

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

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



ΛΑΖΑΡΟΣ ΠΑΤΚΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Σ. Α. Καραμάνος

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ν. Αράβας

Α. Γιαννακόπουλος



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 2431/1

Ημερ. Εισ.: 02-03-2004

Δωρεά:

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ ΜΜΒ

2002

ΠΑΤ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000070524

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Σπύρο Καραμάνο για το ενδιαφέρον και την αμέριστη συμπαράσταση που έδειξε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε σε όλα τα επίπεδα. Θέλω από καρδιάς να ευχαριστήσω τους φίλους μου για τα πολύτιμα διδάγματα ζωής που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας και εύχομαι στον καθένα ξεχωριστά ότι καλύτερο. Μα πάνω από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω έτσι απλά τους γονείς μου...

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</u>	1
<u>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</u>	2
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ</u>	
<u>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	4
1.1 ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ ΣΕ ΜΕΓΑΛΑ ΒΑΘΗ	4
1.1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΠΙΕΣΕΙΣ	7
1.1.3 ΕΝΑΡΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ	10
1.2 ΑΝΑΣΤΟΛΗ ΤΗΣ ΥΒΩΣΗΣ	11
1.2.1 ΠΙΕΣΗ ΑΝΑΣΧΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ	13
1.3 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	14
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ</u>	
<u>ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ</u>	16
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ	18
2.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ	19
2.3.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ-ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΠΛΕΓΜΑ	20
2.3.2 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	21
2.3.3 ΑΡΧΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	23
2.3.4 ΕΠΙΒΟΛΗ ΠΙΕΣΗΣ-ΑΣΤΟΧΙΑ & ΜΕΤΑΛΥΓΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ	23
2.3.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	26
2.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ	27
2.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	28
2.5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	28
2.5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	30
2.6 ΜΙΑ ΑΠΛΟΠΟΙΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	31
2.6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	34
2.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	34
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ</u>	
<u>ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΓΩΓΩΝ</u>	36
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	36
3.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ	37
3.2.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ Ι	37
3.2.2 ΠΙΕΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΑΓΩΓΟΥ Ι	42
3.2.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΙΙ	45
3.2.4 ΠΙΕΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΑΓΩΓΟΥ ΙΙ	46

3.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ Π ΜΗΚΟΥΣ 30 ΔΙΑΜΕΤΡΩΝ	47
3.3.1 ΠΙΕΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ	48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

<u>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ-ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ</u>	51
--	-----------

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	51
4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟ Α	51
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	53
4.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ	57
4.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ Α	58
4.5 ΜΟΝΤΕΛΟ Β	58
4.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ Α & Β	59
4.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ	60
4.7.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ	60
4.7.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΤΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

<u>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>	63
----------------------------	-----------

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	65
----------------------------	-----------

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ ΣΕ ΜΕΓΑΛΑ ΒΑΘΗ

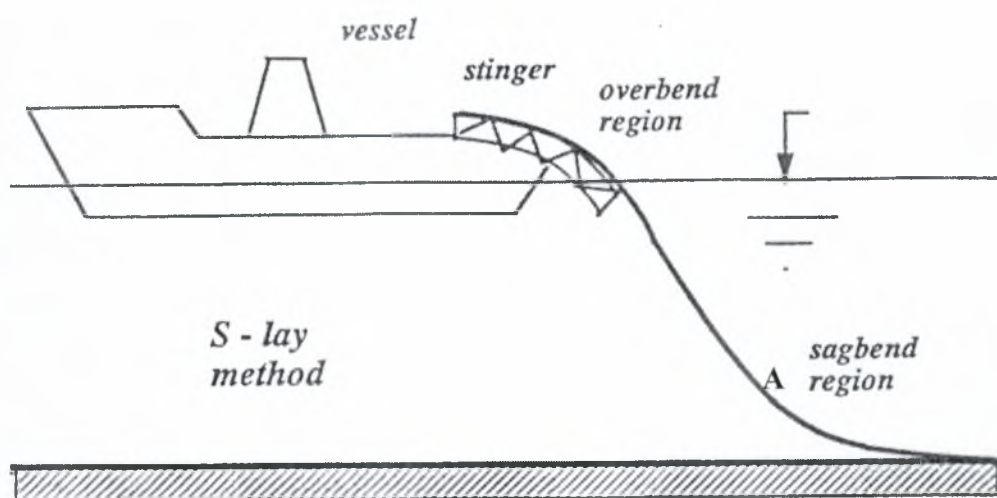
Καθώς η παγκόσμια ανάγκη για τα προϊόντα του πετρελαίου αυξάνεται και πολλές από τις φυσικές χερσαίες πηγές του εξαντλούνται, η βιομηχανία πετρελαίου αναζητά να εξερευνήσει τις εκτάσεις κοιτασμάτων του καθώς και θαλάσσια ορυκτά σε μεγάλα πλέον βάθη. Η παραγωγή θαλάσσιου πετρελαίου και φυσικού αερίου αντιπροσωπεύουν σήμερα παγκοσμίως άνω του 20% της συνολικής παραγωγής τους. Το κατά πόσο είναι εφικτή εξόρυξη σε μεγάλα βάθη εξαρτάται κυρίως από τις παρούσες τεχνολογικές ικανότητες. Έχει ήδη αντληθεί πετρέλαιο και φυσικό αέριο σε βάθη μέχρι 5000 ft ενώ είναι εν εξελίξει σχέδια για γεωτρήσεις στα 10000 ft. Πρόσφατα στις Η.Π.Α διερευνήθηκαν οι δυνατότητες παραγωγής πετρελαίου στο φαράγγι της Βαλτιμόρης (5000 ft), όπως επίσης και στην East Coast Outer Continental Shelf στον κόλπο του Μεξικού (3000 ft). Έχει επίσης διεξαχθεί άντληση πετρελαίου στα μεγάλα βάθη των Shetland Islands του Ηνωμένου Βασιλείου και της Newfoundland του Καναδά (4500 ft). Το σημαντικό όμως είναι πως τα μεγάλα θαλάσσια projects απαιτούν να εξεταστεί μια κατηγορία προβλημάτων τα οποία σχετίζονται με τη δομική επάρκεια των κατασκευών και την λειτουργία τους σε συνεχώς αυξανόμενα θαλάσσια βάθη παρουσία υψηλών πιέσεων. Ένα από τα σημαντικά φαινόμενα που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι και η διαδιδόμενη ύβωση για την δομική επάρκεια μεταλλικών υποθαλάσσιων αγωγών.



ΣΧΗΜΑ 1-1: Η ημιβυθισμένη φορτηγίδα Viking Piper (semi-sumbergible barge) κατά την διάρκεια της πρώτης επιχείρησης τοποθέτησης υποθαλάσσιων αγωγών στην βόρεια θάλασσα. Πόντιση με την μέθοδο S-lay (Veldman and Laggers,1997)

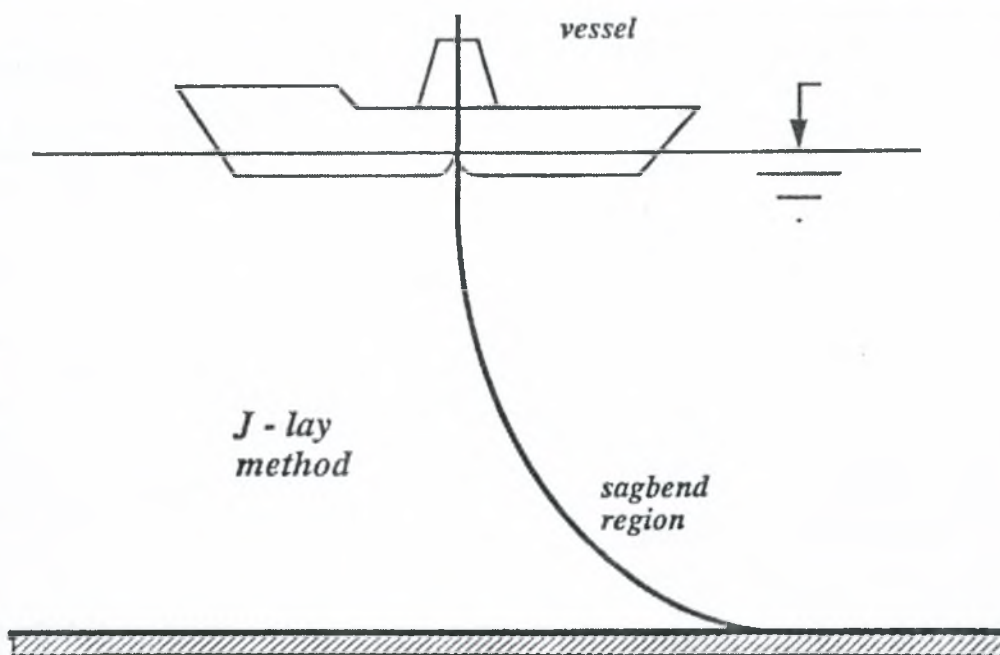
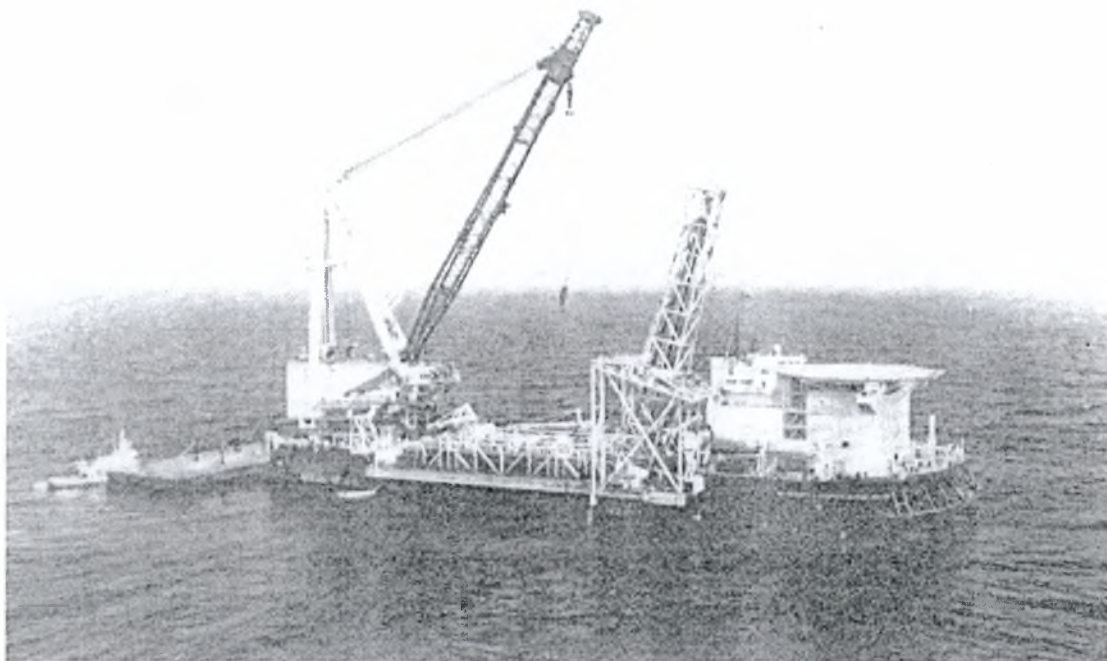
1.1.1.1 ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗ ΥΒΩΣΗ

Το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης, το οποίο παρατηρήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '70, μπορεί να συμβεί κατά την διαδικασία της πόντισης ενός σωληνωτού αγωγού μεγάλου μήκους στον πυθμένα του ωκεανού. Για την τοποθέτηση των αγωγών σε μεγάλα βάθη χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι με καταλληλότερες τις S-lay (σχήμα 1-2) και J-lay (σχήμα 1-3). Πρόσφατα έχει προταθεί και χρησιμοποιηθεί η μέθοδος reel-pipe laying που απεικονίζεται στο σχήμα 1-4.



ΣΧΗΜΑ 1-2: Η μέθοδος S-lay (Wilkins 1994).

Κατά τη διαδικασία της πόντισης ο αγωγός υπόκειται σε συνδυασμό κάμψης, εφελκυσμού καθώς και εξωτερικής υδροστατικής πίεσης. Ειδικά στην περιοχή A που σημειώνεται στο σχήμα 1-2 (sagbend region). Υπό την επίδραση λοιπόν των συνδυασμένων αυτών φορτίων είναι πολύ πιθανό να προκληθεί μια τοπική αστοχία. Μικροατέλειες (αρχικές παραμορφώσεις) μπορούν να συντείνουν στην δημιουργία της αστοχίας αυτής και οι οποίες συμβαίνουν όταν ο αγωγός βρίσκεται σε τμήματα στην φορτηγίδα (barge) ως αποτέλεσμα τυχαίας κακομεταχείρισης τμήματός του ή ακόμα και κατά την διαδικασία της παραγωγής του στο εργοστάσιο ή την μεταφορά του.



ΣΧΗΜΑ 1-3: Η Μέθοδος J-lay (Wilkins,1994).

Μετά την δημιουργία μιας τοπικής αστοχίας και όταν η υδροστατική πίεση είναι αρκετά μεγάλη εξαιτίας του μεγάλου βάθους η τοπική ύβωση μετατρέπεται σε διαδιδόμενη, προχωρά κατά την διαμήκη διεύθυνση "ισοπεδώνοντας" τον αγωγό στο πέρασμά της. Όταν το φαινόμενο αυτό συμβεί τότε ένα πολύ μεγάλο μήκος του αγωγού καταστρέφεται πλήρως.



ΣΧΗΜΑ 1-4: Μέθοδος reel-pipe laying (Veldman and Lagers,1997)

1.1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΠΙΕΣΕΙΣ

1.1.2.1 ΠΙΕΣΗ ΕΝΑΡΞΗΣ

Η κρίσιμη τιμή της πίεσης για την οποία θεωρητικά ξεκινάει το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης, η πίεση δηλαδή της πρώτης αστοχίας στο σημείο της αρχικής ατέλειας, είναι συνδυασμός δυο πιέσεων και μπορεί να υπολογιστεί (προσεγγιστικά) από την ακόλουθη σχέση (Langner,1984):

$$p_{cr} = \frac{p_e p_y}{\sqrt{p_e^2 + p_y^2}} \quad (1.1)$$

όπου p_e είναι το κρίσιμο φορτίο λυγισμού για ελαστικό δακτύλιο υπό ομοιόμορφη εξωτερική πίεση:

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

όπου E το μέτρο Ελαστικότητας, ν ο λόγος του Poisson, t το πάχος και D_m η μέση διάμετρος του δακτυλίου αντίστοιχα. Η πίεση p_e υπολογίζεται από την θεωρία της ευστάθειας των δακτυλίων (Brush & Almroth,1975) και για κυλινδρικά κελύφη με

λόγο διαμέτρου προς πάχος κελύφους (D/t) μεγαλύτερο από $30 \left(\frac{D}{t} \geq 30 \right)$, ισχύει:

$$p_{cr} = p_e$$

Σημειώνουμε πως ο τύπος (1.2) ισχύει για σωλήνες που έχουν ελαστική συμπεριφορά, μηδενικές αρχικές ατέλειες και αποτελεί το ανώτερο-θεωρητικό-όριο αστοχίας ενός σωλήνα υπό ομοιόμορφη εξωτερική πίεση.

Η πίεση p_y είναι η τιμή της εξωτερικής πίεσης που απαιτείται για την πλήρη πλαστικοποίηση της διατομής ενός κυλινδρικού κελύφους, η οποία επίσης υπολογίζεται για λεπτότοιχα κυλινδρικά κελύφη με απλές σχέσεις Αντοχής Υλικών:

$$p_y = 2\sigma_y \frac{t}{D_m} \quad (1.3)$$

όπου σ_y το όριο διαρροής του υλικού από το οποίο αποτελείται ο αγωγός. Για $D/t \leq 20$ η κρίσιμη πίεση γίνεται περίπου ίδια με την τιμή της p_y , $p_{cr} = p_y$. Γενικά το όριο μεταξύ ελαστικής και πλαστικής αστοχίας καθορίζεται από την εξίσωση της p_e με την p_y και είναι:

$$\left(\frac{D}{t} \right)_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{E}{\sigma_y(1-\nu^2)}} \quad (1.4)$$

Η πραγματική πίεση λυγισμού που αποτελεί την πίεση έναρξης p_i του φαινομένου, είναι μικρότερη της κρίσιμης πίεσης p_{cr} , γιατί οι αγωγοί έχουν συνήθως αρχικές ατέλειες οι οποίες μειώνουν την πίεση αστοχίας. Ισχύει δηλαδή ότι:

$$p_i \leq p_{cr} \quad (1.5)$$

1.1.2.2 ΠΙΕΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

Μόλις ο αγωγός αστοχήσει σε ένα σημείο, η υπόψη διατομή "ισοπεδώνεται" και υπό σταθερή πίεση αυτό το φαινόμενο της ύβωσης αρχίζει να διαδίδεται. Όταν το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης ξεκινήσει, η ελάχιστη πίεση που χρειάζεται για να το διατηρήσει, ονομάζεται πίεση διάδοσης, p_p , και είναι πολύ μικρότερη της κρίσιμης πίεσης λυγισμού. Σε συνήθεις εφαρμογές:

$$\frac{1}{10} p_i \leq p_p \leq \frac{1}{5} p_i \quad (1.6)$$

Οι Palmer & Martin (1975) ήταν οι πρώτοι που κατέληξαν σε μια απλή αναλυτική εξίσωση για τον υπολογισμό της πίεσης διάδοσης κυλινδρικών κελυφών (αγωγών) μεγάλου μήκους, θεωρώντας έναν απλό πλαστικό μηχανισμό :

$$p_p = \pi \sigma_y \left(\frac{t}{D} \right)^2 \quad (1.7)$$

όπου σ_y είναι το όριο διαρροής του υλικού (στο πείραμα του μονοαξονικού εφελκυσμού το σ_y είναι συνήθως η τάση που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση ίση με 0.005), ενώ t και D το πάχος και η εξωτερική διάμετρος αντίστοιχα του δακτυλίου και επομένως και του αγωγού. Η απόδειξη της σχέσης (1.7) γίνεται στο 2^ο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας.

Οι Kyriakides & Babcock (1982) διεξάγοντας πειράματα τόσο σε χαλύβδινους αγωγούς, όσο και σε αγωγούς κραμάτων αλουμινίου, κατέληξαν στην ακόλουθη εμπειρική εξίσωση για τον υπολογισμό της πίεσης διάδοσης:

$$p_p = A \sigma_0 \left(\frac{t}{D} \right)^\beta \quad (1.8)$$

όπου οι συντελεστές A και β εξαρτώνται από το υλικό του εκάστοτε αγωγού (π.χ χάλυβας, αλουμίνιο). Για σχεδιασμό αγωγών χάλυβα οι τιμές των συντελεστών είναι $A=14.5$ και $\beta=2.254$, ενώ για αγωγούς αλουμινίου οι αντίστοιχες τιμές είναι $A=11.3$ και $\beta=2.281$. Αν θέσουμε $A=\pi$ και $\beta=2$ η σχέση (1.8) ισοδυναμεί με την (1.9) των Palmer & Martin (1975).



ΣΧΗΜΑ 1-5: Διαδιδόμενη ύβωση σε πραγματικό αγωγό (Ocean Ind. Mag. Mar. 1977).

Συσχετίζοντας την αστοχία διαστάσεων δακτυλίων με το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης οι Kyriakides και Babcock βάσει πειραματικών δεδομένων στην ίδια δημοσίευση (1982) κατέληξαν στην ακόλουθη εμπειρική εξίσωση για την πίεση διάδοσης, η οποία αποτελεί βελτίωση της σχέσεως (1.8):

$$p_p \approx \left[10.7 + 0.54 \left(\frac{E'}{\sigma_y} \right) \right] \sigma_y \left(\frac{t}{D} \right)^{2.25} \quad (1.9)$$

όπου D η εξωτερική διάμετρος και t το πάχος του αγωγού, σ_y το όριο διαρροής του υλικού που αντιστοιχεί σε μόνιμη παραμόρφωση $\varepsilon_y = 0.005$ και E' το μέτρο σκλήρυνσης του υλικού

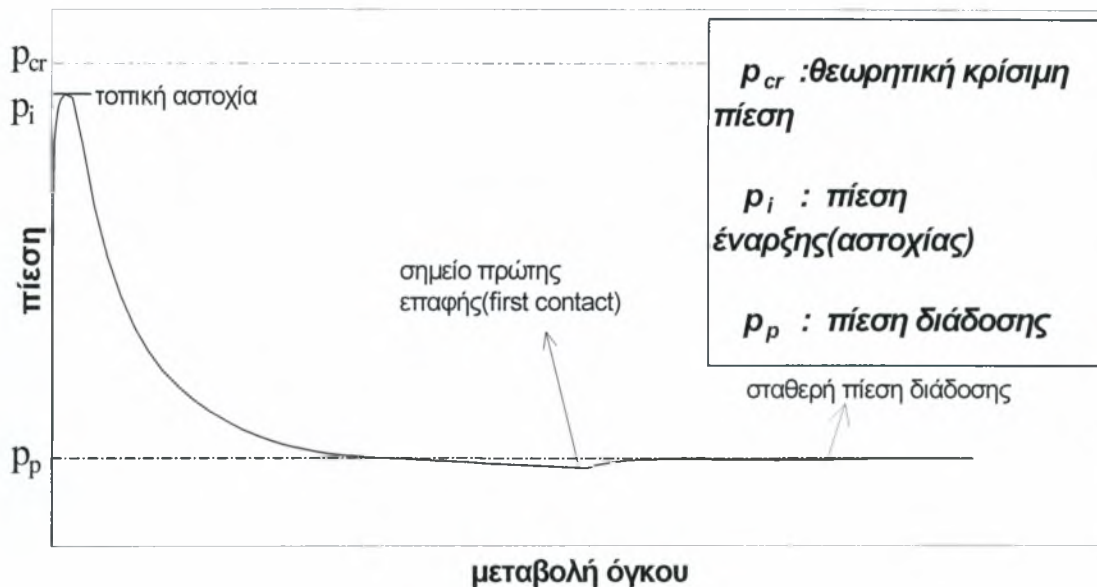
1.1.3 ΕΝΑΡΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι η έναρξη του φαινομένου συμβαίνει για τιμές της πίεσης μεταξύ της κρίσιμης πίεσης λυγισμού, p_{cr} και της πίεσης διάδοσης, p_p , και μάλιστα :

$$p_p \ll p_i \leq p_{cr} \quad (1.10)$$

Η πίεση έναρξης p_i ή αλλιώς πίεση πρώτης αστοχίας εξαρτάται, όπως ήδη ειπώθηκε, από την αρχική ατέλεια. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της αρχικής ατέλειας τόσο μικρότερη είναι η τιμή της πίεσης έναρξης (πίεση αστοχίας). Στο διάγραμμα του σχήματος 1-6 φαίνεται ποιοτικά η τιμή της ομοιόμορφα εξωτερικά επιβαλλόμενης πίεσης σε σχέση με τη παραμόρφωση του σωλήνα κατά το φαινόμενο της διάδοσης (δρόμος ισορροπίας). Η παραμόρφωση εκφράζεται ως η μεταβολή του όγκου που περικλείει ο σωλήνας. Αρχικά η τιμή της πίεσης ανεβαίνει απότομα και φτάνει στην πίεση πρώτης αστοχίας με πάρα πολύ μικρή μεταβολή όγκου. Αφού συμβεί η τοπική αστοχία-ύβωση (buckle) στη διατομή του αγωγού όπου υπήρχε η αρχική ατέλεια, η πίεση αρχίζει να μειώνεται αισθητά και παίρνει την χαμηλότερη τιμή της κατά την πρώτη επαφή (contact) δυο αντιδιαμετρικών σημείων της συγκεκριμένης διατομής. Στο σημείο αυτό η διατομή αυτή έχει καταρρεύσει πλήρως και γίνεται σχεδόν επίπεδη. Με παρόμοιο τρόπο και με μια μικρή αύξηση της πίεσης το φαινόμενο διαδίδεται στις γειτονικές διατομές (propagating buckle) "σαρώνοντας" την μία μετά την άλλη με αποτέλεσμα την καταστροφή του αγωγού κατά την διαμήκη κατεύθυνση.

Κατά την διάδοση η τιμή της πίεσης παραμένει σταθερή ($p = p_p$). Η τιμή αυτή είναι η πίεση διάδοσης.

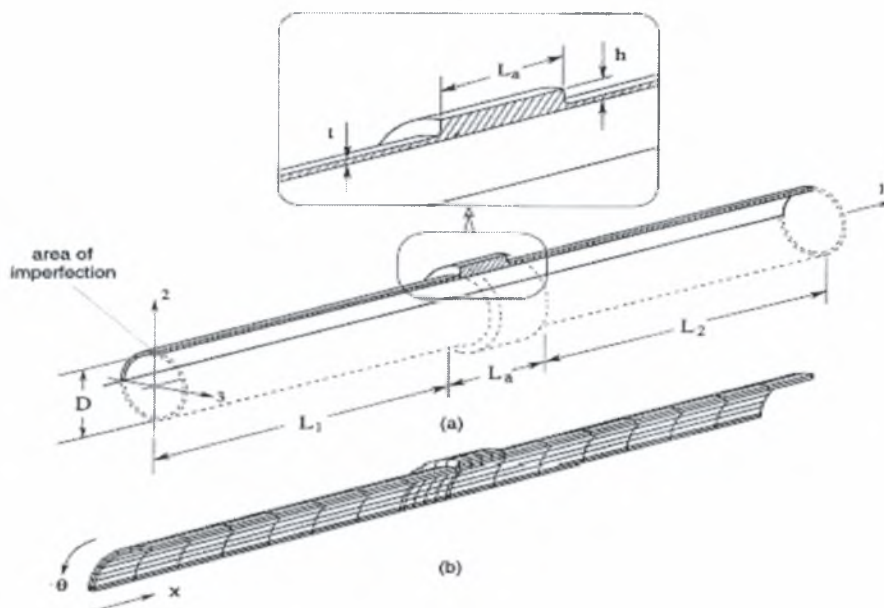


ΣΧΗΜΑ 1-6: Δρόμος ισορροπίας κατά την διάρκεια της διαδιδόμενης ύβωσης.

1.2 ΑΝΑΣΤΟΛΗ ΤΗΣ ΥΒΩΣΗΣ

Γίνεται σαφές πως η διαδιδόμενη ύβωση αποτελεί ένα καταστροφικό για τον αγωγό φαινόμενο, αφού 'ισοπεδώνει' ένα μεγάλο μήκος του. Το φαινόμενο σταματά όταν η υδροστατική πίεση γίνει χαμηλότερη της πίεσης διάδοσης. Εξαιτίας όμως του μεγάλου βάθους (6000 ft) αυτό θα συμβεί αφού έχουν προηγουμένως καταστραφεί αρκετές εκατοντάδες μέτρα αγωγού και επομένως προτιμάται η αναστολή της διαδιδόμενης ύβωσης με την περιοδική τοποθέτηση κατάλληλων μηχανισμών αναστολής (buckle arrestors). Πρόκειται για δακτυλίους με εσωτερική διάμετρο ίση με του αγωγού αλλά σημαντικά μεγαλύτερου πάχους (σχήμα 1-7). Πρέπει να τονιστεί πως οι μεταλλικοί αγωγοί που εξετάζονται έχουν πολύ μεγάλο μήκος και υπόκεινται σε μεγάλες πιέσεις αφού πρόκειται να τοποθετηθούν σε μεγάλα βάθη που φτάνουν μέχρι και τα 6000 ft ($\approx 1,8$ km) κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Κατασκευάζονται τμηματικά, αποτελούνται δηλαδή από διαδοχικά τμήματα, σχετικά μικρού μήκους (της τάξης των 20-30 μέτρων) τα οποία συγκολλούνται μεταξύ τους

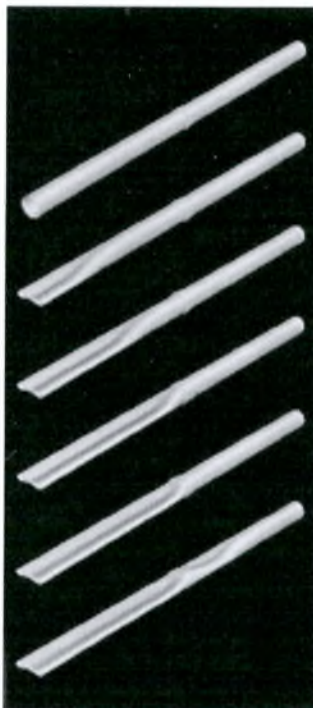
πάνω στην φορτηγίδα κατά την διάρκεια της πόντισης. Οι δακτύλιοι που χρησιμοποιούνται για την αναστολή του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης (αναστολείς ή arrestors) βρίσκονται συγκολλημένοι ανάμεσα στα διαδοχικά τμήματα του αγωγού. Η συγκόλληση των αναστολέων γίνεται επίσης πάνω στην φορτηγίδα



ΣΧΗΜΑ 1-7: Αναστολέας διαδιδόμενης ύβωσης (Netto & Kyriakides, 1999)

κατά την διαδικασία της πόντισης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται ανάλυση των αναστολέων της μορφής integral-ring, οι οποίοι έχουν τις περισσότερες εφαρμογές σε μεγάλα βάθη. Στις εφαρμογές συναντώνται και διάφοροι άλλοι τύποι αναστολέων όπως οι welded-ring, οι slip on και οι spiral, οι οποίοι διαφέρουν στο σχήμα, την διαδικασία τοποθέτησης στον πετρελαιοαγωγό, καθώς και στον τρόπο συμπεριφοράς τους για την αντιμετώπιση της διαδιδόμενης ύβωσης.

Στόχος της τοποθέτησης των αναστολέων είναι ο περιορισμός του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης σε ένα συγκεκριμένο τμήμα του πετρελαιοαγωγού. Και αυτό γιατί η τοπικά αυξημένη ακαμψία των διατομών με τους αναστολείς, λόγω του μεγαλύτερου πάχους, τους καθιστούν ένα ισχυρό εμπόδιο για την διάδοση της ύβωσης. Το τμήμα αυτό του αγωγού, στο οποίο με την βοήθεια των αναστολέων περιορίστηκε το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης, με κατάλληλη τεχνολογία αφαιρείται και αντικαθίστανται από ένα άλλο της ίδιας γεωμετρίας και υλικού.



ΣΧΗΜΑ 1-8: Διαδοχικά στάδια της διαδιδόμενης ύβωσης και της αναστολής της (Netto & Kyriakides,1999)

1.2.1 ΠΙΕΣΗ ΑΝΑΣΧΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ

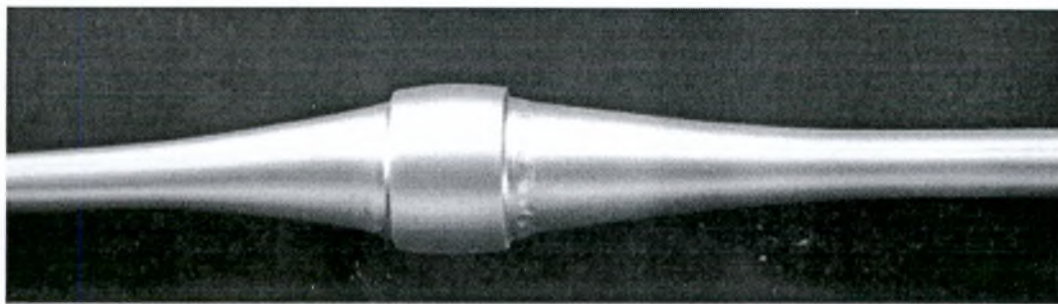
Στην περίπτωση της αναστολής χαρακτηριστική πίεση αποτελεί η cross-over πίεση ή πίεση ανάσχεσης (συμβολίζεται με p_{co}), την οποία αν η εξωτερικά ομοιόμορφη επιβαλλόμενη πίεση υπερβεί συνεχίζει την διάδοσή της στο τμήμα του αγωγού μετά τον αναστολέα (σχήμα 1-9). Διαφορετικά, αν δηλαδή η εξωτερικά εφαρμοζόμενη πίεση είναι μικρότερη της πίεσης ανάσχεσης, το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης αναστέλλεται.

Η πίεση ανάσχεσης εξαρτάται από τις διαστάσεις του αναστολέα (μήκος L_a και πάχος t_a) σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του αγωγού (D, t). Ο λόγος:

$$e = \frac{P_{co}}{P_p} \quad (1.11)$$

ονομάζεται αποτελεσματικότητα (efficiency) του αναστολέα και είναι μεγαλύτερος της μονάδας, ώστε :

$$P_{co} > P_p \quad (1.12)$$



ΣΧΗΜΑ 1-9: Διάδοση του φαινομένου μετά τον αναστολέα (Netto & Kyriakides,1999)

Σε ορισμένες εργασίες (Netto & Estefen,1996, Park & Kyriakides,1997, Kyriakides et al.1998, Netto & Kyriakides,2000) ορίζεται η ανηγμένη αποτελεσματικότητα (normalized efficiency) ως ο λόγος:

$$n = \frac{P_{co} - P_p}{P_i - P_p} \quad (1.13)$$

Επίσης θα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$P_{co} \leq P_i \quad (1.14)$$

γιατί διαφορετικά και παρά το ότι οι αναστολές εμποδίζουν θεωρητικά την διάδοση της ύβωσης, η πίεση θα ισοπεδώσει λόγω λυγισμού τα τμήματα του αγωγού εκατέρωθεν του αναστολέα κάτι που θα συμβεί σε όλα τα τμήματα από τα οποία αποτελείται ο αγωγός. Δεδομένου επίσης ότι η κατασκευή των αναστολέων έχει ιδιαίτερα μεγάλο κόστος λόγω της μεγάλης ποσότητας υλικού και των συγκολλήσεων, τίθεται θέμα βέλτιστου σχεδιασμού.

1.3 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατανόηση του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης και η αριθμητική προσομοίωσή του καθώς και της αναστολής του σε υποθαλάσσιους αγωγούς με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για τον σκοπό αυτό γίνεται χρήση του υπολογιστικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Πρόκειται για ένα υπολογιστικό πρόγραμμα όπου σχεδιάζονται γραφικά τα μοντέλα αγωγών (pre-processing) στα οποία με την επιβολή των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών και φορτίων προσομοιώνεται και με την χρήση μη γραμμικών ελαστοπλαστικών πεπερασμένων στοιχείων αναλύεται λεπτομερώς το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης και της αναστολής της.

Στο 2^ο κεφάλαιο εξετάζεται η αστοχία των δακτυλίων σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης ως μια πρώτη εκτίμηση του μεγέθους της πίεσης διάδοσης, θεωρώντας ότι κάθε δακτύλιος αντιπροσωπεύει μια από τις διαδοχικές διατομές του αγωγού που "ισοπεδώνονται" (flattening) από το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης.

Στο 3^ο κεφάλαιο προσομοιώνονται τρισδιάστατα κυλινδρικά κελύφη σωληνωτών αγωγών μεγάλου μήκους για τον ακριβέστερο υπολογισμό της πίεση διάδοσης, ενώ γίνεται και μια σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από την ανάλυση των δακτυλίων του δευτέρου κεφαλαίου.

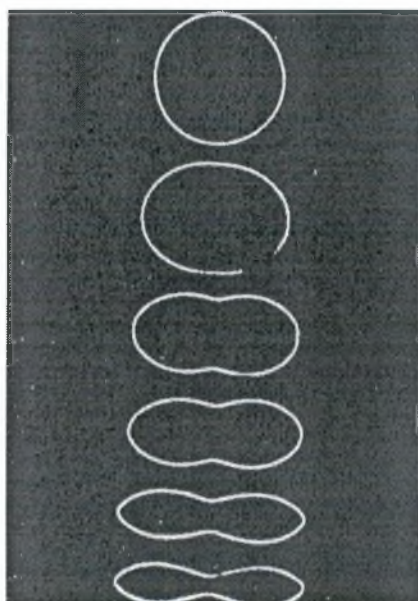
Στο 4^ο κεφάλαιο προσομοιώνονται σωληνωτοί αγωγοί μεγάλου μήκους με αναστολές διαδιδόμενης ύβωσης. Χρησιμοποιούνται διάφορα μήκη και πάχη αναστολέων με στόχο την εξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων για την επιρροή των διαστάσεων του αναστολέα στην πίεση ανάσχεσης.

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

2 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ

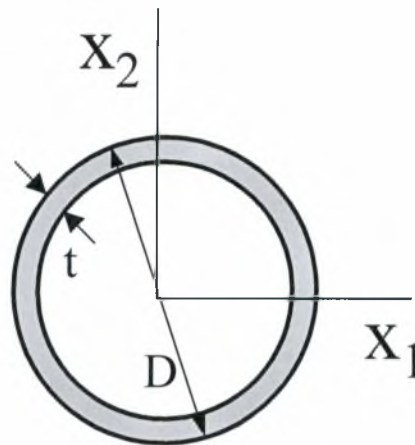
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η δισδιάστατη αστοχία δακτυλίων σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain) ως μια πρώτη προσέγγιση να υπολογιστεί πίεση διάδοσης του φαινομένου σε υποθαλάσσιους αγωγούς. Η προσέγγιση αυτή βασίστηκε στην διαπίστωση πως οι διαδοχικές διατομές κάθε αγωγού, στον οποίο λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης, μοιάζουν με τις παραμορφωμένες μορφές ενός δακτυλίου καθώς αυτός αστοχεί λόγω αστάθειας όπως φαίνεται στα πειραματικά αποτελέσματα των Kyriakides & Babcock (1982). Κάθε ένας λοιπόν από τους δακτυλίους που χρησιμοποιούνται για την παρακάτω δισδιάστατη ανάλυση ουσιαστικά αντιπροσωπεύει μια από τις διατομές του αντίστοιχου αγωγού.



ΣΧΗΜΑ 2-1: Παραμορφωμένες μορφές δακτυλίου κατά την αστοχία του (Kyriakides & Babcock,1982)

Συγκεκριμένα στην παρούσα ανάλυση προσομοιώνονται δακτύλιοι ως κελύφη (shells) με μικρό σχετικά μήκος κατά τον διαμήκη άξονα X_3 . Η ανάλυση πραγματοποιείται σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain) στο εγκάρσιο επίπεδο X_1 - X_2 , ενώ τα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη δεν έχουν εξάρτηση από την διαμήκη μεταβλητή X_3 .



ΣΧΗΜΑ 2-2: Δακτύλιος

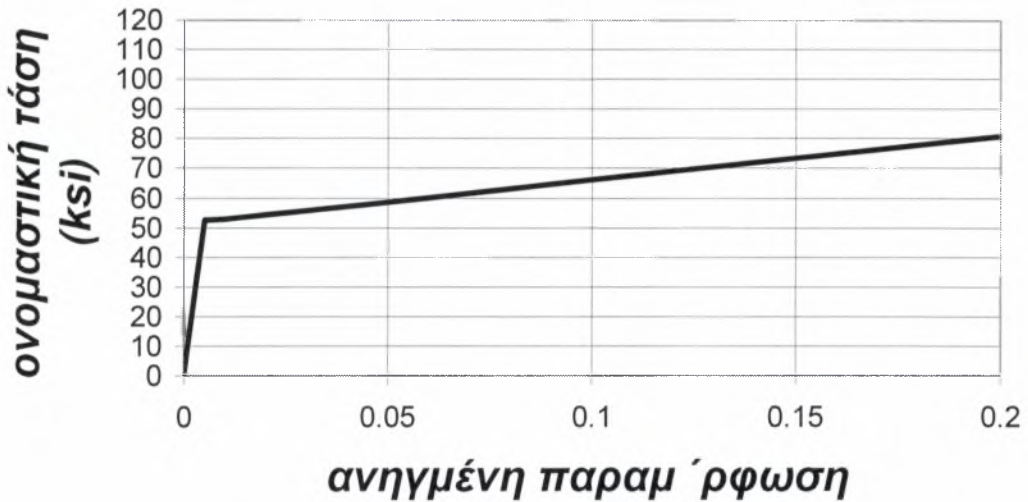
Η μελέτη του φαινομένου χρησιμοποιώντας το μοντέλο του δακτυλίου στοχεύει σε μια πρώτη εκτίμηση της πίεσης διάδοσης p_p , δηλαδή της κυριότερης παραμέτρου που χαρακτηρίζει τη διαδιδόμενη ύβωση.

Βασικό πλεονέκτημα της δισδιάστατης ανάλυσης του φαινομένου είναι η σχετικά εύκολη και κυρίως γρήγορη (μικρός υπολογιστικός χρόνος) εξαγωγή αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας είτε μια ημι-αναλυτική μέθοδο (Kyriakides & Arikan, 1983) είτε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (Jensen 1988, Tassoulas et al 1990). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το πρόγραμμα ABAQUS.

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται δύο δακτύλιοι οι οποίοι διαφέρουν στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους (εξωτερική διάμετρος, πάχος κελύφους) καθώς και στο υλικό τους. Οι δακτύλιοι και το υλικό τους αποτελούν διατομές τυπικών σωλήνων που χρησιμοποιούνται ευρέως σε πρακτικές εφαρμογές για υποθαλάσσιους αγωγούς πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Οι δακτύλιοι υφίστανται μεγάλες παραμορφώσεις και δημιουργούνται γεωμετρικές μη γραμμικότητες κατά την πλαστική τους κατάρρευση. Η θεώρηση γεωμετρικής μη γραμμικότητας έγινε στο ABAQUS με την υποεντολή 'nlgeom' μέσα στην εντολή 'step' που καθορίζει τα βήματα με τα οποία θα προχωρήσει η μη γραμμική ανάλυση.

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ

Ο δακτύλιος I έχει διάμετρο $D_{out} = 12in$ και πάχος $t = 0.2353in$. Το υλικό του είναι χάλυβας X-52 με μέτρο ελαστικότητας E ίσο με $2.95 \times 10^7 psi$, λόγο Poisson ν ίσο με 0.3 όριο διαρροής σ_y ίσο με $52000 psi$ και μέτρο σκλήρυνσης E' ίσο με $147.5 \times 10^3 psi$



ΣΧΗΜΑ 2-3: Διγραμμική καμπύλη ονομαστικής τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης δακτυλίου I.

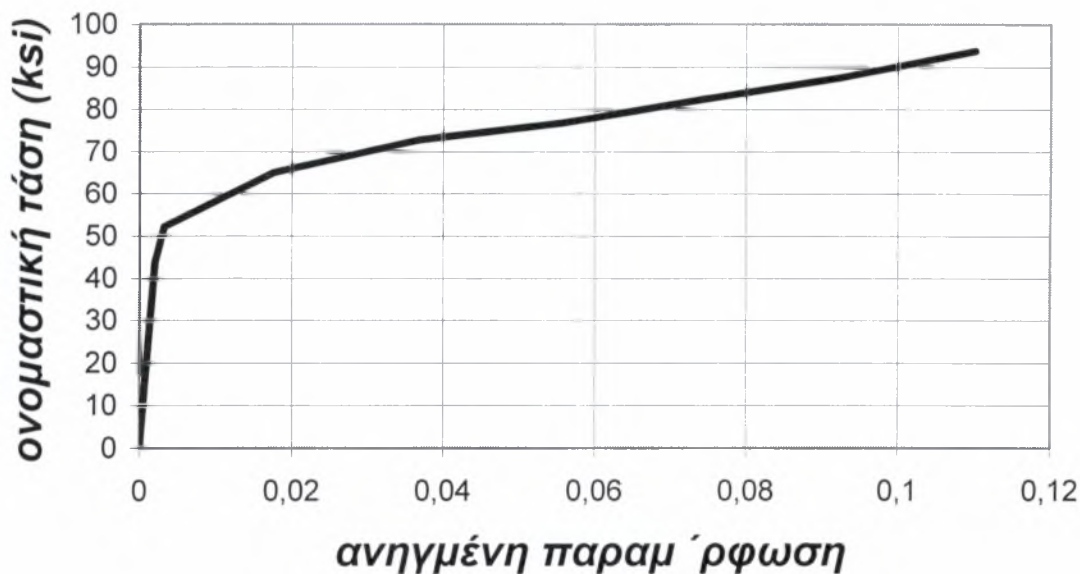
Λαμβάνεται ένας επαρκής αριθμός ζευγών τιμών $(\sigma_{nom}, \varepsilon_{nom})$ πάνω στην διγραμμική καμπύλη του σχήματος 2-3, για να περιγραφεί η ελαστοπλαστική συμπεριφορά του δακτυλίου I ενώ με την βοήθεια των σχέσεων:

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom}) \quad (2.1)$$

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

οι τιμές αυτές μετατρέπονται σε τιμές πραγματικής τάσης και λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης. Με $[\cdot]^p$ συμβολίζεται η λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση. Τα ζεύγη τιμών $(\sigma_{nom}, \varepsilon_{nom})$ μετατρέπονται σε ζεύγη $(\sigma_{true}, \varepsilon_{ln}^p)$ και είναι αυτά που μαζί με το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο Poisson δίνονται στο πρόγραμμα ABAQUS ως δεδομένα υλικού για τους υπολογισμούς

Ο δακτύλιος II έχει διάμετρο $D = 12.75in$ και πάχος $t = 0.25in$. Η καμπύλη ονομαστικής τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης του υλικού του δακτυλίου II φαίνεται στο σχήμα 2-4. Πρόκειται για χάλυβα X-52 με μέτρο ελαστικότητας και λόγο Poisson



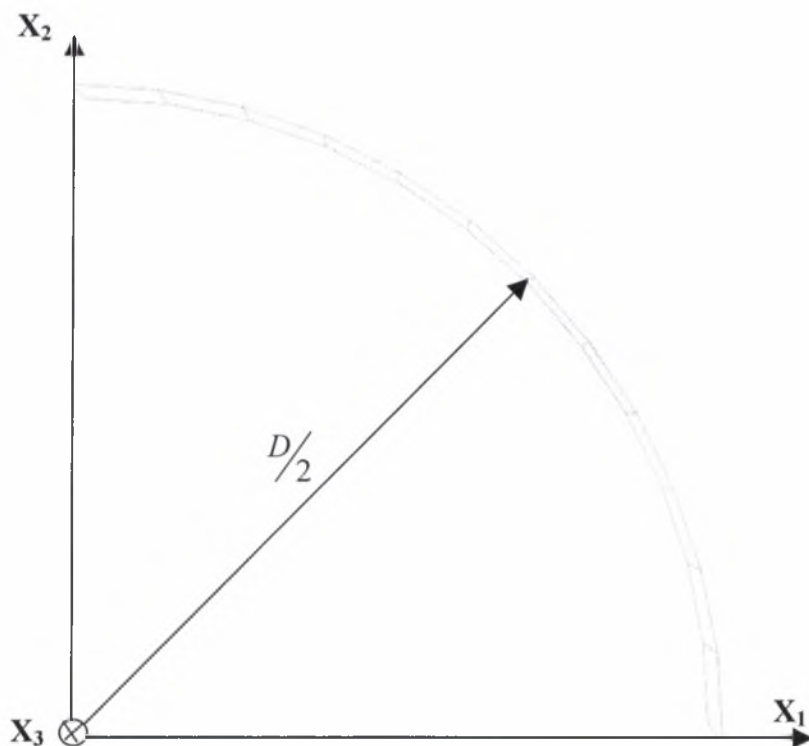
ΣΧΗΜΑ 2-4: Καμπύλη ονομαστικής τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης δακτυλίου II

ίδια με αυτά του υλικού του δακτυλίου I. Το όριο διαρροής του είναι επίσης $\sigma_y = 52000psi$ που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση $\epsilon_y = 0.005$ όπως φαίνεται και στο σχήμα 2-4, αλλά το διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ είναι διαφορετικό. Λαμβάνεται και εδώ ένας επαρκής αριθμός ζευγών τιμών $(\sigma_{nom}, \epsilon_{nom})$ πάνω στην καμπύλη του σχήματος 2-4, τα οποία με την βοήθεια των σχέσεων (2.1) και (2.2) μετατρέπονται σε ζεύγη τιμών $(\sigma_{true}, \epsilon_{ln}^p)$ και μαζί με το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο Poisson δίνονται ως δεδομένα του υλικού.

2.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Στόχος της παραμετρικής μελέτης που διεξάγεται είναι η επιλογή του κατάλληλου αριθμού στοιχείων κατά μήκος της περιφέρειας του δακτυλίου ο οποίος και θα χρησιμοποιηθεί σε όλες τις αριθμητικές προσομοιώσεις από εδώ και στο εξής. Εξαιτίας της συμμετρίας του δακτυλίου ως προς τα επίπεδα X_1-X_2 και X_2-X_3 σε όλες

τις προσομοιώσεις του παρόντος κεφαλαίου θεωρείται μόνο το ένα τέταρτο του δακτυλίου (σχήμα 2-5). Οι αντίστοιχες συνθήκες συμμετρίας περιγράφονται σε επόμενη παράγραφο.



ΣΧΗΜΑ 2-5: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση των δακτυλίων.

Προσομοιώθηκαν δακτύλιοι τύπου I χρησιμοποιώντας 7 ως 15 στοιχεία κατά μήκος του ενός τετάρτου της περιφέρειας αντίστοιχα. Χρησιμοποιήθηκε κάθε φορά ένα στοιχείο κατά τον διαμήκη άξονα X_3 . Τα μοντέλα έχουν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και αποτελούνται από το ίδιο υλικό. Ακολουθώς περιγράφεται η αριθμητική προσομοίωση ενός από τους δακτυλίους χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

2.3.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ-ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΠΛΕΓΜΑ

Ο δακτύλιος είναι τύπου I με εξωτερική διάμετρο $D_{out} = 12in$, πάχος κελύφους $t = 0.2353in$, μήκος κατά τον διαμήκη άξονα 3 ίσο με $0.785in$ και αποτελείται από το υλικό του σχήματος 2-3.

Για την αριθμητική του προσομοίωση χρησιμοποιούνται τετρακομβικά, μη γραμμικά, ελαστοπλαστικά, πεπερασμένα στοιχεία κελύφους, μειωμένης ολοκλήρωσης, τύπου S4R τα οποία είναι τοποθετημένα στην εξωτερική επιφάνεια του κελύφους (αυτό

δηλώνεται στο υπολογιστικό πρόγραμμα με την υποεντολή $offset = 0.5$ μέσα στην εντολή Shell section όπου ορίζεται το πάχος του κελύφους).

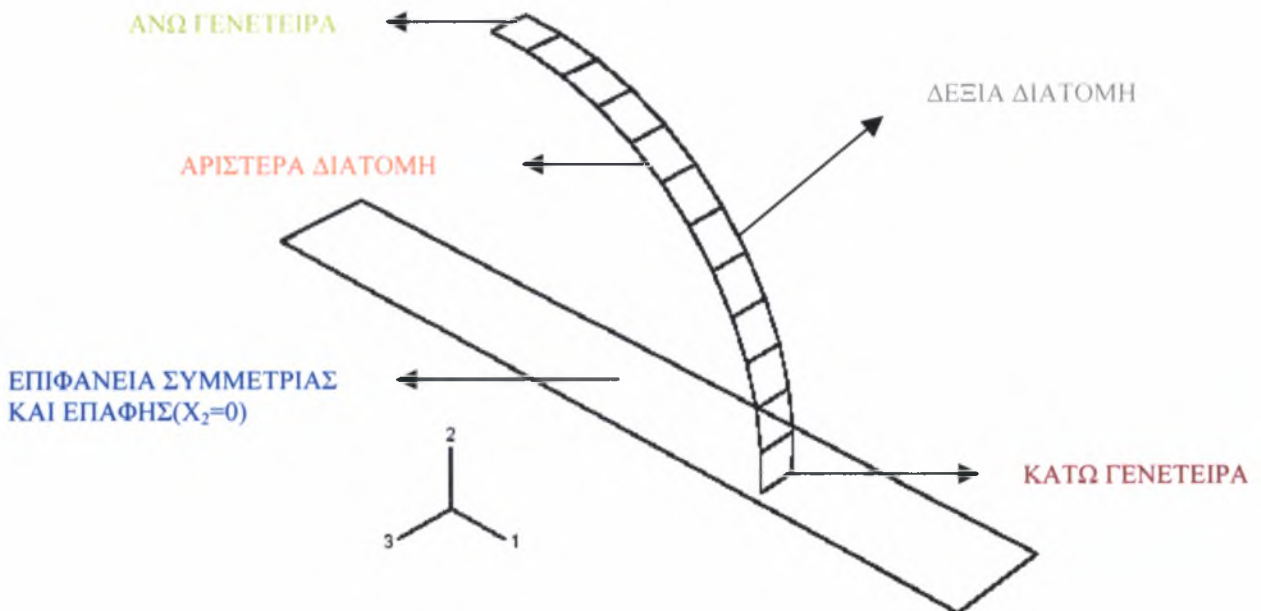
Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων της εξωτερικής επιφάνειας του κελύφους αποτελείται συνολικά από N στοιχεία και $(2N + 2)$ κόμβους, ενώ χρησιμοποιείται ένα στοιχείο κατά την διαμήκη έννοια.

2.3.2 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Στο αρχικό βήμα (initial step) της μη γραμμικής ανάλυσης που ακολουθείται στο ABAQUS δηλώνονται οι εξής συνοριακές συνθήκες:

ΑΝΩ ΓΕΝΕΤΕΙΡΑ

Οι κόμβοι που ανήκουν στην άνω γενέτειρα, έχουν μηδενική συντεταγμένη ως προς τον άξονα 1 (ανήκουν δηλαδή στο επίπεδο 2-3) αφού έχουν συμμετρία ως προς αυτόν. Λόγω αυτής της συμμετρίας κατά την κίνηση στον χώρο δεσμεύονται οι 3 από τους 6 βαθμούς ελευθερίας των κόμβων αυτών ήτοι η μετατόπιση στον άξονα 1 ($U1 = 0$) και οι στροφές γύρω από τους άξονες 1 και 2 ($UR2 = UR3 = 0$)



ΣΧΗΜΑ 2-6: Ακραίες γενέτειρες και διατομές-επιφάνεια συμμετρίας και επαφής

ΚΑΤΩ ΓΕΝΕΤΕΙΡΑ

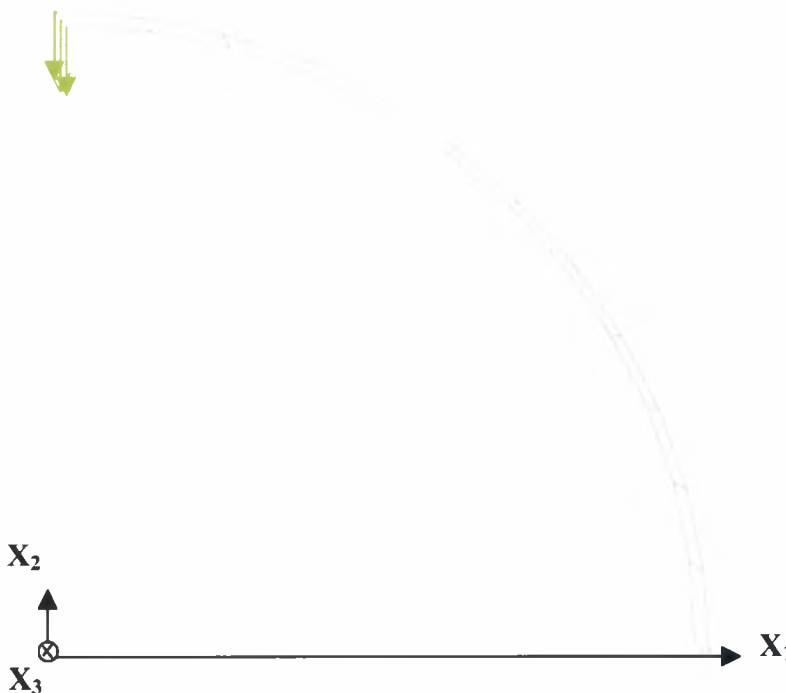
Οι κόμβοι που ανήκουν στην κάτω γενέτειρα έχουν μηδενική συντεταγμένη ως προς τον άξονα 2 (ανήκουν δηλαδή στο επίπεδο 1-3) αφού έχουν συμμετρία ως προς τον 2. Λόγω της συμμετρίας αυτής κατά την κίνηση στον χώρο δεσμεύονται οι 3 από τους 6 βαθμούς ελευθερίας τους δηλαδή η μετατόπιση στον άξονα 2 ($U_2 = 0$) και οι στροφές γύρω από τους άξονες 1 και 3 ($UR_1 = UR_3 = 0$)

ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΚΑΙ ΔΕΞΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗ

Στους κόμβους των δυο αυτών διατομών οι οποίοι έχουν συμμετρία ως προς τον άξονα 3 δεσμεύεται κατά την κίνησή τους στον χώρο η μετατόπιση στον άξονα 3 ($U_3 = 0$) και οι στροφές γύρω από τους άξονες 1 και 2 ($UR_1 = UR_2 = 0$)

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΑΦΗΣ

Η επιφάνεια προσομοιώνεται ως ένα άκαμπτο σώμα που αποτελείται από μια άκαμπτη επιφάνεια (analytical rigid surface) η οποία όπως φαίνεται και στο σχήμα 2-5 είναι ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με συντεταγμένες στο επίπεδο 1-3 και ένα σημείο αναφοράς πάνω στην επιφάνεια αυτή (reference point). Έτσι όλοι οι βαθμοί ελευθερίας της άκαμπτης επιφάνειας (3 μετατοπίσεις και 3 στροφές), οι οποίοι και δεσμεύονται ($U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$), αναφέρονται στο σημείο αυτό.



ΣΧΗΜΑ 2-7: Αρχική παραμόρφωση

2.3.3 ΑΡΧΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

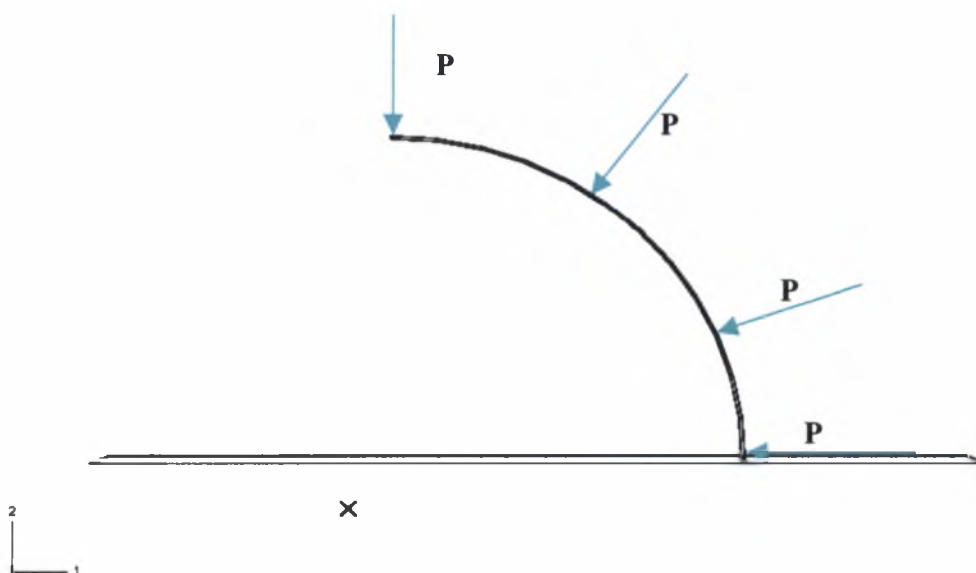
Η αρχική ατέλεια προκαλείται μέσω μιας αρχικής παραμόρφωσης η οποία επιβάλλεται κατά το πρώτο βήμα (step 1) της μη γραμμικής ανάλυσης. Αυτή ορίζεται ως η κατακόρυφη αρνητική μετατόπιση των κόμβων της πάνω γενέτειρας του κελύφους (σχήμα 2-7). Το μέγεθος της αρχικής αυτής παραμόρφωσης εκφράζεται σαν ένα κλάσμα της εξωτερικής ακτίνας του κελύφους και εν προκειμένω ισούται με το $\frac{1}{600}$ αυτής, επιβάλλεται δε στους κόμβους της άνω γενέτειρας του δακτυλίου κατά το πρώτο βήμα της μη γραμμικής ανάλυσης ως εξής:

$$U2 = -0.01in \quad (2.3)$$

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι η φορά είναι αρνητική και προς το κέντρο του δακτυλίου. Η αρχική αυτή μετατόπιση αφαιρείται (αποφόρτιση) και η παραμένουσα παραμόρφωση αποτελεί την μικρή αρχική ατέλεια για το επόμενο βήμα.

2.3.4 ΕΠΙΒΟΛΗ ΠΙΕΣΗΣ-ΑΣΤΟΧΙΑ & ΜΕΤΑΛΥΓΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

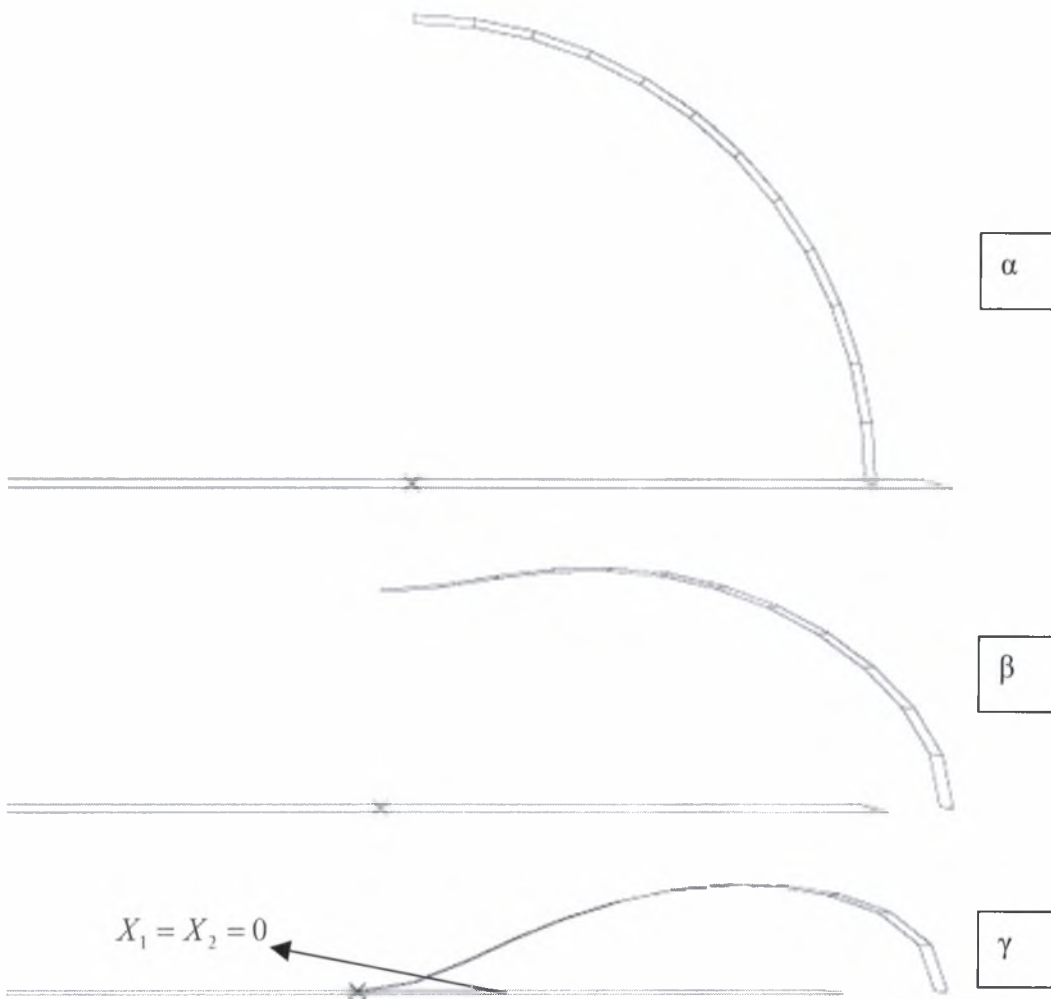
Στο δεύτερο βήμα (step 2) της μη γραμμικής ανάλυσης έχει ήδη δημιουργηθεί η αρχική ατέλεια, και επιβάλλεται εξωτερική πίεση χρησιμοποιώντας την μέθοδο του μήκους τόξου (Riks). Το διάνυσμα της πίεσης σε κάθε σημείο έχει κατεύθυνση κάθετη προς το παραμορφωμένο κέλυφος σε κάθε χρονική στιγμή.



ΣΧΗΜΑ 2-8: Επιβολή πίεσης στον δακτύλιο

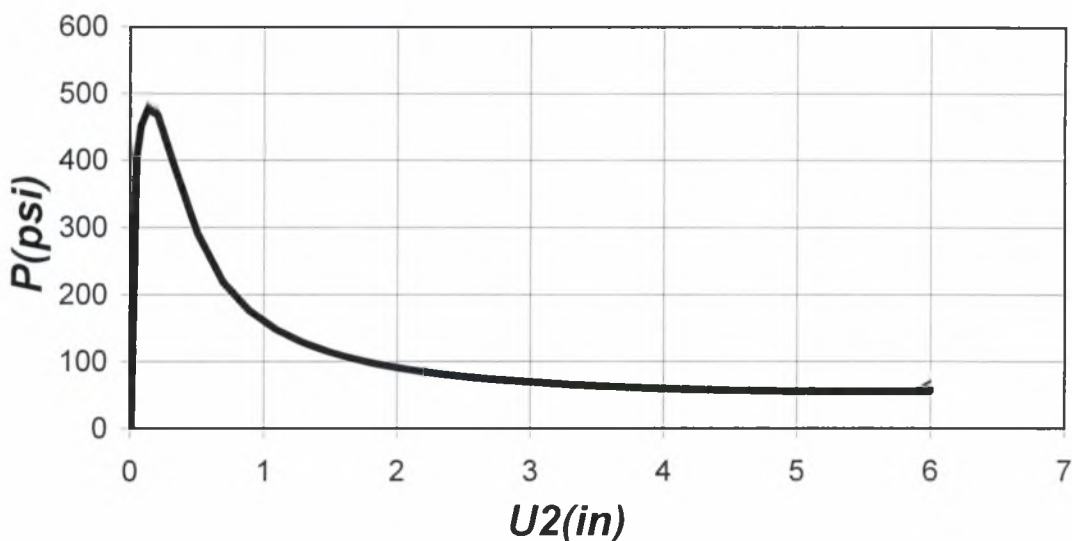
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η τιμή της πίεσης αυξάνει συνοδευόμενη με μικρές σχετικά παραμορφώσεις και παίρνει την μέγιστη τιμή της σε μικρή σχετικά παραμόρφωση του δακτυλίου. Η αρχική ατέλεια (λόγω της αρχικής παραμόρφωσης του πρώτου βήματος) προκαλεί την αστοχία και πλαστικοποίηση του δακτυλίου. Οι κόμβοι της άνω γενέτειρας κατά την αστοχία μετατοπίζονται ομοιόμορφα ως προς τον άξονα 2 με κατεύθυνση το κέντρο του δακτυλίου. Με παρόμοιο τρόπο και μετά την πρώτη αστοχία οι κόμβοι της κάτω γενέτειρας κατά την κατάρρευση μετατοπίζονται ως προς τον άξονα 1 με κατεύθυνση την θετική του άξονα, δηλαδή απομακρύνονται από το κέντρο του δακτυλίου. Ο δακτύλιος επομένως καταρρέει. Κατά την σταδιακή κατάρρευση του δακτυλίου (σχήμα 2-9) η τιμή της πίεσης αρχίζει να μειώνεται και παίρνει την ελάχιστη τιμή της κατά την στιγμή της επαφής της άνω γενέτειρας του κελύφους με την άκαμπτη επιφάνεια (contact στο $X_1=0$). Λόγω συμμετρίας δεν επιτρέπεται η εισχώρηση των κόμβων της άνω γενέτειρας κάτω από το επίπεδο 1-3 ($X_2=0$) το οποίο εξασφαλίζεται με την εντολή contact pair του ABAQUS όπου σαν επιφάνειες που αλληλεπιδρούν δηλώνονται η άνω γενέτειρα του κελύφους (top generator) και η επιφάνεια συμμετρίας και επαφής.

Μόλις οι κόμβοι της άνω γενέτειρας έρθουν σε επαφή με την άκαμπτη επιφάνεια, δεν τους επιτρέπεται να "εισέλθουν" στην επιφάνεια $X_2=0$ και παραμένουν πάνω στην επιφάνεια ή ανασηκώνονται. Πρέπει να υπενθυμιστεί πως η επαφή των δύο επιφανειών αντιστοιχεί στην επαφή δύο αντιδιαμετρικών σημείων ολόκληρου του δακτυλίου. Με την επαφή η τιμή της πίεσης αυξάνει απότομα. Η ανάλυση σταματάει λίγο μετά την επαφή της άνω γενέτειρας (top generator) και της επιφάνειας $X_2=0$ και ενώ η τιμή της πίεσης είναι λίγο μεγαλύτερη από την ελάχιστη την οποία είχε κατά την επαφή. Σημειώνεται πως η συνολική μετατόπιση των κόμβων της άνω γενέτειρας από την αρχή της ανάλυσης μέχρι και το πέρας αυτής είναι ίση με την ακτίνα του δακτυλίου.

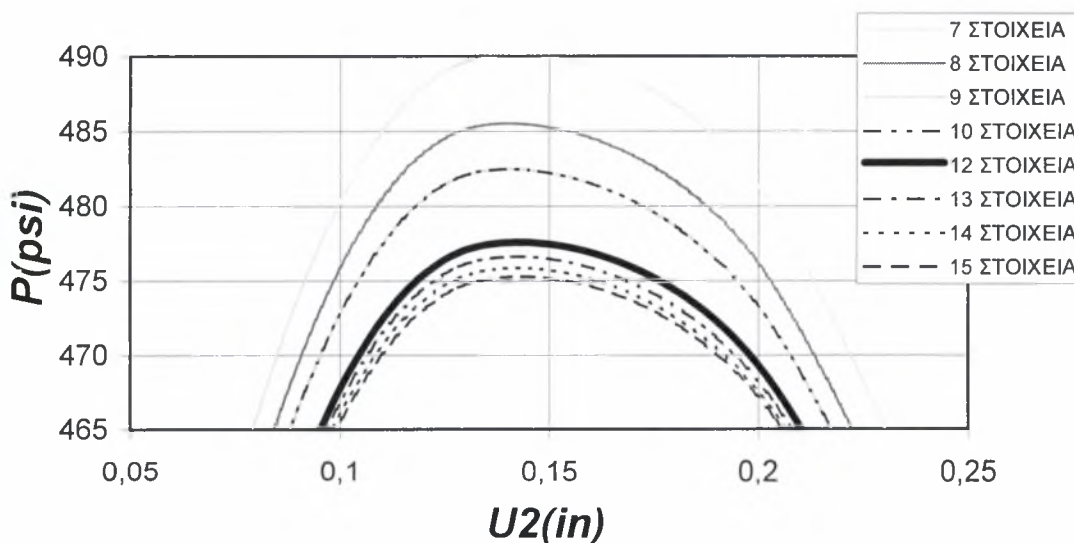


ΣΧΗΜΑ 2-9: Σταδιακή κατάρρευση διατομής σε δακτύλιο υπό ομοιόμορφη εξωτερική πίεση (μεταλυσιμική συμπεριφορά) από το στάδιο απαραμόρφωτης κατάστασης (α) στο στάδιο πλήρους κατάρρευσης (γ).

2.3.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ



ΣΧΗΜΑ 2-10: Δρόμος ισορροπίας των μοντέλων της παραμετρικής μελέτης.



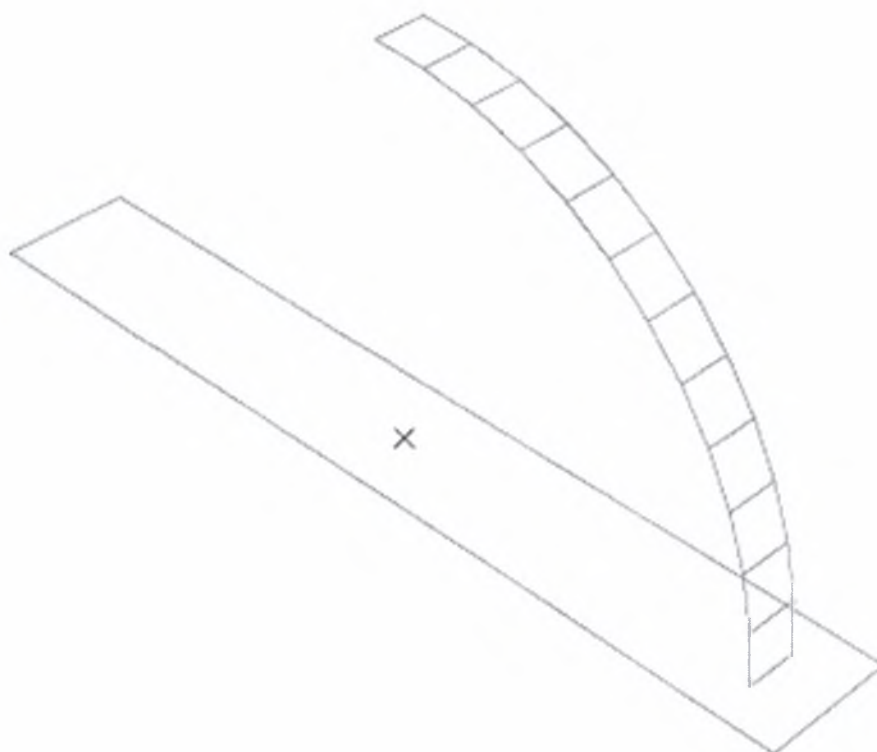
ΣΧΗΜΑ 2-11: Περιοχή μέγιστης πίεσης της γραφικής παράστασης του σχήματος 2-9

Ο δρόμος ισορροπίας (πίεση συναρτήσει της μετατόπισης των κόμβων της άνω γενέτειρας πάνω στον άξονα 2) των μοντέλων της παραμετρικής μελέτης απεικονίζεται στο διάγραμμα του σχήματος 2-10 από όπου φαίνεται ότι οι γραφικές παραστάσεις σχεδόν συμπίπτουν. Στο σχήμα 2-11 διακρίνεται με ευκρίνεια η περιοχή των γραφικών παραστάσεων του σχήματος 2-10 όπου παρατηρείται η μέγιστη τιμή

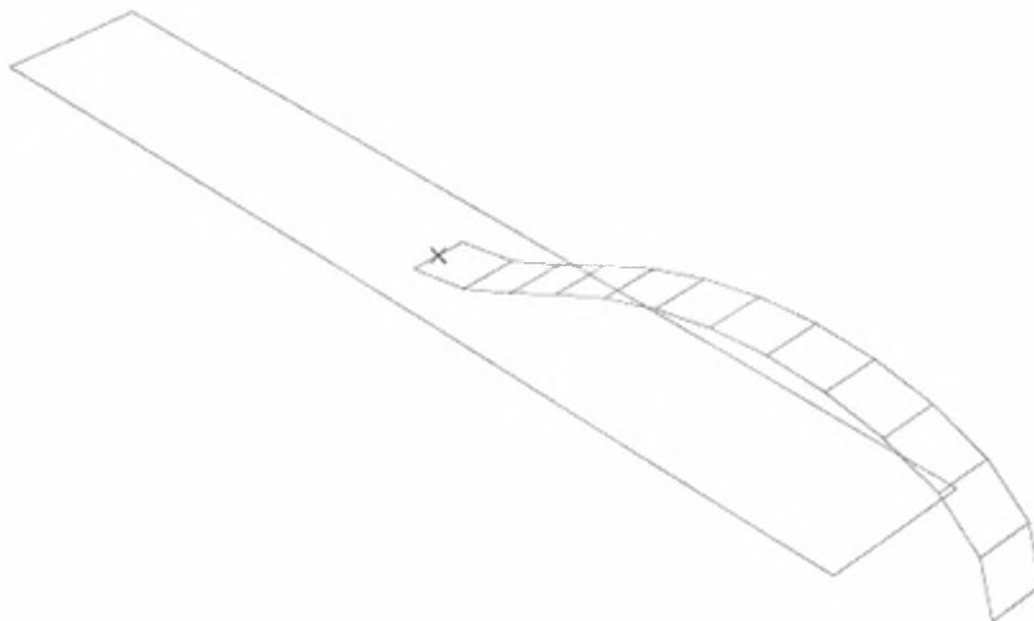
της πίεσης. Από την ανωτέρω παραμετρική μελέτη επιλέγεται το μοντέλο με τα 12 στοιχεία κατά μήκος της περιφέρειας του δακτυλίου, γιατί ο δρόμος ισορροπίας για περισσότερα στοιχεία δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη διαφοροποίηση.

2.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ

Το πλέγμα και των δύο δακτυλίων αποτελείται συνολικά από 12 τετρακομβικά, μη γραμμικά, ελαστοπλαστικά, πεπερασμένα στοιχεία κελύφους, μειωμένης ολοκλήρωσης, τύπου S4R τα οποία είναι τοποθετημένα στην εξωτερική επιφάνεια του κελύφους και 26 κόμβους. Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στις 2 ακραίες γενέτειρες των κελυφών καθώς και στα δύο άκρα καθενός από τους δύο δακτυλίους είναι συνθήκες συμμετρίας (παράγραφος 2.3.2). Το μέγεθος της αρχικής παραμόρφωσης στους κόμβους της άνω γενέτειρας είναι 0.0001 in . Επιβάλλεται ομοιόμορφη εξωτερική πίεση σε όλους τους κόμβους και χρησιμοποιείται η μέθοδος "μήκους τόξου" (μέθοδος Riks) για την λεπτομερέστερη ανάλυση του δρόμου ισορροπίας. Η ανάλυση σταματάει λίγο μετά την επαφή της εσωτερικής επιφάνειας του κελύφους με την επιφάνεια συμμετρίας και επαφής.



ΣΧΗΜΑ 2-12: Απαραμόρφωτη κατάσταση δακτυλίου I



ΣΧΗΜΑ 2-13: Πλαστική κατάρρευση δακτυλίου I υπό την επίδραση της πίεσης (τελική κατάσταση)

2.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

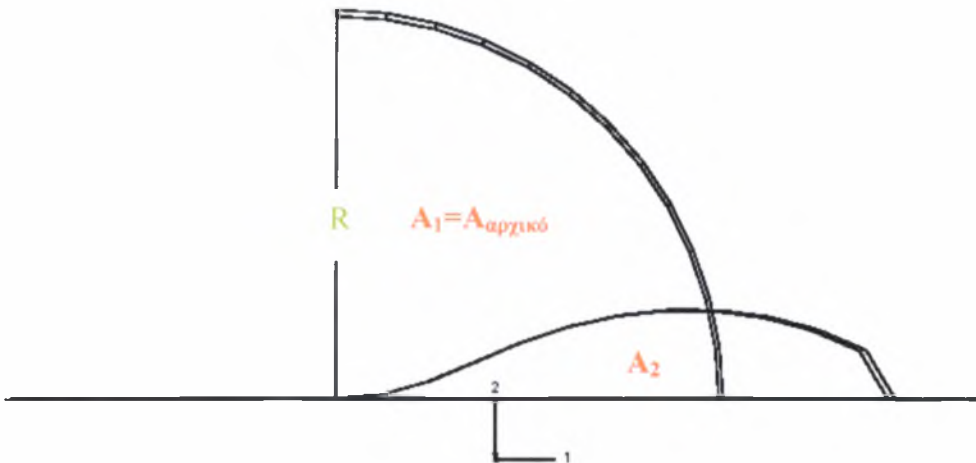
2.5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Οι Chater και Hutchinson (1984) συσχετίζοντας την αστοχία των δακτυλίων με την διαδιδόμενη ύβωση πρότειναν μια απλή μέθοδο για τον υπολογισμό της πίεσης διάδοσης χρησιμοποιώντας τον δρόμο ισορροπίας (p - ΔA) ενός δακτυλίου, όπου ΔA είναι η μεταβολή του εμβαδού που περικλείεται από τον παραμορφωμένο δακτύλιο. Βασίστηκαν στην παραδοχή που αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου ότι ο δακτύλιος αποτελεί μια από τις διαδοχικές διατομές του αγωγού από την αρχική απαραμόρφωτη κατάσταση, μέχρι την τελική του κατάρρευση, σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Επειδή η μεταβολή της τάσης σε κάθε σημείο της διατομής θεωρείται σχεδόν μονοτονική, μπορεί να θεωρηθεί ότι το έργο της εξωτερικά επιβαλλόμενης πίεσης κατά την παραμόρφωση της διατομής, από την αρχική κατάσταση, μέχρι και την τελική της κατάρρευση, εξαρτάται μόνο από τις δύο αυτές καταστάσεις. Επειδή όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο κατά την κατάρρευση των διαδοχικών διατομών του αγωγού η πίεση έχει σταθερή τιμή (πίεση

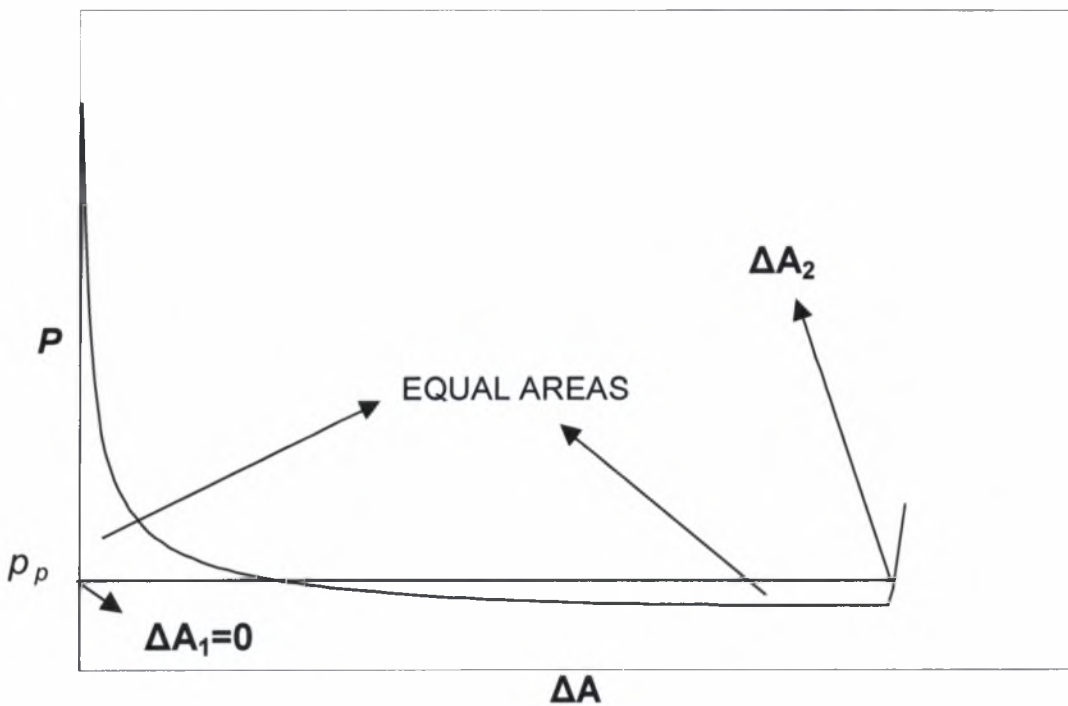
διάδοσης), το έργο της πίεσης διάδοσης του φαινομένου (εξωτερικό έργο) σε μία από τις διατομές του αγωγού είναι:

$$W_{ext} = p_p \cdot (A_{αρχικό} - A_{τελικό}) \quad (2.4)$$

όπου $A_{αρχικό} = \frac{\pi}{4} R^2$, και R η ακτίνα του δακτυλίου (σχήμα 2-14).



ΣΧΗΜΑ 2-14: Αρχικό και τελικό εμβαδον δακτυλίου.



ΣΧΗΜΑ 2-15: Γραφική παράσταση της πίεσης συναρτήσει της σταδιακής μείωσης του εμβαδού που περικλείεται από τον δακτύλιο και τους άξονες 1 και 2

Σύμφωνα με την θεώρηση της εξίσωσης του έργου το έργο αυτό είναι ίσο με το εμβαδό της γραφικής παράστασης p - ΔA μεταξύ των σημείων που αντιστοιχούν στην αρχική και τελική κατάσταση της διατομής, δηλαδή:

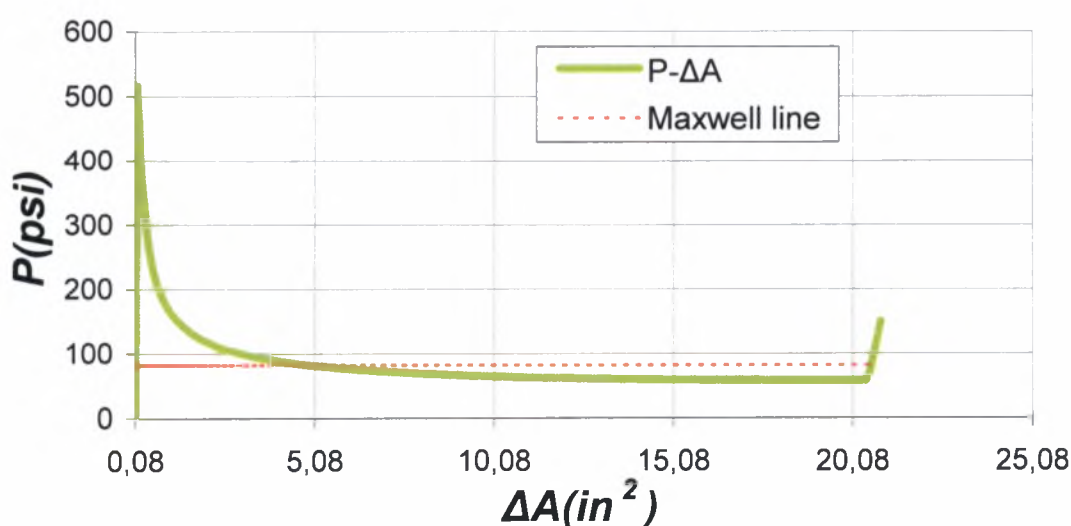
$$W_{\text{int}} = \int_0^{\Delta A_2} p \cdot d(\Delta A) \quad (2.5)$$

Εξίσωση των σχέσεων (2.4) και (2.5) οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η πίεση διάδοσης μπορεί να υπολογιστεί χαράσσοντας μια γραμμή (την επονομαζόμενη και Maxwell-line) παράλληλη στον άξονα ΔA με τέτοιο τρόπο ώστε το εμβαδόν κάτω από την Maxwell-line μεταξύ των σημείων 0 και ΔA_2 (σημεία τομής της γραμμής με την καμπύλη) να είναι ίσο με το εμβαδόν κάτω από την επιφάνεια της καμπύλης μεταξύ των ίδιων τιμών του ΔA (Σχήμα 2-15).

2.5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η μέθοδος εφαρμόστηκε στην περίπτωση των δύο δακτυλίων χρησιμοποιώντας την γραμμή Maxwell. Με μια απλή ολοκλήρωση που βασίζεται στον κανόνα του τραπεζίου υπολογίζεται από τις συντεταγμένες των κόμβων σε κάθε χρονική στιγμή (increment) η μείωση του εμβαδού της παραμορφωμένης κατάστασης του δακτυλίου (deformed configuration) σε σχέση με το αρχικό εμβαδόν του δακτυλίου.

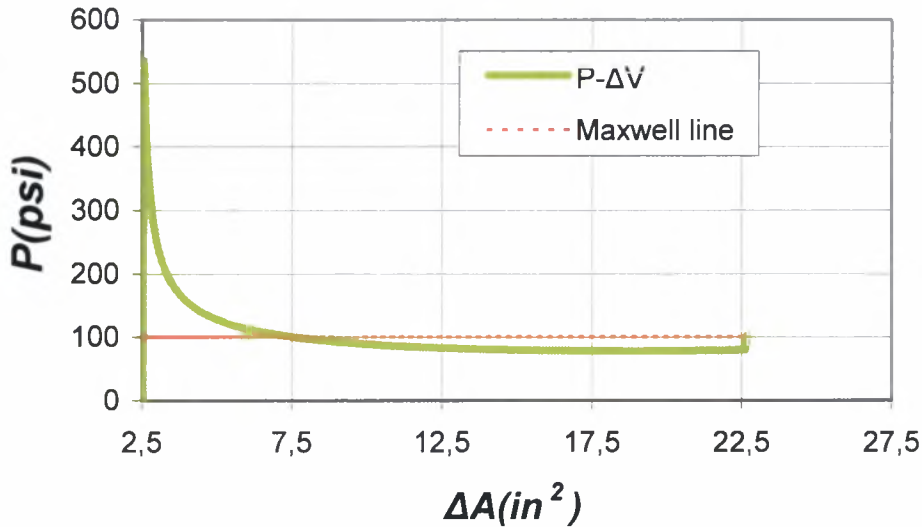
Δακτύλιος I



ΣΧΗΜΑ 2-16: Γραμμή Maxwell δακτυλίου I

Η πίεση διάδοσης στην περίπτωση του δακτυλίου I όπως φαίνεται στην γραφική παράσταση P-ΔA του σχήματος 2-16 χαράσσοντας την γραμμή Maxwell, είναι για τον δακτύλιο I ίση με: $p_p = 81.077 \text{ psi}$ (2.6)

Δακτύλιος II



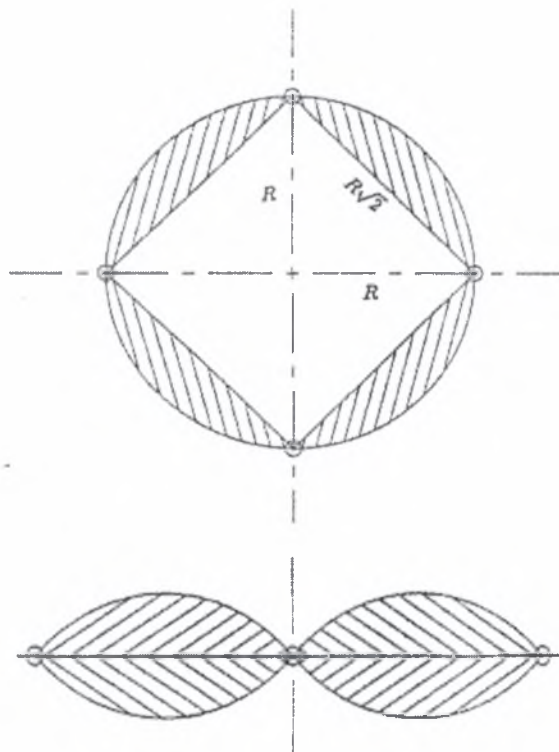
ΣΧΗΜΑ 2-17: Γραμμή Maxwell δακτυλίου II

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και στον υπολογισμό της πίεσης διάδοσης για τον δακτύλιο II χρησιμοποιώντας την μέθοδο χάραξης της γραμμής Maxwell (σχήμα 2-17). Η πίεση διάδοσης υπολογίστηκε: για τον δακτύλιο II ίση με

$$p_p = 100.64 \text{ psi} \quad (2.7)$$

2.6 ΜΙΑ ΑΠΛΟΠΟΙΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Η μέθοδος που περιγράφεται είναι θεωρητική και απλουστευμένη, αλλά δίνει μια προσέγγιση της πίεσης διάδοσης με μια αναλυτική έκφραση κλειστής μορφής. Ο δακτύλιος θεωρείται ότι έχει διάμετρο D , πάχος κελύφους t , μήκος κατά τον άξονα $3b$ και όριο διαρροής σ_y .



ΣΧΗΜΑ 2-18: Μηχανισμός κατάρρευσης λόγω των 4 πλαστικών αρθρώσεων

Θεωρείται πως η κατάρρευση οφείλεται στην δημιουργία 4 πλαστικών αρθρώσεων στα σημεία $\theta = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ και ο μηχανισμός κατάρρευσης φαίνεται στο σχήμα 2-18.

Το έργο της πίεσης διάδοσης κατά την πλαστική κατάρρευση της διατομής που ‘σαρώνεται’ από το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης, δηλαδή το έργο των εξωτερικών δυνάμεων είναι:

$$W_{ext} = p_p \Delta V \quad (2.8)$$

όπου ΔV είναι η μεταβολή του όγκου του υπό κατάρρευση σωλήνα και b είναι η διάσταση του δακτυλίου κατά τον διαμήκη άξονα του σωλήνα:

$$\Delta V = (\Delta A) b = (R\sqrt{2})^2 b = 2R^2 b \quad (2.9)$$

Με την βοήθεια της (2.9) η (2.8) γίνεται:

$$W_{ext} = p_p (2R^2 b) = 2p_p \frac{D^2}{4} b = p_p \frac{D^2}{2} b \quad (2.10)$$

οπότε τελικά το έργο των εξωτερικών δυνάμεων δηλαδή της πίεσης είναι:

$$W_{ext} = p \frac{D^2}{2} b \quad (2.11)$$

Το εσωτερικό έργο W_{int} οφείλεται στην πλαστική συμπεριφορά των 4 πλαστικών αρθρώσεων. Η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης στις 4 πλαστικές αρθρώσεις είναι :

$$M_p = \sigma_y \frac{bt^2}{4} \quad (2.12)$$

Η συνολική στρόφιξη σε κάθε πλαστική άρθρωση είναι $\pi - \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2}$ και το συνολικό έργο σε κάθε μια από αυτές είναι:

$$W_1 = M_p \frac{\pi}{2} \quad (2.13)$$

όποτε το εσωτερικό έργο λόγω των 4 πλαστικών αρθρώσεων κατά την πλαστική κατάρρευση του δακτυλίου είναι:

$$W_{\text{int}} = 4W_1 = 4M_p \frac{\pi}{2} \quad (2.14)$$

η οποία με την βοήθεια της (2.13) γίνεται:

$$W_{\text{int}} = 4\sigma_y \frac{bt^2}{4} \frac{\pi}{2} = \sigma_y bt^2 \frac{\pi}{2} \quad (2.15)$$

οπότε τελικά το έργο των εσωτερικών δυνάμεων λόγω πλαστικοποίησης είναι:

$$W_{\text{int}} = \sigma_y bt^2 \frac{\pi}{2} \quad (2.16)$$

Εξισώνοντας το έργο των εσωτερικών δυνάμεων με το έργο των εξωτερικών, που εκφράζονται μέσω των σχέσεων (2.11) και (2.16) αντίστοιχα προκύπτει η γενική σχέση για την πίεση διάδοσης:

$$p_p \frac{D^2}{2} b = \sigma_y bt^2 \frac{\pi}{2} \quad (2.17)$$

οπότε τελικά:

$$p_p = \pi \sigma_y \left(\frac{t}{D} \right)^2 \quad (2.18)$$

Ο τύπος (2.18) αποτελεί την εξίσωση των Palmer & Martin (1975) αναφορά της οποίας έγινε στο πρώτο κεφάλαιο.

2.6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Εφαρμογή της σχέσης (2.18) των Palmer & Martin στην περίπτωση των δύο δακτυλίων δίνει τα ακόλουθα αποτελέσματα :

Δακτύλιος I

Ο δακτύλιος έχει, όπως ήδη αναφέρθηκε εξωτερική διάμετρο $D_{out} = 12in$, πάχος κελύφους $t = 0.2353in$ και όριο διαρροής $\sigma_y = 52000psi$. Η πίεση διάδοσης εφαρμόζοντας την σχέση (2.18) είναι:

$$p_p = \pi 52000 \times \left(\frac{0.2353}{12} \right)^2 = 62.81 psi$$

Δακτύλιος II

Ο δακτύλιος έχει όπως αναφέρθηκε εξωτερική διάμετρο $D_{out} = 12.75in$, πάχος κελύφους $t = 0.25in$ και όριο διαρροής $\sigma_y = 52000psi$. Η πίεση διάδοσης εφαρμόζοντας την σχέση (2.23) είναι:

$$p_p = \pi 52000 \times \left(\frac{0.25}{12.75} \right)^2 = 62.8 psi$$

2.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	ΠΙΕΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ I	ΠΙΕΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ II
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	81.08 psi	101.64 psi
ΕΞΙΣΩΣΗ PALMER & MARTIN	62.81 psi	62.80 psi

ΣΧΗΜΑ 2-19: Συγκεντρωτικός συγκριτικός πίνακας της πίεσης διάδοσης με βάση την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και την εξίσωση των Palmer & Martin (1975) για τους δύο δακτυλίους που προσομοιώθηκαν

Από την σύγκριση των στοιχείων αξίζει αρχικά να τονιστεί ότι η πίεση διάδοσης των δακτυλίων με βάση την σχέση των Palmer & Martin είναι σχεδόν η ίδια γιατί οι δύο

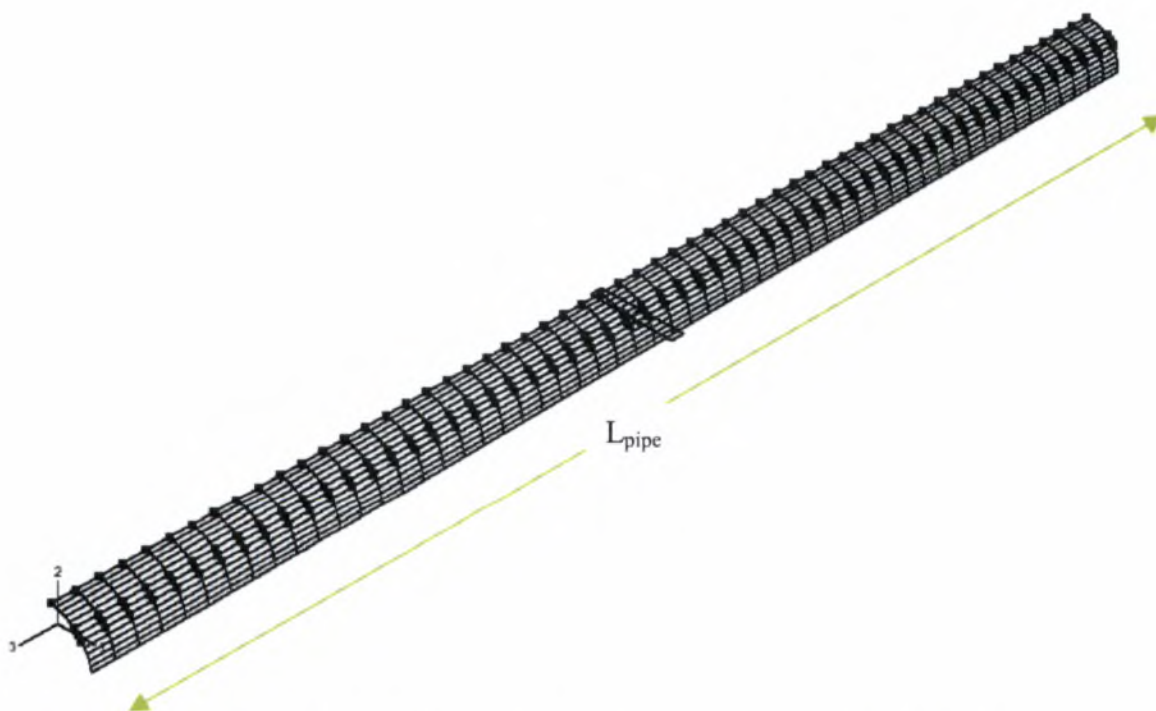
δακτύλιοι έχουν το ίδιο όριο διαρροής-αν και η καμπύλη σ-ε αυτών είναι διαφορετική- και περίπου τον ίδιο λόγο πάχους προς διάμετρο. (t/D).

Η διαφορά των τιμών της πίεσης διάδοσης με βάση την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (81.08 έναντι 101.64 *psi*) έγκειται στο γεγονός ότι οι δύο δακτύλιοι αποτελούνται από διαφορετικό υλικό (κράτυνη). Η διαφορά των δυο τιμών της πίεσης διάδοσης με βάση της δύο μεθόδους έγκειται στο γεγονός ότι στα πεπερασμένα στοιχεία δε συμβαίνει πλαστικοποίηση μόνο στα σημεία των τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων του μηχανισμού κατάρρευσης που περιγράφεται από τους Palmer & Martin αλλά σε μια περιοχή γύρω από αυτά. Ένας επίσης βασικός λόγος της διαφοράς των δυο μεθόδων είναι το γεγονός ότι στην εξίσωση των Palmer and Martin δε λαμβάνεται υπόψη η κράτυνη του υλικού. Στην δισδιάστατη ανάλυση των δακτυλίων η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων δίνει μια καλύτερη προσέγγιση της πίεσης διάδοσης σε σχέση με την έκφραση κλειστής μορφής των Palmer & Martin όπως αυτό θα φανεί από την "ακριβή" τιμή της p_p που θα υπολογίσουμε στο επόμενο κεφάλαιο.

3 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΓΩΓΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό προσομοιώνεται το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης σε υποθαλάσσιους αγωγούς μεγάλου μήκους. Προσομοιώνονται τρισδιάστατα κυλινδρικά κελύφη με αρκετά μεγάλο μήκος κατά τον άξονα 3 συγκριτικά με την διάμετρο του αγωγού (σχήμα 3-1). Αναλύονται δύο τύποι αγωγών (αγωγός I, αγωγός II) οι οποίοι διαφέρουν στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και στο υλικό τους. Τυπικές διατομές των αγωγών I και II αποτελούν ο δακτύλιος I (του αγωγού I) και ο δακτύλιος II (του αγωγού II) αντίστοιχα, οι οποίοι αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επειδή υπάρχει συμμετρία ως προς τα επίπεδα 1-2 και 1-3, στις αριθμητικές προσομοιώσεις σχεδιάζεται και αναλύεται το $\frac{1}{4}$ καθενός από τα 2 μοντέλα αγωγών .



ΣΧΗΜΑ 3-1: Κυλινδρικό κέλυφος σωληνωτού αγωγού ($L_{pipe} \geq 15D$)

Στόχος της τρισδιάστατης ανάλυσης του παρόντος κεφαλαίου είναι ο υπολογισμός της σταθερής πίεσης διάδοσης του φαινομένου p_p , η οποία είναι το σημαντικότερο και χαρακτηριστικότερο μέγεθος που χαρακτηρίζει το φαινόμενο της διαδιδόμενης

ύβωσης, και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα της δισδιάστατης ανάλυσης του δευτέρου κεφαλαίου για την εξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων.

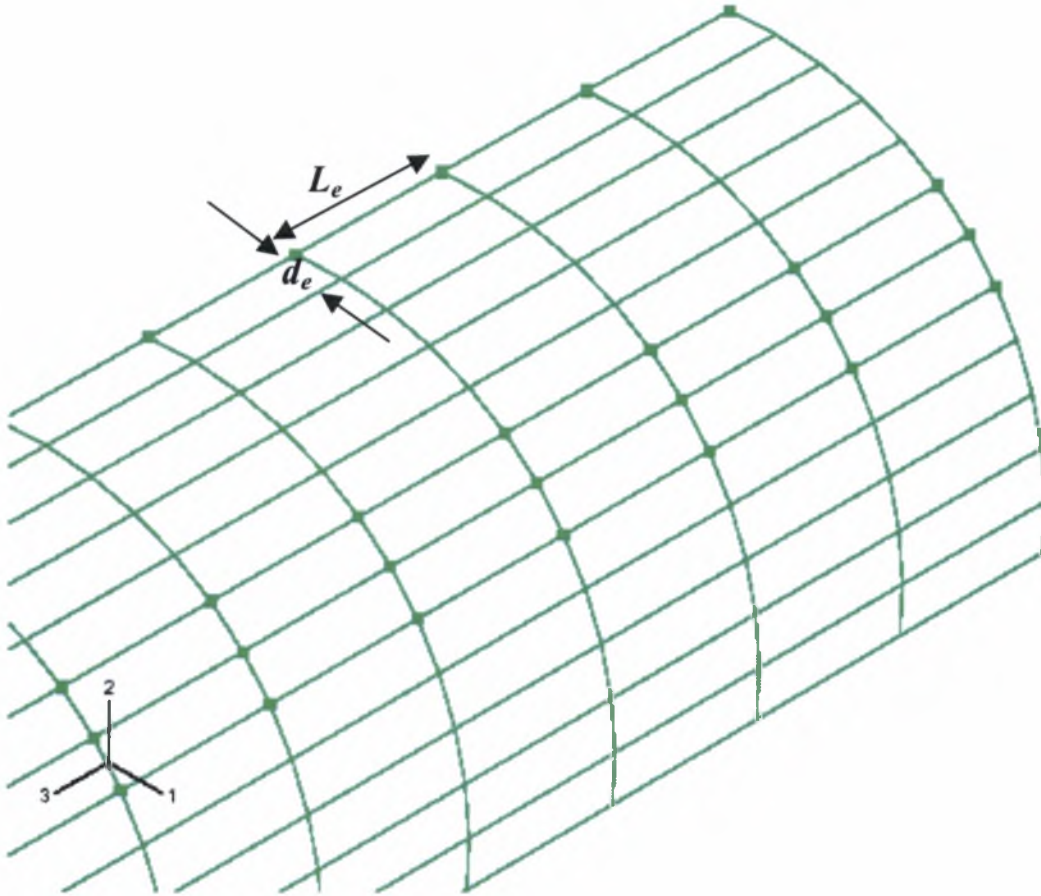
3.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ

Οι αγωγοί υφίστανται μεγάλες παραμορφώσεις και δημιουργούνται γεωμετρικές μη γραμμικότητες κατά την σταδιακή κατάρρευσή τους. Η θεώρηση αυτή έγινε μέσω της υποεντολής ‘nlgeom’, στην εντολή step που ορίζει τα βήματα με τα οποία θα προχωρήσει η μη γραμμική ανάλυση του ABAQUS.

3.2.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ I

3.2.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

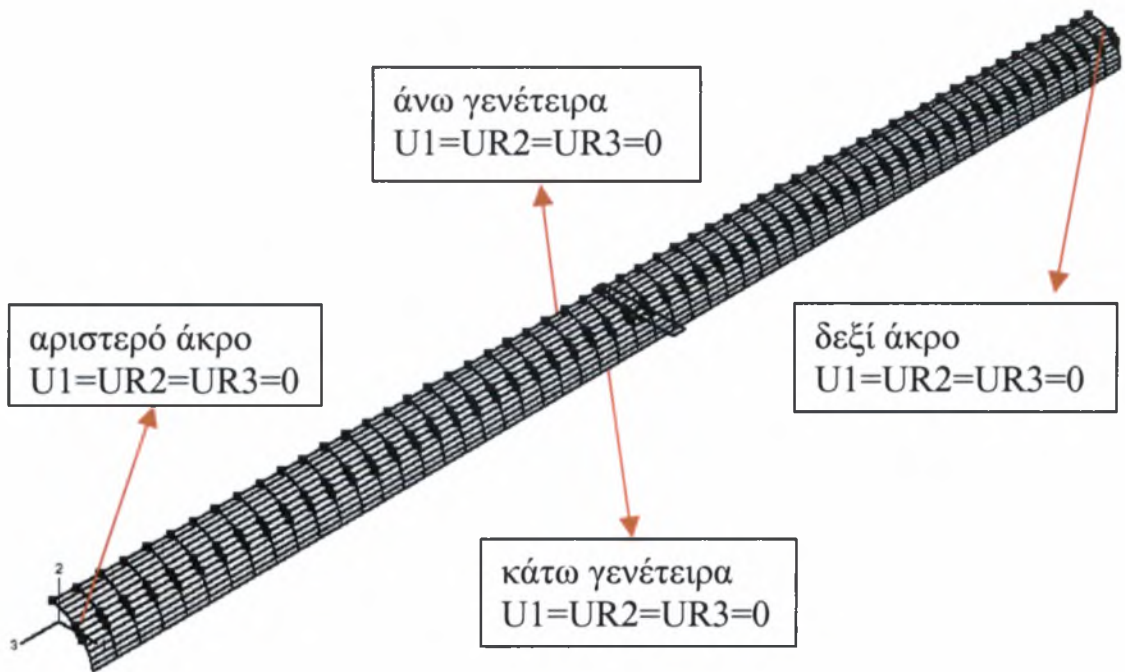
Μία από τις διατομές του αγωγού I όπως αναφέρθηκε είναι ο δακτύλιος I που αναλύθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο. Ως εκ τούτου ο αγωγός I έχει διάμετρο $D = 12in$, πάχος κελύφους $t = 0.2353in$ και αποτελείται από το υλικό του σχήματος 2-3 (παράγραφος 2-2 δευτέρου κεφαλαίου). Το μήκος του κατά τον διαμήκη άξονα 3 είναι: $L_{pipe} = 178.5in = 14.9D$. Για την αριθμητική του προσομοίωση χρησιμοποιούνται τετρακομβικά, μη γραμμικά, ελαστοπλαστικά, πεπερασμένα στοιχεία κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης, τύπου S4R, οι κόμβοι των οποίων τοποθετούνται στην εσωτερική επιφάνεια του κελύφους. Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται συνολικά από 612 στοιχεία, 12 κατά την περιφέρεια και 56 κατά μήκος, με μήκος κάθε στοιχείου κατά τον άξονα 3 $L_e = 3.1875in$ (σχήμα 3-2).



ΣΧΗΜΑ 3-2: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του αγωγού I.

3.2.1.2 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

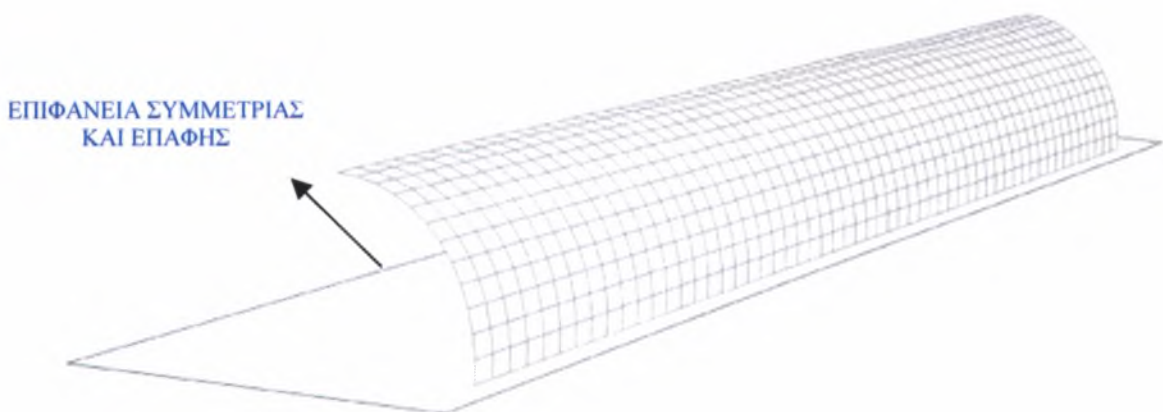
Στο αρχικό βήμα (initial step) της μη γραμμικής ανάλυσης που ακολουθείται στο ABAQUS δηλώνονται στις δυο ακραίες γενέτειρες και στα δυο άκρα του αγωγού I οι συνοριακές συνθήκες που απεικονίζονται στο σχήμα 3.3 της επόμενης σελίδας οι οποίες είναι ανάλογες των συνθηκών συμμετρίας του δακτυλίου I, περιγραφή των οποίων έγινε κατά την αριθμητική του προσομοίωση η οποία έγινε στο δεύτερο κεφάλαιο.



ΣΧΗΜΑ 3-3:Συνοριακές συνθήκες στις δυο ακραίες γενέτειρες και στα δυο άκρα του αγωγού I.

3.2.1.3 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Κατά την διάρκεια της μη γραμμικής ανάλυσης οι κόμβοι της άνω γενέτειρας του αγωγού I υπό την επίδραση της ομοιόμορφα εξωτερικά επιβαλλόμενης πίεσης κινούνται πάνω στην διεύθυνση του άξονα 2 και αντίρροπα ως προς αυτόν έτσι ώστε η απόστασή τους από το επίπεδο 1-3 να μειώνεται συνεχώς κατά την διάρκεια της ανάλυσης.

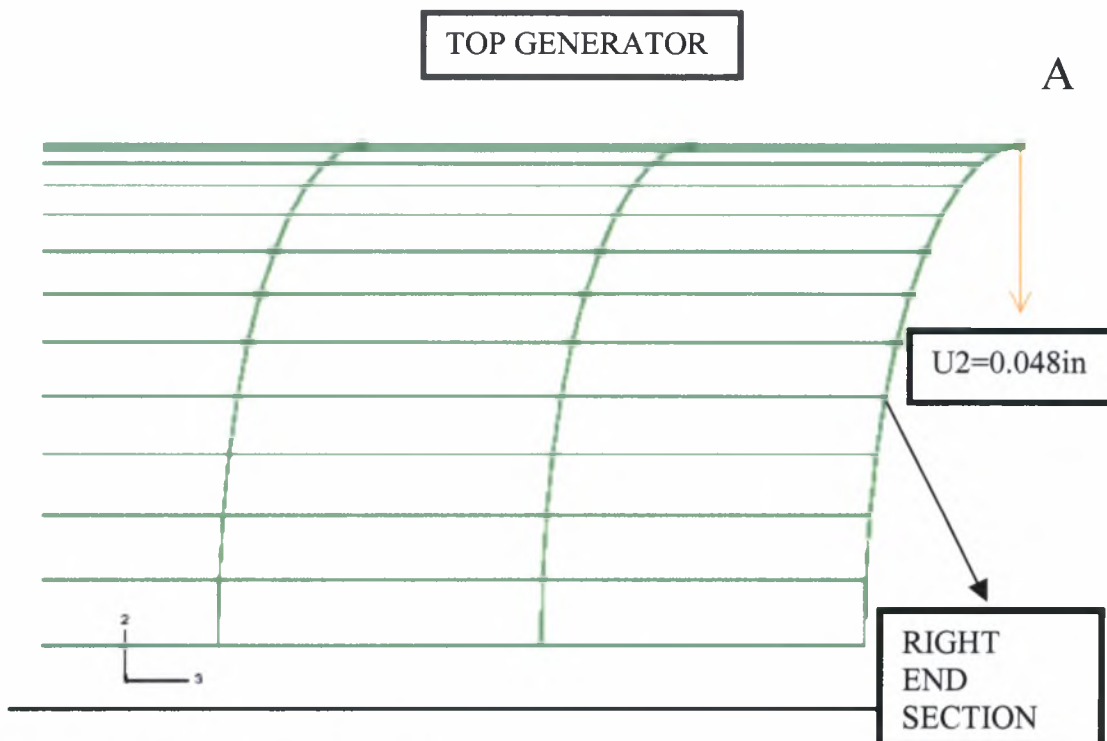


ΣΧΗΜΑ 3-4:Επιφάνεια συμμετρίας και επαφής

Λόγω όμως της συμμετρίας του μοντέλου ως προς το επίπεδο 1-3, δεν επιθυμείται η εισχώρηση (penetration) τους στο επίπεδο αυτό. Για τον λόγο αυτό σχεδιάζεται στο ABAQUS με την εντολή Rigid Body μια επιφάνεια ως ένα άκαμπτο σώμα το οποίο αποτελείται από μια επιφάνεια σχήματος ορθογωνίου παραλληλογράμμου και ένα σημείο αναφοράς (reference point) που ανήκει πάνω σε αυτή. Το σημείο αναφοράς της επιφάνειας παραλαμβάνει όλους τους βαθμούς ελευθερίας της οι οποίοι και δεσμεύονται έτσι ώστε να αποκτήσει της ιδιότητες ενός δύσκαμπτου και αμετακίνητου σώματος (rigid body). Η επιφάνεια συμμετρίας και επαφής (σχήμα 3-4) εδράζει στο επίπεδο 1-3 και κατά την ανάλυση με την εντολή contact pair εμποδίζει τους κόμβους της πάνω γενέτειρας να περάσουν κάτω από το επίπεδο αυτό (σχήμα 3-4).

3.2.1.4 ΑΡΧΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

Η αρχική ατέλεια (σχήμα 3-5) δημιουργείται με την επιβολή μιας αρχικής παραμόρφωσης η οποία δίνεται σαν συνοριακή συνθήκη (boundary condition) κατά το πρώτο βήμα (step 1) της μη γραμμικής ανάλυσης και ορίζεται ως η κατακόρυφη αρνητική μετατόπιση του κόμβου A (σχήμα 3-5). Το μέτρο της μετατόπισης είναι ίσο με $0.048in$



ΣΧΗΜΑ 3-5: Αρχική παραμόρφωση

3.2.1.5 ΕΠΙΒΟΛΗ ΠΙΕΣΗΣ

Στο δεύτερο βήμα (step 2) της μη γραμμικής ανάλυσης επιβάλλεται ομοιόμορφη πίεση (uniform pressure) στην εξωτερική επιφάνεια του κελύφους. Επειδή η συμπεριφορά του μοντέλου μετά την πρώτη αστοχία και κατά την κατάρρευση είναι ένα γεωμετρικά μη γραμμικό πρόβλημα με ασταθή μεταλυγισμική συμπεριφορά, για την επιβολή της πίεσης χρησιμοποιείται η μέθοδος μήκους τόξου (μέθοδος Riks). Η μέθοδος υπολογίζει τις θέσεις στατικής ισορροπίας κατά μήκος του δρόμου ισορροπίας όπου το μητρώο ακαμψίας είναι αρνητικό, δηλαδή η απόκριση πίεσης μετατόπισης του κυλινδρικού κελύφους είναι ασταθής.

Η μέθοδος χρησιμοποιεί το μέγεθος της πίεσης που επιβάλλεται ως έναν επιπλέον άγνωστο και επιλύει ταυτόχρονα ως προς φορτία και μετατοπίσεις ενώ χρησιμοποιείται μια άλλη ποσότητα για να εκτιμηθεί η πρόοδος της λύσης. Εδώ χρησιμοποιείται η μέθοδος μήκους τόξου (arc length) κατά μήκος του δρόμου ισορροπίας.

Η εξωτερικά επιβαλλόμενη πίεση δίνεται αναλογικά. Η τιμή της πίεσης P_{total} σε κάθε increment είναι:

$$P_{total} = P_o + \lambda(P_{ref} - P_o) \quad (3.1)$$

όπου P_o το φορτίο στην αρχή του βήματος το οποίο στην προκειμένη περίπτωση είναι μηδέν, P_{ref} η τιμή της πίεσης που δίνεται από τον χρήστη, ενώ λ είναι ο συντελεστής φόρτισης (load proportional factor) τον οποίο υπολογίζει το υπολογιστικό πρόγραμμα σε κάθε χρονική επαύξηση (increment) του δεύτερου βήματος (step 2) της μη γραμμικής ανάλυσης.

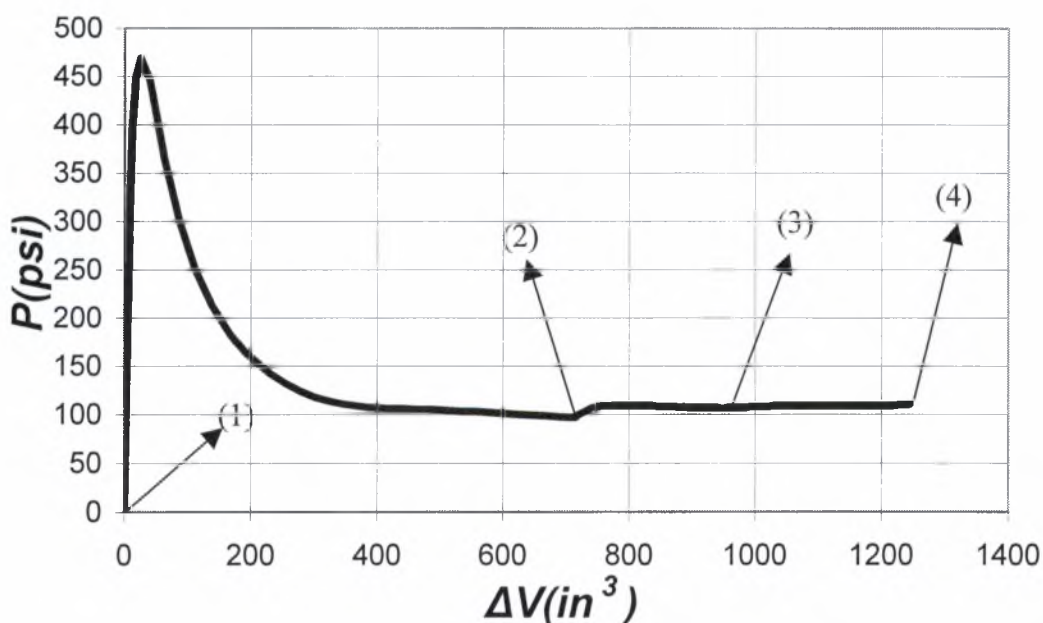
Ο όγκος που περικλείεται από τον αγωγό μειώνεται σταδιακά εξαιτίας της ισοπέδωσης του από το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης και η μείωση του όγκου (ΔV_α) αποτελεί μια μονοτονικά μεταβαλλόμενη ποσότητα. Για την προσεγγιστική εκτίμηση του (ΔV_α) χρησιμοποιείται μια ποσότητα που εκφράζει μεταβολή όγκου η οποία εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta V = \left[\frac{\sqrt{\sum_{j=1}^N (u_{2,j})^2}}{N} \right] \cdot R_{out} \cdot L_{pipe} \quad (3.2)$$

όπου N ένας επαρκής αριθμός κόμβων της άνω γενέτειρας του κελύφους, $u_{2,j}$ η μετατόπιση καθενός από τους N κόμβους σε κάθε increment i πάνω στον άξονα 2, $R_{out} = 6in$ είναι η εξωτερική ακτίνα και $L_{pipe} = 178.5in$ το μήκος κατά τον διαμήκη άξονα 3 του αγωγού I αντίστοιχα.

3.2.2 ΠΙΕΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΑΓΩΓΟΥ I

Η γραφική παράσταση της πίεσης ως συνάρτηση της μεταβολής του όγκου του παραμορφωμένου αγωγού I απεικονίζεται στο σχήμα 3-6



ΣΧΗΜΑ 3-6: Μεταβολή όγκου του αγωγού I συναρτήσει της εξωτερικά ομοιόμορφα επιβαλλόμενης πίεσης.

Η πίεση πρώτης αστοχίας που αποτελεί την πίεση έναρξης του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης είναι

$$p_i = 469 \text{ psi} \quad (3.3)$$

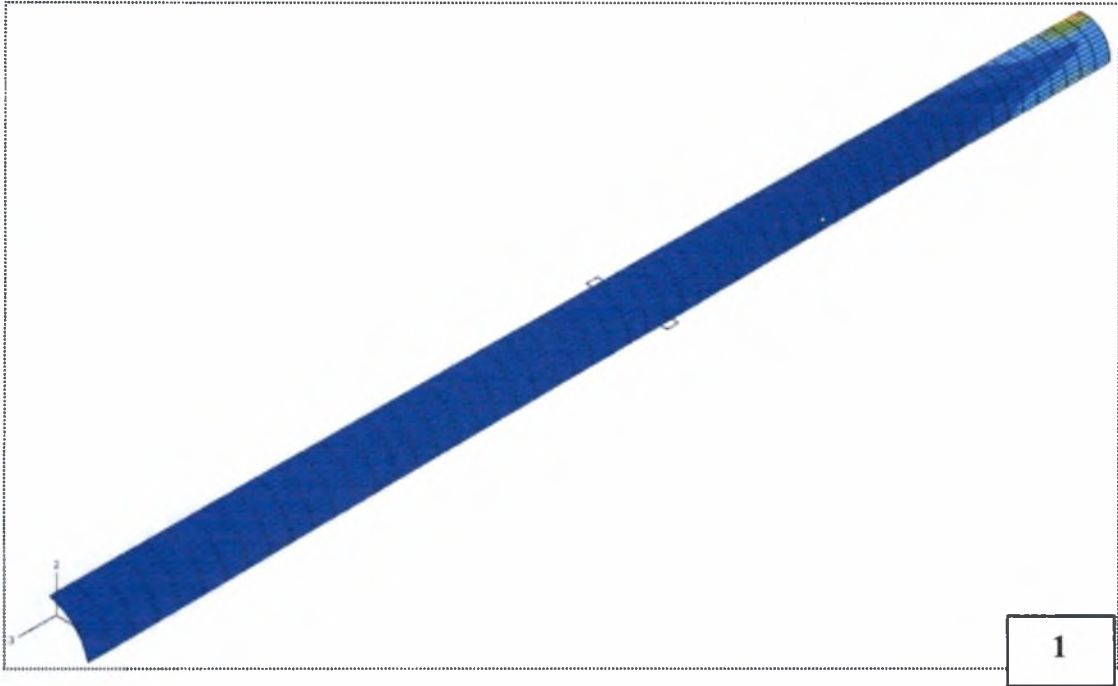
ενώ η πίεση διάδοσης του φαινομένου είναι για τον αγωγό I είναι:

$$p_p = 108 \text{ psi} \quad (3.4)$$

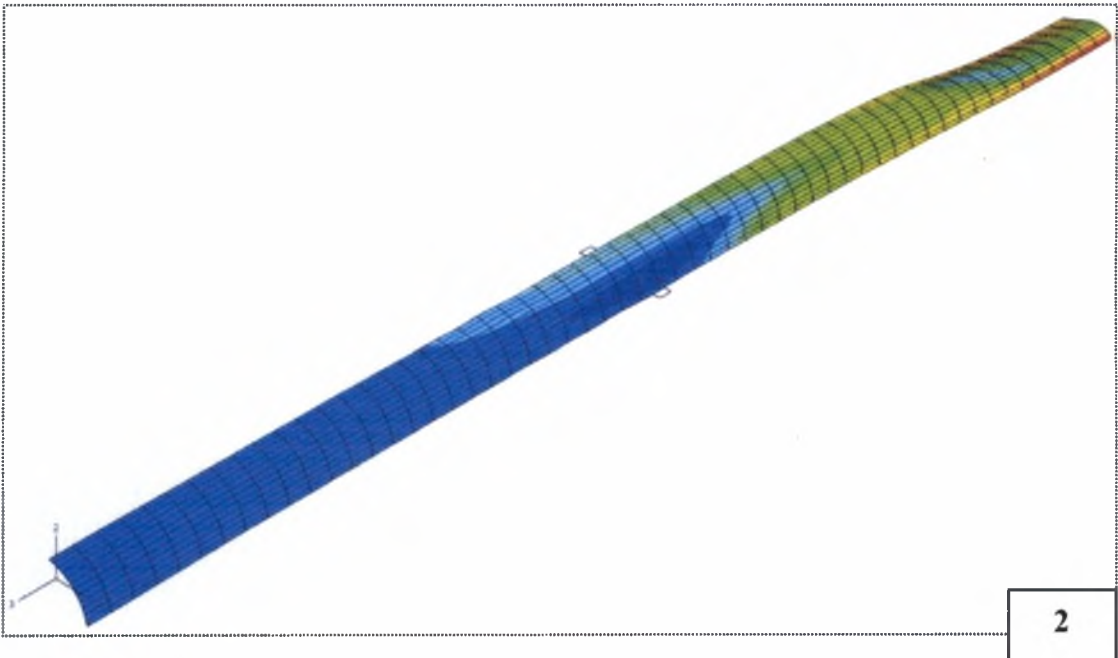
όπως προκύπτει από την γραφική παράσταση του σχήματος 3-6. Σημειώνεται πως η κρίσιμη πίεση p_{cr} του αγωγού I από την σχέση (1.1) είναι:

$$p_{cr} = 476 \text{ psi} \quad (3.5)$$

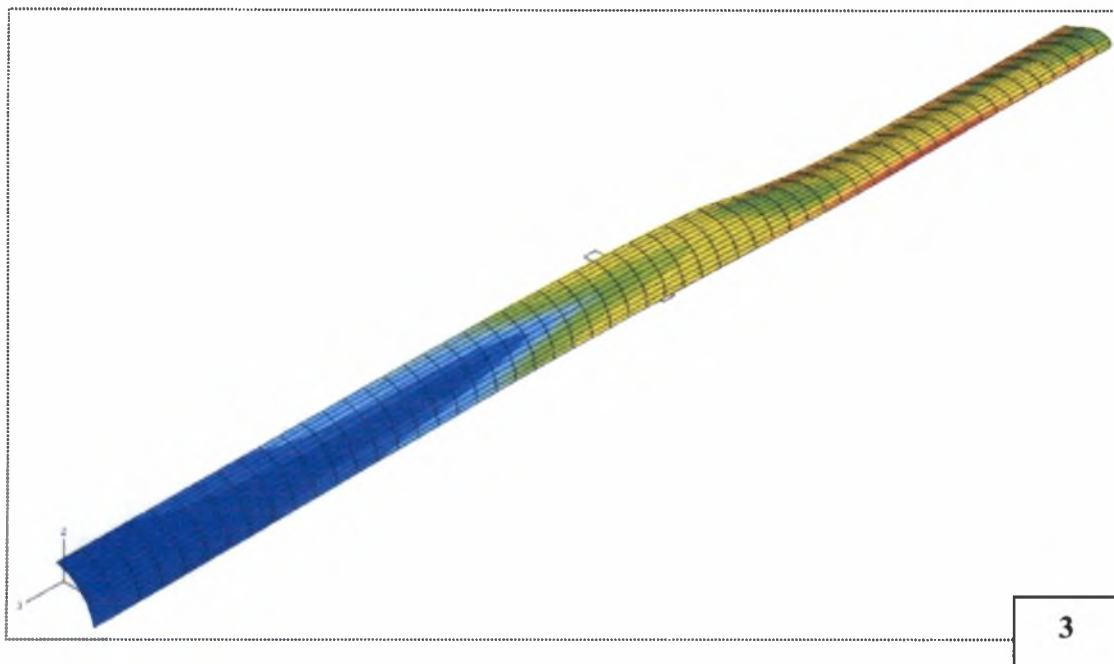
Τα διάφορα στάδια εξέλιξης του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης στον αγωγό Ι τα οποία αντιστοιχούν στα σημεία του δρόμου ισορροπίας του σχήματος 3-6 απεικονίζονται στα σχήματα 3-7 ως 3-10.



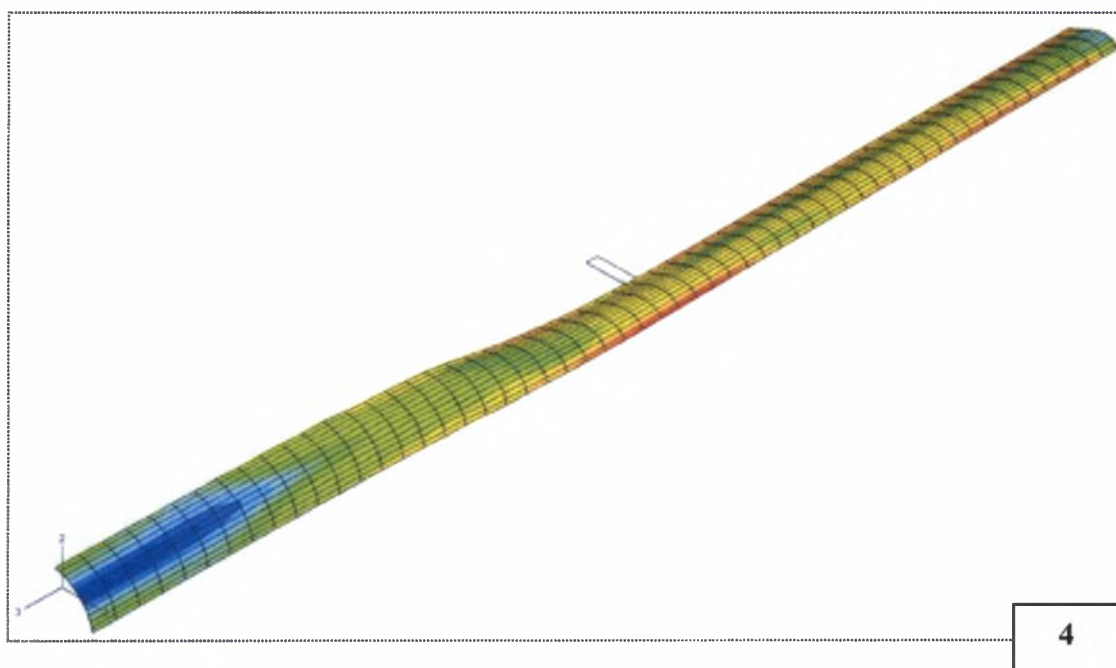
ΣΧΗΜΑ 3-7



ΣΧΗΜΑ 3-8

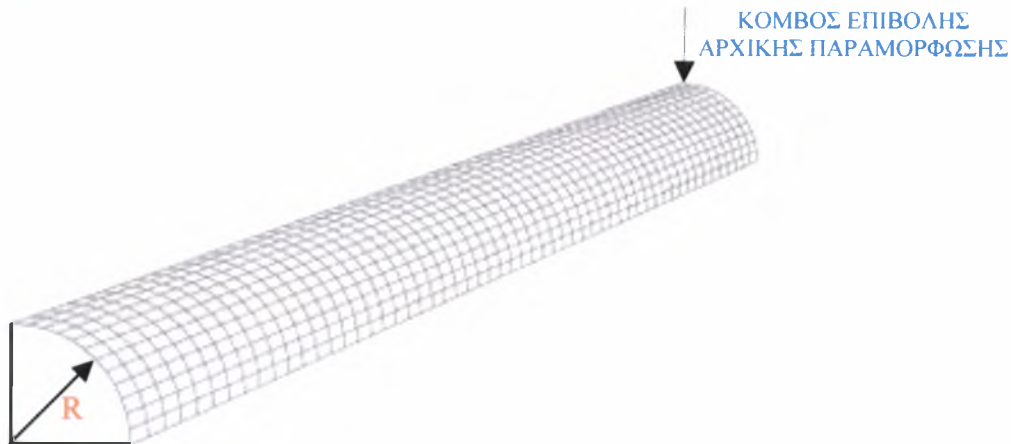


ΣΧΗΜΑ 3-9



ΣΧΗΜΑ 3-10

3.2.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ II



ΣΧΗΜΑ 3-11: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση του αγωγού II.

Ο δακτύλιος II που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο αποτελεί τυπική διατομή του αγωγού II. Η διάμετρος του αγωγού II είναι $D = 12.75in$ και το πάχος του $t = 0.25in$. Το υλικό από το οποίο αποτελείται είναι το υλικό του σχήματος 2-4 (παράγραφος 2.3 δευτέρου κεφαλαίου) ενώ το μήκος του κατά την διαμήκη έννοια είναι $L_{pipe} = 178.5 = 14D$. Το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται συνολικά από 612 στοιχεία κελύφους τύπου S4R με μήκος καθενός κατά την περιφέρεια $d_e = 0.834in$, οι κόμβοι των οποίων είναι τοποθετημένοι στην εσωτερική επιφάνεια του κελύφους.

Οι συνοριακές συνθήκες στις δυο ακραίες γενέτειρες (άνω, κάτω) και στις δυο ακραίες διατομές του αγωγού (δεξιά, αριστερά) είναι συνθήκες συμμετρίας ενώ το μέγεθος της αρχικής παραμόρφωσης η οποία θα προκαλέσει αρχική ατέλεια στην ακραία (δεξιά) διατομή του αγωγού (σχήμα 3-11) είναι:

$$U2 = -0.048in \quad (3.6)$$

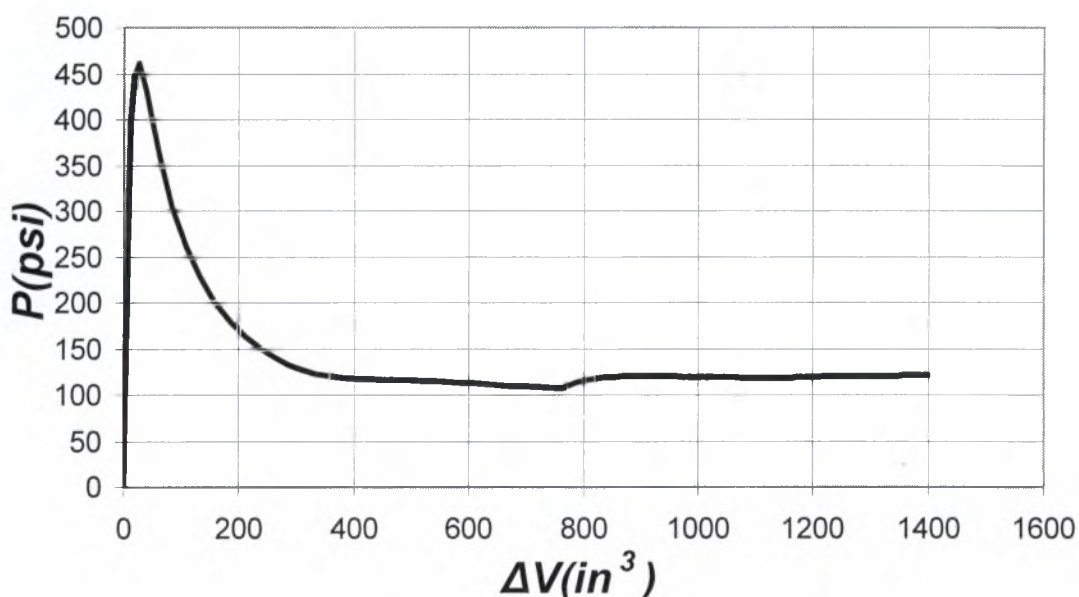
Ως επιφάνειες που αλληλεπιδρούν κατά την διάρκεια της ανάλυσης ορίζονται η άνω γενέτειρα του αγωγού και η επιφάνεια συμμετρίας και επαφής. Επιβάλλεται ομοιόμορφη πίεση στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού. Το διάνυσμα της πίεσης σε κάθε σημείο του αγωγού είναι κάθετο ως προς την παραμορφωμένη εξωτερική επιφάνεια του αγωγού. Η τιμή της πίεσης δίνεται αναλογικά με μέτρο σε κάθε χρονική στιγμή του υπολογιστικού χρόνου (increment) :

$$p = p_{ref} \cdot \lambda_i \quad (3.7)$$

όπου λ_i ο αναλογικός κλιμακωτός συντελεστής πίεσης τον οποίον υπολογίζει το ABAQUS σε κάθε increment και p_{ref} η πίεση αναφοράς που δίνει ο χρήστης.

3.2.4 ΠΙΕΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΑΓΩΓΟΥ II

Η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της πίεσης που επιβάλλεται στον αγωγό II συναρτήσει της μεταβολής του όγκου (υπολογίζεται από την σχέση (3.4) για έναν επαρκή αριθμό κόμβων της άνω γενέτειρας) του αγωγού II κατά την διάρκεια του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης φαίνεται στο σχήμα 3-12



ΣΧΗΜΑ 3-12: Δρόμος ισορροπίας του αγωγού II κατά το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης

Από την μελέτη του ανωτέρω διαγράμματος προκύπτει ότι η πίεση έναρξης του φαινομένου είναι:

$$p_i = 461 \text{ psi} \quad (3.8)$$

ενώ η πίεση διάδοσης του φαινομένου για τον αγωγό II είναι :

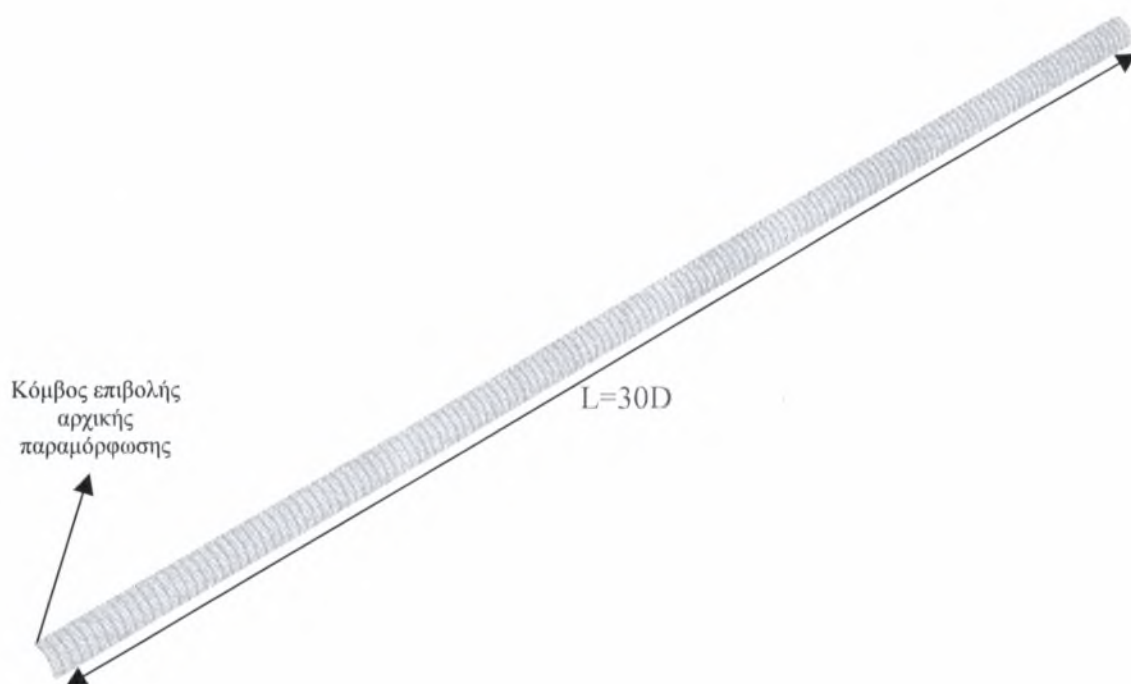
$$p_p = 120 \text{ psi} \quad (3.9)$$

Η τιμή της κρίσιμης πίεσης του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης για τον αγωγό I όπως προκύπτει από την σχέση I είναι :

$$p_{cr} = 476 \text{ psi} \quad (3.10)$$

3.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΙΙ ΜΗΚΟΥΣ 30 ΔΙΑΜΕΤΡΩΝ

Το μοντέλο που προσομοιώνεται (σχήμα 3-12) είναι αγωγός ΙΙ με εξωτερική διάμετρο $D = 12.75 \text{ in}$, πάχος κελύφους $t = 0.25 \text{ in}$ και αποτελείται από το υλικό του σχήματος 2-4 (παράγραφος 2.3 δεύτερου κεφαλαίου). Το μήκος του κατά τον διαμήκη άξονα είναι αρκετά μεγάλο $L_{\text{pipe}} = 382,5 \text{ in} = 30D$ (σχήμα 3-13).



ΣΧΗΜΑ 3-13: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την αριθμητική προσομοίωση του αγωγού ΙΙ με $L_{\text{pipe}} = 30D$ και $L_e = 3d_e$

Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται συνολικά από 1836 στοιχεία κελύφους τύπου S4R, οι κόμβοι των οποίων είναι τοποθετημένοι στην εσωτερική επιφάνεια του κελύφους (το οποίο δηλώνεται με την υποεντολή $\text{offset} = -0.5$) με λόγο

$$\frac{L_e}{d_e} :$$

$$\frac{L_e}{d_e} = 3 \quad (3.11)$$

με $L_c = 2,5in$ το μήκος κάθε στοιχείου κατά την διαμήκη έννοια και

$$d_c = \frac{\left(\frac{2\pi R}{4}\right)}{12} = 0,834 \text{ το μήκος του κατά την διεύθυνση της περιφέρειας. Οι}$$

συνοριακές συνθήκες στις δυο ακραίες γενέτειρες (άνω, κάτω) και στις δυο ακραίες διατομές του αγωγού (δεξιά, αριστερά) είναι συνθήκες συμμετρίας ενώ το μέγεθος της αρχικής παραμόρφωσης η οποία θα προκαλέσει αρχική ατέλεια στην ακραία (αριστερά) διατομή του αγωγού (σχήμα 3-13) είναι:

$$U2 = -0.048in \quad (3.12)$$

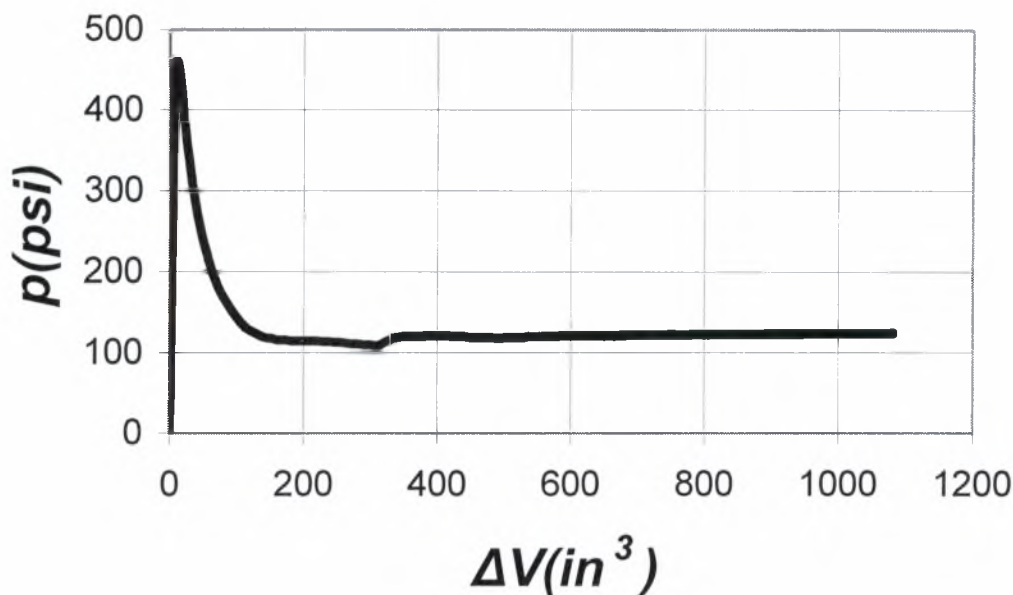
Η εσωτερική επιφάνεια του κελύφους του αγωγού ορίζεται ως η επιφάνεια η οποία έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια συμμετρίας και επαφής και δεν επιτρέπεται να εισχωρήσει στο επίπεδο 1-3 των αξόνων (λόγω συμμετρίας). Επιβάλλεται ομοιόμορφη πίεση στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού με μέτρο σε κάθε χρονική στιγμή του υπολογιστικού χρόνου (increment) :

$$p_{tot} = 10000 \times \lambda_i \quad (3.13)$$

όπου λ_i ο συντελεστής φορτίου πίεσης (pressure load factor) τον οποίον υπολογίζει το ABAQUS σε κάθε increment.

3.3.1 ΠΙΕΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

Η γραφική παράσταση της πίεσης ως προς την ποσότητα που εκφράζει μεταβολή του όγκου (για τον υπολογισμό της οποίας εφαρμόζεται η σχέση (3.4), όπου N ο αριθμός όλων των κόμβων της άνω γενέτειρας) του υπό κατάρρευση αγωγού παριστάνεται στο σχήμα 3-14.



ΣΧΗΜΑ 3-14: Δρόμος ισορροπίας αγωγού II με μήκος κατά την διαμήκη έννοια ίσο με 30 διαμέτρους κατά το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης.

Από την γραφική παράσταση προκύπτει ότι η πίεση έναρξης του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης είναι:

$$p_i = 461 \text{ psi} \quad (3.14)$$

ενώ η πίεση διάδοσης για το μοντέλο του αγωγού II μεγάλου μήκους είναι

$$p_p = 125 \text{ psi} \quad (3.15)$$

Συγκρίνοντας την τιμή της πίεσης διάδοσης για το συγκεκριμένο μοντέλο με αυτήν για το μοντέλο του αγωγού II με μήκος 15 διαμέτρων, παρατηρείται πως η πίεση διάδοσης είναι λίγο πιο μεγάλη. Αύξηση δηλαδή του μήκους του αγωγού προκαλεί αύξηση στην τιμή της πίεσης διάδοσης. Η διαφορά αυτή οφείλεται στις συνοριακές συνθήκες.

Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται οι τιμές της πίεσης διάδοσης για τους δύο τύπους αγωγών (I,II) αναλύοντας με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων αρχικά μια διατομή (δακτύλιος) το οποίο πραγματοποιήθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο και έπειτα (κεφάλαιο 3) τον αγωγό με μήκος αρκετά μεγαλύτερο της διαμέτρου κατά την διαμήκη έννοια.

	ΣΩΛΗΝΑΣ I	ΣΩΛΗΝΑΣ II
ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ	$p_p=81 \text{ psi}$	$p_p=100 \text{ psi}$
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΓΩΓΟΥ	$p_p=108 \text{ psi (L=15D)}$	$p_p=120 \text{ psi (L=14D)}$ $p_p=125 \text{ psi (L=30D)}$

ΣΧΗΜΑ 3-15: Συγκριτικός πίνακας τιμών της πίεσης διάδοσης με βάση την δισδιάστατη και την τρισδιάστατη ανάλυση για τους δυο τύπους αγωγών

Παρατηρείται ότι για κάθε αγωγό στην τρισδιάστατη ανάλυση η τιμή της πίεσης διάδοσης είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή της Maxwell line. Ο λόγος της διαφοράς αυτής έγκειται στο γεγονός ότι στην τρισδιάστατη ανάλυση λαμβάνεται η συνεισφορά του έργου των μεμβρανικών διαμηκών τάσεων (stretching work) το οποίο αγνοείται στην ανάλυση της διατομής όπου λαμβάνονται υπόψη μόνο οι τάσεις κατά την ακτινική διεύθυνση της διατομής (circumferential). Η σύγκριση λοιπόν των αποτελεσμάτων δισδιάστατης και τρισδιάστατης ανάλυσης (πίνακας σχήματος 3-15) φανερώνει τη σπουδαιότητα του έργου αυτών των τάσεων και την συνεισφορά του στο φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης αφού το έργο αυτό είναι που επιφέρει την αύξηση της τιμής της πίεσης διάδοσης σε σχέση με την δισδιάστατη ανάλυση.

4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ-ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σ' αυτό το κεφάλαιο θεωρούνται αναστολές σε αγωγούς οι οποίοι υφίστανται το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης. Πρόκειται, όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, για δακτυλίους με εσωτερική διάμετρο ίση με του αγωγού αλλά σημαντικά μεγαλύτερου πάχους, ενώ το μήκος τους είναι μικρότερο της διαμέτρου του αγωγού. Το υλικό των αναστολέων είναι το ίδιο με το υλικό από το οποίο αποτελούνται τα διαδοχικά τμήματα του αγωγού μεταξύ των οποίων τοποθετούνται οι αναστολές. Στόχος είναι ο υπολογισμός της πίεσης ανάσχεσης του αναστολέα ενώ μελετάται και η εξάρτησή της από τις διαστάσεις του αναστολέα (μήκος L_a και πάχος t_a) σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του αγωγού (D, t).

Επειδή, όπως αναφέρθηκε, οι αναστολές αποτελούν εσωτερικό τμήμα του αγωγού με διαφορετικό ως προς αυτόν μόνο το πάχος, η μοντελοποίησή τους στο υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS γίνεται με την αύξηση του πάχους των στοιχείων της εσωτερικής διατομής του αγωγού η οποία αποτελεί τον αναστολέα της διαδιδόμενης ύβωσης. Πρέπει να τονιστεί ότι λόγω της συμμετρίας του μοντέλου αγωγού-αναστολέα ως προς τα επίπεδα X_1 - X_2 και X_1 - X_3 , σχεδιάζεται και αναλύεται το ένα τέταρτο του αγωγού σε σχέση με την συνολική του περίμετρο.

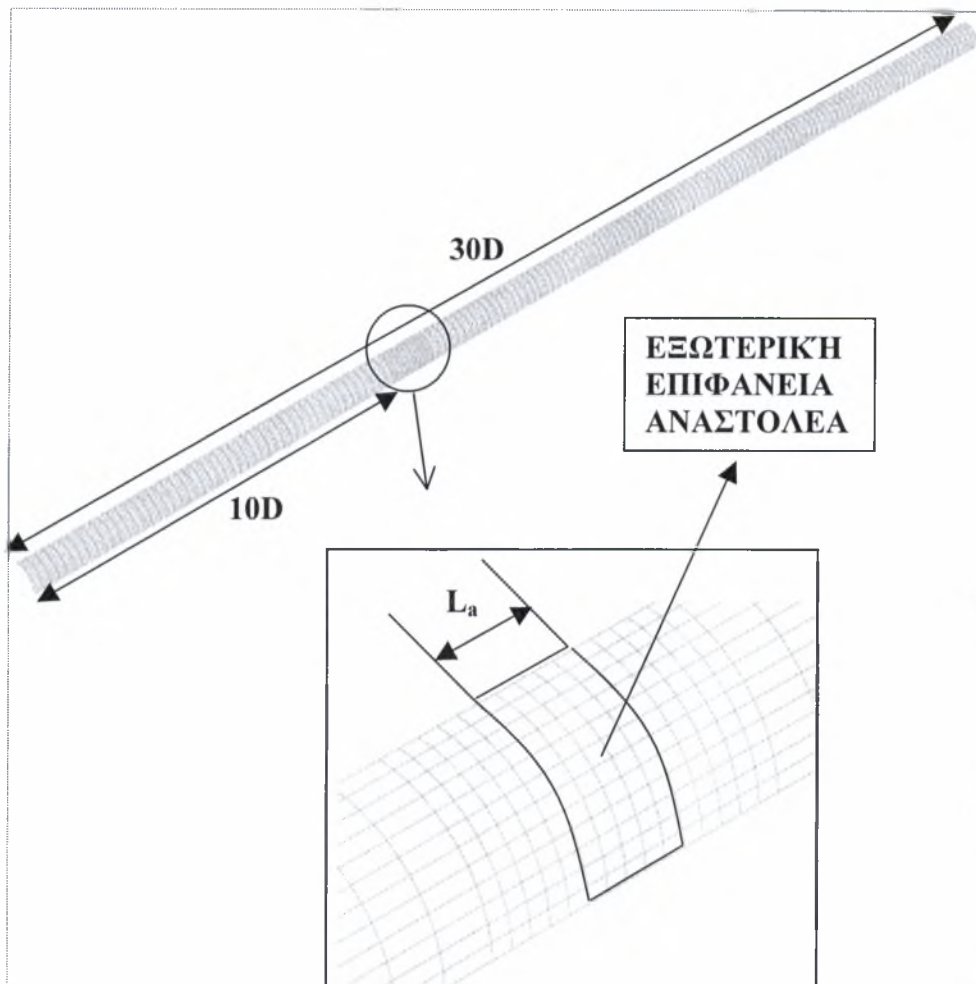
4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟ Α

Ο αγωγός είναι τύπου Π με εξωτερική διάμετρο $D_{out} = 12.75in$ και πάχος $t = 0.25in$, ενώ ο αναστολέας αποτελεί διατομή αγωγού Π του οποίου η εσωτερική διάμετρος είναι ίδια με του αγωγού. Το μήκος του κατά τον άξονα X_3 είναι $L_a = 5in$ ενώ το πάχος του $t_a = 0.67in$. Το συνολικό μήκος του μοντέλου Α είναι $L = 382.5in$ ($L = 30D$) (σχήμα 4-1). Η καμπύλη ονομαστικής τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης του υλικού από το οποίο αποτελείται τόσο ο αγωγός όσο και ο αναστολέας απεικονίζεται στο σχήμα 2-4 (παράγραφος 2-3 δευτέρου κεφαλαίου). Για την διακριτοποίηση τόσο του αγωγού όσο και του αναστολέα χρησιμοποιούνται τετρακομβικά στοιχεία κελύφους τύπου S4R, των οποίων οι κόμβοι είναι

τοποθετημένοι στην εσωτερική επιφάνεια του κελύφους με μήκος κατά την περιφέρεια καθενός από τα 12 στοιχεία κάθε διατομής ίσο με $d_e = 0.834in$. Ο αναστολέας βρίσκεται στο τμήμα του αγωγού που εκτείνεται από $X_3 = 127.5in$ ως $X_3 = 132.5in$ όπου το μήκος κάθε στοιχείου κατά τον διαμήκη άξονα X_3 είναι $L_e = 1in$. Στις διατομές του αγωγού πριν (εκτείνεται από $X_3 = 122.5in$ ως $X_3 = 127.5in$) και μετά (εκτείνεται από $X_3 = 127.5in$ ως $X_3 = 132.5in$) τον αναστολέα το πλέγμα είναι και εκεί το ίδιο πυκνό με μήκος κάθε στοιχείου κατά τον διαμήκη άξονα X_3 ίσο επίσης με $L_e = 1in$. Στις εναπομείναντες διατομές του αγωγού, οι οποίες εκτείνονται, η πρώτη από $X_3 = 0$ ως $X_3 = 122.5in$ και η δεύτερη από $X_3 = 0$ ως $X_3 = 122.5in$, το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων είναι λίγο πιο αραιό με μήκος κάθε στοιχείου κατά τον διαμήκη άξονα X_3 να είναι $L_e = 2.5in$. Στην ακραία αριστερά διατομή του αγωγού ($X_3 = 0$) επιβάλλεται αρχική παραμόρφωση $U_2 = -0.048in$ για την δημιουργία αρχικής ατέλειας από όπου και θα ξεκινήσει το διαδοχικό "σάρωμα" των διατομών. Οι συνοριακές συνθήκες στις δυο ακραίες γενέτειρες (άνω, κάτω) και στις δυο ακραίες διατομές του αγωγού (δεξιά, αριστερά) είναι συνθήκες συμμετρίας. ενώ σαν επιφάνειες που αλληλεπιδρούν κατά την διάρκεια της ανάλυσης ορίζονται η εσωτερική επιφάνεια του αγωγού και η επιφάνεια συμμετρίας και επαφής η οποία βρίσκεται στο επίπεδο $X_2 = 0$ και εκτείνεται από $X_3 = 0$ ως $X_3 = 382.5in$ έχει δηλαδή μήκος ίσο με το μήκος του αγωγού. Επιβάλλεται ομοιόμορφη πίεση στην εξωτερική επιφάνεια του μοντέλου αγωγού – αναστολέα. Η τιμή της πίεσης δίνεται αναλογικά με μέτρο σε κάθε χρονική στιγμή του υπολογιστικού χρόνου (increment) :

$$p = p_{ref} \cdot \lambda_t$$

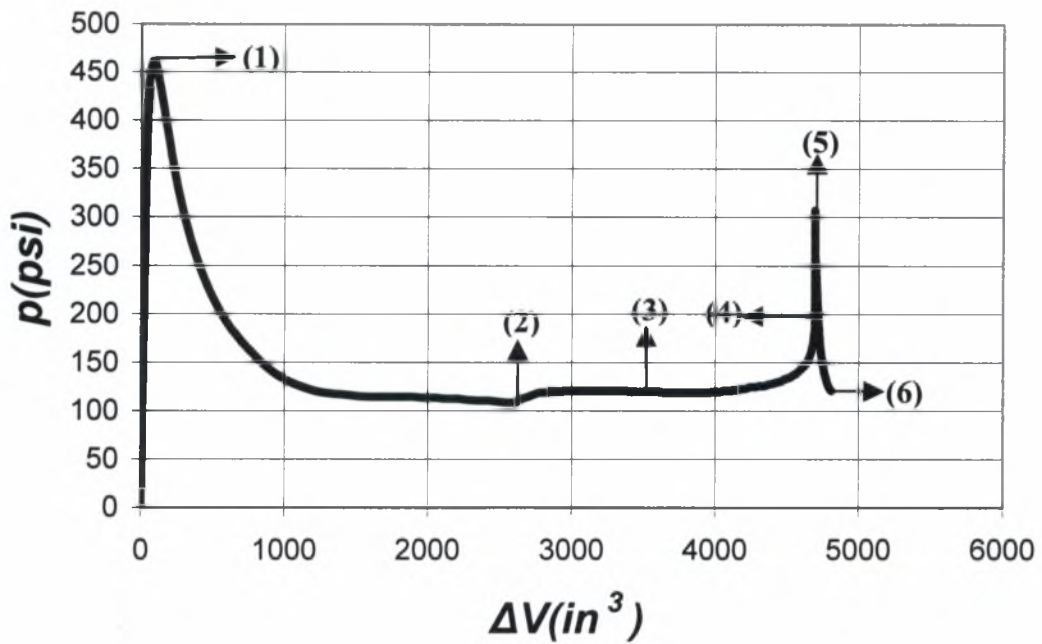
όπου λ_t ο συντελεστής φορτίου πίεσης και p_{ref} είναι η πίεση αναφοράς που δίνει ο χρήστης.



ΣΧΗΜΑ 4-1: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση του συστήματος αγωγού αναστολέα.

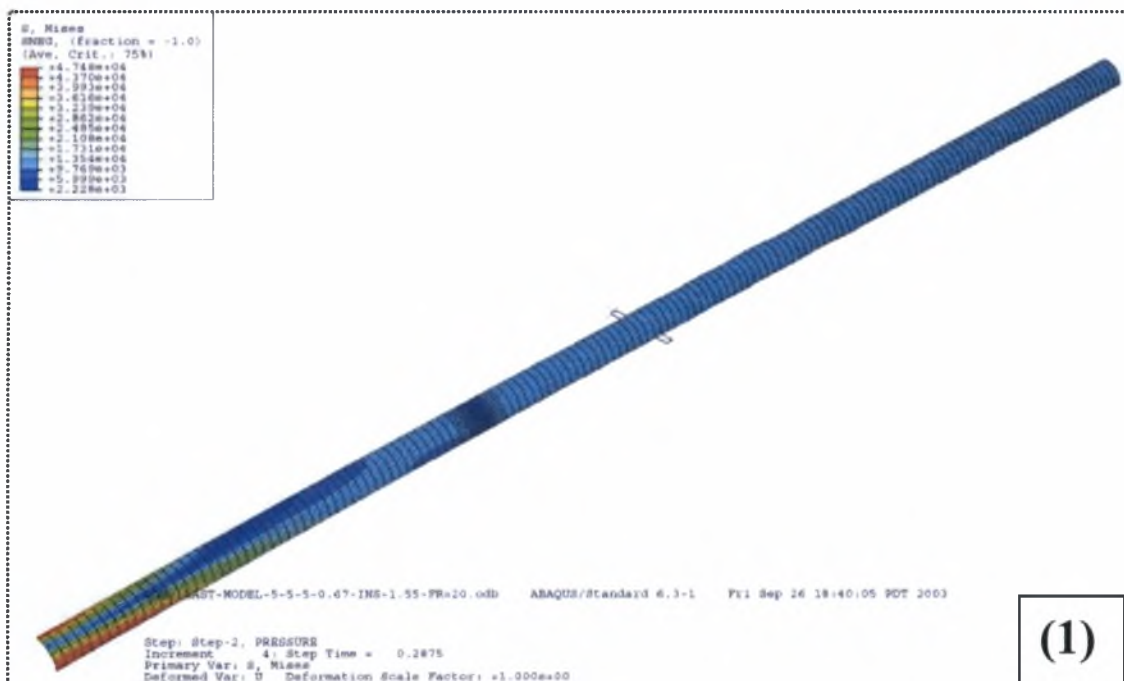
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η γραφική παράσταση της εξωτερικά ομοιόμορφα επιβαλλόμενης πίεσης P σε συνάρτηση της μεταβολής της ποσότητας ΔV που εκφράζει τον όγκο που περικλείεται από τον αγωγό απεικονίζεται στο σχήμα 4-2. Για την εκτίμηση του ΔV γίνεται εφαρμογή και σ' αυτήν την περίπτωση της σχέσης (3.4) με N να είναι ένας επαρκής αριθμός κόμβων της άνω γενέτειρας του αγωγού Π (δε λαμβάνονται οι κόμβοι της άνω γενέτειρας του αναστολέα)

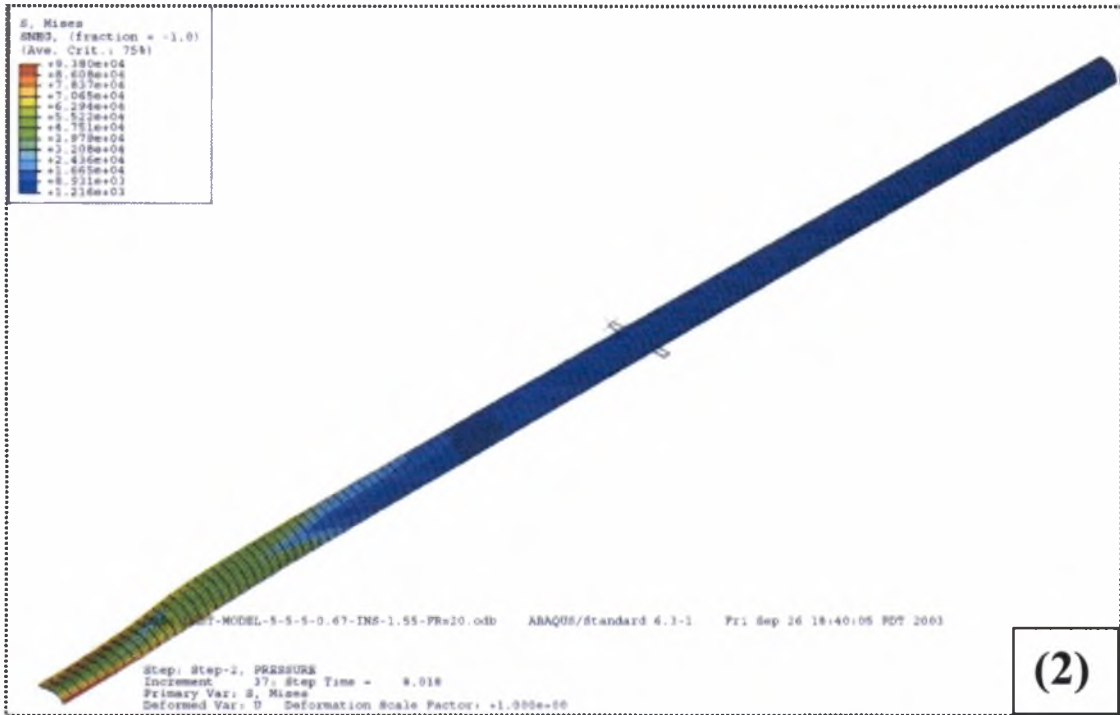


ΣΧΗΜΑ 4-2: Δρόμος ισορροπίας συστήματος αγωγού Π-αναστολέα Π κατά το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης και της αναστολής της.

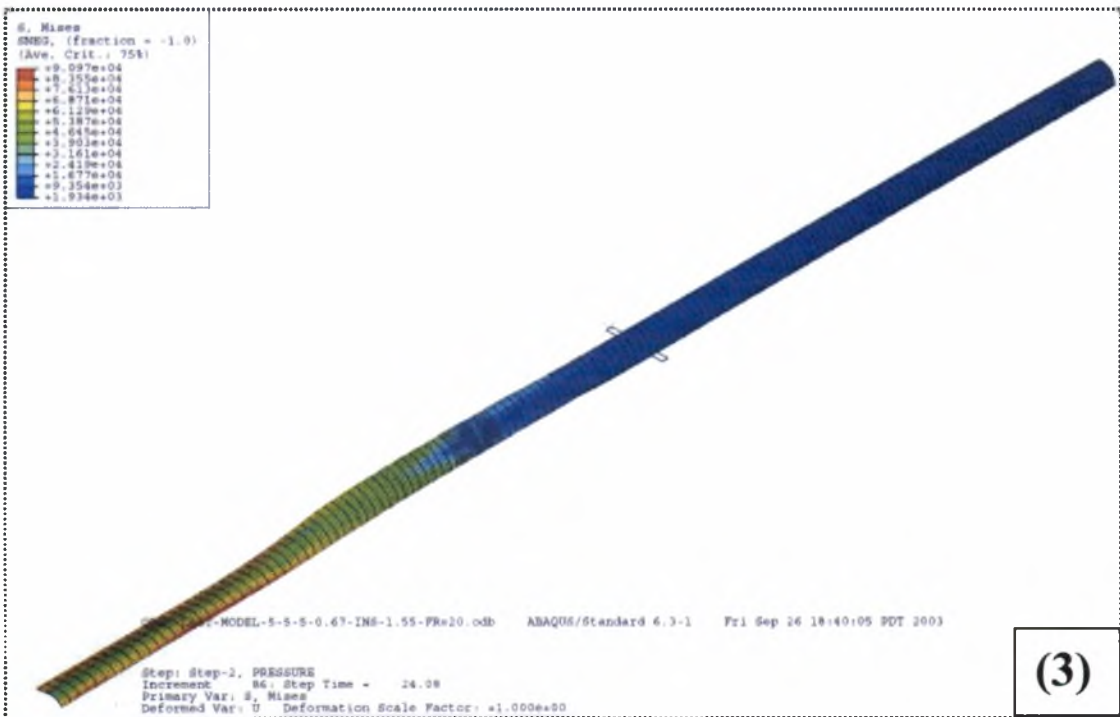
Τα διάφορα στάδια εξέλιξης του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης με την τοποθέτηση του αναστολέα ($L_a = 5in$, $t_a = 0.67in$) τα οποία αντιστοιχούν στα σημεία του δρόμου ισορροπίας που σημειώνονται στο σχήμα 4-2, φαίνονται στις παρακάτω εικόνες (σχήμα 4-3 ως 4-8)



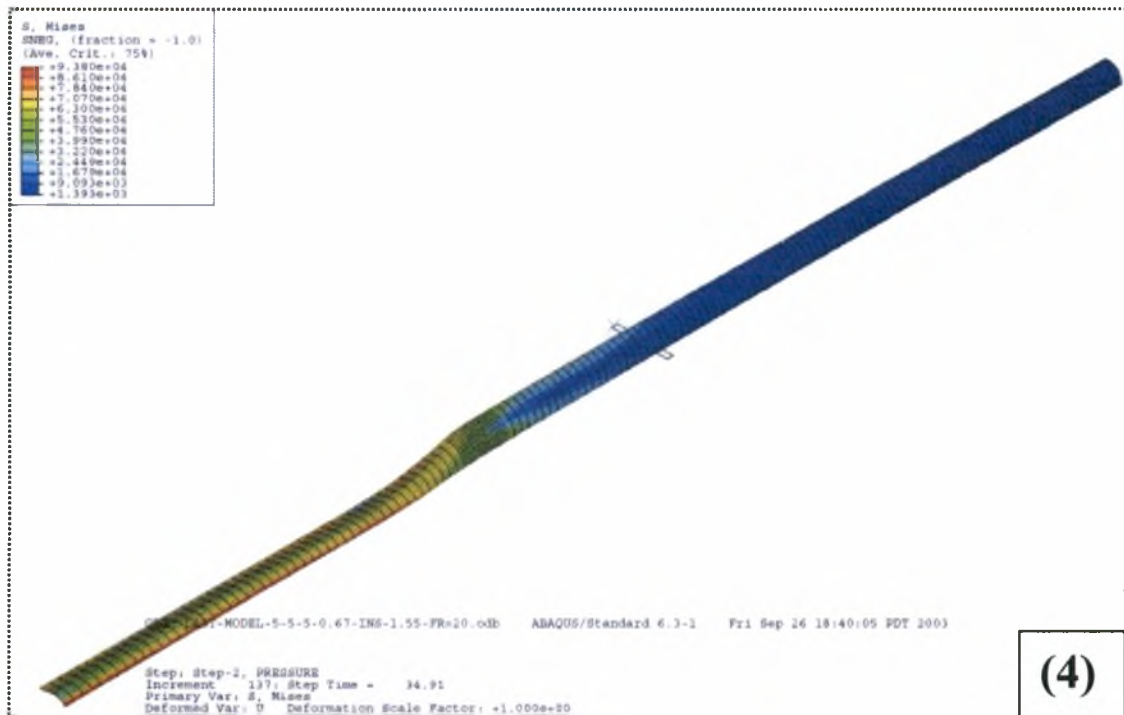
ΣΧΗΜΑ 4-3



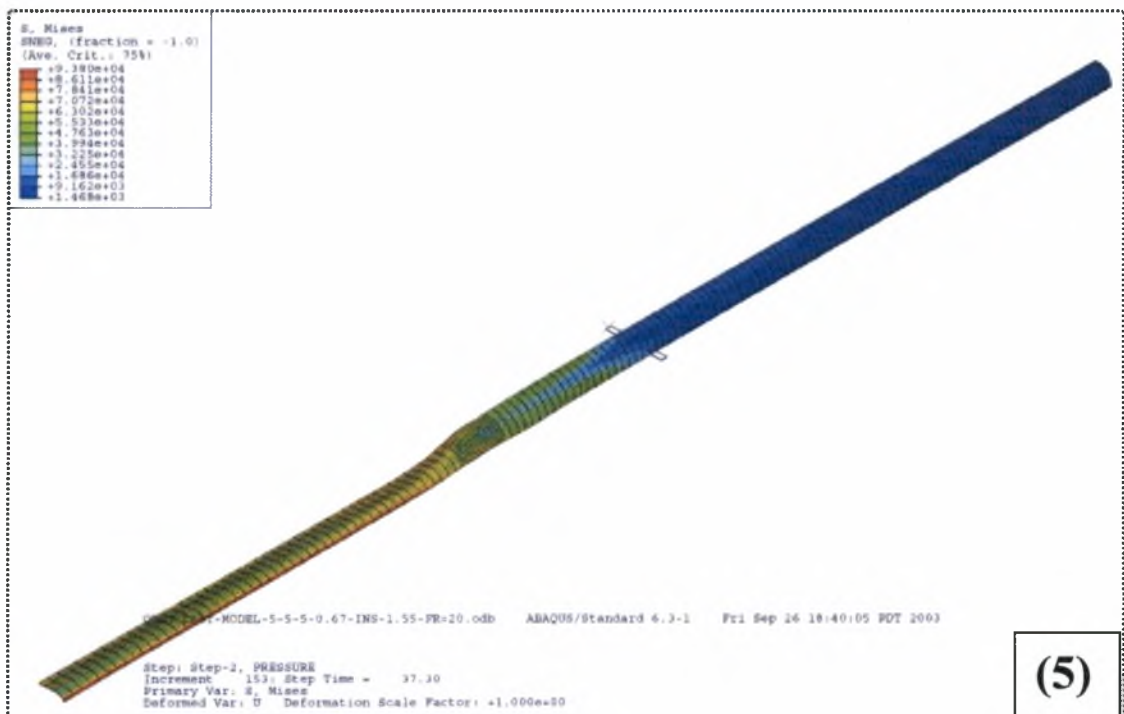
ΣΧΗΜΑ 4-4



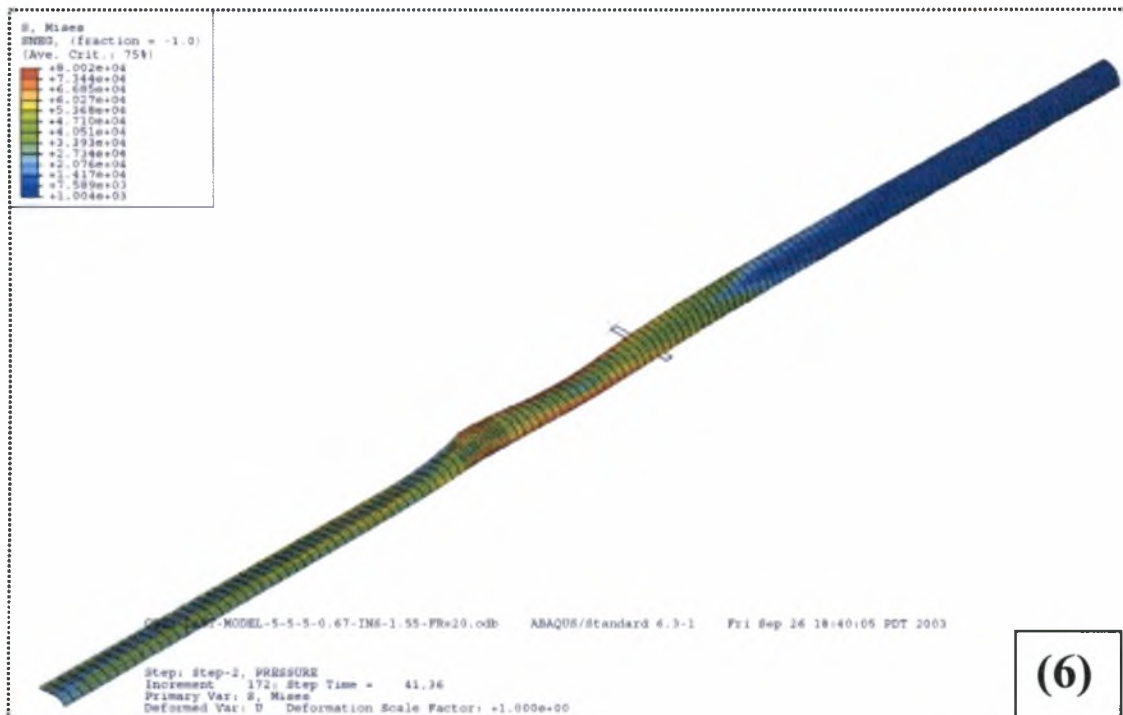
ΣΧΗΜΑ 4-5



ΣΧΗΜΑ 4-6



ΣΧΗΜΑ 4-7



ΣΧΗΜΑ 4-8

Από την γραφική παράσταση P-ΔV του σχήματος 4-3 προκύπτει ότι:

- Η πίεση έναρξης του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης, p_i , είναι $p_i = 461 \text{ psi}$.
- Η πίεση διάδοσης, p_p , είναι $p_p = 120 \text{ psi}$.
- Η πίεση ανάσχεσης, p_{co} , είναι $p_{co} = 307 \text{ psi}$.

Η κρίσιμη πίεση p_{cr} για τον αγωγό εφαρμόζοντας την σχέση (1.1) είναι $p_{cr} = 476 \text{ psi}$, ενώ εφαρμογή της ίδιας σχέσης για τον αναστολέα, θεωρώντας τον έναν αγωγό με μέση διάμετρο $D_m = 12.75 \text{ in}$ και πάχος $t = 0.67 \text{ in}$ είναι $p_{cr}^{(a)} = 4787 \text{ psi}$.

4.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ

Η αποτελεσματικότητα (efficiency) e του αναστολέα από την σχέση (1.11) είναι:

$e = 2.56$. Αναστολείς δηλαδή με πάχος μεγαλύτερο κατά 68% σε σχέση με το πάχος

του αγωγού και μήκος περίπου ίσο με το 40% της διαμέτρου $\left(\frac{L_a}{D} = \frac{5 \text{ in}}{12.75 \text{ in}} = 0.39 \right)$

έχουν μια πίεση ανάσχεσης 2.5 φορές μεγαλύτερη της πίεσης διάδοσης. Η ανηγμένη αποτελεσματικότητα (normalized efficiency) του αναστολέα από την σχέση (1.13) είναι: $h = 0.55$

4.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ Α

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο Α αγωγού ΙΙ-αναστολέα που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο διεξάγεται παραμετρική μελέτη για αναστολείς με το ίδιο μήκος ($L_a = 5in$) αλλά διαφορετικά πάχη. Προσομοιώνονται 6 μοντέλα με πάχη αναστολέα $t_a = 0.3in, 0.35in, 0.4in, 0.45in, 0.55in,$ και $0.625in$ αντίστοιχα. Οι τιμές της πίεσης έναρξης, p_i , της διαδιδόμενης ύβωσης, της πίεσης διάδοσης, p_p , και της πίεσης ανάσχεσης, p_{co} , του αναστολέα, καθώς και η αποτελεσματικότητα e του αναστολέα, η ανηγμένη αποτελεσματικότητα του n , και η κρίσιμη πίεση $p_{cr}^{(a)}$ του αναστολέα εφαρμόζοντας την σχέση (1.1) για καθένα από τα μοντέλα παρατίθενται στον πίνακα του σχήματος 4-6.

$t_a(in)$	$p_i(psi)$	$p_p(psi)$	$p_{co}(psi)$	e	n	$p_{cr}^{(a)}$
0.3	461	120	140	1.17	0.06	800
0.35	461	120	155	1.29	0.1	1218
0.4	461	120	169	1.41	0.14	1714
0.45	461	120	186	1.55	0.19	2266
0.55	461	120	229	1.91	0.32	3431
0.625	461	120	276	2.3	0.46	4291

$L_a=5in$

ΣΧΗΜΑ 4-9: Πίνακας παραμετρικής μελέτης για 6 διαφορετικά πάχη αναστολέα του μοντέλου Α

4.5 ΜΟΝΤΕΛΟ Β

Αναλύθηκε ένα δεύτερο μοντέλο αγωγού ΙΙ (μοντέλο Β) το οποίο διαφέρει με το μοντέλο Α μόνο ως προς την διακριτοποίηση. Τα στοιχεία δηλαδή που αποτελούν τον

αναστολέα έχουν μήκος κατά την διαμήκη έννοια $2.5in$, ίσο με το μήκος των στοιχείων που αποτελούν τον αγωγό ενώ δεν χρησιμοποιείται πυκνό πλέγμα πριν και μετά τον αναστολέα. Έγινε παραμετρική μελέτη με μήκος αναστολέα $L_a = 5in$ και δύο διαφορετικά πάχη αυτού ($t_a = 0.5in$ και $t_a = 0.67in$) τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στον πίνακα του σχήματος 4-10.

$L_a(in)$	$t_a(in)$	$p_i(psi)$	$p_p(psi)$	$p_{co}(psi)$	e	η	$p_{cr}^{(a)}$
5	0,5	461	120	205	1.71	0.25	2846
5	0,67	461	120	296	2.47	0.52	4787

ΣΧΗΜΑ 4-10: Πίνακας παραμετρικής μελέτης του μοντέλου Γ αγωγού II-αναστολέα II για μήκος αναστολέα 5 in και δυο διαφορετικά πάχη αυτού.

4.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ A & B

Επιλέγεται ο αναστολέας με μήκος $L_a = 5in$ και πάχος $t = 0.67in$ που χρησιμοποιείται και στα δυο μοντέλα ώστε να γίνει σύγκριση αυτών. Από το αποτέλεσμα της σύγκρισης το οποίο απεικονίζεται στον πίνακα του σχήματος 4-11 φαίνεται ότι υπάρχει διαφορά (όχι και τόσο μεγάλη) στην τιμή της πίεσης ανάσχεσης. Η διαφορά οφείλεται στην πύκνωση του πλέγματος.

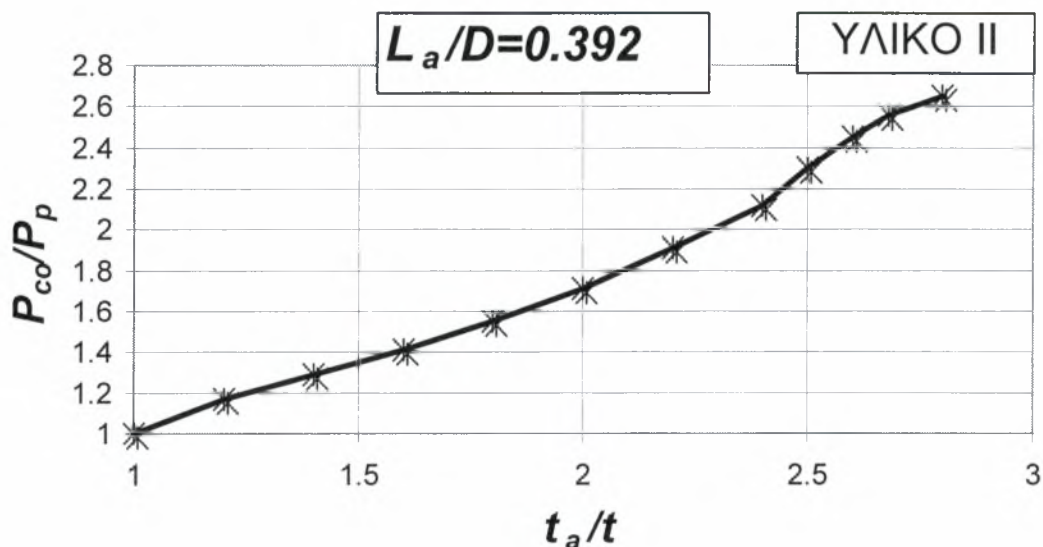
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ							
$L_a=5in$ $t_a=0.67in$		$p_i(psi)$	$p_p(psi)$	$p_{co}(psi)$	e	η	$p_{cr}^{(a)}$
		ΜΟΝΤΕΛΟ A	461	120	307	2.56	0,55
$L=382.5in$	ΜΟΝΤΕΛΟ B	461	120	296	2.47	0.52	4787

ΣΧΗΜΑ 4-11: Συγκριτικός πίνακας

4.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ

4.7.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ

Στην γραφική παράσταση του σχήματος 4-12 απεικονίζονται οι τιμές του αδιάστατου αριθμού P_{co}/P_p συναρτήσει του αδιάστατου αριθμού t_a/t για αναστολές με πάχη $t_a = 0.3$ ως $0.7in$ και σταθερό μήκος $L_a = 5in$. Υπενθυμίζεται πως ο αγωγός είναι τύπου II με διάμετρο $D = 12.75in$, πάχος $t = 0.25in$ ενώ η πίεση διάδοσης είναι σε όλες τις περιπτώσεις $p_p = 120psi$



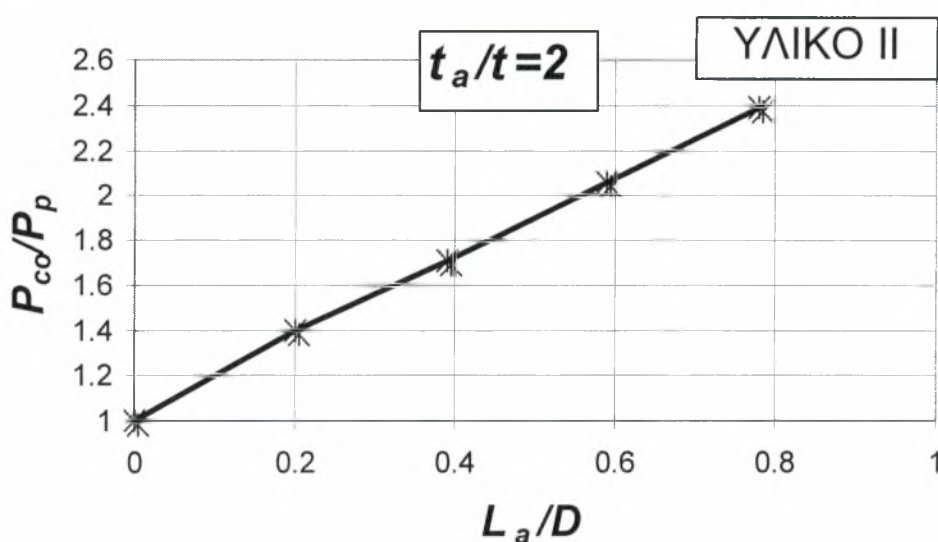
ΣΧΗΜΑ 4-12:Γραφική παράσταση της πίεσης ανάσχεσης συναρτήσει του πάχους του αναστολέα για σταθερό μήκος αυτού

Οι τιμές του πάχους του αναστολέα και της αντίστοιχης πίεσης ανάσχεσης είναι:

$t_a(in)$	$p_{co}(psi)$
0.30	140.4
0.35	154.8
0.40	169.2
0.45	186.0
0.50	205.2
0.55	229.2
0.60	254.4
0.625	276.0
0.65	294.0
0.67	307.2
0.7.0	318.0

Το σημείο (1,1) του διαγράμματος αντιστοιχεί σε μηδενικό πάχος αναστολέα όπου η πίεση ανάσχεσης εκφυλίζεται στην πίεση διάδοσης. Παρατηρείται ότι για σταθερό λόγο $L_a/D = 0.392$ και περίπου σταθερό ρυθμό αύξησης του λόγου t_a/t κάθε φορά, ο λόγος P_{co}/P_o αυξάνεται με σταθερό επίσης ρυθμό.

4.7.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΤΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ



ΣΧΗΜΑ 4-13: Γραφική παράσταση της πίεσης ανάσχεσης συναρτήσει του πάχους του αναστολέα για σταθερό μήκος αυτού

$L_a(\text{in})$	$p_{co}(\text{psi})$
2.5	168
5	205.2
7.5	247.2
10	286.8

ΣΧΗΜΑ 4-14: Τιμές διαγράμματος.

Στην γραφική παράσταση του σχήματος 4-13 απεικονίζονται οι τιμές του αδιάστατου αριθμού P_{co}/P_o συναρτήσει του αδιάστατου αριθμού L_a/D για σταθερό λόγο $t_a/t = 2$. Τα μήκη αναστολέα που χρησιμοποιούνται είναι $L_a = 2.5, 5, 7.5$ και 10 in . Το πρώτο σημείο αντιστοιχεί σε μηδενικό μήκος αναστολέα, δηλαδή υπάρχει μόνο ο

αγωγός και επομένως η πίεση ανάσχεσης εκφυλίζεται στην πίεση διάδοσης.

Παρατηρείται ότι η συνάρτηση $\frac{p_{co}}{p_p} = f\left(\frac{t_a}{t}\right)$ είναι αύξουσα και οίονει γραμμική.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης και της αναστολής της σε υποθαλάσσιους αγωγούς. Για τον σκοπό αυτό έγινε χρήση του υπολογιστικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή με στόχο την γενική κατανόηση του φαινομένου και τότε αυτό παρατηρείται. Προσομοιώθηκαν δύο τύποι αγωγών διαφορετικής γεωμετρίας και υλικού. Έγινε θεώρηση της γεωμετρικής μη γραμμικότητας και ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του υλικού, ενώ λόγω της συμμετρίας των μοντέλων ως προς τα επίπεδα αξόνων X_1 - X_2 και X_1 - X_3 σε όλες τις προσομοιώσεις αναλύθηκε το ένα τέταρτο αυτών. Παρατηρήθηκαν μεγάλες μεταβολές στην γεωμετρία των μοντέλων, ενώ σημειώθηκε και επαφή της άνω γενέτειρας ($X_1 = 0$) με την επιφάνεια συμμετρίας και επαφής ($X_2 = 0$). Αρχικά πραγματοποιήθηκε ανάλυση δακτυλίου σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης για τους δύο τύπους αγωγών ώστε να ληφθεί μια πρώτη εκτίμηση της πίεσης διάδοσης, της σταθερής δηλαδή πίεσης για την οποία το φαινόμενο διαδίδεται κατά την διαμήκη έννοια. Η εξαγωγή της εκτίμησης αυτής έγινε από το διάγραμμα της ομοιόμορφα εξωτερικά επιβαλλόμενης πίεσης συναρτήσεως της μείωσης του εμβαδού που περικλείεται από τον παραμορφωμένο δακτύλιο χρησιμοποιώντας την μέθοδο χάραξης της γραμμής Maxwell που πρότειναν οι Chater & Hutchinson (1984). Παρατηρήθηκε ότι και για τους δυο τύπους αγωγών, η τιμή της πίεσης διάδοσης με την μέθοδο της Maxwell-line ήταν υψηλότερη της αντίστοιχης που προέκυπτε από την έκφραση κλειστής μορφής των Palmer & Martin (1975), και αυτό γιατί στην εξίσωση των Palmer & Martin η πλαστικοποίηση συμβαίνει μόνο στα τέσσερα σημεία των τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων ενώ με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η πλαστικοποίηση συμβαίνει σε μια ευρύτερη περιοχή γύρω από τα τέσσερα αυτά σημεία. Επιπλέον στην σχέση των Palmer & Martin δε λαμβάνεται υπόψη η κράτνση του υλικού και για αυτό παρατηρείται διαφορά στην τιμή σε σχέση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Εν συνεχεία προσομοιώθηκαν μοντέλα σωληνωτών αγωγών μεγάλου μήκους σε τρισδιάστατη ανάλυση. Χρησιμοποιήθηκαν οι δύο τύποι αγωγών για τους οποίους έγινε η δισδιάστατη ανάλυση και υπολογίστηκε η τιμή της πίεσης διάδοσης για καθέναν από αυτούς. Η σύγκριση των τιμών αυτών με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ανάλυσης

των δακτυλίων φανέρωσε την σπουδαιότητα της συνεισφοράς των μεμβρανικών διαμηκών τάσεων στο φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης. Ακόμα αναλύοντας αρκετά μεγαλύτερο μήκος ενός από τους δύο τύπους αγωγών διαπιστώθηκε ότι η τιμή της πίεσης διάδοσης αυξάνεται και οφείλεται στις συνοριακές συνθήκες. Τέλος τοποθετήθηκαν αναστολείς της μορφής integral-ring στους αγωγούς με στόχο τον υπολογισμό της πίεσης ανάσχεσης. Επειδή στην περιοχή γύρω από τον αναστολέα παρατηρείται μεγάλη συγκέντρωση τάσεων εξαιτίας της απότομης αύξησης της πίεσης, για την καλύτερη εκτίμηση της τιμής της πίεσης ανάσχεσης χρησιμοποιήθηκε αρκετά πυκνό πλέγμα στην περιοχή πριν και μετά τον αναστολέα καθώς και σ' αυτόν. Μελετήθηκε ακόμα και η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στην πίεση ανάσχεσης για μεταβλητό το ένα μέγεθος (πάχος ή μήκος) και σταθερό το άλλο (μήκος ή πάχος). Διαπιστώθηκε ότι η αύξηση των διαστάσεων του αναστολέα μπορεί να συντελέσει σε σημαντική αύξηση της πίεσης ανάσχεσης.

Ο καταστροφικός λοιπόν χαρακτήρας του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης επιβάλλει θέμα βέλτιστου σχεδιασμού με στόχο την αποφυγή του φαινομένου. Ο σχεδιασμός των αγωγών γίνεται με βάση την κρίσιμη πίεση αφού ο σχεδιασμός τους με βάση την πίεση διάδοσης κρίνεται αντιοικονομικός. Στην περίπτωση όμως αυτή χρησιμοποιούνται οι αναστολείς της διάδοσης έτσι ώστε πιθανή έναρξη του φαινομένου να καταστρέψει ένα μικρό μέρος του αγωγού ώστε να είναι δυνατή η αφαίρεση και αντικατάσταση του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Brush, D. O. and Almroth, B. O. (1975), *Buckling of Bars, Plates, and Shells*, McGraw-Hill, New York.
- [2] Chater, E, and Hutchinson, J. W. (1984), On the Propagation of Bulges and Buckles, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 51, pp. 269-277.
- [3] Jensen, H. M. (1988), Collapse of Hydrostatically Loaded Cylindrical Shells, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 1, pp. 51-64.
- [4] Kyriakides, S. and Arikan, E. (1983), Buckling Behavior of Inelastic Inextensional Rings Under External Pressure, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 50, pp. 537-543.
- [5] Kyriakides, S. and Babcock, C. D. (1982), Buckle propagation phenomena in pipelines, *IVTAM Symposium on Collapse*, Cambridge, UK, Vol. 1, pp. 74-91.
- [6] Kyriakides, S. and Babcock, C. D. (1982), Experimental Determination of the Propagation Pressure of Circular Pipes, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 103, pp. 328-336.
- [7] Kyriakides, S., Park, T.-D. and Netto, T. A. (1988), On the design of integral buckle arrestors for offshore pipelines, *Applied Ocean Research*, Vol. 20, pp. 95-104.
- [8] Langner, C.G. (1984), Design of deepwater pipelines, *TNO-IWECO 30th Anniversary Symposium on Underwater Technology*, Kurhaus, The Hague, Netherlands.
- [9] Mansour, G. N. and Tassoulas, J. L. (1977), Crossover of Integral-Ring Buckle Arrestors : Computational Results, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No 4, pp. 359-366.

- [10] Netto, T. A. and Estefen, S. F. (1996), Buckle Arrestors for Deepwater Pipelines, *Marine Structures*, Vol. 9, pp. 873-883.
- [11] Netto, T.A. and Kyriakides, S. (2000), Dynamic performance of integral buckle arrestors for offshore pipelines. Part I: Experiments, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol 42, pp. 1405-1423.
- [12] Netto, T.A. and Kyriakides, S. (2000), Dynamic performance of integral buckle arrestors for offshore pipelines. Part II: Analysis, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol 42, pp. 1425-1452.
- [13] Palmer, A. C. and Martin, J. H., (1975), Buckle Propagation in Sybmarine Pipelines, *Nature*, Vol. 1, pp. 46-48.
- [14] Park, T.-D. and Kyriakides, S. (1997), On the performance of integral buckle arrestors for offshore pipelines, *International Journal of Mecahnical Sciences*, Vol 39, No. 6, pp. 643-669.
- [15] Tassoulas, J. L., Katsounas, A.T. and Song, H-W. (1990), Finite Element Analysis of Propagating Buckles in Deepwater Pipelines, *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas.
- [16] Veldman, H. and Lagers, G. (1997), *50 Years Offshore*, Foundation for Offshore Studies, Delft, The Netherlands.
- [17] Wilkins, J. R. (1994), From S-lay to J-lay, *OMAE Conference Pipeline Technology*, ASME, Vol. 5, pp. 319-331.