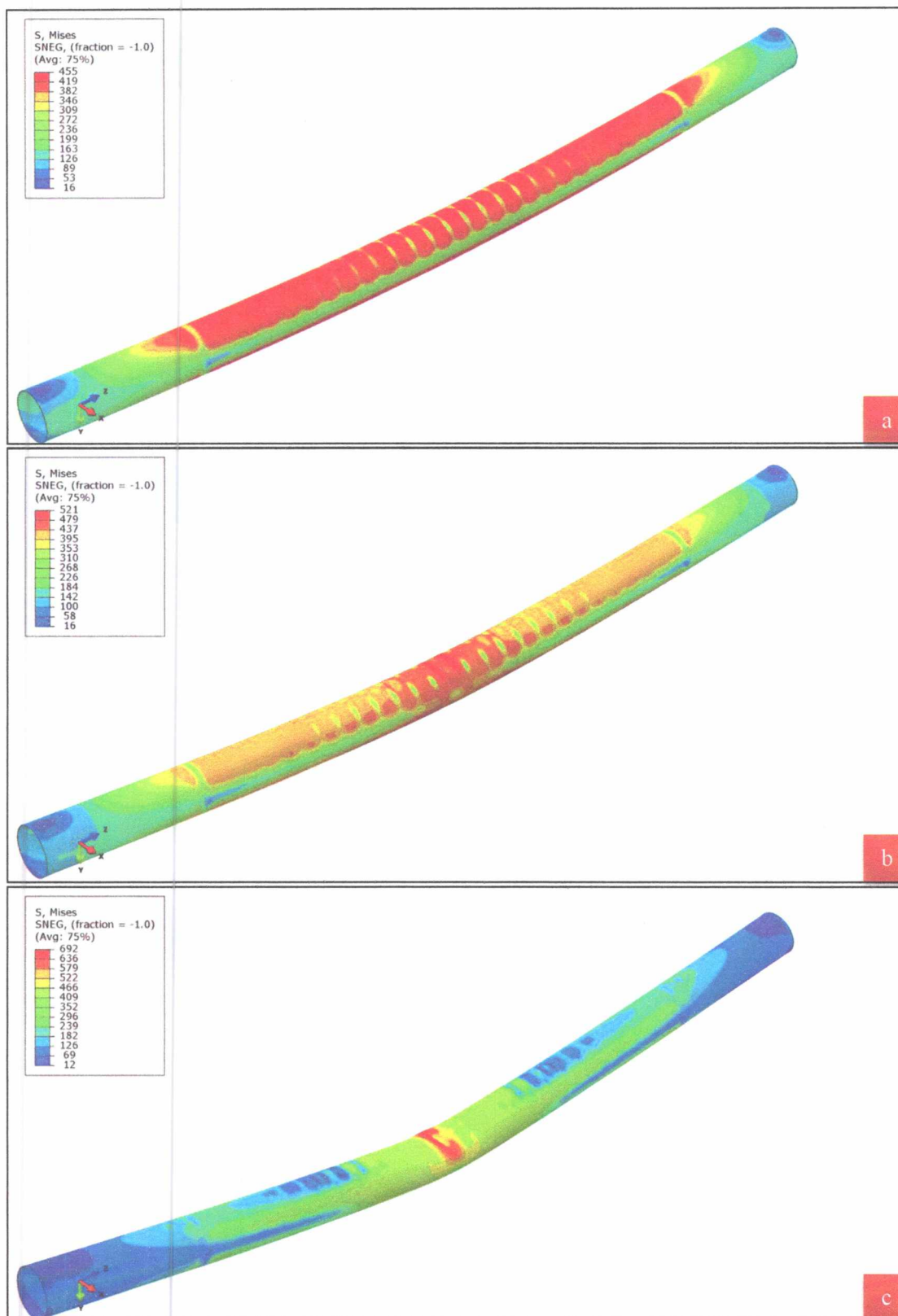
Η συγκεκριμένη παράγραφος περιλαμβάνει αντιπροσωπευτικά γραφήματα της εντατικής κατάστασης σωλήνα σε φόρτιση σε διάφορα στάδια της καταπόνησης. Συγκεκριμένα, μπορούμε να παρατηρήσουμε την πλαστικοποίηση του μεγαλύτερου τμήματος του αγωγού, ή οποία ακολουθείται από συγκέντρωση των τάσεων και παραμορφώσεων στο κεντρικό τμήμα του σωλήνα, ενώ η αστοχία του σωλήνα επέρχεται με την μορφή του τοπικού λυγισμού.

Παρουσιάζονται αποτελέσματα για χαλύβδινο αγωγό 36in (Εικόνες 27, 28 και 29) και 32in (Εικόνα 30). Παρατηρούμε πως στο μοντέλο χωρίς ατέλεια ρυτιδώσεων ο λυγισμός επέρχεται σε δύο σημεία εν αντιθέσει με τα υπόλοιπα μοντέλα, που έχουν αρχική ατέλεια ρυτιδώσεων.



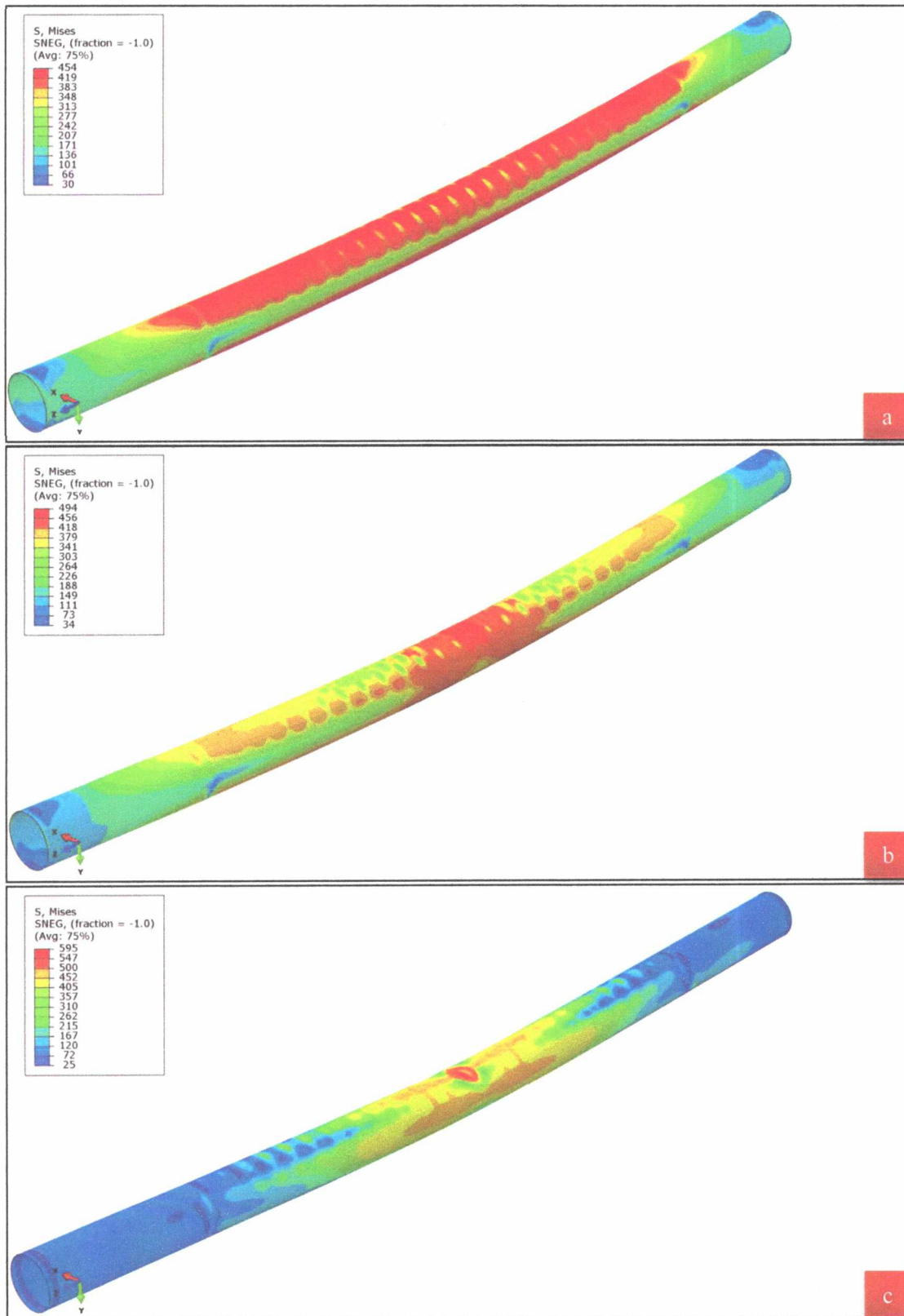
Εικόνα 27: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε σωλήνα διαμέτρου 36ίν, αρχικής οβαλότητας 0.3% υπό συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης και κάμψης με την μέθοδο four-point bending. (a) Στάδιο της πλαστικοποίησης του μεγαλύτερου τμήματός του. (b) Στάδιο της συγκέντρωσης των τάσεων σε δύο τμήματα κοντά στις στηρίξεις του. (c) Στάδιο του τοπικού λυγισμού στα δύο τμήματα κοντά στις στηρίξεις του.



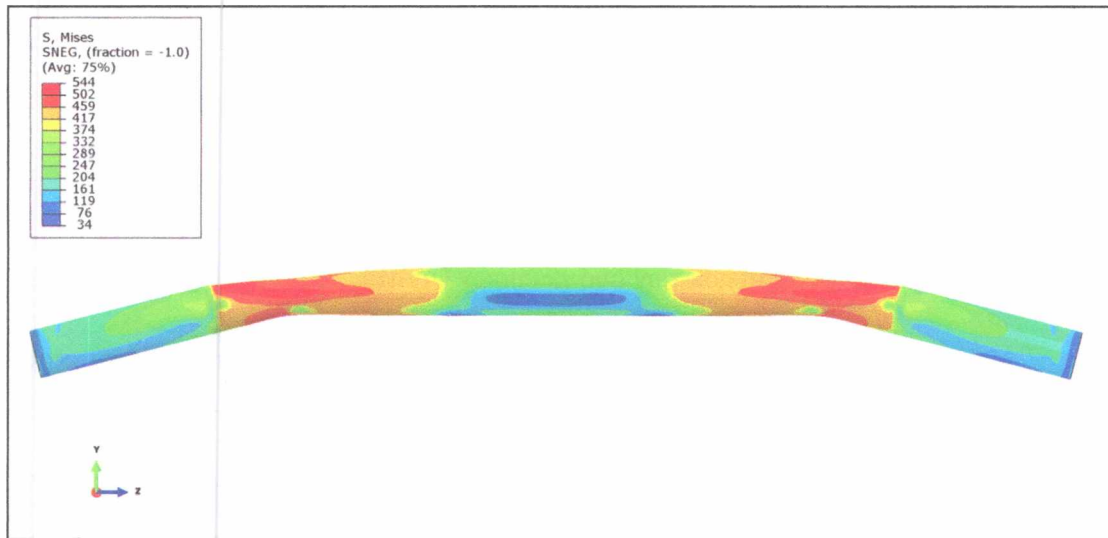


Εικόνα 28: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε σωλήνα διαμέτρου 36in, αρχικής οβαλότητας 0.3% και μεγέθους ρυτιδώσεων  $W=0.7$ , υπό συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης μεγέθους 3 MPa και κάμψης με την μέθοδο four-point bending. (a) Στάδιο της πλαστικοποίησης του μεγαλύτερου μέρους του. (b) Στάδιο της συγκέντρωσης των τάσεων στο κεντρικό τμήμα του και ιδιαίτερα ανάμεσα στις πτυχώσεις. (c) Τοπικός λογισμός στο κεντρικό τμήμα του σωλήνα.





Εικόνα 29: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε σωλήνα διαμέτρου 36in, αρχικής οβαλότητας 0.3% και μεγέθους ρυτιδώσεων  $W=0.7$ , υπό συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης μεγέθους 6.5 MPa και κάμψης με την μέθοδο four-point bending. (a) Στάδιο της πλαστικοποίησης του μεγαλύτερου τμήματός του. (b) Στάδιο της συγκέντρωσης των τάσεων στο κεντρικό τμήμα του. (c) Τοπικός λυγισμός στο κεντρικό τμήμα του σωλήνα.



Εικόνα 30: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε σωλήνα διαμέτρου 32in, αρχικής οβαλότητας 0.3% υπό συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης και κάμψης με την μέθοδο four-point bending. Ο αγωγός βρίσκεται στο στάδιο του λυγισμού στα δύο τμήματα κοντά στις στηρίξεις του.

## 7.6 Αριθμητικά αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της μελέτης του αγωγού σε καμπτικά φορτία με τη μέθοδο four-point bending παρουσιάζονται μέσω κατάλληλων διαγραμμάτων. Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν είναι οι εξής:

Πίνακας 3: Περιπτώσεις εξεταζόμενων σωλήνων σε συνδυασμένη καταπόνηση.

$D_{ext}$ (in)	in.ovality%	wrinkles(w)
36	0.3	0.7
36	0.3	0.0
36	0.1	0.0
32	0.3	0.0

Σε κάθε περίπτωση παρουσιάζονται δύο είδη διαγραμμάτων, ένα που δείχνει την συμπεριφορά της καμπυλότητας, όπως αυτή ορίστηκε στο κεφάλαιο της καθαρής κάμψης, σε σχέση με το επιβαλλόμενο φορτίο και ένα δεύτερο που στην θέση της καμπυλότητας βρίσκεται η απαιτούμενη διάμετρος του δοχείου πίεσης. Ο αγωγός θα τοποθετείται στο δοχείο πίεσης αλλά οι υδραυλικοί βραχίονες που ασκούν την εγκάρσια δύναμη στα άκρα θα βρίσκονται έξω από το δοχείο και μόνο το πιστόνι θα έχει δυνατότητα να εισέρχεται στο εσωτερικό. Επομένως, η απαιτούμενη εσωτερική διάμετρος του κελύφους για τις δεδομένες πειραματικές δοκιμές δίνεται από την σχέση:

$$D_{in}^{shell} = D_{ext}^{pipe} + U_{mid} + U_{end} \quad (7.1)$$

$D_{in}^{shell}$  = εσωτερική διάμετρος δοχείου πίεσης (mm)

$D_{ext}^{pipe}$  = εξωτερική διάμετρος πειραματικού αγωγού (mm)

$U_{mid}$  = μέγιστη μετατόπιση κεντρικού τμήματος αγωγού (mm)

$U_{end}$  = μέσος όρος μετατοπίσεων των δύο πλευρών (mm)

Αναφορικά με την εξωτερική πίεση, αυτή επιβάλλεται στην αρχή κάθε μελέτης και παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια επιβολής της κάμψης. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει το ποσοστό των οριακών τιμών  $P_{cr}$ ,  $P_y$ ,  $\max F.E.A.$  που αντιπροσωπεύουν διάφορες τιμές πιέσεων που δοκιμάστηκαν.

όπου,

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

$$P_y = 2S \left(\frac{t}{D}\right)$$

$\max F.E.A.$  = φορτίο αστοχίας του σωλήνα κατά την μέθοδο ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (Finite Elements Analysis)

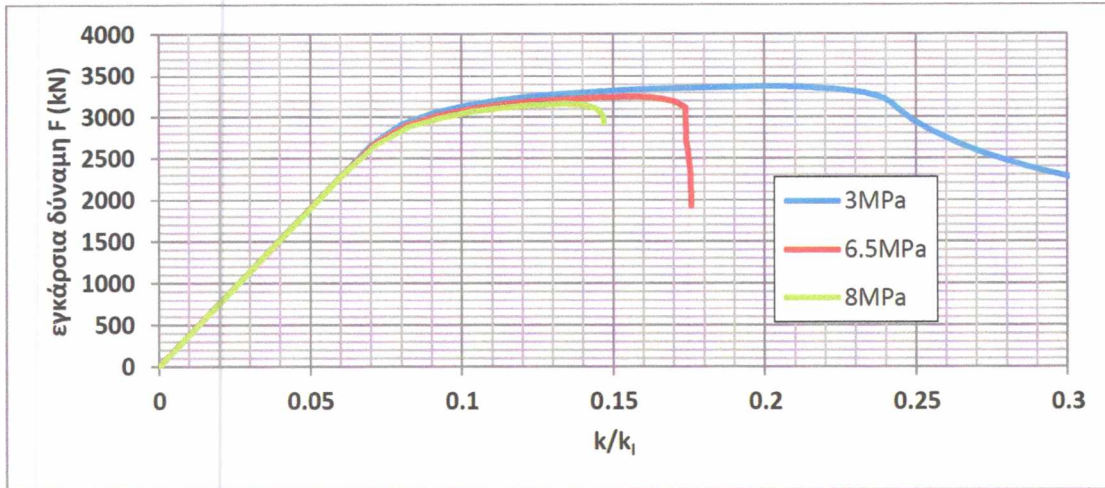
*Πίνακας 4: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης σωλήνων σε συνδυασμένη καταπόνηση συγκριτικά με τα μεγέθη  $P_{cr}$  και  $P_y$ .*

$D_{ext}$ (in)	pressure (MPa)	$P_{cr}$ (MPa)	$P_y$ (MPa)	$\max FEA$ (MPa)
36	3	0.193	0.102	0.177 <sup>1</sup>
36	5	0.322	0.169	0.319 <sup>1</sup> 0.339 <sup>2</sup>
36	6,5	0.419	0.220	0.384 <sup>1</sup>
36	7	0.451	0.237	0.446 <sup>1</sup>
36	8	0.515	0.271	0.473 <sup>1</sup> 0.542 <sup>2</sup>
36	10	0.644	0.339	0.638 <sup>1</sup>
32	15	0.248	0.324	-
32	25	0.413	0.540	-

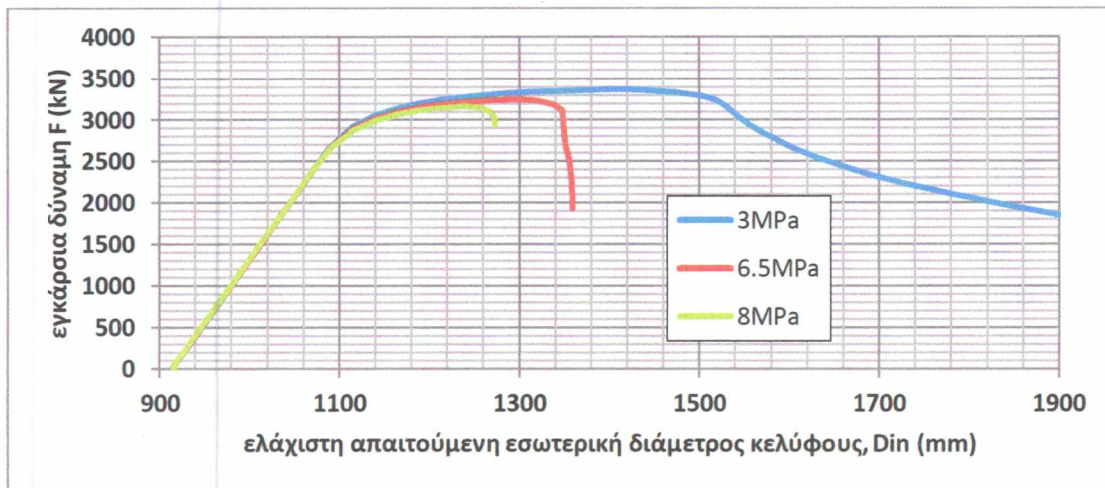
<sup>1</sup> : ovality=0.3%

<sup>2</sup> : ovality=0.1%

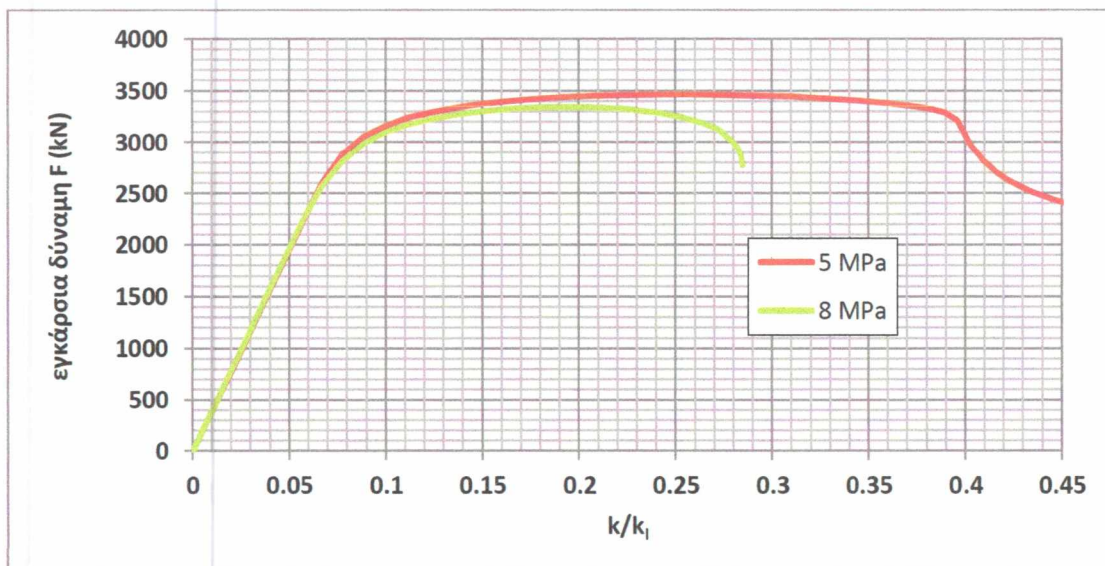




Γράφημα 17: Μεταβολή της καμπυλότητας σε σχέση με την επιβαλλόμενη εγκάρσια δύναμη σε αγωγό διαμέτρου 36in, με μέγεθος ατέλειας ρυτιδώσεων  $W=0.7$  και αρχικής οβαλότητας 0.3%.

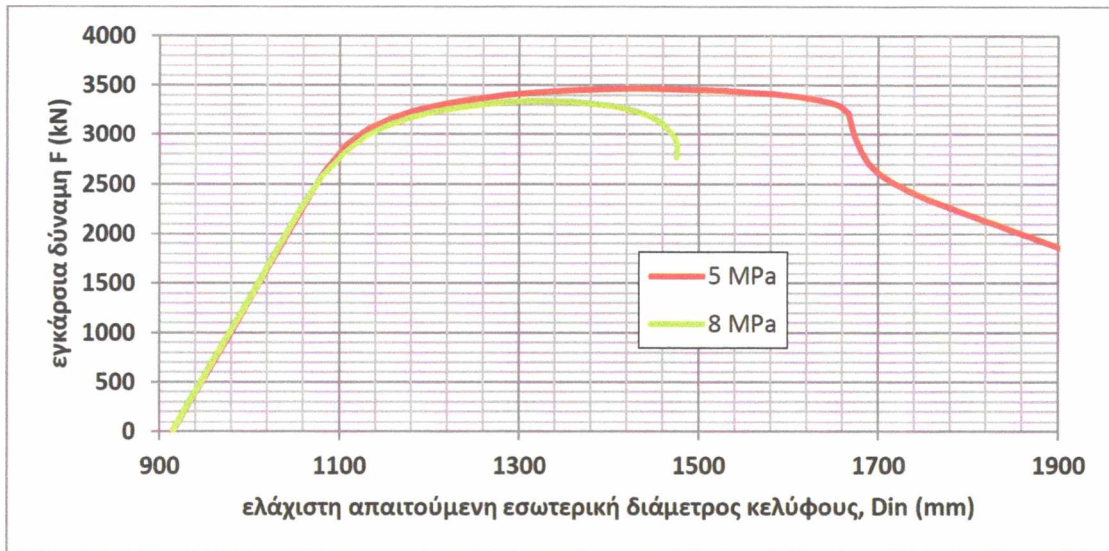


Γράφημα 18: Μεταβολή της ελάχιστης απαιτούμενης εσωτερικής διαμέτρου του κελύφους της πειραματικής διάταξης σε σχέση με την επιβαλλόμενη εγκάρσια δύναμη σε αγωγό διαμέτρου 36in, με μέγεθος ατέλειας ρυτιδώσεων  $W=0.7$  και αρχικής οβαλότητας 0.3%.

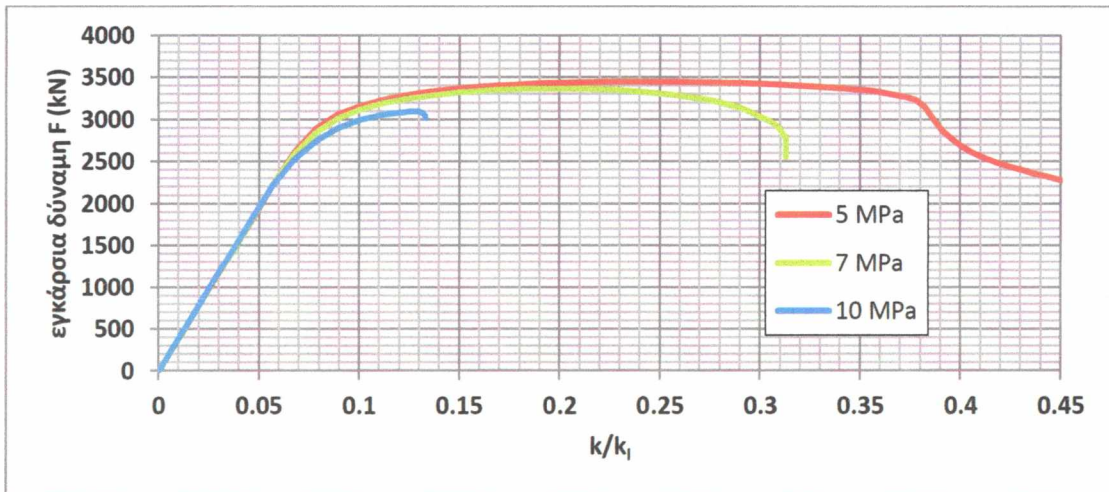


Γράφημα 19: Μεταβολή της καμπυλότητας σε σχέση με την επιβαλλόμενη εγκάρσια δύναμη σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.1%.

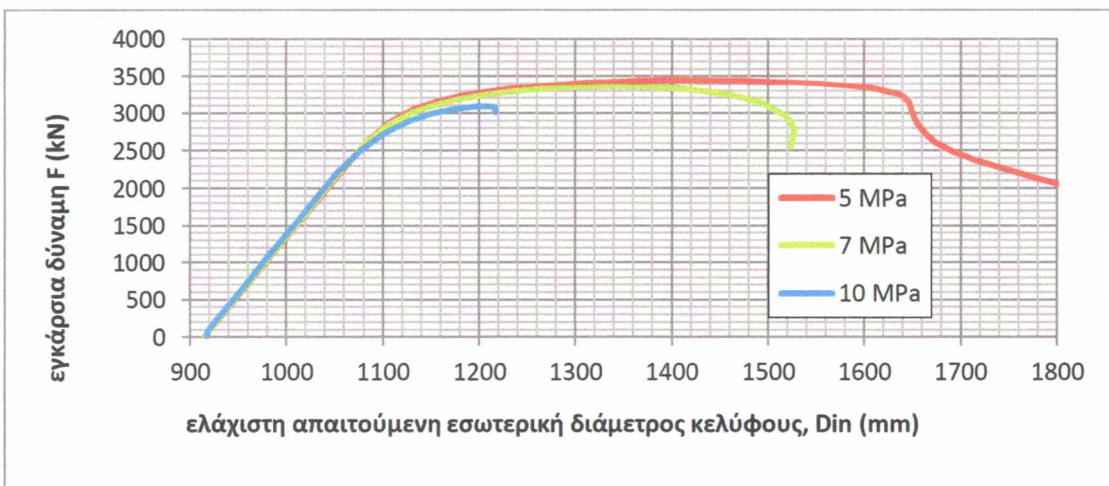




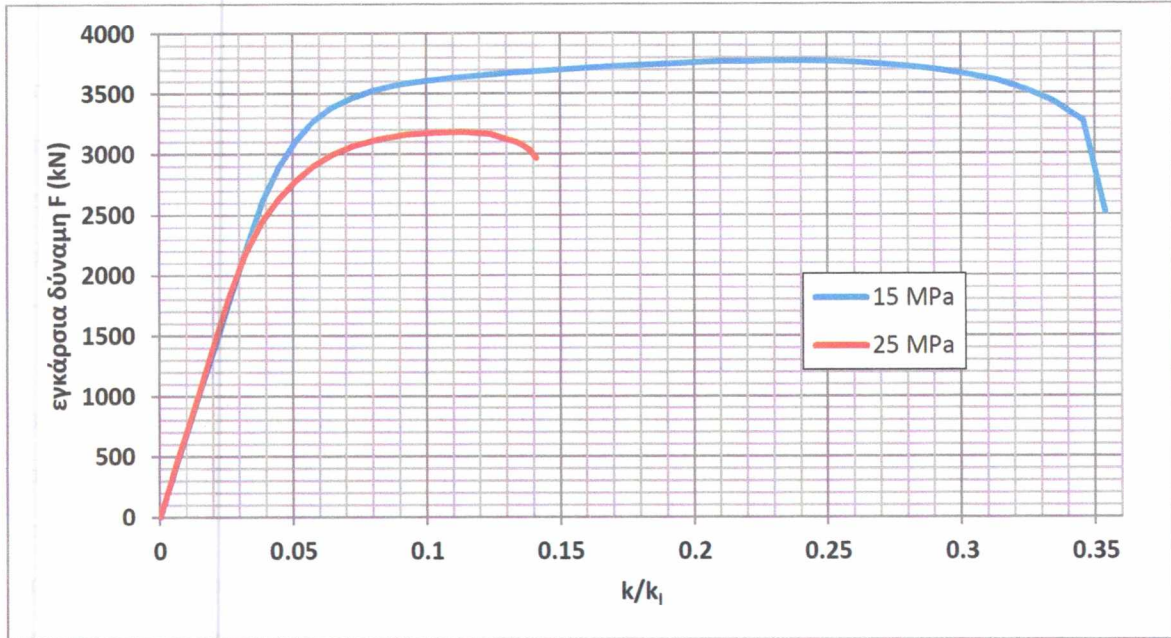
Γράφημα 19: Μεταβολή της ελάχιστης απαιτούμενης εσωτερικής διαμέτρου του κελύφους της πειραματικής διάταξης σε σχέση με την επιβαλλόμενη εγκάρσια δύναμη σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.1%.



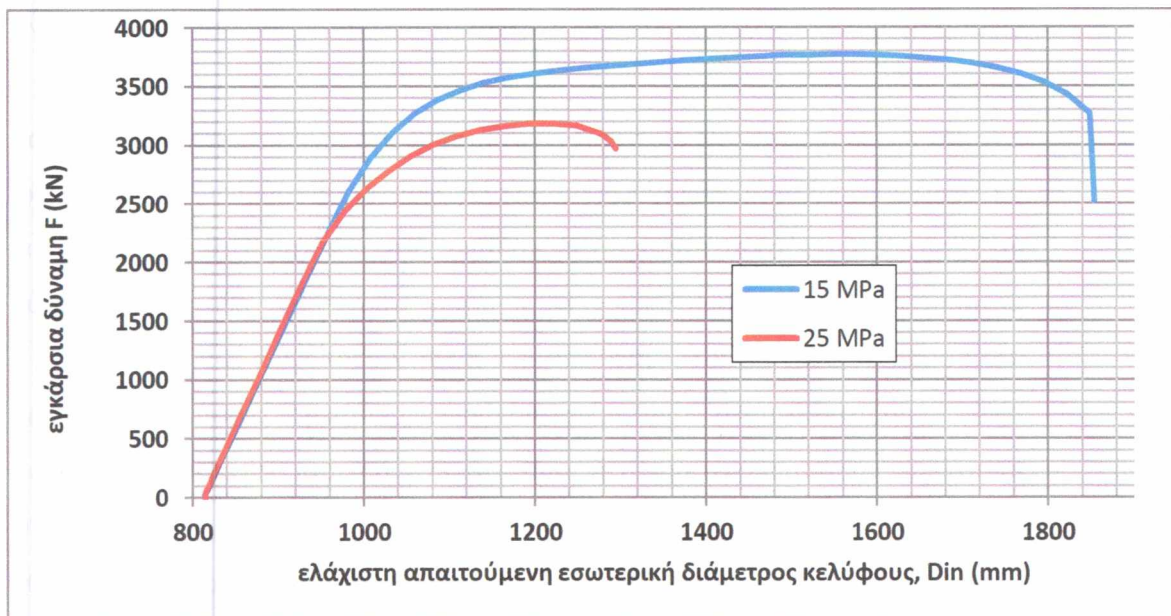
Γράφημα 20: Μεταβολή της καμπλότητας σε σχέση με την επιβαλλόμενη εγκάρσια δύναμη σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.3%.



Γράφημα 21: Μεταβολή της ελάχιστης απαιτούμενης εσωτερικής διαμέτρου του κελύφους της πειραματικής διάταξης σε σχέση με την επιβαλλόμενη εγκάρσια δύναμη σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.3%.



Γράφημα 22: Μεταβολή της καμπυλότητας σε σχέση με την επιβαλλόμενη εγκάρσια δύναμη σε αγωγό διαμέτρου 32in και αρχικής οβαλότητας 0.3%.



Γράφημα 23: Μεταβολή της ελάχιστης απαιτούμενης εσωτερικής διαμέτρου του κελύφους της πειραματικής διάταξης σε σχέση με την επιβαλλόμενη εγκάρσια δύναμη σε αγωγό διαμέτρου 32in και αρχικής οβαλότητας 0.3%.



## 7.7 Βασικά συμπεράσματα

1. Παρατηρώντας τα διαγράμματα των αριθμητικών αποτελεσμάτων, η ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρος κελύφους για την διεξαγωγή των πειραμάτων στο δοχείο πίεσης είναι περίπου 1800mm. Αξίζει να σημειωθεί πως όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της συγκεκριμένης διαμέτρου τόσο μεγαλύτερες θα είναι και οι τάσεις που αναπτύσσονται κατά το πάχος του δοχείου πίεσης για την ίδια τιμή επιβαλλόμενης εσωτερικής πίεσης.
2. Η εσωτερική διάμετρος του δοχείου θέτει περιορισμούς σε πειραματικές διατάξεις κατά τις οποίες η επιβαλλόμενη εξωτερική πίεση είναι αρκετά χαμηλή σε σχέση με το οριακό φορτίο του εκάστοτε σωλήνα. Στις περιπτώσεις αυτές προηγείται σημαντική κάμψη πριν τον λυγισμό του αγωγού και υπάρχει πιθανότητα να έχουμε επαφή του αγωγού με το τοίχωμα του δοχείου πριν το λυγισμό. Παρόλα αυτά, η διάμετρος των 1.8m φαίνεται να είναι ικανοποιητική ακόμα και για πειράματα υπό αυτές τις συνθήκες για ένα μεγάλο εύρος σωλήνων.
3. Σκοπός της πειραματικής διάταξης είναι η συνδυασμένη καταπόνηση αγωγών σε υψηλή εξωτερική πίεση και καμπτικά φορτία. Επομένως η περαιτέρω αύξηση της διαμέτρου του αγωγού κρίθηκε άσκοπη καθώς θα επέτρεπε τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις των αγωγών αλλά θα έθετε αυστηρούς περιορισμούς στην μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση λειτουργίας του δοχείου.
4. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων κάμψης τεσσάρων σημείων μπορούμε να συμπεράνουμε την απαιτούμενη δύναμη για την κάμψη των αγωγών. Συγκεκριμένα, αν υποθέσουμε πως ένας αγωγός με γεωμετρικά στοιχεία  $D_{ext} = 36in, D/t = 30.48$  και 3m βραχίονα επιβολής κάμψης σε κάθε πλευρά είναι αντιπροσωπευτικός για την πειραματική μας διάταξη, ο κάθε υδραυλικός βραχίονας πρέπει να είναι σε θέση να ασκεί στον σωλήνα 4000kN εγκάρσιας δύναμης.

## 8. Διαστασιολόγηση Πάχους Δοχείου Πίεσης για Μηχανικές Δοκιμές

Το Κεφάλαιο 8 αφορά την διαστασιολόγηση του δοχείου πίεσης. Αναλυτικότερα, στην παράγραφο 8.1 περιγράφονται οι περιπτώσεις κελυφών υπό εξέταση και στην 8.2 διαστασιολογείται το πάχος του δοχείου με βάση της Ευρωπαϊκή προδιαγραφή EN 13445-3:2002. Οι παράγραφοι 8.3 έως 8.6 αναλύουν τις μελέτες με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για όλες τις περιπτώσεις της παραγράφου 8.1, ενώ στην παράγραφο 8.7 διαστασιολογούνται τα ημισφαιρικά άκρα του δοχείου πίεσης.

### 8.1 Εισαγωγή

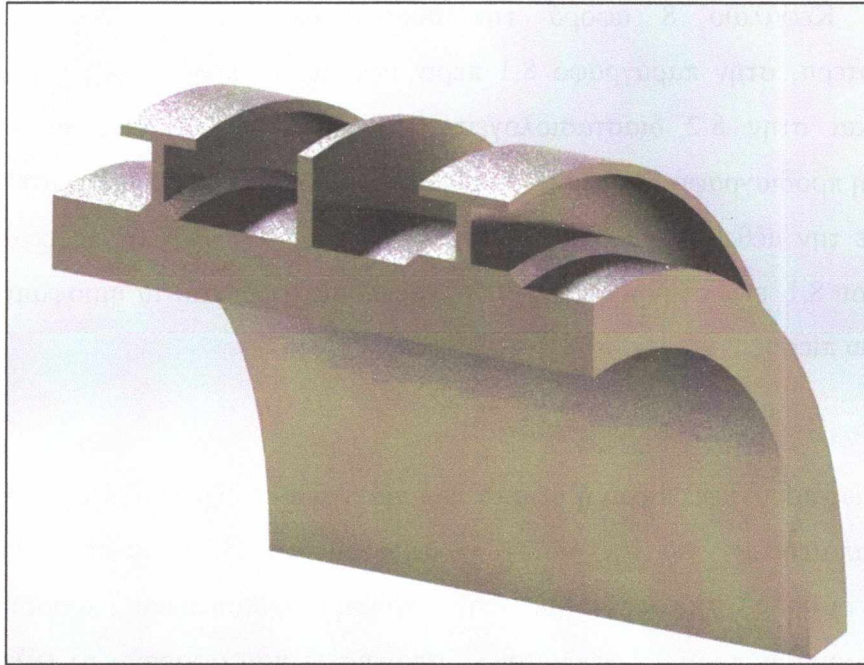
Όπως προαναφέρθηκε, η μελέτη που προηγήθηκε είχε στόχο τον ορισμό των βασικών απαιτήσεων για την διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών σε σωλήνες υπό συνθήκες υψηλής πίεσης. Με την χρήση αριθμητικών προσομοιώσεων ποσοτικοποιήσαμε τόσο τις γεωμετρικές απαιτήσεις που αφορούν το κέλυφος του δοχείου πίεσης όσο και τα απαραίτητα φορτία και πιέσεις που πρέπει οι υδραυλικές πρέσες και οι αντλίες να παράγουν, αντίστοιχα. Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την διαστασιολόγηση του πάχους του κελύφους του δοχείου πίεσης εξετάζοντας διάφορες περιπτώσεις ενίσχυσης. Συνοπτικά, μελετώνται οι ακόλουθες γεωμετρίες δοχείων (Εικόνα 31):

1. Δοχείο χωρίς νευρώσεις
2. Δοχείο με περιμετρικές νευρώσεις τύπου  $I$
3. Δοχείο με περιμετρικές νευρώσεις τύπου  $T$
4. Δοχείο με περιμετρικές νευρώσεις τύπου  $H$
5. Δοχείο διπλού τοιχώματος με χρήση ενδιάμεσου κονιάματος (μέθοδος Grouting)

Στη περίπτωση 1 θεωρούμε πως το δοχείο πίεσης αποτελείται μόνο από ένα κυλινδρικό κέλυφος, στις περιπτώσεις 2,3,4 εξετάζουμε την επίδραση συγκολλητών νευρώσεων στην αντοχή του κελύφους ενώ στην τελευταία περίπτωση, 5, αναλύεται η χρησιμοποίηση διπλού μεταλλικού κελύφους με ενδιάμεσο συνδετικό υλικό (κονίαμα). Αναφορικά με τους τρόπους ανάλυσης, σε όλες τις αναλύσεις



χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα Abaqus ενώ στην περίπτωση 1 εξετάζεται το πρόβλημα και με τη βοήθεια της Ευρωπαϊκής προδιαγραφής EN 13445-3:2002 “Unfired pressure vessels. Part 3-Design”.



Εικόνα 31: Σχηματική απεικόνιση τομής διαφόρων περιπτώσεων νευρώσεων κελύφους.

## 8.2 Υπολογισμός πάχους κελύφους EN 13445-3

Το κεφάλαιο 7 της συγκεκριμένης προδιαγραφής παρέχει στον χρήστη σχέσεις διαστασιολόγησης πάχους κυλινδρικών, σφαιρικών και κωνικών κελυφών τα οποία υπόκεινται σε εσωτερική πίεση. Η τιμή του πάχους που προτείνεται είναι η ελάχιστη απαιτούμενη και θα πρέπει να αυξηθεί σε περιοχές που έχουμε συγκέντρωση τάσεων λόγω επιπρόσθετων φορτίων ή ανοιγμάτων.

Για κυλινδρικά δοχεία πίεσης το πάχος  $e$  μπορεί να δοθεί με μία από τις επόμενες σχέσεις:

$$e = \frac{P \cdot D_i}{2f \cdot z - P} \quad (8.1)$$

ή

$$e = \frac{P \cdot D_e}{2f \cdot z + P} \quad (8.2)$$

Ενώ για ημισφαιρικά πλάγια καλύμματα:

$$e = \frac{P \cdot D_i}{4f \cdot z - P} \quad (8.3)$$

ή

$$e = \frac{P \cdot D_e}{4f \cdot z + P} \quad (8.4)$$

όπου,

$D_e$  = εξωτερική διάμετρος δοχείου πίεσης (mm)

$D_i$  = εσωτερική διάμετρος δοχείου πίεσης (mm)

$z$  = συντελεστής συγκόλλησης ανάλογα με τον έλεγχο των συγκολλήσεων

$P$  = εσωτερική πίεση (MPa)

$f$  = ονομαστική τάση σχεδιασμού (MPa)

$e$  = πάχος δοχείου πίεσης (mm)

Οι τιμές της παραμέτρου  $z$  δίνονται από τον Πίνακα 5. Λεπτομερής ανάλυση των ομάδων ελέγχων “testing group” των συγκολλήσεων υπάρχει στην προδιαγραφή EN 13445-5:2002, κεφάλαιο 6.

*Πίνακας 5: Συντελεστές συγκόλλησης σε σχέση με τον βαθμό ελέγχου συγκολλήσεων σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 13445-5:2002.*

$z$	1	0.85	0.7
Testing_Group	1,2	3	4

Αναφορικά με την τιμή της μεταβλητής  $f$  (ονομαστική τάση σχεδιασμού), χρησιμοποιούμε τον ακόλουθο πίνακα αναλόγως την κατάσταση λειτουργίας που επιθυμούμε να εξετάσουμε και το υλικό που χρησιμοποιούμε.

	Κανονική λειτουργία <sup>a 1b2</sup>	Λειτουργία δοκιμών και έκτακτων καταστάσεων
<b>Χάλυβες εκτός των ωστενιτικών<sup>c3</sup></b> $A < 30\%$	$f_d = \min\left(\frac{R_{p0.2/t}}{1.5}; \frac{R_{m/20}}{2.4}\right)$	$f_{test} = \left(\frac{R_{p0.2/t_{test}}}{1.05}\right)$
<b>Ωστενιτικοί χάλυβες<sup>c</sup>,</b> $30\% < A \leq 35\%$	$f_d = \left(\frac{R_{p1.0/t}}{1.5}\right)$	$f_{test} = \left(\frac{R_{p1.0/t_{test}}}{1.05}\right)$
<b>Ωστενιτικοί χάλυβες<sup>c</sup>, <math>A &gt; 35\%</math></b>	$f_d = \max\left[\left(\frac{R_{p1.0/t}}{1.5}\right); \min\left(\frac{R_{p1.0/t}}{1.2}; \frac{R_{m/t}}{3}\right)\right]$	$f_d = \max\left(\frac{R_{p1.0/t_{test}}}{1.05}; \frac{R_{m/t_{test}}}{2}\right)$
<b>χυτοχάλυβες</b>	$f_d = \min\left(\frac{R_{p0.2/t}}{1.9}; \frac{R_{m/20}}{3}\right)$	$f_{test} = \min\left(\frac{R_{p0.2/t_{test}}}{1.33}\right)$

όπου,

$R_{eH}$  = όριο διαρροής

$R_m$  = όριο αντοχής σε εφελκυσμό

$R_{m/t}$  = όριο αντοχής σε εφελκυσμό στη θερμοκρασία T

$R_{p0.2}$  = τάση για πλαστική παραμόρφωση 0.2%

$R_{p0.2/t}$  = τάση για πλαστική παραμόρφωση 0.2% σε θερμοκρασία T

$R_{p0.1}$  = τάση για πλαστική παραμόρφωση 0.1%

$R_{p0.1/t}$  = τάση για πλαστική παραμόρφωση 0.1% σε θερμοκρασία T

Με την βοήθεια κατάλληλου υπολογιστικού φύλλου Excel, ο χρήστης επιλέγει την εξωτερική διάμετρο του κελύφους, την εσωτερική πίεση λειτουργίας, τον συντελεστή συγκολλήσεων  $z$  και το είδος χάλυβα που επιθυμεί, ενώ το πρόγραμμα υπολογίζει το απαιτούμενο πάχος. Στην προκειμένη περίπτωση, μας ενδιαφέρουν τα ακόλουθα αποτελέσματα και ειδικότερα η περίπτωση του μη-ωστενιτικού χάλυβα.

<sup>1</sup> a: για την κατηγορία ελέγχου συγκολλήσεων 4, η ονομαστική τάση πρέπει να πολλαπλασιαστεί με 0.9

<sup>2</sup> b: το όριο διαρροής  $R_{eH}$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέση του  $R_{p0.2}$

<sup>3</sup> c: ο λεπτομερής ορισμός της επιμήκυνσης A δίνεται στην προδιαγραφή EN 13445-2:2002, κεφάλαιο 4



Πίνακας 6: Αποτελέσματα υπολογισμού πάχους κελύφους σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 13445-3:2002.

$P(MPa)$	$D_{in}(mm)$	<i>testing_group</i>	<i>material</i>	$e(mm)$
60	1800	1 ή 2	Χάλυβας (όχι ωστενιτικός)	343
60	1800	1 ή 2	Ωστενιτικός χάλυβας	200
60	1800	1 ή 2	Χυτοχάλυβας	450

Το υψηλό κόστος των ωστενιτικών χάλυβων καθιστά την επιλογή τους ως υλικό κελύφους πρακτικά ανέφικτη. Οπότε, έγιναν ορισμένες μελέτες με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να εξετάσουμε την κατανομή των τάσεων στο εσωτερικό του κελύφους και να ορίσουμε μόνοι μας τους συντελεστές ασφαλείας, αποφεύγοντας την υπερδιαστασιολόγηση της προδιαγραφής.

### 8.3 Μοντελοποίηση κυλινδρικού κελύφους σε εσωτερική πίεση

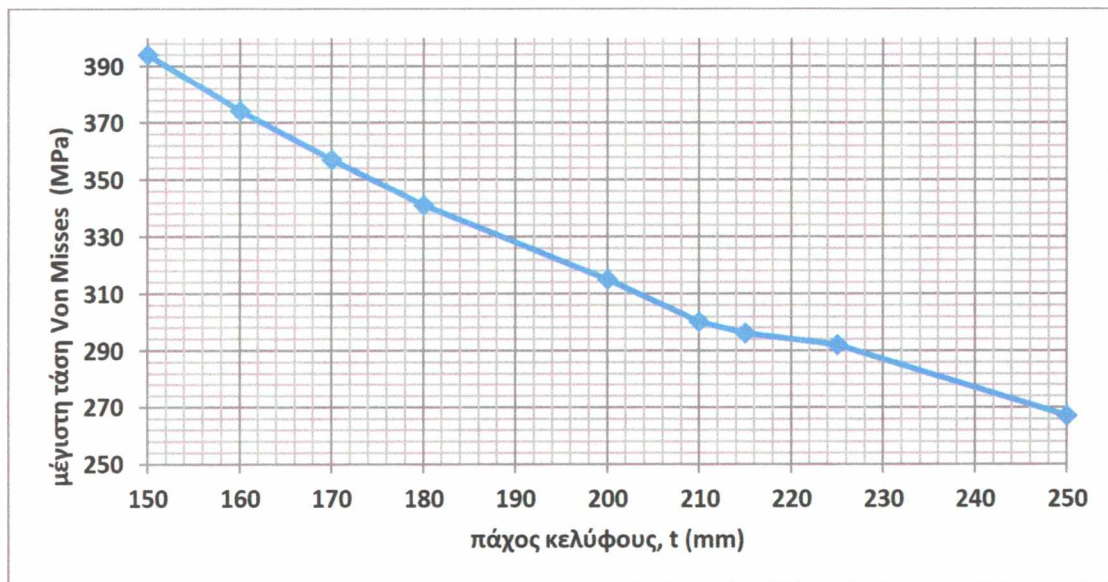
Αρχικά αναλύουμε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων την κατανομή των τάσεων σε μία παρόμοια διάταξη που έχει ήδη κατασκευαστεί και λειτουργεί στον δυτικό Καναδά από την εταιρία C-FER με τα εξής δεδομένα: πάχος κελύφους  $t=152.4mm$ , εσωτερική διάμετρο  $D_{in}=1219mm$  και εσωτερική πίεση  $P=60MPa$ . Δημιουργούμε ένα αξονοσυμμετρικό μοντέλο στο Abaqus με τις ανωτέρω διαστάσεις και επιβαλλόμενη εσωτερική πίεση. Το δοχείο πίεσης παρουσιάζει μέγιστη τάση κατά Von Misses  $S_{max}=291MPa$ . Καταλήξαμε λοιπόν πως τα  $300MPa$  θα μπορούσαν να αποτελέσουν ένα όριο για την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση στο εσωτερικό του σωλήνα και με βάση αυτή την απαίτηση να διαστασιολογήσουμε το πάχος του δοχείου.

Στο μοντέλο του δοχείου πίεσης της εταιρείας C-FER αλλά και στα αριθμητικά μοντέλα που ακολουθούν, χρησιμοποιήθηκαν αξονοσυμμετρικά στοιχεία *CAX4R* μειωμένης ολοκλήρωσης καθώς η γεωμετρία αλλά και η φόρτιση είναι συμμετρική ως προς άξονα που διέρχεται από το κέντρο του δοχείου. Στη γεωμετρία του μοντέλου επιλέξαμε να αναπαραστήσουμε ένα μόνο τμήμα στο κέντρο του κελύφους με σχετικά μεγάλο μήκος ώστε να μείνει η λύση ανεπηρέαστη από τις



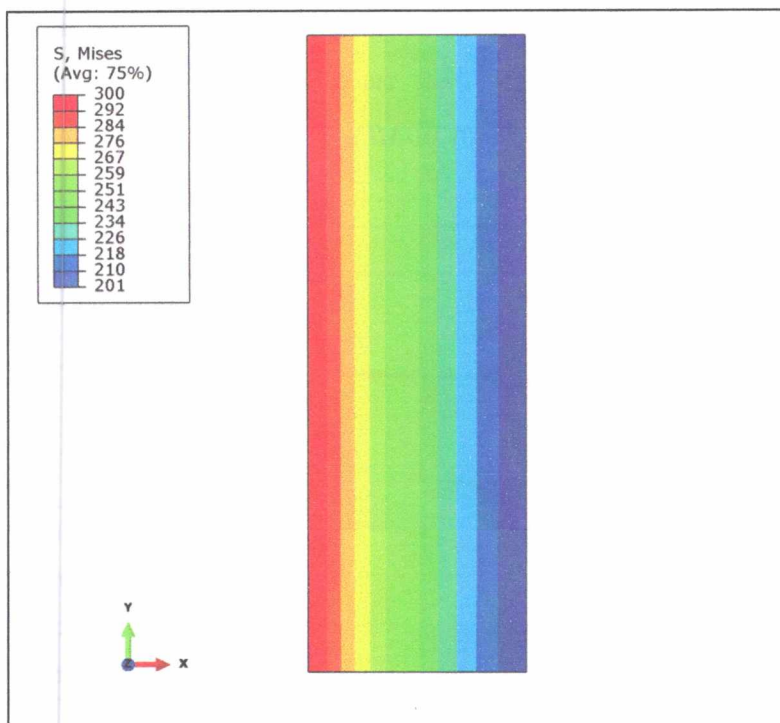
συνοριακές συνθήκες. Το υλικό ορίστηκε με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως στα προηγούμενα κεφάλαια και επιλέχθηκε η επίλυση τύπου Static, General καθώς μας αφορούσε μόνο η ελαστική περιοχή φόρτισης. Η φόρτιση έχει δύο συνιστώσες, μία αυτή της εσωτερικής πίεσης ( $60\text{MPa}$ ) και μία της συνισταμένης διαμήκους δύναμης που ασκεί η πίεση αυτή στα τοιχώματα των άκρων του δοχείου πίεσης. Η δεύτερη ορίζεται στο σημείο αναφοράς στο κέντρο της μίας πλευράς και είναι εφελκυστική. Οι βαθμοί ελευθερίας του σημείου αυτού δεσμεύονται με τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων της ακραίας διατομής του κελύφους με τρόπο όμοιο με τις μελέτες αγωγών των προηγούμενων κεφαλαίων. Τέλος, επιβάλλεται η συνοριακή συνθήκη συμμετρίας στην πλευρά του μοντέλου που δεν ασκούνται φορτία.

Το Γράφημα 24 παρουσιάζει την μέγιστη τάση του μοντέλου σε σχέση με το πάχος του. Σε όλες τις περιπτώσεις, η εσωτερική πίεση είναι ίση με  $60\text{MPa}$  και η εσωτερική διάμετρος είναι  $1800\text{mm}$ .



Γράφημα 24: Μέγιστη τάση κατά Von Mises στο κέλυφος για διάφορες τιμές πάχους.

Στην Εικόνα 32 φαίνεται η κατανομή των τάσεων στο εσωτερικό του κελύφους για πάχος  $t = 210\text{mm}$ . Είναι εμφανές πως η τάση αγγίζει οριακά τα  $300\text{MPa}$ , το όριο δηλαδή που θέσαμε ως μέγιστη επιτρεπόμενη τάση.



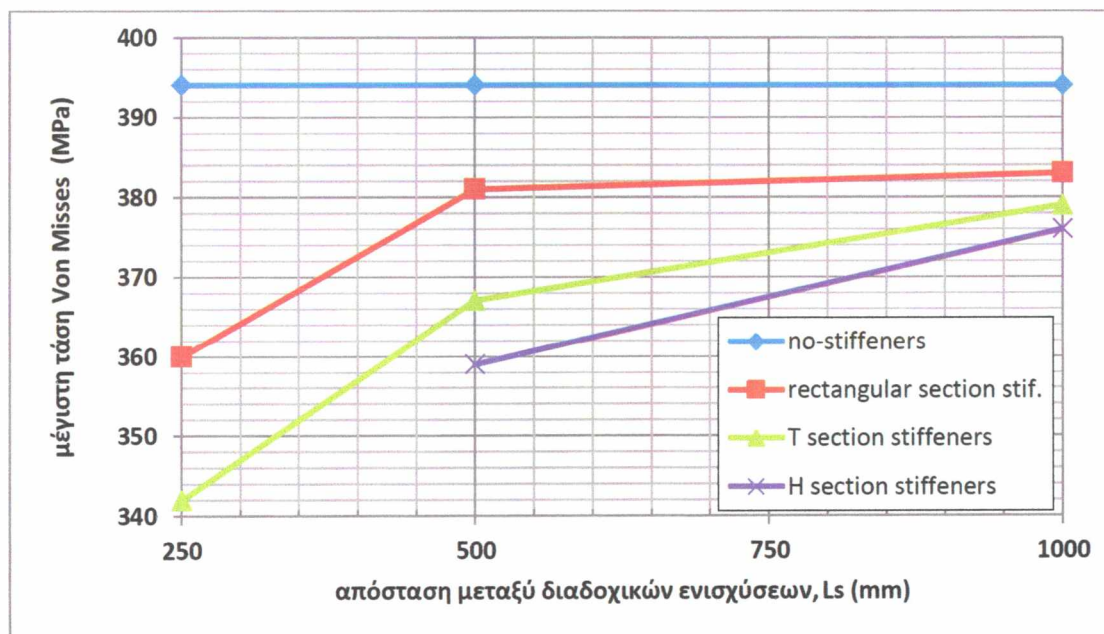
Εικόνα 32: Γραφική απεικόνιση κατανομής τάσεων στον εσωτερικό κυλινδρικού κελύφους υπό εσωτερική πίεση.

#### 8.4 Επιρροή των νευρώσεων στην αντοχή

Στη παρούσα παράγραφο εξετάζουμε την επιρροή των νευρώσεων στις αναπτυσσόμενες τάσεις στο πάχος του κελύφους. Ο λόγος που μας ώθησε να εξετάσουμε την προσθήκη ενισχύσεων στο κέλυφος του δοχείου ήταν να μειωθεί το εξαιρετικά μεγάλο πάχος (210mm) που σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση θα έπρεπε να είχαμε.

Το στοιχείο που άλλαξε κατά τον ορισμό του μοντέλου σε σχέση με αυτό την προηγούμενης μελέτης (χωρίς νευρώσεις) ήταν η γεωμετρία και κατά επέκταση το πλέγμα το οποίο χρειάστηκε να πυκνώσει σε σημεία έντονης ασυνέχειας. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις νευρώσεων, γεωμετρίας:  $I, H, T$ . Η παράμετρος που μας ενδιέφερε δεν ήταν οι γεωμετρικές λεπτομέρειες των νευρώσεων καθώς αυτό μπορεί να αποτελέσει ζητούμενο μετέπειτα σχεδιασμού που θα αφορά αποκλειστικά αυτό το θέμα. Στη παρούσα εργασία εξετάστηκε το θέμα μακροσκοπικά, δηλαδή κατά πόσο η προσθήκη ενισχύσεων μειώνει τα φορτία στο πάχος του υλικού. Η παράμετρος που μεταβάλαμε σε κάθε μελέτη ήταν η απόσταση μεταξύ διαδοχικών ενισχυτικών ελασμάτων.

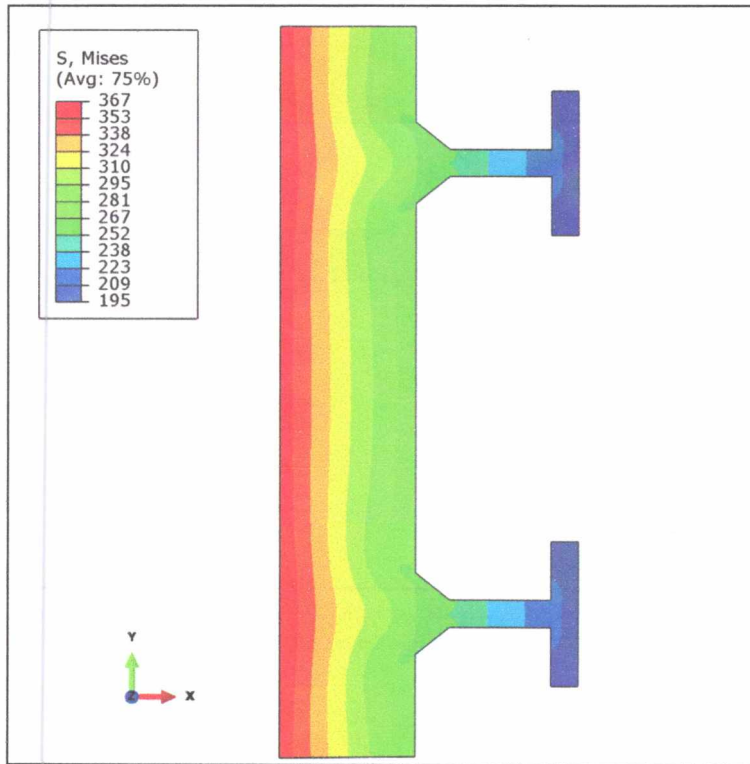
Το Γράφημα 25 παρουσιάζει τα συγκριτικά αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων που εξετάστηκαν. Σε όλες τις αναλύσεις θεωρήσαμε καθαρό πάχος κελύφους  $150\text{mm}$  και εσωτερική πίεση  $60\text{MPa}$ .



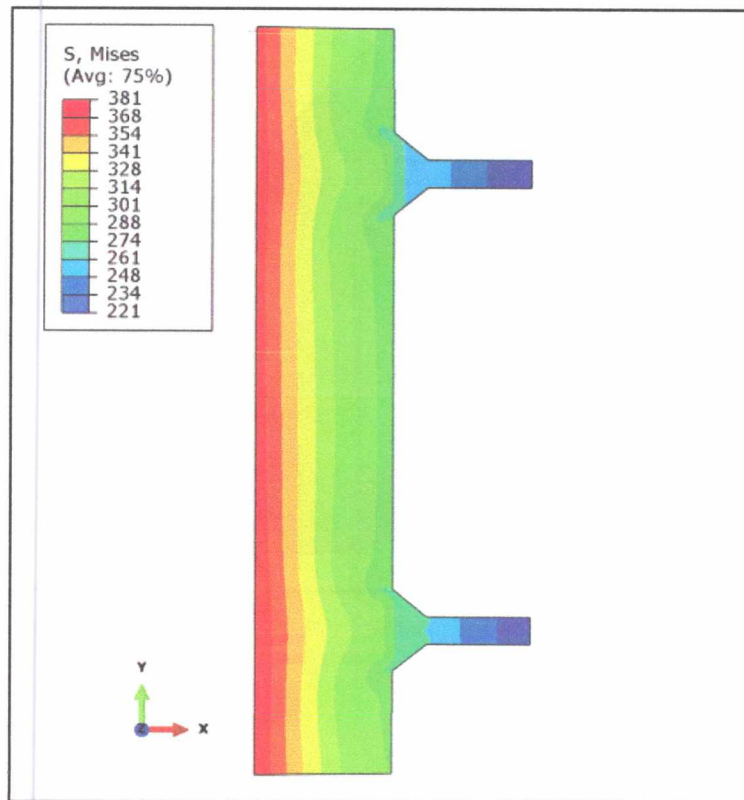
Γράφημα 25: Γραφική αναπαράσταση επιρροής διαφόρων ενισχύσεων στην μέγιστη παρατηρούμενη τάση στο πάχος του κελύφους.

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η κατανομή των τάσεων για τις παραπάνω περιπτώσεις. Σε όλα τα γραφήματα, το μήκος μεταξύ ενισχύσεων είναι  $L_s = 500\text{mm}$ . Επίσης, η Εικόνα 35 αποτελεί μεγέθυνση της περιοχής της συγκόλλησης για νευρώσεις τύπου  $H$ , στο σημείο σύνδεσης με το σώμα του κελύφους. Με την υψηλή πυκνότητα του πλέγματος στο συγκεκριμένο σημείο υπολογίζουμε επικίνδυνα υψηλές τάσεις, πράγμα που καθιστά τον συγκεκριμένο τύπο νευρώσεων ανεπαρκή για την ενίσχυση του δοχείου.

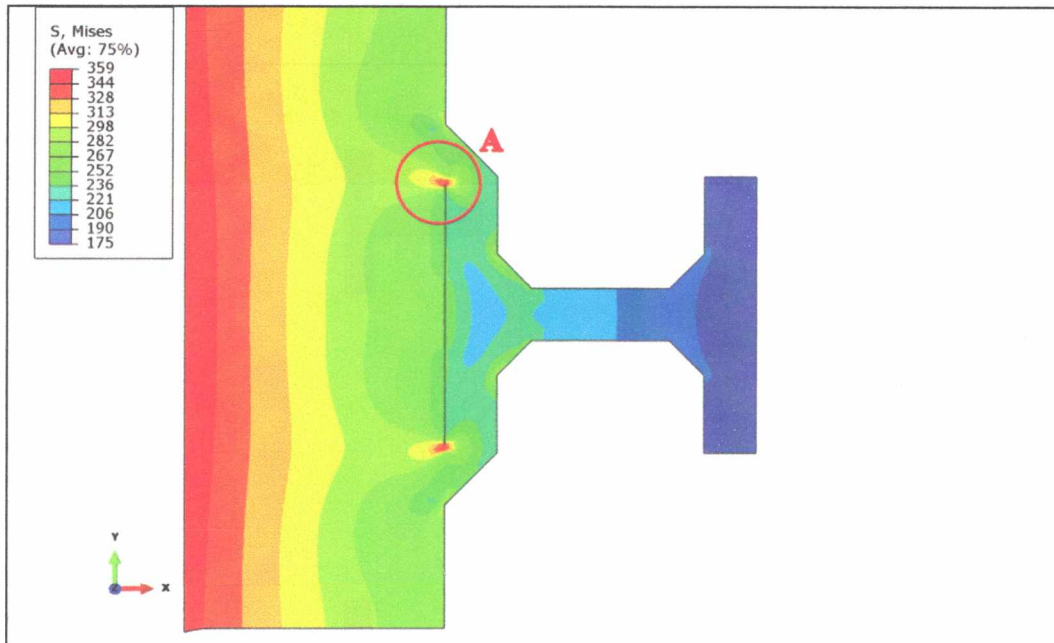




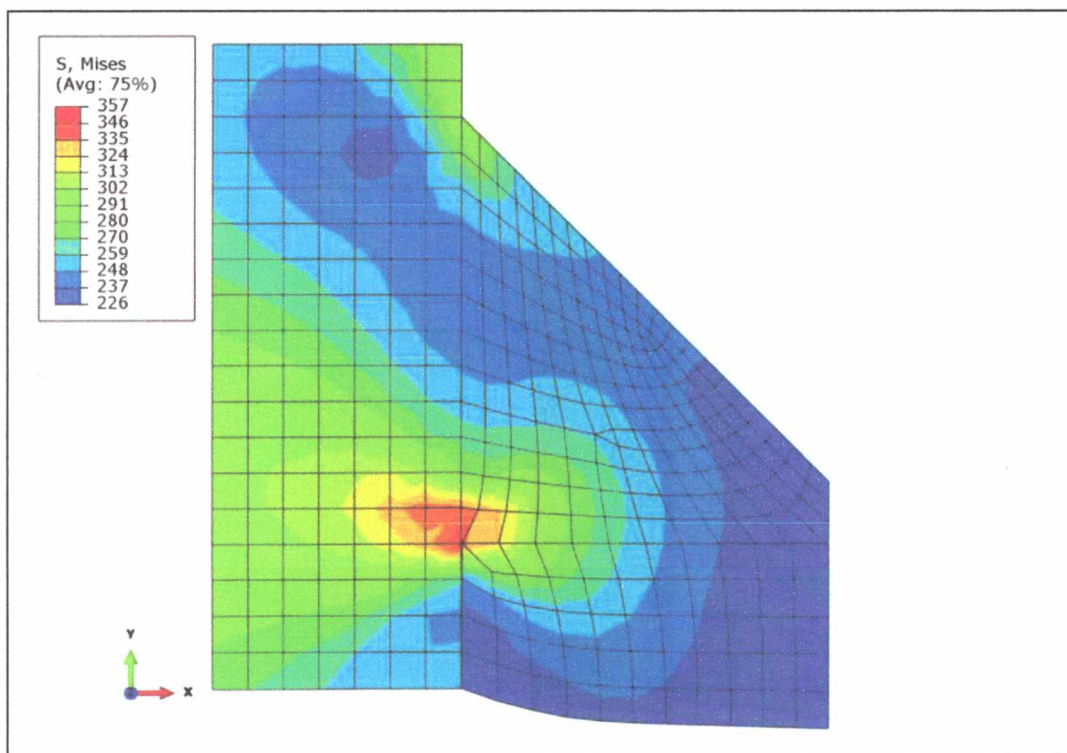
Εικόνα 33: Σχηματική απεικόνιση κατανομής τάσεων σε κέλυφος με ενισχύσεις τύπου T υπό εσωτερική πίεση.



Εικόνα 34: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε κέλυφος με ενισχύσεις τύπου I.



Εικόνα 36: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε κέλυφος με ενισχύσεις τύπου H υπό εσωτερική πίεση.



Εικόνα 35: Σχηματική αναπαράσταση πλέγματος και κατανομής τάσεων της περιοχή (a) της Εικόνας 35.

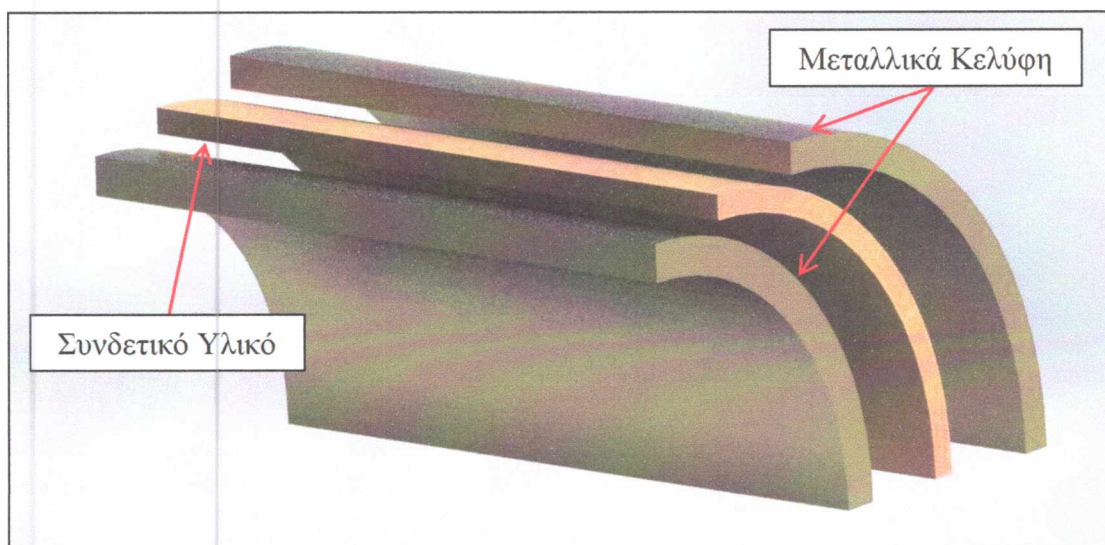
## 8.5 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που ακολουθούν λειτούργησαν αποτρεπτικά στην επιλογή των νευρώσεων ως μέσο ελάττωσης του πάχους του κελύφους του δοχείου πίεσης.

1. Οι ενισχύσεις δεν παίζουν σημαντικό ρόλο στην στιβαρότητα και στην αντοχή της παρούσας κατασκευής υπό τις συγκεκριμένες καταπονήσεις. Οι νευρώσεις θα πρέπει να είναι τοποθετημένες υπερβολικά πυκνά ώστε να υπάρχει αξιοσημείωτο αποτέλεσμα.
2. Στην περίπτωση των νευρώσεων τύπου  $H$  τίθεται σοβαρό θέμα συγκέντρωσης τάσεων στις συγκολλήσεις με το κέλυφος του δοχείου. Οι υψηλές τάσεις μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στα συγκεκριμένα στοιχεία και να οδηγήσουν σε αστοχία.

## 8.6 Δοχείο διπλού τοιχώματος

Αναζητώντας λύση στο πρόβλημα της κατασκευασιμότητας του κελύφους, μελετήθηκε η λύση δοχείου διπλού τοιχώματος (Εικόνα 37). Η γενική αρχή της ιδέας είναι η χρησιμοποίηση δύο ομόκεντρων κελυφών με συνολικό πάχος ίσο με  $210mm$  περίπου. Το κέρδος μας είναι πως τα δύο κελύφη είναι λεπτότερα από αυτό που εξετάσαμε προηγουμένως και κατασκευάζονται ευκολότερα σε σχέση με το μονοκόμματο. Ανάμεσα σε αυτά τα δύο κυλινδρικά κελύφη τοποθετούμε ένα συνδετικό υλικό που έχει σύσταση και ιδιότητες παρόμοιες με του σκυροδέματος και είναι υπεύθυνο ώστε να διατηρεί την απόσταση των δύο περιβλημάτων, εξαλείφοντας το κενό, μεταφέροντας τις τάσεις από το εσωτερικό στο εξωτερικό κέλυφος.



Εικόνα 37: Σχηματική απεικόνιση των τριών διαφορετικών επιπέδων στην μέθοδο διπλού σωλήνα, (grouting).

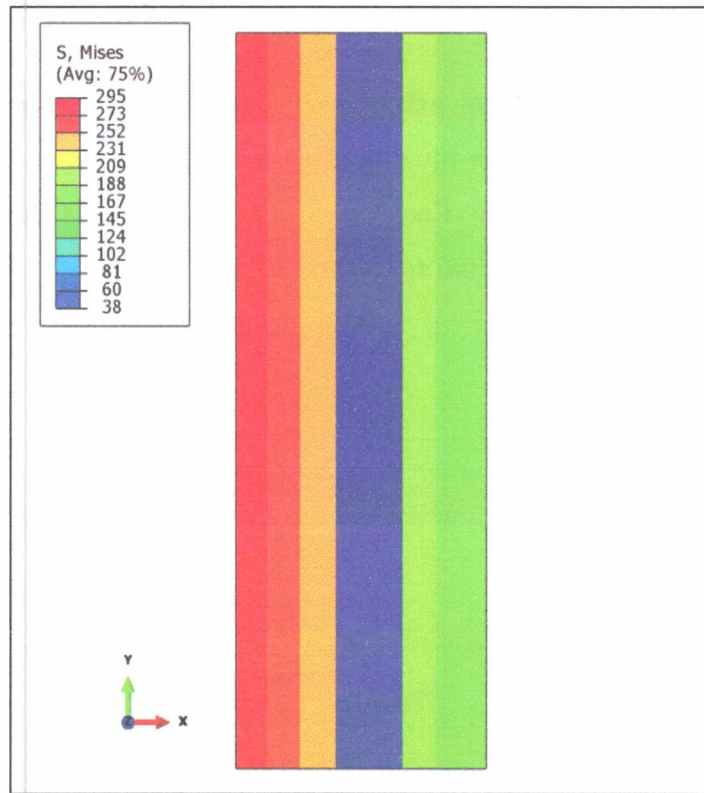


Για την μοντελοποίηση της παραπάνω μεθόδου χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα Abaqus και εργαστήκαμε με τον ίδιο ακριβώς τρόπο με τα υπόλοιπα αξονοσυμμετρικά προβλήματα, ορίζοντας όμως ένα νέο υλικό και χρησιμοποιώντας την εντολή “partition”. Αναλυτικότερα, ορίστηκε υλικό με όνομα “filler”, μέτρο ελαστικότητας  $E = 30GPa$  και λόγο Poisson  $\nu = 0.15$ . Παράλληλα, με την εντολή “partition” διαχωρίστηκε το πάχος σε τρεις ζώνες, δύο εξωτερικές οι οποίες είχαν ως υλικό τον χάλυβα που χρησιμοποιήσαμε σε όλες τις προηγούμενες προσομοιώσεις και μία μεσαία η οποία θα συμπεριφέρεται σύμφωνα με το υλικό “filler”. Δοκιμάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί πάχους των ζωνών που προαναφέραμε και εξάγαμε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

*Πίνακας 7: Εξεταζόμενες περιπτώσεις μεθόδου διπλού σωλήνα.*

internal shell thickness (mm)	external shell thickness (mm)	filler material (mm)	max stress (MPa)
100	100	100	317
120	80	50	346
120	80	100	295
120	120	50	343

Η Εικόνα 38 παρουσιάζει την κατανομή των τάσεων στο μοντέλο στο οποίο η μέγιστη τάση δεν ξεπερνά τα 300MPa. Με το μπλε χρώμα βλέπουμε το συνδεδετικό υλικό. Το αποτέλεσμα είναι λογικό καθώς το ισχυρότερο υλικό μπορεί να παραλάβει πολύ μεγαλύτερα φορτία.



Εικόνα 38: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων στο εσωτερικό του κελύφους για τη μέθοδο του διπλού σωλήνα, (Abaqus).

### 8.7 Πάχος ημισφαιρικών πλευρικών τμημάτων

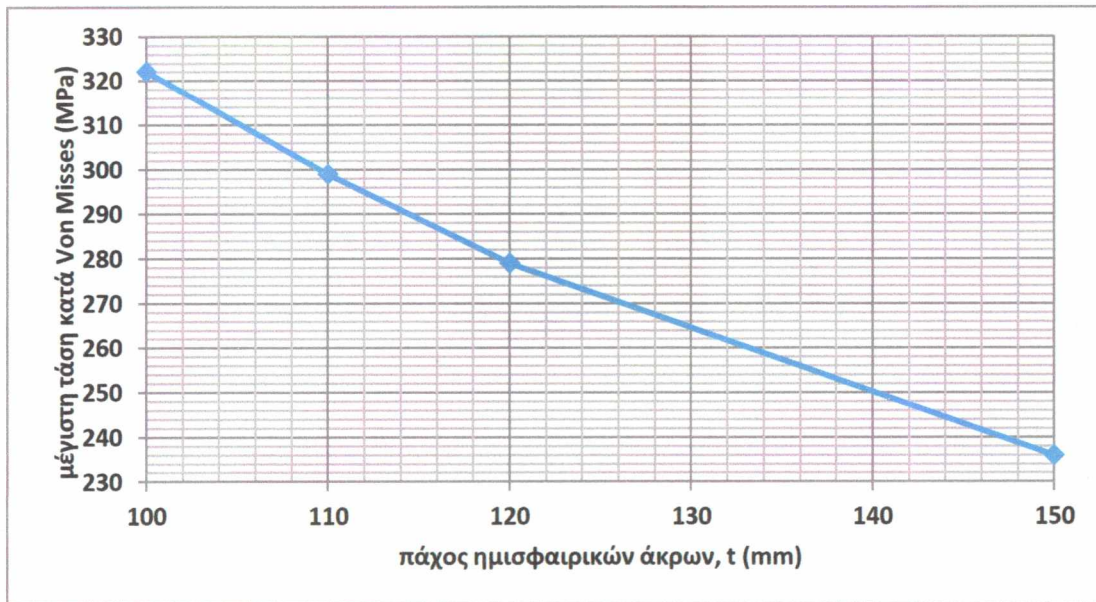
Με παρόμοια ανάλυση καταλήγουμε στο πάχος των ημισφαιρικών άκρων του δοχείου πίεσης. Η σφαιρική γεωμετρία έχει ως μειονέκτημα την όχι καλή διαχείριση του χώρου καθώς ένα μεγάλο μέρος όγκου μένει ανεκμετάλλευτο, αλλά προσφέρει την καλύτερη διαφυγή των τάσεων ανάμεσα στο άκρο και στο κύριο μέρος του κελύφους.

Αναλυτικότερα, η διαστασιολόγηση με βάση την προδιαγραφή EN 13445-3:2002 δίνει τα εξής αποτελέσματα:

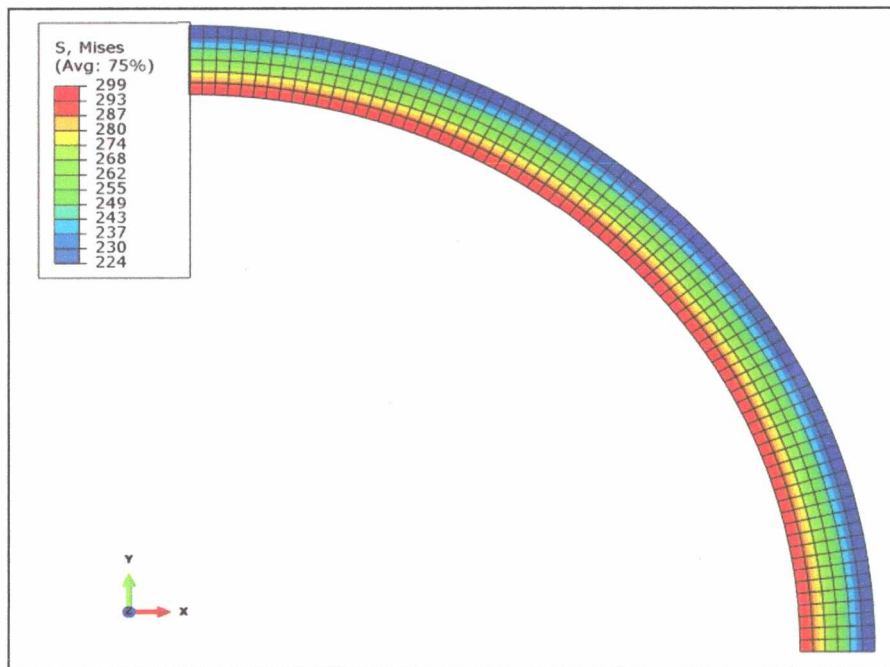
Πίνακας 8: Αποτελέσματα υπολογισμού πάχους ημισφαιρικών άκρων σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 13445-3:2002.

$P$ (MPa)	$D_{in}$ (mm)	testing_group	material	$e_{cap}$ (mm)
60	1800	1 ή 2	Χάλυβας (όχι ωστενιτικός)	157
60	1800	1 ή 2	Ωστενιτικός χάλυβας	95
60	1800	1 ή 2	Χυτοχάλυβας	200

Εκτελώντας ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η γραφική παράσταση που ακολουθεί, δείχνει την συμπεριφορά της μέγιστης τάσης σε σχέση με το πάχος του ελάσματος. Στην Εικόνα 39 παρατηρούμε λεπτομερέστερα την κατανομή των τάσεων στο εσωτερικό των ημισφαιρικών άκρων.



Γράφημα 26: Μέγιστη τάση κατά Von Mises στο ημισφαιρικό άκρο για διάφορες τιμές πάχους.



Εικόνα 39: Σχηματική αναπαράσταση πλέγματος και κατανομής τάσεων στο ημισφαιρικό άκρο, (Abaqus).

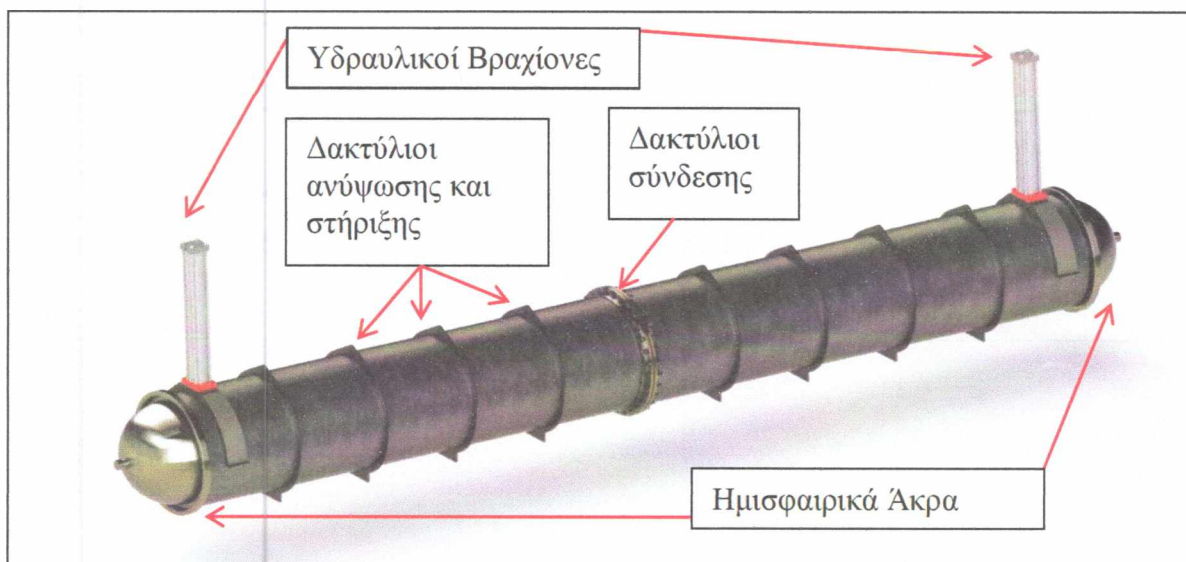


## 9. Γενική Γεωμετρία και Στηρίξεις Δοχείου Πίεσης

Το Κεφάλαιο 9 εστιάζει στις στηρίξεις της πειραματικής διάταξης. Η παράγραφος 9.1 περιγράφει τον τρόπο στήριξης ενώ η παράγραφος 9.2 που ακολουθεί, του υπολογισμούς. Η παράγραφος 9.3 περιλαμβάνει τους υπολογισμούς των δυνάμεων και των ροπών που αναπτύσσονται και η παράγραφος 9.4 εστιάζει στο καθορισμό της απαραίτητης διαδρομής πιστονιού των υδραυλικών βραχιόνων. Τέλος, οι παράγραφοι 9.5 και 9.6 περιλαμβάνουν σχεδιαστικές προτάσεις και αντικείμενα προς μελέτη, τα οποία δεν μπόρεσαν να αναλυθούν στο περιορισμένο χρόνο διεξαγωγής της διπλωματικής εργασίας.

### 9.1 Εισαγωγή

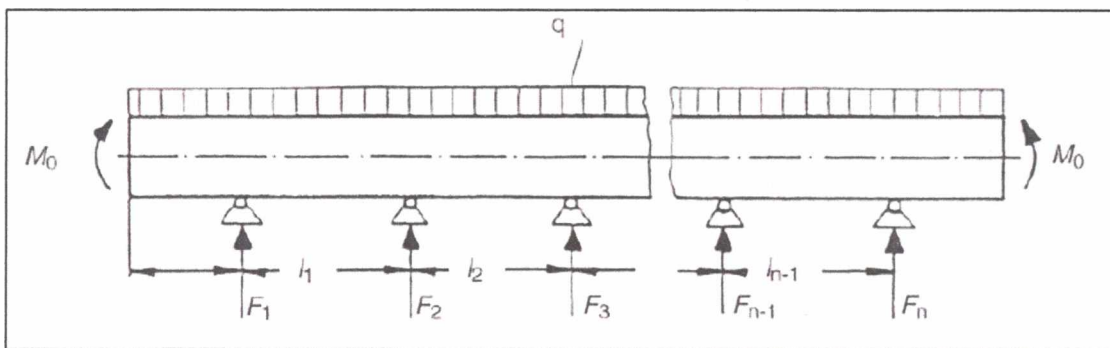
Μια σημαντική παράμετρος του σχεδιασμού του συγκεκριμένου δοχείου πίεσης είναι ο τρόπος μεταφοράς και τοποθέτησής του στο χώρο λειτουργίας του. Λόγω του πολύ υψηλού του βάρους, το κέλυφος μπορεί να διαιρεθεί σε δύο συμμετρικά τμήματα στα οποία είναι συγκολλημένοι χαλύβδινοι δακτύλιοι και συνδέονται κοχλιωτά (Εικόνα 48). Επίσης υπάρχουν δακτύλιοι κατά μήκος του δοχείου πίεσης με διπλό ρόλο καθώς βοηθούν στην ανύψωση του κελύφους με την οπή που φέρουν στο άνω τμήμα τους, αλλά και στην στήριξή του στο έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, θα κατασκευαστούν βάσεις από σκυρόδεμα που θα στηρίζουν το δοχείο πίεσης. Οι δακτύλιοι θα εφαρμόζονται σε κατάλληλες υποδοχές που θα υπάρχουν στις βάσεις αυτές και θα εμποδίζουν την μετατόπιση του δοχείου.



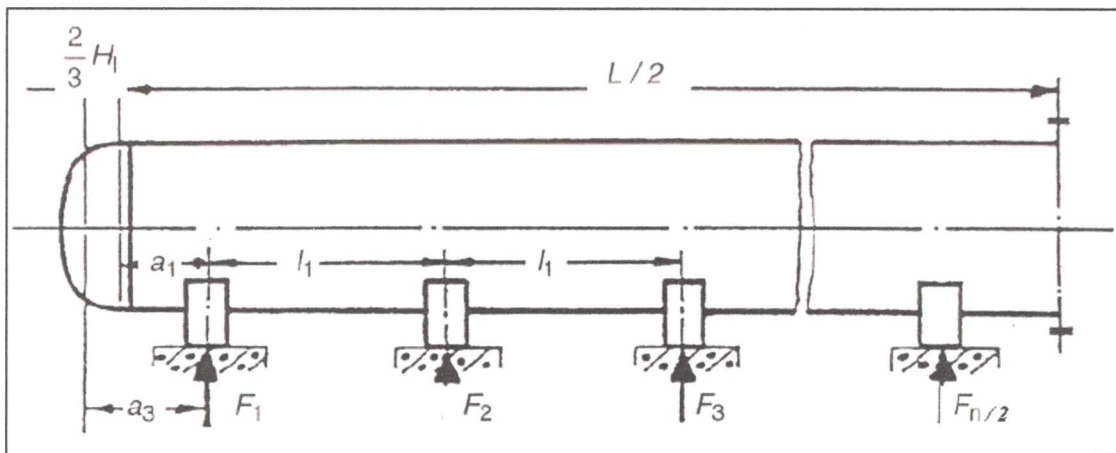
Εικόνα 40: Σχηματική απεικόνιση του εξωτερικού του δοχείου πίεσης, (SolidWorks).

## 9.2 Υπολογισμοί

Για τον υπολογισμό των φορτίων σε στις στηρίξεις χρησιμοποιούμε την προδιαγραφή EN 13445-3:2002 και συγκεκριμένο το κεφάλαιο 16 “Additional non-pressure loads”. Σύμφωνα λοιπόν με την συγκεκριμένη προδιαγραφή επιλέγουμε στηρίξεις τύπου B, δηλαδή το δοχείο πίεσης να είναι τοποθετημένο σε τρεις ή παραπάνω ισαπέχοντες στηρίξεις. Αρχικά υπολογίζουμε τις ροπές και τις διατμητικές δυνάμεις κατά μήκος του κελύφους για να βρούμε τις δυνάμεις αντίδρασης στις στηρίξεις.



Εικόνα 41: Διάγραμμα ελεύθερου σώματος για δοχείο πίεσης με ισαπέχοντες στηρίξεις και κατανεμημένο φορτίο σε όλο το μήκος του.



Εικόνα 42: Διάγραμμα δοχείου πίεσης με γεωμετρικούς συμβολισμούς.

Το καταναμεμένο φορτίο  $q$  δίνεται από τον τύπο:

$$q = \frac{W}{L + 4H_i / 3} \quad (9.1)$$

Η ροπή στα άκρα του κελύφους, λόγω της μάζας του δίνεται από τη σχέση:

$$M_o = q \frac{W_F}{W} D_i^2 / 16 \quad (9.2)$$

Προφανώς, για συμμετρικά τοποθετημένα δοχεία με ισαπέχοντες στηρίξεις, η δύναμη αντίδρασης σε κάθε στήριγμα δίνεται από τον τύπο :

$$F_i = \frac{W}{n} \quad (9.3)$$

Αναφορικά με τις ροπές στις στηρίξεις εργαζόμαστε ως εξής:

Για  $i = 1$  ή  $i = n$

$$M_i = \max(qa_3^2 / 2 - M_o; ql_1^2 / 8) \quad (9.4)$$

Για  $i = 2$  μέχρι  $i = n - 1$

$$M_i = ql_1^2 / 8 \quad (9.5)$$

Για την διατμητική δύναμη σε κάθε στήριξη ισχύει:

$$Q_i = 0.5F_i \quad (9.6)$$

Σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 13445-3:2002, έχοντας εκτελέσει τους προηγούμενους υπολογισμούς, πρέπει να ικανοποιούμε δύο κριτήρια έλεγχου. Το πρώτο αφορά την αντοχή και το δεύτερο την αστάθεια.

$$\frac{PD_i}{4e_a} + \frac{4|M_{ij}|K_{12}}{\pi D_i^2 e_a} \leq f_{\max} \quad (9.7)$$

$f_{\max} = f$  : για περιοχές που δεν υπάρχουν περιφερειακές συγκολλήσεις

$f_{\max} = f \cdot z$  : για περιοχές με περιφερειακές συγκολλήσεις



$K_{12}$  : δίνεται από το διάγραμμα 16.8-12 της προδιαγραφής

Το δεύτερο κριτήριο γράφεται:

$$\left| M_{ij} \right| / M_{\max} \leq 1.0 \quad (9.8)$$

όπου,

$W$  = μικτό βάρος δοχείου πίεσης

$W_F$  = βάρος υγρού (στην προκειμένη περίπτωση νερό)

$L$  = μήκος δοχείου

$M_i$  = καμπτική ροπή στη στήριξη  $i$

$M_{ij}$  = μέγιστη καμπτική ροπή ανάμεσα στις στηρίξεις  $i$  και  $j$

$Q_i$  = μέγιστη διατμητική δύναμη στη στήριξη  $i$

$n$  = αριθμός στηρίξεων

$D_i$  = εσωτερική διάμετρος

Στην συγκεκριμένη εργασία αυτοματοποιήσαμε τις παραπάνω σχέσεις στο Excel και λάβαμε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

*Πίνακας 9: Αποτελέσματα ανάλυσης εντατικής κατάστασης των στηρίξεων της πειραματικής διάταξης.*

Input			output		
<b>L</b>	20000	mm	<b>q</b>	138963	N/m
<b>n</b>	10	-	<b>M<sub>o</sub></b>	5614	Nm
<b>W</b>	2779268	N	<b>F<sub>i</sub></b>	277926	N
<b>W<sub>f</sub></b>	554461	N	<b>M<sub>i</sub></b>	57537	Nm
<b>D<sub>i</sub></b>	1800	mm	<b>Q<sub>i</sub></b>	138963	N
<b>a<sub>3</sub></b>	900	mm		115075	Nm
<b>l<sub>i</sub></b>	1820	mm			
<b>P</b>	60	MPa			
<b>e</b>	210	mm			
<b>f<sub>d</sub></b>	450	MPa			

Σημειώνουμε πως τα παραπάνω αποτελέσματα ικανοποιούν τα κριτήρια που είχαμε αναφέρει. Επίσης, μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε πως το συνολικό βάρος του κελύφους ανέρχεται στους 222tn.

### 9.3 Υπολογισμοί δυνάμεων και ροπών

Στο κεφάλαιο της συνδυασμένης φόρτισης αναφέραμε πως ο τρόπος επιβολής κάμψης θα είναι τύπου four-point bending (κάμψη τεσσάρων σημείων). Χρειαζόμαστε υδραυλικές πρέσες που θα είναι σε θέση να ασκήσουν εγκάρσια δύναμη στις άκρες του πειραματικού αγωγού. Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε διαγράμματα στα οποία φαίνεται η μέγιστη ροπή που απαιτείται για να επιφέρουμε αστοχία στον αγωγό. Πρέπει λοιπόν να υπερκαλύπτουμε αυτή την ροπή, κατά έναν συντελεστή ασφάλειας, πολλαπλασιάζοντας την μέγιστη κάθετη δύναμη που μπορεί να ασκήσει η πρέσα με τον μοχλοβραχίονα (3m), δηλαδή την απόσταση από το ένα άκρο του αγωγού έως την ενδιάμεση στήριξη.

$$Moment_{hyd} = F_{hyd} \cdot X \quad (9.9)$$

$$F.S. = \frac{Moment_{hyd}}{Moment_{req}} (> 1) \quad (9.10)$$

όπου,

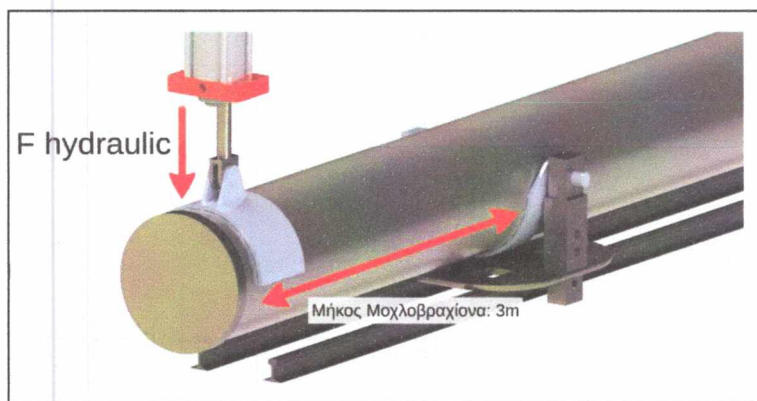
$F.S.$  = συντελεστής ασφάλειας (factor of safety)

$Moment_{hyd}$  = ροπή που προκαλεί η υδραυλική πρέσα στο σημείο στήριξης του αγωγού

$Moment_{req}$  = ροπή που απαιτείται για την διεξαγωγή του πειράματος

$X$  = μοχλοβραχίονας, απόσταση άκρου αγωγού με σημείο στήριξης

$F_{hyd}$  = κάθετη δύναμη που μπορεί να ασκήσει η υδραυλική πρέσα.

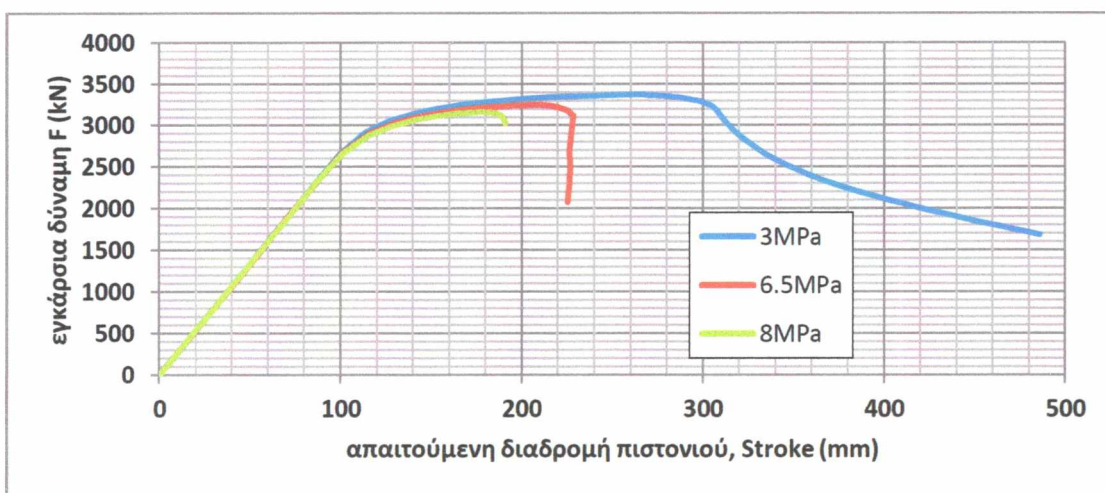


Εικόνα 43: Απεικόνιση του εσωτερικού του δοχείου πίεσης.

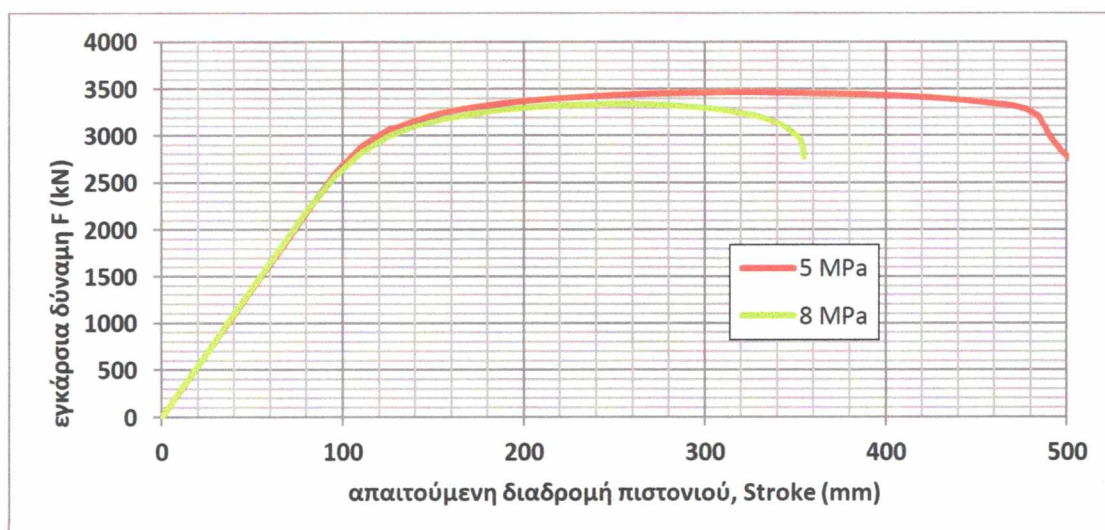
Ο υπολογισμός της εγκάρσιας επιτρεπόμενης δύναμη σε συνδυασμό με την διάμετρο του διαθέσιμου πιστονιού θα καθορίσει την πίεση λειτουργία στους υδραυλικούς βραχίονες. Στο εμπόριο υπάρχει πληθώρα συνδυασμών όλων των παραπάνω μεγεθών, αλλά θα μπορούσε να γίνει και μία ιδιο-συσκευή.

### 9.4 Υπολογισμός διαδρομής πιστονιού

Γενικώς, όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση στο δοχείο τόσο μικρότερη είναι η παραμόρφωση του αγωγού πριν την αστοχία. Από τη μελέτη της μεθόδου four-point bending έχουμε εξάγει τα ακόλουθα διαγράμματα στα οποία απεικονίζεται η απαιτούμενη διαδρομή πιστονιού για διαφορετικές πειραματικές φορτίσεις σε αγωγό διαμέτρου 36in και 32in. Αρχικά, στον αγωγό επιβάλλεται εξωτερική πίεση η οποία αναγράφεται στο υπόμνημα κάθε διαγράμματος και ακολουθεί η επιβολή εγκάρσιας δύναμης στα άκρα του.

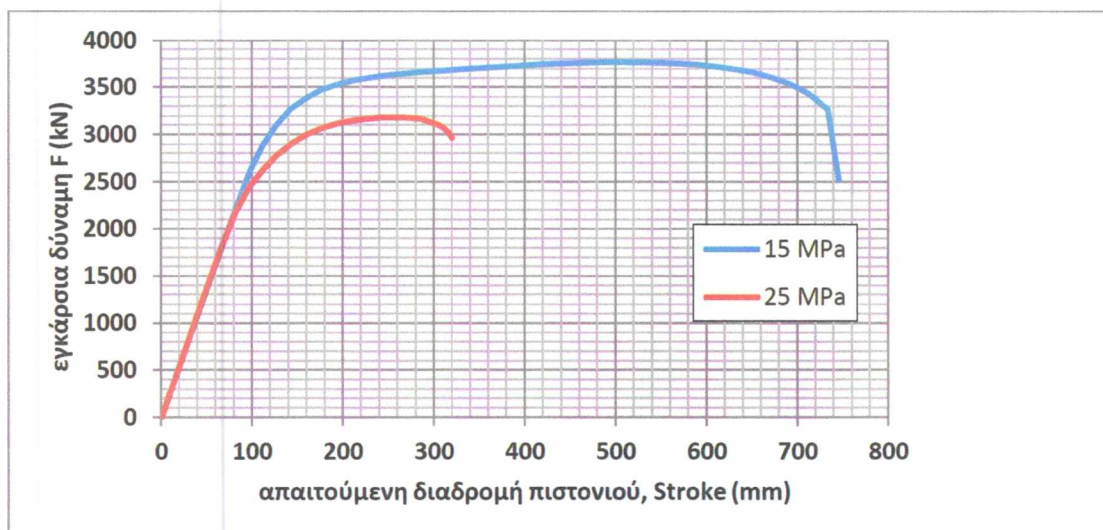


Γράφημα 27: Γραφική παράσταση εγκάρσιας δύναμης προς απαιτούμενη διαδρομή πιστονιού για αγωγό διαμέτρου 36in, μέγεθος wrinkles 0.7 και αρχική οβαλότητα 0.3%.



Γράφημα 28: Γραφική παράσταση εγκάρσιας δύναμης προς απαιτούμενη διαδρομή πιστονιού για αγωγό διαμέτρου 36in και αρχική οβαλότητα 0.1%.





Γράφημα 29: Γραφική παράσταση εγκάρσιας δύναμης προς απαιτούμενη διαδρομή πιστονιού για αγωγό διαμέτρου 32in και αρχική οβαλότητα 0.3%.

Από τα Γραφήματα 27, 28 και 29 φαίνεται πως η απαιτούμενη διαδρομή του πιστονιού είναι περίπου 500mm για την περίπτωση του αγωγού με εξωτερική διάμετρο 36in αλλά αυξάνεται σημαντικά όσο μειώνεται η διάμετρος του αγωγού, καθώς ο τελευταίος γίνεται πιο εύκαμπτος. Επίσης, η πρέσα θα πρέπει να παράγει τουλάχιστον 4000kN δύναμης ώστε να εκτελούνται με ασφάλεια οι περισσότερες πειραματικές διεργασίες.

### 9.5 Τοποθέτηση υδραυλικών πρεσών

Η τοποθέτηση των υδραυλικών πρεσών εκτός του δοχείου πίεσης έχει πολλά πλεονεκτήματα. Βασικότερο όλων είναι η εξοικονόμηση χώρου μέσα στο δοχείο. Λόγω της σχετικώς μεγάλης διαδρομής πιστονιού που χρειαζόμαστε, το μήκος της πρέσας είναι αρκετά μεγάλο και επιφέρει σημαντική αύξηση της διαμέτρου του κελύφους αν η πρέσα τοποθετούνταν μέσα σε αυτό. Η αύξηση της διαμέτρου θα οδηγούσε σε εκτόξευση των τάσεων στο πάχος του κελύφους οπότε και αναγκαστικό περιορισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης πίεσης. Επιπρόσθετα, το περιβάλλον υψηλής πίεσης στο εσωτερικό του δοχείου μπορεί να προκαλούσε προβλήματα στην λειτουργία της πρέσας, να έθετε θέματα στεγανοποίησης ή ακόμα και να οδηγούσε στην αστοχία της. Τέλος, ένα πρακτικό πλεονέκτημα είναι πως η συνδεσμολογία των πρεσών μπορεί να γίνει εκτός του δοχείου και να υπάρχει καλύτερος εποπτικός έλεγχος για τυχόν διαρροές.



*Εικόνα 44: Διαμήκης τομή της παραματικής διάταξης, (SolidWorks).*

## 9.6 Σχεδιαστικές προτάσεις και αντικείμενα προς μελέτη

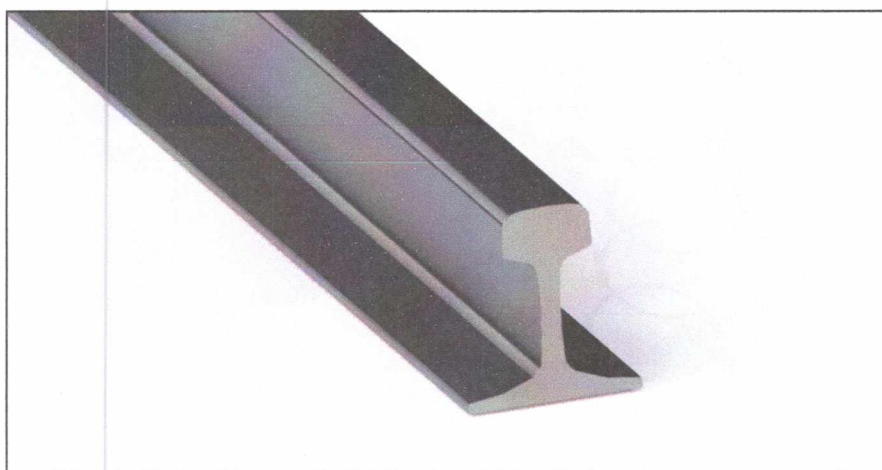
- Αναλύσαμε το ημισφαιρικό σχήμα και το πάχος των άκρων του δοχείου πίεσης αλλά δεν εμβαθύνουμε στον τρόπο σύνδεσης με το κύριο σώμα του κελύφους. Για να υπάρχει εύκολη πρόσβαση στο εσωτερικό και από τις δύο μεριές προτείνεται η ύπαρξη σπειρώματος στην περίμετρο των καπακιών ώστε να βιδώνουν σε κατάλληλο θηλυκό σπείρωμα στις άκρες του κελύφους (Εικόνα 45). Η λύση της περιφερειακής φλάντζας στο κέλυφος ή οποία θα είναι συνδεδεμένη με κοχλίες με αντίστοιχη φλάντζα στο καπάκι απορρίπτεται για λόγους συναρμογής αλλά και δυσκολίας στην ευθυγράμμιση των οπών του καπακιού με τις αντίστοιχες οπές στο κέλυφος. Παρόλα αυτά εκκρεμεί η μελέτη της κοχλιοσύνδεσης μεταξύ καπακιών και κελύφους, ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σπειρώματος.
- Η σύνδεση των δύο συμμετρικών τμημάτων του κελύφους είναι κοχλιωτή με μορφή διπλής φλάντζας. Πρέπει να μελετηθεί τόσο η γεωμετρία όσο και ο τρόπος στεγανοποίησής της. Μία πρωταρχική μελέτη της περιλαμβάνεται στο κεφάλαιο 10.
- Ο τρόπος περιστροφής των καπακιών ώστε να βιδώσουν στο κέλυφος απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό λόγω του υψηλού βάρους και όγκου των ημισφαιρίων. Προτείνεται η εξής λύση: στην κορυφή του άκρου προσαρμόζεται ρουλεμάν σε κατάλληλα συγκολλημένο άξονα ώστε να δημιουργήσουμε τον άξονα περιστροφής που επιθυμούμε. Η εξωτερική πλευρά του ρουλεμάν εδράζεται σε εξωτερική κατασκευή η οποία φέρει και ηλεκτροκινητήρα. Ο ηλεκτροκινητήρας είναι συνδεδεμένος με την περιμετρική οδόντωση στο καπάκι. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζουμε την ασφαλή σύνδεση του καπακιού χωρίς την καταβολή ιδιαίτερης ανθρώπινης προσπάθειας (Εικόνα 45).



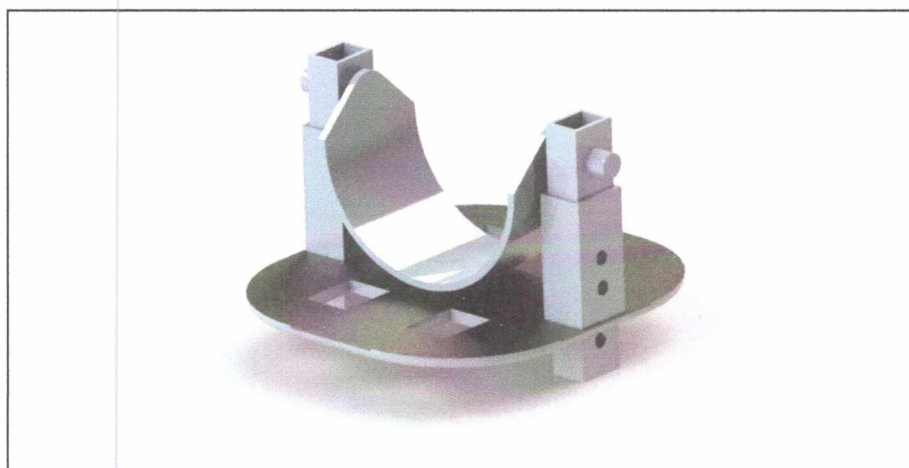


*Εικόνα 45: Απεικόνιση του ημισφαιρικού άκρου του δοχείου πίεσης, (a) εσωτερικά, (b) εξωτερικά, (c) τομή πλάγιας όψης.*

- Αναφορικά με το εσωτερικό του δοχείου, επιλέξαμε να προσαρμόσουμε την στήριξη του αγωγού σε ράγες (Εικόνα 46). Κατάλληλα ράουλα στη βάση των στηρίξεων θα δίνουν την δυνατότητα μετακίνησής του κατά μήκος των ραγών ώστε να μπορεί να μεταβάλλεται το μήκος υπό εξέταση, δηλαδή από στήριξη σε στήριξη. Γνωρίζοντας τις δυνάμεις και τις ροπές που ασκούνται στον αγωγό μπορούμε να διαστασιολογήσουμε τα επιμέρους εξαρτήματα έχοντας υπ' όψη μας τα διαθέσιμα προϊόντα στο εμπόριο ώστε να μειώσουμε το κόστος.
- Οι στηρίξεις του αγωγού στο δοχείο πίεσης πρέπει να είναι σε μορφή “σέλας” και με δυνατότητα περιστροφής ώστε να μην επηρεάζουν τα πειραματικά αποτελέσματα. Στην Εικόνα 47 φαίνεται μία προτεινόμενη διάταξη η οποία ενσωματώνει δυνατότητα προσαρμογής της στήριξης ως προς το ύψος, για μεγαλύτερη ευελιξία στο πλήθος των αγωγών που μπορούν να εξεταστούν στην πειραματική διάταξη.



*Εικόνα 46: Προφίλ ράγας στην οποία εδράζονται οι στηρίξεις του αγωγού.*



*Εικόνα 47: Στηρίξεις τύπου "σέλας" του αγωγού μέσα στο δοχείο πίεσης.*



*Εικόνα 48: Απεικόνιση της αποσυναρμολογημένης πειραματικής διάταξης, (SolidWorks).*



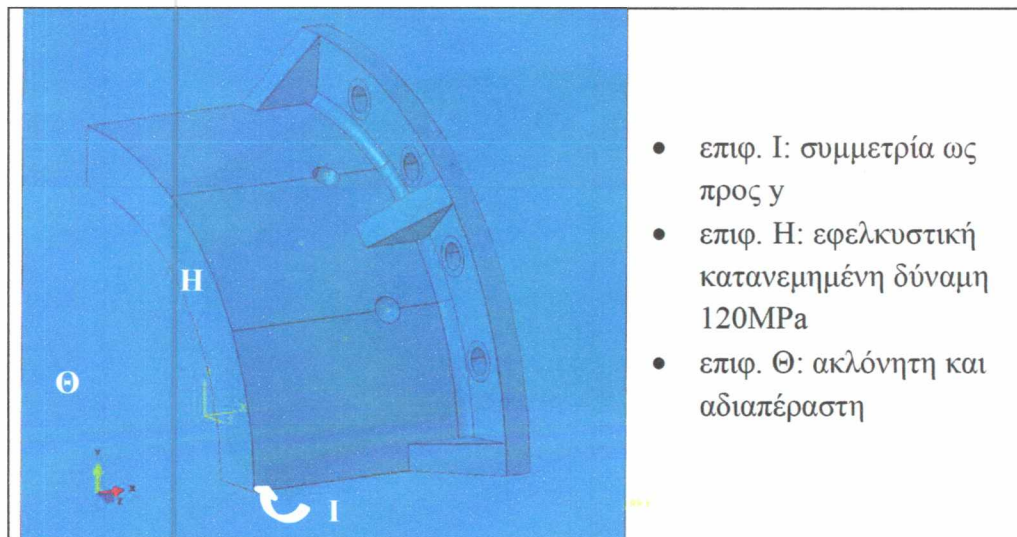
## 10. Σύνδεση του Κελύφους

Η μεταφορά του δοχείου πίεσης από τις εγκαταστάσεις κατασκευής του ως το χώρο λειτουργίας του είναι αρκετά πολύπλοκη διαδικασία λόγω των διαστάσεων και του βάρους της διάταξης. Προτείνεται η διαίρεση του δοχείου σε δύο ή περισσότερα κομμάτια, τα οποία θα συνδέονται με κοχλίες. Εξετάζονται δύο διατάξεις σύνδεσης:

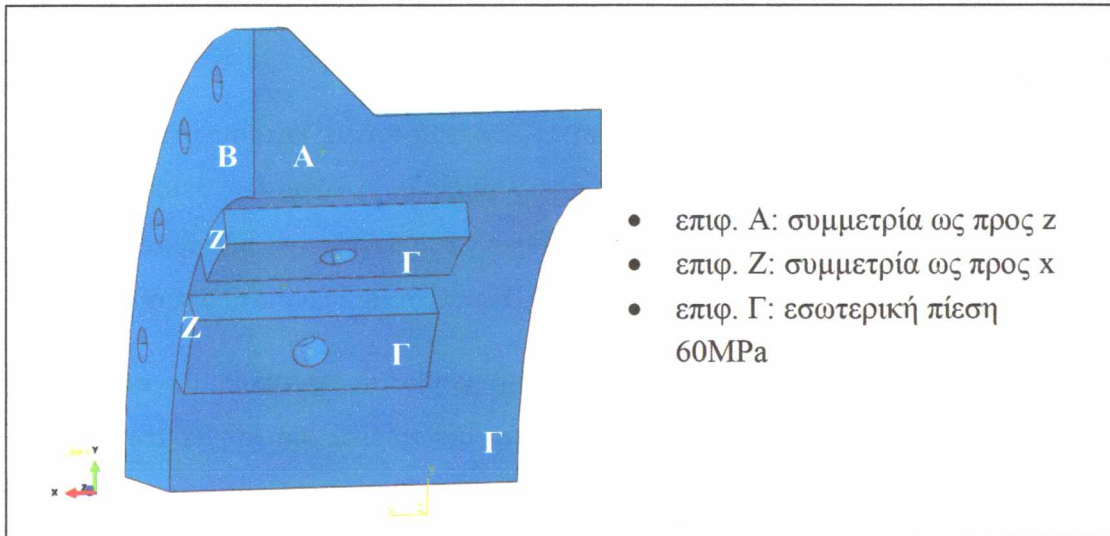
- Διαίρεση του κελύφους σε τρία όμοια κομμάτια τα οποία θα συνδέονται εξωτερικά, μετωπικά με φλάντζα και εσωτερικά θα συγκρατούνται με ελάσματα.
- Διαίρεση του κελύφους σε τρία κομμάτια τα οποία θα συνδέονται μετωπικά με διπλή αρμοκαλύπτρα.
- Διαίρεση του κελύφους σε τρία κομμάτια τα οποία θα συνδέονται με μετωπική φλάντζα.

### 10.1 Σύνδεση με φλάντζα

Αρχικά σχεδιάστηκε η σύνδεση στο SolidWorks και στη συνέχεια το σχέδιο εισήχθη στο Abaqus για μελέτη πεπερασμένων στοιχείων. Δημιουργήθηκε το πλέγμα και εφαρμόστηκαν κατάλληλες συνοριακές συνθήκες και δυνάμεις, οι οποίες φαίνονται στις Εικόνες 49 και 50.

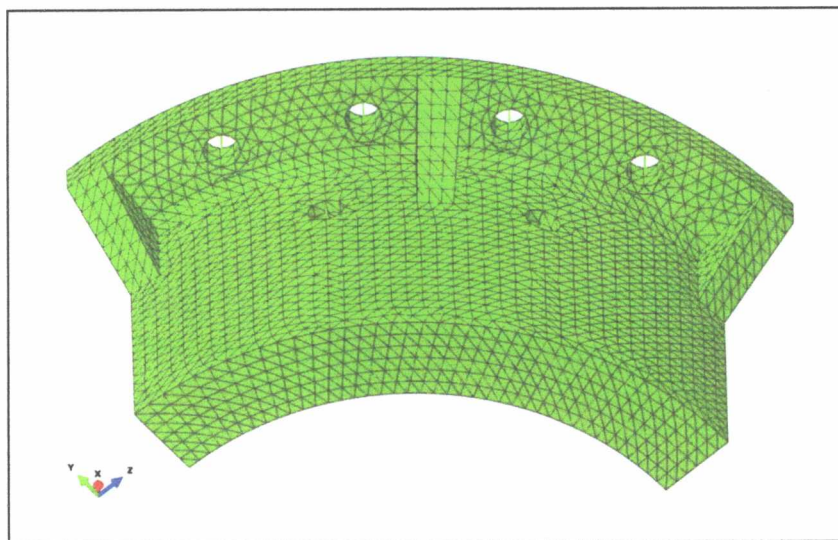


Εικόνα 49: Συνοριακές συνθήκες και φορτία στο μοντέλο σύνδεσης με φλάντζα και ελάσματα.

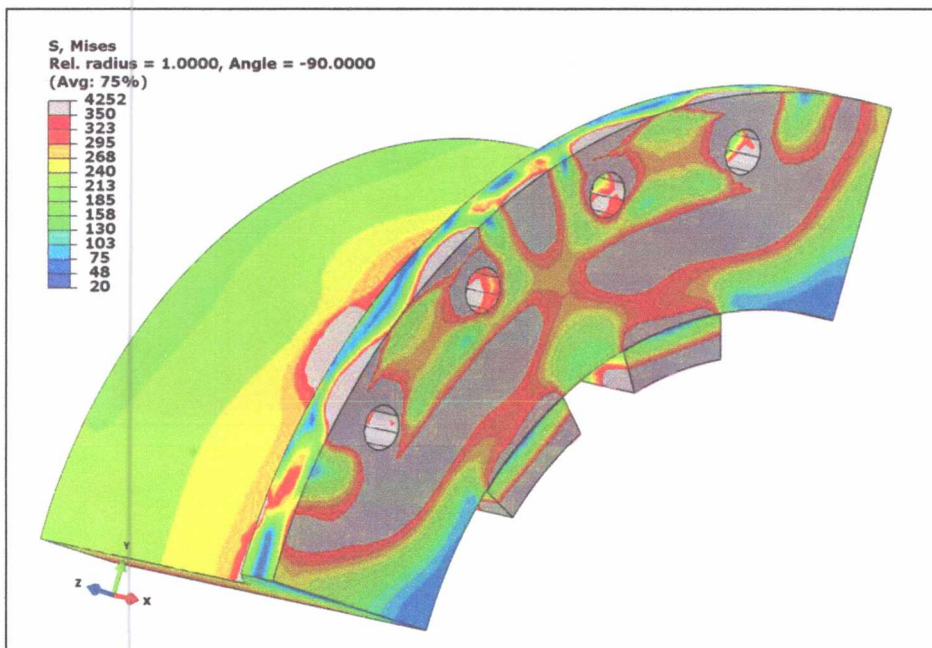
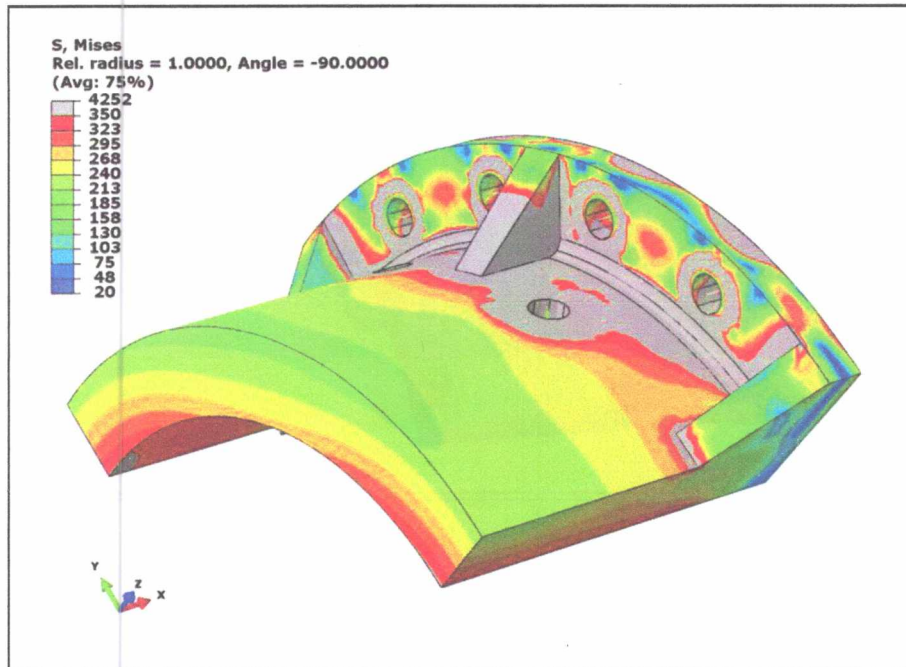


Εικόνα 50: Συνοριακές συνθήκες και φορτία στο μοντέλο σύνδεσης με φλάντζα και ελάσματα.

Επιπρόσθετα, ορίστηκαν οι απαραίτητες συνθήκες επαφής. Η επιφάνεια  $\Theta$  είναι αδιαπέραστη από την επιφάνεια B και η επιφάνεια  $\Gamma$  είναι αδιαπέραστη από την εξωτερική επιφάνεια των ελασμάτων. Τέλος, στο μοντέλο μας εισήχθησαν οι κοχλίες, ο οποίοι αποτελούνται από beam elements και τους επιβλήθηκε προένταση μέσω της επιλογής predefined fields ίση με 200MPa ( $=\frac{1}{6}\sigma_{yield}$  για κοχλία κλάσης 12.9). Επίσης στους κοχλίες της φλάντζας επιβλήθηκαν συνθήκες συμμετρίας ως προς τον άξονα x.

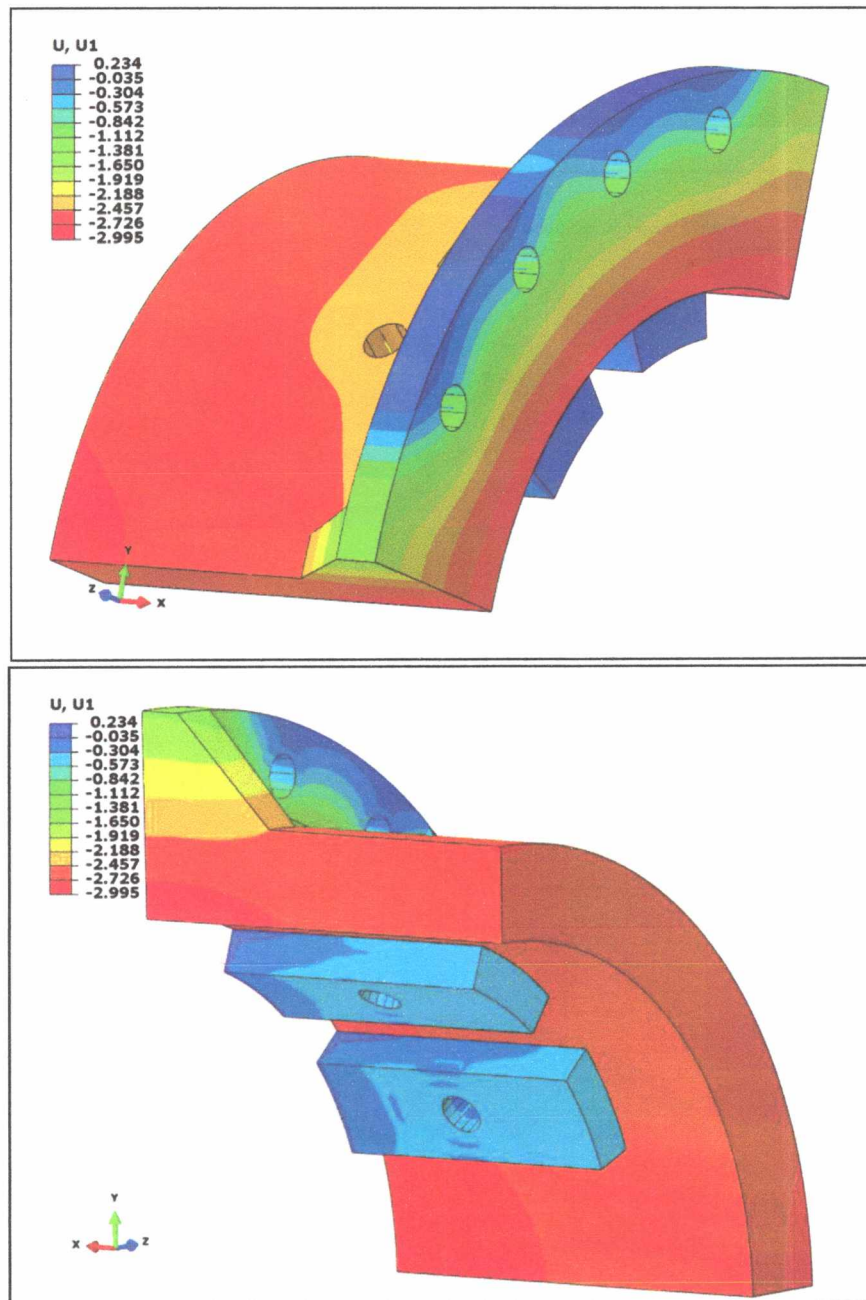


Εικόνα 51: Πλέγμα μοντέλου συνδεσμολογίας κελύφους.



Εικόνα 52: Κατανομή των τάσεων στο μοντέλο σύνδεσης με φλάντζα και ελάσματα.





Εικόνα 53: Γραφική απεικόνιση της μετατόπισης κατά τον άξονα  $x$  στο μοντέλο σύνδεσης με φλάντζα και ελάσματα.

Παρατηρούμε πως λόγω εκκεντρότητας, το εσωτερικό του κελύφους αποκολλάται στο σημείο της σύνδεσης προκαλώντας προβλήματα στεγανότητας της διάταξης. Συγκεκριμένα, η μετατόπιση είναι της τάξης των 3mm στο κάτω μέρος της επιφάνειας επαφής. Επίσης στα κρίσιμα σημεία γεωμετρικής ασυνέχειας η ισοδύναμη τάση κατά Von Mises υπερβαίνει κατά πολύ τα 350MPa. Οπότε απορρίπτεται ο συγκεκριμένος τρόπος σύνδεσης και συνεχίζουμε με την μελέτη σύνδεσης με αρμοκαλύπτρα.

## 10.2 Σύνδεση με διπλή αρμοκαλύπτρα

Η δύναμη στο ημισφαιρικό καπάκι δίνεται από τη σχέση:

$$F_{cp} = AP_{int} \quad (10.1)$$

Η εφελκυστική δύναμη ανά μονάδα μήκους που επιβάλλεται σε μία τομή του δοχείου δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{F_{cp}}{2\pi R} = \frac{P_{int} R}{2} \quad (10.2)$$

Επειδή όμως έχουμε επιλέξει διάταξη αρμοκαλύπτρας, δηλαδή δύο ελασμάτων, ένα εσωτερικά και ένα εξωτερικά του δοχείου, η δύναμη ισομοιράζεται στα δύο ελάσματα.

Συνεπώς η εφελκυστική τάση που αναπτύσσεται σε κάθε έλασμα είναι ίση με:

$$\sigma = \frac{F}{2t} = \frac{P_{int} R}{4t} \quad (10.3)$$

Σε μία σύνδεση με αρμοκαλύπτρα, τα προς σύνδεση ελάσματα είναι πρόσωπο με πρόσωπο, μία ή δύο αρμοκαλύπτρες σκεπάζουν τη σύνδεση ενώ οι ήλοι (ή οι κοχλίες) διαπερνούν τις αρμοκαλύπτρες και τα κύρια ελάσματα και τα συνδέουν. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αναλύεται η σύνδεση με διπλή αρμοκαλύπτρα και μονή σειρά κοχλιών.

Μία τέτοια συνδεσμολογία μπορεί να παρουσιάσει αστοχία είτε στους κοχλίες είτε στα ελάσματα. Για το λόγο αυτό εξετάζουμε τρία κριτήρια αστοχίας.

- a. Αστοχία κοχλία (ήλου) σε διάτμηση (Εικόνα 54).

$$\tau = \frac{4F}{nm\pi d^2} \leq \left( \frac{S_{xy}}{N} \right)_{κοχλία} = \left( \frac{S_y}{2N} \right)_{κοχλία} \quad (10.4)$$

b. Αποκοπή ελάσματος κατά μήκος της σύνδεσης (Εικόνα 55).

$$\sigma_t = k_t \frac{F}{(w - nd)t} \leq \left( \frac{S_y}{N} \right)_{\text{ελάσματος}} \quad (10.5)$$

c. Αστοχία ελάσματος σε απόσχιση (Εικόνα 56).

$$\tau_t = k_t \frac{F}{2at} \leq \left( \frac{0.3S_y}{N} \right)_{\text{ελάσματος}} \quad (10.6)$$

Όπου,

$F$  = δύναμη φόρτισης

$n$  = αριθμός κοχλιών

$m$  = αριθμός καταπονούμενων διατομών ανά κοχλία

$a$  = απόσταση του κέντρου του κοχλία από την άκρη του ελάσματος

$d$  = διάμετρος κοχλία

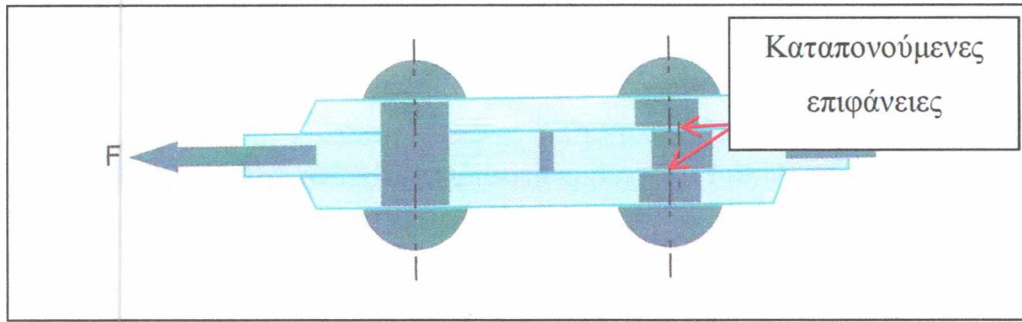
$S_y$  = όριο διαρροής

$w$  = πλάτος ελάσματος

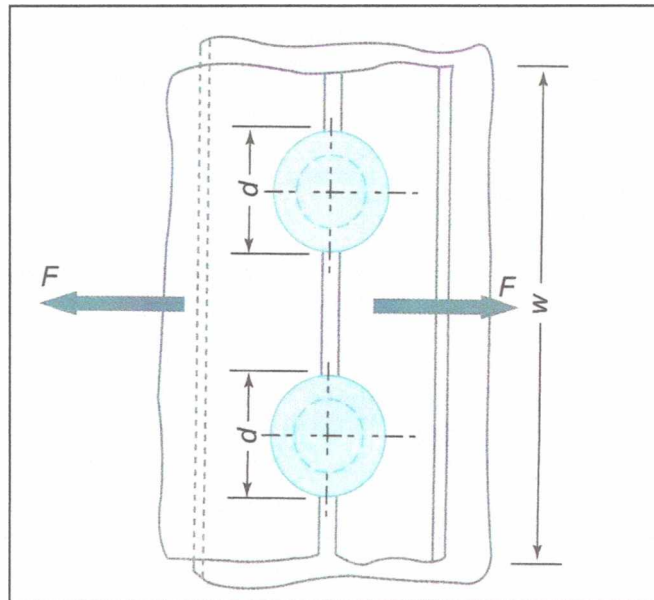
$k_t$  = συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων

$N$  = συντελεστής ασφάλειας

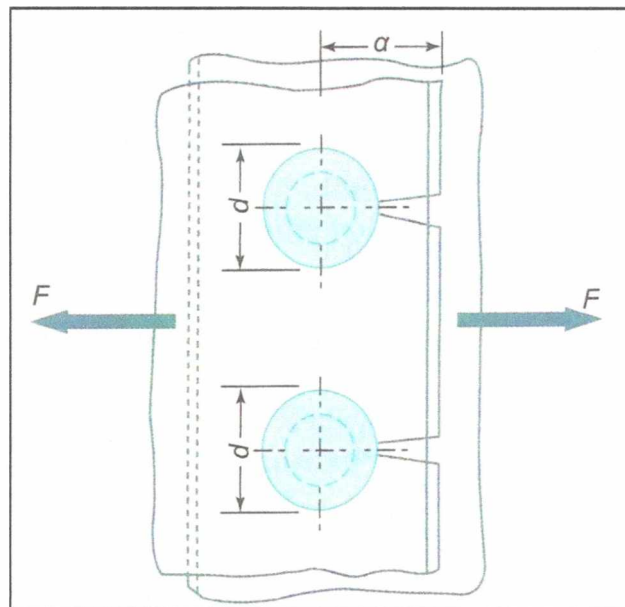




Εικόνα 54: Σύνδεση δύο ελασμάτων με διπλή αρμοκώπτρα, (Παπαδόπουλος, 2013).



Εικόνα 55: Αστοχία ελάσματος σε αποκοπή, (Παπαδόπουλος, 2013).



Εικόνα 56: Αστοχία ελάσματος σε απόσχιση, (Παπαδόπουλος, 2013).

Εφαρμόζοντας τις παραπάνω σχέσεις σε φύλλο του Excel και με επαναληπτική διαδικασία εξάγαμε τα εξής αποτελέσματα.

Δεδομένα		
Pint	60	MPa
Dint	1800	mm
τελ.	100	mm
Δυνάμεις & Τάσεις		
Fcp	152604000	N
F(ανά μονάδα μήκους)	27000	N/mm
σ/έλασμα	135	MPa

Αστοχία ήλου σε διάτμηση			
<b>N</b>	<b>1.13</b>		
n	20	# ήλων	
m	2	# καταπονούμενων διατομών/ήλο	
Sy	1100	MPa	12.9 Grade
d	100	mm	
F	152604000	N	
Αποκοπή Ελάσματος κατά μήκος της ήλωσης			
<b>N</b>	<b>1.13</b>		
w	5652	mm	
kt	2.95	-	
t	100	mm	
F/έλασμα	76302000	N	
Sy	700		

Αστοχία Ελάσματος σε Απόσχιση		
<b>N</b>	<b>2.49</b>	
<b>a</b>	200	mm
<b>Sy</b>	700	MPa
<b>t</b>	100	mm
<b>F</b>	3815100	N

Για οριακές τιμές του συντελεστή ασφαλείας καταλήγουμε σε μία συνδεσμολογία με 20 κοχλίες, Grade 12.9, M100 και ελάσματα με όριο διαρροής πάνω από 700MPa.

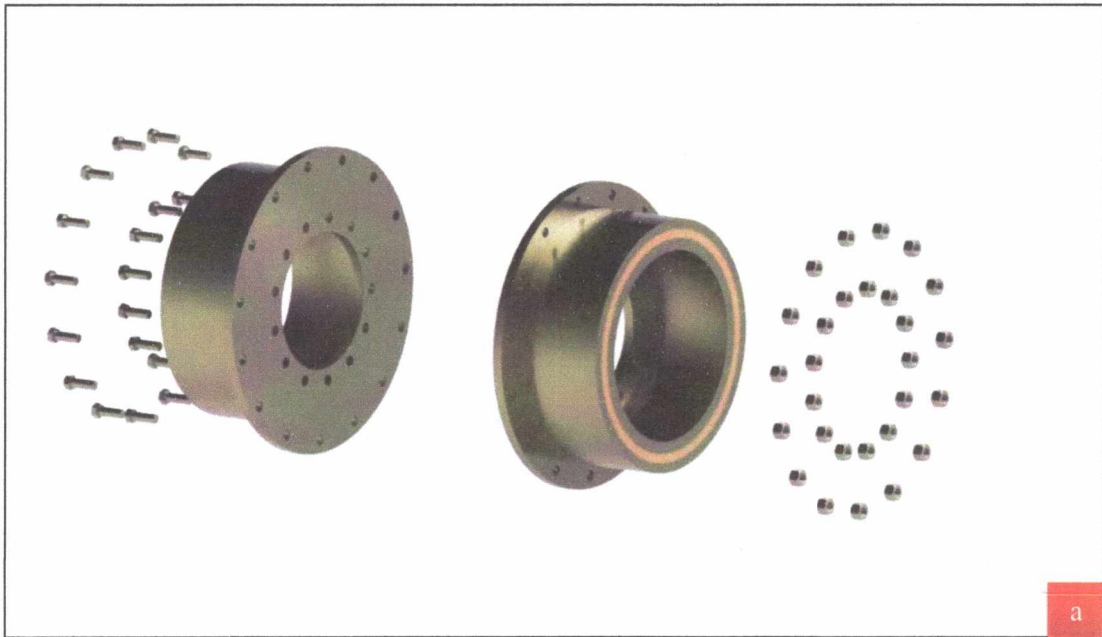


Εικόνα 57: Σχέδιο σύνδεσης κελύφους με διπλή αρμοκαλύπτρα (a) σε κατάσταση λειτουργίας του δοχείου, (b) πλήρως αποσυναρμολογημένο.



### 10.3 Σύνδεση με μετωπική φλάντζα

Ο συγκεκριμένος τύπος σύνδεσης προτείνεται καθώς συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των προηγούμενων τρόπων σύνδεσης και έχει το πλεονέκτημα πως τα κομμάτια σε συνδέονται απλώς αλλά πιέζονται ώστε να βρίσκονται συνεχώς σε επαφή. Η (Εικόνα 58) αναπαριστά τον συγκεκριμένο τρόπο σύνδεσης, ο οποίος προτείνεται να μελετηθεί και να συγκριθεί με τον τρόπο σύνδεσης με διπλη αρμοκαλύπτρα.



Εικόνα 58: Σχέδιο σύνδεσης μετωπικής φλάντζας (a) σε κατάσταση λειτουργίας του δοχείου, (b) πλήρως αποσυναρμολογημένο.

## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση φορτίσεων σε κάθε ζώνη εγκατάστασης και λειτουργίας με τη μέθοδο εγκατάστασης S-lay, (Kyriakides & Corona, 2007).....	2
Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση φορτίσεων σε κάθε ζώνη εγκατάστασης και λειτουργίας με την μέθοδο εγκατάστασης J-lay, (Kyriakides & Corona, 2007).....	3
Εικόνα 3: Πλοίο της εταιρίας Technip κατά την εγκατάσταση υποθαλάσσιων αγωγών με τη μέθοδο Reeling (a) φωτογραφία και (b) σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας της μεθόδου Reeling, (Kyriakides & Corona, 2007).....	4
Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης για μηχανικές δοκιμές αγωγών σε φόρτιση συνδυασμένης κόπωσης εξωτερικής πίεσης και κάμψης, (C-FER Technologies).....	5
Εικόνα 5: Χάρτης διαδρομής αγωγού TAP από τον Έβρο μέχρι την Ιταλία, (www.tap-ag.gr).....	8
Εικόνα 6: Αναπαράσταση της μεθόδου πόντισης υποθαλάσσιων αγωγών J-lay, (Langner, 1984).....	11
Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση των μετατοπίσεων.....	15
Εικόνα 8: Γραφική απεικόνιση της γεωμετρίας της διατομής αγωγού για τις εξής περιπτώσεις: απουσία ατέλειας, αρχική ατέλεια μορφής οβάλ, παραμορφωμένη κατάσταση.....	17
Εικόνα 9: Διάγραμμα ελευθέρου σώματος τεταρτοκύκλιου που υπόκειται σε εξωτερική πίεση.....	19
Εικόνα 10: Γραφική απεικόνιση της οβαλότητας.....	22
Εικόνα 11: Σχηματική απεικόνιση διακριτοποίησης αγωγού με 3 ζώνες διαφορετικής πυκνότητας.....	29
Εικόνα 12: Πλέγμα διδιάστατου μοντέλου δακτυλίου.....	31
Εικόνα 13: Γραφική απεικόνιση συνοριακών συνθηκών μοντέλου δακτυλίου υπό φόρτιση εξωτερικής πίεσης.....	32
Εικόνα 14: Κατανομή των τάσεων σε διδιάστατο μοντέλο δακτυλίου υπό εξωτερική πίεση.....	33
Εικόνα 15: Γραφική απεικόνιση συνοριακών συνθηκών τριδιάστατου μοντέλου υπό φόρτιση εξωτερικής πίεσης.....	37
Εικόνα 16: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.8% υπό εξωτερική πίεση, (a) σε προοπτική, (b) σε πλάγια όψη, (c) σε πρόοψη.....	42
Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση συνοριακών συνθηκών σε τριδιάστατο μοντέλο υπό κάμψη... 44	
Εικόνα 18: Σχηματική απεικόνιση ιδιομορφής της πρώτης ιδιοσυχνότητας σωλήνα, εφαρμόζοντας μοναδιαία ροπή στα άκρα του.....	45
Εικόνα 19: Σχηματική απεικόνιση ιδιομορφής της πρώτης ιδιοσυχνότητας σωλήνα, εφαρμόζοντας μοναδιαία ροπή στα άκρα του.....	46
Εικόνα 20: Σχηματική απεικόνιση γεωμετρικών χαρακτηριστικών ατέλειας μορφής ρυτιδώσεων.....	46
Εικόνα 21: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε αγωγό διαμέτρου 36in και με ατέλεια ρυτιδώσεων μεγέθους $W=0.5$ σε κάμψη. (a) Ο αγωγός βρίσκεται στο στάδιο της πλαστικοποίησής του στις περιοχές ανάμεσα στις ρυτιδώσεις. (b) Ο αγωγός βρίσκεται στο στάδιο της συγκέντρωσης των τάσεων στο κεντρικό τμήμα του. (c) Στον αγωγό έχει επέλθει τοπικός λυγισμός.....	50

Εικόνα 22: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε αγωγό διαμέτρου 36in και με ατέλεια ρυτιδώσεων μεγέθους $W=0.05$ σε κάμψη. (a) Ο αγωγός βρίσκεται στο στάδιο της πλαστικοποίησής του στις περιοχές ανάμεσα στις ρυτιδώσεις. (b) Ο αγωγός βρίσκεται στο στάδιο της συγκέντρωσης των τάσεων στο κεντρικό τμήμα του. (c) Στον αγωγό έχει επέλθει τοπικός λυγισμός. ....	51
Εικόνα 23: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.3% υπό συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης (3MPa) και κάμψης (a) στο στάδιο της πλήρους πλαστικοποίησης του αγωγού, (b) στο στάδιο της συγκέντρωσης των τάσεων στο μεσαίο τμήμα του αγωγού, (c) στο στάδιο του τοπικού λυγισμού. ....	55
Εικόνα 24: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.8% υπό συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης και κάμψης στο στάδιο του λυγισμού. ....	56
Εικόνα 25: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.01% υπό συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης και κάμψης στο στάδιο του λυγισμού. ....	56
Εικόνα 26: Σχηματική απεικόνιση μεθόδου four-Point Bending. ....	59
Εικόνα 27: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε σωλήνα διαμέτρου 36in, αρχικής οβαλότητας 0.3% υπό συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης και κάμψης με την μέθοδο four-point bending. (a) Στάδιο της πλαστικοποίησης του μεγαλύτερου τμήματός του. (b) Στάδιο της συγκέντρωσης των τάσεων σε δύο τμήματα κοντά στις στηρίξεις του. (c) Στάδιο του τοπικού λυγισμού στα δύο τμήματα κοντά στις στηρίξεις του. ....	60
Εικόνα 28: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε σωλήνα διαμέτρου 36in, αρχικής οβαλότητας 0.3% και μεγέθους ρυτιδώσεων $W=0.7$ , υπό συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης μεγέθους 3 MPa και κάμψης με την μέθοδο four-point bending. (a) Στάδιο της πλαστικοποίησης του μεγαλύτερου μέρους του. (b) Στάδιο της συγκέντρωσης των τάσεων στο κεντρικό τμήμα του και ιδιαίτερα ανάμεσα στις πτυχώσεις. (c) Τοπικός λυγισμός στο κεντρικό τμήμα του σωλήνα. ....	61
Εικόνα 29: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε σωλήνα διαμέτρου 36in, αρχικής οβαλότητας 0.3% και μεγέθους ρυτιδώσεων $W=0.7$ , υπό συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης μεγέθους 6.5 MPa και κάμψης με την μέθοδο four-point bending. (a) Στάδιο της πλαστικοποίησης του μεγαλύτερου τμήματός του. (b) Στάδιο της συγκέντρωσης των τάσεων στο κεντρικό τμήμα του. (c) Τοπικός λυγισμός στο κεντρικό τμήμα του σωλήνα. ....	62
Εικόνα 30: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε σωλήνα διαμέτρου 32in, αρχικής οβαλότητας 0.3% υπό συνδυασμένη καταπόνηση εξωτερικής πίεσης και κάμψης με την μέθοδο four-point bending. Ο αγωγός βρίσκεται στο στάδιο του λυγισμού στα δύο τμήματα κοντά στις στηρίξεις του. ....	63
Εικόνα 31: Σχηματική απεικόνιση τομής διαφόρων περιπτώσεων νευρώσεων κελύφους. ....	70
Εικόνα 32: Γραφική απεικόνιση κατανομής τάσεων στον εσωτερικό κυλινδρικού κελύφους υπό εσωτερική πίεση. ....	75



Εικόνα 33: Σχηματική απεικόνιση κατανομής τάσεων σε κέλυφος με ενισχύσεις τύπου T υπό εσωτερική πίεση.....	77
Εικόνα 34: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής .....	77
Εικόνα 35:Σχηματική αναπαράσταση πλέγματος και κατανομής τάσεων της περιοχής (α) της Εικόνας 35.....	78
Εικόνα 36: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων σε κέλυφος με ενισχύσεις τύπου H υπό εσωτερική πίεση.....	78
Εικόνα 37: Σχηματική απεικόνιση των τριών διαφορετικών επιπέδων στην μέθοδο διπλού σωλήνα, (grouting).....	79
Εικόνα 38: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής τάσεων στο εσωτερικό του κελύφους για τη μέθοδο του διπλού σωλήνα, (Abaqus).....	81
Εικόνα 39: Σχηματική αναπαράσταση πλέγματος και κατανομής τάσεων στο ημισφαιρικό άκρο, (Abaqus).....	82
Εικόνα 40:Σχηματική απεικόνιση του εξωτερικού του δοχείου πίεσης, (SolidWorks).....	83
Εικόνα 41: Διάγραμμα ελευθέρου σώματος για δοχείο πίεσης με ισαπέχοντες στηρίξεις και κατανεμημένο φορτίο σε όλο το μήκος του.....	84
Εικόνα 42: Διάγραμμα δοχείου πίεσης με γεωμετρικούς συμβολισμούς.....	84
Εικόνα 43:Απεικόνιση του εσωτερικού του δοχείου πίεσης.....	87
Εικόνα 44: Διαμήκης τομή της πειραματικής διάταξης, (SolidWorks). ....	90
Εικόνα 45:Απεικόνιση του ημισφαιρικού άκρου του δοχείου πίεσης, (α)εσωτερικά,(b)εξωτερικά,(c)τομή πλάγιας όψης. ....	92
Εικόνα 46:Προφίλ ράγας στην οποία εδράζονται οι στηρίξεις του αγωγού. ....	93
Εικόνα 47:Στηρίξεις τύπου "σέλας" του αγωγού μέσα στο δοχείο πίεσης. ....	93
Εικόνα 48: Απεικόνιση της αποσυναρμολογημένης πειραματικής διάταξης, (SolidWorks). ....	94
Εικόνα 49:Συνοριακές συνθήκες και φορτία στο μοντέλο σύνδεσης με φλάντζα και ελάσματα. ....	95
Εικόνα 50: Συνοριακές συνθήκες και φορτία στο μοντέλο σύνδεσης με φλάντζα και ελάσματα.....	96
Εικόνα 51:Πλέγμα μοντέλου συνδεσμολογίας κελύφους.....	96
Εικόνα 52:Κατανομή των τάσεων στο μοντέλο σύνδεσης με φλάντζα και ελάσματα.....	97
Εικόνα 53: Γραφική απεικόνιση της μετατόπισης κατά τον άξονα x στο μοντέλο σύνδεσης με φλάντζα και ελάσματα. ....	98
Εικόνα 54: Σύνδεση δύο ελασμάτων με διπλή αρμοκύπτρα, (Παπαδόπουλος, 2013). ....	101
Εικόνα 55:Αστοχία ελάσματος σε αποκοπή, (Παπαδόπουλος, 2013). ....	101
Εικόνα 56: Αστοχία ελάσματος σε απόσχιση, (Παπαδόπουλος, 2013). ....	101
Εικόνα 57: Σχέδιο σύνδεσης κελύφους με διπλή αρμοκαλύπτρα (α) σε κατάσταση λειτουργίας του δοχείου , (b) πλήρως αποσυναρμολογημένο.....	103
Εικόνα 58: Σχέδιο σύνδεσης μετωπικής φλάντζας (α) σε κατάσταση λειτουργίας του δοχείου, (b) πλήρως αποσυναρμολογημένο.....	104



## Πίνακας Γραφημάτων

Γράφημα 1: Αναπαράσταση της μεταβολής της οβαλότητας αγωγού σε σχέση με την μεταβολή της εξωτερικής πίεσης σύμφωνα με τις σχέσεις της αναλυτικής λύσης. ....	23
Γράφημα 2: Διάγραμμα ονομαστικής τάσης - ονομαστικής παραμόρφωσης υλικού X65. ....	28
Γράφημα 3: Διάγραμμα πραγματικής τάσης - λογαριθμικής πραγματικής παραμόρφωσης υλικού X65. ....	28
Γράφημα 4: Γραφική αναπαράσταση της μεταβολής της οβαλότητας σε σχέση με την εξωτερική πίεση με βάση το αναλυτικό και το διδιάστατο μοντέλο, (α) $\sigma_n=0.01\%$ , (b) $\sigma_n=0.1\%$ , (c) $\sigma_n=0.3\%$ , (d) $\sigma_n=0.5\%$ , (e) $\sigma_n=0.8\%$ .....	35
Γράφημα 5: Γραφική αναπαράσταση της μεταβολής της οβαλότητας σε σχέση με την εξωτερική πίεση με βάση το αναλυτικό και το διδιάστατο μοντέλο. ....	36
Γράφημα 6: Γραφική αναπαράσταση επιρροής της πίεσης αστοχίας αγωγού σε σχέση με το λόγο $L/D$ , όπου $L$ και $D$ είναι το μήκος και η εξωτερική διάμετρος του αγωγού αντίστοιχα.....	37
Γράφημα 7: Γραφική αναπαράσταση της μεταβολής της οβαλότητας σε σχέση με την εξωτερική πίεση με βάση το αναλυτικό και το τριδιάστατο μοντέλο, (α) $\sigma_n=0.01\%$ , (b) $\sigma_n=0.1\%$ , (c) $\sigma_n=0.3\%$ , (d) $\sigma_n=0.5\%$ , (e) $\sigma_n=0.8\%$ .....	40
Γράφημα 8: Γραφική αναπαράσταση της μεταβολής της οβαλότητας σε σχέση με την εξωτερική πίεση με βάση το αναλυτικό και το τριδιάστατο μοντέλο (συγκεντρωτικά αποτελέσματα).....	40
Γράφημα 9: Γραφική αναπαράσταση της μεταβολής της οβαλότητας σε σχέση με την εξωτερική πίεση με βάση το αναλυτικό και το τρισδιάστατο μοντέλο.....	40
Γράφημα 9: Μεταβολή καμπυλότητας σε σχέση με την επιβαλλόμενη ροπή σε αγωγό διαμέτρου 36in. ....	47
Γράφημα 10: Επιρροή του μήκους κύματος ατέλειας ρυτιδώσεων στην αντοχή αγωγού διαμέτρου 36in σε κάμψη. ....	49
Γράφημα 11: Μεταβολή καμπυλότητας σε σχέση με μεταβολή της επιβαλλόμενης ροπής σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.01%.....	57
Γράφημα 12: Μεταβολή καμπυλότητας σε σχέση με μεταβολή της επιβαλλόμενης ροπής σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.1%. ....	57
Γράφημα 13: Μεταβολή καμπυλότητας σε σχέση με μεταβολή της επιβαλλόμενης ροπής σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.3%. ....	57
Γράφημα 14: Μεταβολή καμπυλότητας σε σχέση με μεταβολή της επιβαλλόμενης ροπής σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.8%. ....	58
Γράφημα 15: Σύγκριση συμπεριφοράς σε κάμψη αγωγού διαμέτρου 36in για διάφορες τιμές αρχικής οβαλότητας. ....	58
Γράφημα 16: Μεταβολή της καμπυλότητας σε σχέση με την επιβαλλόμενη εγκάρσια δύναμη σε αγωγό διαμέτρου 36in, με μέγεθος ατέλειας ρυτιδώσεων $W=0.7$ και αρχικής οβαλότητας 0.3%. ....	65



Γράφημα 17: Μεταβολή της ελάχιστης απαιτούμενης εσωτερικής διαμέτρου του κελύφους της πειραματικής διάταξης σε σχέση με την επιβαλλόμενη εγκάρσια δύναμη σε αγωγό διαμέτρου 36in, με μέγεθος ατέλειας ρυτιδώσεων $W=0.7$ και αρχικής οβαλότητας 0.3%.....	65
Γράφημα 18: Μεταβολή της καμπυλότητας σε σχέση με την επιβαλλόμενη εγκάρσια δύναμη σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.1%.....	65
Γράφημα 20: Μεταβολή της καμπυλότητας σε σχέση με την επιβαλλόμενη εγκάρσια δύναμη σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.3%.....	66
Γράφημα 21: Μεταβολή της ελάχιστης απαιτούμενης εσωτερικής διαμέτρου του κελύφους της πειραματικής διάταξης σε σχέση με την επιβαλλόμενη εγκάρσια δύναμη σε αγωγό διαμέτρου 36in και αρχικής οβαλότητας 0.3%.....	66
Γράφημα 22: Μεταβολή της καμπυλότητας σε σχέση με την επιβαλλόμενη εγκάρσια δύναμη σε αγωγό διαμέτρου 32in και αρχικής οβαλότητας 0.3%.....	67
Γράφημα 23: Μεταβολή της ελάχιστης απαιτούμενης εσωτερικής διαμέτρου του κελύφους της πειραματικής διάταξης σε σχέση με την επιβαλλόμενη εγκάρσια δύναμη σε αγωγό διαμέτρου 32in και αρχικής οβαλότητας 0.3%.....	67
Γράφημα 24: Μέγιστη τάση κατά Von Misses στο κέλυφος για διάφορες τιμές πάχους.....	74
Γράφημα 25: Γραφική αναπαράσταση επιρροής διαφόρων ενισχύσεων στην μέγιστη παρατηρούμενη τάση στο πάχος του κελύφους.....	76
Γράφημα 26: Μέγιστη τάση κατά Von Misses στο ημισφαιρικό άκρο για διάφορες τιμές πάχους.....	82
Γράφημα 27: Γραφική παράσταση εγκάρσιας δύναμης προς απαιτούμενη διαδρομή πιστονιού για αγωγό διαμέτρου 36in, μέγεθος wrinkles 0.7 και αρχική οβαλότητα 0.3%.....	88
Γράφημα 28: Γραφική παράσταση εγκάρσιας δύναμης προς απαιτούμενη διαδρομή πιστονιού για αγωγό διαμέτρου 36in και αρχική οβαλότητα 0.1%.....	88
Γράφημα 29: Γραφική παράσταση εγκάρσιας δύναμης προς απαιτούμενη διαδρομή πιστονιού για αγωγό διαμέτρου 32in και αρχική οβαλότητα 0.3%.....	89

## Πίνακες

Πίνακας 1: Σχέση αρχικής ατέλειας οβαλότητας με κρίσιμη εξωτερική πίεση αστοχίας δακτυλίου. ....	24
Πίνακας 2: Τάσεις και παραμορφώσεις για χάλυβα X65.....	27
Πίνακας 3: Περιπτώσεις εξεταζόμενων σωλήνων σε συνδυασμένη καταπόνηση. ....	63
Πίνακας 4: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης σωλήνων σε συνδυασμένη καταπόνηση συγκριτικά με τα μεγέθη $P_{cr}$ και $P_y$ . ....	64
Πίνακας 5: Συντελεστές συγκόλλησης σε σχέση με τον βαθμό ελέγχου συγκολλήσεων σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 13445-5:2002.....	71
Πίνακας 6: Αποτελέσματα υπολογισμού πάχους κελύφους σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 13445-3:2002. ....	73
Πίνακας 7: Εξεταζόμενες περιπτώσεις μεθόδου διπλού σωλήνα. ....	80
Πίνακας 8: Αποτελέσματα υπολογισμού πάχους ημισφαιρικών άκρων σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 13445-3:2002. ....	81
Πίνακας 9: Αποτελέσματα ανάλυσης εντατικής κατάστασης των στηρίξεων της πειραματικής διάταξης.....	86





## Βιβλιογραφία

- Calladine, C. R. (1983). *Theory of Shell Structures*. Cambridge University Press.
- C-FER Technologies. (n.d.). <http://www.cfertech.com/downloads/pipelines-and-structures-brochure>.
- Chattopadhyay, S. (2005). *Pressure Vessels: Design and Practice*. CRC Press LLC.
- Kyriakides, S., & Corona, E. (2007). *Mechanics of Offshore Pipelines, Volume 1: Buckling and Collapse*. Oxford, UK: Elsevier.
- Langner, C. (1984). *Design of Deepwater Pipelines*. The Hague: TNO-iwego.
- Spence, J., & Tooth, A. (1994). *Pressure Vessel Design: Concepts and Principles*. E & FN SPON.
- [www.tap-ag.gr](http://www.tap-ag.gr). (n.d.).
- Zienkiewicz, O. (1977). *The Finite Element Method, Third Edition*. McGraw-Hill.
- Παπαδόπουλος, X. A. (2013). *Στοιχεία Μηχανών*. Τζιόλα.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000125613