



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

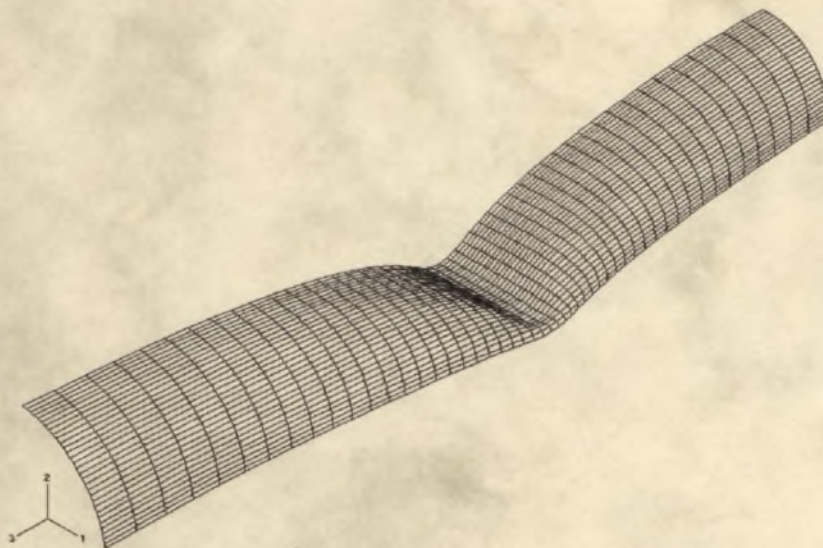


**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Χαράλαμπος Ελευθεριάδης

**ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ
ΥΠΟ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗ
ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων:

Σ. Α. Καραμάνος

Εξεταστική Επιτροπή:

Ν. Αράβας

Κ. Παπαδημητρίου

Βόλος, Ιούλιος 2002



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

Αριθ. Εισ.: 1628/1

Ημερ. Εισ.: 24-07-2002

Δωρεά: Συγγραφέα

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜΒ

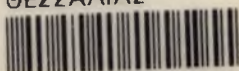
2002

ΕΛΕ

Αρ. εισ. 336



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000062884



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	4
-------------------	---

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
---------------	---

Κεφάλαιο 1

Η Αντοχή Κυλινδρικών Κελυφών

Υπό Εγκάρσια Φορτία-Βιβλιογραφικές Αναφορές

1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	6
-------------------------------------	---

1.2 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ.....	6
---	---

Κεφάλαιο 2

Δισδιάστατη Ανάλυση Κυλινδρικών Κελυφών

Υπό Εγκάρσια Φόρτιση και Πίεση

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
----------------	----

2.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Α (ΑΣΤΟΧΙΑ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ).....	11
--	----

2.1.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	11
--	----

2.1.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ.....	14
------------------------------	----

2.1.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ.....	16
---	----

2.1.4 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	16
--	----

2.1.5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ.....	17
------------------------------	----

2.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Β (ΑΣΤΟΧΙΑ ΜΕ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΕ ΔΥΟ ΑΚΑΜΠΤΕΣ ΠΛΑΚΕΣ)	19
--	----

2.2.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	19
--	----

2.2.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ.....	21
------------------------------	----

2.2.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	23
---------------------------------	----

2.2.4 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	23
--	----

2.2.5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ.....	25
------------------------------	----

2.2.6 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΤΡΟ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ.....	27
---	----

2.2.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ	28
---------------------------------	----

Κεφάλαιο 3
Τρισδιάστατη Ανάλυση Κυλινδρικών Κελυφών Αλουμινίου
Υπό Εγκάρσια Φόρτιση και Πίεση

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	30
3.1 ΑΣΤΟΧΙΑ ΧΩΡΙΣ ΠΙΕΣΗ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΤΩΝ ΜΟΡΦΗΣ ΛΕΠΙΔΑΣ	30
3.1.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ (“RING MODE”).....	32
3.1.2 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ (“TRANSITIONAL MODE”).....	37
3.1.3 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ “ΟΒΑΛΟΠΟΙΗΣΗ” (“REVERSING OVALITY MODE”)	38
3.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	40
3.2.1 ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΑΚΡΑ.....	42
3.2.2 ΠΑΚΤΩΜΕΝΑ ΑΚΡΑ.....	43
3.2.3 ΑΠΑΡΑΜΟΡΦΩΤΕΣ ΠΛΑΚΕΣ (“ΚΑΠΑΚΙΑ”) ΣΤΑ ΑΚΡΑ	43
3.2.4 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΑ ΑΚΡΑ	44
3.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	46
3.3.1 ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	46
3.3.2 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	50

Κεφάλαιο 4
Τρισδιάστατη Ανάλυση Χαλύβδινων Κυλινδρικών Κελυφών
Υπό Εγκάρσια Φόρτιση και Πίεση

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	57
4.1 ΑΣΤΟΧΙΑ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΤΩΝ ΜΟΡΦΗΣ ΛΕΠΙΔΑΣ	57
4.1.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	60
4.1.2 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	60
4.2 ΑΣΤΟΧΙΑ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΤΗ ΜΟΡΦΗΣ ΣΦΑΙΡΑΣ	68
4.2.1 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	68
4.3 ΑΣΤΟΧΙΑ ΣΩΛΗΝΑ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ (SS 304) ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΤΗ ΜΟΡΦΗΣ ΣΦΑΙΡΑΣ	72
4.3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	73
4.3.2 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΩΛΗΝΑ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ (SS 304) ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	76

Κεφάλαιο 5
Αναλυτική Προσέγγιση Κυλινδρικών Κελυφών Υπό
Εγκάρσια Φόρτιση και Πίεση

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	79
5.1 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	80
5.1.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Α (ΑΣΤΟΧΙΑ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ)	82
5.1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Α ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	84
5.1.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Β (ΑΣΤΟΧΙΑ ΜΕ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΕ ΔΥΟ ΑΚΑΜΠΤΕΣ ΠΛΑΚΕΣ).....	86
5.1.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Β ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	88
5.2 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	91
5.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	92
5.2.2 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	99
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	104

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Σπύρο Καραμάνο για την αμέριστη συμπαράσταση που μου έδειξε κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας και την καθημερινή ενασχόληση με τα προβλήματα που ανέκυπταν. Με βοήθησε να καταλάβω την φυσική σημασία ενός δύσκολου προβλήματος της μηχανικής το οποίο πραγματεύεται η διπλωματική εργασία και μου δίδαξε τις αρχές της μεθοδολογίας για την τεκμηρίωση των συμπερασμάτων.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τους καθηγητές κύριο Ν. Αράβα και κύριο Κ. Παπαδημητρίου για τη μελέτη και αξιολόγηση της εργασίας μου αλλά και για τις πολύτιμες βασικές γνώσεις που μου παρέιχαν στα πλαίσια των προπτυχιακών μαθημάτων.

Ευχαριστώ επίσης, τους φοιτητές του εργαστηρίου της Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών για την υποστήριξη τους τον τελευταίο ενάμιση χρόνο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία μελετά την κατάρρευση κυλινδρικών κελυφών υπό την επίδραση εγκάρσιας φόρτισης με χρήση μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Η έρευνα εμβαθύνει κυρίως στην επίδραση της πίεσης (εξωτερικής ή εσωτερικής) στο μέγιστο φορτίο και στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σωλήνων. Κατά την προσομοίωση χρησιμοποιούνται κυρίως, στοιχεία κελύφους, λαμβάνοντας υπόψη την μη γραμμικότητα της γεωμετρίας και του υλικού. Θεωρούμε σχετικώς παχιά κελύφη από χάλυβα και αλουμίνιο ($D/t \leq 50$), τα οποία υφίστανται ανελαστικές παραμορφώσεις. Η δισδιάστατη περίπτωση εξετάζεται πρώτα, όπου η εγκάρσια αστοχία επιβάλλεται είτε από δύο άκαμπτες πλάκες, είτε από δύο αντιδιαμετρικά συγκεντρωμένα φορτία. Επιπρόσθετα, αναλύονται τρισδιάστατες περιπτώσεις, όπου η εφαρμογή του φορτίου γίνεται μέσω ενός ζεύγους διεισδυτών μορφής λεπίδας ή από ένα σφαιρικό διεισδυτή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται υπό τη μορφή διαγραμμάτων δύναμης-μετατόπισης για διάφορα επίπεδα πίεσης. Κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά μελετώνται, όπως η επίδραση της εργοσκλήρυνσης και ο λόγος διαμέτρου προς πάχος (D/t). Παρουσιάζεται επίσης μία απλοποιητική αναλυτική μέθοδος για τη δισδιάστατη και την τρισδιάστατη περίπτωση, η οποία καταλήγει σε εκφράσεις κλειστής μορφής και ερμηνεύει ποιοτικά τους πιο σημαντικούς παράγοντες της απόκρισης του κελύφους.

Summary (Περίληψη Στα Αγγλικά)

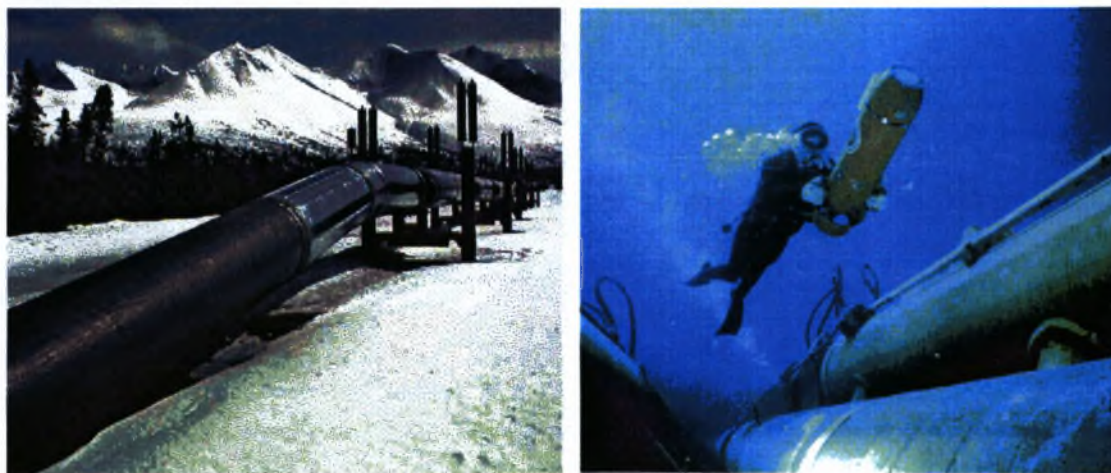
The present work examines the collapse of tubular members subjected to lateral (transverse) quasi-static loading in the presence of pressure, using a nonlinear finite element analysis. In particular, the paper investigates the effects of pressure (external or internal) on the ultimate lateral load of tubes and on their energy absorption capacity. Tubes are modeled with shell finite elements, accounting for geometric and material nonlinearities. Relatively thick steel and aluminum tubes ($D/t \leq 50$), which exhibit significant inelastic deformations, are considered. Two-dimensional cases are examined first, where lateral crushing is imposed by either two rigid plates or by two opposite radial loads. Three-dimensional cases are also analyzed, where the load is applied either through a pair of opposite wedge-shaped indenters or a single spherical indenter. The results are presented in terms of load-deflection curves for different levels of pressure, and indicate that the presence of pressure has significant effects on tube response. Some special issues are also investigated, such as the influence of strain hardening, or the effects of end conditions. Deformed shapes of tubes are shown and discussed. Furthermore, simplified analytical models are also presented for symmetric two-dimensional and three-dimensional loading configurations, which result in closed-form expressions, and illustrate qualitatively some important features of tube response.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Η Αντοχή Κυλινδρικών Κελυφών Υπό Εγκάρσια Φορτία-Βιβλιογραφικές Αναφορές

1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

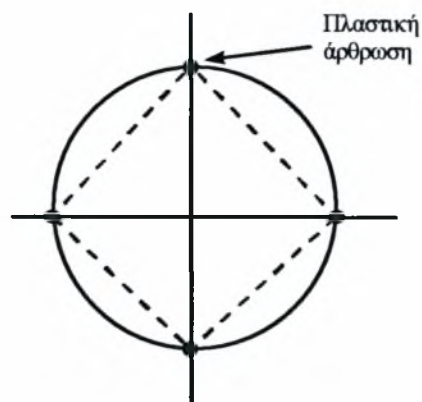
Η ικανότητα των κυλινδρικών κελυφών να απορροφούν την ενέργεια από το εφαρμοζόμενο φορτίο και να τη μετατρέπουν σε πλαστική παραμόρφωση παρουσιάζει ενδιαφέρον για πολυάριθμες πρακτικές εφαρμογές. Σωλήνες και αγωγοί εκτίθενται πολύ συχνά σε ισχυρά εγκάρσια φορτία λόγω ατυχημάτων, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές καταστροφές. Πιο συγκεκριμένα, τα κυλινδρικά κελύφη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα απορρόφησης ενέργειας, όπως φρένα η αποσβεστής κρούσεων (“shock absorbers”) και πρέπει να είναι ικανά να σταματήσουν μια κινούμενη μάζα με ελεγχόμενο τρόπο (Reid 1983,1985). Επιπλέον, η απόκριση υποθαλάσσιων αγωγών μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου σε συνθήκες εγκάρσιας φόρτισης, προερχόμενες από άγκυρα ή από συρόμενο δίκτυο (“τράτα”), παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, λόγω των καταστροφικών συνεπειών που μπορεί να επιφέρει (Madke 1990, Hvan et al. 1990, Mellem et al. 1996). Οι υπέργειοι αγωγοί επίσης, υφίστανται συχνά μεγάλα εγκάρσια φορτία από εργαλεία εκσκαφής (Wildschut & ter Avest 1984). Επιπρόσθετα, ισχυρά φορτία σε μέλη εξέδρών πετρελαίου, μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα αυτών (Taby & Moan 1985, Ellinas & Walker 1985).



Σχήμα 1-1. Υπέργειοι αγωγοί (αριστερά) και έλεγχος υποθαλάσσιων αγωγών (δεξιά).

1.2 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ

Η διαδιάστατη απόκριση σωλήνων χάλυβα και αλουμινίου υπό την επίδραση εγκάρσιων φορτίων μελετήθηκε αρχικά πειραματικά και αναλυτικά χωρίς πίεση (Burton & Craig 1963, De Runtz & Hodge 1963, Redwood 1964). Κίνητρο αυτής της εργασίας ήταν η χρήση σωλήνων ως μέσα απορρόφησης ενέργειας. Το φορτίο εξασκήθηκε με τη βοήθεια άκαμπτων πλακών και θεωρήθηκε σταθερό κατά την αξονική διεύθυνση του κελύφους. Η αναλυτική λύση βασίστηκε σε ένα θεωρητικό μοντέλο με τέσσερις πλαστικές αρθρώσεις κατά την εγκάρσια διατομή, θεωρώντας πλήρως πλαστική συμπεριφορά (Σχήμα 1-2).



Σχήμα 1-2. Μηχανισμός κατάρρευσης με τέσσερις πλαστικές αρθρώσεις.

Οι Reid & Reddy (1978,1979) συμπλήρωσαν αυτή την έρευνα λαμβάνοντας υπόψη την κράτυνση που υφίσταται το υλικό κατά την παραμόρφωση (“plastica” model), βελτιώνοντας την εργασία του Redwood (1963). Κατέληξαν τελικά στο συμπέρασμα ότι η απόκριση είναι ευαίσθητη στις ιδιότητες του υλικού και στον λόγο της διαμέτρου προς το πάχος (D/t). Σε μια επόμενη δημοσίευση οι Reid & Bell (1982), λαμβάνοντας και αυτοί υπόψη την κράτυνση (“plastica” model theory), ερεύνησαν την απόκριση του σωλήνα υπό την επίδραση δύο συγκεντρωμένων αντιδιαμετρικών αξονικών φορτίων. Βρήκαν ότι λόγω της θέσης που εξασκείται το φορτίο, η ελαστοπλαστική συμπεριφορά είναι πιο “ασταθής” από αυτήν που δημιουργείται λόγω συμπίεσης του σωλήνα ανάμεσα σε δύο πλάκες. Η επίδραση της κράτυνσης καθώς και ο λόγος της διαμέτρου προς το πάχος (D/t) μελετήθηκαν και σε αυτή την εργασία και έγιναν συγκρίσεις με τα αντίστοιχα πειράματα. Οι Watson et al. (1976) εξέθεσαν ενδιαφέροντα πειραματικά αποτελέσματα ως προς την ικανότητα σωλήνων αλουμινίου και χάλυβα να απορροφούν ενέργεια υπό την επίδραση εγκάρσιων φορτίων, δίνοντας έμφαση στις διάφορες μορφές αστοχίας. Οι σωλήνες φορτίστηκαν με ένα ζεύγος διεισδυτών μορφής λεπίδας, αντιδιαμετρικά τοποθετημένους. Οι Ghosh et al. (1981) επέκτειναν αυτή την εργασία μελετώντας την απόκριση κοντών σωλήνων και δακτυλίων υπό την επίδραση συγκεντρωμένων φορτίων.



Σχήμα 1-3. Πειραματική διάταξη της T.N.O. για την προσομοίωση κατάρρευσης σωλήνα υπό την επίδραση διεισδυτή μορφής λεπίδας.

Σε μία πρόσφατη δημοσίευση, ο Leu (1999) εξέτασε την κατάρρευση σωλήνων αλουμινίου με εύρος διαμέτρου προς πάχους (D/t) μεταξύ 10 και 80, υπό συμπίεση

μεταξύ δύο άκαμπτων πλακών, κάνοντας χρήση μίας άρρητης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων η οποία θεωρεί γεωμετρικές μη γραμμικότητες, πλαστική συμπεριφορά του υλικού και τριβή κατά την επαφή διεισδυτή κελύφους. Μελετήθηκαν διάφοροι παράγοντες, όπως η εργοσκλήρυνση, το πάχος του σωλήνα και ο συντελεστής τριβής. Ο Leu (1999) εξέτασε επίσης την πιθανότητα της αποκόλλησης από την επιφάνεια του κελύφους της άνω και της κάτω πλάκας, την οποία και θεώρησε ως “λυγισμό” και απέδειξε ότι εξαρτάται από τον λόγο του πάχους προς την διάμετρο (D/t).

Η φόρτιση σωλήνων εγκάρσια σε ένα μικρό τμήμα της επιφάνειάς τους συνιστά ένα τρισδιάστατο πρόβλημα. Η προσομοίωση αυτής της διαδικασίας απαιτεί την αξιόπιστη θεώρηση της μεμβρανικής παραμόρφωσης, υπό την έννοια ότι οι γενέτειρες υφίστανται παραμορφώσεις κατά την αξονική διεύθυνση και προβάλλουν πρόσθετη αντίσταση κατά την διαδικασία της διείσδυσης. Στην πειραματική εργασία των Watson et al. (1976), επισημαίνεται η σημαντική επίδραση της μεμβρανικής παραμόρφωσης στην απόκριση του σωλήνα. Σε μία πιο πρόσφατη εργασία οι Wierzbicky & Suh (1988) μελέτησαν αναλυτικά την απόκριση σωλήνων υπό την επίδραση ενός μοναχικού συγκεντρωμένου φορτίου, θεωρώντας παράλληλα αξονική φόρτιση και καμπτική ροπή. Η προσομοίωση έγινε θεωρώντας ένα απλοποιητικό τρισδιάστατο κέλυφος αποτελούμενο από μία αλληλουχία δακτυλίων και κάθετα σε αυτά μία σειρά από γενέτειρες. Στην εργασία μελετήθηκε η επίδραση των συνοριακών συνθηκών στην αντίσταση του κελύφους κατά την διείσδυση, καθώς και αναλυτικές εξισώσεις για το δρόμο ισορροπίας. Οι Hoo-Fatt & Wierzbicky (1991) εξέτασαν επίσης την απόκριση κυλινδρικών κελυφών υπό την επίδραση της πίεσης και παρουσίασαν μία μέθοδο για την μετατροπή του δισδιάστατου προβλήματος σε μονοδιάστατο. Το υλικό θεωρήθηκε τέλεια πλαστικό και εξήχθησαν εξισώσεις σε κλειστή μορφή για τη σχέση δύναμης-μετατόπισης. Οι Zeinoddini et al. (1999), παρακινούμενος από το πρόβλημα της αντίστασης σε πρόσκρουση στις εξέδρες πετρελαιαγωγών, διερεύνησε αριθμητικά την παραμόρφωση κελυφών, υπό την επίδραση στατικής και δυναμικής εγκάρσια φόρτισης. Κάνοντας χρήση τετρακομβικών στοιχείων κελύφους μελέτησε την επίδραση των συνοριακών συνθηκών, καθώς και την επίδραση της προέντασης. Σε μία νεότερη δημοσίευση, οι Zeinoddini et al. (2000) υιοθέτησαν μία τροποποιημένη έκδοση του αναλυτικού μοντέλου που παρουσιάστηκε από τους Wierzbicky & Suh (1988), για να αναλύσουν την απόκριση σωλήνων υπό εγκάρσια φόρτιση από ένα μοναχικό φορτίο και πρότειναν μία απλή έκφραση για το δρόμο ισορροπίας. Έγινε σύγκριση των αναλυτικών αποτελεσμάτων με αυτά των πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία λάμβαναν υπόψη την αξονική παραμόρφωση μέσω ελατηρίων στους κόμβους των στοιχείων κελύφους.

Στην παρούσα εργασία, μελετάται η απόκριση κυλινδρικών κελυφών σε συνθήκες πίεσης (εσωτερικής ή εξωτερικής). Η αποσταθεροποιητική επίδραση της πίεσης στα κελύφη έχει αναγνωριστεί σε πολλές προηγούμενες εργασίες (Kyriakides & Yeh, 1986). Οι μελέτες αυτές έχουν δείξει ότι η απόκριση του σωλήνα υπό την επίδραση μόνον της πίεσης ακολουθεί πολύ ασταθή μεταλυγισμικό δρόμο ισορροπίας και ότι οι διατομές που έχουν υποστεί λυγισμό, γίνονται επίπεδες σε μορφή κόκαλου (“dog-bone”). Επιπρόσθετα, σε ένα μακρύ σωλήνα υπό την επίδραση μόνο της πίεσης, το επίπεδο αυτό σχήμα μπορεί να διαδοθεί κατά μήκος του σωλήνα προκαλώντας αστοχία ολόκληρου του κελύφους (Palmer & Martin, 1975). Όταν ο σωλήνας υπόκειται σε συνδυασμό πίεσης και εγκάρσιας φόρτισης, η πρόσθετη παραμόρφωση λόγω της πίεσης δύναται να επιφέρει πρόωρη αστοχία του σωλήνα. Με χρήση μίας μη γραμμικής θεώρησης πεπερασμένων στοιχείων ο

Karamanos (1996), μελέτησε την επίδραση της πίεσης για τη δισδιάστατη περίπτωση φόρτισης του σωλήνα από δύο αντιδιαμετρικά συγκεντρωμένα φορτία, καταναμεημένα ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του σωλήνα. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ακόμη και για σχετικώς μικρές τιμές της πίεσης, η απόκριση επηρεάζεται σημαντικά, καθώς το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο σωλήνας μειώνεται, ενώ εξίσου σημαντικά μειώνεται και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Από την άλλη πλευρά η επίδραση της εσωτερικής πίεσης είναι ευεργετική στην αντίσταση του κελύφους στην κατάρρευση.

Στην διπλωματική εργασία επεκτείνονται τα προαναφερθέντα αποτελέσματα για την περίπτωση όπου έχουμε συμπίεση του κελύφους από δύο άκαμπτες πλάκες. Επιπρόσθετα, η εργασία έχει ως σκοπό την ανάλυση τρισδιάστατων περιπτώσεων σωλήνων πεπερασμένου μήκους που υπόκεινται σε εγκάρσια φόρτιση και εξωτερική ή εσωτερική πίεση. Η μελέτη αυτή γίνεται με μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα Abaqus. Επιπλέον, αναπτύχθηκε απλοποιητικό μοντέλο που ερμηνεύει ποιοτικά τις διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν την απόκριση. Το μοντέλο καταλήγει σε εξισώσεις κλειστής μορφής που έχουν αρκετά καλή σύγκριση με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Θεωρούνται σωλήνες χάλυβα και αλουμινίου, με λόγο διαμέτρου προς πάχος (D/t) μεταξύ 24 και 47, τυπικό εύρος για πραγματικές περιπτώσεις αγωγών. Όλοι αυτοί οι σωλήνες υφίστανται μεγάλες ανελαστικές παραμορφώσεις και υπό την επίδραση εξωτερικής πίεσης ρέπουν προς ασταθή συμπεριφορά. Επίσης μελετάται και η επίδραση εσωτερικής πίεσης στην απόκριση του σωλήνα ενώ διεξήχθη και σύγκριση των αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα για σωλήνες χωρίς πίεση.



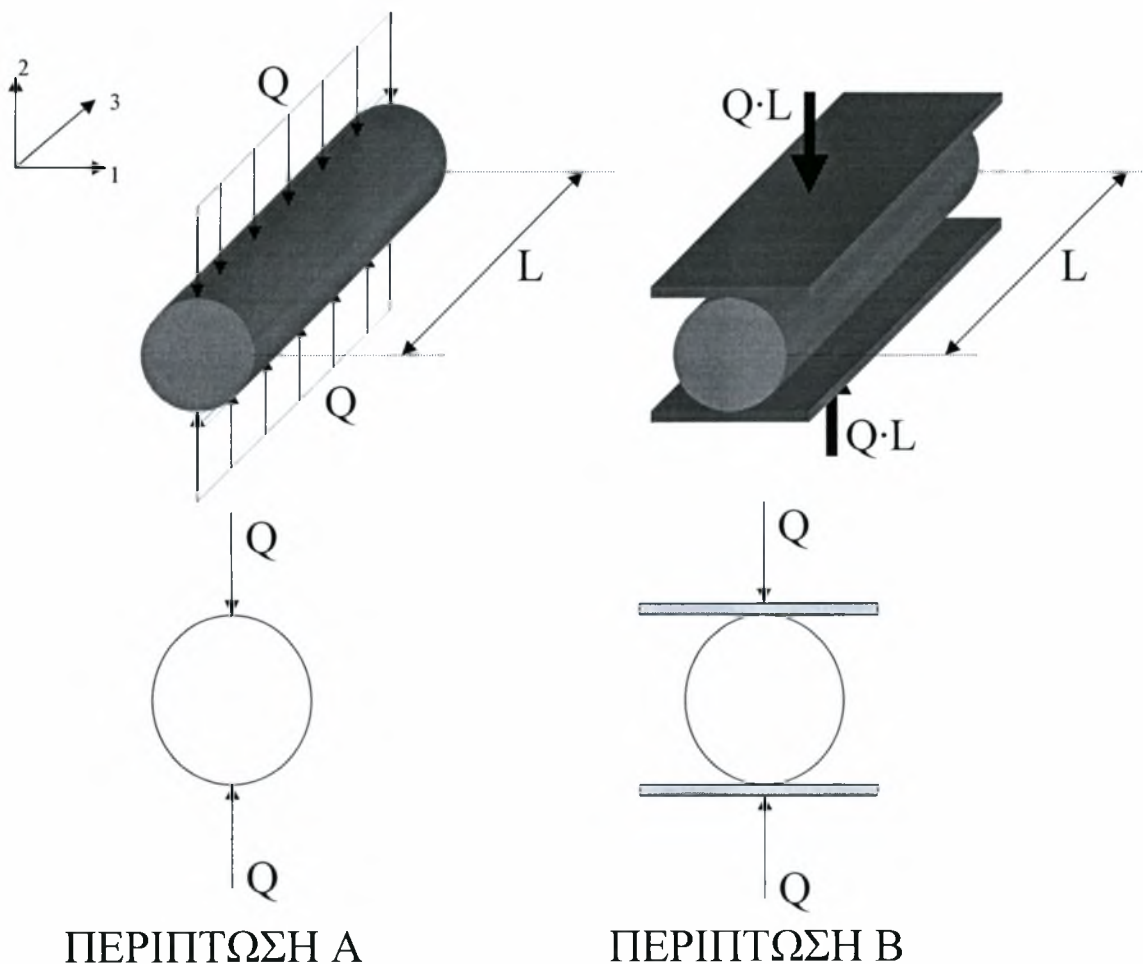
Σχήμα 1-4. Μια ιστορική φωτογραφία. “Εφαρμογή εγκάρσιας φόρτισης” στο ένα άκρο ανυψωμένου σωλήνα για την επίτευξη κάμψης (Max Hosmanek 1984).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Δισδιάστατη Ανάλυση Κυλινδρικών Κελυφών Υπό Εγκάρσια Φόρτιση Και Πίεση

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αστοχία ενός σωλήνα υπό την επίδραση εγκάρσιων φορτίων μπορεί να θεωρηθεί δισδιάστατο πρόβλημα, υποθέτοντας ότι το κυλινδρικό κέλυφος έχει άπειρο μήκος και ότι το φορτίο και η παραμόρφωση δεν μεταβάλλονται κατά το μήκος. Το εγκάρσιο φορτίο εφαρμόζεται είτε μέσω δύο συγκεντρωμένων δυνάμεων, είτε από δύο άκαμπτες πλάκες. Για να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του σωλήνα έγινε ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα “ABAQUS”. Στην περίπτωση A ο σωλήνας φορτίζεται από ομοιόμορφα κατανομημένα φορτία αντιδιαμετρικά κατά την επιφάνεια και στην περίπτωση B συμπιέζεται ανάμεσα σε δύο πλάκες. Στις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις ο σωλήνας μπορεί να υπόκειται σε συνθήκες εσωτερικής ή εξωτερικής πίεσης, η οποία εφαρμόζεται αρχικά και εν συνεχεία διατηρείται σταθερή καθώς η εγκάρσια φόρτιση αυξάνεται μέχρι την τελική κατάρρευση. Οι δύο περιπτώσεις φόρτισης φαίνονται στο σχήμα 2-1.



Σχήμα 2-1. Αντιδιαμετρικά συγκεντρωμένα φορτία (Περίπτωση A) και συμπίεση μεταξύ πλακών (Περίπτωση B) για το δισδιάστατο πρόβλημα.

2.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Α (Αστοχία Υπό Την Επίδραση Αντιδιαμετρικών Εγκάρσιων Συγκεντρωμένων Φορτίων)

Για να χρησιμοποιήσουμε την καλύτερη και πιο αποτελεσματική προσομοίωση για τις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήσαμε διάφορα στοιχεία, ενώ μελετήσαμε και την επίδραση του αριθμού των στοιχείων που απαρτίζουν το πλέγμα.

Για την εφαρμογή των αποτελεσμάτων επιλέξαμε ένα τυπικό χαλύβδινο σωλήνα που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές πετρελαιοαγωγών, με τα εξής χαρακτηριστικά:

ΣΩΛΗΝΑΣ 1

- $E=29000$ ksi (200 GPa)
- $\nu=0.3$
- $\sigma_y=60$ ksi (413.7 MPa)
- $D_{out}=24$ in (61 cm)
- $t=0.5$ in (1.27 cm)
- $D/t=47$

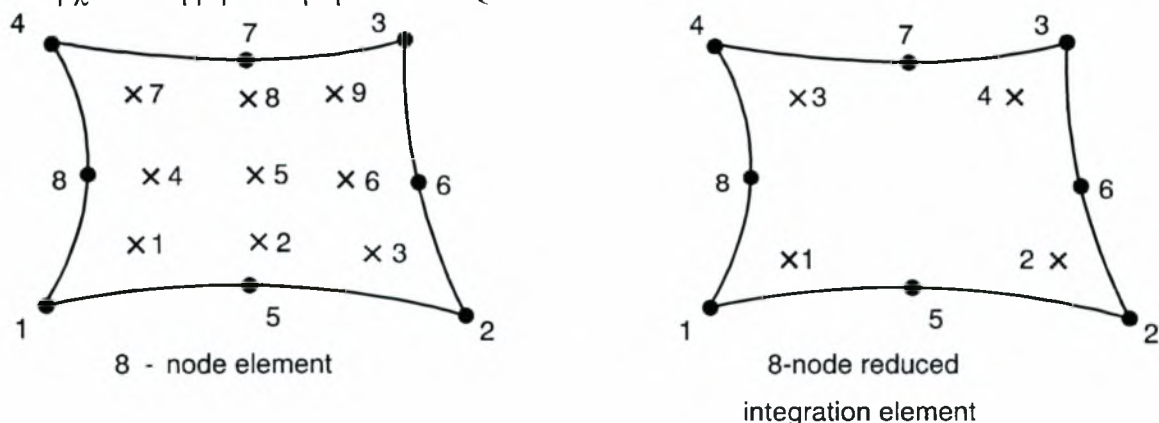
όπου E , ν , D_{out} , t , D/t , σ_y είναι το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος του Poisson, η εξωτερική διάμετρος, το πάχος, ο λόγος μέσης διαμέτρου προς πάχος και το όριο διαρροής αντίστοιχα. Οι τιμές δίνονται σύμφωνα με το αγγλοσαξονικό σύστημα και όχι το SI γιατί αυτές έχουν επικρατήσει σε όλες σχεδόν τις βιομηχανικές χρήσεις σωληνώσεων.

2.1.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Η ανάλυση γίνεται σε δύο διαστάσεις θεωρώντας ένα απειρομήκες κυλινδρικό κέλυφος όπου η δύναμη είναι σταθερή κατά το μήκος του κυλίνδρου. Επομένως η αξονική παραμόρφωση είναι μηδενική ($\epsilon_{33}=0$) και καταλήγουμε σε δισδιάστατο μοντέλο επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain). Έτσι χρησιμοποιούμε τα στοιχεία CPE τα οποία είναι δισδιάστατα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης. Μελετήσαμε δύο τέτοια στοιχεία με 8 κόμβους, για δύο τύπους ολοκλήρωσης, πλήρους και μειωμένης:

- CPE8 (8-κομβικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης· 3x3 ολοκλήρωση)
- CPE8R (8-κομβικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης· 2x2 ολοκλήρωση)

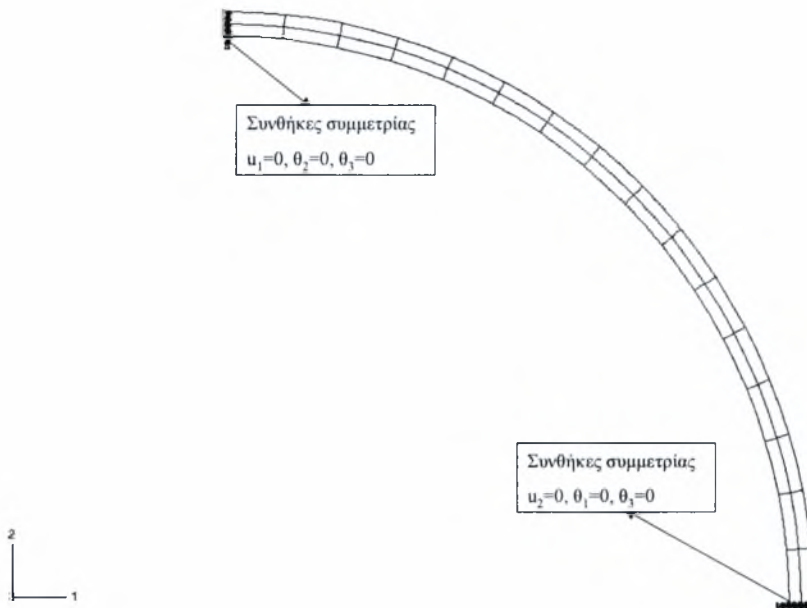
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2-2) βλέπουμε τα στοιχεία CPE8 και CPE8R τα οποία υπάρχουν στη βιβλιοθήκη του ABAQUS.



Σχήμα 2-2. Στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης (CPE8 και CPE8R)

Κατά την προσομοίωση του σωλήνα αναλύσαμε μόνο το ¼ αυτού, εφόσον το πρόβλημα είναι συμμετρικό ως προς τους άξονες 1 και 2 (βλέπε σχήμα 2-1). Στα άκρα έχουμε οριακές συνθήκες συμμετρίας, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες συμβιβαστού για τις μετατοπίσεις και τις στροφές. Στην επόμενη εικόνα (Σχήμα 2-3)

βλέπουμε ένα τυπικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε με 16 στοιχεία κατά την περιφέρεια και 1 ή 2 κατά το πάχος.



Σχήμα 2-3. Μοντέλο με 16 στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης κατά την περιφέρεια και δύο κατά το πάχος.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ

Ο σωλήνας που αναλύουμε υφίσταται μεγάλες παραμορφώσεις και πρέπει η συμπεριφορά του υλικού να προσομοιωθεί ανάλογα, ώστε να λαμβάνονται υπόψη μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις. Θεωρήσαμε ελαστοπλαστικό γραμμικά κρατυνόμενο υλικό με μέτρο σκλήρυνσης $E' = E/400$ και μοντέλο ιστροπικής κράτυνσης με κριτήριο διαρροής “Von Mises” (J_2 flow plasticity). Στο “Abaqus” χρησιμοποιήθηκαν τιμές της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, αφού πρώτα τροποποιήθηκαν ως τιμές πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης σύμφωνα με τους τύπους:

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.1)$$

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

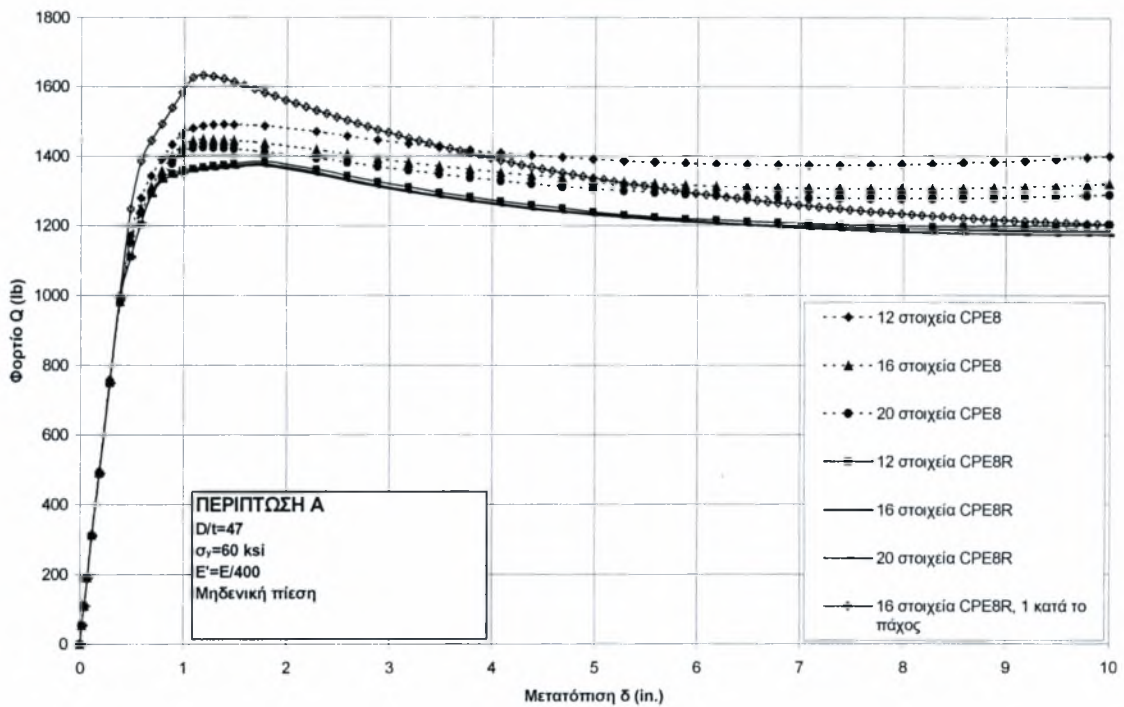
όπου σ είναι η τάση και οι δείκτες $[\cdot]_T$ και $[\cdot]_y$ δηλώνουν πραγματική τάση και τάση διαρροής αντίστοιχα, ενώ ε είναι η συνολική παραμόρφωση και ε^p η πλαστική λογαριθμική παραμόρφωση.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

Όπως είπαμε και προηγουμένως ο σωλήνας υφίσταται μεγάλες παραμορφώσεις και δημιουργούνται γεωμετρικές μη-γραμμικότητες κατά την κατάρρευση. Η θεώρηση αυτή έγινε στο “Abaqus” με την υποεντολή “nlgeom” μέσα στην εντολή “step” που ορίζει τα βήματα με οποία θα προχωρήσει η μη-γραμμική ανάλυση.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Για να μελετήσουμε την εξάρτηση της λύσεως από τον αριθμό των στοιχείων του πλέγματος διεξήχθη μία προκαταρκτική παραμετρική μελέτη χρησιμοποιώντας τα στοιχεία CPE8 και CPE8R για 12, 16 και 20 στοιχεία κατά την περιφέρεια και ένα ή δύο στοιχεία κατά το πάχος. Στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 2-4) φαίνονται τα αποτελέσματα για αυτές τις περιπτώσεις.



Σχήμα 2-4. Εξάρτηση της λύσης από το είδος και τον αριθμό των στοιχείων επίπεδης παραμόρφωσης.

Ως μετατόπιση δ θεωρούμε την κατακόρυφη μετατόπιση του σημείου υπό το συγκεντρωμένο φορτίο σε σχέση με το κέντρο του κύκλου. Από την παραμετρική μελέτη παρατηρούμε ότι τα στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης συμπεριφέρονται πιο καλά και η λύση για 12, 16 και 20 στοιχεία είναι σχεδόν η ίδια. Τελικά υιοθετήσαμε για επόμενες αναλύσεις το μοντέλο με 8-κομβικά στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης όπου χρησιμοποιήθηκαν 16 στοιχεία κατά την περιφέρεια και 2 κατά το πάχος.

ΒΗΜΑ-ΠΡΟΣ-ΒΗΜΑ ΑΝΑΛΥΣΗ

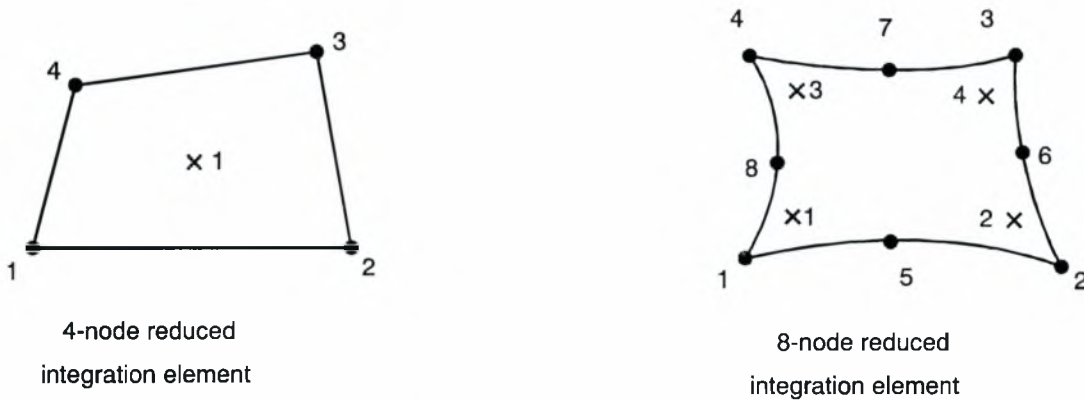
Μπορεί κάποιος να παρατηρήσει από το παραπάνω σχήμα ότι το φορτίο δεν αυξάνεται μονοτονικά με τη μετατόπιση. Για μικρές μετατοπίσεις το υλικό παραμορφώνεται ελαστικά και η σχέση Q- δ είναι σχεδόν γραμμική. Στη συνέχεια η δύναμη συνεχίζει να αυξάνεται ελαστοπλαστικά αλλά με μειωμένη κλίση λόγω της εργοσκληρυνσης που υφίσταται το υλικό περνώντας στην πλαστική περιοχή. Όμως καθώς η μετατόπιση μεγαλώνει η γεωμετρία αλλάζει με αποτέλεσμα τη μείωση της ακαμψίας του μοντέλου και μετά από κάποιο σημείο η απαιτούμενη δύναμη για παραμόρφωση αρχίζει να μειώνεται. Για την αριθμητική επίλυση, ακολουθούμε βήμα-προς-βήμα ανάλυση με έλεγχο μετατόπισης (displacement control). Έτσι, αντί να δίνουμε το εφαρμοζόμενο φορτίο και να μετρούμε την μετατόπιση ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπία, δίνουμε ως οριακή συνθήκη (Boundary Condition) τη μετατόπιση στον κόμβο που θα εφαρμοζόταν η δύναμη και μετρούμε την αντίδραση αυτού. Αυτό μας επιτρέπει να αποφεύγουμε τα προβλήματα σύγκλισης και η λύση προκύπτει με σχετικά λίγες επαναλήψεις ανά βήμα.

2.1.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

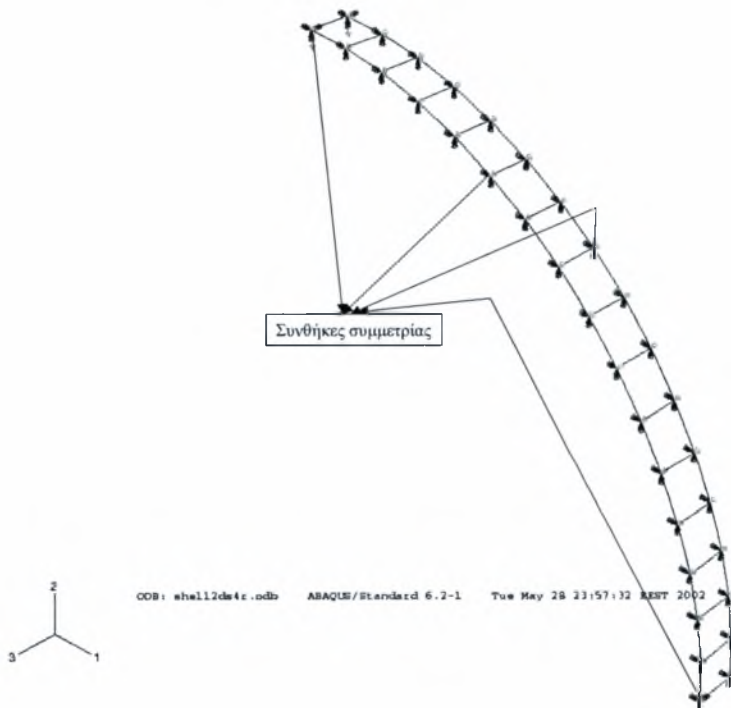
Η ίδια ανάλυση έγινε και με στοιχεία κελύφους. Για το μοντέλο χρησιμοποιήσαμε δύο τύπους στοιχείων (S4R και S8R5), μειωμένης ολοκλήρωσης και στις δύο περιπτώσεις επειδή συμπεριφέρονται καλύτερα για λεπτότοιχα κελύφη:

- S4R (4-κομβικό στοιχείο κελύφους· 1x1 ολοκλήρωση)
- S8R5 (8-κομβικό στοιχείο κελύφους με πέντε βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο· 2x2 ολοκλήρωση)

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2-5) βλέπουμε τα στοιχεία S4R από τη βιβλιοθήκη του “Abaqus” και στο επόμενο (Σχήμα 2-6) ένα τυπικό πλέγμα που χρησιμοποιήσαμε με 16 στοιχεία τύπου S4R σε παραμορφωμένη κατάσταση.



Σχήμα 2-5. Στοιχεία κελύφους (S4R και S8R5).



Σχήμα 2-6. Μοντέλο με 16 στοιχεία κελύφους κατά την περιφέρεια..

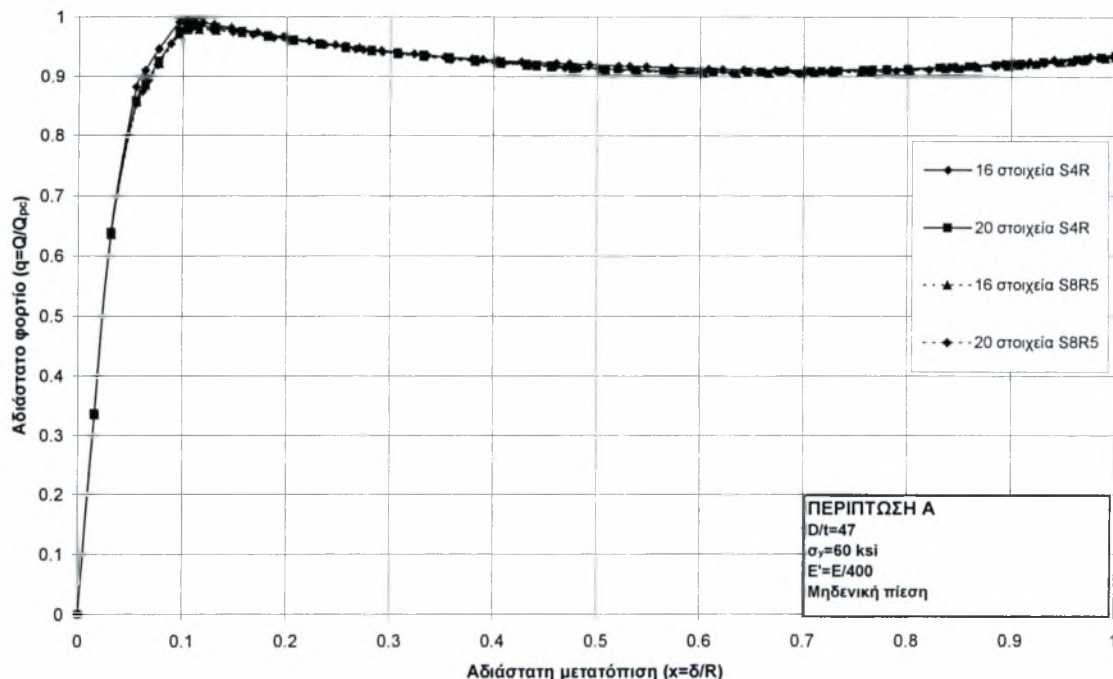
Ανάλογα με τα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης στα στοιχεία κελύφους προσομοιώθηκε μόνο το ¼ του σωλήνα. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν όπως και στην προηγούμενη περίπτωση οι ίδιες ιδιότητες για το υλικό, η υποεντολή “nlgeom”, ενώ κατά την ανάλυση έγινε έλεγχος της μετατόπισης κατά την βήμα-προς-βήμα ανάλυση.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Για να εξετάσουμε την επίδραση του αριθμού των στοιχείων κάναμε παραμετρική ανάλυση με τα δύο στοιχεία (S4R και S8R5) για δύο περιπτώσεις:

- Πλέγμα με 16 ομοιόμορφα καταναμημένα στοιχεία.
- Πλέγμα με 20 στοιχεία και πύκνωση στα δύο άκρα (με συντελεστή πύκνωσης 3 στο “Abaqus”) όπου έχουμε τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις.

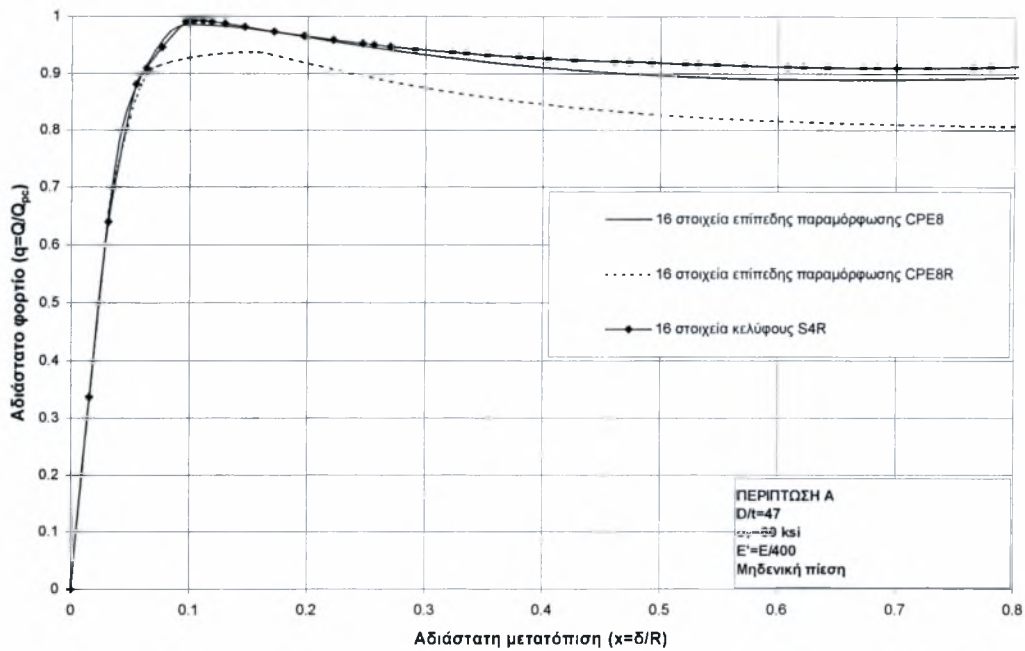
Στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 2-7) βλέπουμε το δρόμο ισορροπίας για τις τέσσερις περιπτώσεις:



Σχήμα 2-7. Εξάρτηση της λύσης από το είδος και τον αριθμό των στοιχείων κελύφους.

Στο διάγραμμα έχουμε αδιαστατοποιήσει το φορτίο Q και τη μετατόπιση δ με το λόγο $q=Q/Q_{pc}$ και $x=\delta/R$ αντίστοιχα, όπου $Q_{pc} = \sigma_y^* \cdot \frac{t^2}{R}$ (σ_y^* είναι το τροποποιημένο όριο διαρροής για επίπεδη παραμόρφωση, το οποίο για κριτήριο διαρροής “Von Mises” μπορεί να θεωρηθεί ίσο με $\sigma_y^* = 1.15\sigma_y$).

Παρατηρούμε ότι και οι τέσσερις περιπτώσεις έδωσαν την ίδια λύση, οπότε επιλέγουμε την πιο οικονομική υπολογιστικά που είναι αυτή με τα 16 4-κομβικά στοιχεία (S4R). Στο επόμενο γράφημα (Σχήμα 2-8) παρουσιάζουμε σύγκριση μεταξύ της λύσης που πήραμε για τα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης (CPE8R και CPE8) και το στοιχείο κελύφους S4R, για 16 στοιχεία και στις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 2-8. Σύγκριση μεταξύ των στοιχείων επίπεδης παραμόρφωσης και των στοιχείων κελύφους.

2.1.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Η επίδραση της πίεσης αναμένεται να μειώσει την ακαμψία του μοντέλου προκαλώντας ταχύτερη κατάρρευση και μείωση της συνολικής ενέργειας που μπορεί αυτό να απορροφήσει. Για την περίπτωση Α έγινε παραμετρική μελέτη για διάφορες τιμές της πίεσης, σχετικά χαμηλές, υπό την έννοια ότι δεν ξεπερνούν το 50% της κρίσιμης πίεσης “λυγισμού”. Αυτή υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση [Timoshenko & Gere (1961)]:

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

όπου ο δείκτης $[\cdot]_e$ δηλώνει ελαστική ανάλυση για την εύρεση της κρίσιμης πίεσης. Σημειώνεται πως ο σωλήνας είναι σχετικά λεπτός ($D/t=47$) και επομένως η πίεση αστοχίας λόγω αστάθειας εκφράζεται από την ελαστική λύση της σχέσης (2.3). Η τιμή της πίεσης προκύπτει τελικά $p_e=614$ psi για το σωλήνα Ι.

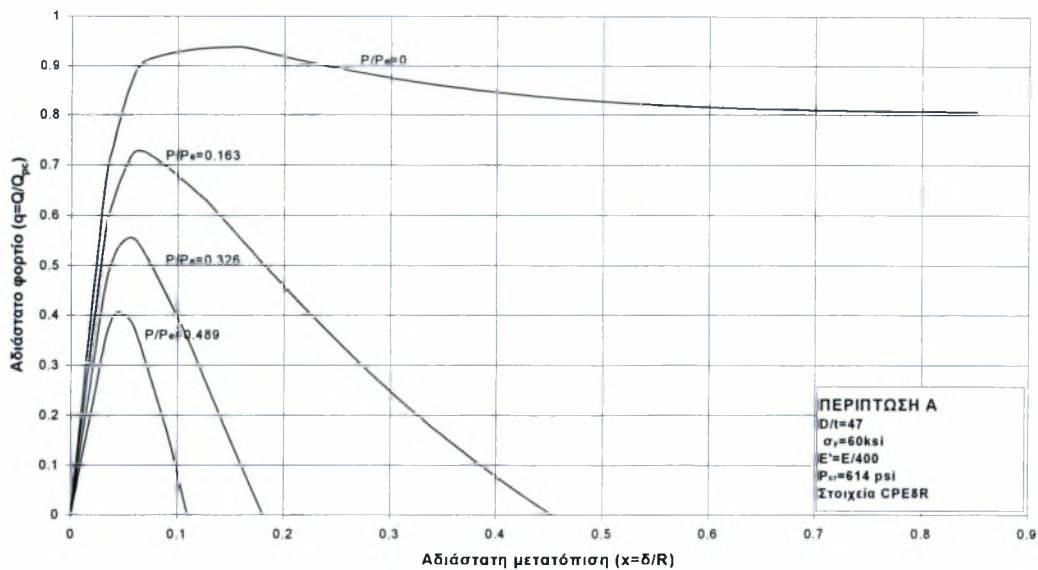
Για τη μοντελοποίηση στο “Abaqus” κατασκευάστηκε ένα πρώτο βήμα (step 1) στο οποίο εφαρμόσαμε την πίεση και στη συνέχεια διατηρώντας αυτή σταθερή, δημιουργήσαμε δεύτερο βήμα (step 2) στο οποίο εφαρμόσαμε το “φορτίο”, διατηρώντας την πίεση σταθερή. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο που χρησιμοποιεί το “Abaqus” η πίεση είναι πάντα κάθετη στην επιφάνεια κατά την παραμόρφωση του πλέγματος.

Οι τιμές της πίεσης που χρησιμοποιήσαμε στην ανάλυση είναι οι εξής:

- $p/p_e=0.163$ (100 psi)
- $p/p_e=0.326$ (200 psi)
- $p/p_e=0.489$ (300 psi)

2.1.4 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Τα αποτελέσματα για τις παραπάνω τιμές της πίεσης φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2-9). Για την ανάλυση χρησιμοποιήσαμε το πλέγμα με τα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης μειωμένης ολοκλήρωσης (CPE8R), 16 κατά την περιφέρεια και 2 κατά το πάχος.



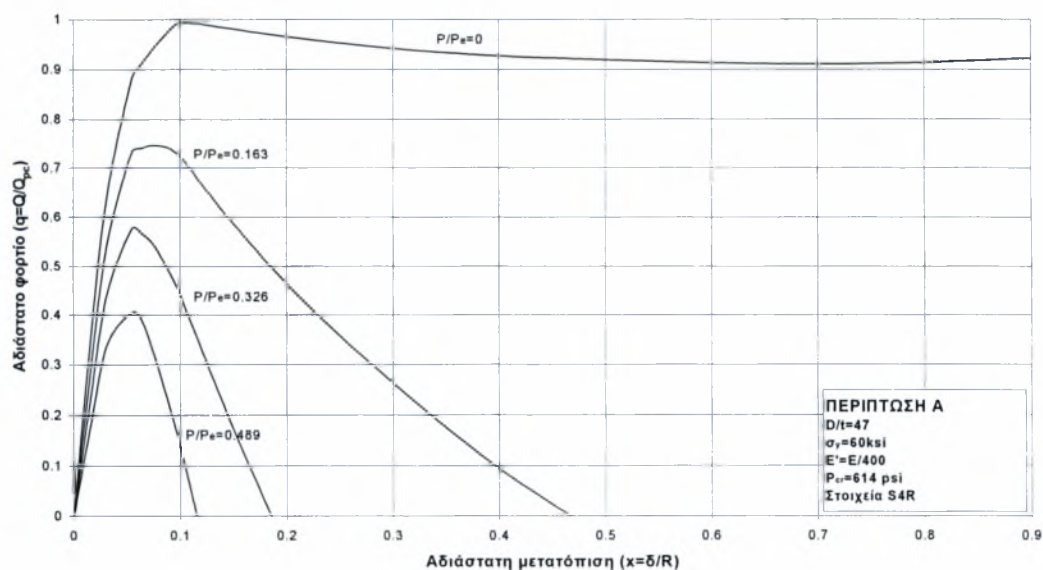
Σχήμα 2-9. Απόκριση υπό την επίδραση συγκεντρωμένων φορτίων για διάφορες τιμές της πίεσης· στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης (CPE8R).

Από το γράφημα παρατηρούμε ότι ακόμα και για σχετικά μικρές τιμές της πίεσης (μικρότερες από 50 % της κρίσιμης πίεσης) μειώνεται αισθητά το μέγιστο φορτίο που μπορεί ο σωλήνας να παραλάβει καθώς και η ικανότητα του για απορρόφηση ενέργειας.

Όταν το φορτίο φτάσει τη μέγιστη τιμή, η γεωμετρία του σωλήνα είναι πλέον τέτοια, ώστε η πίεση είναι ικανή να προκαλέσει αστάθεια μέχρι την τελική κατάρρευση του κελύφους. Αυτό ονομάζεται στη βιβλιογραφία λυγισμός δακτυλίου (“buckling”).

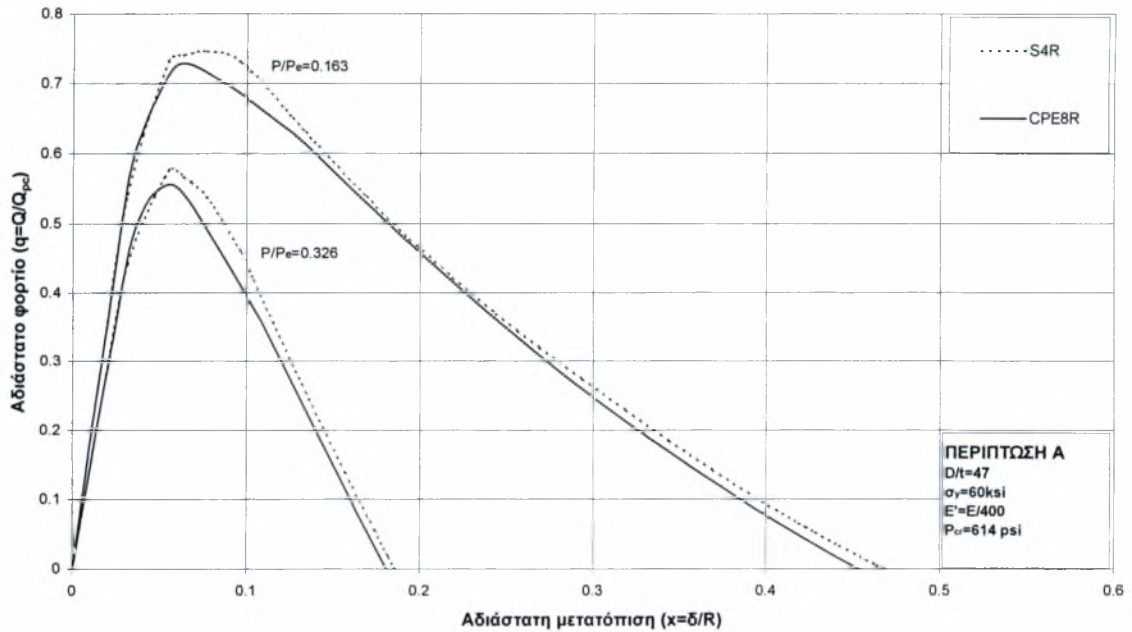
2.1.5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Για τις ίδιες τιμές της πίεσης διεξήχθη ξανά η ανάλυση με το μοντέλο για τα 16 στοιχεία κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης (S4R). Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2-10. Απόκριση υπό την επίδραση συγκεντρωμένων φορτίων για διάφορες τιμές της πίεσης· στοιχεία κελύφους (S4R).

Στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 2-11) παρουσιάζουμε σύγκριση μεταξύ των δύο στοιχείων (S4R και CPE8R) για πίεση 16.3 % και 32.6 % της κρίσιμης πίεσης.



Σχήμα 2-11. Σύγκριση μεταξύ των στοιχείων επίπεδης παραμόρφωσης και των στοιχείων κελύφους υπό την επίδραση εξωτερικής πίεσης.

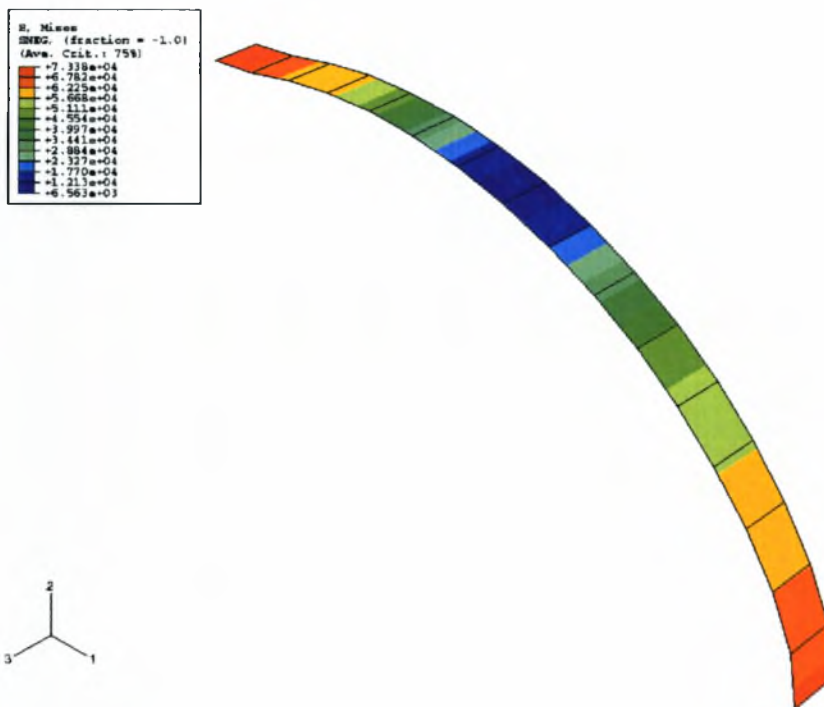
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι και τα δύο στοιχεία δίνουν πρακτικά όμοια αποτελέσματα, με τα στοιχεία κελύφους να δίνουν ανεπαίσθητα υψηλότερο μέγιστο φορτίο (1095 lb για το S4R και 1068 lb για το CPE8R, για πίεση $p=16.3\% p_{cr}$).

Στην επόμενη εικόνα (Σχήμα 2-12) παρουσιάζουμε σύγκριση των πλεγμάτων για την περίπτωση της μηδενικής πίεσης και για $p=100 \text{ psi}$. Η σύγκριση γίνεται για $x=0.44$.



Σχήμα 2-12. Σύγκριση των παραμορφωμένων πλεγμάτων για μηδενική πίεση και $p=100 \text{ psi}$: στοιχεία S4R.

Για την ίδια τιμή της μετατόπισης παρουσιάζονται οι τάσεις κατά “Von Mises” για μηδενική πίεση. (Σχήμα 2-13)



Σχήμα 2-13. Κατανομή των τάσεων κατά “Von Mises” για μηδενική πίεση και μετατόπιση $x=0.44$ (Στοιχεία S4R).

Η εικόνα δείχνει ότι οι μεγαλύτερες τιμές της τάσης εμφανίζονται στα άκρα του σωλήνα.

2.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Β (Αστοχία Με Συμπίεση Ανάμεσα Σε Δύο Άκαμπτες Πλάκες)

Χρησιμοποιώντας και πάλι τον ίδιο σωλήνα (Σωλήνας Ι) κάναμε την ίδια παραμετρική μελέτη αλλάζοντας τον τρόπο φόρτισης. Στην περίπτωση αυτή θεωρήσαμε το πρόβλημα όπου ο σωλήνας συμπιέζεται από δύο άκαμπτες πλάκες εγκάρσια, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-1.

Για την ανάλυση χρησιμοποιήσαμε τα ίδια στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης και κελύφους και στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζουμε τη σύγκριση μεταξύ αυτών.

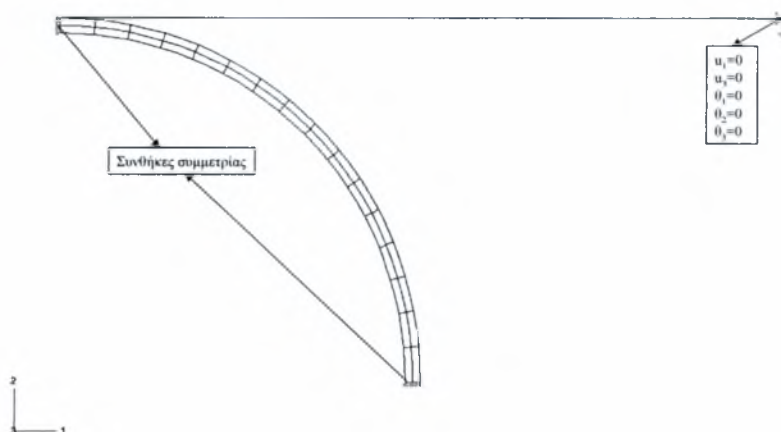
Θεωρήσαμε επίσης το ίδιο ελαστοπλαστικό γραμμικά κρατυνόμενο υλικό με μέτρο σκλήρυνσης $E' = E/400$ και μοντέλο ιστροπικής κράτυνσης με κριτήριο διαρροής “Von Mises”. Στο τέλος της παραγράφου παρουσιάζουμε αποτελέσματα για επίδραση του μέτρου σκλήρυνσης στην απόκριση του κελύφους. Η υποεντολή “nlgeom” χρησιμοποιήθηκε για να λάβουμε υπόψη τις γεωμετρικές μη-γραμμικότητες.

2.2.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήσαμε είναι τα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης:

- CPE8R (8-κομβικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης: 2x2 ολοκλήρωση)

Στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 2-14) βλέπουμε ένα τυπικό πλέγμα που χρησιμοποιήσαμε με 16 στοιχεία κατά την περιφέρεια και 2 κατά το πάχος.



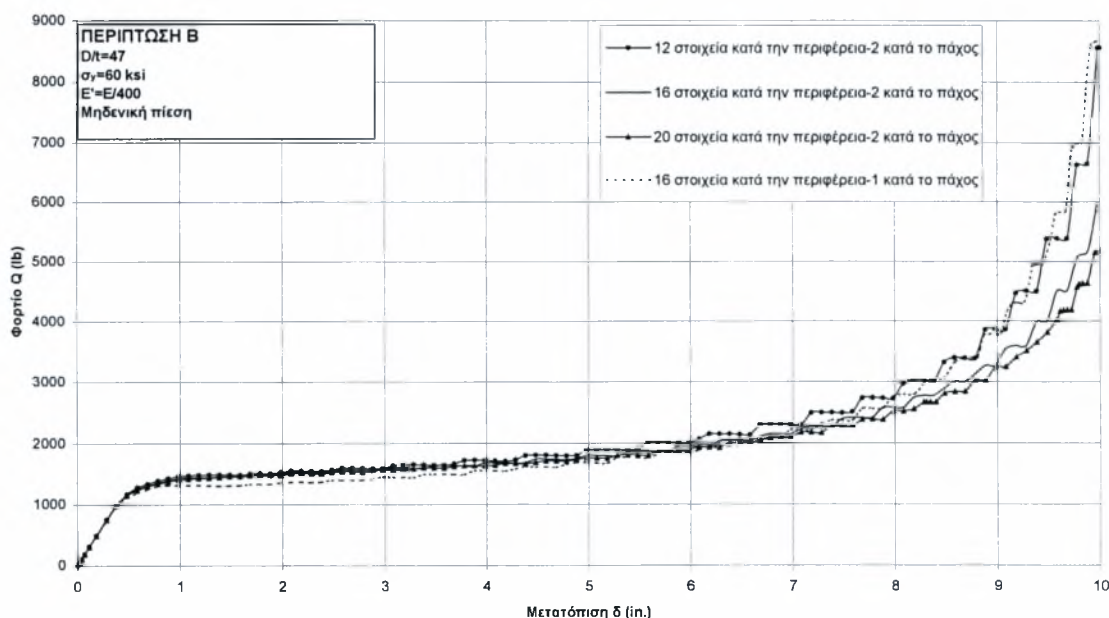
Σχήμα 2-14. Μοντέλο με 16 στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης κατά την περιφέρεια και 2 κατά το πάχος (Περίπτωση Β).

ΑΚΑΜΠΤΗ ΠΛΑΚΑ

Η άκαμπτη πλάκα μοντελοποιήθηκε στο “Abaqus” με την εντολή “rigid surface”. Θεωρήσαμε οριακές συνθήκες, δεσμεύοντας όλους τους βαθμούς ελευθερίας εκτός από τη διεύθυνση 2 όπου εφαρμόσαμε τη μετατόπιση. Η αλληλεπίδραση πλάκας κελύφους θεωρήθηκε χωρίς τριβή με τις εντολές “contact pair” και “surface interaction”.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η μελέτη της εξάρτησης της λύσεως από τον αριθμό των στοιχείων επίπεδης παραμόρφωσης που απαρτίζουν το πλέγμα έγινε για 12, 16 και 20 στοιχεία κατά την περιφέρεια και 2 κατά το πάχος, ενώ χρησιμοποιήθηκε και πλέγμα με 1 στοιχείο κατά το πάχος και 16 κατά την περιφέρεια. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 2-15).



Σχήμα 2-15. Επιρροή του αριθμού των στοιχείων επίπεδης παραμόρφωσης στην απόκριση του σωλήνα.

Ως μετατόπιση δ στην περίπτωση Β θεωρούμε την μετατόπιση κατά την κατακόρυφη διεύθυνση της πλάκας. Φαίνεται από την ανάλυση ότι και τα τέσσερα στοιχεία δουλεύουν αρκετά καλά. Ωστόσο το μοντέλο για 12 στοιχεία κατά την περιφέρεια και 2 κατά το πάχος, καθώς και για 16 στοιχεία κατά την περιφέρεια και 1 κατά το πάχος σε μεγάλες μετατοπίσεις ($\delta > 60\%R$) φαίνεται να υπερεκτιμούν το φορτίο. Έτσι επιλέγουμε τη λύση για 16 στοιχεία κατά την περιφέρεια και 2 κατά το πάχος (για το στοιχείο CPE8R) καθώς είναι η πλέον οικονομική και “ακριβής” λύση ταυτόχρονα.

Παρατηρούμε επίσης ότι όταν η μετατόπιση ξεπεράσει τις 5 ίντσες εμφανίζονται κάποιοι “κουματισμοί” στη λύση. Αυτό οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ της άκαμπτης πλάκας και του πλέγματος.

ΒΗΜΑ-ΠΡΟΣ-ΒΗΜΑ ΑΝΑΛΥΣΗ

Σε αντίθεση με την περίπτωση Α ο δρόμος ισορροπίας δεν παρουσιάζει οριακό σημείο και η αύξηση του φορτίου είναι μονοτονική. Όμως επειδή η κλίση της καμπύλης σε ορισμένα σημεία είναι κοντά στο μηδέν και αργότερα με την εφαρμογή της πίεσης παίρνει και αρνητικές τιμές κρίθηκε σκόπιμο να εφαρμοστεί και πάλι έλεγχος μετατόπισης “displacement control” γιατί έτσι η σύγκλιση είναι ταχύτερη.

2.2.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Η ίδια ανάλυση έγινε και με στοιχεία κελύφους διατηρώντας τις ιδιότητες του υλικού και της διατομής ίδιες.

ΑΚΑΜΠΤΗ ΠΛΑΚΑ

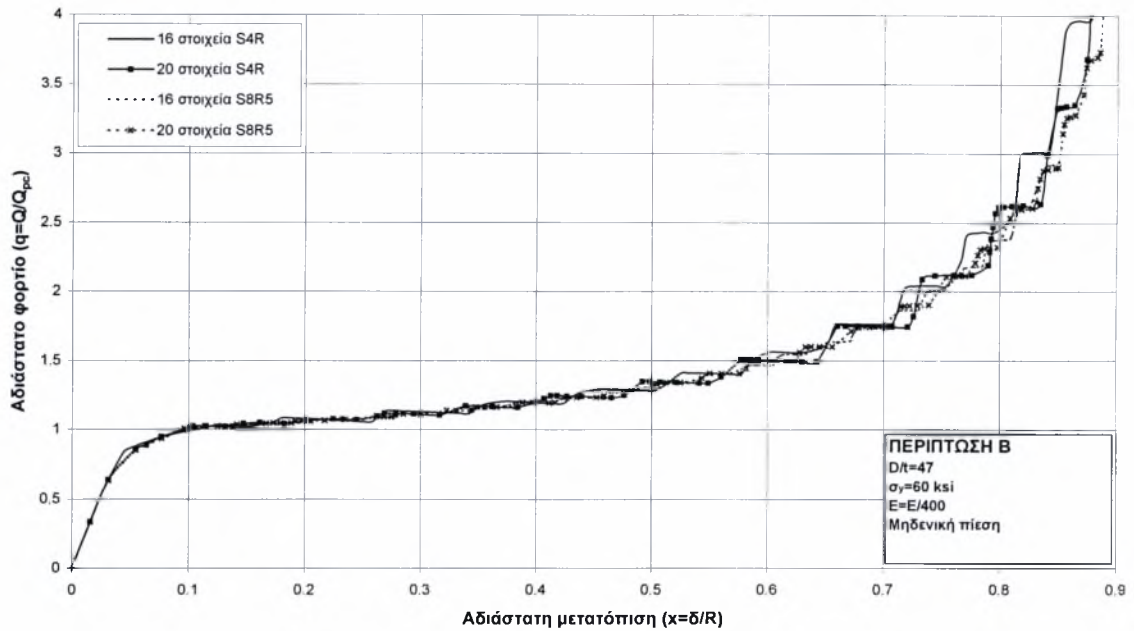
Η άκαμπτη πλάκα μοντελοποιήθηκε στον “pre-processor”, “ABAQUS CAE” με την εντολή “analytical surface”. Θεωρήσαμε οριακές συνθήκες, δεσμεύοντας όλους τους βαθμούς ελευθερίας εκτός από τη διεύθυνση 2 όπου εφαρμόσαμε τη μετατόπιση, ενώ η αλληλεπίδραση πλάκας-κελύφους θεωρήθηκε όπως και στα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Όπως και στην περίπτωση Α κάναμε παραμετρική ανάλυση με τα στοιχεία κελύφους S4R και S8R5 για δύο περιπτώσεις:

- Πλέγμα με 16 ομοιόμορφα κατανεμημένα στοιχεία.
- Πλέγμα με 20 στοιχεία και πύκνωση στα δύο άκρα (με συντελεστή πύκνωσης 3 στο “Abaqus”) όπου έχουμε τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις.

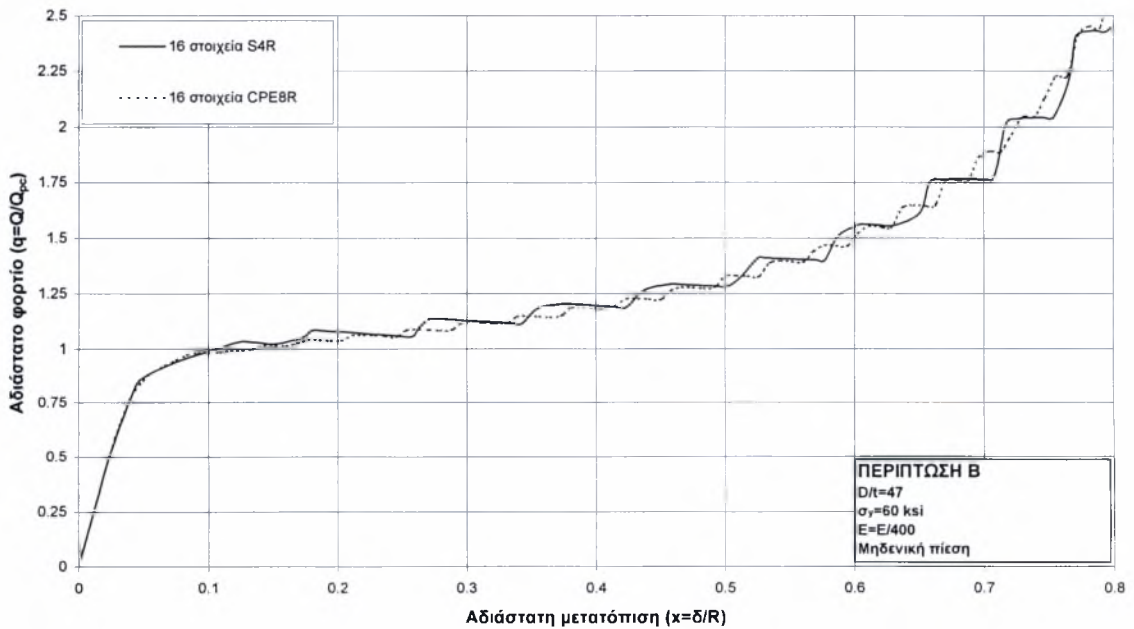
Στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 2-16) φαίνεται ο δρόμος ισορροπίας για τις τέσσερις περιπτώσεις:



Σχήμα 2-16. Εξάρτηση της λύσης από το είδος και των αριθμό των στοιχείων κελύφους.

Όπως και στην περίπτωση Α και οι τέσσερις περιπτώσεις έδωσαν περίπου την ίδια λύση. Επιλέγουμε έτσι την πιο οικονομική που είναι αυτή με τα 16 4-κομβικά στοιχεία (S4R).

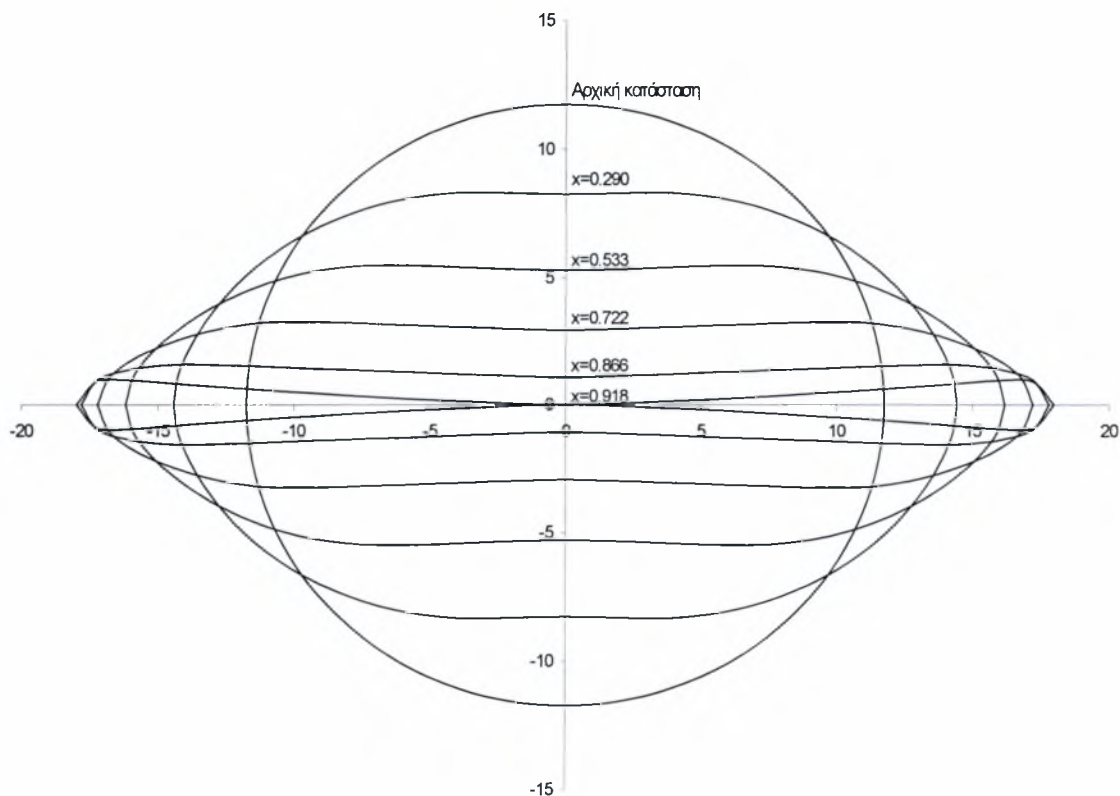
Στο επόμενο γράφημα (Σχήμα 2-17) παρουσιάζουμε σύγκριση μεταξύ των στοιχείων επίπεδης παραμόρφωσης (CPE8R) και κελύφους (S4R) για 16 στοιχεία και στις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 2-17. Σύγκριση μεταξύ των στοιχείων επίπεδης παραμόρφωσης και των στοιχείων κελύφους.

Παρατηρούμε ότι και για τις δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα είναι σχεδόν τα ίδια, ενώ οι κυματισμοί λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ πλάκας και πλέγματος είναι λίγο πιο έντονοι στην περίπτωση των στοιχείων κελύφους.

Στην επόμενη εικόνα (Σχήμα 2-18), παρουσιάζουμε σχηματικά τη μορφή της διατομής του σωλήνα για διάφορες τιμές της μετατόπισης, μέχρι την τελική κατάρρευση.



Σχήμα 2-18. Παραμορφωμένη κατάσταση σωλήνα από την αρχική γεωμετρία έως την τελική κατάρρευση (Περίπτωση Β).

2.2.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Στην περίπτωση Β έγινε και πάλι παραμετρική ανάλυση για διάφορες τιμές της πίεσης. Εκτός από εξωτερική πίεση η οποία αναμένεται να μειώσει την ακαμψία του μοντέλου όπως είδαμε στην περίπτωση Α, έγιναν και αναλύσεις υπό την επίδραση εσωτερικής πίεσης. Η εσωτερική πίεση έχει την τάση να “διογκώσει” το σωλήνα και να εμποδίσει την παραμόρφωση της διατομής αυξάνοντας την αντοχή του σε αστάθεια και τη συνολική ενέργεια που μπορεί αυτός να απορροφήσει.

Κατασκευάστηκαν δύο βήματα, όπου στο πρώτο (step 1) εφαρμόσαμε την πίεση και στη συνέχεια διατηρώντας αυτή σταθερή εφαρμόσαμε το “φορτίο” μέχρι την τελική κατάρρευση της κατασκευής (step 2).

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετρική ανάλυση είναι:

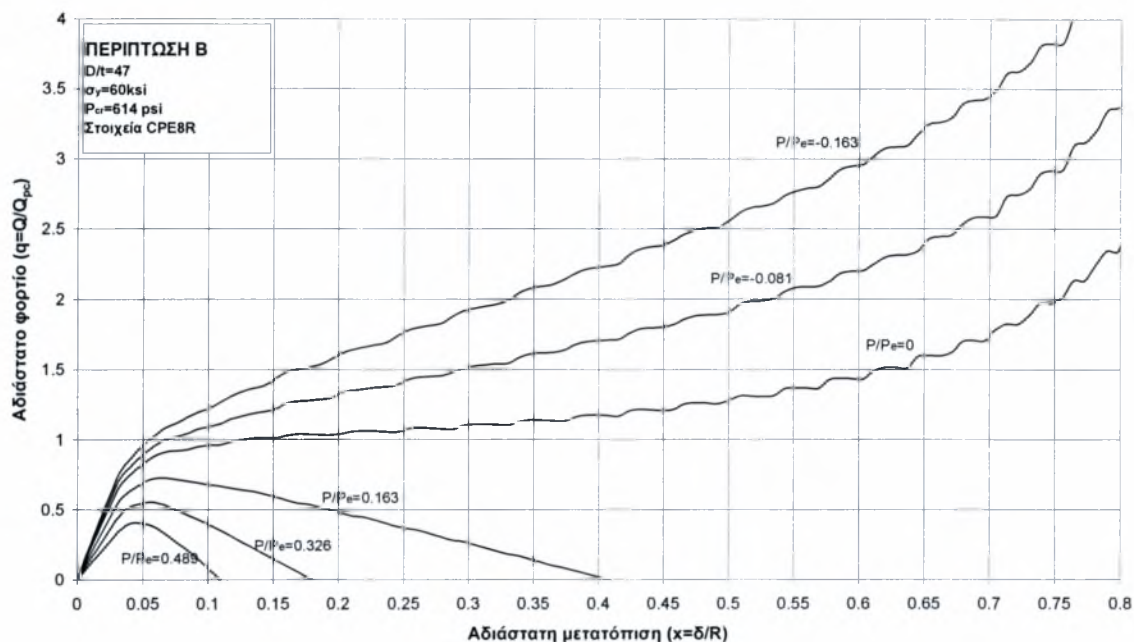
- $p/p_e=0.163$ (100 psi)
- $p/p_e=0.326$ (200 psi)
- $p/p_e=0.489$ (300 psi)
- $p/p_e=-0.163$ (-50 psi)
- $p/p_e=-0.326$ (-100 psi)

Οι αρνητικές τιμές της πίεσης αντιστοιχούν σε εσωτερική πίεση.

2.2.4 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Τα αποτελέσματα για τις παραπάνω τιμές της πίεσης παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2-19). Για την ανάλυση χρησιμοποιήσαμε το πλέγμα

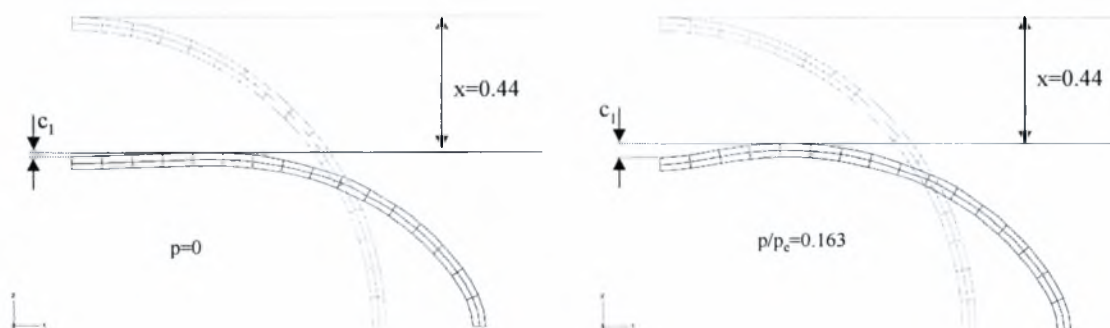
με τα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης μειωμένης ολοκλήρωσης (CPE8R), 16 κατά την περιφέρεια και 2 κατά το πάχος.



Σχήμα 2-19. Απόκριση με συμπίεση ανάμεσα σε δύο άκαμπτες πλάκες για διάφορες τιμές της πίεσης· στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης (CPE8R).

Βλέπουμε από το διάγραμμα πως η εσωτερική πίεση αυξάνει την ακαμψία του μοντέλου και απαιτείται περισσότερη ενέργεια μέχρι την κατάρρευση. Αντίθετα, εξωτερική πίεση προκαλεί μείωση της ακαμψίας με αποτέλεσμα την ραγδαία πτώση του μέγιστου φορτίου που μπορεί ο σωλήνας να παραλάβει.

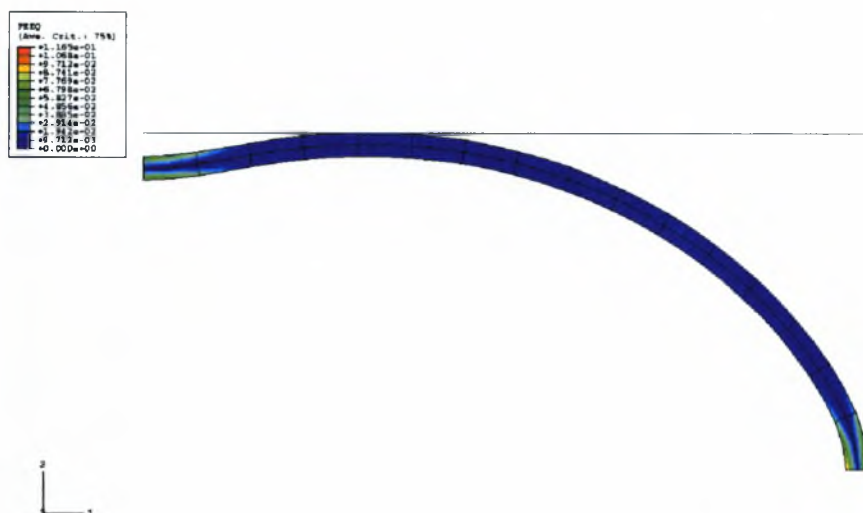
Στην επόμενη εικόνα (Σχήμα 2-20) βλέπουμε την επίδραση της πίεσης στην παραμόρφωση του μοντέλου συγκρίνοντας την περίπτωση της μηδενικής πίεσης και την περίπτωση όπου $p=100$ psi, για μετατόπιση $x=0.44$, λίγο πριν ο σωλήνας με πίεση καταρρεύσει.



Σχήμα 2-20. Επίδραση της πίεσης στην παραμόρφωση του μοντέλου.

Από το παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι για την ίδια μετατόπιση ο σωλήνας με την πίεση έχει παραμορφωθεί πολύ πιο έντονα από το σωλήνα που δεν έχει πίεση.

Πολύ σημαντικές πληροφορίες για την παραμόρφωση κατά την κατάρρευση μας δίνει η επόμενη εικόνα (Σχήμα 2-21) όπου παρουσιάζει την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση για πίεση $p=100$ psi και μετατόπιση $x=0.44$.

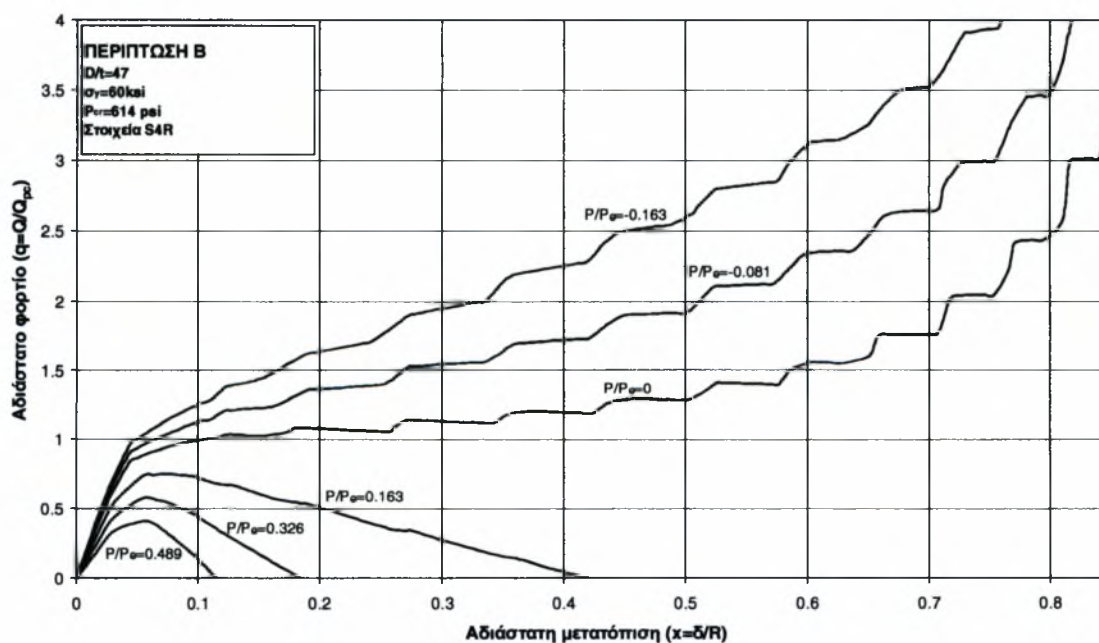


Σχήμα 2-21. Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση για το μοντέλο με πίεση $p=100$ psi για $x=0.44$.

Από την εικόνα παρατηρούμε ότι υπάρχει έντονη πλαστικοποίηση στα δύο άκρα ενώ στον υπόλοιπο σωλήνα η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση είναι μηδενική. Αυτό θα χρησιμοποιηθεί αργότερα για την κατασκευή του αναλυτικού απλοποιητικού μοντέλου.

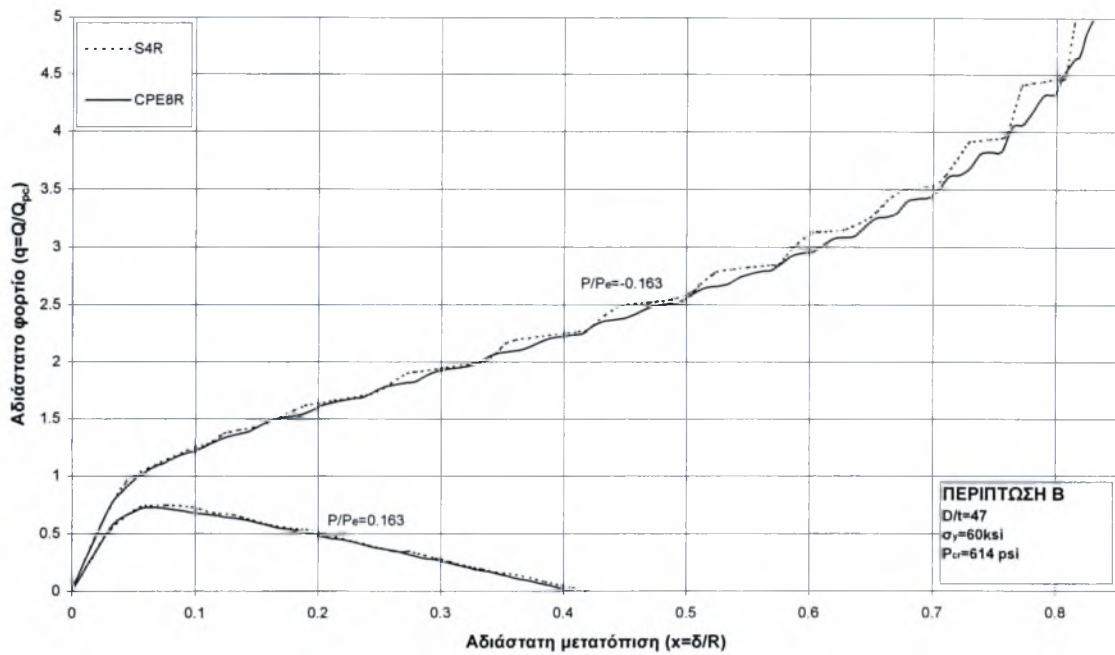
2.2.5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Για τις ίδιες τιμές της πίεσης διεξήχθη ξανά η ανάλυση με το μοντέλο για τα 16 στοιχεία κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης (S4R). Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2-22).



Σχήμα 2-22. Απόκριση με συμπίεση ανάμεσα σε δύο άκαμπτες πλάκες για διάφορες τιμές της πίεσης· στοιχεία κελύφους (S4R).

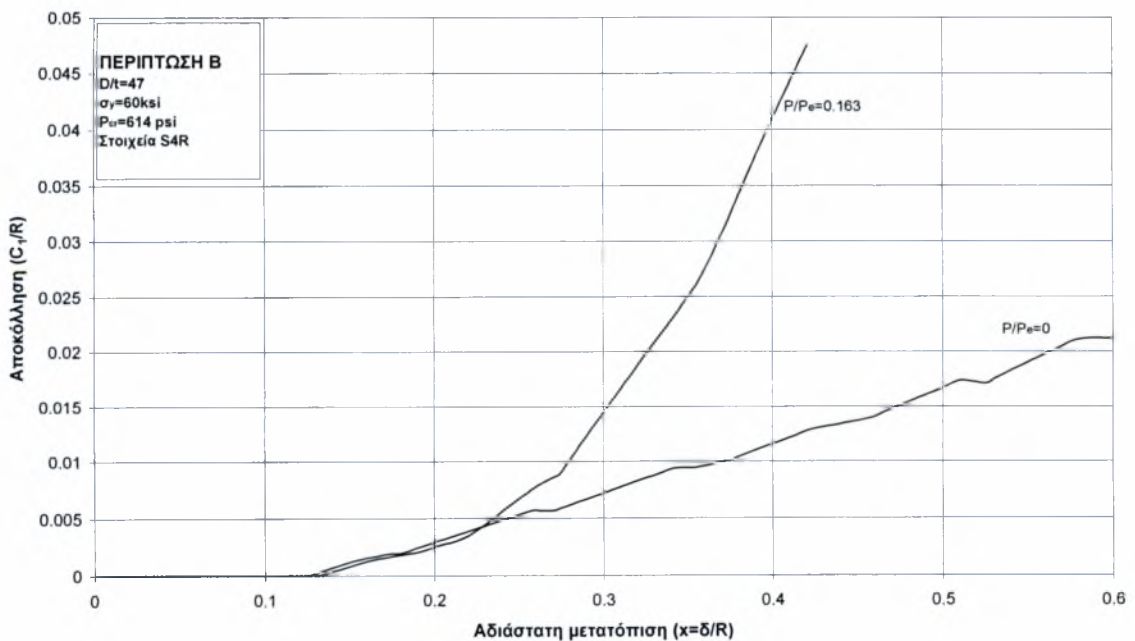
Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζουμε σύγκριση μεταξύ των στοιχείων επίπεδης παραμόρφωσης και κελύφους (CPE8R και S4R) για 16.3 % της κρίσιμης πίεσης, εσωτερικής και εξωτερικής.



Σχήμα 2-23. Σύγκριση μεταξύ των στοιχείων επίπεδης παραμόρφωσης και των στοιχείων κελύφους υπό την επίδραση πίεσης

Στην περίπτωση της εξωτερικής πίεσης η απόκριση είναι ακριβώς η ίδια ενώ για εσωτερική πίεση τα στοιχεία κελύφους δίνουν ελαφρώς μεγαλύτερα φορτία για την ίδια μετατόπιση.

Στο σχήμα 2-20 παρουσιάσαμε σύγκριση της παραμορφωμένης κατάστασης για μηδενική πίεση και $p/p_e=0.163$ για μετατόπιση $x=0.44$. Βλέπει κανείς ότι υπό την επίδραση της πίεσης είναι έντονη η τάση για αποκόλληση της κάθετης διαμέτρου, φαινόμενο που στη βιβλιογραφία συναντάται και ως “λυγισμός” (Leu 1999). Στο επόμενο γράφημα (Σχήμα 2-24) παρουσιάζουμε το μέγεθος της αποκόλλησης (C_1) κατά την εξέλιξη της κατάρρευσης του σωλήνα.



Σχήμα 2-24. Εξέλιξη του φαινομένου της αποκόλλησης της κάθετης διαμέτρου για μηδενική πίεση και $p/p_e=0.163$.

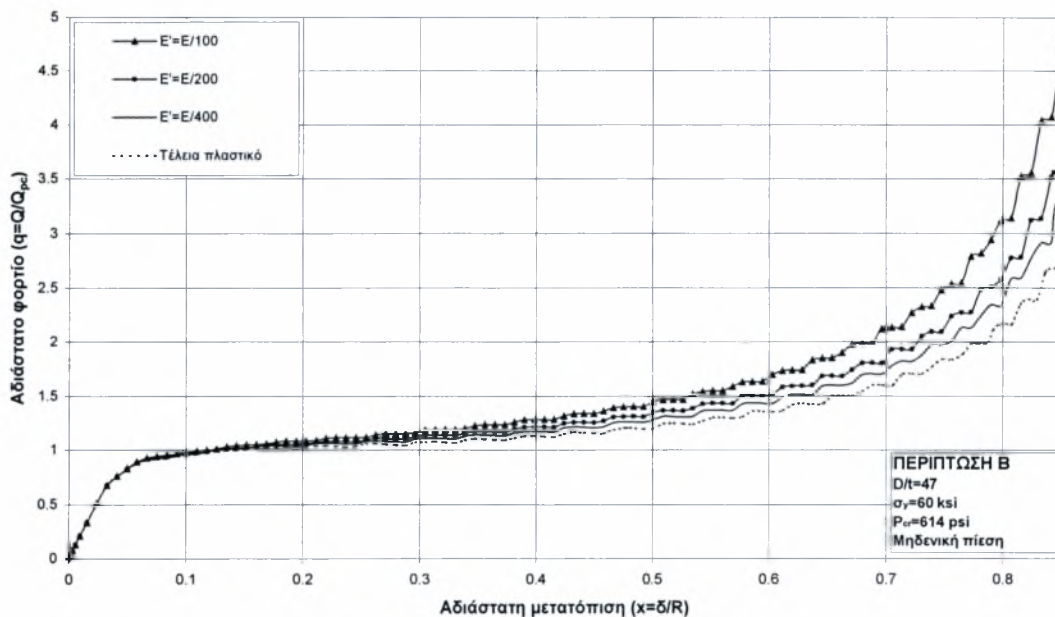
Από το παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι για μηδενική πίεση η αποκόλληση είναι ανεπαίσθητη, ενώ υπό την επίδραση της πίεσης το φαινόμενο είναι αρκετά πιο έντονο. Συμπεραίνουμε πως δεν αλλάζει μόνον η ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει ο σωλήνας υπό την επίδραση της πίεσης αλλά και ο τρόπος με τον οποίο παραμορφώνεται η γεωμετρία αυτού μέχρι την κατάρρευση.

2.2.6 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΤΡΟ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ

Σε όλες τις προηγούμενες αναλύσεις θεωρήσαμε γραμμικά κρατυνόμενο υλικό με μέτρο σκλήρυνσης $E' = E/400$. Στη συνέχεια πραγματοποιήσαμε παραμετρική μελέτη για να δούμε κατά πόσον επηρεάζεται η λύση από την κλίση του μέτρου σκλήρυνσης. Η ανάλυση έγινε με στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης CPE8R. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

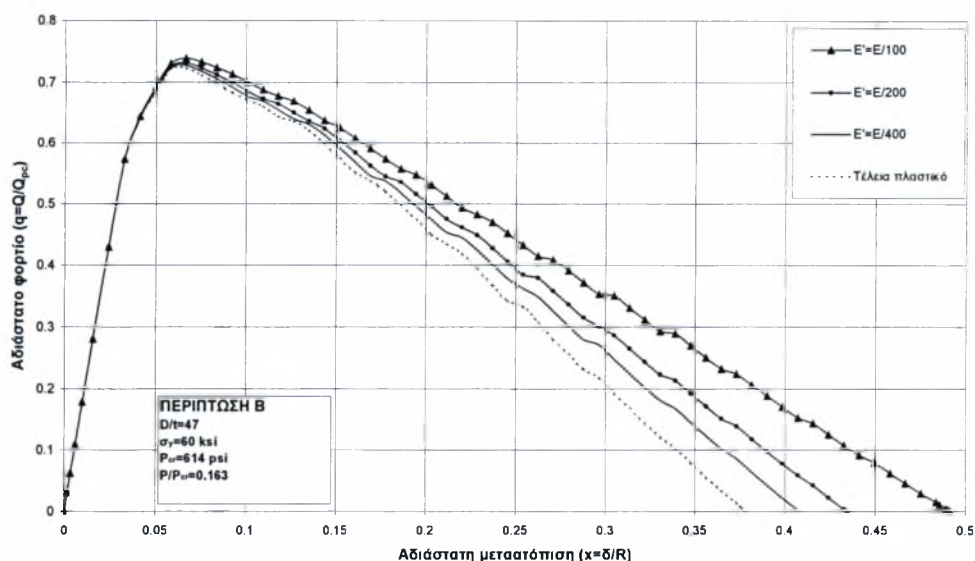
- $E' = E/100$
- $E' = E/200$
- $E' = E/400$
- Τέλεια Πλαστικό (Ως τέλεια πλαστικό θεωρήσαμε το υλικό για μέτρο σκλήρυνσης $E' = 0$)

Για τις αναλύσεις που παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2-24), χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο επίπεδης παραμόρφωσης (CPE8R).



Σχήμα 2-24. Επίδραση του μέτρου σκλήρυνσης για μηδενική πίεση (Στοιχεία CPE8R).

Για τις ίδιες τιμές του μέτρου σκλήρυνσης έγινε ανάλυση και υπό την επίδραση της πίεσης. Στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 2-25) παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα για τιμή $p=100$ psi ($p/p_e=0.163$).



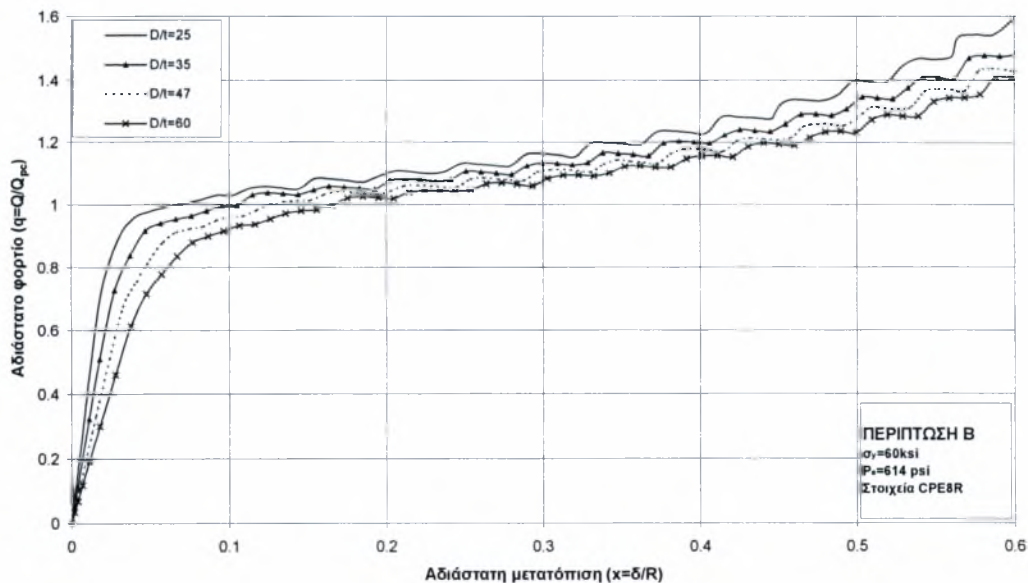
Σχήμα 2-26. Επίδραση του μέτρου σκλήρυνσης για πίεση $P=16.3\% P_e$ (Στοιχεία CPE8R).

Βλέπουμε από το σχήμα 2-24 για μηδενική πίεση, ότι όταν η μετατόπιση ξεπεράσει την τιμή $x=0.3$ η αλλαγή στο μέτρο σκλήρυνσης αρχίζει να επηρεάζει εμφανώς τη λύση. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση της πίεσης, με τη διαφορά ότι η επιρροή του E' εμφανίζεται για πολύ μικρότερη μετατόπιση ($x=0.06$) στο δρόμο ισορροπίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι η πίεση παραμορφώνει έντονα τη γεωμετρία του σωλήνα προκαλώντας πλαστικοποίηση πολύ γρήγορα.

2.2.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ

Για να ολοκληρώσουμε την ανάλυση του δισδιάστατου προβλήματος διεξήγαμε παραμετρική μελέτη σε σχέση με τον λόγο διαμέτρου προς πάχους του σωλήνα. Οι λόγοι διαμέτρου προς ακτίνας που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- $D/t=25$
- $D/t=35$
- $D/t=47$
- $D/t=60$



Σχήμα 2-26. Επίδραση του πάχους στην απόκριση του σωλήνα (Στοιχεία CPE8R).

Από το σχήμα βλέπουμε ότι η λύση είναι διαφορετική αρχικά στην ελαστική περιοχή. Στη συνέχεια είναι περίπου η ίδια ($0.2 < x < 0.45$) και για μεγαλύτερες μετατοπίσεις ($x > 0.45$) παρουσιάζεται και πάλι εμφανής διαφορά κυρίως για τα δύο πιο παχιά κελύφη ($D/t = 25$ και $D/t = 35$).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

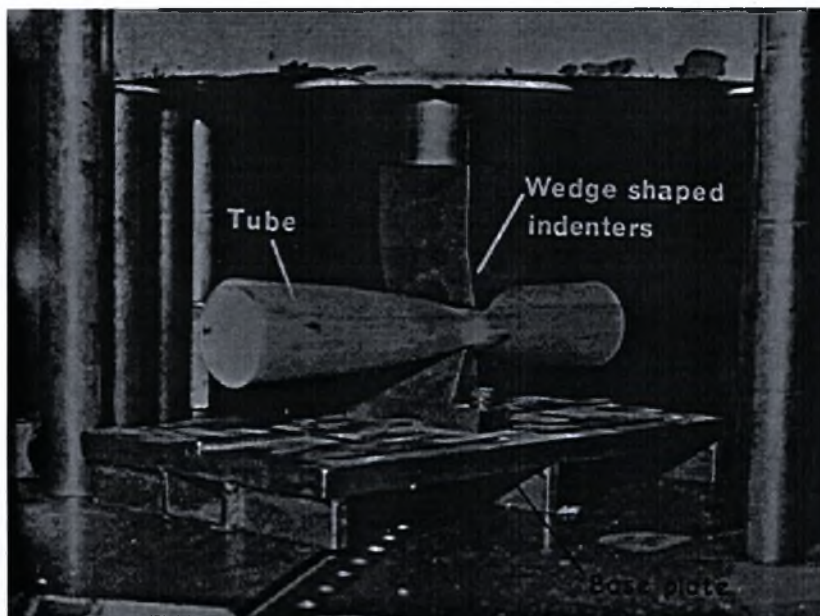
Τρισδιάστατη Ανάλυση Κυλινδρικών Κελυφών Αλουμινίου Υπό Εγκάρσια Φόρτιση Και Πίεση

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό μελετούμε την απόκριση κυλινδρικών κελυφών (σωλήνων) υπό την επίδραση εγκάρσιων φορτίων σε ένα περιορισμένο τμήμα της επιφάνειας. Ως φορτίο θεωρήθηκε ένα ζεύγος αιχμηρών μαχαιριών. Το φαινόμενο στην περίπτωση αυτή είναι τρισδιάστατο και η επίλυση έγινε με το πρόγραμμα "ABAQUS". Οι σωλήνες που μελετούμε είναι σχετικώς μεγάλου πάχους ($D/t=30.25$) και παρουσιάζουν σημαντική ανελαστική παραμόρφωση. Έγινε παραμετρική ανάλυση για διάφορα μήκη ενώ εξετάστηκε και η επίδραση των οριακών συνθηκών. Οι σωλήνες προσομοιώθηκαν με τετρακομβικά στοιχεία κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης (S4R), ενώ θεωρήσαμε ελαστοπλαστικό υλικό με μεγάλες παραμορφώσεις και μοντέλο ισοτροπικής κράτυνσης με κριτήριο διαρροής "Von Mises". Σε όλες τις περιπτώσεις κατασκευάσαμε πλέγμα πυκνότερο στην περιοχή εφαρμογής της δύναμης, ενώ στο υπόλοιπο του κελύφους το πλέγμα ήταν πιο αραιό.

3.1 Αστοχία Χωρίς Πίεση Υπό Την Επίδραση Διεσδυτών Μορφής Λεπίδας.

Σε μία προηγούμενη πειραματική εργασία, εγκάρσια φορτία εφαρμόζονται σε μια σειρά σωλήνων από αλουμίνιο (Watson et. al. 1976). Η διάταξη του πειράματος φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 3-1).



Σχήμα 3-1. Πειραματική διάταξη για φόρτιση κυλινδρικών κελυφών στην μεσαία διατομή. (Watson et. al. 1976)

Η διείδυση κατά την πειραματική διαδικασία έγινε με αργό ρυθμό, έτσι ώστε το φαινόμενο να μπορεί να θεωρηθεί στατικό. Όπως φαίνεται από την εικόνα, οι δύο άκρες του σωλήνα δεν έχουν κινηματικούς περιορισμούς και παραμορφώνονται ελεύθερα.

Οι Watson et al. (1976) βρήκαν ότι διατηρώντας όλες τις παραμέτρους σταθερές και μεταβάλλοντας το μήκος του σωλήνα εμφανίζονται τρεις διαφορετικοί τρόποι συμπεριφοράς κατά την παραμόρφωση.

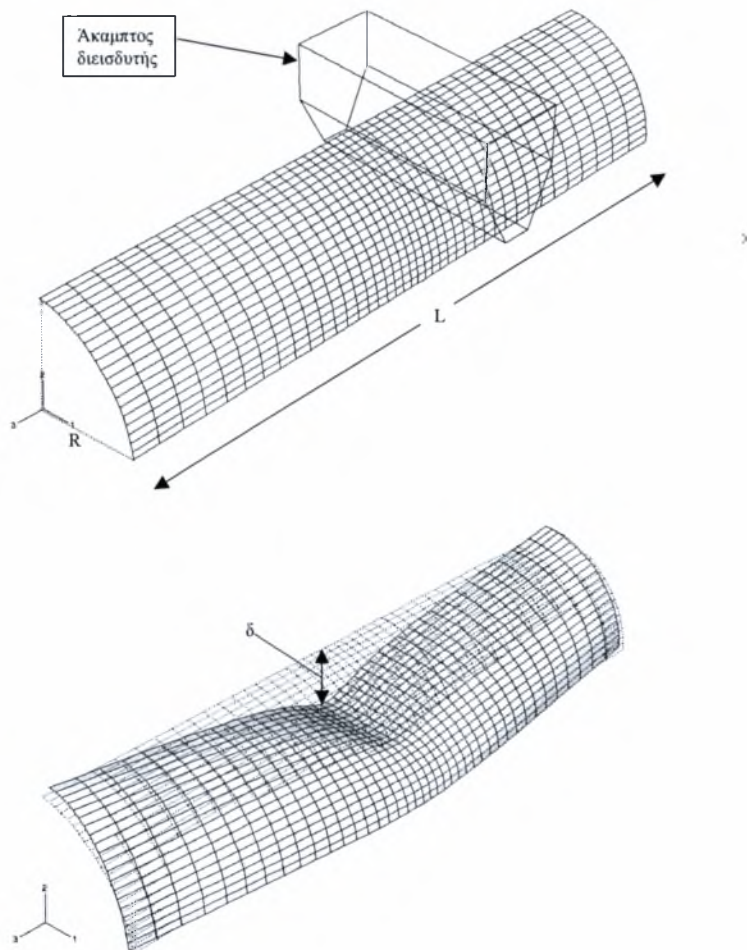
- Συμπεριφορά δακτυλίου (“Ring mode”) για μικρά μήκη.
- Μεταβατική συμπεριφορά (“Transitional mode”) για μέσα μήκη.
- Αντίστροφη “οβαλοποίηση” (“Reversing ovality mode”) για σχετικά μεγάλα μήκη.

Μια αυστηρή προσομοίωση της πειραματικής διάταξης έγινε, χρησιμοποιώντας στοιχεία κελύφους για το σωλήνα, ενώ ο διεσδυτής θεωρήθηκε άπαραμόρφωτος. Τα χαρακτηριστικά του σωλήνα είναι τα εξής:

ΣΩΛΗΝΑΣ 2

- $E=10240$ ksi (70.6 GPa)
- $\nu=0.3$
- $D_{out}=2$ in (50.8 mm)
- $t=0.064$ in (1.6256 mm)
- $D/t=30.25$
- $\sigma_y=35.5$ ksi (244.8 Mpa)

όπου E , ν , D_{out} , t , D/t , σ_y είναι το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος του Poisson, η εξωτερική διάμετρος, το πάχος, ο λόγος μέσης διαμέτρου προς πάχος και το όριο διαρροής αντίστοιχα. Το πάχος του διεσδυτή είναι $1/4$ της ίντσας.



Σχήμα 3-2. Προσομοίωση κυλινδρικού κελύφους στο “Abaqus”. Απαραμόρφωτη και παραμορφωμένη κατάσταση. (δ είναι η μετατόπιση του διεσδυτή)

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ

Ο σωλήνας υφίσταται μεγάλες παραμορφώσεις, οπότε είναι αναγκαίο να λάβουμε υπόψη πλαστικές παραμορφώσεις. Το όριο διαρροής για τα συγκεκριμένα δοκίμια αλουμινίου είναι $\sigma_y = 35500 \text{ lb/in}^2$. Θεωρήσαμε μοντέλο ισοτροπικής κράτνσης με κριτήριο διαρροής “Von Mises” (J_2 flow plasticity). Η καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού θεωρήσαμε ότι ακολουθεί το νόμο “Ramberg-Osgood” σύμφωνα με τον τύπο:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \frac{3}{7} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y'} \right)^{n-1} \right] \quad (3.1)$$

όπου ε και σ η ονομαστική παραμόρφωση και τάση αντίστοιχα. Ο εκθέτης n προσδιορίζεται πειραματικά και στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε η τιμή $n=30$, ενώ για το σ_y χρησιμοποιήθηκε η τιμή $\sigma_y' = 35000 \text{ lb/in}^2$.

Οι γεωμετρικές μη γραμμικότητες λήφθηκαν υπόψη με την υποεντολή “nlgeom” στην εντολή “step” όπως και στο δισδιάστατο πρόβλημα.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΧΑΡΑΞΗΣ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Για την αριθμητική επίλυση χρησιμοποιήθηκε στις περισσότερες περιπτώσεις έλεγχος μετατόπισης, (displacement control) γιατί όπως και στο δισδιάστατο πρόβλημα το φορτίο στον δρόμο ισορροπίας παίρνει αρνητική κλίση, δημιουργώντας πρόβλημα στη σύγκλιση. Ακόμα και με αυτή τη θεώρηση όμως σε κάποιες περιπτώσεις που παρουσιάζονται παρακάτω, εμφανίστηκε κατά την ανάλυση έντονη αστάθεια όπου μειωνόταν τόσο η δύναμη όσο και η μετατόπιση. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο του Riks στην εντολή “step”.

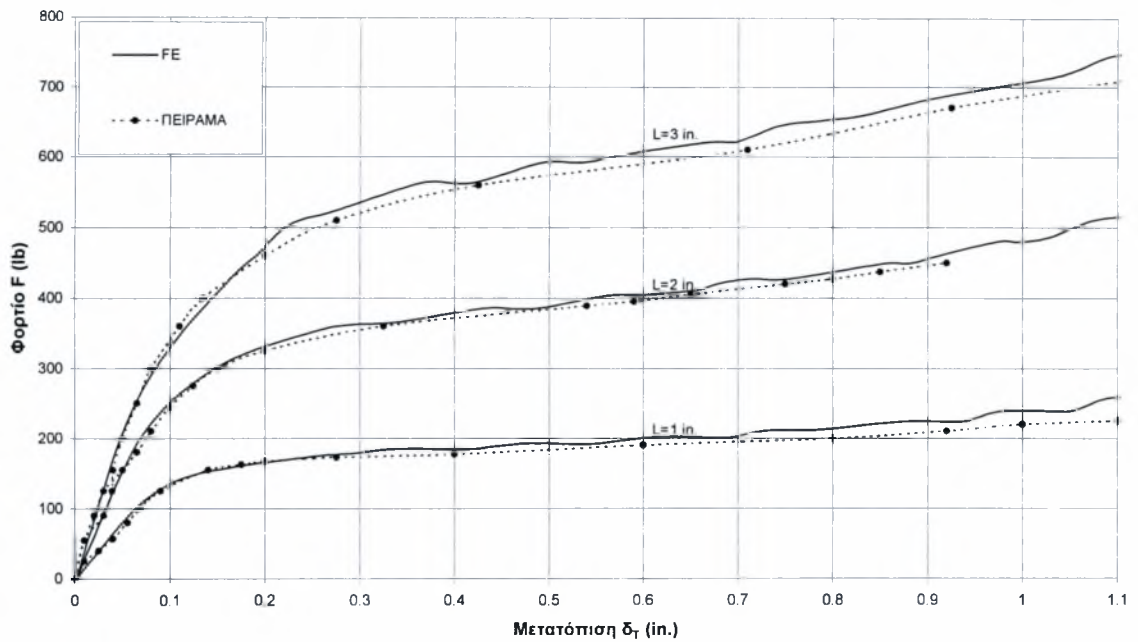
ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΤΗ-ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Η αλληλεπίδραση επαφής ανάμεσα στον διεισδυτή και το κέλυφος θεωρήθηκε χωρίς τριβή και για την προσομοίωση στο “Abaqus” χρησιμοποιήθηκε η εντολή “interaction”. Ο διεισδυτής κατασκευάστηκε με την εντολή “analytical surface” από τον “pre-processor”, “Abacus CAE” και θεωρήθηκε άκαμπτος, μέσω της εντολής “Rigid body”. Το φορτίο εφαρμόστηκε σε αυτό αφού πρώτα θεωρήσαμε ένα κόμβο αναφοράς (“reference point”). Η επιφάνεια επαφής του διεισδυτή με το κέλυφος έχει πάχος $1/4$ της ίντσας.

3.1.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ (“Ring Mode”)

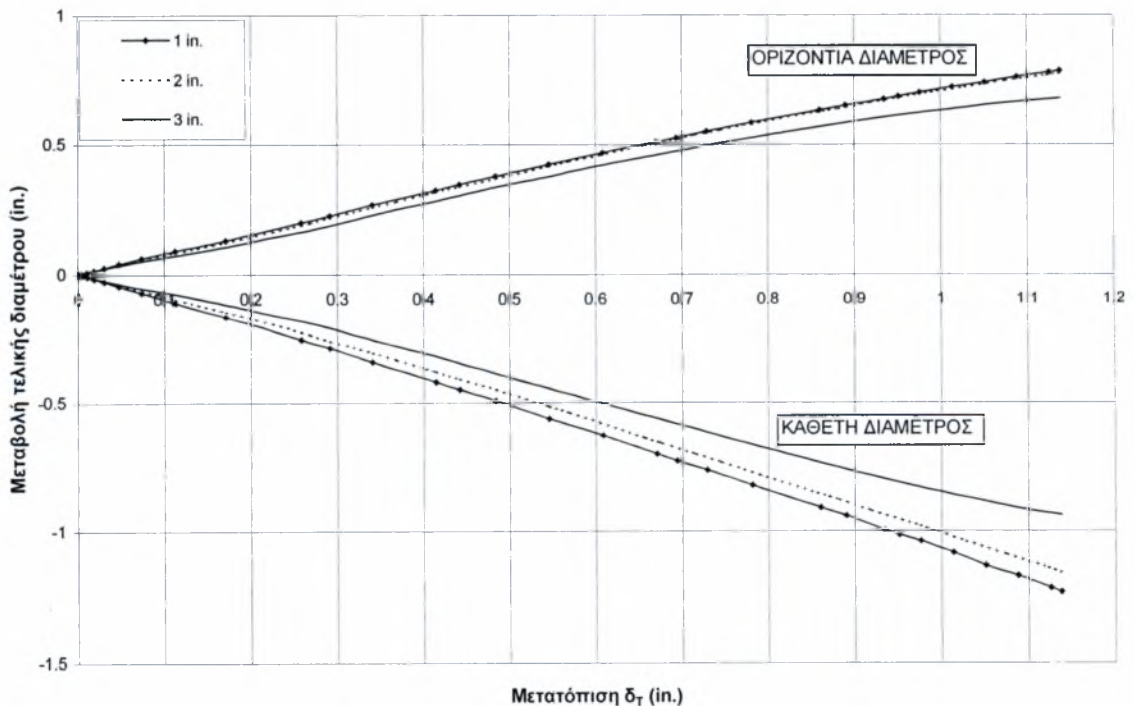
Κατά την φόρτιση κοντών σωλήνων η παραμόρφωση είναι παρόμοια με αυτή που περιγράψαμε στην δισδιάστατη ανάλυση στο κεφάλαιο 2. Αυτή η συμπεριφορά κατά τους Watson et al. (1976), συμβαίνει για σωλήνες με μήκος μικρότερο από μιάμιση διάμετρο. Τα αποτελέσματα από τα πειράματα καθώς και η ανάλυση με τα πεπερασμένα στοιχεία παρουσιάζονται στα επόμενα διαγράμματα για μήκη:

- $L=1 \text{ in}$ ($L=0.5D$)
- $L=2 \text{ in}$ ($L=1D$)
- $L=3 \text{ in}$ ($L=1.5D$)

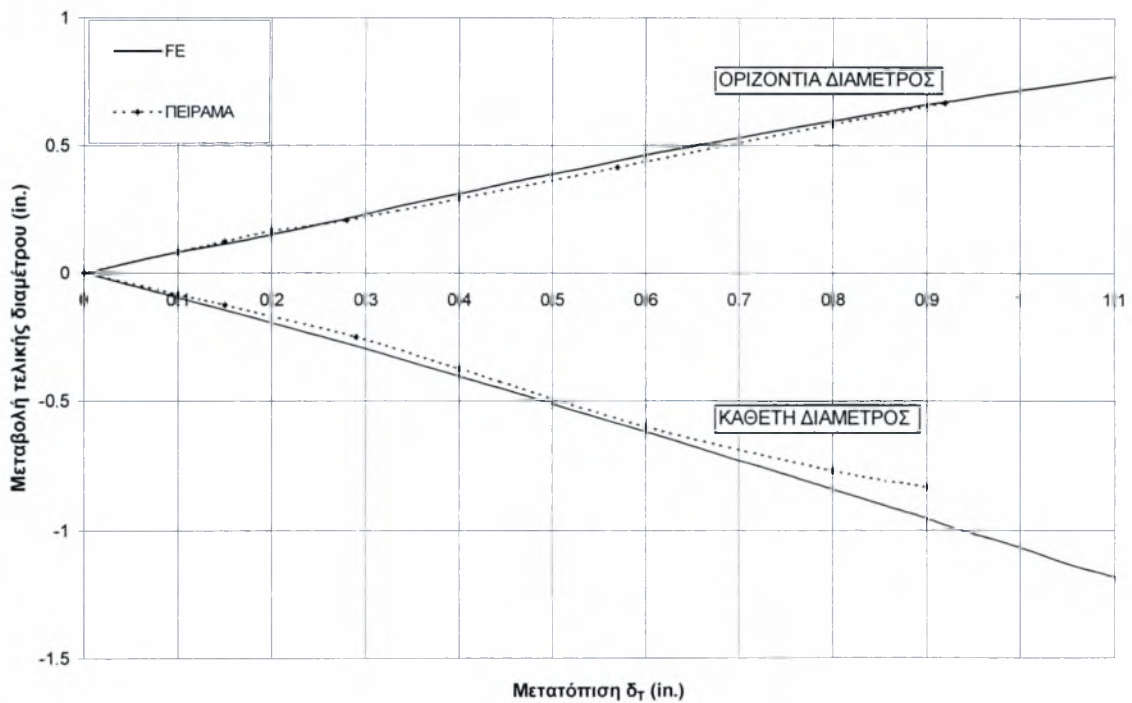


Σχήμα 3-3. Σύγκριση της πειραματικής λύσης με το Abaqus για μικρά μήκη σωλήνων. ($D_{out}=2$ in., $t=0.064$ in.)

Στο άνω διάγραμμα F είναι το φορτίο που επιβάλλουμε στους διεισδυτές και δ_T η συνολική μετατόπιση αυτών ($\delta_T=2\delta$). Η σύγκριση δείχνει ότι η λύση με τα πεπερασμένα στοιχεία προσομοιάζει με μεγάλη ακρίβεια τα πειραματικά αποτελέσματα. Στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 3-5) παρουσιάζουμε τη μεταβολή των μετατοπίσεων της άνω και της κάτω γενέτειρας στο άκρο του σωλήνα όπως προέκυψε από το “Abaqus”, ενώ στο σχήμα 3-4 παρουσιάζουμε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα για μήκος $L=1$ in.



Σχήμα 3-4. Μεταβολή τελικής διαμέτρου για μικρά μήκη σωλήνων.

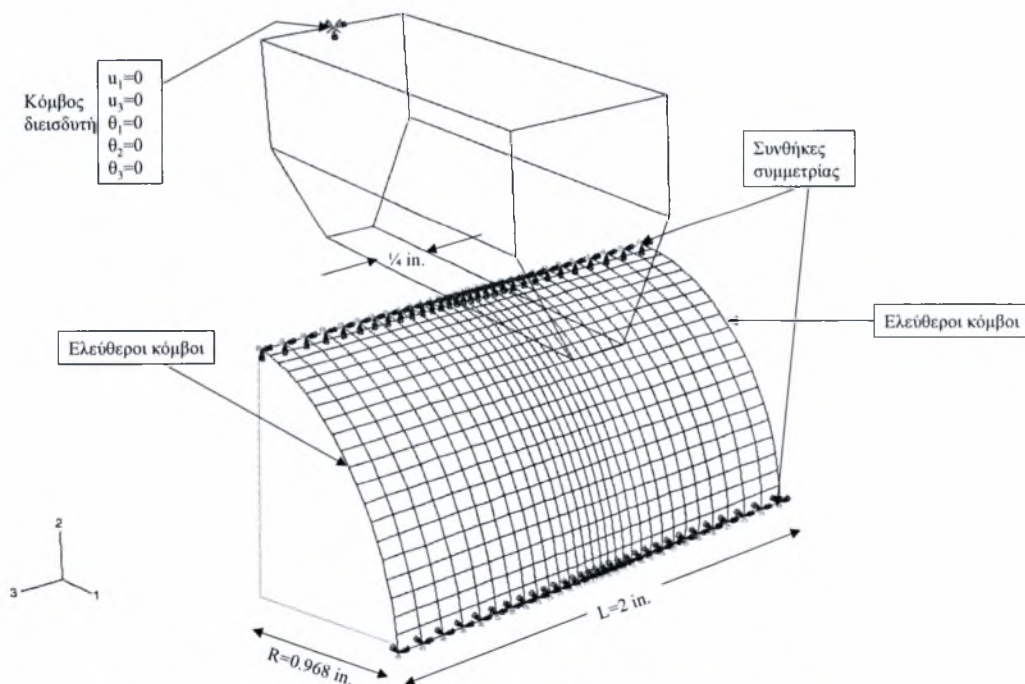


Σχήμα 3-5. Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με το Abaqus για μήκος $L=1$ in. ($L/D=0.5$)

Από το σχήμα 3-5 βλέπουμε ότι το μοντέλο μας δίνει πολύ καλά αποτελέσματα και για την μεταβολή των τελικών διαμέτρων της ακραίας διατομής.

ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

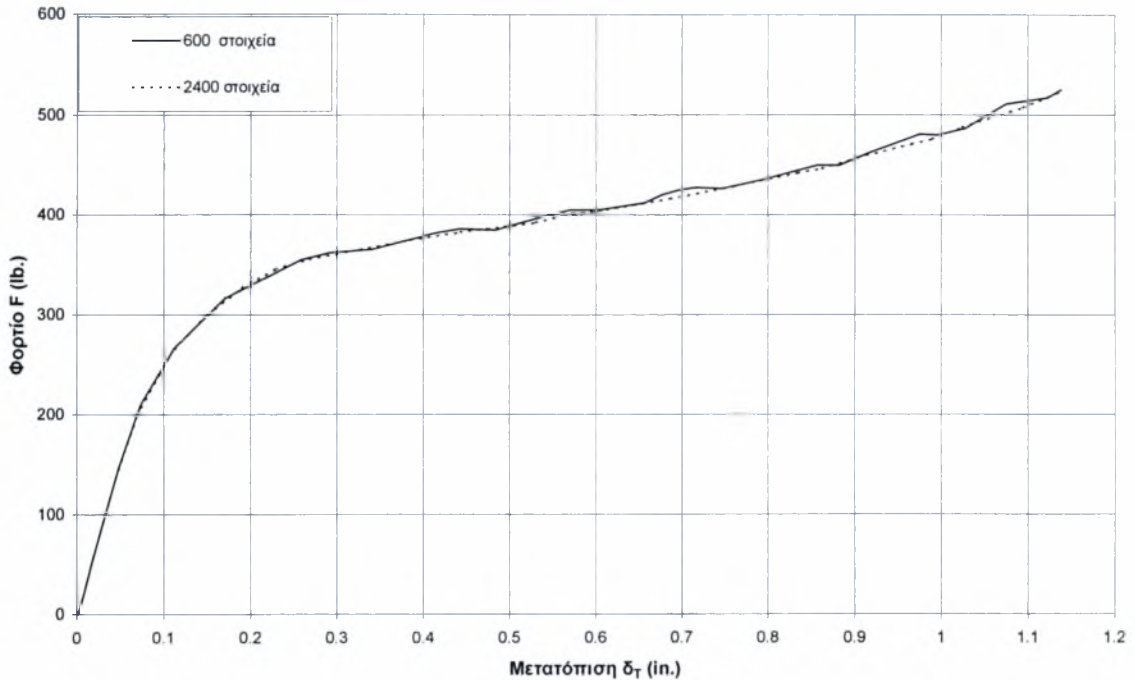
Για τη δημιουργία του μοντέλου χρησιμοποιήσαμε στοιχεία κελύφους (S4R). Ένα τυπικό πλέγμα που χρησιμοποιήσαμε φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 3-5) για μήκος σωλήνα $L=2$ in.



Σχήμα 3-6. Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για σωλήνα αλουμινίου μήκους 2 ιντσών.

Στο παραπάνω μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν 600 στοιχεία κελύφους. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3-5 αναλύσαμε το ¼ αυτού. Στο πλέγμα επιβάλλαμε πύκνωση (με συντελεστή 3 στο Abaqus) προς το σημείο εφαρμογής του φορτίου.

Για να ελέγξουμε την ακρίβεια της λύσης μας κάναμε ανάλυση με πλέγμα στο οποίο χρησιμοποιήσαμε τα τετραπλάσια (2400) στοιχεία. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 3-7).



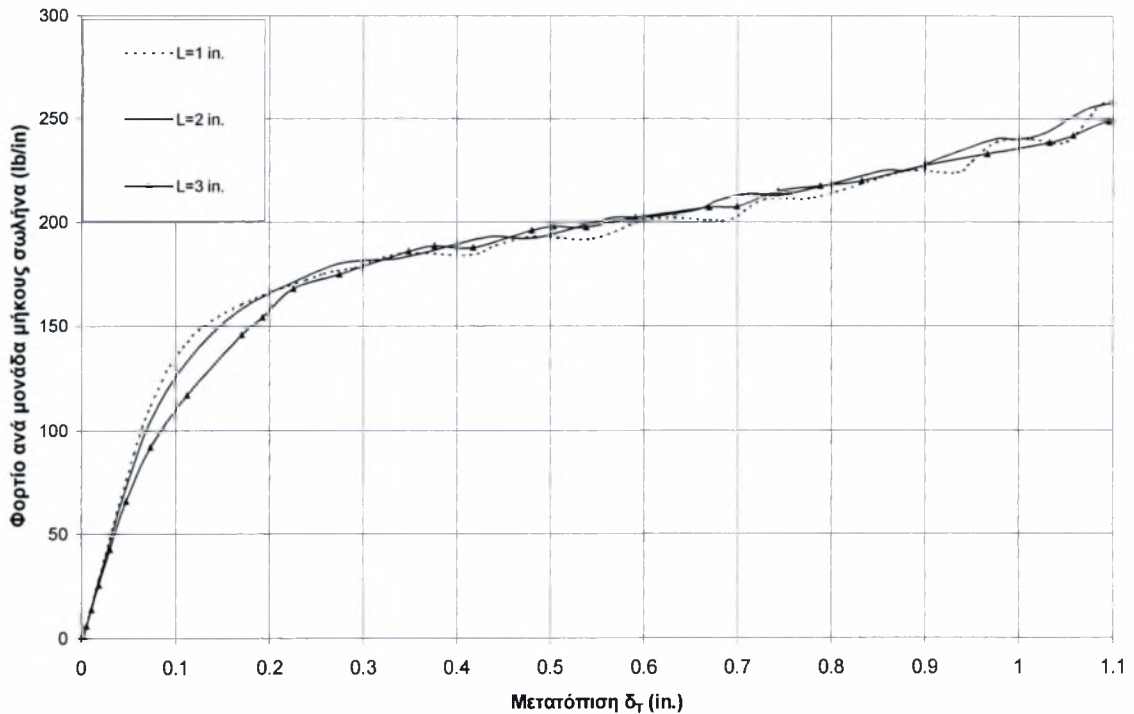
Σχήμα 3-7. Ακρίβεια της λύσης για μήκος σωλήνα $L=D$ συναρτήσει του αριθμού των στοιχείων που απαρτίζουν το πλέγμα.

Όπως βλέπουμε από τη σύγκριση τα αποτελέσματα είναι σχεδόν πανομοιότυπα. Η λύση για 2400 στοιχεία είναι λίγο πιο ομαλή, χωρίς να παρουσιάζει καθόλου “κυματισμούς” που οφείλονται στον αλγόριθμο της αλληλεπίδρασης κελύφους-διεισδυτή (contact algorithm). Ωστόσο αυτοί οι “κυματισμοί” δεν επηρεάζουν την ακρίβεια της λύσης και αυτό το επιχείρημα ενισχύεται από την σύγκριση με τα πειράματα, έτσι χρησιμοποιούμε για την ανάλυση το πρώτο μοντέλο με τα 600 στοιχεία.

Διατηρώντας το μέγεθος των στοιχείων περίπου σταθερό κατασκευάσαμε και τα υπόλοιπα πλέγματα για τα διάφορα μήκη που εξετάσαμε με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Παραπάνω περιγράψαμε τη συμπεριφορά των σωλήνων ισχυριζόμενοι ότι για μήκος μέχρι και μιάμιση διάμετρο παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Για να ενισχύσουμε αυτό το επιχείρημα παρουσιάζουμε στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 3-8) το δρόμο ισορροπίας για τα τρία μήκη (Σχήμα 3-3), διαιρώντας το φορτίο F με το μήκος L.



Σχήμα 3-8. Δρόμος ισορροπίας για μικρά μήκη σωλήνων. ($D_{out}=2 \text{ in.}$, $t=0.064 \text{ in.}$)

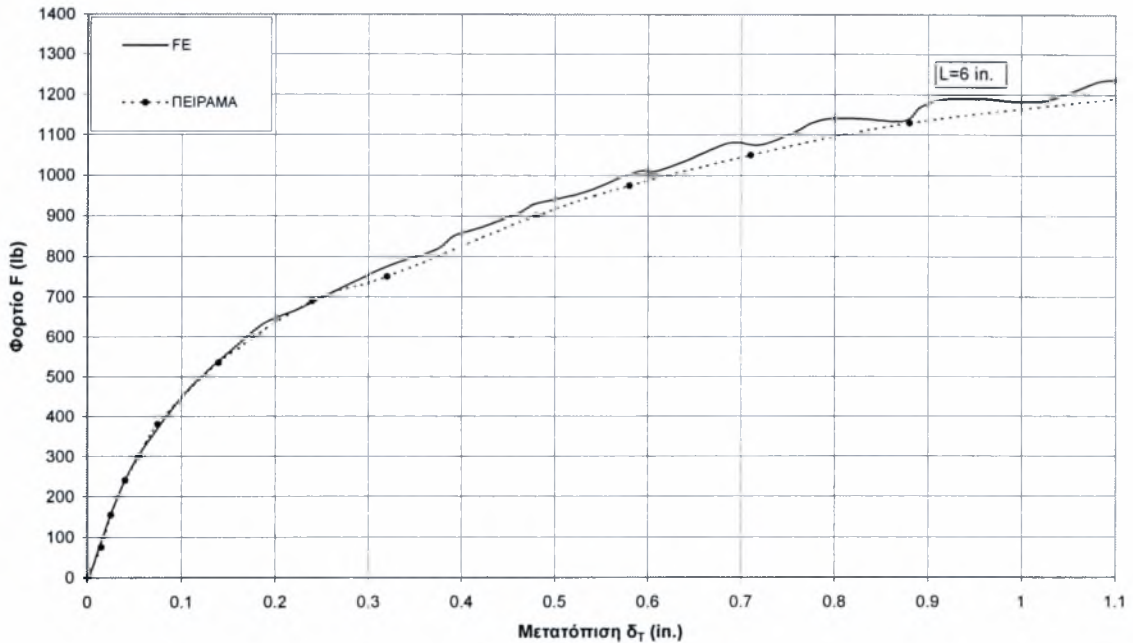
Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι το φορτίο που επιβάλλουμε για παραμόρφωση είναι περίπου ανάλογο με το μήκος. Αυτό σημαίνει πως η ενέργεια που καταβάλουμε απορροφάται από την κάμψη κάθε διατομής ενώ οι γενέτιρες παραμένουν σχεδόν απαραμόρφωτες. Για αυτόν ακριβώς το λόγο θεωρούμε ότι οι μικρού μήκους σωλήνες έχουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του δακτυλίου. Το επιχείρημα αυτό ενισχύεται από το σχήμα 3-4 όπου βλέπουμε ότι η μεταβολή της κάθετης διαμέτρου στα άκρα ακολουθεί περίπου τη μετατόπιση του διεισδυτή.

Η κάμψη των γενετειρών είναι πολύ μικρή και φαίνεται από το διάγραμμα του σχήματος 3-8. Οι σωλήνες των δύο και των τριών ιντσών χρειάζονται λιγότερο φορτίο αρχικά, μέχρι τις 0.25 ίντσες περίπου. Αυτό οφείλεται στην αρχική κάμψη των γενετειρών με αποτέλεσμα τη μείωση της ακαμψίας του κελύφους, αλλά πολύ γρήγορα το φαινόμενο της διείσδυσης καλύπτει το μήκος του σωλήνα. Μετά το σημείο αυτό η αύξηση του φορτίου με τη μετατόπιση εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από την παραμόρφωση των διατομών και γι' αυτό οι τρεις λύσεις είναι πρακτικά ίδιες.

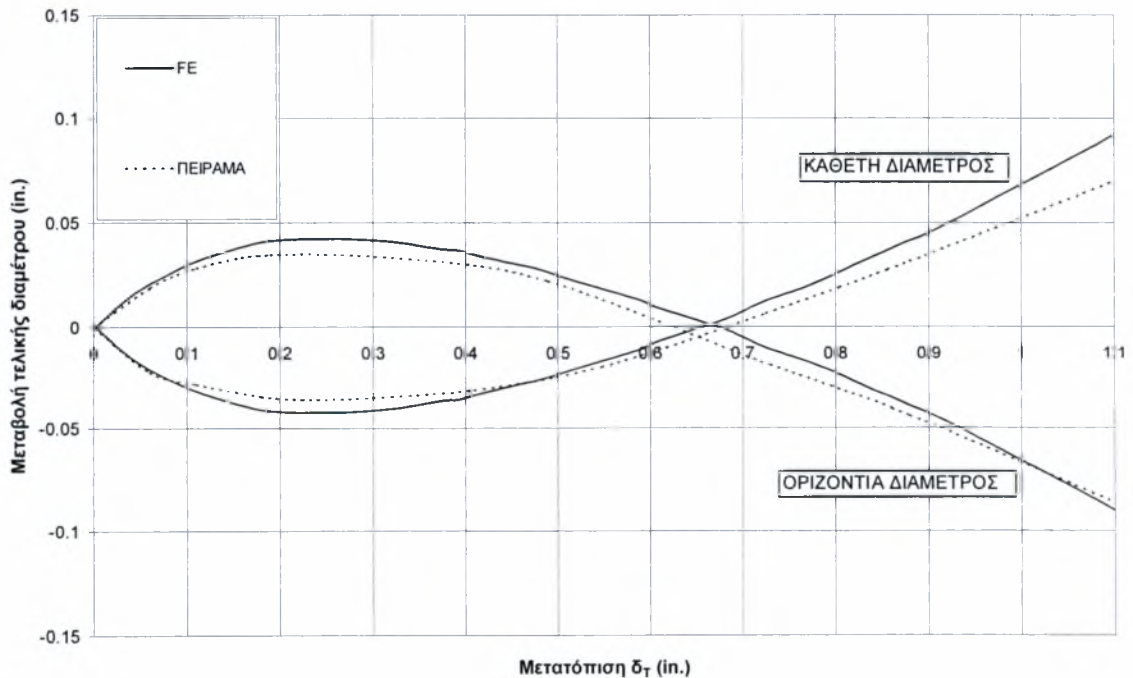
Ο μηχανισμός της κατάρρευσης είναι παρόμοιος με αυτόν που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο για συμπίεση ανάμεσα σε πλάκες. Το φορτίο τείνει να κάνει “επίπεδο” το σωλήνα (flattening) στην περιοχή εφαρμογής του φορτίου και οι μεγαλύτερες τάσεις εμφανίζονται στις οριζόντιες και τις κάθετες γενέτιρες, λόγω της κάμψης της κάθε διατομής σε σχήμα οβάλ.

3.1.2 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ (“Transitional Mode”)

Για μέσου μεγέθους μήκη, δηλαδή για $1.5D < L < 6D$, η συμπεριφορά των σωλήνων χαρακτηρίστηκε από τους Watson et al (1976) “μεταβατική”. Προτού περάσουμε στην εξήγηση αυτού του όρου παραθέτουμε τα αποτελέσματα για ένα τέτοιο σωλήνα, μήκους $L=6$ in. ($L=3D$). Στα επόμενα δύο σχήματα παρουσιάζεται η λύση με πεπερασμένα στοιχεία καθώς και σύγκριση με τα πειράματα για τον δρόμο ισορροπίας καθώς και για τις μεταβολές στην τελική διάμετρο.



Σχήμα 3-9. Σύγκριση της πειραματικής λύσης με το Abaqus για μήκος σωλήνα $L=6$ in. ($L/D=3$)



Σχήμα 3-10. Μεταβολή των διαμέτρων της ακραίας διατομής για μήκος σωλήνα $L=6$ in. ($L/D=3$)

Παρατηρεί κανείς ότι όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, για μικρά μήκη, το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων δίνει εξαιρετικά καλά αποτελέσματα.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

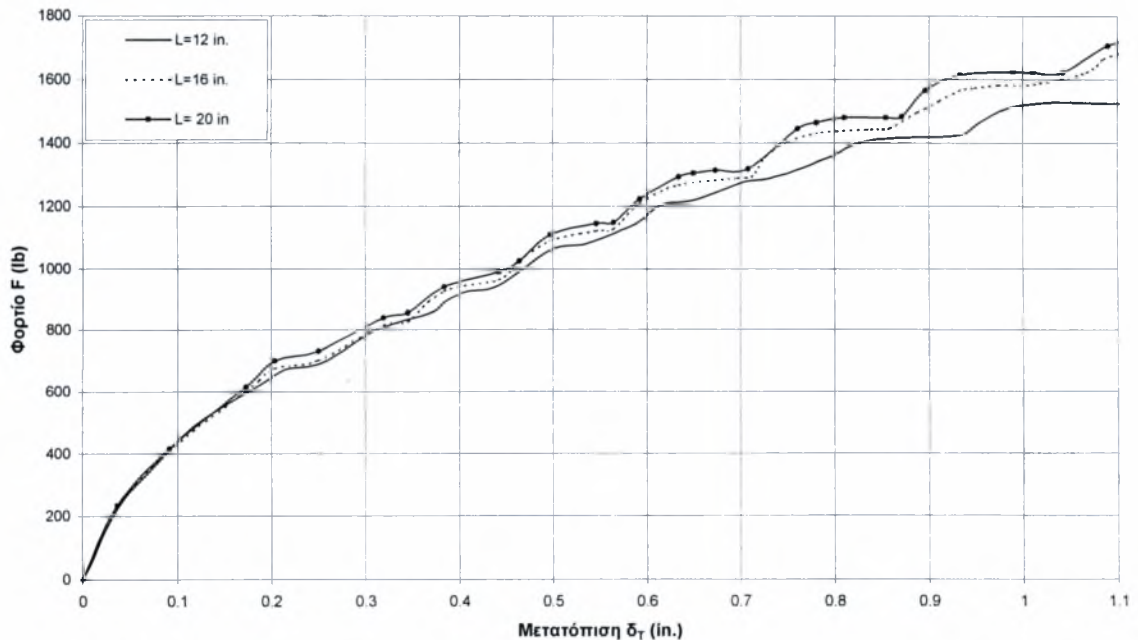
Αρχικά, καθώς ο σωλήνας παραμορφώνεται, οι οριζόντιες και οι κάθετοι διάμετροι σε κάθε διατομή παραμορφώνονται κατά την ίδια διεύθυνση με τις αντίστοιχες διαμέτρους της κεντρικής διατομής. Αυτό αποκαλύπτεται από τη μεταβολή της τελικής διαμέτρου όπως φαίνεται στο σχήμα 3-10. Η συμπεριφορά είναι παρόμοια με αυτή της προηγούμενης περίπτωσης (συμπεριφορά δακτυλίου), μόνο που τώρα οι μεταβολές της τελικής διαμέτρου έχουν μικρότερο μέγεθος από αυτό της κεντρικής.

Όσο η μετατόπιση μεγαλώνει, η περιοχή υπό το φορτίο γίνεται επίπεδη με κάμψη των διατομών. Μετά από κάποιο σημείο η ενέργεια για την κάμψη των γενετειρών γίνεται σημαντική και κυρίως για τη γενέτειρα που βρίσκεται κάτω από τον διεισδυτή. Αυτό φαίνεται καθαρά στο σχήμα 3-10, όπου για μετατόπιση μεγαλύτερη από 0.25 ίντσες η καμπύλη αλλάζει κλίση και οι δύο γενέτειρες επιστρέφουν προς την αρχική τους θέση και αρχίζουν να παραμορφώνονται αντίθετα από την κεντρική διατομή.

Το στάδιο αυτό, για μέσου μήκους σωλήνες καλείται μεταβατικό γιατί οι δύο κύριοι μηχανισμοί παραμόρφωσης του σωλήνα (κάμψη των διατομών-κάμψη των γενετειρών) κάνουν έντονη την εμφάνιση τους. Στο αρχικό στάδιο της παραμόρφωσης η κάμψη των διαμέτρων είναι πιο σημαντική, ενώ στη συνέχεια καθώς η παραμόρφωση μεγαλώνει, ο μηχανισμός της κάμψης των γενετειρών γίνεται επικρατέστερος.

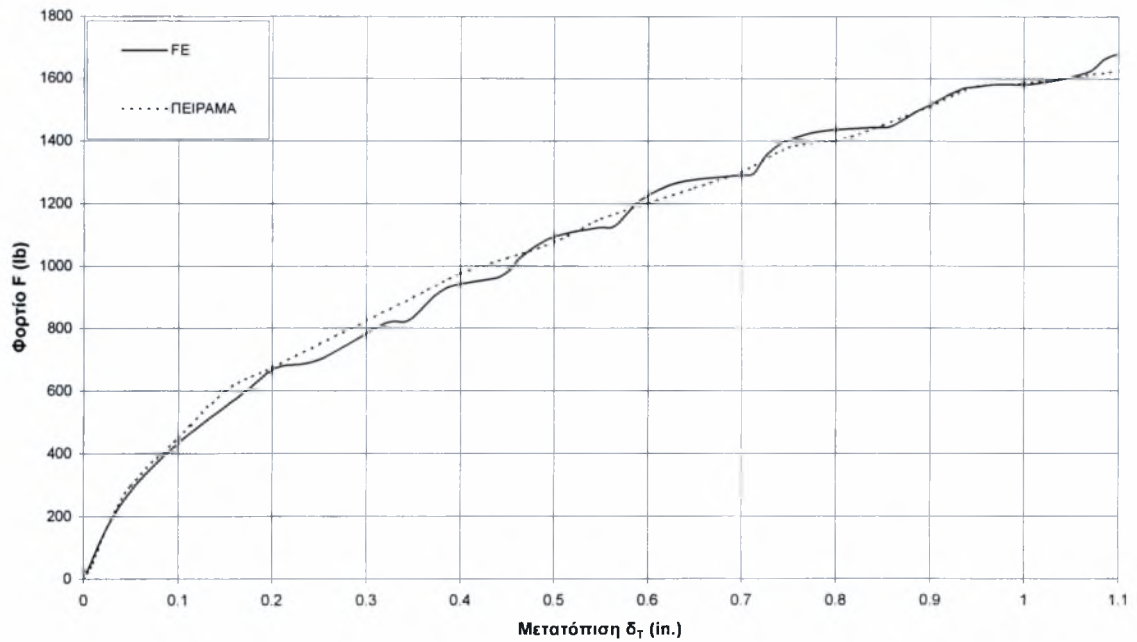
3.1.3 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ “ΟΒΑΛΟΠΟΙΗΣΗ” (“Reversing Ovality Mode”)

Για μέτρια έως μεγάλα μήκη η συμπεριφορά του σωλήνα χαρακτηρίζεται ως αντίστροφη “οβαλοποίηση”. Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα με πεπερασμένα στοιχεία για μήκη σωλήνων 12 in.(L=6D), 16 in.(L=8D) και 20 in.(L=10D).



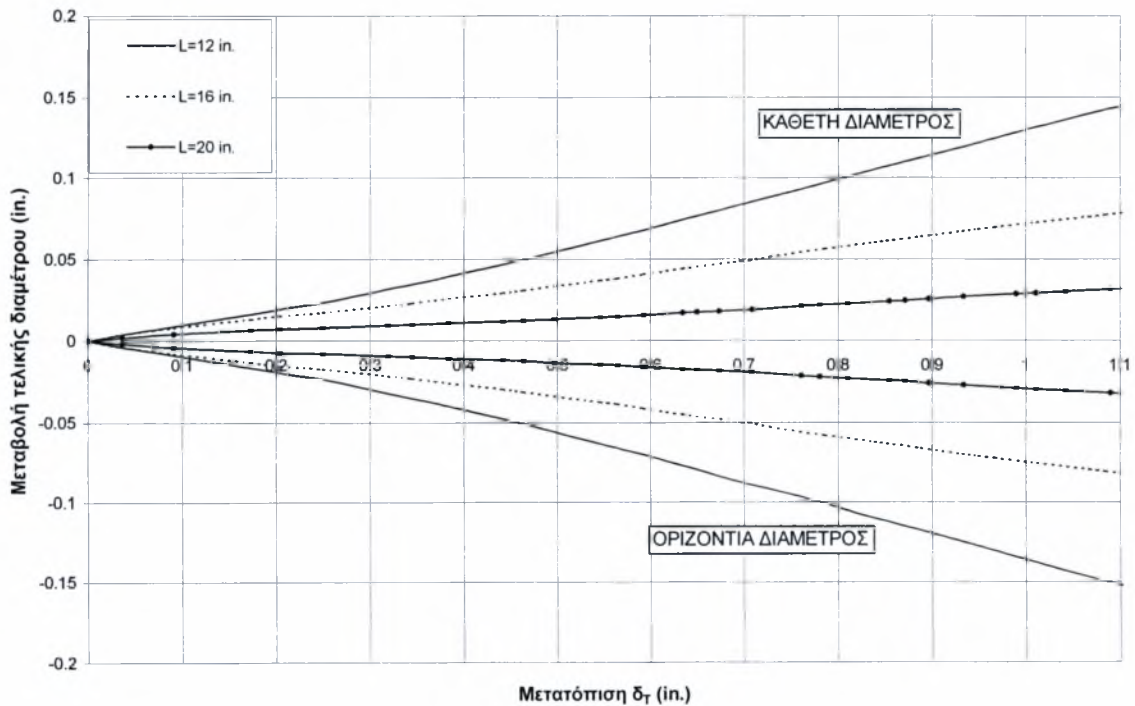
Σχήμα 3-11. Απόκριση για μέτρια έως μεγάλα μήκη.

Η σύγκριση με τα πειράματα είναι και πάλι πολύ καλή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-12 για το σωλήνα L=8D.



Σχήμα 3-12. Σύγκριση της πειραματικής λύσης με το Abaqus για μήκος σωλήνα $L=8D$.

Στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 3-13) παρουσιάζουμε για τα ίδια μήκη σωλήνων τη μεταβολή της τελικής διαμέτρου συναρτήσει της μετατόπισης του διεισδυτή.

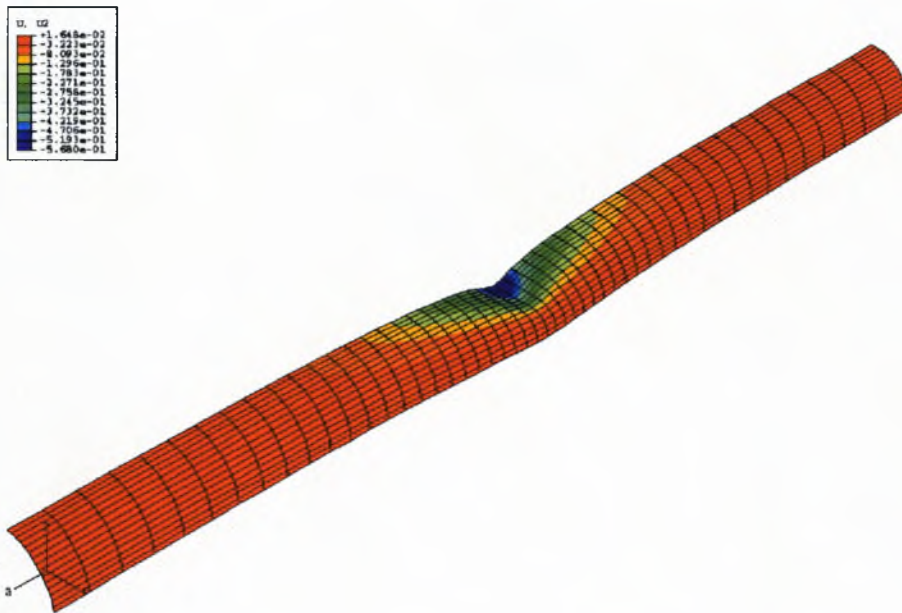


Σχήμα 3-13. Μεταβολή της τελικής διαμέτρου για μέτρια έως μεγάλα μήκη σωλήνων.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την ομάδα σωλήνων οι γενέτειρες της τελικής διαμέτρου παραμορφώνονται αντίθετα με την κεντρική διάμετρο από την αρχή της ανάλυσης (Σχήμα 3-13). Συμπεραίνουμε ότι ο επικρατέστερος μηχανισμός για αυτή την

Καθώς το μήκος αυξάνεται η μεταβολή της τελικής διαμέτρου μειώνεται και για πολύ μεγάλα μήκη είναι μηδενική. Από το δρόμο ισορροπίας (Σχήμα 3-11) βλέπουμε ότι η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας για τους τρεις προαναφερθέντες σωλήνες είναι πρακτικά η ίδια.



Σχήμα 3-14. Παραμορφωμένο πλέγμα για μήκος σωλήνα $L=10D$ ·κατανομή των μετατοπίσεων.

3.2 Επίδραση Συνοριακών Συνθηκών

Στη συνέχεια βασιζόμενοι στους σωλήνες που εξετάστηκαν στα προαναφερθέντα πειράματα [Watson et al., 1976] μελετούμε την επίδραση των συνοριακών συνθηκών για μέσα και μεγάλα μήκη. Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

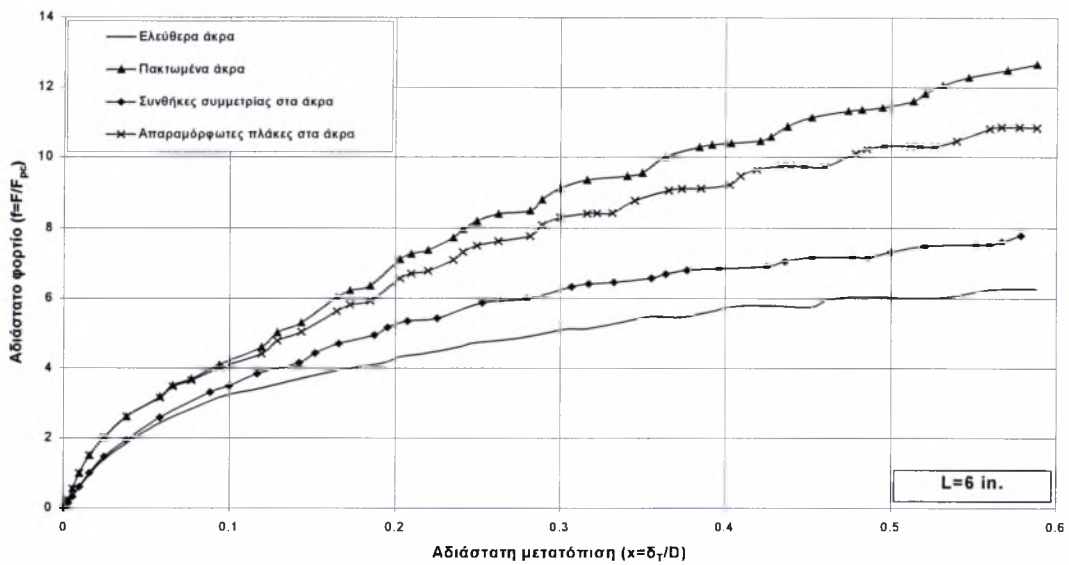
- Ελεύθερα άκρα (όλοι οι βαθμοί ελευθερίας χωρίς δέσμευση)
- Συνθήκες συμμετρίας ($u_3=\theta_1=\theta_2=0$)
- Πακτωμένα άκρα ($u_1=u_2=u_3=\theta_1=\theta_2=\theta_3=0$)
- Άκαμπτη πλάκα (καπάκι), προσαρμοσμένη σε κάθε άκρο, ελεύθερο να κινηθεί μόνο κατά την αξονική διεύθυνση ($u_1=u_2=\theta_1=\theta_2=\theta_3=0$)

όπου $u_{[j]}$ είναι οι μετατοπίσεις που περιορίζουμε και $\theta_{[j]}$ οι στροφές.

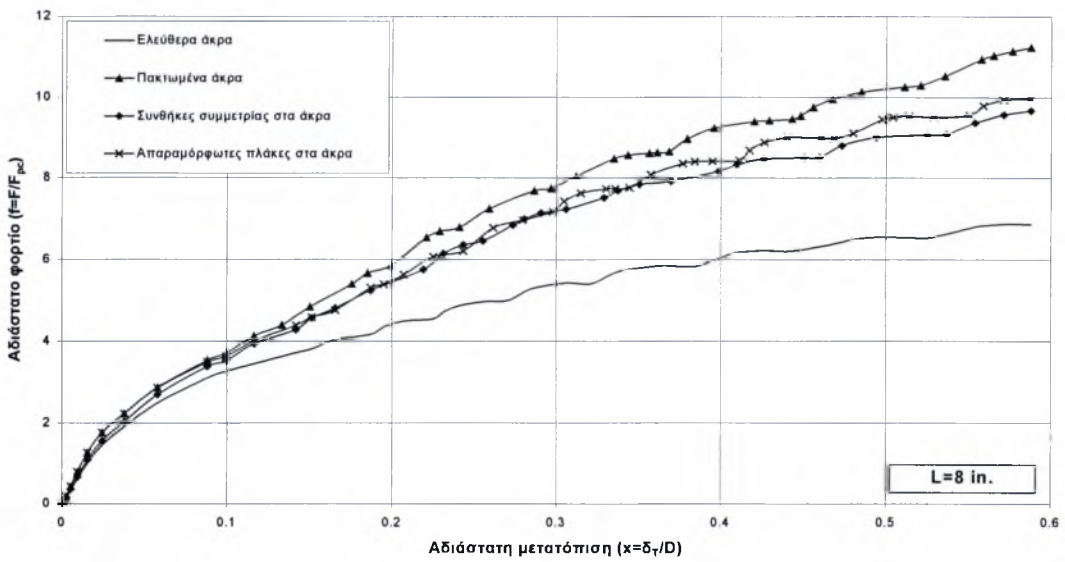
Για να προσομοιώσουμε το “καπάκι” στο Abaqus περιορίσαμε όλους τους κόμβους στα άκρα, έτσι ώστε να κινούνται σύμφωνα με ένα κόμβο τον οποίο φτιάξαμε και σε αυτόν επιβάλαμε τις άνω οριακές συνθήκες. Αυτό έγινε με την εντολή “kinematic coupling”.

Στα επόμενα διαγράμματα παραθέτουμε σύγκριση του δρόμου ισορροπίας για μήκη σωλήνων 6 και 8 ιντσών (μεταβατική συμπεριφορά για ελεύθερα άκρα) και 12 και 20 ιντσών (αντίστροφη “οβαλοποίηση” για ελεύθερα άκρα). Η μετατόπιση παρουσιάζεται αδιάστατη διαιρώντας με τη μέση διάμετρο D ($x=\delta_T/D$) και το φορτίο

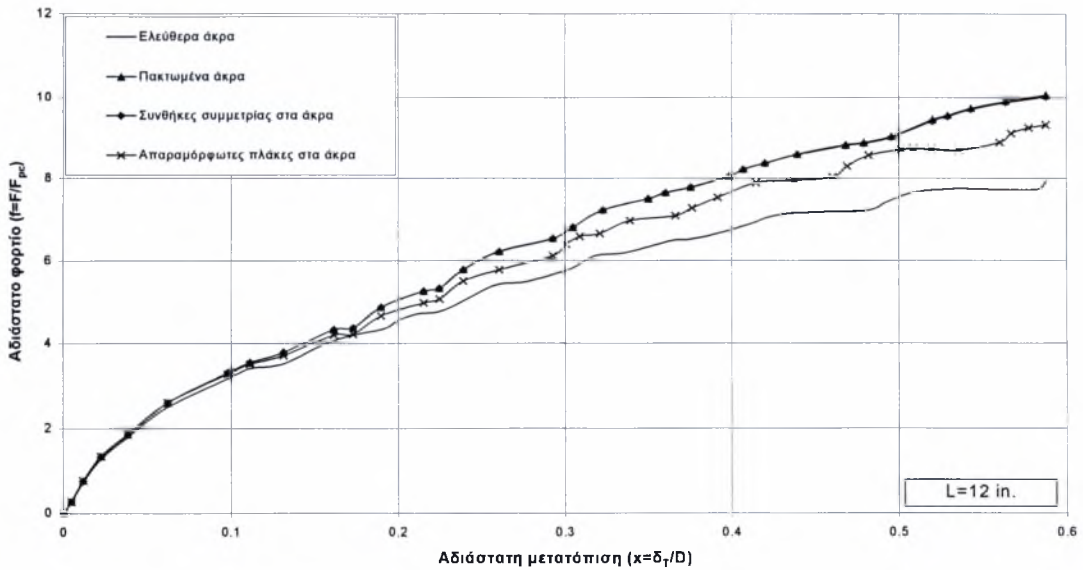
F διαιρείται με $F_{pc} = M_p \sqrt{\frac{D}{t}}$ ($f=F/F_{pc}$). Ως δ_T θεωρήσαμε τη συνολική μετατόπιση του διεισδυτή ($\delta_T=2\delta$).



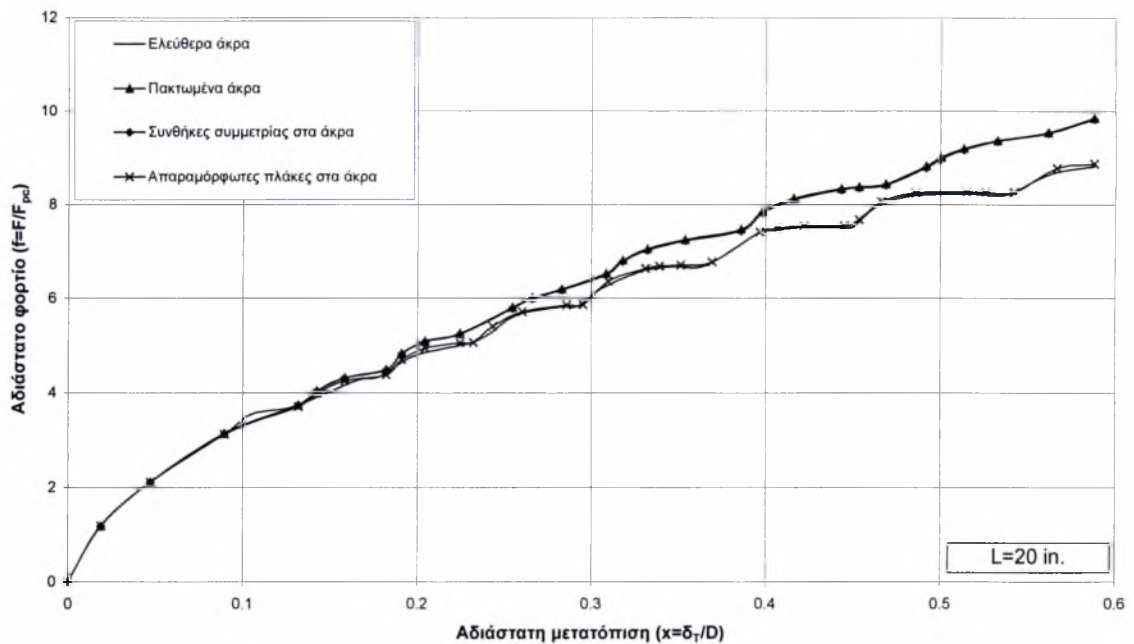
Σχήμα 3-15. Απόκριση σωλήνα 6 ιντσών ($L=3D$) για διάφορες συνοριακές συνθήκες.



Σχήμα 3-16. Απόκριση σωλήνα 8 ιντσών ($L=4D$) για διάφορες συνοριακές συνθήκες.



Σχήμα 3-17. Απόκριση σωλήνα 12 ιντσών ($L=6D$) για διάφορες συνοριακές συνθήκες.

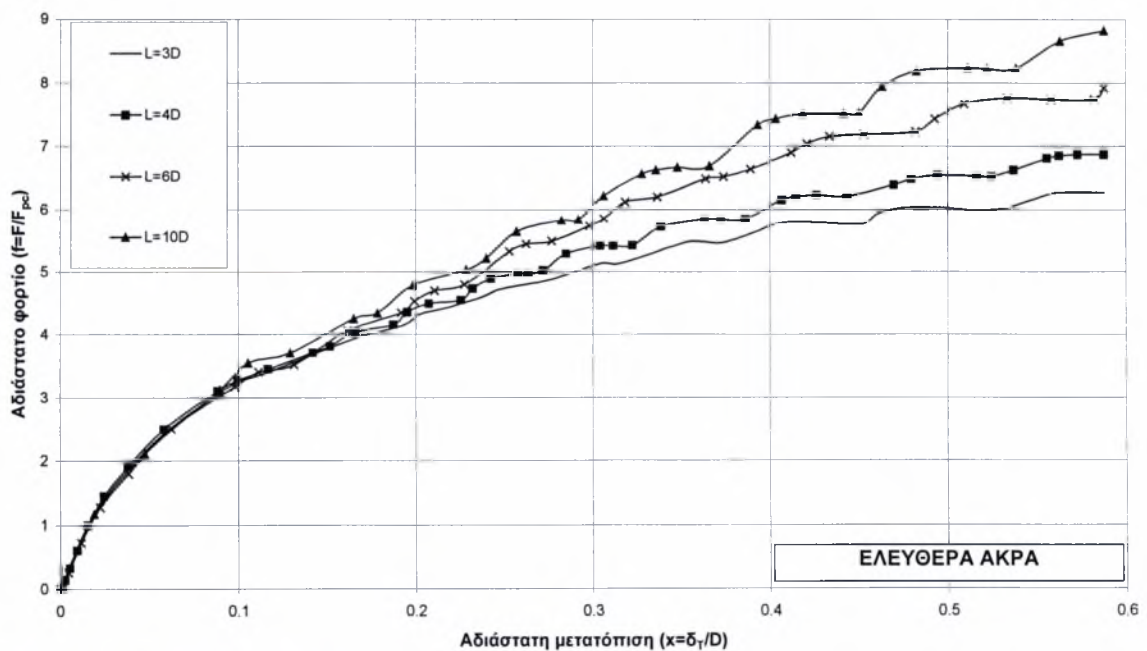


Σχήμα 3-18. Απόκριση σωλήνα 20 ιντσών ($L=10D$) για διάφορες συνοριακές συνθήκες

ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.2.1 ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΑΚΡΑ

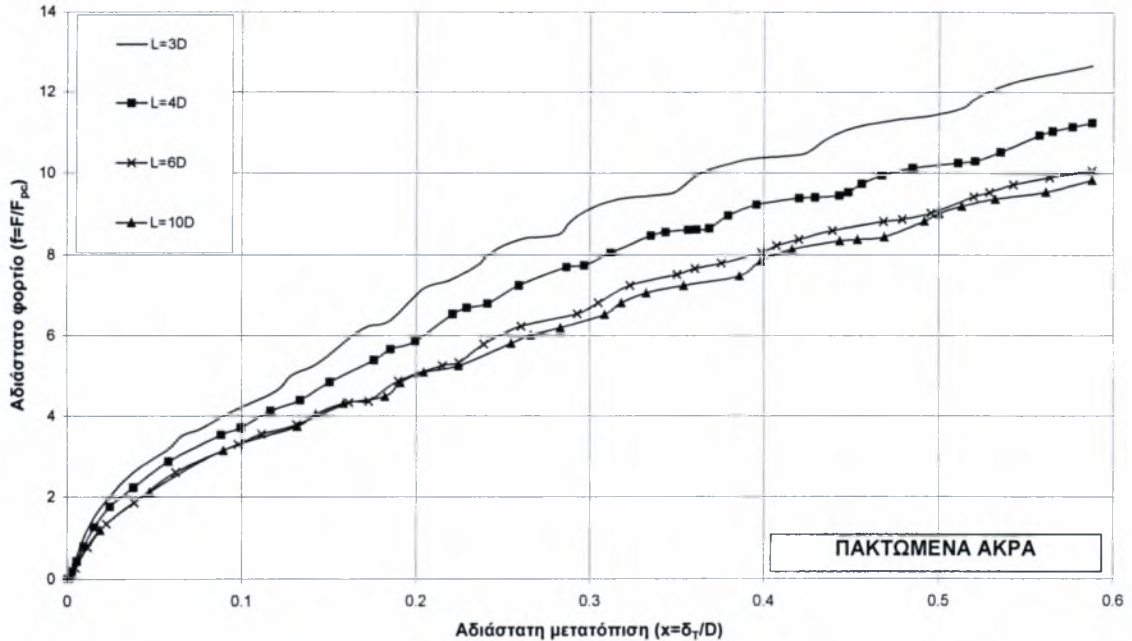
Από τα ανωτέρω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι για την περίπτωση όπου έχουμε ελεύθερα τα άκρα, το απαιτούμενο φορτίο για την ίδια μετατόπιση αυξάνεται με σχεδόν ανάλογο τρόπο καθώς αυξάνεται το μήκος. Επίσης, τα φορτία που απαιτούνται για παραμόρφωση με ελεύθερα άκρα είναι τα μικρότερα σε σχέση με τις λοιπές συνοριακές συνθήκες αφού τα άκρα του σωλήνα δεν προβάλλουν ουσιαστικά καμία αντίσταση.



Σχήμα 3-19. Σύγκριση για διάφορα μήκη σωλήνα με ελεύθερα άκρα

3.2.2 ΠΑΚΤΩΜΕΝΑ ΑΚΡΑ

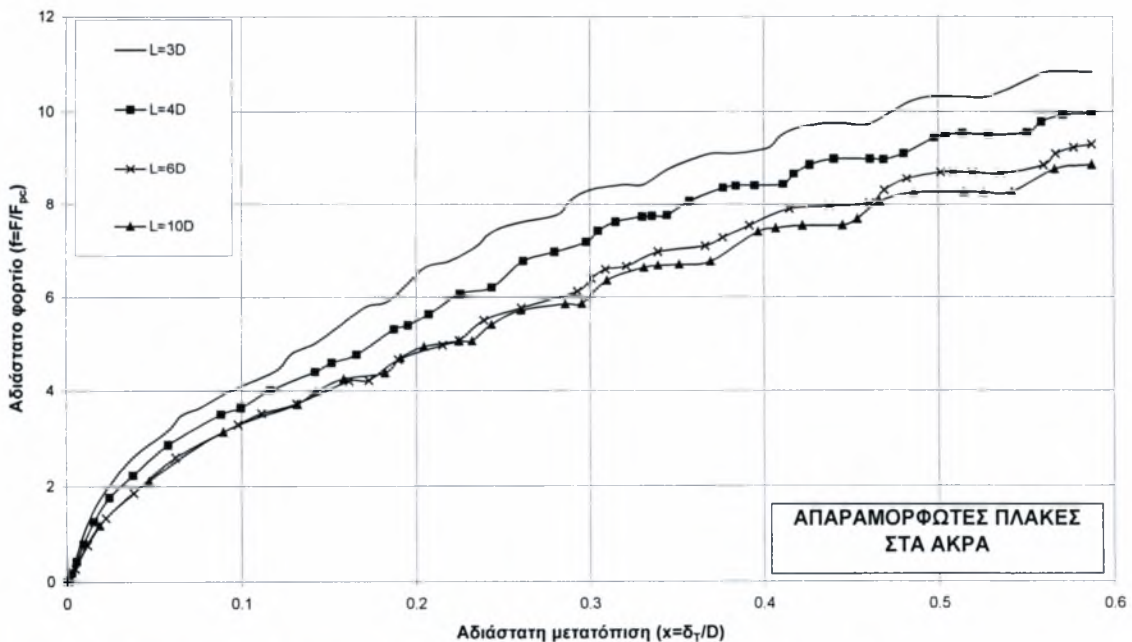
Στην περίπτωση όπου έχουμε πακτώσει τα άκρα του σωλήνα το φαινόμενο της διείδυσης είναι διαφορετικό. Για τις 6 ίντσες έχουμε τη μεγαλύτερη αντίσταση από τα άκρα που προκαλεί αντίστοιχα και το μεγαλύτερο φορτίο. Καθώς όμως το μήκος μεγαλώνει, η επίδραση των συνοριακών συνθηκών δεν είναι πλέον τόσο έντονη και για τα μήκη των 12 και 20 ιντσών έχουν ουσιαστικά την ίδια επίδραση, η οποία μάλιστα δεν διαφέρει σημαντικά από αυτή του ελεύθερου άκρου.



Σχήμα 3-20. Σύγκριση για διάφορα μήκη σωλήνα με πακτωμένα άκρα.

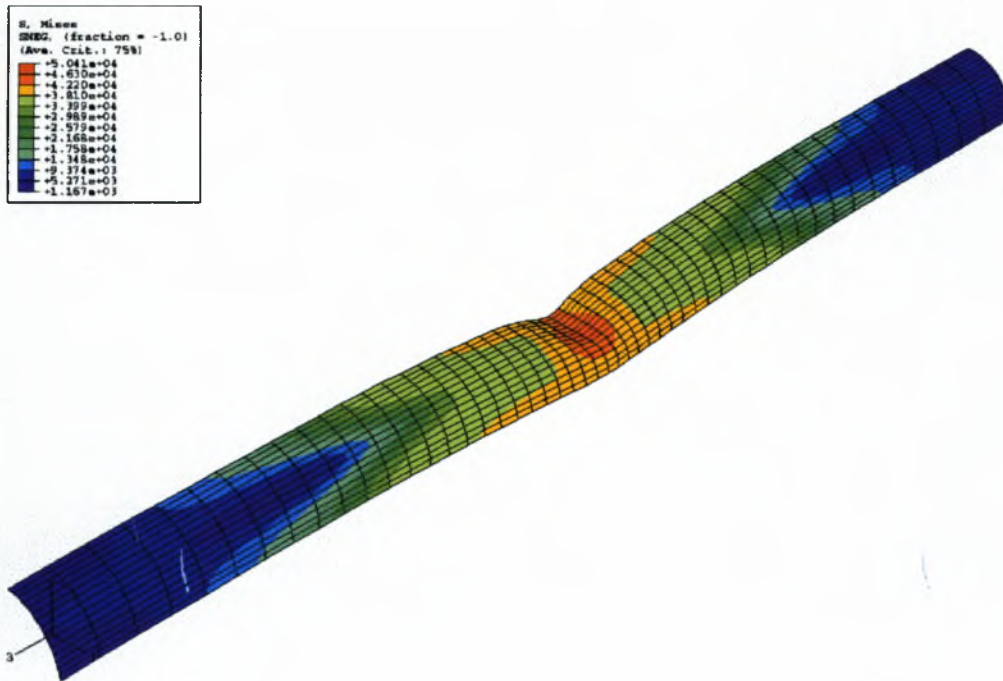
3.2.3 ΑΠΑΡΑΜΟΡΦΩΤΕΣ ΠΛΑΚΕΣ (“ΚΑΠΑΚΙΑ”) ΣΤΑ ΑΚΡΑ

Στην περίπτωση αυτή η συμπεριφορά για τις διάφορες συνοριακές συνθήκες είναι παρόμοια με αυτή που έχουμε για πακτωμένα άκρα.



Σχήμα 3-21. Σύγκριση για διάφορα μήκη σωλήνα με απαραμόρφωτες πλάκες στα άκρα.

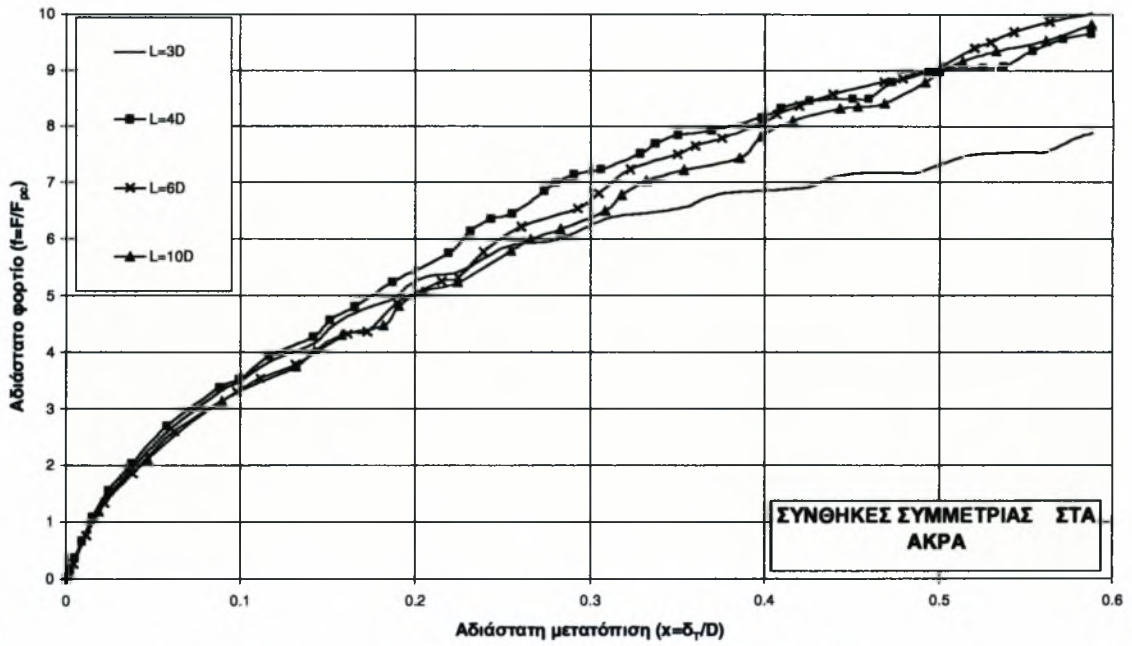
Στις 6 ίντσες παρουσιάζεται η μεγαλύτερη αντίδραση και στη συνέχεια αυτή μειώνεται, ενώ για 12 και 20 ίντσες η συνεισφορά των συνοριακών συνθηκών είναι περίπου η ίδια. Η διαφορά του φορτίου μεταξύ των πακτωμένων άκρων και των άκρων με καπάκια για την ίδια μετατόπιση είναι περίπου σταθερή όπως μπορεί να παρατηρήσει κάποιος από τα παραπάνω διαγράμματα για τα τέσσερα μήκη. Αυτή η διαφορά έγκειται στην ελευθερία κίνησης κατά τον άξονα 3 (διαμήκης άξονας του σωλήνα) την οποία επιτρέπουν οι συνοριακές συνθήκες.



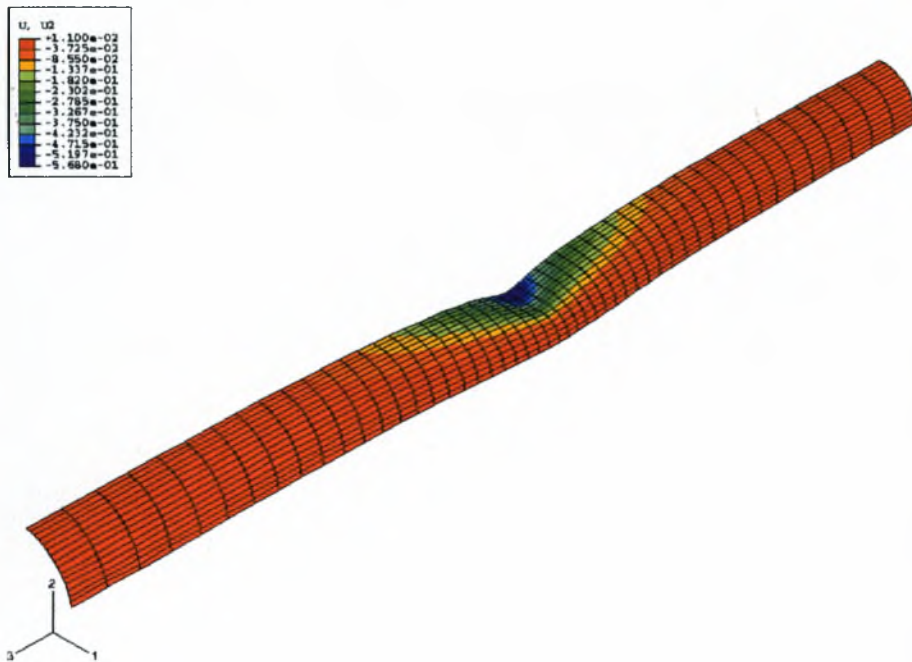
Σχήμα 3-22. Κατανομή των τάσεων κατά “Von Mises” για μήκος σωλήνα $L=10D$ · απαμορφωμένες πλάκες στα άκρα ($x=0.59$)

3.2.4 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΑ ΑΚΡΑ

Σε αυτή την περίπτωση οι τελικές διαμέτροι μπορούν να παραμορφωθούν στο επίπεδο τους, αλλά δεν επιτρέπεται η στρέβλωση. Ο σωλήνας των 6 ιντσών που ανήκει στην κατηγορία “αντίστροφης οβαλοποίησης” (σύμφωνα με τη θεώρηση για τα ελεύθερα άκρα) έχει έντονη τάση να κινηθεί στην κατακόρυφη διεύθυνση. Αυτή η κίνηση επιτρέπεται από τις παρούσες συνοριακές συνθήκες γι’ αυτό και η απαιτούμενη δύναμη διεύθυνσης είναι σχετικά μικρή και κοντινή προς την απόκριση του ελεύθερου άκρου. Για μεγαλύτερους σωλήνες όμως, η κάμψη των γενετειρών γίνεται πιο έντονη και η αντίδραση των συνθηκών είναι εμφανής στην αξονική διεύθυνση 3. Για τα κυλινδρικά κελύφη των 8, 12 και 20 ιντσών η συμπεριφορά των συνοριακών συνθηκών είναι περίπου η ίδια. Για τις 12 και 20 ίντσες συγκεκριμένα η συμπεριφορά με πακτωμένα άκρα και συνθήκες συμμετρίας είναι πανομοιότυπη και το κυρίαρχο φαινόμενο είναι η κάμψη των γενετειρών.



Σχήμα 3-23. Σύγκριση για διάφορα μήκη σωλήνα με συνθήκες συμμετρίας στα άκρα.



Σχήμα 3-24. Κατανομή των μετατοπίσεων κατά την διεύθυνση 2 για σωλήνα μήκους $L=10D$ · συνοριακές συνθήκες συμμετρίας. ($x=0.59$)

3.3 Επίδραση Της Πίεσης

Για να εξετάσουμε την επίδραση της πίεσης αναλύσαμε τους σωλήνες με μεγάλα σχετικά μήκη, δηλαδή το κέλυφος των 12 ιντσών ($L=6D$) και το κέλυφος των 20 ιντσών ($L=10D$). Η ανάλυση έγινε για συνοριακές συνθήκες συμμετρίας και για την περίπτωση όπου έχουμε απαραμόρφωτες πλάκες (“καπάκια”) στα άκρα. Αρχικά επιβάλλαμε πίεση (“step-1”) και στη συνέχεια διατηρώντας αυτή σταθερή, προχωρήσαμε στη διείδυση του “μαχαιριού” (“step-2). Για σχετικώς μικρές τιμές της πίεσης (λιγότερο από 30 % της κρίσιμης ελαστικής πίεσης) ο δρόμος ισορροπίας ξεπερνά ένα οριακό σημείο ακολουθούμενο από ασταθή συμπεριφορά και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του σωλήνα μειώνεται πάρα πολύ. Πριν όμως περάσουμε στα αποτελέσματα διείδυσης υπό πίεσης κρίνουμε σκόπιμη την παρουσίαση κάποιων αποτελεσμάτων για φόρτιση του κελύφους υπό την επίδραση της πίεσης και μόνο (pure pressure loading).

3.3.1 ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Για απειρομήκες λεπτότοιχο σωλήνα η σχέση που μας δίνει την ελαστική πίεση αστάθειας (λυγισμού) είναι:

$$p_e = \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{D} \right)^3 \quad (3.2)$$

και στην περίπτωση μας προκύπτει $p_e=813$ psi. Εάν ο σωλήνας είναι πιο παχύς δεν θα έχουμε το φαινόμενο του λυγισμού, αλλά μετά από κάποια πίεση θα περάσουμε το όριο διαρροής και θα πλαστικοποιηθεί. Η σχέση που δίνει την πίεση κατάρρευσης λόγω πλαστικοποίησης είναι:

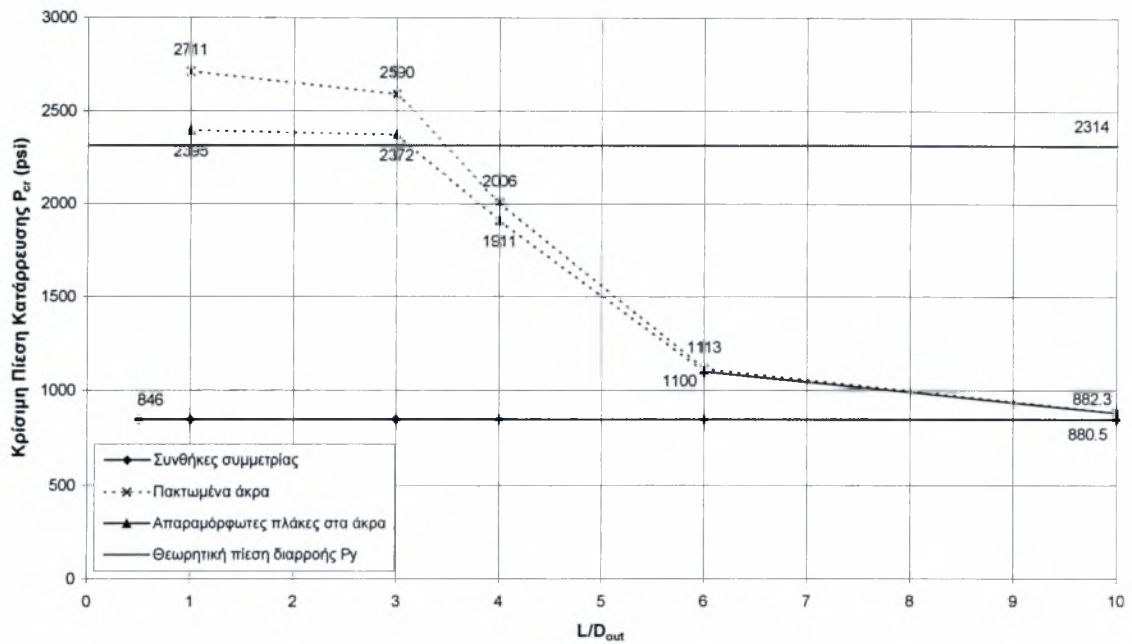
$$p_y = 2\sigma_y \frac{t}{D} \quad (3.3)$$

και προκύπτει $p_y=2314$ psi. Από τις δύο τιμές βλέπουμε ότι η πιο επικίνδυνη περίπτωση για το συγκεκριμένο κέλυφος είναι αυτή του λυγισμού. Για να προσεγγίσουμε ακριβέστερα αυτές τις τιμές προχωρήσαμε προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία για τον ακριβή υπολογισμό της πίεσης.

ΠΙΕΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ

Για τους σωλήνες οι οποίοι εξετάστηκαν στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου ($D \leq L \leq 10D$) έγινε ανάλυση για να υπολογίσουμε την κρίσιμη πίεση κατάρρευσης, τη μέγιστη πίεση δηλαδή, που παραλαμβάνει ο σωλήνας μετά την οποία δημιουργείται αστάθεια. Χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο μήκους τόξου κατά Riks, ενώ υποχρεώσαμε την ανάλυση να προχωρήσει με πολύ μικρά βήματα για της σωστή εκτίμηση της κρίσιμης πίεσης.

Προτού εφαρμόσουμε την πίεση επιβάλλαμε μία πολύ μικρή ατέλεια στο κέλυφος για να προσδιορίσουμε το οριακό φορτίο. Σε μία πραγματική κατασκευή το υλικό και η γεωμετρία δεν είναι ποτέ τέλεια, οπότε είναι σίγουρο ότι ο δρόμος ισορροπίας θα ακολουθήσει τον μεταλυγισμικό δρόμο ισορροπίας. Τα αποτελέσματα που πήραμε για τις διάφορες συνοριακές συνθήκες παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 3-24).

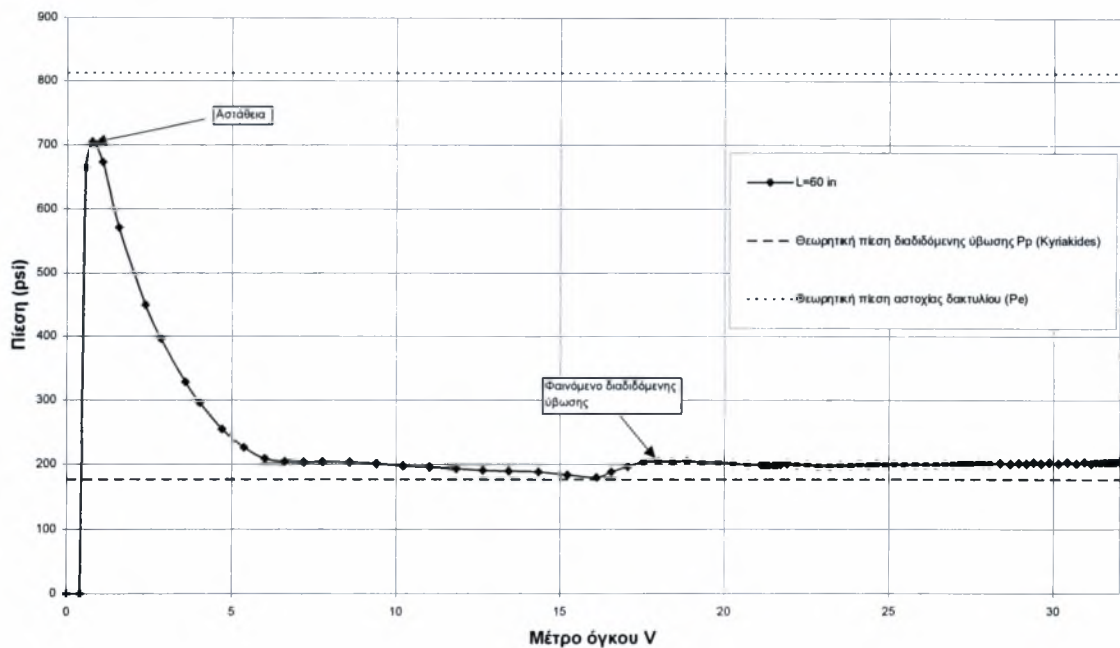


Σχήμα 3-25. Κρίσιμη πίεση κατάρρευσης συναρτήσει του μήκους για διάφορες συνοριακές συνθήκες.

Παρατηρούμε από το σχήμα ότι για πακτωμένα άκρα έχουμε τη μεγαλύτερη κρίσιμη πίεση για το εκάστοτε μήκος. Αυτό είναι λογικό εφόσον αυτού του τύπου οι συνοριακές συνθήκες προβάλλουν τη μεγαλύτερη αντίσταση σε κατάρρευση. Λίγο χαμηλότερες τιμές παρουσιάζουν οι συνοριακές συνθήκες με απαραμόρφωτες πλάκες στα άκρα, οι οποίες επιτρέπουν την κίνηση στην κατεύθυνση 3 αλλά όχι τη παραμόρφωση (στρέβλωση) των ακραίων διατομών. Και για τις δύο προαναφερθείσες συνθήκες με αύξηση του μήκους μειώνεται το κρίσιμο φορτίο γιατί η επίδραση τους σταδιακά ελαττώνεται. Για την περίπτωση όπου έχουμε συνθήκες συμμετρίας το κρίσιμο φορτίο μετρήθηκε στα 846 psi για όλες τις περιπτώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διατομές στα άκρα παραμορφώνονται ελεύθερα, και κάθε διατομή παραμορφώνεται με τον ίδιο τρόπο.

ΠΙΕΣΗ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ

Η επίδραση της πίεσης στα κυλινδρικά κελύφη είναι ένα πολύ επικίνδυνο και περίπλοκο φαινόμενο. Έχει παρατηρηθεί ότι σε σωλήνες μεγάλου μήκους, η πίεση είναι δυνατόν να προκαλέσει όχι μόνο τοπική καταστροφή, αλλά και αστοχία ολόκληρου του σωλήνα. Θεωρώντας ένα σωλήνα μήκους 60 ιντσών ($L/D=30$) με μία μικρή ατέλεια στο μέσο παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που πήραμε από την ανάλυση με το Abaqus (Σχήμα 3-25). Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν συνοριακές συνθήκες συμμετρίας έτσι ώστε να παραμορφώνεται ελεύθερα η τελική διατομή.



Σχήμα 3-26. Πίεση διαδιδόμενης ύβωσης για σωλήνα μεγάλου μήκους ($L=30D$) με συνθήκες συμμετρίας στα άκρα.

Στο σχήμα παρουσιάζεται η πίεση συναρτήσει του μέτρου όγκου. Επειδή κατά την ανάλυση δεν ήταν δυνατό να μετρήσουμε την πραγματική μείωση που υφίσταται ο όγκος κατά την παραμόρφωση ορίσαμε ως μέτρο όγκου μία ποσότητα που συνδέεται άμεσα με αυτόν και αυξάνεται μονοτονικά. Μετρήσαμε σε κάθε βήμα την κατακόρυφη μετατόπιση (u_2) για δέκα συγκεκριμένους κόμβους της άνω γενέτειρας και ορίσαμε μία ποσότητα V που εκφράζει μια ποσότητα όγκου για το σωλήνα σύμφωνα με τη σχέση:

$$V = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N u_{2,i}^2}}{N} DL, \text{ όπου } N=10, u_2 \text{ είναι η μετατόπιση κατά την κατακόρυφη}$$

διεύθυνση, D η μέση διάμετρος και L το μήκος του σωλήνα.

Αρχικά η πίεση αυξάνεται και για τιμή 705 psi παρουσιάζεται τοπική αστάθεια. Στο σημείο όπου έχουμε επιβάλει την ατέλεια δημιουργείται φαινόμενο ανάλογο του λυγισμού και εν συνεχεία το κέλυφος παραμορφώνεται απαιτώντας μικρότερες τιμές της πίεσης. Για μέτρο όγκου περίπου 16 έχουμε επαφή της άνω και της κάτω γενέτειρας στο σημείο της ατέλειας. Μετά από αυτό το σημείο και ενώ η πίεση σταθεροποιείται στα 201 psi το φαινόμενο διαδίδεται κατά μήκος του σωλήνα με αποτέλεσμα την πλήρη αστοχία αυτού, μέχρι να συναντήσει κάποια συνοριακή συνθήκη όπου και σταματά. Η τιμή αυτή της πίεσης για την οποία παρουσιάζεται αυτό το φαινόμενο αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως πίεση διαδιδόμενης ύβωσης (“propagation pressure”).

Η πίεση αυτή έχει εκτιμηθεί αναλυτικά σύμφωνα με τη σχέση:

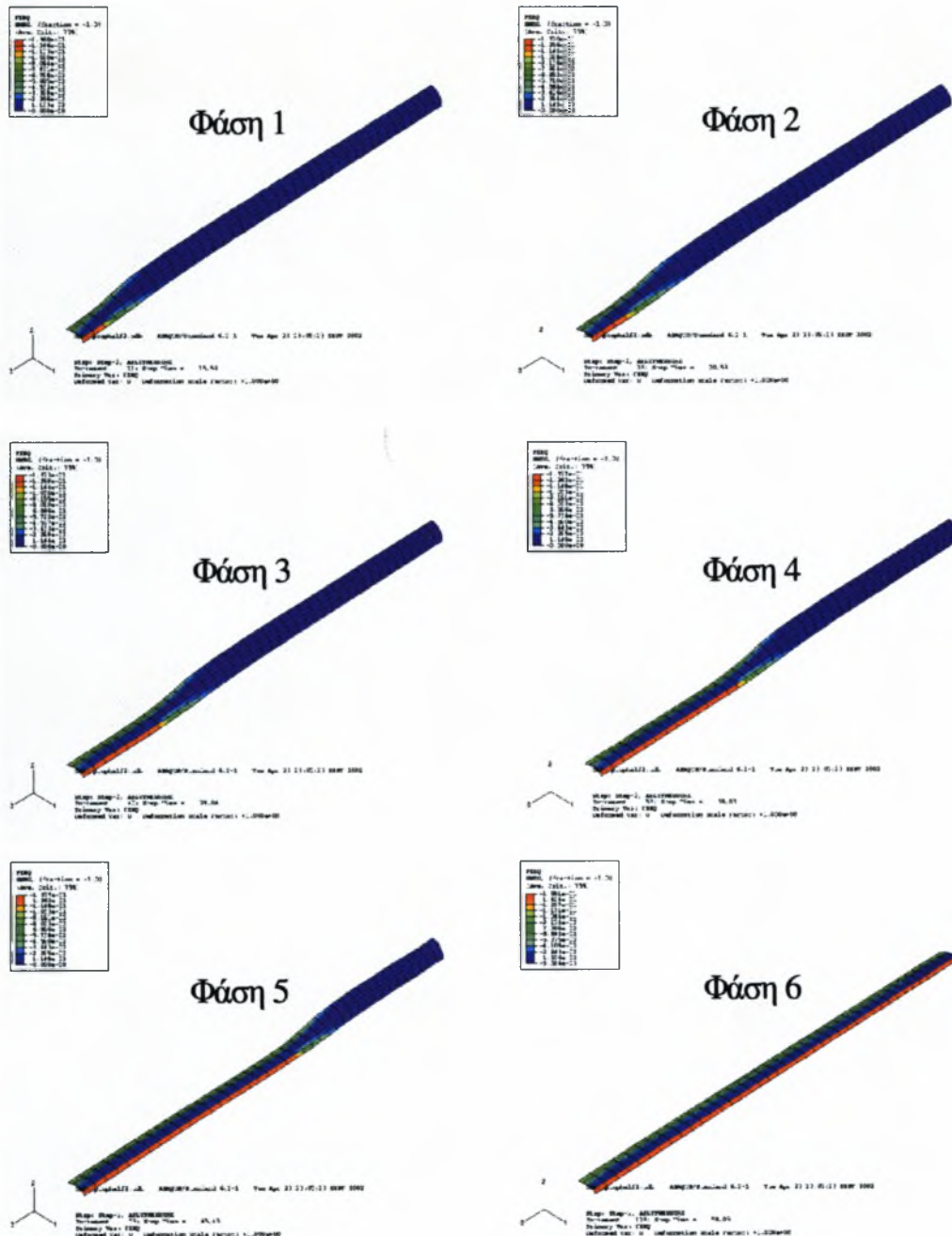
$$p_p = \pi \sigma_y \left(\frac{t}{D} \right)^2 \quad (3.4)$$

σύμφωνα με τους Palmer & Martin (1975). Στην περίπτωση μας προκύπτει τιμή πίεσης διαδιδόμενης ύβωσης $p_p=120.2$ psi, τιμή αρκετά χαμηλότερη από αυτή που βρήκαμε με την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων. Αργότερα ο Kyriakides (1982) πρότεινε τη σχέση:

$$p_p = \left[10.7 + 0.54 \left(\frac{E'}{\sigma_y} \right) \right] \sigma_y \left(\frac{t}{D} \right)^{2.25} \quad (3.5)$$

για την οποία είχε πολύ καλή προσαρμογή στα πειράματα που διεξήγαγε. Για τη σχέση αυτή προκύπτει $p_p=176.7$ psi που είναι αρκετά κοντά στην τιμή που υπολογίσαμε (201 psi).

Μετά από αυτή την ανάλυση για τα αποτελέσματα μόνο υπό την επίδραση της πίεσης μπορούμε να περάσουμε στην παρουσίαση και την αιτιολόγηση των αποτελεσμάτων όπου πρώτα επιβάλαμε πίεση, σε συνδυασμό με εγκάρσιο φορτίο.



Σχήμα 3-27. Εξέλιξη του φαινομένου της διαδιδόμενης ύβωσης έως την τελική αστοχία ολόκληρου του σωλήνα. (Ως μεταβλητή παρουσιάζεται η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση)

3.3.2 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Περνάμε τώρα στα αποτελέσματα της κύριας ανάλυσης που κάναμε, όπου εφαρμόσαμε πίεση (“step-1”) και στη συνέχεια διατηρώντας αυτή σταθερή επιβάλλαμε το φορτίο (“step-2”).

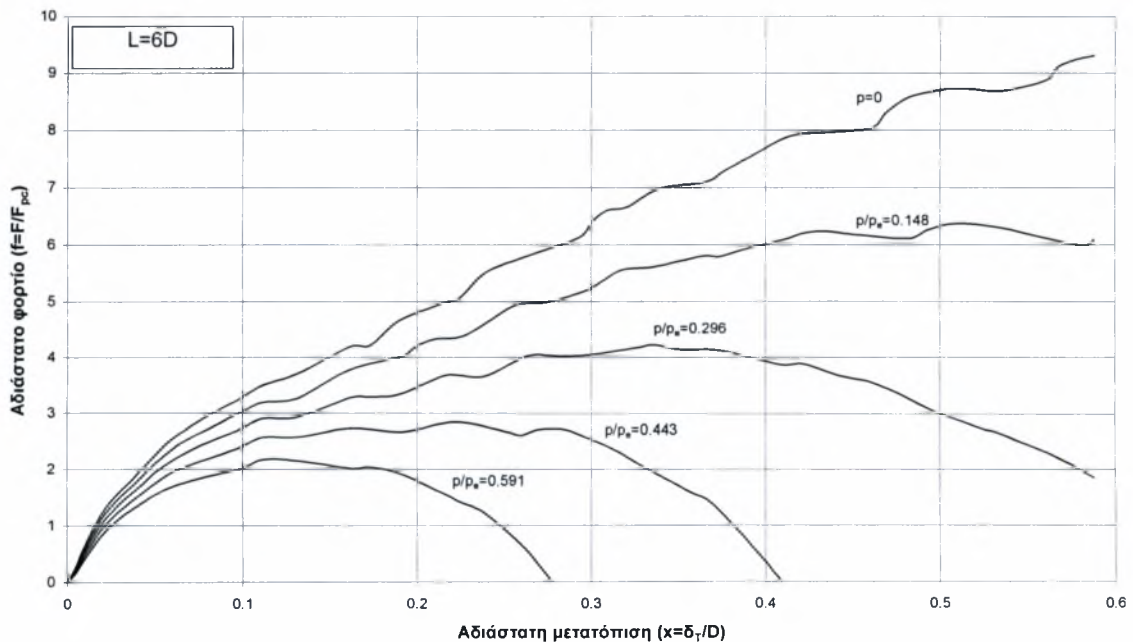
ΑΠΑΡΑΜΟΡΦΩΤΕΣ ΠΛΑΚΕΣ (“ΚΑΠΑΚΙΑ”) ΣΤΑ ΑΚΡΑ

Αρχικά αναλύουμε την περίπτωση όπου έχουμε δύο απαραμόρφωτες πλάκες στις ακραίες διατομές. Οι τιμές της πίεσης που επιβάλλαμε είναι οι εξής:

Πίνακας 3-1. Τιμές της πίεσης που αναλύθηκαν για την περίπτωση με τις δύο απαραμόρφωτες πλάκες

Απόλυτη τιμή p (psi)	p/p_e	p/p_{cr} ($L/D=6$)	p/p_{cr} ($L/D=10$)
0	0	0	0
120	0.148	0.109	0.136
240	0.296	0.218	0.273
360	0.443	0.327	0.409
480	0.591	0.436	0.545

Στον παραπάνω πίνακα p_e είναι η κρίσιμη ελαστική πίεση λυγισμού που υπολογίστηκε ($p_e=813$ psi) και p_{cr} είναι οι κρίσιμες τιμές που υπολογίσαμε με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και παρουσιάζονται στο σχήμα 3-24. Τα αποτελέσματα που πήραμε για τις δύο περιπτώσεις ($L=6D$ και $L=10D$) φαίνονται στα σχήματα που ακολουθούν.

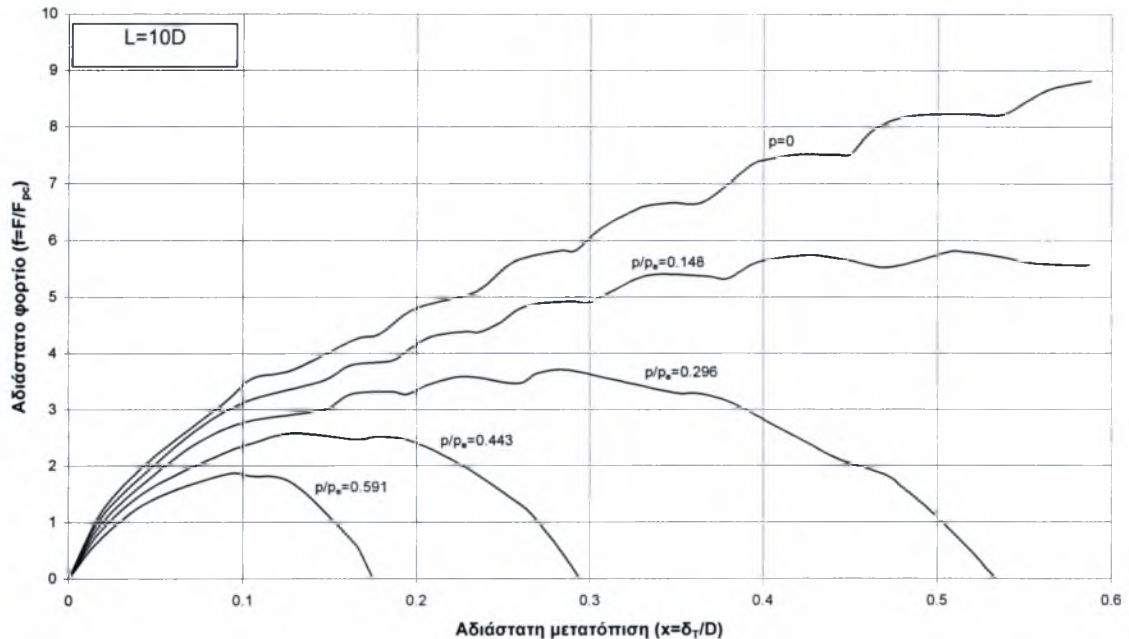


Σχήμα 3-28. Επίδραση της πίεσης για σωλήνα μήκους $L=6D$ με απαραμόρφωτες πλάκες στα άκρα.

Από το σχήμα βλέπουμε ότι για περίπου 22% της πίεσης αστοχίας ($\sim 30\%$ του p_e) παρουσιάζεται μέγιστο φορτίο $f=4.22$ ($F=416$ lb.) και στη συνέχεια παρουσιάζεται τοπική αστάθεια στο σημείο εφαρμογής του φορτίου. Ταυτόχρονα παρουσιάζεται σημαντική μείωση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας λόγω παραμόρφωσης του

σωλήνα. Η τιμή αυτή είναι πολύ χαμηλότερη από την κρίσιμη ελαστική πίεση και την κρίσιμη πίεση κατάρρευσης ($p/p_{cr}=0.218$), ωστόσο ο σωλήνας δε μπορεί να αντισταθεί σε σχετικά μεγάλα εξωτερικά φορτία. Λόγω της φόρτισης, η γεωμετρία του σωλήνα παραμορφώνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε μετά από κάποιο σημείο ($x \approx 0.35$) η επίδραση έστω και για σχετικά μικρή τιμή της πίεσης να συντελεί στην απότομη αστοχία του κελύφους. Επίσης, με περαιτέρω αύξηση της πίεσης βλέπουμε ότι η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας μειώνεται ραγδαία.

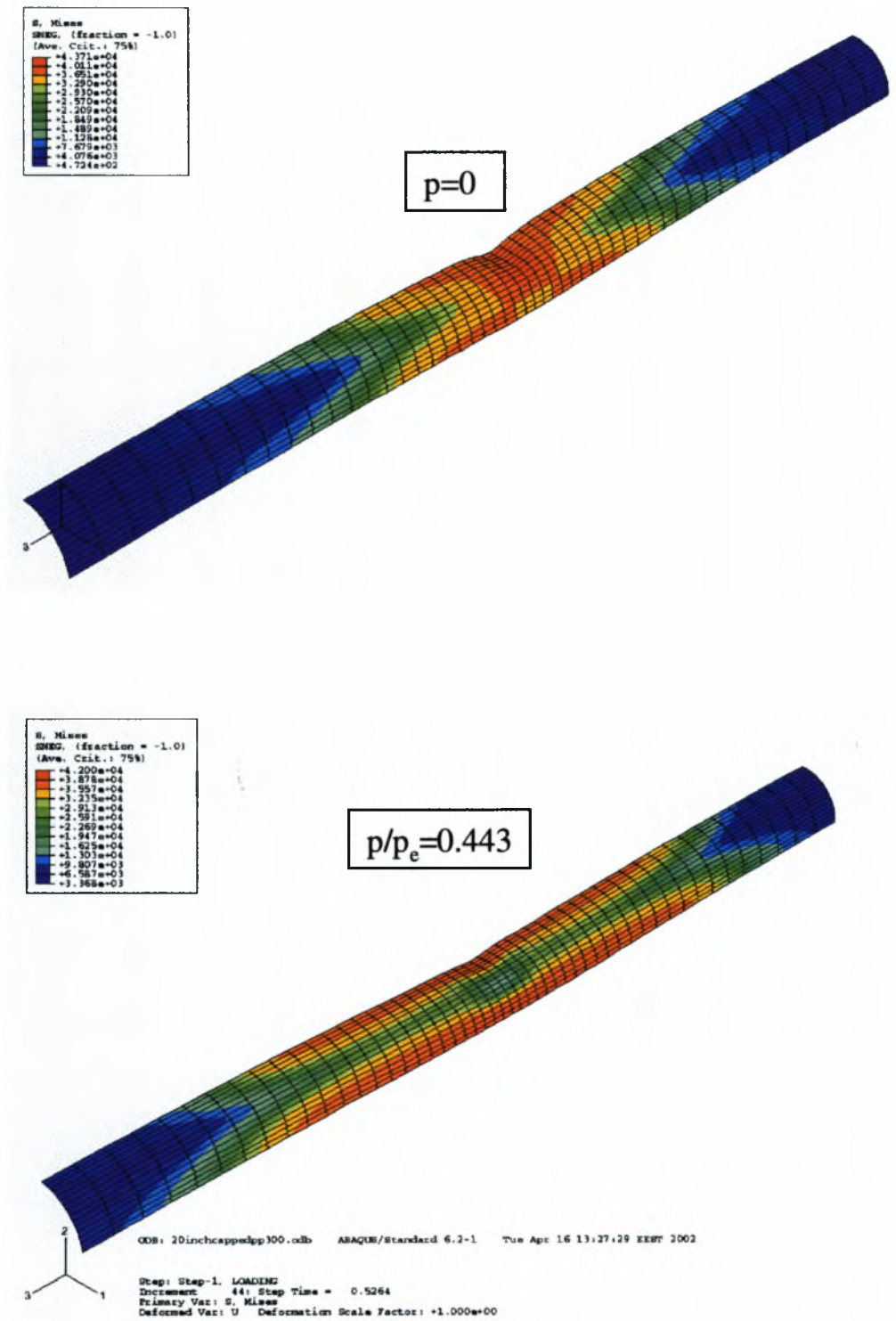
Παρακάτω παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που πήραμε για τις ίδιες οριακές συνθήκες, για ένα μεγαλύτερο σωλήνα ($L=10D$).



Σχήμα 3-29. Επίδραση της πίεσης για σωλήνα μήκους $L=10D$ με απαραμόρφωτες πλάκες στα άκρα.

Τα αποτελέσματα για αυτή την ανάλυση είναι παρόμοια με αυτά που παρουσιάστηκαν στο σχήμα 3-28. Η επίδραση της πίεσης είναι η ίδια, αλλά η απόσταση από τις συνοριακές συνθήκες είναι μεγαλύτερη και γι' αυτό έχουμε μείωση της συνολικής ενέργειας που μπορεί το κέλυφος να απορροφήσει.

Η επίδραση της πίεσης φαίνεται πιο παραστατικά στην επόμενη εικόνα (Σχήμα 3-30) όπου παρουσιάζουμε την κατανομή των τάσεων κατά Von Mises στην παραμορφωμένη κατάσταση για αδιάστατη μετατόπιση $x=0.3$. Η σύγκριση γίνεται ανάμεσα στο σωλήνα $L=10D$ για μηδενική πίεση και πίεση $p/p_e=0.443$.



Σχήμα 3-30. Κατανομή των τάσεων “Von Mises”. Σύγκριση για μηδενική πίεση και $p/p_e=0.449$ για μήκος σωλήνα $L=10D$. (Μετατόπιση $x=0.3$ και για τις δύο περιπτώσεις)

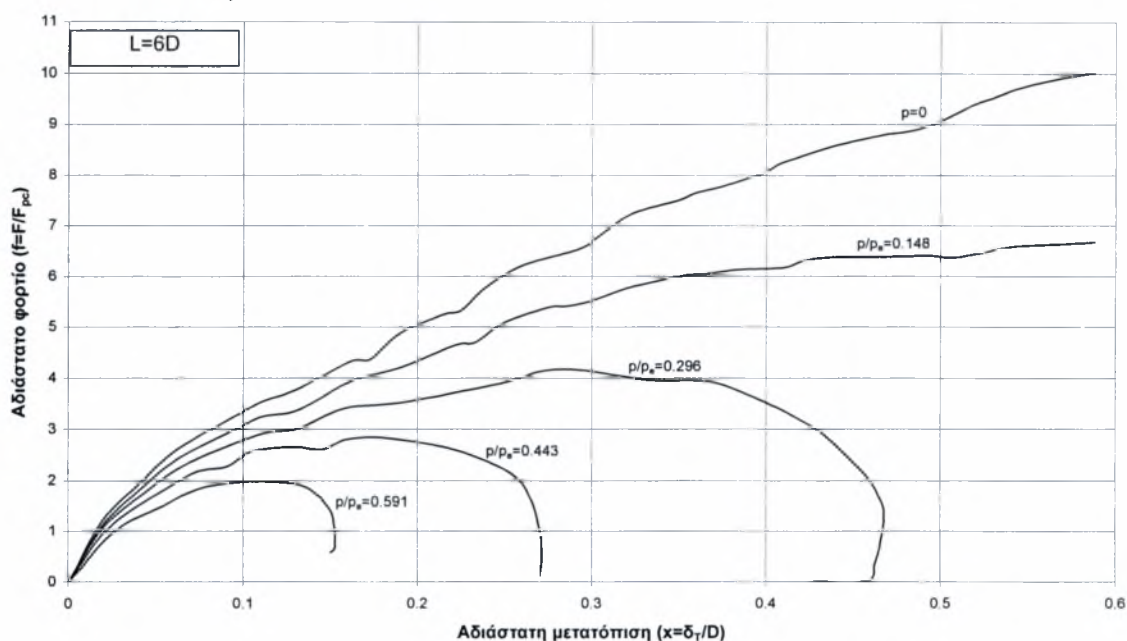
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΑ ΑΚΡΑ

Η ίδια ανάλυση έγινε στους δύο σωλήνες αλλάζοντας μόνο τις συνοριακές συνθήκες στα άκρα του σωλήνα σε συνθήκες συμμετρίας. Οι τιμές της πίεσης που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3-2. Τιμές της πίεσης που αναλόθηκαν για την περίπτωση με συνθήκες συμμετρίας. ($p_e=813\text{psi}$)

Απόλυτη τιμή p (psi)	p/p_e	p/p_{cr} ($L/D=6$)	p/p_{cr} ($L/D=10$)
0	0	0	0
120	0.148	0.142	0.142
240	0.296	0.284	0.284
360	0.443	0.426	0.426
480	0.591	0.567	0.567

Παρακάτω παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που πήραμε για τα δύο μήκη σωλήνων ($L=6D$ και $L=10D$).

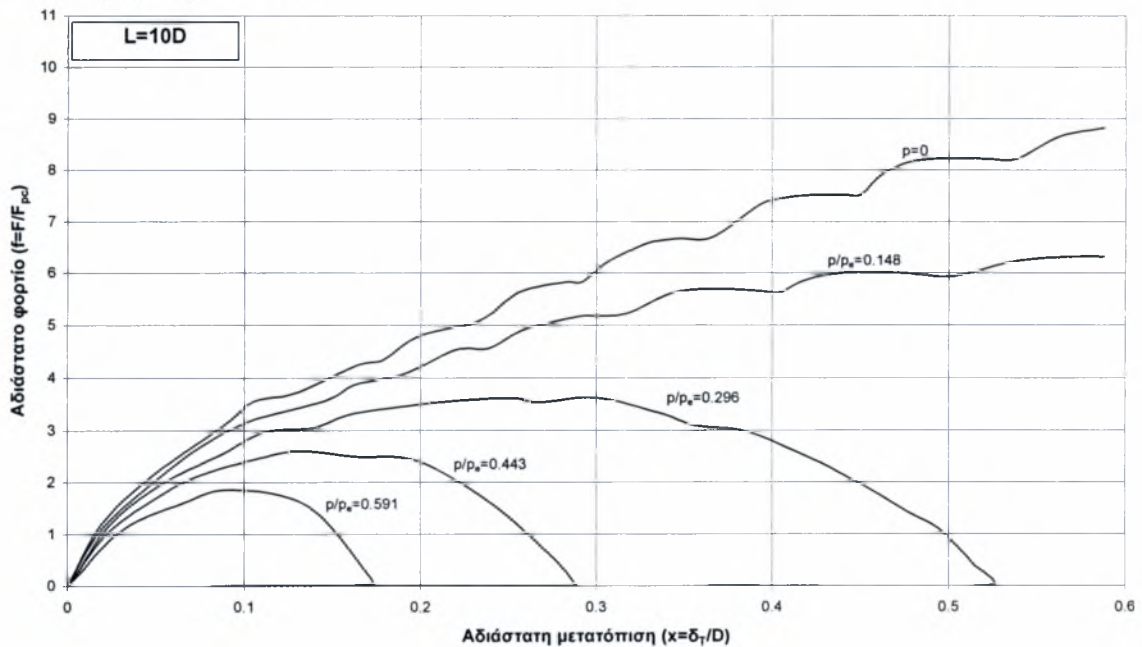


Σχήμα 3-31. Επίδραση της πίεσης για σωλήνα μήκους $L=6D$ με συνθήκες συμμετρίας στα άκρα.

Αρχικά για πίεση έως και 14.8 % της ελαστικής κρίσιμης πίεσης το φορτίο αυξάνεται μονοτονικά με τη μετατόπιση και τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά που πήραμε για την περίπτωση με καπάκια στα άκρα. Για πίεση $p/p_e=0.296$ και όταν ξεπερνάμε ένα οριακό μέγιστο φορτίο $f=4.173$ ($F=411\text{ lb.}$) παρουσιάζεται αστάθεια και ο σωλήνας τείνει προς την κατάρρευση. Ενώ όμως προχωρά η μετατόπιση όταν φτάσει την τιμή $x=0.468$ το φαινόμενο φτάνει στα άκρα και η τελική διατομή παραμορφώνεται. Η λύση είναι έντονα ασταθής, ενώ η μετατόπιση καθώς και το φορτίο μειώνονται για να επιτευχθεί ισορροπία. Ο σωλήνας καταστρέφεται ολοσχερώς κατά μήκος και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας παρουσιάζεται μειωμένη σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση όπου είχαμε καπάκια.

Για μεγαλύτερες τιμές της πίεσης η ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί μέχρι την τελική κατάρρευση μειώνεται πάρα πολύ και για τιμή της πίεσης $p/p_e=0.591$ το φαινόμενο φτάνει στα άκρα πολύ γρήγορα και το φαινόμενο της αστάθειας γίνεται ιδιαίτερα έντονο στο άνω διάγραμμα.

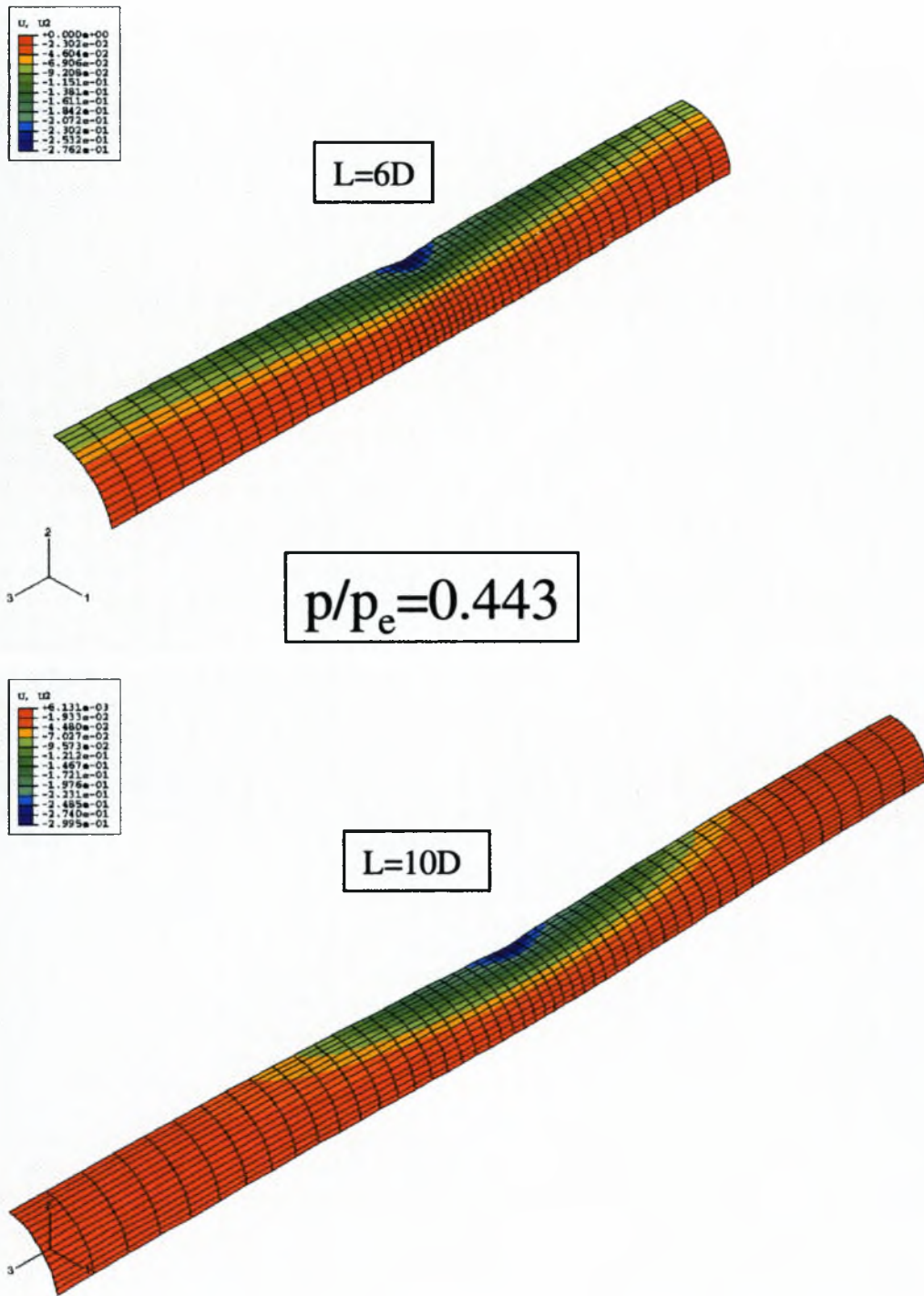
Παρακάτω παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που πήραμε κατά την ανάλυση του σωλήνα μήκους $L=10D$.



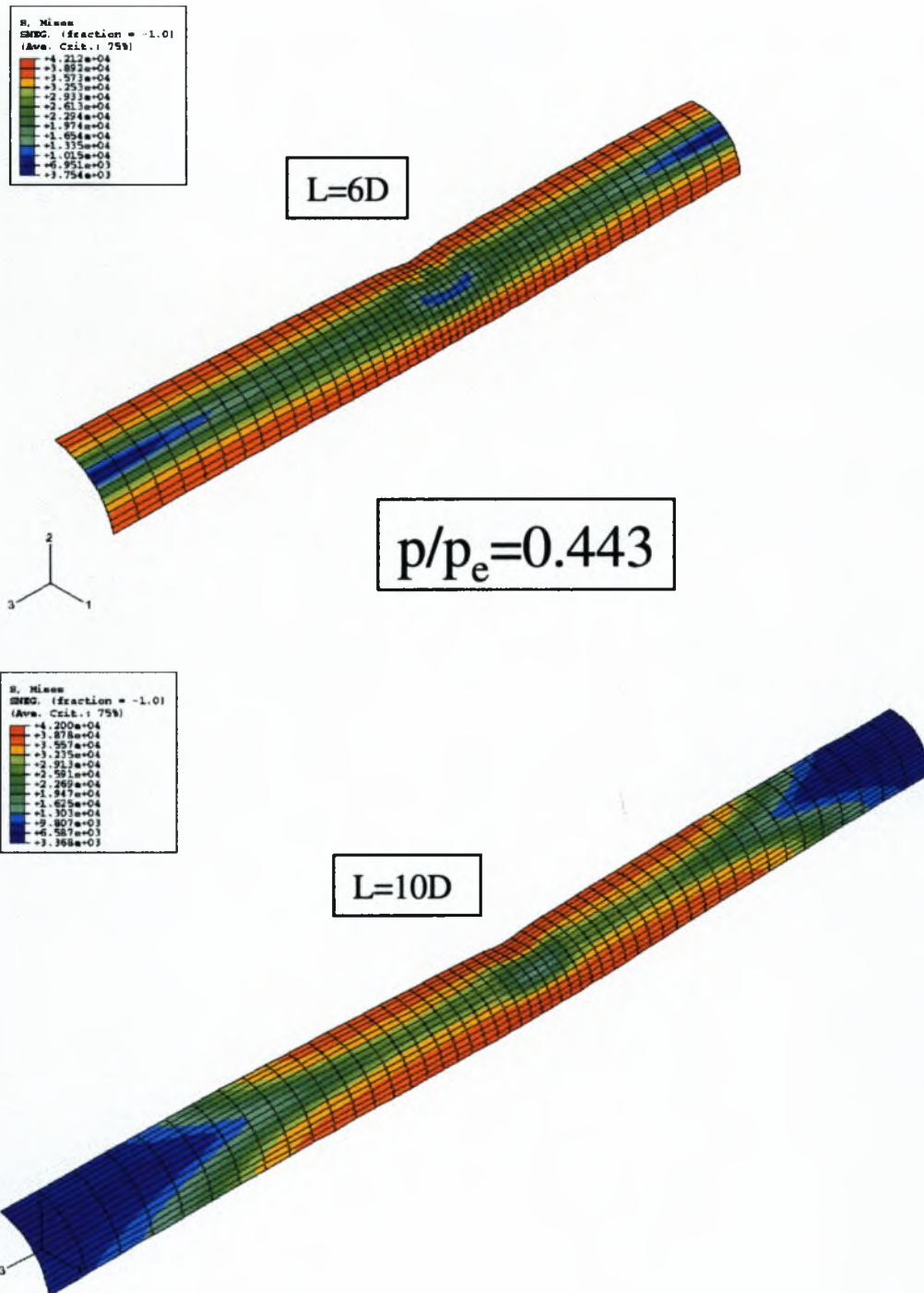
Σχήμα 3-32. Επίδραση της πίεσης για σωλήνα μήκους $L=10D$ με συνθήκες συμμετρίας στα άκρα.

Στην περίπτωση αυτή το φαινόμενο της αστοχίας του κελύφους είναι παρόμοιο. Για πίεση $p/p_e=0.296$ παρουσιάζεται αστάθεια μετά από κάποιο σημείο και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας μειώνεται. Στην παρούσα περίπτωση παρουσιάζεται κάποια διαφοροποίηση με τον προηγούμενο σωλήνα ($L=6D$). Ενώ για μηδενική πίεση και πίεση $p/p_e=0.148$ η ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί είναι ελαφρώς χαμηλότερη γιατί οι συνοριακές συνθήκες είναι πιο απομακρυσμένες και παρουσιάζουν μικρότερη αντίδραση κατά την κατάρρευση, για τιμές της πίεσης μεγαλύτερες του 29.6 % του p_e η ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί είναι λίγο μεγαλύτερη και αυτό συμβαίνει γιατί το φαινόμενο δεν έχει φτάσει ακόμα στην τελευταία διατομή. Όπως είδαμε παραπάνω (Σχήμα 3-31) όταν αυτό συμβεί έχουμε “γύρισμα” της λύσης προς τα πίσω (“snap-back”), που αντιστοιχεί σε αποκόλληση του σωλήνα από το διεισδυτή.

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζουμε σύγκριση για τους σωλήνες $L=6D$ και $L=10D$ στην παραμορφωμένη κατάσταση ($x=0.28$). Στην πρώτη εικόνα (Σχήμα 3-33) βλέπουμε την κατανομή των μετατοπίσεων και στη δεύτερη (Σχήμα 3-34) την κατανομή των τάσεων κατά Von Mises. Η τιμή της πίεσης είναι και στις δύο περιπτώσεις 44.3 % του p_e . Στις εικόνες φαίνεται ότι στην περίπτωση των 6 ιντσών το φαινόμενο έχει προχωρήσει σε όλο το μήκος του σωλήνα και οι τάσεις είναι αρκετά υψηλές ακόμα και στα άκρα αυτού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κρίσιμη πίεση ($p_{cr}=846$ psi) είναι ανεξάρτητη του μήκους και είναι λίγο μεγαλύτερη από την κρίσιμη ελαστική πίεση ($p_e=813$ psi) λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης και της εργοσκλήρυνσης που υφίσταται το υλικό πριν φτάσει σε αστάθεια.



Σχήμα 3-33. Κατανομή των μετατοπίσεων για σωλήνες μήκους $L=6D$ και $L=10D$. Συνοριακές συνθήκες συμμετρίας και πίεση $p/p_e=0.443$. ($x=0.28$)



Σχήμα 3-34. Κατανομή των τάσεων κατά "Von Mises" για σωλήνες μήκους $L=6D$ και $L=10D$. Συνοριακές συνθήκες συμμετρίας και πίεση $p/p_e=0.443$..($x=0.28$)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Τρισδιάστατη Ανάλυση Χαλύβδινων Κυλινδρικών Κελυφών Υπό Εγκάρσια Φόρτιση Και Πίεση

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήσαμε την απόκριση κυλινδρικών κελυφών αλουμινίου υπό την επίδραση της πίεσης και εγκάρσιας φόρτισης. Για να επιβάλουμε την εγκάρσια φόρτιση θεωρήσαμε ένα διεισδυτή μορφής λεπίδας. Στο παρών κεφάλαιο προχωρούμε αυτή την ανάλυση θεωρώντας σωλήνες από χάλυβα υψηλής αντοχής που είναι και οι συνήθεις περιπτώσεις που συναντώνται στις πραγματικές κατασκευές. Επίσης μελετούμε την επίδραση στη λύση που θα έχει η μορφή του διεισδυτή θεωρώντας δύο περιπτώσεις: στην πρώτη έχει μορφή λεπίδας ενώ στη δεύτερη μορφή σφαίρας. Αρχικά θεωρήσαμε το κυλινδρικό κέλυφος που παρουσιάστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο (Σωλήνας 1) και στη συνέχεια μελετήσαμε ένα σωλήνα μεγαλύτερου μήκους συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά που παρουσιάστηκαν από τους Park & Kyriakides (1996). Οι σωλήνες προσομοιώθηκαν με τετρακομβικά στοιχεία κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης (S4R), ενώ θεωρήσαμε ελαστοπλαστικό υλικό και μοντέλο ισοτροπικής κράτυνσης με κριτήριο διαρροής “Von Mises”. Σε όλες τις περιπτώσεις κατασκευάσαμε πλέγμα πυκνότερο στην περιοχή εφαρμογής της δύναμης, ενώ στο υπόλοιπο του κελύφους το πλέγμα ήταν πιο αραιό.

4.1 Αστοχία Χαλύβδινου Σωλήνα Υπό Την Επίδραση Διεισδυτών Μορφής Λεπίδας

Στο δεύτερο κεφάλαιο διεξήγαμε αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία σε ένα χαλύβδινο σωλήνα που βρίσκεται βιομηχανική εφαρμογή σε πετρελαιοαγωγούς, θεωρώντας εγκάρσια φόρτιση σε όλο το μήκος του σωλήνα. Στο παρών κεφάλαιο εξετάζουμε τον ίδιο σωλήνα θεωρώντας τώρα εγκάρσια φόρτιση σε ένα μικρό μήκος της επιφάνειας αυτού. Το φαινόμενο είναι τρισδιάστατο και είμαστε υποχρεωμένοι να αναλύσουμε όλο το σωλήνα. Τα χαρακτηριστικά του κυλινδρικού κελύφους είναι τα εξής:

ΣΩΛΗΝΑΣ 1

- $E=29000$ ksi (200 GPa)
- $\nu=0.3$
- $\sigma_y=60$ ksi (413.7 MPa)
- $D_{out}=24$ in (61 cm)
- $t=0.5$ in (1.27 cm)
- $D/t=47$

όπου E , ν , D_{out} , t , D/t , σ_y είναι το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος του Poisson, η εξωτερική διάμετρος, το πάχος, ο λόγος μέσης διαμέτρου προς πάχος και το όριο διαρροής αντίστοιχα.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ

Ο σωλήνας που αναλύουμε υφίσταται μεγάλες παραμορφώσεις και πρέπει η συμπεριφορά του υλικού να προσομοιωθεί ανάλογα, ώστε να λαμβάνονται υπόψη μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις. Θεωρήσαμε ελαστοπλαστικό γραμμικά

κρατυνόμενο υλικό με μέτρο σκλήρυνσης $E' = E/400$ και μοντέλο ισοτροπικής κράτυνσης με κριτήριο διαρροής “Von Mises” (J_2 flow plasticity). Στο “Abaqus” χρησιμοποιήθηκαν τιμές της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, αφού πρώτα τροποποιήθηκαν ως τιμές πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης σύμφωνα με τους τύπους:

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

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

όπου σ είναι η τάση και οι δείκτες $[\cdot]_T$ και $[\cdot]_y$ δηλώνουν πραγματική τάση και τάση διαρροής αντίστοιχα, ενώ ε είναι η συνολική παραμόρφωση και ε^p η πλαστική λογαριθμική παραμόρφωση αντίστοιχα.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΧΑΡΑΞΗΣ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

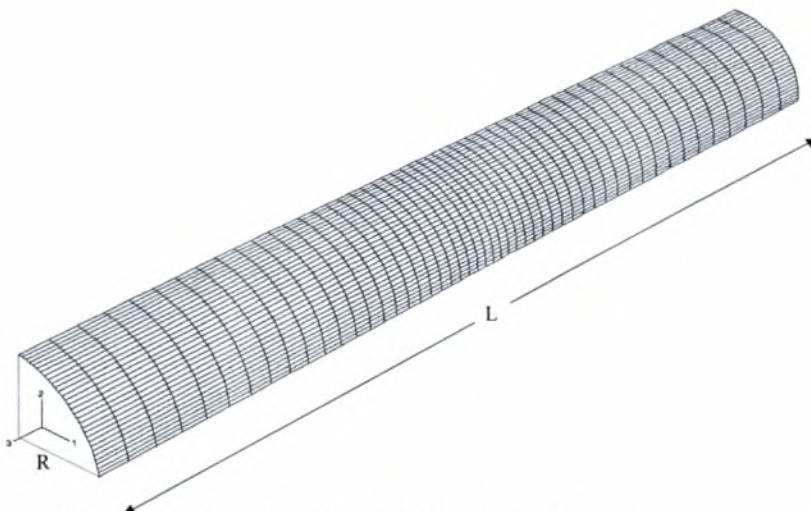
Για την αριθμητική επίλυση χρησιμοποιήθηκε έλεγχος μετατόπισης, “displacement control” γιατί όπως και στο δισδιάστατο πρόβλημα το φορτίο στον δρόμο ισορροπίας παίρνει αρνητική κλίση, δημιουργώντας πρόβλημα στη σύγκλιση. Ακόμα και με αυτή τη θεώρηση όμως σε κάποιες περιπτώσεις που παρουσιάζονται παρακάτω, εμφανίστηκε κατά την ανάλυση έντονη αστάθεια όπου μειωνόταν τόσο η δύναμη όσο και η μετατόπιση. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο του Riks στην εντολή “step”.

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΤΗ-ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Η αλληλεπίδραση επαφής ανάμεσα στον διεισδυτή και το κέλυφος θεωρήθηκε χωρίς τριβή και για την προσομοίωση στο “Abaqus” χρησιμοποιήθηκε η εντολή “interaction”. Ο διεισδυτής κατασκευάστηκε με την εντολή “analytical surface” από τον “pre-processor”, “Abacus CAE” και θεωρήθηκε άκαμπτος, μέσω της εντολής “Rigid body”. Το φορτίο εφαρμόστηκε σε αυτό αφού πρώτα θεωρήσαμε ένα κόμβο αναφοράς (“reference point”). Η επιφάνεια επαφής του διεισδυτή με το κέλυφος έχει πάχος 3 ίντσες.

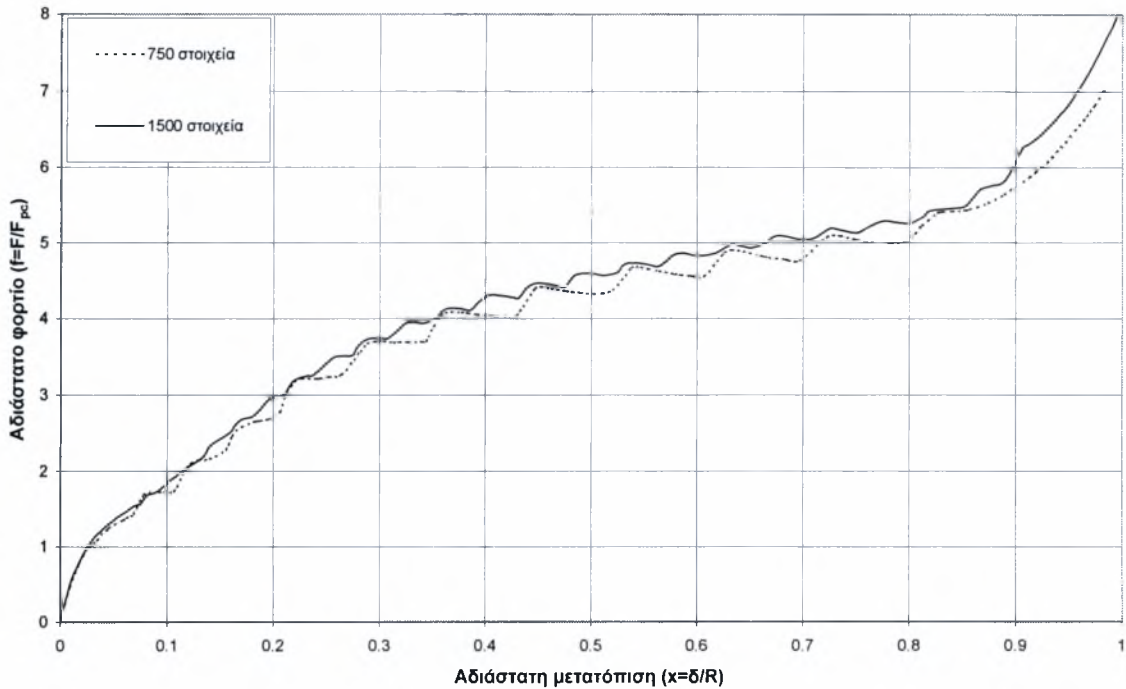
ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά κελύφη μήκους $L=5D$ (120 in.) και $L=15D$ (360 in.). Αυτά προσομοιώθηκαν με τετρακομβικά στοιχεία κελύφους (S4R). Στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 4-1) φαίνεται ένα τυπικό πλέγμα που χρησιμοποιήσαμε για μήκος σωλήνα $L=5D$.



Σχήμα 4-1. Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για σωλήνα μήκους $L=5D$.

Στο παραπάνω μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν 1500 στοιχεία κελύφους, ενώ επιβάλαμε πύκνωση (με συντελεστή 3 στο Abaqus) στην περιοχή εφαρμογής του φορτίου. Χρησιμοποιήθηκε επίσης και άλλο ένα πλέγμα με τα μισά στοιχεία (750), για να δούμε την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 4-2) παρουσιάζουμε τη λύση για τις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 4-2. Ακρίβεια της λύσης για μήκος σωλήνα $L=5D$ συναρτήσει του αριθμού των στοιχείων που απαρτίζουν το πλέγμα.

Στο άνω σχήμα η μετατόπιση του διεισδυτή και το φορτία παρουσιάζονται αδιάστατα σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$x = \frac{\delta}{R} \quad (4.3)$$

όπου δ είναι η μετατόπιση του διεισδυτή και R η μέση ακτίνα και

$$f = \frac{F}{F_{pc}} \quad (4.4)$$

όπου F το φορτίο που εφαρμόζουμε στον διεισδυτή και $F_{pc} = M_p \sqrt{\frac{D}{t}} = \frac{\sigma_y t^2}{4} \sqrt{\frac{D}{t}}$.

Από τη σύγκριση παρατηρούμε ότι για 750 στοιχεία υποεκτιμάται η λύση. Έτσι επιλέγουμε τη λύση για τα 1500 στοιχεία στην οποία εμφανίζονται κάποιοι κυματισμοί λόγω του αλγορίθμου επαφής κελύφους-διεισδυτή, αλλά δεν επηρεάζουν την ακρίβεια της λύσης.

ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Ως συνοριακές συνθήκες θεωρήσαμε απαραμόρφωτες πλάκες (“καπάκια”), προσαρμοσμένες σε κάθε άκρο, ελεύθερο να κινηθεί μόνο κατά την αξονική διεύθυνση ($u_1=u_2=\theta_1=\theta_2=\theta_3=0$, όπου $u_{[1]}$ είναι οι μετατοπίσεις που περιορίζουμε και $\theta_{[1]}$ οι στροφές). Για να προσομοιώσουμε το “καπάκι” στο Abaqus περιορίσαμε όλους τους κόμβους στα άκρα, έτσι ώστε να κινούνται σύμφωνα με ένα κόμβο τον οποίο φτιάξαμε και σε αυτόν επιβάλαμε τις άνω οριακές συνθήκες. Αυτό έγινε με την εντολή “kinematic coupling”.

4.1.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Σκοπός της παρούσας ανάλυσης είναι η εξαγωγή αποτελεσμάτων για την επίδραση εγκάρσιας φόρτισης σε περιβάλλον σταθερής πίεσης. Προτού περάσουμε όμως σε αυτά τα αποτελέσματα παρουσιάζουμε κάποιες προκαταρκτικές μελέτες που έγιναν υπό την επίδραση της πίεσης και μόνο (pure pressure loading).

Η σχέση που μας δίνει την ελαστική πίεση αστάθειας (λυγισμού) ενός ελαστικού δακτυλίου είναι:

$$p_e = \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{D} \right)^3 \quad (4.5)$$

και για την περίπτωση μας προκύπτει $p_e=614$ psi. Επίσης, η πίεση κατάρρευσης λόγω πλαστικοποίησης δίνεται από τη σχέση:

$$p_y = 2\sigma_y \frac{t}{D} \quad (4.6)$$

και είναι για την περίπτωση μας $p_y=2553$ psi. Από τις δύο τιμές βλέπουμε ότι η πιο κρίσιμη περίπτωση για το κέλυφος είναι αυτή του λυγισμού. Για να προσεγγίσουμε ακριβέστερα αυτές τις τιμές διεξήγαμε αυστηρή προσομοίωση αναλύοντας την επίδραση της πίεσης με πεπερασμένα στοιχεία.

Κατασκευάσαμε δύο βήματα για να διεξάγουμε την ανάλυση, όπου στο πρώτο (“step-1”) εφαρμόσαμε μια μικρή ατέλεια και στο δεύτερο (“step-2”) εφαρμόσαμε την πίεση, έτσι ώστε να οδηγηθούμε στον μεταλυγισμικό δρόμο ισορροπίας. Με αύξηση της πίεσης μετά από κάποιο σημείο δημιουργείται αστάθεια (λυγισμός) και η πίεση αυτή ονομάζεται πίεση κατάρρευσης. Για το σωλήνα μήκους $L=5D$ προέκυψε η τιμή $p_{cr}=1275$ psi, ενώ για μήκος σωλήνα $L=15D$ προέκυψε $p_{cr}=614$ psi.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε μνεία στο φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης που μπορεί να επιφέρει την καταστροφή όλου του σωλήνα όταν αυτός έχει σχετικά μεγάλο μήκος. Η προσεγγιστική τιμή της πίεσης διαδιδόμενης ύβωσης είναι σύμφωνα με τους Palmer & Martin (1975):

$$p_p = \pi\sigma_y \left(\frac{t}{D} \right)^2 \quad (4.7)$$

και στην περίπτωση μας προκύπτει $p_p=85.3$ psi.

Για να οδηγηθούμε στην ακριβή τιμή της πίεσης διαδιδόμενης ύβωσης κατασκευάσαμε σωλήνα με τις γεωμετρικές ιδιότητες του σωλήνα 1 και μήκος $L=30D$. Για αυτά τα χαρακτηριστικά η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία έδωσε, $p_p=122$ psi.

Πίνακας 4-1. Κρίσιμες τιμές της πίεσης για την περίπτωση όπου έχουμε ως συνοριακές συνθήκες, απαραμόρφωτες πλάκες στα άκρα

ΚΡΙΣΙΜΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ p_e	ΚΡΙΣΙΜΗ ΠΙΕΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ p_{cr} ($L=5D$)	ΚΡΙΣΙΜΗ ΠΙΕΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ p_{cr} ($L=15D$)	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ p_p	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΗΣ ΥΒΩΣΗΣ p_p
614 psi	1275 psi	614 psi	85.3 psi	122 psi

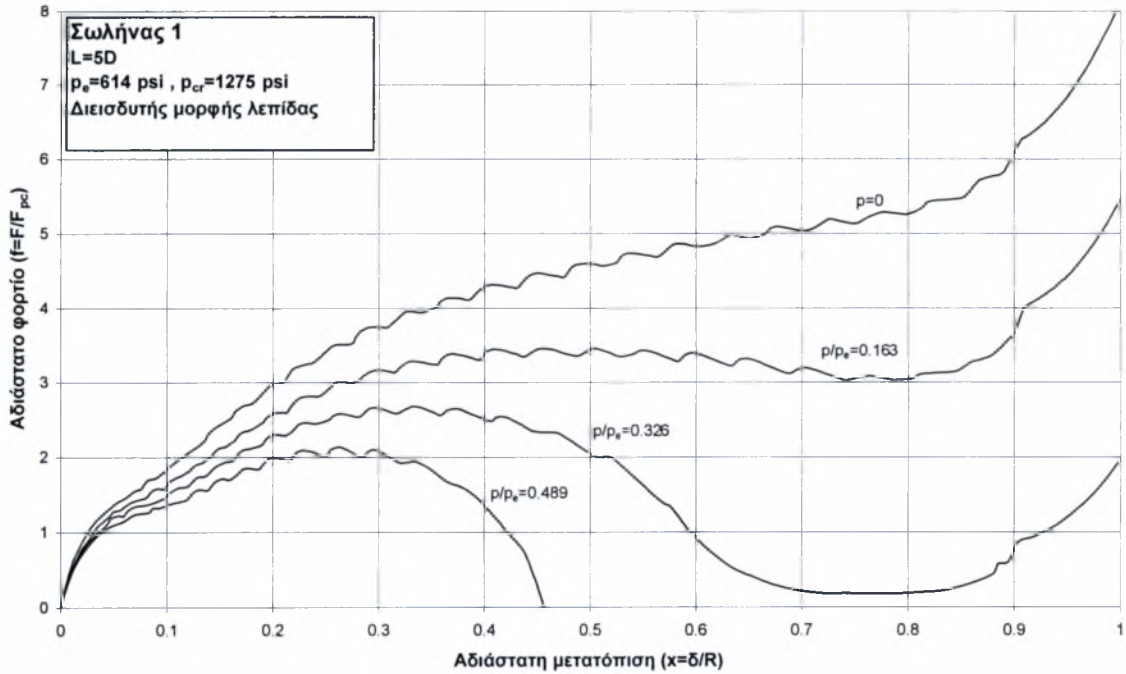
4.1.2 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Περνάμε στη συνέχεια στα αποτελέσματα που πήραμε για εγκάρσια φόρτιση από το διεισδυτή τύπου λεπίδας. Κατασκευάσαμε ένα πρώτο βήμα (“step-1”) στο οποίο

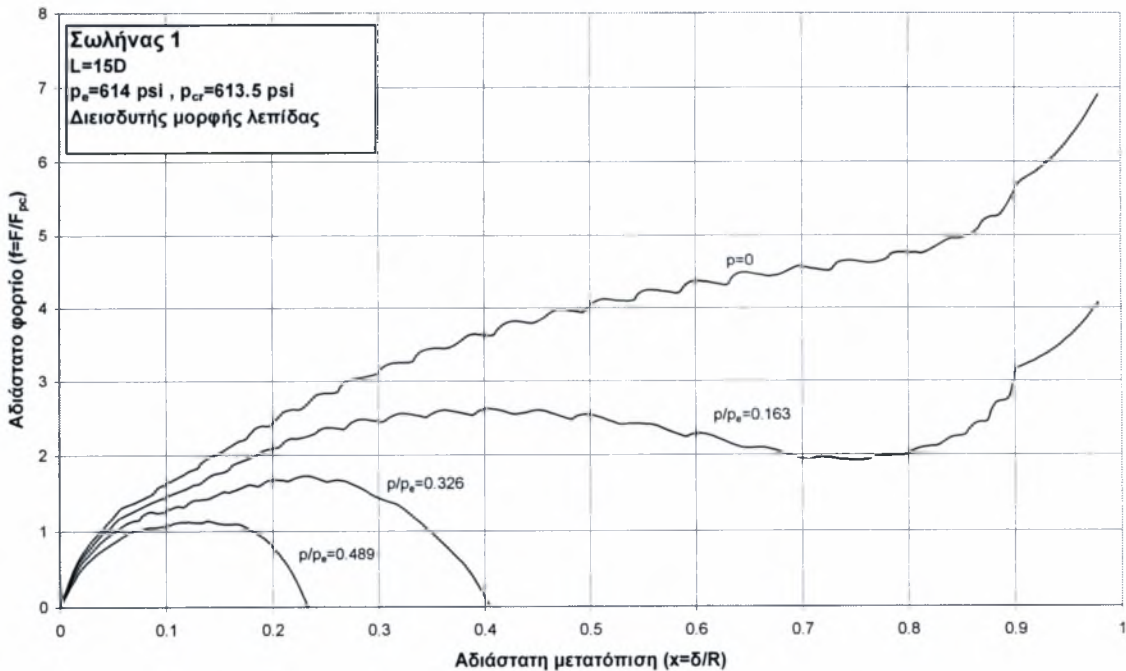
επιβάλαμε την πίεση και στη συνέχεια διατηρώντας αυτή σταθερή, επιβάλαμε το φορτίο (“step-2”). Οι τιμές της πίεσης που επιβάλαμε φαίνονται στον πίνακα 4-2.

Πίνακας 4-2. Τιμές της πίεσης που αναλόθηκαν με το Abaqus για την περίπτωση της εγκάρσιας φόρτισης.

Απόλυτη τιμή p (psi)	p/p_c	p/p_{cr} ($L/D=5$)	p/p_{cr} ($L/D=15$)
0	0	0	0
100	0.163	0.078	0.163
200	0.326	0.157	0.326
300	0.489	0.235	0.489



Σχήμα 4-3. Επίδραση της πίεσης σε σωλήνα μήκους $L=5D$ με απαραμόρφωτες πλάκες στα άκρα.



Σχήμα 4-4. Επίδραση της πίεσης σε σωλήνα μήκους $L=15D$ με απαραμόρφωτες πλάκες στα άκρα.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σωλήνας Μήκους $L=5D$

Από το σχήμα 4-3 (Σωλήνας μήκους $L=5D$) παρατηρούμε ότι για περίπου 8% της πίεσης αστοχίας ($\sim 16\%$ του p_e) δημιουργείται αστάθεια. Η κλίση του φορτίου γίνεται αρνητική και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας μειώνεται έντονα σε σχέση με την περίπτωση της μηδενικής πίεσης. Στη συνέχεια της φόρτισης και ενώ ο σωλήνας συνεχίζει να παραμορφώνεται οι μεμβρανικές δυνάμεις του κελύφους γίνονται σημαντικά μεγάλες έτσι ώστε η λύση να γίνει και πάλι ευσταθής. Έτσι για $x > 0.8$ απαιτείται να αυξήσουμε το φορτίο για αύξηση της μετατόπισης. Το ίδιο φαινόμενο απαντάται και στην περίπτωση όπου έχουμε επιβάλει πίεση $p=200$ psi ($p/p_e=0.326$), ενώ για μεγαλύτερες τιμές της πίεσης ($p/p_e=0.489$) ο δρόμος ισορροπίας μετά το οριακό φορτίο είναι ασταθής και το κέλυφος δεν μπορεί πλέον να αντισταθεί στην επίδραση της εγκάρσιας δύναμης. Από το εμβαδόν που περικλείεται από την καμπύλη για $p/p_e=0.489$ ($p/p_{cr}=0.235$) βλέπει κανείς πόσο σημαντικά έχει μειωθεί η ενέργεια απορρόφησης σε σχέση με τη μηδενική πίεση. Έτσι στο σχεδιασμό αγωγών σε περιβάλλον πίεσης πρέπει να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο αυτό.

Σωλήνας Μήκους $L=15D$

Από το σχήμα 4-4 βλέπουμε την επίδραση της πίεσης για ένα μεγαλύτερο σωλήνα μήκους $L=15D$. Η τιμή της πίεσης κατάρρευσης σε αυτή την περίπτωση συμπίπτει σχεδόν με την ελαστική πίεση αστάθειας για απειρομήκες σωλήνα, επειδή ο σωλήνας είναι αρκετά μεγάλος. Το απαιτούμενο φορτίο για διείδυση της λεπίδας είναι εμφανώς μειωμένο σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση $L=5D$, επειδή οι συνοριακές συνθήκες είναι πιο απομακρυσμένες και δεν επηρεάζουν σημαντικά τη λύση. Για πίεση $p/p_e=0.163$ και $x \approx 0.3$ δημιουργείται αστάθεια, αλλά οι μεμβρανικές δυνάμεις γίνονται σημαντικές στη συνέχεια και η λύση γίνεται και πάλι ευσταθής για $x \approx 0.75$ όπου και απαιτείται αύξηση του φορτίου για περαιτέρω παραμόρφωση του κελύφους. Για μεγαλύτερες τιμές της πίεσης, ($p/p_e=0.326$) το φαινόμενο είναι έντονα ασταθές και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας από το σωλήνα μειώνεται σημαντικά.

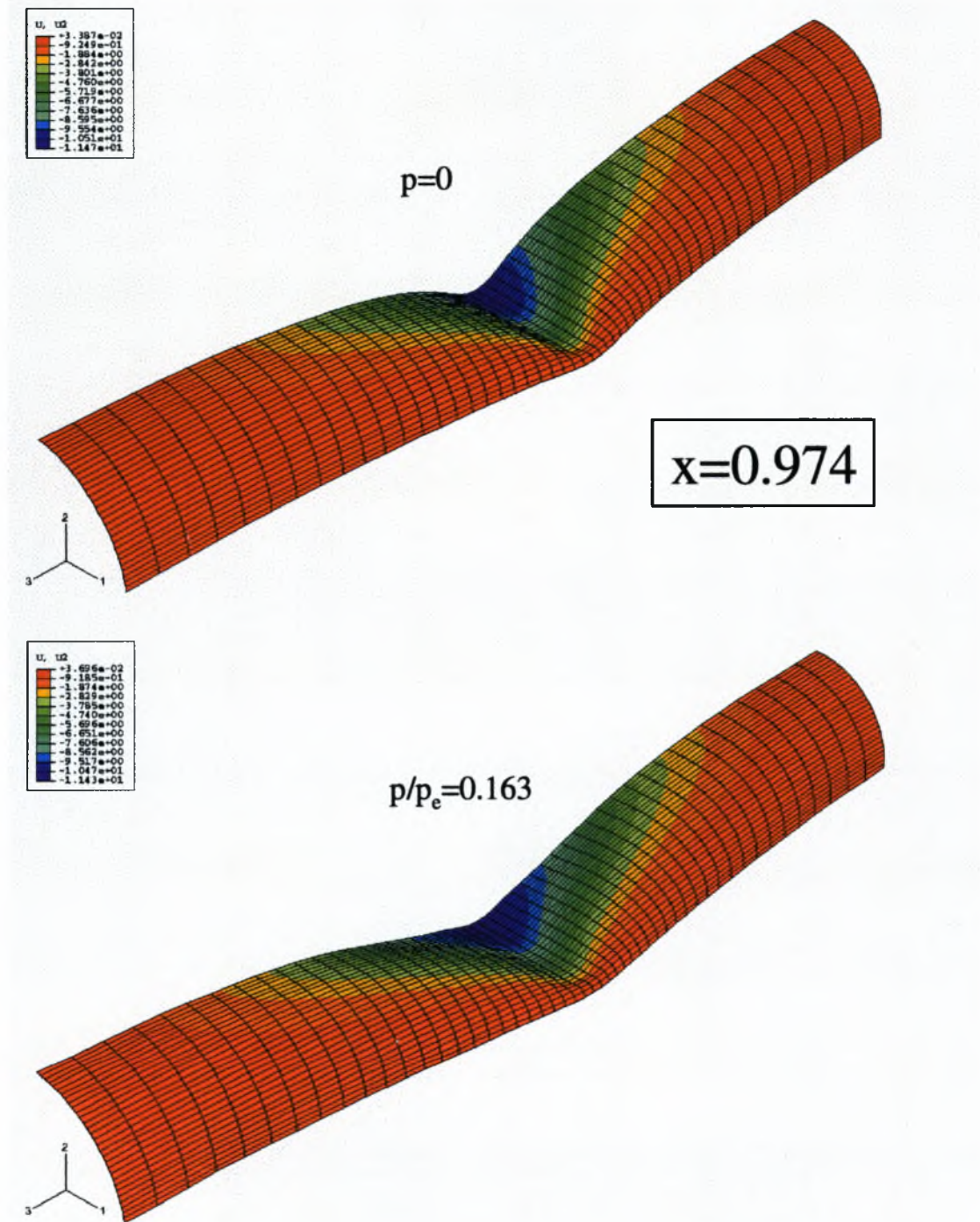
Επίδραση Συνοριακών Συνθηκών

Από την ανάλυση που έγινε παραπάνω βλέπουμε ότι ο ρόλος των συνοριακών συνθηκών είναι σημαντικός λόγω των μεμβρανικών δυνάμεων που αναπτύσσονται. Όσο πιο απομακρυσμένες είναι οι συνοριακές συνθήκες τόσο μικρότερες είναι οι μεμβρανικές δυνάμεις και για αυτό το λόγο η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση του σωλήνα μήκους $L=5D$. Στην περίπτωση όπου έχουμε εφαρμόσει πίεση ($p/p_e=0.326$) παρατηρούμε ότι ο δρόμος ισορροπίας του σωλήνα μήκους $L=5D$ είναι ευσταθής για $x=0.9$, ενώ ο σωλήνας μήκους $L=15D$ έχει ήδη καταρρεύσει ($x=0.41$).

Επίδραση Υλικού

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε παρόμοια παραμετρική ανάλυση για να εξάγουμε την επίδραση της πίεσης σε σωλήνες αλουμινίου. Σε εκείνες τις περιπτώσεις από τη στιγμή που παρατηρούσαμε αστάθεια η κλίση του φορτίου στο δρόμο ισορροπίας παρέμενε αρνητική για μεγαλύτερες παραμορφώσεις έως την τελική κατάρρευση του σωλήνα. Στην περίπτωση αυτή παρατηρήσαμε ότι ενώ μπορεί να δημιουργηθεί αστάθεια στη συνέχεια ο μεταλυγισμικός δρόμος ισορροπίας μπορεί και πάλι να γίνει ευσταθής. Αυτό οφείλεται εν μέρει στις συνοριακές συνθήκες όπως εξηγήσαμε παραπάνω αλλά και στις ιδιότητες του υλικού. Η κράτυνση του χάλυβα

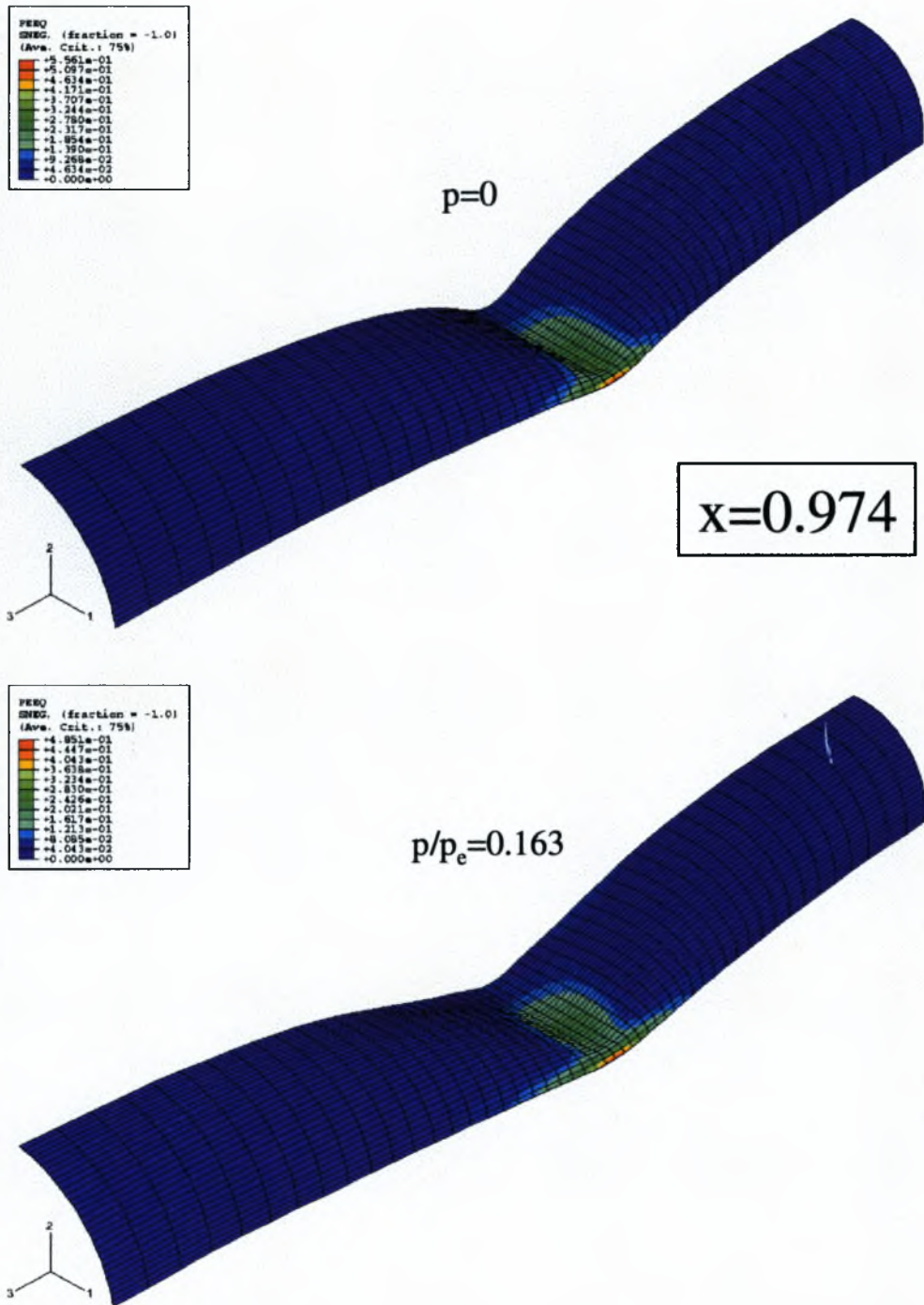
κατά την πλαστικοποίηση ($E' = E/400$) είναι σημαντικότερη του αλουμινίου που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3, ώστε να επιτρέπει στο σωλήνα ενώ η γεωμετρία του έχει παραμορφωθεί σημαντικά να επανακάμπτει για σχετικά χαμηλές τιμές της πίεσης.



Σχήμα 4-5. Κατανομή των μετατοπίσεων για μηδενική πίεση και $p/p_e=0.163$ σε σωλήνα μήκους $L=5D$. (Μετατόπιση του διεισδότη $x=0.974$)

Από το σχήμα 4-5 παρατηρούμε ότι η μορφή των δύο σωλήνων στην παραμορφωμένη κατάσταση είναι σχεδόν πανομοιότυπη. Ωστόσο για την περίπτωση της πίεσης το απαιτούμενο φορτίο είναι σημαντικά χαμηλότερο και αυτό φαίνεται

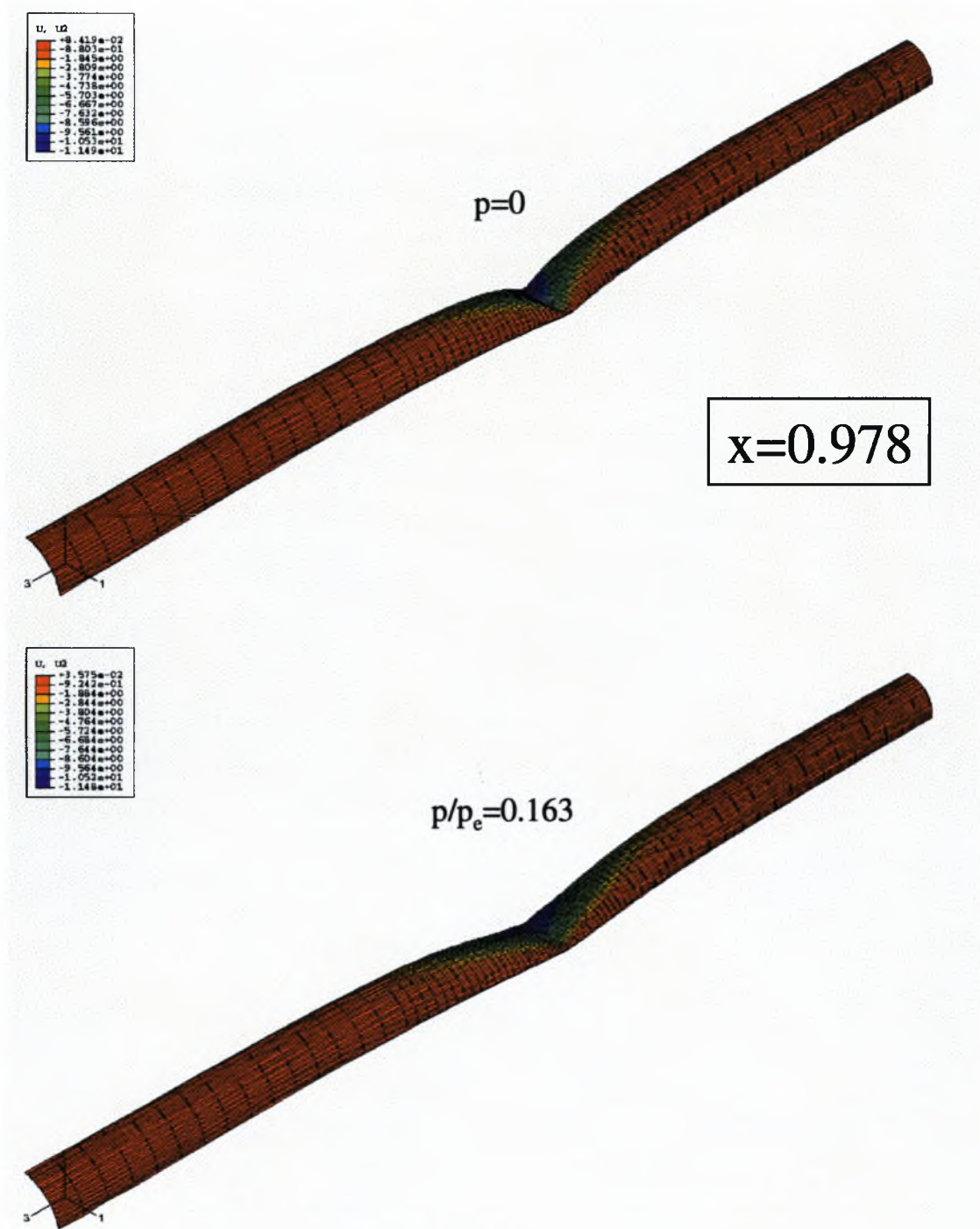
στο επόμενο σχήμα όπου για την ίδια μετατόπιση του διεισδυτή ($x=0.974$) συγκρίνεται η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση (“PEEQ”).



Σχήμα 4-6. Κατανομή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωση για μηδενική πίεση και $p/p_e=0.163$ σε σωλήνα μήκους $L=5D$. (Μετατόπιση του διεισδυτή $x=0.974$)

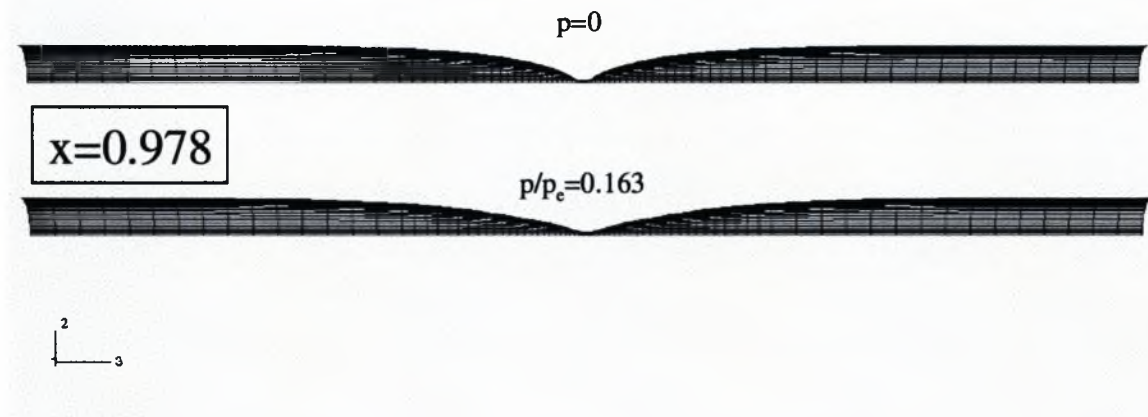
Από το σχήμα 4-6 βλέπουμε ότι στην περίπτωση της πίεσης έχουν πλαστικοποιηθεί περισσότερο οι δύο γενέτειρες στους άξονες συμμετρίας και για αυτό το λόγο εμφανίζεται η διαφορά στο απαιτούμενο φορτίο που φαίνεται στο σχήμα 4-3.

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζουμε αντίστοιχα αποτελέσματα για το σωλήνα μήκους $L=15D$.

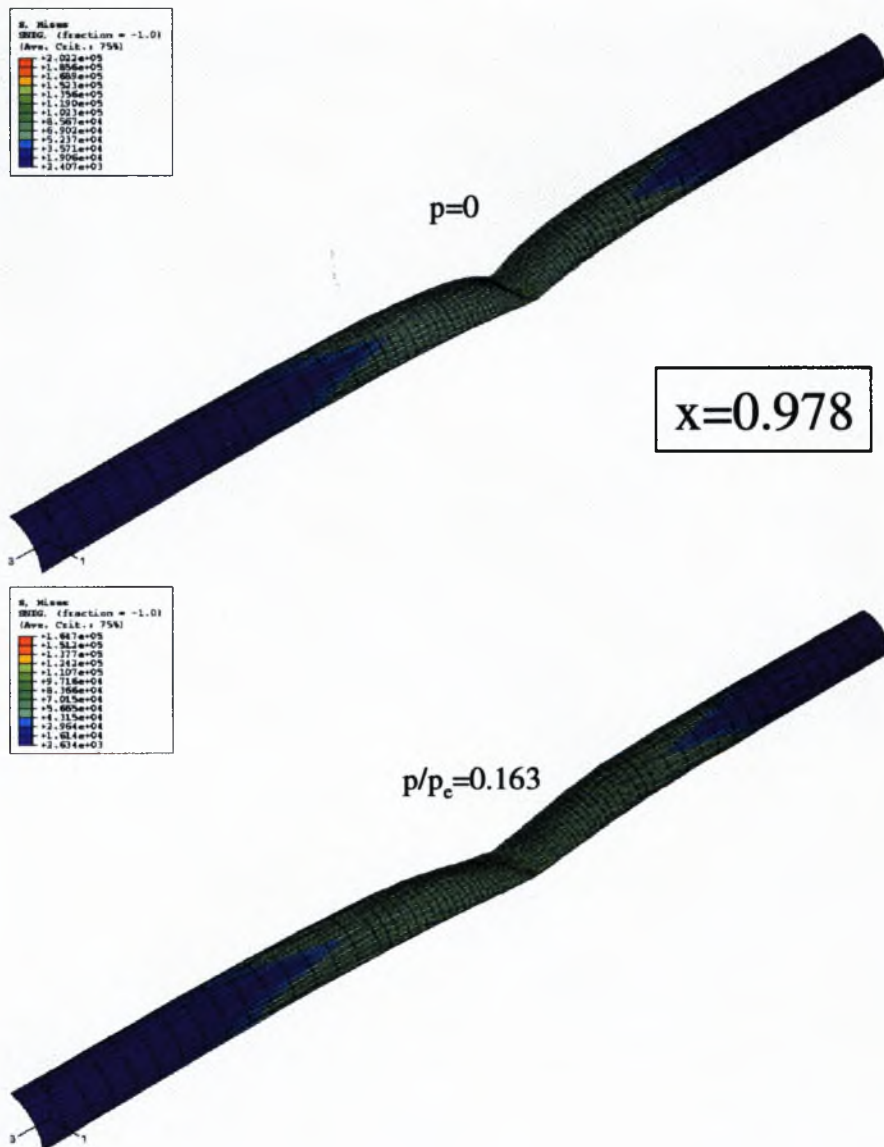


Σχήμα 4-7. Κατανομή των μετατοπίσεων για μηδενική πίεση και $p/p_e=0.163$ σε σωλήνα μήκους $L=15D$. (Μετατόπιση του διεισδότη $x=0.978$)

Από το άνω σχήμα δεν φαίνεται η διαφορά που προκαλεί η πίεση στην παραμόρφωση του σωλήνα. Αν δούμε όμως την ίδια εικόνα από το επίπεδο 2-3 (Σχήμα 4-8) φαίνεται η επιροή της πίεσης στο να κάνει επίπεδο (flattening) το σωλήνα και η κλίση στην περιοχή της διείδυσης είναι πιο ομαλή. Η επίδραση της πίεσης φαίνεται επίσης από την σύγκριση των τάσεων κατά Von Mises (Σχήμα 4-9).

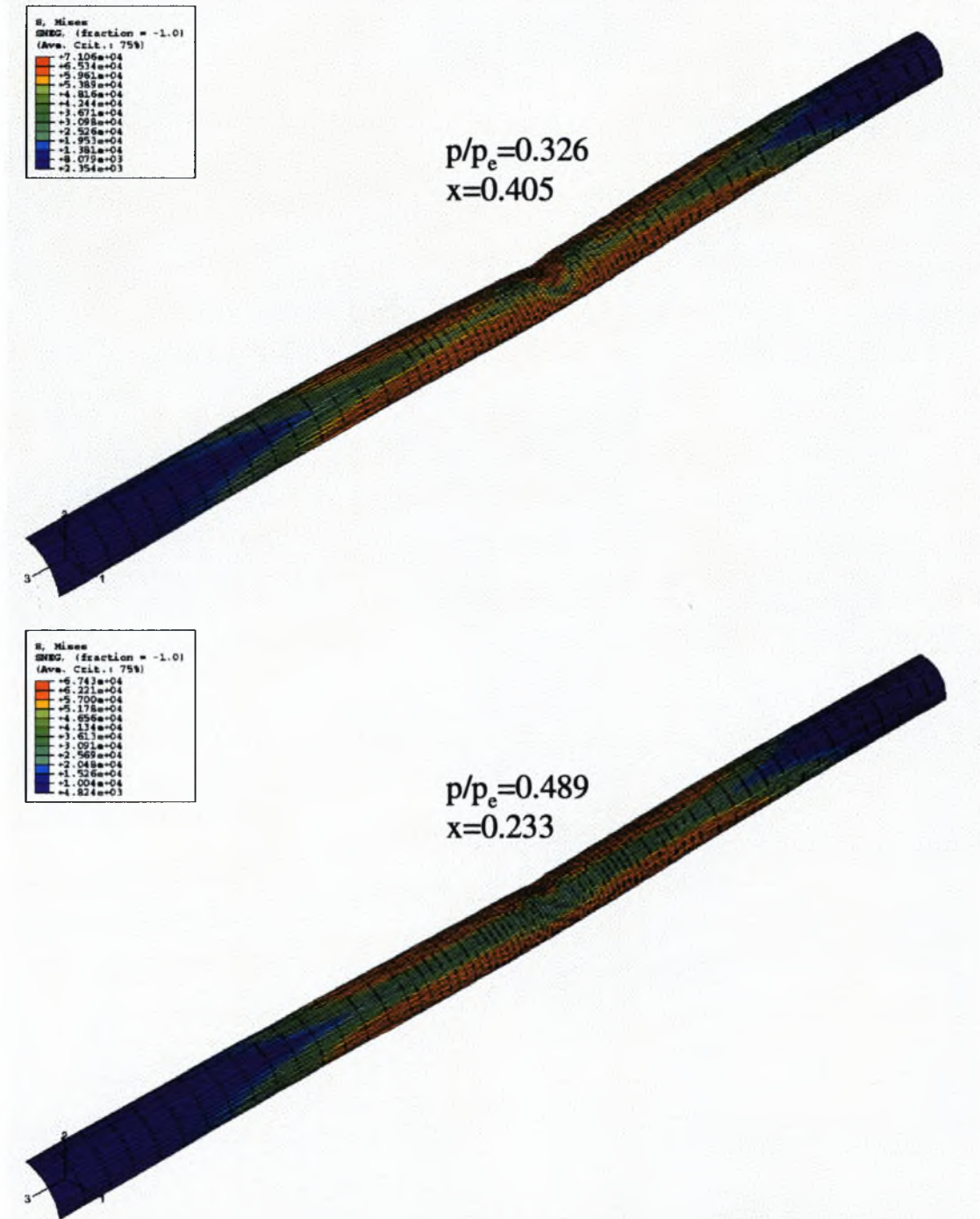


Σχήμα 4-8. Σύγκριση παραμορφωμένης κατάστασης στο επίπεδο 2-3 για μηδενική πίεση και $p/p_e=0.163$ σε σωλήνα μήκους $L=15D$. (Μετατόπιση του διεσδοτή $x=0.978$)



Σχήμα 4-9. Κατανομή των τάσεων κατά Von Mises για μηδενική πίεση και $p/p_e=0.163$ σε σωλήνα μήκους $L=15D$. (Μετατόπιση του διεσδοτή $x=0.978$)

Στην περίπτωση της πίεσης βλέπουμε ότι οι τάσεις κατά Von Mises καταπονούν το σωλήνα πολύ πιο έντονα. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζουμε τις τάσεις κατά Von Mises για δύο τιμές της πίεσης και η σύγκριση δεν γίνεται αυτή τη φορά για την ίδια τιμή της μετατόπισης, αλλά στο σημείο του δρόμου ισορροπίας όπου το φορτίο μηδενίζεται και ο σωλήνας δεν μπορεί πλέον να απορροφήσει άλλη ενέργεια.

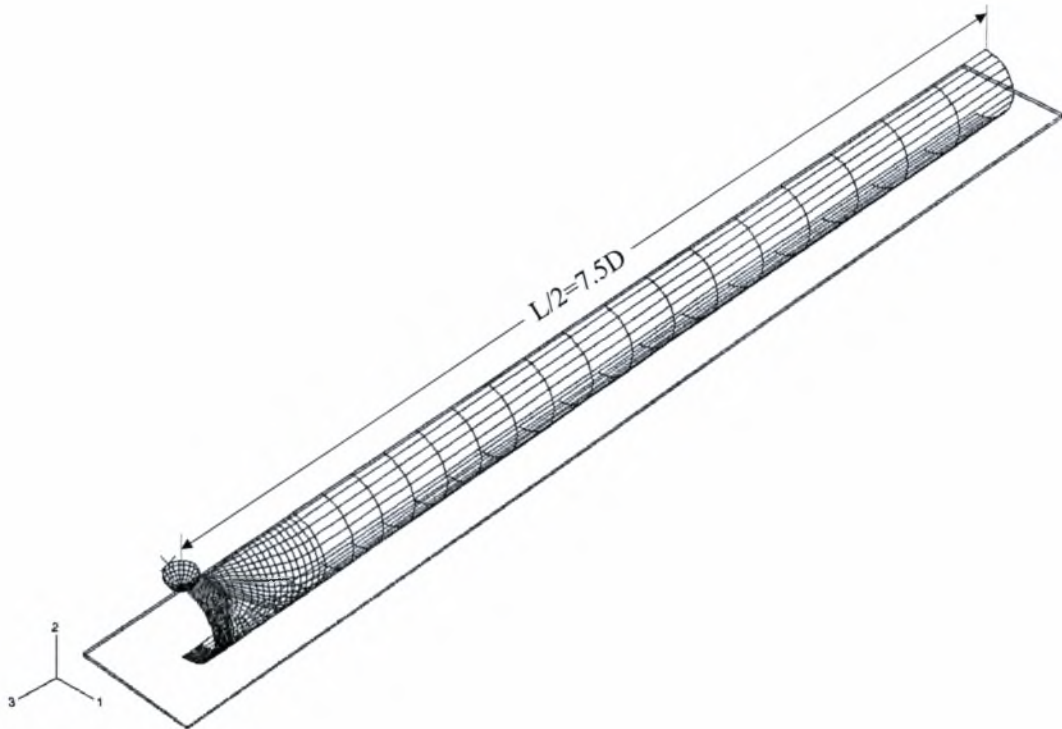


Σχήμα 4-10. Κατανομή των τάσεων κατά Von Mises για $p/p_e=0.326$ και $p/p_e=0.489$, σε σωλήνα μήκους $L=15D$, για το σημείο του ασταθή δρόμου ισορροπίας όπου μηδενίζεται η δύναμη.

Από το σχήμα βλέπουμε πως οι τάσεις είναι πολύ ισχυρές, ενώ μετά από αυτό το σημείο ο σωλήνας παραμορφώνεται σε όλο το μήκος χωρίς να απαιτείται πρόσθετη ενέργεια όπως περιγράφηκε για το φαινόμενο της διαδιδόμενης ύβωσης στο δεύτερο κεφάλαιο.

4.2 Αστοχία Χαλύβδινου Σωλήνα Υπό Την Επίδραση Διεισδυτή Μορφής Σφαίρας

Παρόμοια ανάλυση έγινε στο μακρύ σωλήνα ($L=15D$) διαφοροποιώντας τον διεισδυτή. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήσαμε ένα σφαιρικό διεισδυτή με διάμετρο $d=0.4D_{out}=4.8$ in. Ο σωλήνας στο κάτω μέρος του ακουμπά σε μία άκαμπτη πλάκα που μοντελοποιήθηκε με τον “pre-processor”, “Abaqus CAE”. Για την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία προσομοιώσαμε το $\frac{1}{4}$ του σωλήνα χρησιμοποιώντας 725 στοιχεία κελύφους, ενώ επιβάλαμε πύκνωση στην περιοχή εφαρμογής του φορτίου.



Σχήμα 4-11. Προσομοίωση κυλινδρικού κελύφους ($L=15D$) με σφαιρικό διεισδυτή.

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΤΗ-ΚΕΛΥΦΟΥΣ-ΠΛΑΚΑΣ

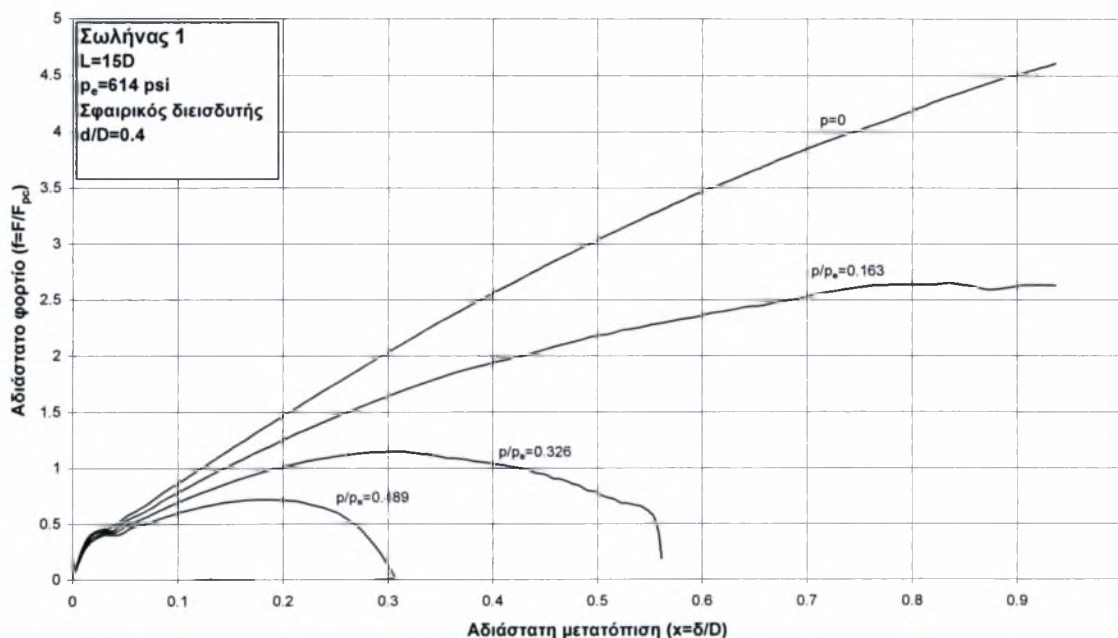
Η αλληλεπίδραση επαφής ανάμεσα στον διεισδυτή και το κέλυφος θεωρήθηκε χωρίς τριβή και για την προσομοίωση στο “Abaqus” χρησιμοποιήθηκε η εντολή “interaction”. Ο σφαιρικός διεισδυτής κατασκευάστηκε με την εντολή “analytical surface” από τον “pre-processor”, “Abaqus CAE” και θεωρήθηκε άκαμπτος, μέσω της εντολής “Rigid body”. Το φορτίο εφαρμόστηκε σε αυτό αφού πρώτα θεωρήσαμε ένα κόμβο αναφοράς (“reference point”).

4.2.1 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Περνάμε στη συνέχεια στα αποτελέσματα που πήραμε για εγκάρσια φόρτιση από το διεισδυτή τύπου λεπίδας. Κατασκευάσαμε ένα πρώτο βήμα (“step-1”) στο οποίο επιβάλαμε την πίεση και στη συνέχεια διατηρώντας αυτή σταθερή, επιβάλαμε το φορτίο (“step-2”). Οι τιμές της πίεσης που επιβάλαμε φαίνονται στον πίνακα 4-3.

Πίνακας 4-2. Τιμές της πίεσης που αναλύθηκαν με το Abaqus για την περίπτωση της εγκάρσιας φόρτισης.

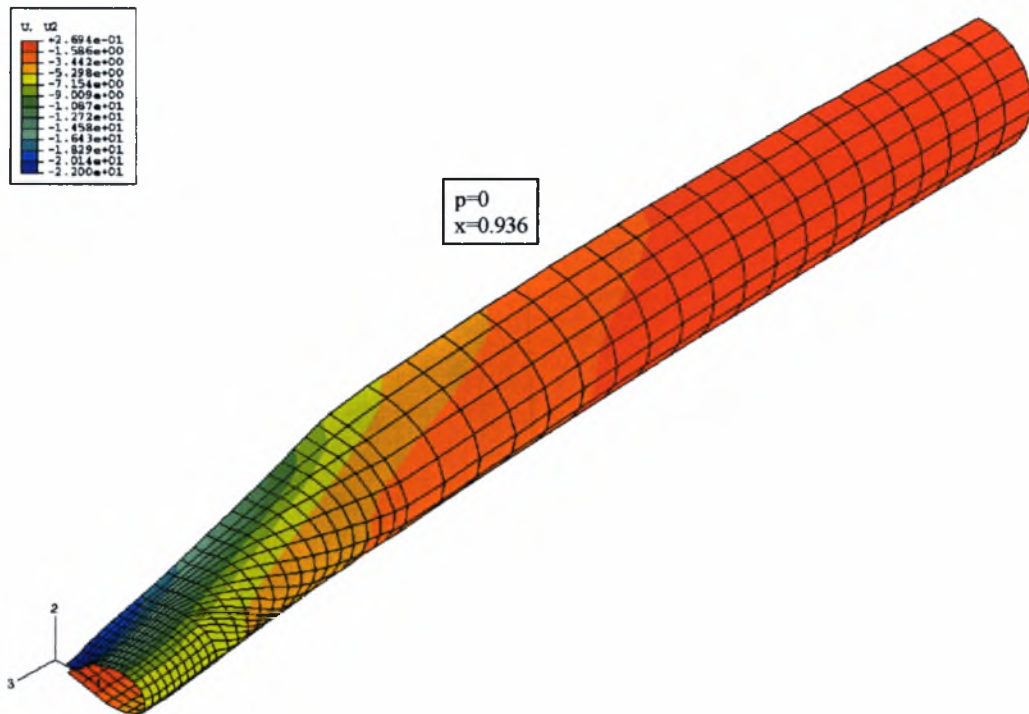
Απόλυτη τιμή p (psi)	p/p_c	$p/p_{cr} (L/D=15)$
0	0	0
100	0.163	0.163
200	0.326	0.326
300	0.489	0.489



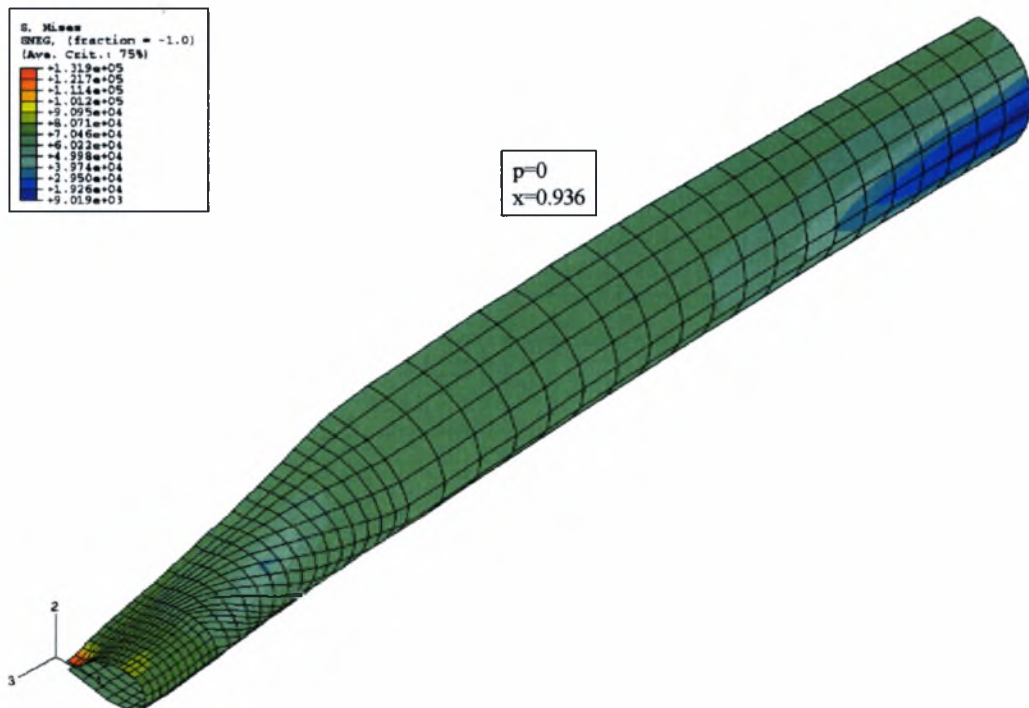
Σχήμα 4-12. Επίδραση της πίεσης σε σωλήνα μήκους $L=15D$ υπό φόρτιση σφαιρικού διεισδυτή.

Από το γράφημα βλέπουμε ότι για πολύ μικρή μετατόπιση ($x \approx 0.025$) η κλίση του φορτίου f μικραίνει απότομα λόγω πλαστικότητας και για ορισμένες τιμές της εξωτερικής πίεσης γίνεται αρνητική. Πολύ γρήγορα όμως το υλικό εργοσκληρύνεται και αρχίζει να συμμετέχει και η μεμβρανική λειτουργία στην αντίσταση του κελύφους έναντι διείσδυσης, επομένως το φορτίο αυξάνει. Ελλείψει πίεσης η αύξηση είναι μονοτονική. Με εφαρμογή μικρής πίεσης ($p/p_c=0.163$) το φορτίο μειώνεται καθώς και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, αλλά δεν δημιουργείται φαινόμενο αστάθειας. Για μεγαλύτερες όμως τιμές ($p/p_c=0.326$) η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας εμφανίζεται φανερά μειωμένη. Για τιμή της μετατόπισης του διεισδυτή, $x \approx 0.3$ δημιουργείται αστάθεια και ο δρόμος ισορροπίας προχωρά με αρνητική κλίση. Καθώς η μετατόπιση μεγαλώνει για τιμή $x \approx 0.56$ η κλίση γίνεται -90° και το κέλυφος καταστρέφεται ολοσχερώς χωρίς να μπορεί να απορροφήσει επιπλέον ενέργεια. Μεγαλύτερη αύξηση της πίεσης ($p/p_c=0.489$) συνεπάγεται, μείωση του μέγιστου φορτίου και της ενέργειας απορρόφησης.

Παρακάτω παρουσιάζουμε σύγκριση για διάφορες τιμές της πίεσης και την επίδραση τους στην παραμόρφωση του σωλήνα.



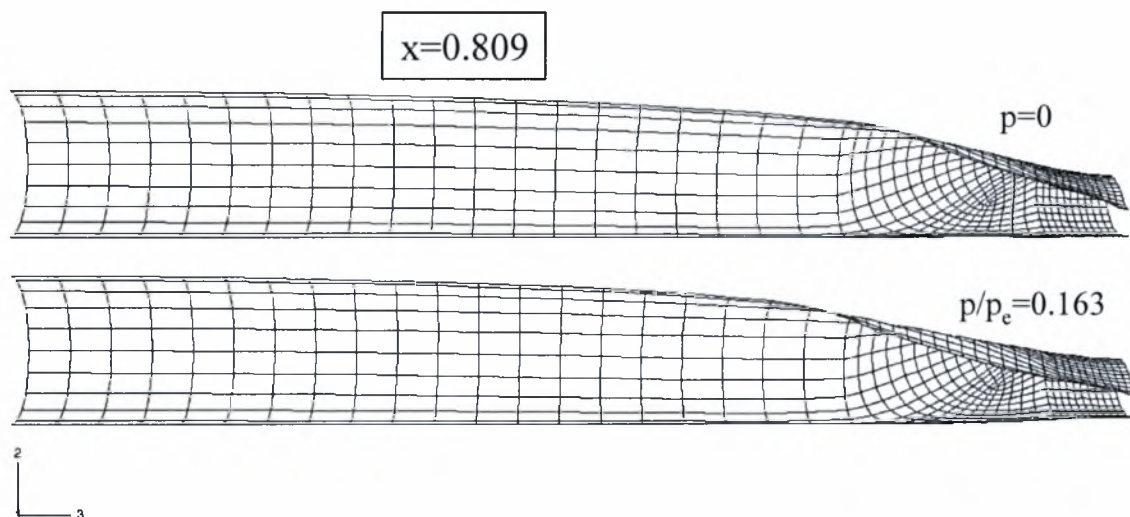
Σχήμα 4-13. Κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά τη διεύθυνση 2 για μηδενική πίεση και μετατόπιση του διεισδυτή $x=0.936$.



Σχήμα 4-14. Κατανομή των τάσεων κατά Von Mises για μηδενική πίεση και μετατόπιση του διεισδυτή $x=0.936$.

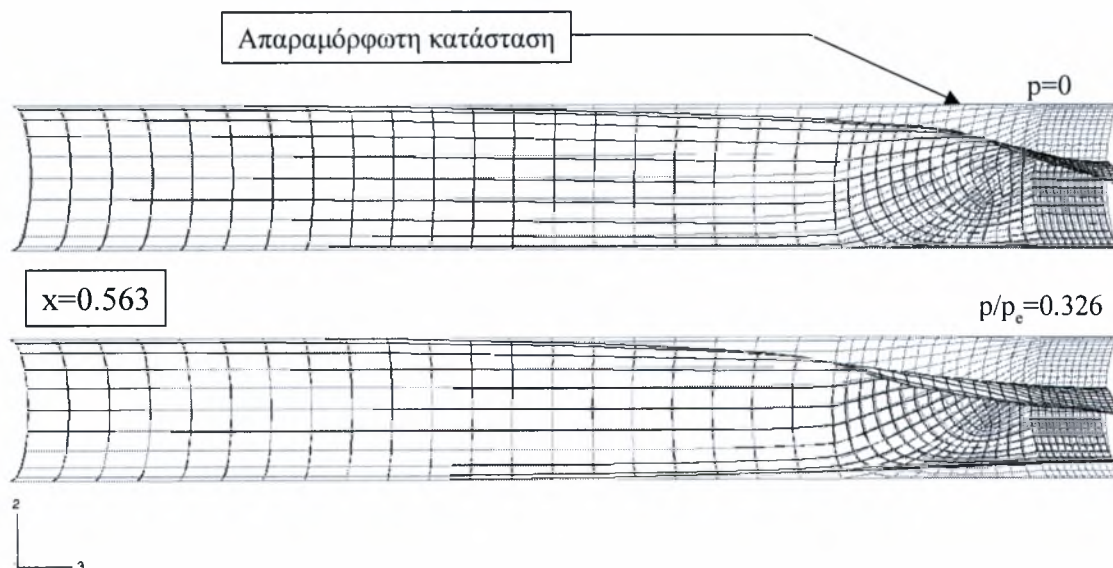
Από το σχήμα 4-13 βλέπουμε ότι το δεξί άκρο του σωλήνα ανασηκώνεται λίγο (κόκκινο χρώμα), λόγω της εγκάρσιας φόρτισης στο μέσο. Οι τάσεις Von Mises (Σχήμα 4-14) είναι ομοιόμορφες κατά μήκος του σωλήνα και οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται στο σημείο εφαρμογής του φορτίου.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε σύγκριση για διάφορες τιμές της πίεσης και βλέπουμε πως μεταβάλλεται η γεωμετρία στο σύνολο του σωλήνα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο επίπεδο 2-3 όπου φαίνεται καλύτερα η μεταβολή της γεωμετρίας της άνω γενέτειρας.



Σχήμα 4-15. Σύγκριση γεωμετρίας κυλινδρικών κελυφών στην διεύθυνση 2-3, για μηδενική πίεση και $p/p_e=0.163$.

Από τη σύγκριση βλέπουμε ότι η άνω γενέτειρα υπό την επίδραση της πίεσης παραμορφώνεται πιο ομαλά απ' ότι για μηδενική πίεση. Το αποτέλεσμα αυτό γίνεται ακόμα πιο εμφανές στην παρακάτω εικόνα όπου παραθέτουμε σύγκριση για μηδενική πίεση και $p/p_e=0.326$.



Σχήμα 4-16. Σύγκριση γεωμετρίας κυλινδρικών κελυφών στην διεύθυνση 2-3, για μηδενική πίεση και $p/p_e=0.326$.

Από το σχήμα παρατηρούμε την έντονη επίδραση της πίεσης στην άνω γενέτειρα του κελύφους. Παρατηρούμε επίσης ότι η κάτω γενέτειρα έχει την τάση να ανασηκωθεί και υπό την επίδραση της πίεσης η “αποκόλληση” παίρνει μεγαλύτερες τιμές.

4.3 Αστοχία Σωλήνα Ανοξειδωτου Χάλυβα (SS 304) Υπό Την Επίδραση Διεισδυτή Μορφής Σφαίρας

Σε μία παλαιότερη πειραματική εργασία οι Park & Kyriakides (1996) ανέλυσαν πειραματικά την απόκριση κυλινδρικών κελυφών υπό εγκάρσια φόρτιση. Τα πειράματα διεξήχθησαν με διαθέσιμα στο εμπόριο δοκίμια από ανοξειδωτο χάλυβα SS 304. Η διάταξη που χρησιμοποίησε είναι παρόμοια με αυτή που προσομοιώσαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Το κέλυφος φορτίζεται από ένα σφαιρικό διεισδυτή στο πάνω μέρος του σωλήνα, ενώ αυτός στηρίζεται (ακουμπά χωρίς να περιορίζεται η κίνηση του) από κάτω σε μία άκαμπτη πλάκα. Ανάμεσα στο σωλήνα και την πλάκα, τοποθετήθηκε ένα λεπτό ελαστικό επίθεμα για να αποτρέψει την στροφή του κελύφους κατά τα πρώτα στάδια της διείδυσης. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα πειράματα καθώς και από την ανάλυση που διεξήγαμε με πεπερασμένα στοιχεία. Για την ανάλυση χρησιμοποιήσαμε στοιχεία κελύφους (S4R). Παράλληλα επεκτείναμε αυτή την μελέτη για να συμπεριλάβουμε την επίδραση εξωτερικής και εσωτερικής πίεσης. Τα χαρακτηριστικά του σωλήνα που χρησιμοποιήθηκε είναι τα εξής:

ΣΩΛΗΝΑΣ 3

- $E=29900$ ksi (206.2 GPa)
- $\nu=0.3$
- $\sigma_y=54.08$ ksi (372.9 Mpa)
- $D_{out}=1.3$ in (33.02 mm)
- $t=0.0516$ in (1.31 mm)
- $D/t=24.2$
- $L=29D=36.221$ in (92 cm)

όπου E , ν , D_{out} , t , D/t , σ_y είναι το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος του Poisson, η εξωτερική διάμετρος, το πάχος, ο λόγος μέσης διαμέτρου προς πάχος και το όριο διαρροής αντίστοιχα.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ

Σύμφωνα με τους Park & Kyriakides (1996) η καμπύλη πραγματικής τάσης-λογαριθμικής παραμόρφωσης ακολουθεί το νόμο των Ramberg-Osgood σύμφωνα με τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \frac{3}{7} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y'} \right)^{n-1} \right] \quad (4.8)$$

Οι παράμετροι n και σ_y' θεωρήθηκαν για να προσομοιώσουν την πραγματική καμπύλη, $n=12.6$ και $\sigma_y'=50$ ksi. Στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία με το πρόγραμμα Abaqus χρησιμοποιήσαμε αυτές τις τιμές, ενώ θεωρήσαμε μοντέλο ιστροπικής κράτυνσης με κριτήριο διαρροής “Von Mises” (J_2 flow plasticity). Οι γεωμετρικές μη γραμμικότητες λήφθηκαν υπόψη με την υποεντολή “nlgeom” στην εντολή “step”.

4.3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Οι Park & Kyriakides χρησιμοποίησαν ένα σφαιρικό διεισδυτή του οποίου το μέγεθος θεωρήθηκε $d=0.4D$ ($d=0.5$ in), όπου d η διάμετρος του διεισδυτή και D η μέση διάμετρος του σωλήνα.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΧΑΡΑΞΗΣ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

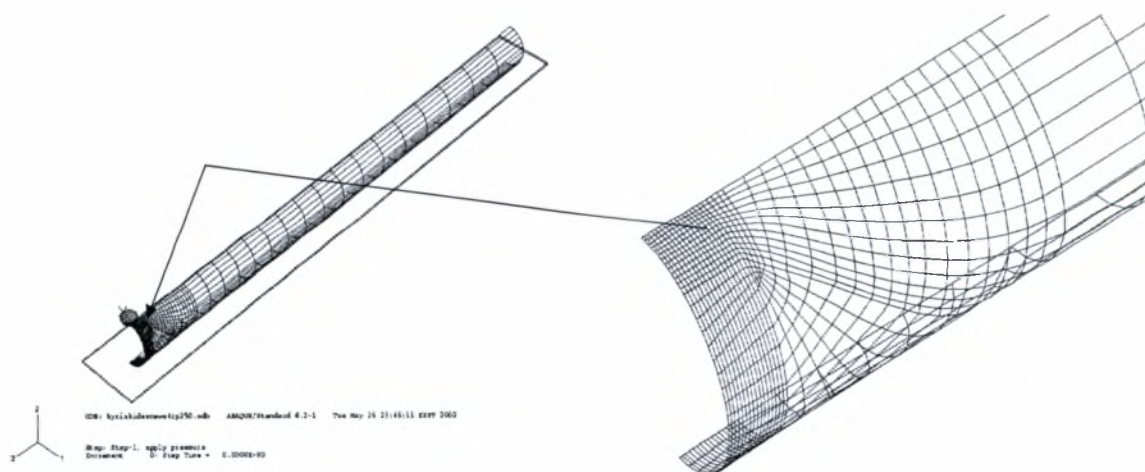
Για την αριθμητική επίλυση χρησιμοποιήθηκε έλεγχος μετατόπισης, “displacement control”, ενώ όταν επιβάλαμε και την πίεση για να επιτευχθεί σύγκλιση ήταν απαραίτητη η χρήση της μεθόδου Riks (μήκους-τόξου) λόγω της αστάθειας που δημιουργεί στο κέλυφος.

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΤΗ-ΚΕΛΥΦΟΥΣ-ΠΛΑΚΑΣ

Η αλληλεπίδραση επαφής ανάμεσα στον διεισδυτή και το κέλυφος θεωρήθηκε χωρίς τριβή και για την προσομοίωση στο “Abaqus” χρησιμοποιήθηκε η εντολή “interaction”. Ο σφαιρικός διεισδυτής κατασκευάστηκε με την εντολή “analytical surface” από τον “pre-processor”, “Abacus CAE” και θεωρήθηκε άκαμπτος, μέσω της εντολής “Rigid body”. Το φορτίο εφαρμόστηκε σε αυτό αφού πρώτα θεωρήσαμε ένα κόμβο αναφοράς (“reference point”).

Με τον ίδιο τρόπο (“analytical surface”) κατασκευάστηκε και η άκαμπτη πλάκα στην οποία στέκεται το κέλυφος. Σημειώνουμε βέβαια ότι θεωρήθηκε χωρίς τριβή και δεν προσομοιώσαμε το ελαστικό επίθεμα γιατί δεν είχαμε πληροφορίες για την συμπεριφορά του.

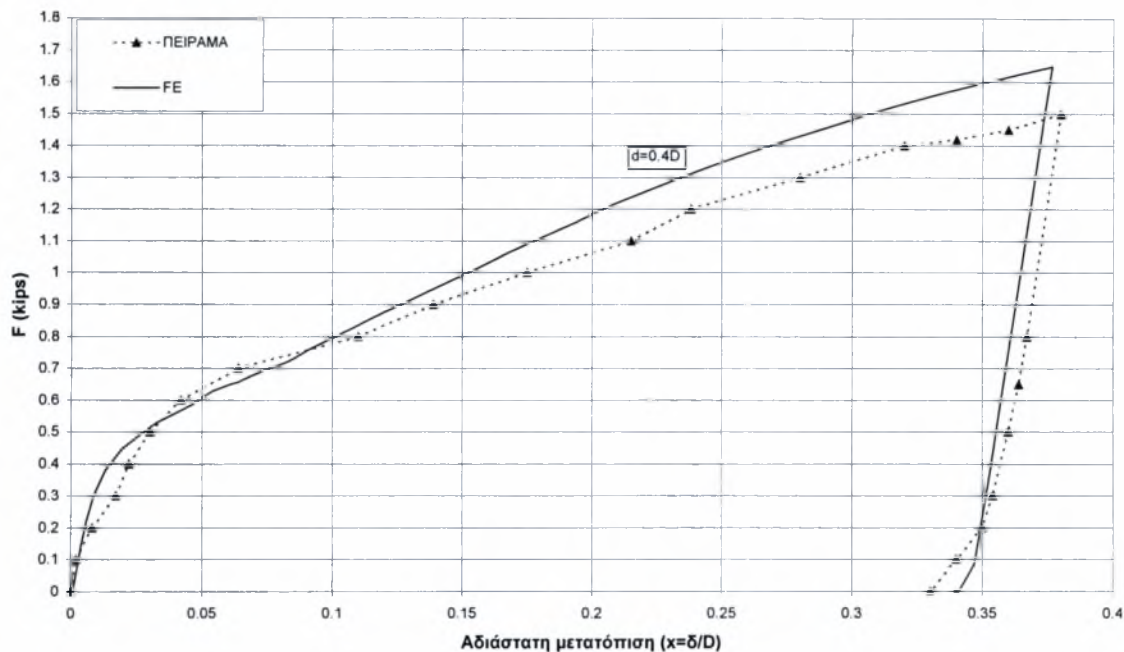
Τέλος, θεωρήσαμε αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων στο εσωτερικό του κελύφους. Έτσι για μεγάλες παραμορφώσεις και αν τα στοιχεία έρθουν σε επαφή η ανάλυση προχωρά κανονικά. Υπεισέρχεται και σε αυτό το σημείο ένα μικρό σφάλμα γιατί προσομοιώσαμε τα στοιχεία κελύφους σύμφωνα με τη μέση διάμετρο. Έτσι τα δύο σημεία του κελύφους αλληλεπιδρούν όταν έρθουν σε επαφή οι μέσες διαμέτροι και όχι οι εσωτερικές όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα.



Σχήμα 4-17. Προσομοίωση πλέγματος στο Abaqus για το χαλύβδινο σωλήνα SS-304. Δεξιά φαίνεται σε λεπτομέρεια η περιοχή όπου επιβάλαμε πύκνωση.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας [13] αρχικά έγινε διείδυση της σφαίρας σε βάθος $\delta_0=0.33D$ και στη συνέχεια επακολούθησε το στάδιο της αποφόρτισης. Αντίστοιχα προσομοιώσαμε αυτή την ανάλυση με το πρόγραμμα Abaqus όπου δημιουργήσαμε ένα βήμα (“step-1”) όπου επιβάλαμε τη φόρτιση και εν συνεχεία ένα δεύτερο βήμα (“step-2”) όπου αποφορτίσαμε. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 4-18).



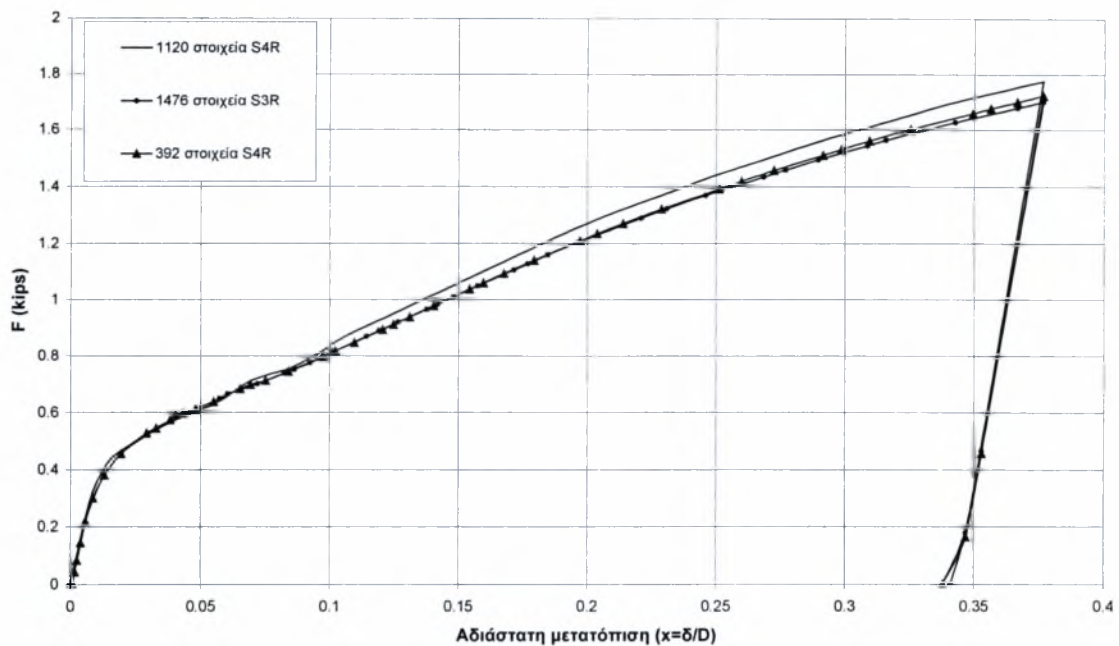
Σχήμα 4-18. Σύγκριση της πειραματικής λύσης με το Abaqus για χαλύβδινο σωλήνα 304.

Από το σχήμα 4-18 παρατηρούμε ότι η σύγκριση ανάμεσα στο πειράματα και την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία είναι αρκετά καλή. Ωστόσο εμφανίζονται κάποιες μικρές διαφορές που μπορεί να οφείλονται σε δύο λόγους. Είτε δεν είναι καλό το πλέγμα, είτε η θεώρηση της αλληλεπίδρασης χωρίς τριβή μεταξύ διεισδυτή-κελύφους-πλάκας προκαλεί αυτή τη διαφορά.

Για να διαβεβαιώσουμε ότι το πλέγμα που επιλέξαμε δίνει ακριβή στοιχεία διεξήγαμε παραμετρική μελέτη που παρουσιάζεται παρακάτω.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Το πλέγμα που κατασκευάσαμε του οποίου τα αποτελέσματα παρατέθηκαν παραπάνω (Σχήμα 4-18) αποτελείται από 1120 τετρακομβικά στοιχεία κελύφους (S4R). Κατασκευάσαμε επίσης ένα πλέγμα με 392 τετρακομβικά στοιχεία κελύφους (S4R) και περισσότερα στοιχεία στην περιοχή εφαρμογής του φορτίου. Τέλος δημιουργήσαμε ένα πλέγμα με 1476 τριγωνικά στοιχεία τριών κόμβων (S3R) με ολοκλήρωση 1x1. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 4-19).



Σχήμα 4-19. Ακρίβεια της λύσης για διάφορα στοιχεία κελύφους.

Από το σχήμα 4-19 βλέπουμε ότι τα στοιχεία που χρησιμοποιήσαμε δίνουν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα με τα τριγωνικά στοιχεία και έχουν πολύ καλή σύγκριση με το πλέγμα των 392 στοιχείων.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η όποια διαφορά παρατηρείται στο σχήμα 4-18 μεταξύ της πειραματικής λύσης και της ανάλυσης με το Abaqus οφείλεται στο γεγονός ότι δεν προσομοιώσαμε το ελαστικό επίθεμα πάνω στην άκαμπτη πλάκα (Πείραμα Park & Kyriakides (1996) και ότι θεωρήσαμε ότι δεν υπάρχει τριβή.

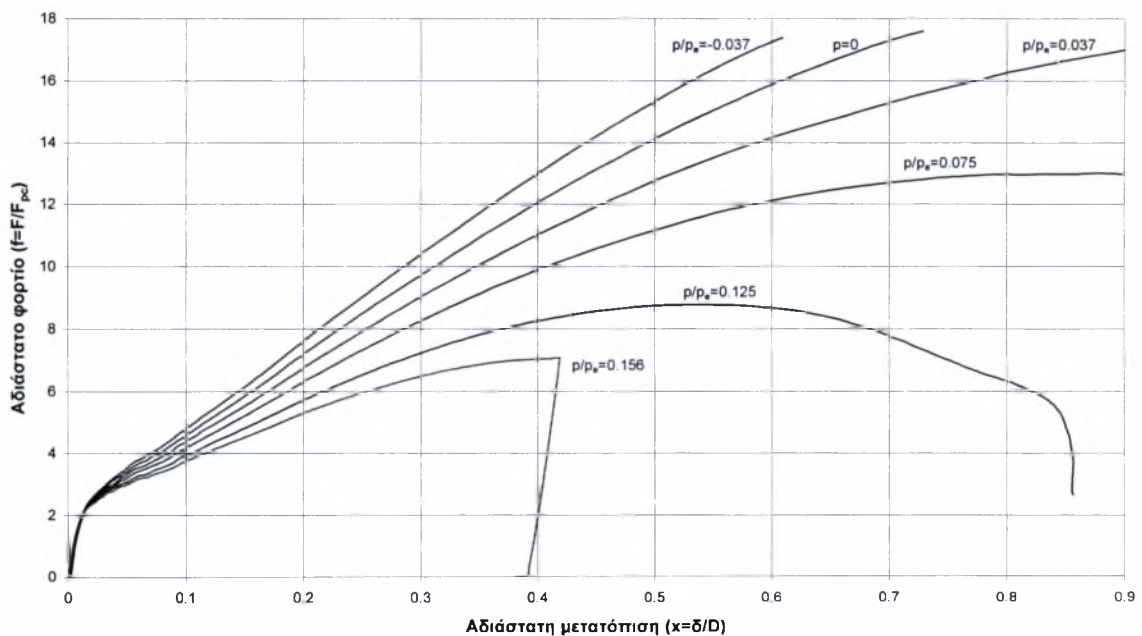
4.3.2 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΩΛΗΝΑ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ (SS 304) ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Η κρίσιμη ελαστική πίεση για απειρομήκες σωλήνα δίνεται από τη σχέση (4.5) και για την περίπτωση μας προκύπτει $p_e=4637$ psi. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που πήραμε για την περίπτωση του σφαιρικού διεισδυτή με διάμετρο $d_i=0.4D$. Αρχικά επιβάλαμε την πίεση (“step-1”) και στη συνέχεια διατηρώντας αυτή σταθερή επιβάλαμε το φορτίο (“step-2”). Οι τιμές της πίεσης που επιβάλαμε φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4-3).

Πίνακας 4-3. Τιμές της πίεσης που αναλόγησαν με το Abaqus για την περίπτωση της εγκάρσιας φόρτισης.

Απόλυτη τιμή p (psi)	p/p_e
0	0
174	0.037
348	0.075
580	0.125
752	0.156
-174	-0.037

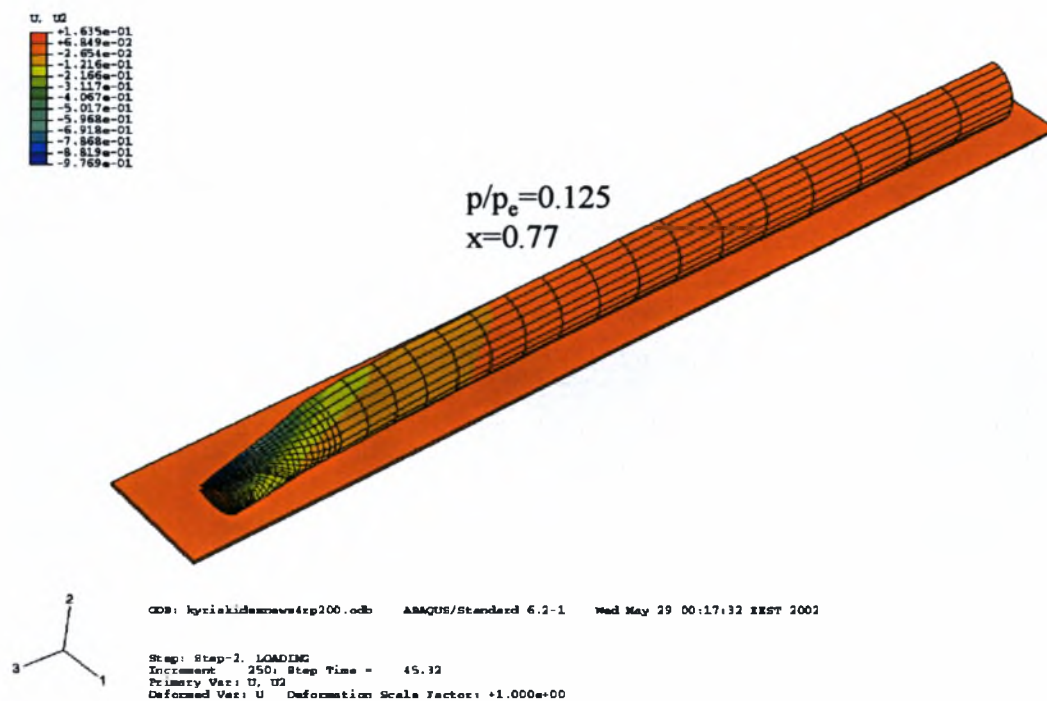
Παρακάτω παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που πήραμε για τις άνω τιμές της πίεσης (Σχήμα 4-20).



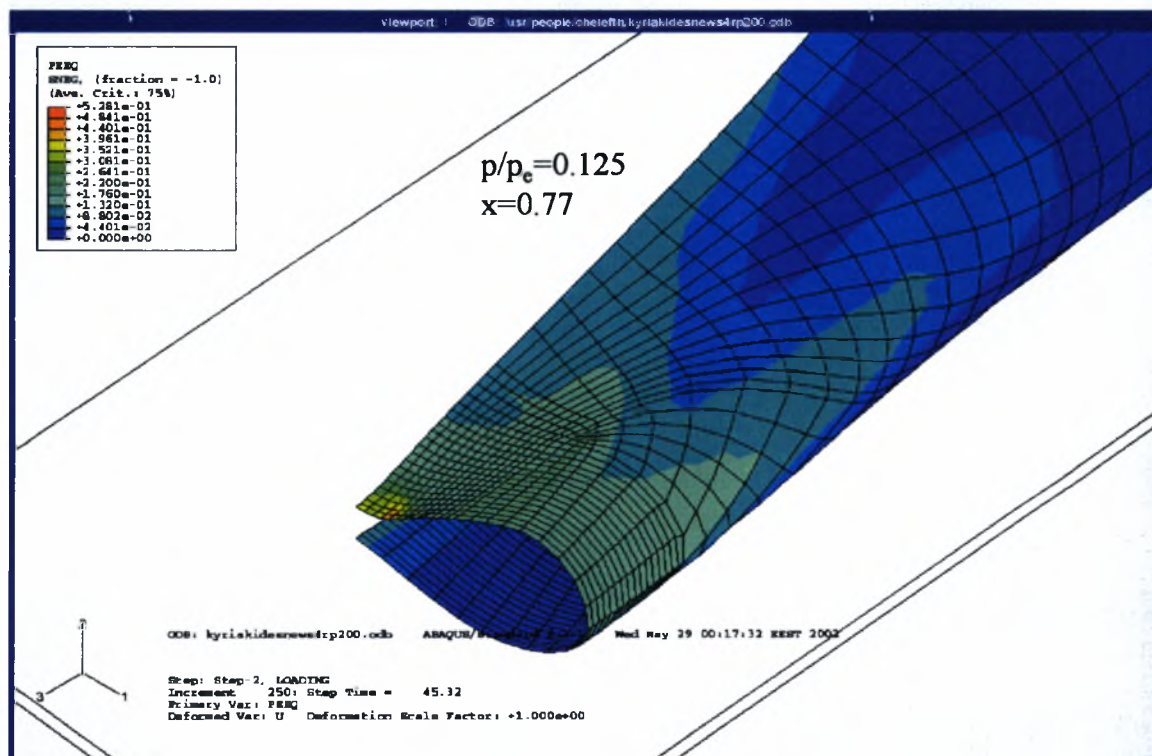
Σχήμα 4-20. Απόκριση χαλύβδινου σωλήνα για διάφορες τιμές της πίεσης.

Από το σχήμα 4-20 βλέπουμε ότι για σχετικώς μικρές τιμές της πίεσης (λιγότερο από 13% της κρίσιμη ελαστικής πίεσης) δημιουργείται αστάθεια και παρουσιάζεται οριακό φορτίο. Στη συνέχεια ο σωλήνας παραμορφώνεται με μικρότερα φορτία και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας μειώνεται πάρα πολύ. Για λίγο μεγαλύτερη πίεση ($p/p_e=0.156$) το οριακό φορτίο δεν μειώνεται πάρα πολύ, αλλά μόλις αυτό επιτευχθεί ο σωλήνας καταστρέφεται άμεσα χωρίς να απορροφά καθόλου πρόσθετη ενέργεια.

Από το σχήμα βλέπουμε ότι με την επιβολή ακόμη και μικρής εσωτερικής πίεσης ($p/p_e=-0.037$) η ακαμψία του κελύφους αυξάνεται και αντιστέκεται σημαντικά στην εγκάρσια φόρτιση.



Σχήμα 4-21. Κατανομή των μετατοπίσεων κατά την διεύθυνση 2 για $p/p_e=0.125$. Αδιάστατη μετατόπιση διεσδυτή $x=0.77$.



Σχήμα 4-22. Κατανομή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στο αριστερό άκρο του σωλήνα για πίεση $p/p_e=0.125$. Μετατόπιση του διεσδυτή $x=0.77$.

Από τα σχήματα 4-21 παρατηρούμε ότι ένα μεγάλο μέρος του σωλήνα παραμένει απαραμόρφωτο για μεγάλες τιμές της μετατόπισης του διεσδυτή. Επίσης από το

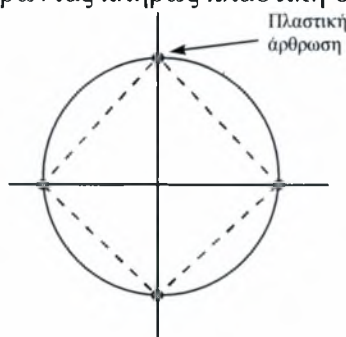
σχήμα 4-22 βλέπουμε ότι τα φαινόμενα πλαστικότητας επικεντρώνονται σε μια μικρή περιοχή του αριστερού άκρου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Κεφάλαιο 5- Αναλυτική προσέγγιση κυλινδρικών κελυφών υπό εγκάρσια φόρτιση και πίεση.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την απόκριση κυλινδρικών κελυφών μέσω της ανάλυσης με απλοποιητικά μοντέλα. Η απόκριση σωλήνων χάλυβα και αλουμινίου υπό την επίδραση εγκάρσιων φορτίων μελετήθηκε αρχικά πειραματικά και αναλυτικά χωρίς πίεση (Burton & Craig 1963, DeRuntz & Hodge 1963, Redwood 1964). Κίνητρο αυτής της εργασίας ήταν η χρήση σωλήνων ως μέσα απορρόφησης ενέργειας. Το φορτίο εξασκήθηκε με τη βοήθεια άκαμπτων πλακών και θεωρήθηκε σταθερό κατά την αξονική διεύθυνση του κελύφους. Η αναλυτική λύση βασίστηκε σε ένα θεωρητικό μοντέλο με τέσσερις πλαστικές αρθρώσεις κατά την εγκάρσια διατομή, θεωρώντας πλήρως πλαστική συμπεριφορά (σχήμα 1).



Σχήμα 5-1. Μηχανισμός κατάρρευσης με τέσσερις πλαστικές αρθρώσεις.

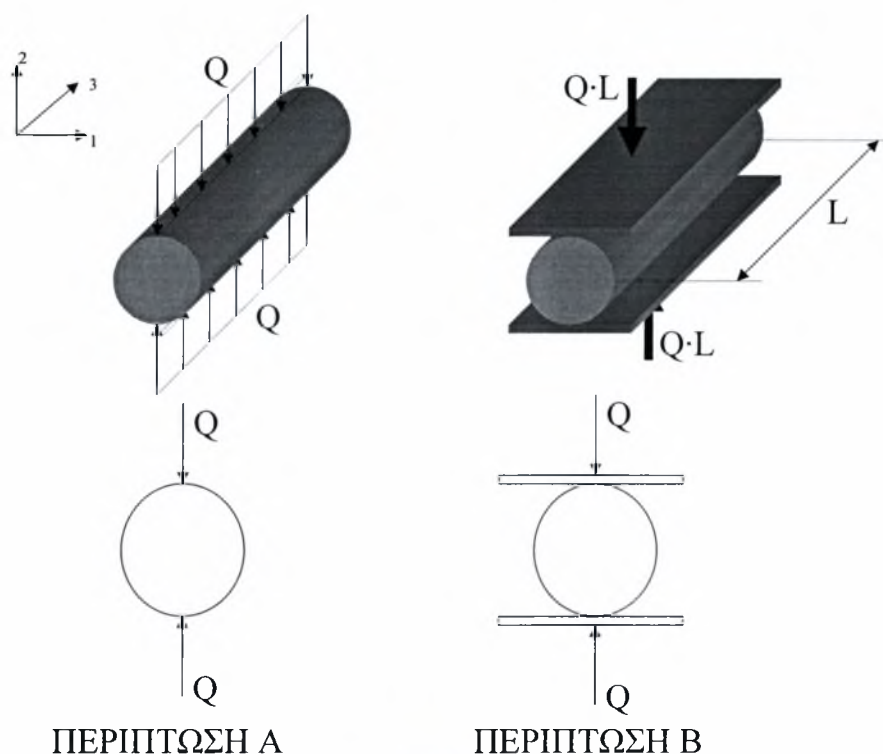
Οι Reid & Reddy (1978, 1979) συμπλήρωσαν αυτή την έρευνα λαμβάνοντας υπόψη την κράτνση που υφίσταται το υλικό κατά την παραμόρφωση (“plastica” model), βελτιώνοντας την εργασία του Redwood (1963). Κατέληξαν τελικά στο συμπέρασμα ότι η απόκριση είναι ευαίσθητη στις ιδιότητες του υλικού και στον λόγο της διαμέτρου προς το πάχος (D/t).

Σε μια επόμενη δημοσίευση οι Reid & Bell (1982), λαμβάνοντας και αυτοί υπόψη την κράτνση (“plastica” model theory), ερεύνησαν την απόκριση του σωλήνα υπό την επίδραση δύο συγκεντρωμένων αντιδιαμετρικών αξονικών φορτίων. Βρήκαν ότι λόγω της θέσης που εξασκείται το φορτίο, η ελαστοπλαστική συμπεριφορά είναι πιο “ασταθής” από αυτήν που δημιουργείται λόγω συμπίεσης του σωλήνα ανάμεσα σε δύο πλάκες. Η επίδραση της κράτνσης καθώς και ο λόγος της διαμέτρου προς το πάχος (D/t) μελετήθηκαν και σε αυτή την εργασία και έγιναν συγκρίσεις με τα αντίστοιχα πειράματα.

Στην παρούσα εργασία, η πρώτη έκδοση του συμμετρικού δισδιάστατου μοντέλου από τους Burton & Craig (1963), εμπλουτίστηκε ώστε να λάβουμε υπόψη την επίδραση της πίεσης και χρησιμοποιήθηκε για να προσφέρει μια προσεγγιστική λύση της απόκρισης κυλινδρικών κελυφών υπό την επίδραση της πίεσης και εγκάρσιας φόρτισης. Επιπλέον, έγινε επέκταση του δισδιάστατου προβλήματος σε τρεις διαστάσεις συμπεριλαμβάνοντας την επίδραση των αξονικών δυνάμεων. Αμφότερα τα μοντέλα (2D και 3D) έχουν ως σκοπό την παραγωγή συγκρίσιμων αποτελεσμάτων με αυτά των πεπερασμένων στοιχείων και την ανάδειξη των μηχανισμών εκείνων που προκαλούν την κατάρρευση του σωλήνα.

5.1 Δισδιάστατη Ανάλυση

Στη δισδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία (Κεφάλαιο 2) μελετήσαμε την περίπτωση της εγκάρσιας φόρτισης υπό την επίδραση δύο συγκεντρωμένων φορτίων (Περίπτωση Α) και της συμπίεσης ανάμεσα σε δύο άκαμπτες πλάκες (Περίπτωση Β). Οι δύο αυτές περιπτώσεις (Σχήμα 5-2) προσεγγίζονται αναλυτικά και σε αυτό το κεφάλαιο.



Σχήμα 5-2. Αντιδιαμετρικά συγκεντρωμένα φορτία (Περίπτωση Α) και συμπίεση μεταξύ πλακών (Περίπτωση Β) για το δισδιάστατο πρόβλημα.

Η ανάλυση του μοντέλου γίνεται σε δύο διαστάσεις θεωρώντας ένα απειρομήκης κέλυφος όπου η δύναμη είναι σταθερή κατά το μήκος. Με την παραδοχή ότι η αξονική παραμόρφωση είναι μηδενική ($\epsilon_{33}=0$, όπου x_3 είναι ο άξονας κατά μήκος του κυλίνδρου) καταλήγουμε σε δισδιάστατο μοντέλο επίπεδης παραμόρφωσης.

Στην μαθηματική προσέγγιση που ακολουθούμε είναι απαραίτητο να τροποποιήσουμε το όριο διαρροής για τη δική μας περίπτωση φόρτισης. Η τάση διαρροής κατά την περιφέρεια του κελύφους σ_θ εξαρτάται από τις τάσεις κατά την ακτινική και την αξονική κατεύθυνση. Εξηγήσαμε ήδη ότι λόγω επίπεδης παραμόρφωσης η αξονική παραμόρφωση είναι μηδενική. Επιπρόσθετα η ακτινική τάση θεωρείται και αυτή μηδενική από την κλασική θεωρία για τα κελύφη. Έτσι, αμελώντας τις διατμητικές τάσεις, έχουμε:

$$\epsilon_{33} = \epsilon_x = 0 \Rightarrow \sigma_x = \nu_s \sigma_\theta$$

όπου ν_s είναι ο γενικευμένος λόγος του Poisson για ελαστο-πλαστική συμπεριφορά. Για αυτή την κατάσταση της διαξονικής έντασης (σ_x και σ_θ) και λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω σχέση, το κριτήριο διαρροής “Von Mises” δίνει την τάση διαρροής κατά την περιφέρεια :

$$\sigma_\theta \equiv \sigma_y^* = \frac{\sigma_y}{\sqrt{1 + \nu_s - \nu_s^2}} > \sigma_y$$

όπου σ_y είναι το όριο διαρροής για μονοαξονικό εφελκυσμό. Η τιμή του ν_s κυμαίνεται από 0.30 για πλήρως ελαστική συμπεριφορά, έως 0.50 για πλήρως πλαστική συμπεριφορά. Έτσι η τάση διαρροής πολλαπλασιάζεται από ένα συντελεστή μεγέθυνσης με εύρος 1.12 έως 1.15. Στην περίπτωση μας υιοθετείται η τιμή 1.15 για πλήρως πλαστική συμπεριφορά, δηλαδή $\sigma_y^* = 1.15\sigma_y$.

Η ελαστική ανάλυση για πραγματικές περιπτώσεις σωληνώσεων ισχύει μόνο για μικρές παραμορφώσεις και σε πολλές περιπτώσεις αυτή δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψη. Παρ' όλα αυτά τη συμπεριλαμβάνουμε για να έχουμε την πλήρη απόκριση του μοντέλου, αλλά κυρίως για να ελέγξουμε την ακρίβεια του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων. Στα δύο μοντέλα που εξετάζουμε (Περίπτωση A & Περίπτωση B), η ελαστική συμπεριφορά μέχρι να πλαστικοποιηθούν οι αρθρώσεις είναι η ίδια και παρουσιάζεται παρακάτω.

Η ελαστική λύση για ένα απειρομήκες σωλήνα που συμπιέζεται από δύο αντιδιαμετρικά εγκάρσια κατανεμημένα φορτία δόθηκε από τους Timoshenko & Gere (1961):

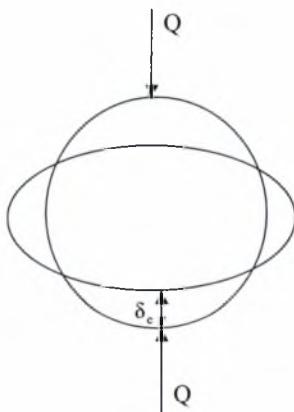
$$Q_{el}(\delta) = 1.12 \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{R}\right)^3 \delta \quad (5.1)$$

όπου E, ν , t και R είναι το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος του Poisson, το πάχος του κελύφους και η ονομαστική του ακτίνα αντίστοιχα, ενώ ο δείκτης $[\cdot]_{el}$ δείχνει την ελαστική συμπεριφορά.

Η εξωτερική πίεση σε συνδυασμό με το φορτίο τείνει να προκαλέσει λυγισμό του δακτυλίου δίνοντας σε αυτό ωοειδές σχήμα (Σχήμα 5-3). Θεωρώντας γραμμική θεωρεία ευστάθειας η κρίσιμη ελαστική πίεση του δακτυλίου δίνεται από τον παρακάτω τύπο του Timoshenko:

$$p_e = \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{D}\right)^3 \quad (5.2)$$

όπου D η ονομαστική διάμετρος του κελύφους.



Σχήμα 5-3. Ελαστική παραμόρφωση του σωλήνα υπό την επίδραση πίεσης και εγκάρσιας φόρτισης.

Η πίεση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ακαμψίας του μοντέλου, έτσι ώστε για την ίδια δύναμη να παίρνουμε μεγαλύτερη παραμόρφωση με αύξηση της πίεσης. Ένας τρόπος για να προσομοιώσουμε αυτή την επίδραση είναι πολλαπλασιάζοντας την ακαμψία με ένα συντελεστή μεγέθυνσης. Ένας τέτοιος συντελεστής δόθηκε από τους Timoshenko & Gere (1933) και ισούται με:

$$\frac{1}{1-p/p_e} \quad (5.3)$$

όπου p είναι η εφαρμοζόμενη πίεση και p_e είναι η κρίσιμη ελαστική πίεση, όπως δίνεται από την εξίσωση (5.2).

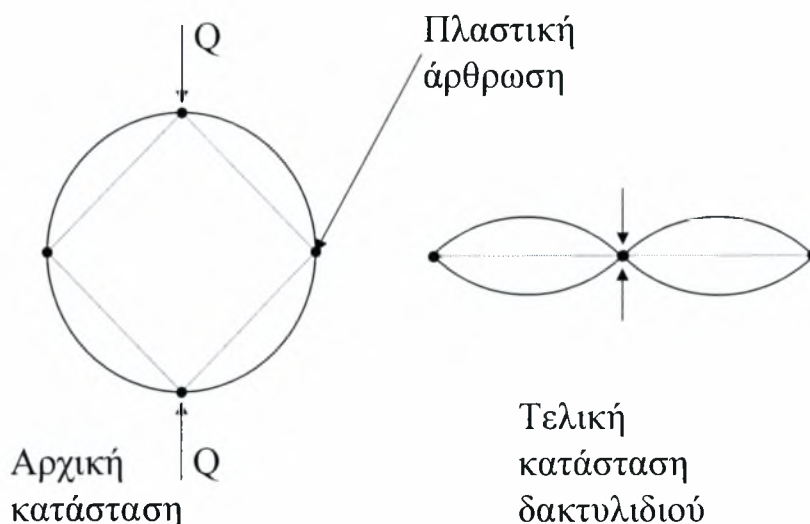
Με εφαρμογή του συντελεστή μεγέθυνσης στην εξίσωση (5.1) έχουμε:

$$Q_{ei}(\delta) = 1.12 \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{R}\right)^3 \left(1 - \frac{p}{p_e}\right) \delta \quad (5.4)$$

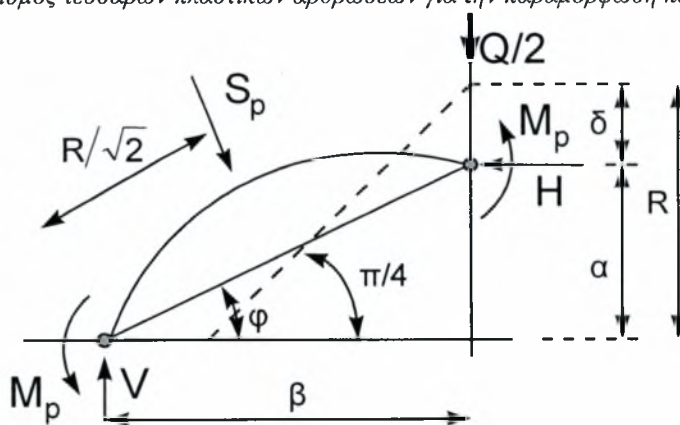
Η ελαστική ανάλυση που περιγράψαμε υποθέτει ότι ακόμη και για μεγάλες παραμορφώσεις η ακαμψία παραμένει πάντα θετική. Αυτό βέβαια δεν ισχύει για πραγματικές κατασκευές. Στις συνήθεις περιπτώσεις πετρελαιαγωγών χρησιμοποιούνται σχετικά παχείς σωλήνες που έχουν λόγο διαμέτρου προς ακτίνα (D/t) σε ένα εύρος τιμών μεταξύ 20 και 50. Η συμπεριφορά αυτών των κελυφών είναι ισχυρά ανελαστική και οδηγούν στη μείωση της ακαμψίας, μειώνοντας τελικά τη συνολική ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί.

5.1.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Α (Αστοχία Υπό Την Επίδραση Αντιδιαμετρικών Εγκάρσιων Συγκεντρωμένων Φορτίων)

Στο Σχήμα 5-4 φαίνεται το μοντέλο στην αρχική και στην παραμορφωμένη κατάσταση που έχει καταρρεύσει, ενώ στο Σχήμα 5-5 βλέπουμε το διάγραμμα ελευθέρου σώματος για το $1/4$ του δακτυλίου.



Σχήμα 5-4. Μηχανισμός τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων για την παραμόρφωση κατά την κατάρρευση.



Περίπτωση Α (2D)

Σχήμα 5-5. Ισορροπία στην παραμορφωμένη κατάσταση για την περίπτωση φόρτισης Α.

Στο άνω σχήμα S_p είναι η συνισταμένη της πίεσης που ασκείται πάντα κάθετα στην επιφάνεια, Q είναι η εγκάρσια δύναμη και φ η γωνία κατά την οποία έχει στραφεί το

μοντέλο. M_p , H και V είναι οι εσωτερικές αντιδράσεις της ροπής στην πλαστική άρθρωση και της κάθετης δύναμης αντίστοιχα. Οι κινηματικές σχέσεις για το πρόβλημα προκύπτουν με απλή γεωμετρία από το παραπάνω σχήμα. Αδιαστατοποιούμε τη βύθιση δ σύμφωνα με τη σχέση:

$$x = \frac{\delta}{R} \quad (5.5)$$

οπότε:

$$a = R - \delta = R(1 - x) \quad (5.6)$$

$$\beta^2 + \alpha^2 = 2R^2 \Leftrightarrow \beta^2 = 2R^2 - \alpha^2 = 2R^2 - R^2(1 - x)^2 \Rightarrow$$

$$\beta = R\sqrt{2 - (1 - x)^2} = R\sqrt{2 - 1 + 2x - x^2} \Leftrightarrow$$

$$\beta = R\sqrt{1 + 2x - x^2} \quad (5.7)$$

$$\tan(\phi) = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{1 - x}{\sqrt{1 + 2x - x^2}} \quad (5.8)$$

ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (Τέλεια Πλαστικότητα)

Ισορροπία δυνάμεων κατά τη x-διεύθυνση:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow H = S_p \sin \phi \quad (5.9)$$

Ισορροπία δυνάμεων κατά τη y-διεύθυνση:

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow \frac{Q}{2} + S_p \cos \phi = V \quad (5.10)$$

Ισορροπία ροπών στην πλαστική άρθρωση που εφαρμόζεται η V:

$$\sum M = 0 \Rightarrow \frac{Q}{2} \beta - Ha + S_p e = 2M_p \Leftrightarrow \frac{Q}{2} \beta = 2M_p - [F_p e - Ha] \quad (5.11)$$

Η συνισταμένη δύναμη πίεσης βρίσκεται από το επιφανειακό ολοκλήρωμα κατά μήκος του τεταρτοκυκλίου:

$$S_p = \int_{-\pi/4}^{\pi/4} pR \cos \theta d\theta = pR \int_{-\pi/4}^{\pi/4} \cos \theta d\theta \Rightarrow$$

$$S_p = pR\sqrt{2} \quad (5.12)$$

Έτσι η σχέση (5.11) γίνεται με τη βοήθεια της (5.12) γίνεται:

$$\frac{Q}{2} \beta = 2M_p - pR\sqrt{2}R \frac{\sqrt{2}}{2} + pR\sqrt{2} \alpha \sin \phi \Leftrightarrow$$

$$Q = \frac{4M_p}{\beta} - \frac{2pR^2}{\beta} + 2 \frac{pR\sqrt{2}}{\beta} a \sin \phi \quad (5.13)$$

Αδιαστατοποιούμε το φορτίο Q με το $Q_{pc} = \sigma_y^* \frac{t^2}{R}$, όπου σ_y^* το όριο ροής για κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης, t το πάχος του κελύφους και D η διάμετρος αυτού. Προκύπτει έτσι το αδιάστατο φορτίο $q_{pl} = \frac{Q}{Q_{pc}}$. Για την πλαστική ροπή στην

άρθρωση ισχύει ότι $M_p = \sigma_y^* \frac{t^2}{4} b$ και με την βοήθεια των σχέσεων (5.6) και (5.7) για τα α και β αντίστοιχα η εξίσωση (5.13) γίνεται:

$$q_{pl} \sigma_y \frac{t^2}{R} = \frac{\sigma_y^* t^2}{R \sqrt{1+2x-x^2}} - \frac{2pR^2}{R \sqrt{1+2x-x^2}} + \frac{2pR\sqrt{2}}{R \sqrt{1+2x-x^2}} (1-x) \frac{1-x}{\sqrt{1+2x-x^2}} \Leftrightarrow$$

$$q_{pl} = \frac{1}{\sqrt{1+2x-x^2}} - \frac{pD}{t \sqrt{1+2x-x^2}} \frac{R}{\sigma_y^* t} + \frac{2p(1-x)^2 R}{t \sqrt{1+2x-x^2}} \frac{R}{\sigma_y^* t} \quad (5.14)$$

Η πίεση διαρροής είναι $p_y = \frac{\sigma_y^* t}{R}$, οπότε η σχέση (5.14) παίρνει τη μορφή:

$$q_{pl} = \frac{1}{\sqrt{1+2x-x^2}} - \frac{pD}{t \sqrt{1+2x-x^2}} \frac{1}{p_y} + \frac{p(1-x)^2}{t \sqrt{1+2x-x^2}} \frac{1}{p_y} \Leftrightarrow$$

$$q_{pl} = \frac{1}{\sqrt{1+2x-x^2}} \left[1 - \frac{p}{p_y} \left(\frac{D}{t} \right) + \frac{p}{p_y} \frac{(1-x)^2 D}{t} \right] \Leftrightarrow$$

$$q_{pl} = \frac{1}{\sqrt{1+2x-x^2}} \left[1 - \frac{p}{p_y} \left(\frac{D}{t} \right) (2x-x^2) \right] \quad (5.15)$$

Με την αδιαστατοποίηση που περιγράψαμε παραπάνω για την πλαστική λύση τροποποιείται και η εξίσωση (5.4) για την ελαστική απόκριση:

$$q_{el} = \left[\frac{2.24E}{\sigma_y^* (1-\nu^2)} \left(\frac{t}{D} \right) \right] \left[1 - \frac{p}{p_c} \right] x \quad (5.16)$$

Ο δρόμος ισορροπίας για το μοντέλο προκύπτει από τον συνδυασμό της ελαστικής και της πλαστικής λύσης έτσι ώστε:

$$q(x) = \min [q_{el}(x), q_{pl}(x)] \quad (5.17)$$

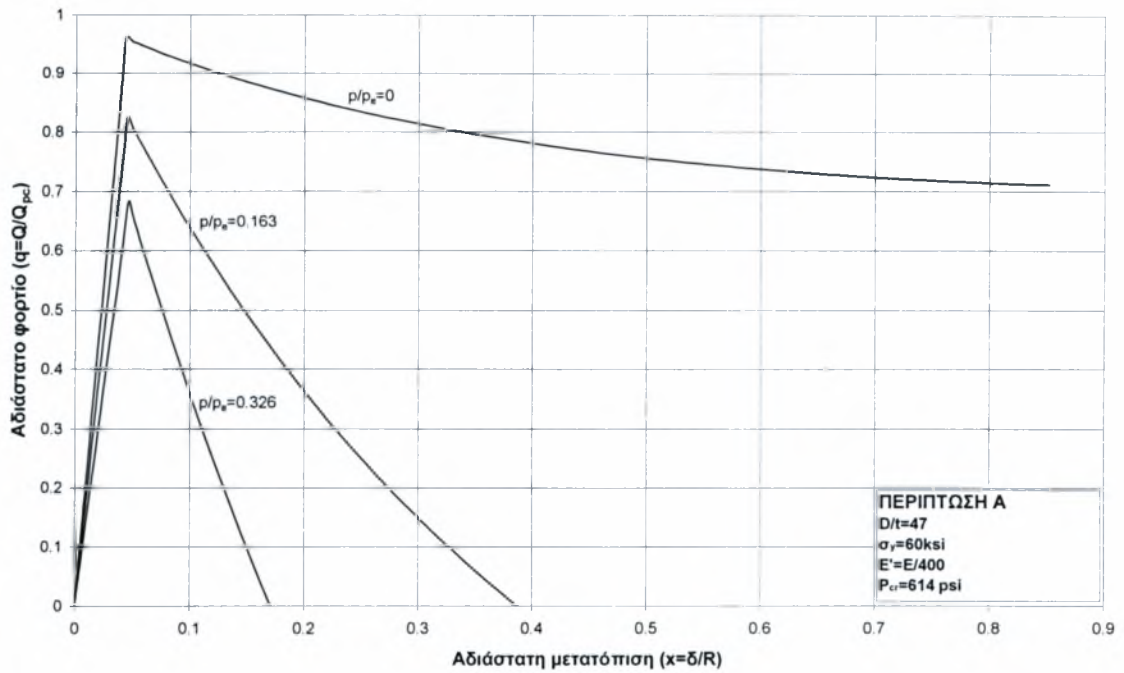
5.1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Α ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στο γράφημα που ακολουθεί (Σχήμα 5-6) παρουσιάζουμε το δρόμο ισορροπίας για το Σωλήνα 1 που μελετήσαμε στο Κεφάλαιο 2 όπως προκύπτει από την εξίσωση (5.17) και στο σχήμα 5-7 παρουσιάζεται σύγκριση με τα αποτελέσματα για τα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης (CPE8R).

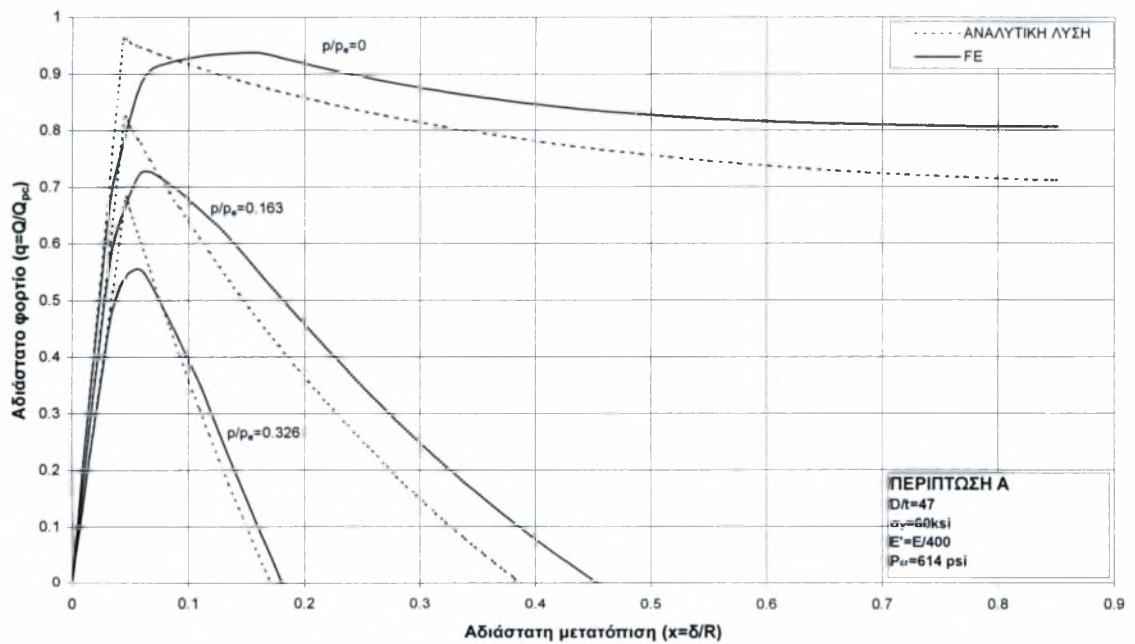
ΣΩΛΗΝΑΣ 1

- E=29000 ksi
- ν=0.3
- D/t=47
- $\sigma_y=60$ ksi

όπου E,ν,D/t,σ_y είναι το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος του Poisson, ο λόγος διαμέτρου προς ακτίνα και το όριο διαρροής αντίστοιχα.



Σχήμα 5-6. Αναλυτική απόκριση του σωλήνα I. Σύγκριση για διάφορες τιμές της πίεσης.

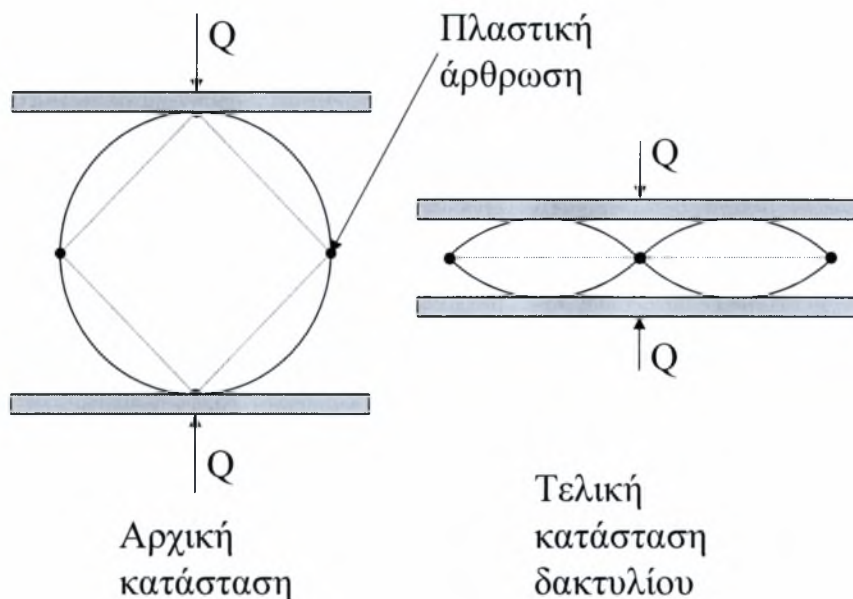


Σχήμα 5-7. Σύγκριση αναλυτικής λύσης με τα πεπερασμένα στοιχεία για διάφορες τιμές της πίεσης.

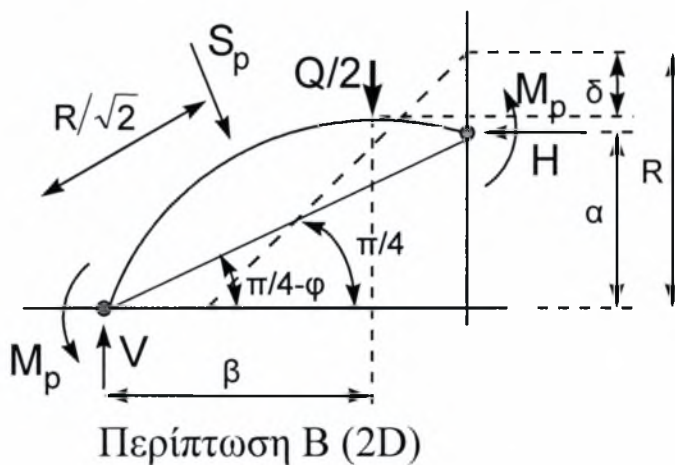
Η σύγκριση είναι πολύ καλή, ως προς το ελαστικό μέρος και το μεταλυσισμικό μέρος του δρόμου ισορροπίας. Η αναλυτική λύση δεν εκτιμά σωστά το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο σωλήνας στην περίπτωση της πίεσης, επειδή δεν εκτιμά την ομαλή μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική λύση. Παρ' όλα αυτά η σύγκριση είναι ικανοποιητική, λαμβάνοντας υπόψη τις απλουστεύσεις του μοντέλου των τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων.

5.1.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Β (Αστοχία Με Συμπίεση Ανάμεσα Σε Δύο Άκαμπτες Πλάκες)

Στο Σχήμα 5-8 φαίνεται το μοντέλο στην αρχική και την τελική κατάσταση όπου έχει καταρρεύσει για την περίπτωση της φόρτισης ανάμεσα σε πλάκες. Στο Σχήμα 5-9 βλέπουμε το διάγραμμα ελευθέρου σώματος για το 1/4 του δακτυλίου.



Σχήμα 5-8. Μηχανισμός τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων για την παραμόρφωση κατά την κατάρρευση



στην περίπτωση φόρτισης B.

Σχήμα 5-9. Ισοροπία στην παραμορφωμένη κατάσταση για την περίπτωση φόρτισης B

Οι κινηματικές σχέσεις προκύπτουν από το άνω σχήμα ως εξής:

$$a = \sin\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right) R\sqrt{2} \quad (5.18)$$

$$\beta = R\sqrt{1 - x^2} \quad (5.19)$$

ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Ισοροπία δυνάμεων κατά την x-διεύθυνση:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow H = S_p \sin\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right) \quad (5.20)$$

Ισοροπία κατά την y-διεύθυνση:

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow \frac{Q}{2} + S_p \cos(\phi) = V \quad (5.21)$$

Ισοροπία ροπών στην πλαστική άρθρωση που εφαρμόζεται το V:

$$\sum M = 0 \Rightarrow \frac{Q}{2} \beta - H\alpha + S_p R \sqrt{2} = 2M_p$$

Αλλά $S_p = pR\sqrt{2}$ οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\frac{Q}{2} \beta = 2M_p - pR^2 + 2pR^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right) \quad (5.22)$$

Επίσης ισχύει για την πλαστική ροπή στην άρθρωση $M_p = \sigma_y^* \frac{t^2}{4}$ και αδιαστατοποιώντας όπως και στην περίπτωση Α το φορτίο Q με το $Q_{pc} = \sigma_y^* \frac{t^2}{D}$,

($q_{pl} = \frac{Q}{Q_{pc}}$) η εξίσωση (5.22) γίνεται:

$$q_{pl} = \frac{R}{\beta} - pR^2 \frac{2R}{\beta \sigma_y^* t^2} + 2pR^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} - \omega\right) \frac{2R}{\beta \sigma_y^* t^2} \quad (5.23)$$

Όμως για την κρίσιμη πίεση διαρροής ισχύει:

$$p_y^* = \frac{\sigma_y^* t}{R} \quad (5.24)$$

οπότε η σχέση (5.23) γίνεται:

$$q_{pl} = \frac{R}{\beta} - pR^2 \frac{2}{\beta t p_y^*} + 2pR^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4} - \omega\right) \frac{2}{\beta t p_y^*} \quad (5.25)$$

ΤΡΙΓΩΝΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \omega\right) = \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \cos(\omega) - \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \sin(\omega) \\ \sin \omega = \frac{\delta}{R} = x \\ \cos(\omega) = \sqrt{1 - \sin^2(\omega)} = \sqrt{1 - x^2} \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sin\left(\frac{\pi}{4} - \omega\right) = \frac{\sqrt{2}}{2} (\sqrt{1 - x^2} - x) \quad (5.26)$$

Επίσης ισχύει ότι:

$$\beta = R \cos(\omega) = R \sqrt{1 - x^2} \quad (5.27)$$

Με τη βοήθεια των σχέσεων (5.26) και (5.27) η εξίσωση (5.25) γίνεται:

$$q_{pl} = \frac{1}{\sqrt{1 - x^2}} - \frac{p}{p_y^*} \frac{2R}{t\sqrt{1 - x^2}} + \frac{p}{p_y^*} \frac{2R}{t\sqrt{1 - x^2}} (\sqrt{1 - x^2} - x)^2 \Leftrightarrow$$

$$q_{pl} = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \left[1 - \frac{p}{p_y^*} \left(\frac{D}{t} \right) 2x\sqrt{1-x^2} \right] \quad (5.28)$$

Η άνω σχέση μας δίνει την πλαστική απόκριση του σωλήνα υπό συμπίεση ανάμεσα σε δύο πλάκες. Η ελαστική απόκριση αυτού, προκύπτει όπως και στην Περίπτωση Α σύμφωνα με τη σχέση:

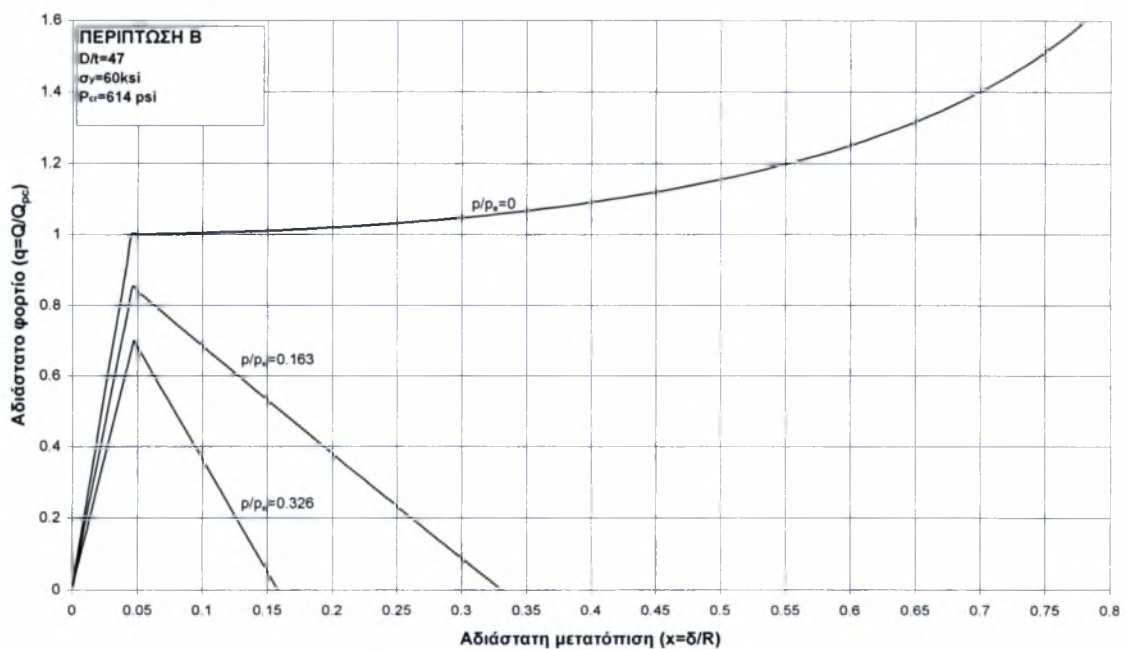
$$q_{el} = \left[\frac{2.24E}{\sigma_y^*(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{D} \right) \right] \left(1 - \frac{p}{p_e} \right) x \quad (5.29)$$

Ο δρόμος ισορροπίας για το μοντέλο προκύπτει από τον συνδυασμό της ελαστικής και της πλαστικής λύσης έτσι ώστε:

$$q(x) = \min [q_{el}(x), q_{pl}(x)] \quad (5.30)$$

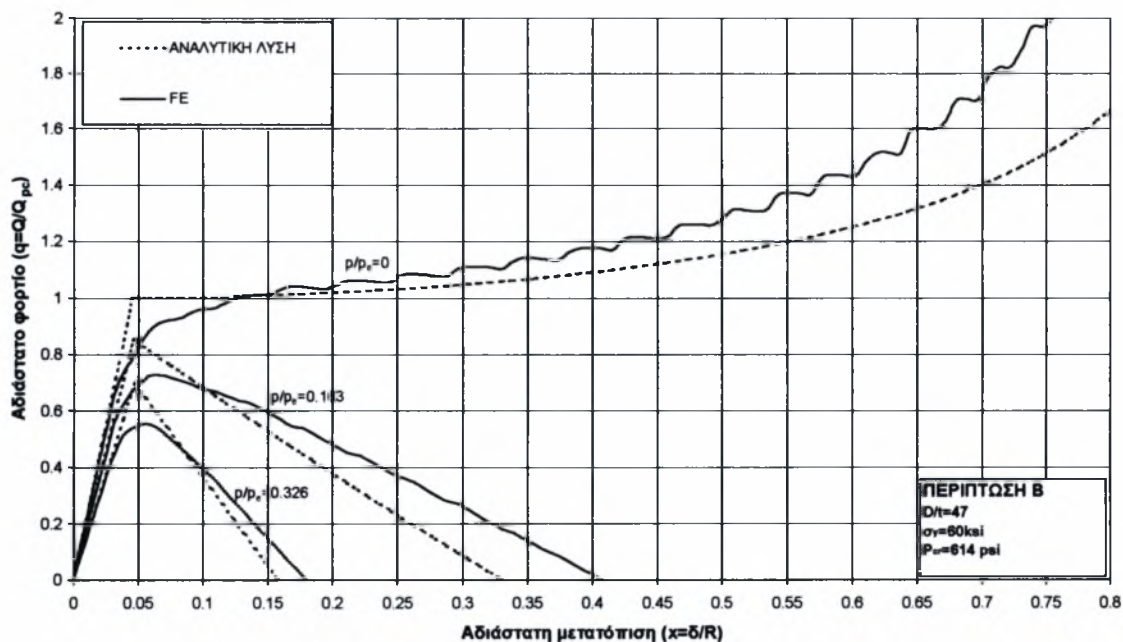
5.1.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Β ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε αποτελέσματα του σωλήνα 1 που αναλύσαμε στο Κεφάλαιο 2 για την περίπτωση της συμπίεσης μεταξύ δύο άκαμπτων πλακών.



Σχήμα 5-10. Αναλυτική απόκριση του σωλήνα 1. Σύγκριση για διάφορες τιμές της πίεσης.

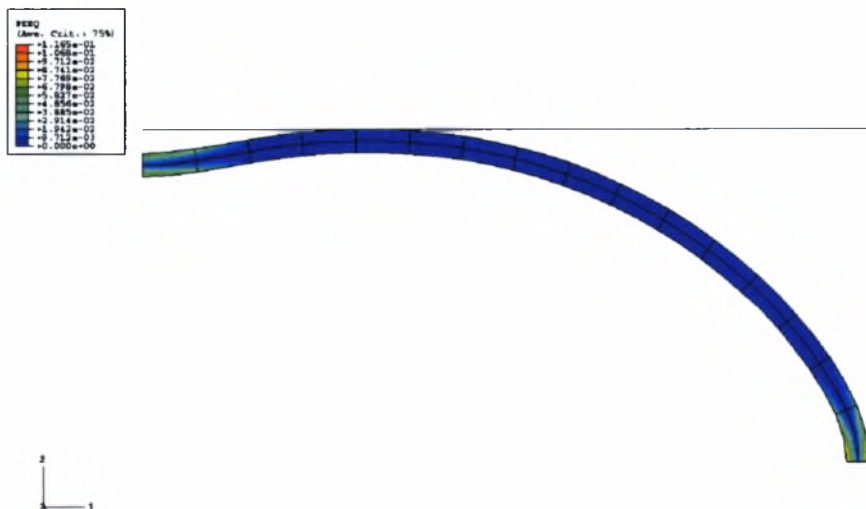
Φαίνεται ότι υπό την επίδραση της πίεσης μειώνεται η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας από το σωλήνα όπως ήδη έχουμε δει στο Κεφάλαιο 2. Στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 5-11) συγκρίνουμε τη άνω λύση με αυτή που πήραμε από την προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία.



Σχήμα 5-11. Σύγκριση αναλυτικής λύσης με τα πεπερασμένα στοιχεία (CPE8R) για διάφορες τιμές της πίεσης.

Παρατηρούμε ξανά ότι η αναλυτική λύση οδηγεί σε πολύ καλή προσέγγιση της απόκρισης για την περίπτωση της συμπίεσης ανάμεσα σε πλάκες, αν και δεν εκτιμά σωστά το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο σωλήνας.

Το μοντέλο με τις τέσσερις πλαστικές αρθρώσεις παρουσιάζει πολύ καλά αποτελέσματα παρά την απλότητα και δείχνει να περιγράφει πολύ καλά το μηχανισμό κατάρρευσης. Το γεγονός αυτό το επιβεβαιώνει και η ανάλυση με τα πεπερασμένα στοιχεία. Στην επόμενη εικόνα (Σχήμα 5-12) φαίνεται ο σωλήνας σε παραμορφωμένη κατάσταση για πίεση $r/r_e=0.163$.

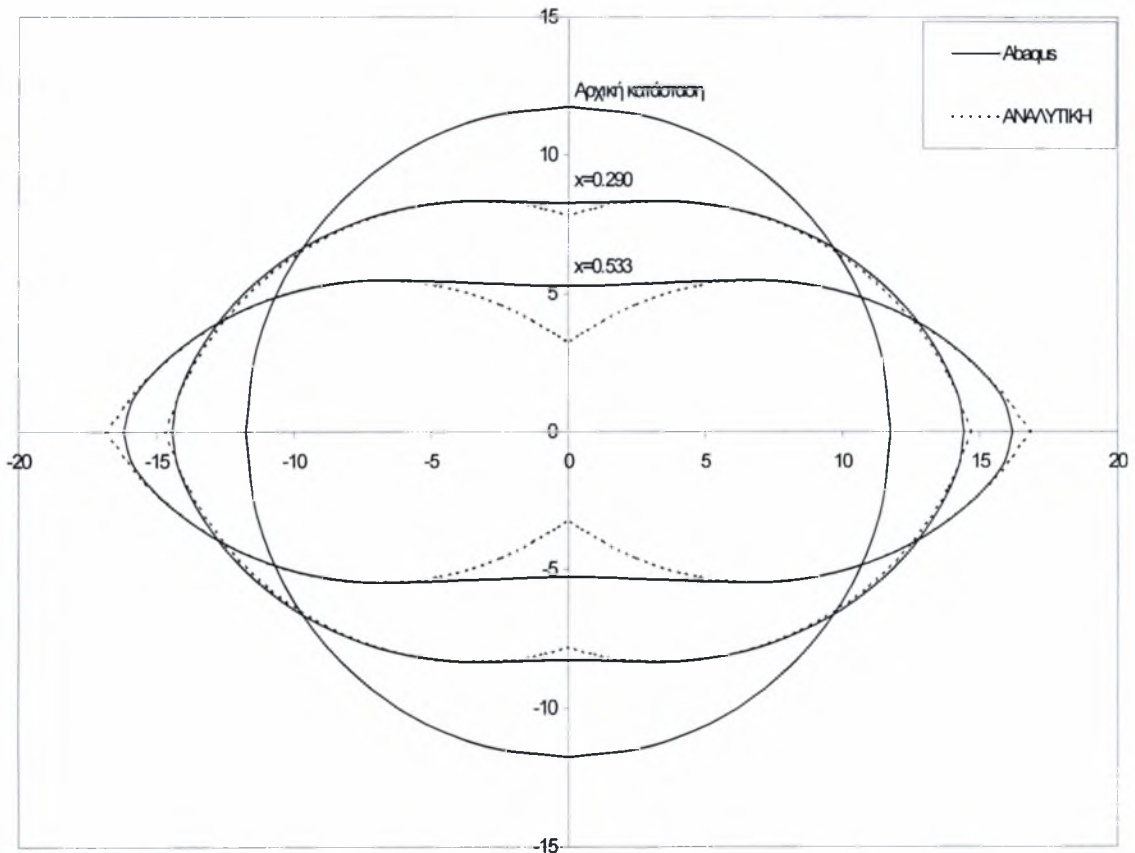


Σχήμα 5-12. Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση για το σωλήνα 1 με πίεση $p=100$ psi και μετατόπιση της πλάκας $x=0.44$.

Παρατηρούμε από την εικόνα ότι η πλαστική παραμόρφωση είναι μηδενική στο μεγαλύτερο τμήμα του σωλήνα και η πλαστικοποίηση περιορίζεται στα δύο άκρα

αυτής. Αυτός είναι ο λόγος που το μοντέλο με τις τέσσερις πλαστικές αρθρώσεις δίνει τόσο καλά αποτελέσματα.

Στα παραπάνω γραφήματα παρουσιάσαμε το δρόμο ισορροπίας του φορτίου συναρτήσει της μετατόπισης της άκαμπτης πλάκας. Στην Σχήμα 5-13 συγκρίνουμε την παραμορφωμένη γεωμετρία του σωλήνα για διάφορες τιμές της μετατόπισης της πλάκας.



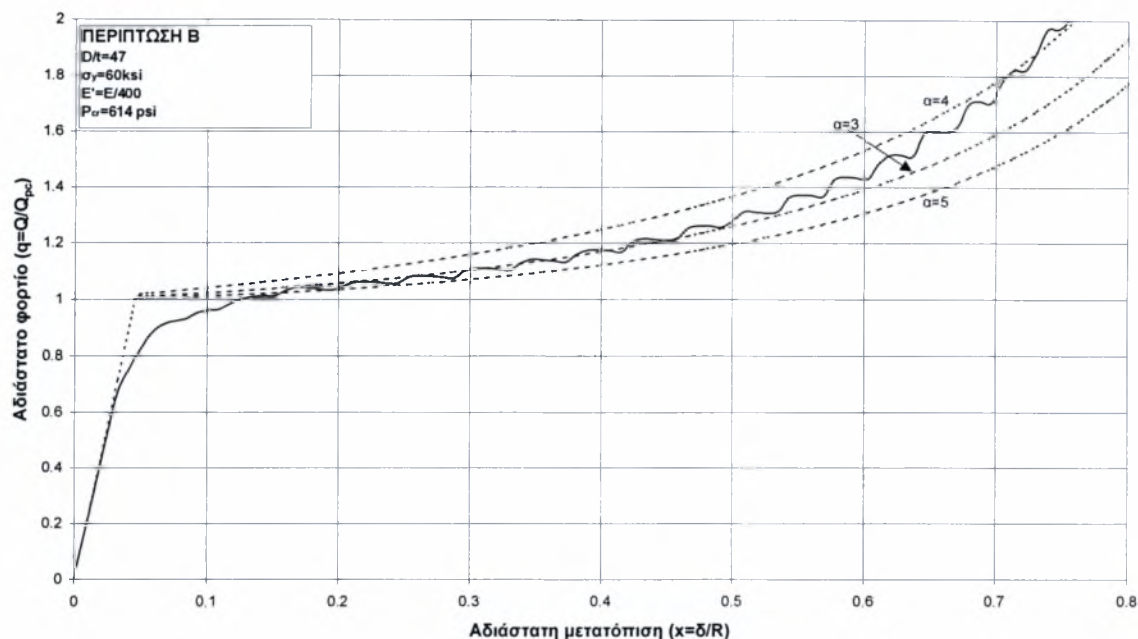
Σχήμα 5-13. Σύγκριση αναλυτικής λύσης και πεπερασμένων στοιχείων της παραμορφωμένης κατάστασης σωλήνα, για διάφορες τιμές της μετατόπισης του διεισδότη.

Από το σχήμα βλέπουμε ότι η σύγκριση είναι πολύ καλή εκτός από τα άκρα, όπου το αναλυτικό μοντέλο αδυνατεί να εκτιμήσει την τάση του σωλήνα να γίνει επίπεδος με την επιβολή του φορτίου.

Για να ολοκληρώσουμε τη σύγκριση με τα πεπερασμένα στοιχεία συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με την αναλυτική έκφραση που πρότεινε ο Redwood (1963) για μηδενική πίεση, η οποία συμπεριλαμβάνει και την επίδραση της εργοσκλήρυνσης του υλικού σύμφωνα με τη σχέση:

$$q_{pl} = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \left[1 + \left(\frac{E'}{3\sigma_y a} \right) \cdot \sin^{-1} x \right] \quad (5.31)$$

Στην εξίσωση (5.31) α είναι το μήκος της πλαστικής ζώνης και εξαρτάται από το πάχος του σωλήνα. Ο Redwood προτείνει την τιμή α=5, ενώ για τα δικά μας αποτελέσματα η τιμή α=5 ταιριάζει καλύτερα όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5-14).



Σχήμα 5-14. Σύγκριση των πεπερασμένων στοιχείων (CPE8R) με την αναλυτική εξίσωση που πρότεινε ο Redwood.

5.2 Τρισδιάστατο Μοντέλο

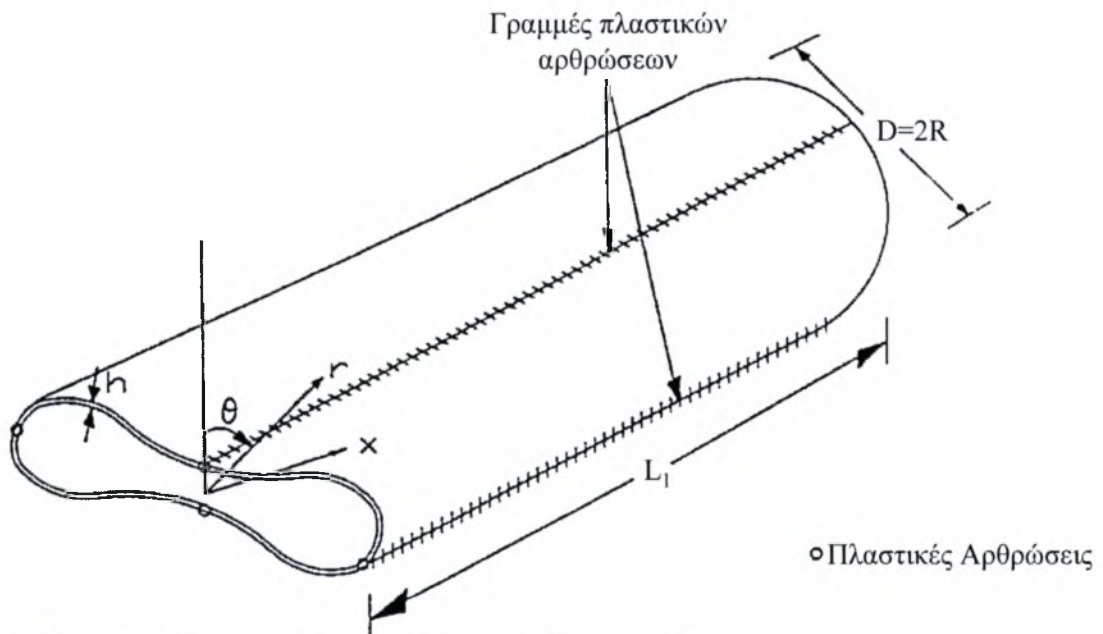
Το τρισδιάστατο απλοποιητικό μοντέλο που αναλύεται στην παρούσα εργασία είναι μία γενίκευση του δισδιάστατου που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Το μοντέλο περιγράφει την επίδραση της πίεσης σε ένα τρισδιάστατο κέλυφος και προσφέρει ποιοτικά αποτελέσματα που εξηγούν την απόκριση του σωλήνα υπό εγκάρσια φόρτιση. Ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λάβουμε υπόψη στην παρούσα ανάλυση είναι η αξονική παραμόρφωση λόγω της επιμήκυνσης των γενετειρών (μεμβρανικό έργο παραμόρφωσης), οι οποίες απορροφούν σημαντική ποσότητα ενέργειας και προβάλλουν πρόσθετη αντίσταση κατά την διαδικασία της διείδυσης.

Κατά το παρελθόν, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για να προβλεφθεί η απόκριση κυλινδρικών κελυφών με απλοποιητικές διατυπώσεις. Οι Wierzbicki & Suh (1988) θεώρησαν ένα απλό μοντέλο για την τρισδιάστατη ανάλυση κελυφών υπό την επίδραση ενός εγκάρσιου μοναχικού φορτίου. Το κέλυφος θεωρήθηκε ως ένας συνδυασμός μιας σειράς δακτυλίων και μίας δέσμης δοκών. Η παραμόρφωση της κάθε διαμέτρου θεωρήθηκε μέσω ενός μοντέλου πλήρους πλαστικότητας με τέσσερις κινούμενες πλαστικές αρθρώσεις. Η αξονική παραμόρφωση ελήφθη μέσω ενός απλού μαθηματικού μοντέλου που θεωρεί γραμμική κατανομή των ταχυτήτων κατά μήκος του σωλήνα. Το άνω μοντέλο χρησιμοποιεί αρκετές παραδοχές και καταλήγει σε εξισώσεις κλειστής μορφής για το δρόμο ισορροπίας και το μήκος της πλαστικά παραμορφωμένης ζώνης. Οι Zeinoddini et al. (2000) υιοθέτησαν και βελτίωσαν αυτό το μοντέλο και βασισμένοι στα δικά τους αποτελέσματα, πρότειναν μια απλοποιητική έκφραση για το δρόμο ισορροπίας. Ανέπτυξαν επίσης, ένα αριθμητικό μοντέλο που αποτελείται από ένα δακτύλιο, προσομοιωμένο με στοιχεία κελύφους, το οποίο λαμβάνει υπόψη την αξονική παραμόρφωση μέσω μίας σειράς από ελατήρια στους κόμβους του κελύφους. Οι σταθερές των ελατηρίων καθορίστηκαν από ανάλυση πλήρως πλαστικής συμπεριφοράς δοκών.

Ο Nogueira (1998), για το πρόβλημα της διαδόμενης ύβωσης, πρότεινε ένα μοντέλο “συνδέσμου-δοκού” (“link-beam”) για τη θεώρηση των αξονικών

παραμορφώσεων, υποθέτοντας ότι κάθε δακτύλιος καταρρέει σύμφωνα με τη θεωρία των τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων (Σχήμα 5-1). Επιπρόσθετα, το μοντέλο θεωρεί αλληλεπίδραση μεταξύ των δακτυλίων και της άνω γενέτειρας του σωλήνα, καταλήγοντας σε μη γραμμική εξίσωση για την μορφή της άνω γενέτειρας, η οποία και επιλύεται αριθμητικά.

Στην παρούσα εργασία η αξονική παραμόρφωση λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός απλοποιητικού μοντέλου που προτάθηκε από τη Hoo-Fatt (1999) για το πρόβλημα της διαδιδόμενης ύβωσης. Το μοντέλο αυτό τροποποιήθηκε μερικώς για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης και παρ' όλες τις απλουστεύσεις, οδηγεί σε μία εξίσωση κλειστής μορφής που εξηγεί ποιοτικά το φαινόμενο της κατάρρευσης υπό την επίδραση εγκάρσιων φορτίων. Η παραμόρφωση κάθε διατομής, περιγράφεται μέσω του μοντέλου των τεσσάρων πλήρως πλαστικών αρθρώσεων (Σχήμα 5-16) και η αξονική παραμόρφωση θεωρείται με ένα προσεγγιστικό τρόπο. Το μοντέλο (Σχήμα 5-15) είναι κατάλληλο για την διερεύνηση της απόκρισης σωλήνων υπό την επίδραση εγκάρσιων αξονικών φορτίων (π.χ. ένα ζεύγος διεισδυτών μορφής λεπίδας ή αντιδιαμετρικά συγκεντρωμένα φορτία) σε περιβάλλον εσωτερικής ή εξωτερικής πίεσης. Εν συνεχεία παρουσιάζουμε την μαθηματική διατύπωση.



Σχήμα 5-15. Μοντέλο προσομοίωσης τρισδιάστατης κατάρρευσης σωλήνα.

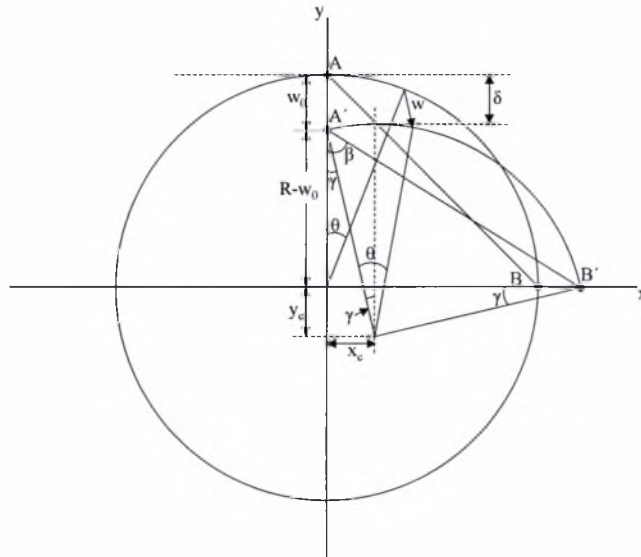
5.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η μετατόπιση σε κάθε σημείο του σωλήνα δίνεται από τη σχέση :

$$\bar{w} = R[\sin \gamma + \sin(\theta - \gamma) - \sin \theta] \bar{i} + R[\cos(\theta - \gamma) - \sin \gamma - \cos \theta] \bar{j} \quad (5.32)$$

όπου \bar{i} και \bar{j} είναι τα μοναδιαία διανύσματα στους άξονες x, y . Η ταχύτητα προκύπτει με παραγωγή ως προς το χρόνο:

$$\dot{\bar{w}} = R\dot{\gamma} \{ [\cos \gamma - \cos(\theta - \gamma)] \bar{i} + [\sin(\theta - \gamma) - \sin \gamma] \bar{j} \} \quad (5.33)$$



Σχήμα 5-16. Κινηματικές σχέσεις για το μηχανισμό των τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων.

Η γωνία στροφής για τον παραμορφωμένο δακτύλιο όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-16 δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma = \cos^{-1} \left[\frac{\left(1 - \frac{w_0}{R}\right) + \sqrt{1 + 2 \frac{w_0}{R} - \left(\frac{w_0}{R}\right)^2}}{2} \right] \quad (5.34)$$

όπου w_0 είναι η μετατόπιση του σημείου $\theta = \pi/2$. Ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας στροφής είναι:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{w}_0}{2R \sin \gamma} \left[1 - \frac{1 - \frac{w_0}{R}}{\sqrt{1 + 2 \frac{w_0}{R} - \left(\frac{w_0}{R}\right)^2}} \right] \quad (5.35)$$

Η ταχύτητα της άνω γενέτειρας θεωρούμε ότι μεταβάλλεται γραμμικά με την αξονική θέση σύμφωνα με τη σχέση:

$$\dot{w}_0 = \dot{\Delta} \left(1 - \frac{x}{L_1} \right), \text{ όπου } 0 \leq x, L_1 \leq L \quad (5.36)$$

όπου L_1 είναι το μήκος της “πλαστικά παραμορφωμένης ζώνης” και θα αναφέρεται ως το “μήκος διείδυσης”. Η τιμή του L_1 είναι άγνωστη και καθορίζεται από τη βύθιση Δ του κελύφους υπό τον διειδυτή. L , είναι το μήκος του μισού σωλήνα, τον οποίο και αναλύουμε. Για να ικανοποιείται η ισορροπία, πρέπει ο ρυθμός μεταβολής του έργου των εσωτερικών δυνάμεων να ισούται με το ρυθμό μεταβολής των εξωτερικών, δηλαδή:

$$\dot{W}_{ext} = \int_s (N_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} + M_{ij} \dot{\kappa}_{ij}) dS \quad (5.37)$$

όπου p είναι η πίεση που ασκείται στο σωλήνα, F η δύναμη που επιβάλλουμε με τον διειδυτή, N_{ij} οι μεμβρανικές δυνάμεις ανά μονάδα μήκους και M_{ij} οι καμπτικές

ροπές ανά μονάδα μήκους, $\dot{\epsilon}_{ij}$ και \dot{k}_{ij} είναι η ταχύτητα παραμόρφωσης και καμπυλότητας αντίστοιχα, ενώ $dS=Rd\theta dx$ σε πολικές συντεταγμένες.

ΕΡΓΟ ΤΩΝ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ

Το αριστερό μέλος της εξίσωσης (5.37) εκφράζει το ρυθμό μεταβολής του έργου των εξωτερικών δυνάμεων για το μισό κέλυφος:

$$\dot{W}_{ext} = \dot{W}_{ext,p} + \dot{W}_{ext,F} \quad (5.38)$$

Έργο Πίεσης

Η επιφανειακή δύναμη της πίεσης είναι πάντα κάθετη στην επιφάνεια και δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{p} = -p_0 [\sin(\theta - \gamma)\vec{i} + \cos(\theta - \gamma)\vec{j}] \quad (5.39)$$

όπου p_0 είναι το μέτρο της πίεσης που εξασκείται στο σωλήνα.

Για να υπολογίσουμε το έργο της πίεσης ολοκληρώνουμε πρώτα κατά την περιφέρεια και στη συνέχεια κατά μήκος του σωλήνα:

$$\dot{W}_{ext,p} = \int_s \vec{p} \cdot \dot{\vec{w}} dS = \int_0^L \left[4 \int_0^{\pi/2} \vec{p} \cdot \dot{\vec{w}}(x, \theta) R d\theta \right] dx$$

Η ολοκλήρωση στην περιφέρεια μας παρέχει την ενέργεια που απαιτείται για την σύνθλιψη ενός μοναδιαίου δακτυλίου:

$$\dot{W}_r = 4R^2 p_0 \frac{\dot{w}_0}{R} f_1 \quad (5.40)$$

όπου $f_1 = \int_0^{\pi/2} \frac{\vec{p}}{p_0} \cdot \frac{\dot{\vec{w}}}{\dot{w}_0}(\theta) d\theta$. Με αριθμητική ολοκλήρωση αποδεικνύεται ότι $f_1 \approx 0.5$.

Αντικαθιστώντας την τιμή αυτή στην εξίσωση (5.40) και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5.36) για την ταχύτητα υπολογίζουμε το συνολικό έργο της πίεσης στο κέλυφος που προκύπτει με την ολοκλήρωση κατά το “μήκος διείσδυσης”:

$$\dot{W}_{ext,p} = \frac{4R^2 p_0}{R} \int_0^{L_1} \dot{\Delta} \left(1 - \frac{x}{L_1} \right) dx \Rightarrow$$

$$\dot{W}_{ext,p} = 2RL_1 p_0 \dot{\Delta} \quad (5.41)$$

Έργο Συγκεντρωμένης Δύναμης Του Διεισδυτή

Το έργο της συγκεντρωμένης δύναμης F ισούται με το γινόμενο της δύναμης που ασκείται από το μαχαίρι με την αντίστοιχη μετατόπιση αυτού. Από το Σχήμα 5-16 μπορούμε να εξάγουμε τις γεωμετρικές σχέσεις που ισχύουν για το δ :

$$\delta = w_0 - R(1 - \cos \gamma) \Leftrightarrow$$

$$\delta = \Delta - R \left[\frac{\left(1 + \frac{\Delta}{R} \right) - \sqrt{1 + 2 \frac{\Delta}{R} - \left(\frac{\Delta}{R} \right)^2}}{2} \right] \quad (5.42)$$

Η χρονική παράγωγος της μετατόπισης του “μαχαριού” προκύπτει εύκολα και είναι:

$$\dot{\delta} = \left[\frac{1}{2} \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{R}\right)^2} + 2\frac{\Delta}{R} + \left(1 - \frac{\Delta}{R}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{R}\right)^2} + 2\frac{\Delta}{R}} \right] \dot{\Delta} \quad (5.43)$$

Γράφουμε τη σχέση (5.43) στη μορφή:

$$\dot{\delta} = g(\Delta/R) \cdot \dot{\Delta} \quad (5.44)$$

$$\text{όπου } g(\Delta/R) = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{R}\right)^2} + 2\frac{\Delta}{R} + 1 - \frac{\Delta}{R}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{R}\right)^2} + 2\frac{\Delta}{R}} \quad (5.45)$$

Το έργο της συγκεντρωμένης δύναμης είναι για κέλυφος:

$$\dot{W}_{ext,F} = 2F \cdot g(\Delta/R) \cdot \dot{\Delta} \quad (5.46)$$

Επομένως το συνολικό έργο των εξωτερικών δυνάμεων προκύπτει από τις σχέσεις (5.41) και (5.46) για το μισό κέλυφος ως:

$$\dot{W}_{ext} = 2(RL_1 p_0 \dot{\Delta} + F \cdot g(\Delta/R) \cdot \dot{\Delta}) \quad (5.47)$$

ΕΡΓΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ

Το δεξί μέλος της εξίσωσης (5.37) εκφράζει το έργο των εσωτερικών δυνάμεων και είναι αναλυτικά:

$$\dot{W}_{int} = \int_S (N_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + N_{x\theta} \dot{\epsilon}_{x\theta} + N_{\theta\theta} \dot{\epsilon}_{\theta\theta} + M_{xx} \dot{k}_{xx} + M_{x\theta} \dot{k}_{x\theta} + M_{\theta\theta} \dot{k}_{\theta\theta}) dS \quad (5.48)$$

Ακολουθώντας την ανάλυση Hoo-Fatt θεωρούμε χωρίς σημαντικό σφάλμα ότι οι επικρατέστεροι όροι στην παραπάνω εξίσωση είναι η αξονική δύναμη N_{xx} που προκαλεί εφελκυσμό στις γενέτειρες και η ροπή $M_{\theta\theta}$ που προκαλεί περιμετρική κάμψη σε κάθε δαχτυλίδι. Έτσι σε πρώτη προσέγγιση μπορούμε να απαλείψουμε τους υπόλοιπους όρους και η απλοποιημένη εξίσωση που προκύπτει είναι:

$$\dot{W}_{int} = \int_S (N_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + M_{\theta\theta} \dot{k}_{\theta\theta}) dS \quad (5.49)$$

Θεωρώντας πλήρης πλαστικότητα οι γενικευμένες δυνάμεις προσεγγίζονται σύμφωνα με τους τύπους:

$$N_{xx} = N_0 = \sigma_0 t, \quad M_{\theta\theta} = \frac{\sigma_0 t^2}{4} \quad (5.50)$$

Έργο Καμπτικής Ροπής

Το έργο που προκαλεί η καμπτική ροπή $M_{\theta\theta}$ είναι για το κάθε δαχτυλίδι σύμφωνα με τη θεώρηση των τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων:

$$\dot{W}_{br} = 8 \cdot |M_{\theta\theta} \dot{\phi}| \quad (5.51)$$

όπου $\phi = \frac{\pi}{4} - \beta$ (Σχήμα 5-16), ενώ η απόλυτη τιμή εξασφαλίζει ότι το έργο που δαπανάται είναι θετικό.

$$\phi = \cos^{-1} \left[\frac{R - w_0}{\sqrt{2}R} \right] - \frac{\pi}{4} \quad (5.52)$$

Η παραπάνω συνάρτηση προσεγγίζεται για ευθεία γραμμή ως:

$$\phi \approx \frac{\pi w_0}{4 R} \quad (5.53)$$

Η χρονική παράγωγος της παραπάνω εξίσωσης δίνει:

$$\dot{\phi} \approx \frac{\pi \dot{w}_0}{4 R} \quad (5.54)$$

Έτσι ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας για κάθε δαχτυλίδι προκύπτει:

$$\dot{W}_{br} = \frac{2\pi M_p}{R} \dot{w}_0 \quad (5.55)$$

Ο ρυθμός μεταβολής του συνολικού έργου λόγω κάμψης προκύπτει με ολοκλήρωση κατά το “μήκος διείδυσης”:

$$\dot{W}_b = 2 \frac{\pi M_p}{R} L_1 \dot{\Delta} \quad (5.56)$$

Έργο Αξονικής Δύναμης

Το έργο της αξονικής δύναμης οφείλεται στην δύναμη εφελκυσμού που υφίστανται οι πάνω γενέτειρες του κελύφους. Εάν ονομάσουμε Δu το ρυθμό της αξονικής μετατόπισης έχουμε τελικά έχουμε τελικά ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας στο κέλυφος είναι:

$$\dot{W}_m = 8R \int_0^{\pi/2} N_0(\Delta u) d\theta \quad (5.57)$$

Η μετατόπιση για κάθε πλαστική άρθρωση προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$\Delta u = \sqrt{w^2 + L^2} - L \quad (5.58)$$

Θεωρώντας $w/L \ll 1$ μπορούμε να γράψουμε ότι:

$$\Delta u = L_1 \left[\sqrt{\left(\frac{w}{L_1}\right)^2 + 1} - 1 \right] \approx \frac{L_1}{2} \left(\frac{w}{L_1}\right)^2 \quad (5.59)$$

Ο ρυθμός της μετατόπισης προκύπτει με παραγωγή της ως άνω σχέσης:

$$\Delta \dot{u} = \frac{w\dot{w}}{L_1} \quad (5.60)$$

Με αντικατάσταση του Δu στην εξίσωση (5.57) προκύπτει:

$$\dot{W}_m = 8N_0 \frac{R^2}{L_1} \left(\frac{\Delta}{R}\right) f_3 \dot{\Delta} \quad (5.61)$$

όπου $f_3 = \int_0^{\pi/2} \frac{w}{w_0} \cdot \frac{\dot{w}}{\dot{w}_0} d\theta$. Με αριθμητική ολοκλήρωση προκύπτει $f_3 \approx 0.5$.

Έτσι τελικά ο ρυθμός παραγωγής έργου της αξονικής δύναμης για το κέλυφος είναι:

$$\dot{W}_m = 4N_0 R \left(\frac{\Delta}{L_1}\right) \dot{\Delta} \quad (5.62)$$

ΔΡΟΜΟΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Με αντικατάσταση των εξισώσεων (5.47)(5.56) και (5.62) στην εξίσωση (5.37) έχουμε:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{ext} &= \dot{W}_{int} \Leftrightarrow \\ F \cdot g(\Delta/R) \cdot \dot{\Delta} + \dot{W}_p &= \dot{W}_b + \dot{W}_m \Leftrightarrow \end{aligned}$$

$$F \cdot g(\Delta / R) \cdot \dot{\Delta} + RL_1 p_0 \dot{\Delta} = \frac{\pi M_p L_1}{R} \dot{\Delta} + 2N_0 \frac{R\Delta}{L_1} \dot{\Delta} \Leftrightarrow$$

$$F \cdot g(\Delta / R) + RL_1 p_0 = \frac{\pi M_p L_1}{R} + 2N_0 \frac{R\Delta}{L_1} \Leftrightarrow$$

$$F \cdot g(\Delta / R) = \frac{\pi M_p L_1}{R} + 2N_0 \frac{R\Delta}{L_1} - RL_1 p_0 \quad (5.63)$$

Το απαραίτητο “μήκος διείδυσης” για να εξελιχθεί το φαινόμενο που περιγράφουμε σε αυτή την ανάλυση πρέπει να είναι τέτοιο, ώστε να ελαχιστοποιείται η απαιτούμενη δύναμη για τη σύνθλιψη σε κάθε στάδιο της ανάλυσης. Για κάθε τιμή του βάθους διείδυσης η τιμή του L_1 προκύπτει με μηδενισμό της παραγώγου του φορτίου προς το “μήκος διείδυσης” L_1 :

$$\frac{\partial F}{\partial L_1} = 0 \Rightarrow \frac{\pi M_p}{R} - 2N_0 \frac{R\Delta}{L_1^2} - Rp_0 = 0 \Leftrightarrow$$

$$L_1 = \sqrt{\frac{2N_0 R}{\frac{\pi M_p}{R} - Rp_0}} \Delta \Leftrightarrow \quad (5.64)$$

$$L_1 = \sqrt{\frac{2\sigma_0 t R}{\frac{\pi \sigma_0 t^2}{4R^2} \left(1 - \frac{p_0}{p_p}\right)}} \Delta = R \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sqrt{\frac{\Delta}{t}} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{p_0}{p_p}}} \quad (5.65)$$

Διαιρώντας το μήκος L_1 με την ακτίνα R , παίρνουμε το αδιάστατο μήκος $l = \frac{L_1}{R}$:

$$l = 2 \sqrt{\frac{1}{\pi}} \sqrt{\frac{\Delta}{R}} \sqrt{\frac{D}{t}} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{p_0}{p_p}}} \quad (5.66)$$

Από την παραπάνω εξίσωση παρατηρούμε ότι το απαραίτητο μήκος για να εξελιχθεί το φαινόμενο που περιγράφουμε εξαρτάται από το λόγο του μήκους προς τη διάμετρο (D/t), τη βύθιση (Δ/R) και την εφαρμοζόμενη πίεση p . Αύξηση κάθε μίας εκ των τριών παραμέτρων οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση του απαραίτητου αδιάστατου “μήκους διείδυσης” l .

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (5.64) στην (5.63) έχουμε:

$$F \cdot g(\Delta / R) = \frac{\pi M_p}{R} \sqrt{\frac{2N_0 R}{\frac{\pi M_p}{R} - Rp_0}} \Delta + \sqrt{2N_0 R \Delta \left(\frac{\pi M_p}{R} - Rp_0 \right)} - Rp_0 \sqrt{\frac{2N_0 R}{\frac{\pi M_p}{R} - Rp_0}} \Delta \quad (5.67)$$

$$\text{Αλλά } M_p = \frac{\sigma_0 t^2}{4} \text{ και } N_0 = \sigma_0 t$$

όπου M_p είναι η πλήρως πλαστική ροπή στην άρθρωση και N_0 η αξονική δύναμη για πλήρη πλαστικότητα. Έτσι η σχέση (5.67) γίνεται τελικά:

$$\begin{aligned}
 F \cdot g(\Delta/R) &= \frac{\pi\sigma_0 t^2}{4R} \sqrt{\frac{2\sigma_0 tR}{\frac{\pi\sigma_0 t^2}{4R} - Rp_0}} \Delta + \sqrt{2\sigma_0 tR \left(\frac{\pi\sigma_0 t^2}{4R} - Rp_0 \right)} \Delta - Rp_0 \sqrt{\frac{2\sigma_0 tR}{\frac{\pi\sigma_0 t^2}{4R} - Rp_0}} \Delta \Leftrightarrow \\
 F \cdot g(\Delta/R) &= \left(\frac{\pi\sigma_0 t^2}{4R} - Rp_0 \right) \sqrt{\frac{2\sigma_0 tR}{\frac{\pi\sigma_0 t^2}{4R} - Rp_0}} \Delta + \sqrt{2\sigma_0 tR \left(\frac{\pi\sigma_0 t^2}{4R} - Rp_0 \right)} \Delta \Leftrightarrow \\
 F &= \frac{2}{g(\Delta/R)} \sqrt{2\sigma_0 tR \left(\frac{\pi\sigma_0 t^2}{4R} - Rp_0 \right)} \Delta \quad (5.68)
 \end{aligned}$$

Θέτοντας:

$P_p = \pi\sigma_0 \left(\frac{t}{D} \right)^2$, όπου p_p είναι μια προσεγγιστική τιμή της πίεσης διαδιδόμενης

ύβωσης η εξίσωση (5.68) μπορεί να τροποποιηθεί στη μορφή:

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{4}{f(\Delta)} \sqrt{2\sigma_0 tR^2 (p_p - p_0) \Delta} \Leftrightarrow F = \frac{4}{f(\Delta)} \sqrt{2\sigma_0 tR^2 \Delta \frac{\pi\sigma_0 t^2}{4R^2} \sqrt{1 - \frac{p_0}{p_p}}} \Leftrightarrow \\
 F &= \frac{4}{g(\Delta/R)} \sqrt{2\sigma_0^2 t^3 \pi \Delta} \sqrt{1 - \frac{p_0}{p_p}} \Leftrightarrow \\
 F &= \frac{4\sigma_0 t}{g(\Delta/R)} \sqrt{2\pi \Delta t} \sqrt{1 - \frac{p_0}{p_p}} \quad (5.69)
 \end{aligned}$$

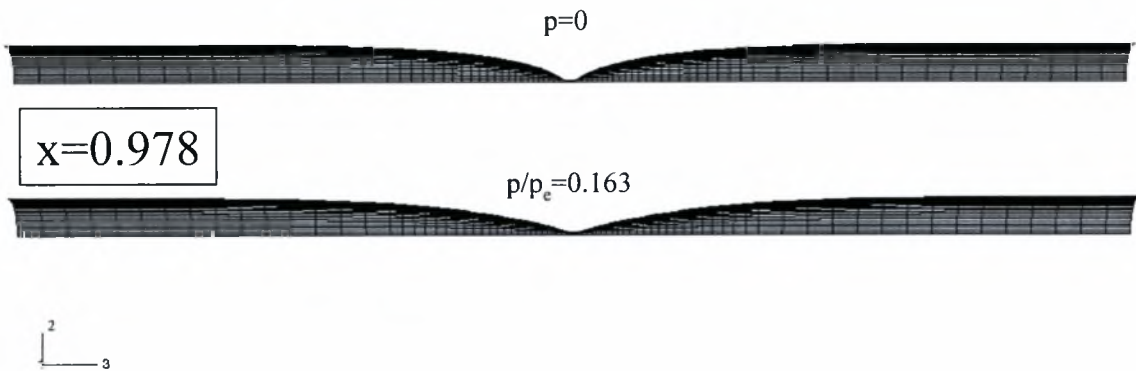
Αδιαστατοποιούμε τη δύναμη F με το λόγο $f = \frac{F}{M_p} \sqrt{\frac{t}{D}}$, τη βύθιση του διεισδυτή δ

με την αδιάστατη μεταβλητή $x = \delta/R$ και τη μέγιστη βύθιση της άνω γενέτειρας Δ με $X = \Delta/R$. Έτσι προκύπτει η τελική μορφή της εξίσωσης (5.69) ως εξής, αντικαθιστώντας και την τιμή του $g(\Delta/R)$ από τη σχέση (5.45):

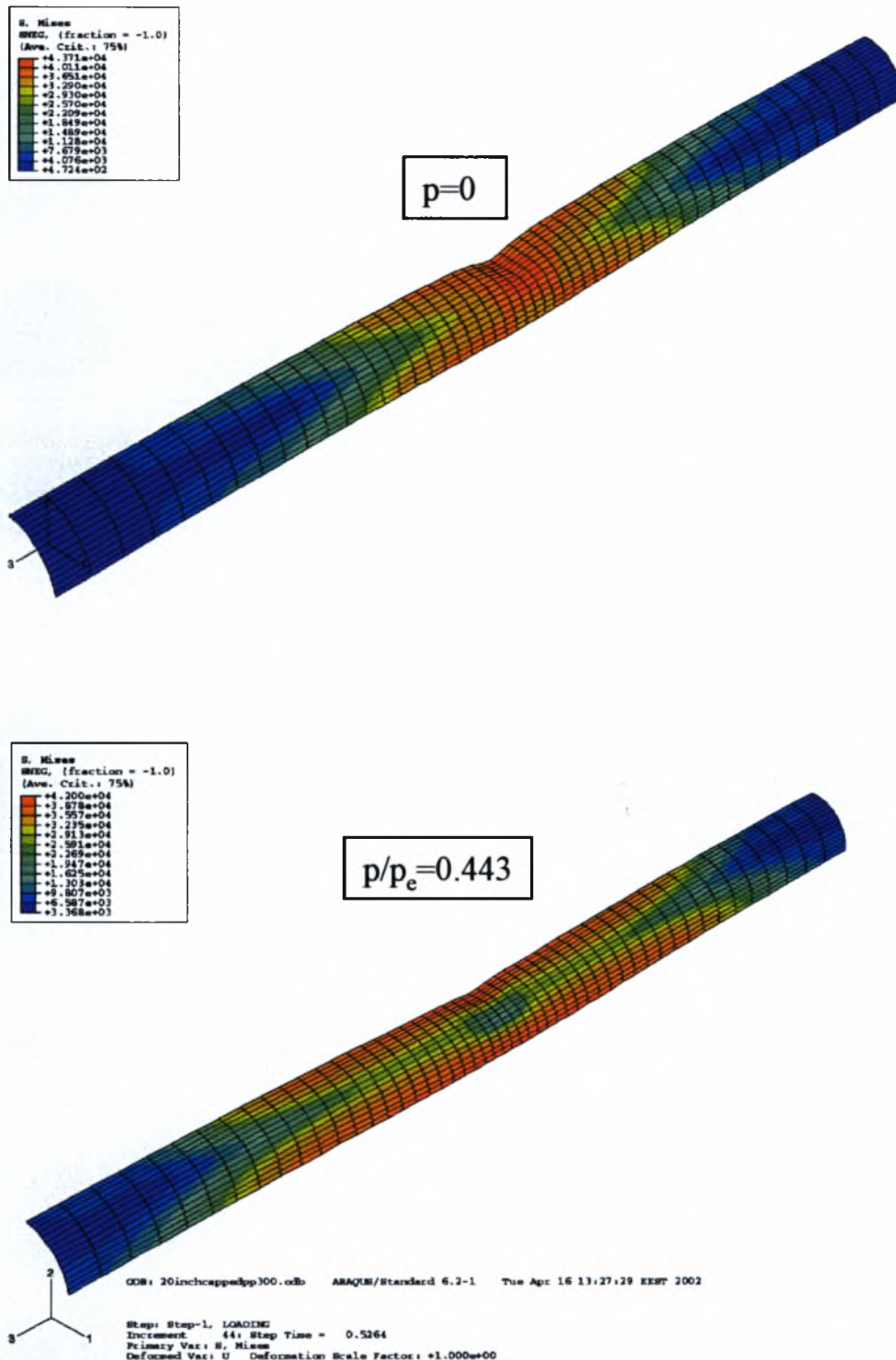
$$f = 16\sqrt{\pi} \sqrt{1 - \frac{p_0}{p_p}} \sqrt{X} \frac{\sqrt{1 - X^2 + 2X}}{\sqrt{1 - X^2 + 2X + 1 - X}} \quad (5.70)$$

5.2.2 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Από την ανάλυση που περιγράψαμε παραπάνω αποκομίσαμε σημαντικά συμπεράσματα που εξηγούν ποιοτικά την απόκριση του σωλήνα. Από την εξίσωση (5.65) βλέπουμε ότι το μήκος της πλαστικά παραμορφωμένης ζώνης, εκφραζόμενο από το μήκος διείσδυσης, L_1 αυξάνεται καθώς το βάθος διείσδυσης αυξάνεται. Επιπρόσθετα η τιμή του L_1 μεγαλώνει με αύξηση της πίεσης. Τα συμπεράσματα αυτά επαληθεύονται και με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-17, όπου η παραμορφωμένη κατάσταση είναι πιο ομαλή στην περίπτωση της πίεσης και αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο εύρος “πλαστικά παραμορφωμένης ζώνης” (Σχήμα 5-18).



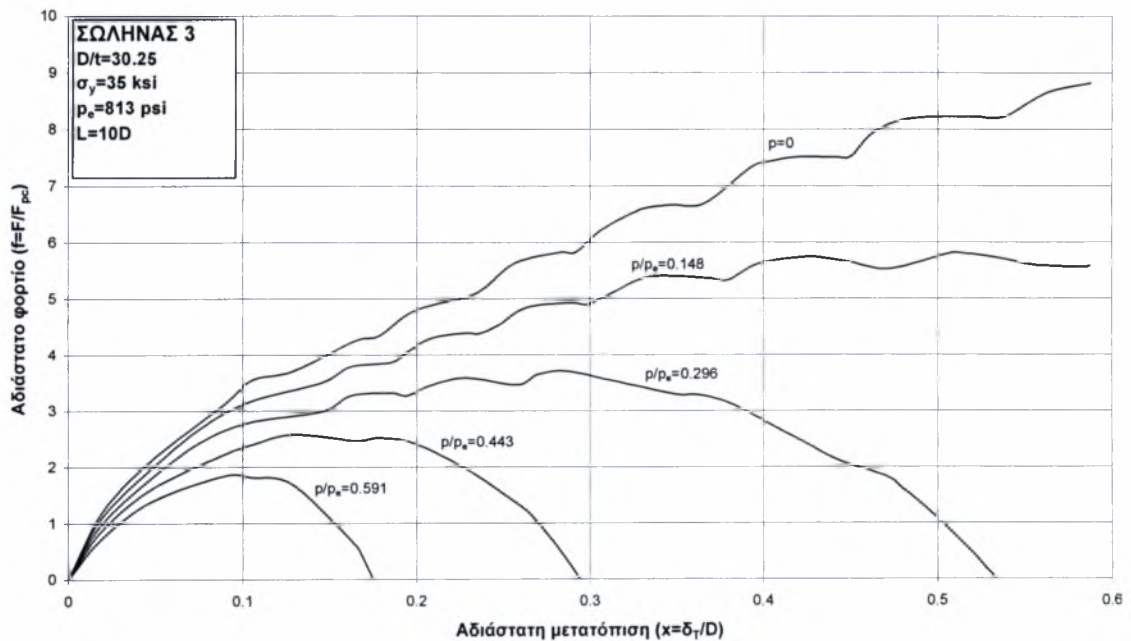
Σχήμα 5-17. Σύγκριση παραμορφωμένης κατάστασης του Σωλήνα 1 ($L=15D$), για μηδενική πίεση και $p/p_e=0.163$ και μετατόπιση του διεισδυτή $x=0.978$. (Κεφάλαιο 4)



Σχήμα 5-18. Κατανομή των τάσεων “Von Mises”. Σύγκριση για μηδενική πίεση και $p/p_e=0.449$ για σωλήνα αλουμινίου. Μετατόπιση $x=0.3$ και για τις δύο περιπτώσεις. (Κεφάλαιο 3)

Η εξίσωση (5.70) υποδεικνύει ότι η τρισδιάστατη απόκριση σωλήνα εξαρτάται σημαντικά από την παρουσία εξωτερικής πίεσης, επιφέροντας μείωση του μέγιστου φορτίου και της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. Αυτό το είδαμε και στα δύο προηγούμενα κεφάλαια (Κεφάλαιο 3, Κεφάλαιο 4). Συγκεκριμένα η λύση του αναλυτικού μοντέλου δείχνει ότι η μέγιστη πίεση την οποία μπορεί ο σωλήνας να αντέξει είναι η p_p που είναι μια προσεγγιστική (συντηρητική) εκτίμηση της πίεσης

διαδιδόμενης ύβωσης. Αυτή η παρατήρηση είναι συνεπής με τα αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία δείχνουν ότι η επίδραση της πίεσης μπορεί να αποβεί καταστροφική όταν ξεπεράσει την πραγματική τιμή της πίεσης διαδιδόμενης ύβωσης. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 5-18 για το σωλήνα από αλουμίνιο που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.



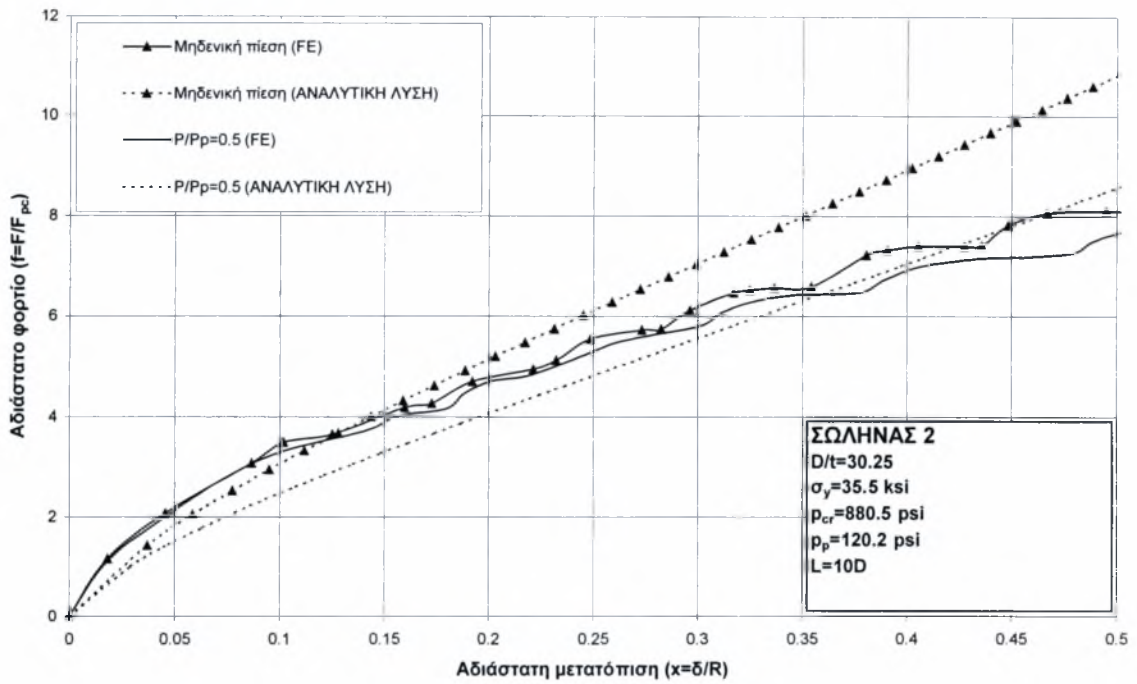
Σχήμα 5-19. Επίδραση της πίεσης για σωλήνα αλουμινίου μήκους $L=10D$ με απαραμόρφωτες πλάκες στα άκρα. (Κεφάλαιο 3)

Από το άνω σχήμα βλέπουμε ότι ο σωλήνας παρουσιάζει έναν ευσταθή δρόμο ισορροπίας για πίεση 120 psi ενώ παρουσιάζει αστάθεια για πίεση 240 psi. Η πραγματική τιμή της πίεσης διαδιδόμενης ύβωσης για την περίπτωση αυτή είναι $p_p=201$ psi. Σημειώνουμε ότι για την περίπτωση αυτή η κρίσιμη πίεση κατάρρευσης για το σωλήνα είναι $p_{cr}=880.5$ ($p/p_{cr}=0.273$).

Στην ανάλυση που περιγράψαμε παραπάνω θεωρήσαμε πλήρως πλαστικό υλικό (θεώρηση τέλει πλαστικότητας), όπου η ενέργεια λόγω ελαστικής παραμόρφωσης παραλείφθηκε. Για να διεξάγουμε ποσοτική σύγκριση μεταξύ της λύσης με πεπερασμένα στοιχεία και της αναλυτικής λύσης, η ελαστική απόκριση του σωλήνα πρέπει να ληφθεί υπόψη. Μια απλή αναλυτική έκφραση για την ελαστική λύση δεν είναι διαθέσιμη. Παρ' όλα αυτά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μία τραχεία προσέγγιση, βασισμένη σε πειραματικά αποτελέσματα για συγκεντρωμένα εγκάρσια φορτία, που περιγράφεται από την εξίσωση (5.71) σε κλειστή μορφή:

$$F = 2.083Et \left(\frac{t}{R} \right)^{1.22} \left(\frac{R}{L} \right)^{0.50} \delta \quad (5.71)$$

Με πρόσθεση αυτής της λύσης στην πλαστική απόκριση του σωλήνα μπορούμε να έχουμε συγκρίσιμα αποτελέσματα με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Στο επόμενο γράφημα (Σχήμα 5-19) παρουσιάζουμε σύγκριση για την περίπτωση του σωλήνα αλουμινίου που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3 δύο τιμές της πίεσης.



Σχήμα 5-20. Σύγκριση αναλυτικής λύσης και πεπερασμένων στοιχείων για το Σωλήνα 3 υπό την επίδραση εγκάρσιων φορτίων και πίεσης. Η μη μηδενική πίεση είναι 50% του p_p και 7.4% του p_c .

Για της απαιτήσεις της παρούσας εργασίας και αναλογιζόμενοι τις παραδοχές που έχουμε θεωρήσει η σύγκριση των αποτελεσμάτων σε αυτό το στάδιο θεωρείται ικανοποιητική.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία μελετά την αστοχία κυλινδρικών κελυφών υπό την επίδραση διαφόρων τύπων εγκάρσιας φόρτισης σε περιβάλλον εξωτερικής ή εσωτερικής πίεσης. Η ανάλυση είναι μη γραμμική και έγινε με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων. Στην εργασία δίνεται έμφαση στην επίδραση της πίεσης στο μέγιστο φορτίο που μπορούν να παραλάβουν οι σωλήνες, καθώς και στην ενέργεια απορρόφησης. Αναλύονται δισδιάστατες και τρισδιάστατες περιπτώσεις με στοιχεία κελύφους, για σωλήνες χάλυβα και αλουμινίου σχετικά μεγάλου πάχους. Οι λόγοι διαμέτρου προς ακτίνας (D/t) για τα κελύφη που εξετάζονται, είναι παρόμοιοι με αυτούς που βρίσκουν εφαρμογή σε πραγματικές περιπτώσεις αγωγών.

Σε όλες τις περιπτώσεις που αναλύθηκαν (δισδιάστατες και τρισδιάστατες) καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι σχετικά χαμηλές τιμές της εξωτερικής πίεσης προκαλούν σημαντική πτώση του μέγιστου φορτίου και συνεπακόλουθα μείωση της ενέργειας απορρόφησης. Από την άλλη πλευρά, η ύπαρξη εσωτερικής πίεσης αυξάνει το μέγιστο φορτίο και την ενέργεια απορρόφησης.

Στο δισδιάστατο πρόβλημα μελετούμε τις περιπτώσεις φόρτισης του σωλήνα από δύο αντιδιαμετρικά συγκεντρωμένα φορτία καθώς και από δύο άκαμπτες πλάκες. Οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις εμφανίζονται σε τέσσερις ισαπέχουσες πλαστικές αρθρώσεις. Η απόκριση εξαρτάται από την εργοσκήρυνση του σωλήνα κατά τη φόρτιση και το λόγο της διαμέτρου προς το πάχος (D/t). Κατά τη φόρτιση ανάμεσα σε δύο άκαμπτες πλάκες, παρατηρήσαμε αποκόλληση ανάμεσα στην επιφάνεια του κελύφους και την πλάκα. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο για μεγαλύτερες τιμές της πίεσης και η τιμή του δεν ξεπερνά το 5% της ακτίνας του σωλήνα.

Στις τρισδιάστατες περιπτώσεις οι μεμβρανικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στις γενέτειρες του κελύφους προβάλλουν επιπρόσθετη αντίδραση στο διεισδυτή. Χωρίς την ύπαρξη της πίεσης το φορτίο αυξάνεται μονοτονικά στο δρόμο ισορροπίας, ενώ η παραμόρφωση εστιάζεται στην περιοχή εφαρμογής του φορτίου. Σε συνθήκες σταθερής πίεσης η παραμόρφωση του κελύφους είναι πιο ομαλή, ενώ αύξηση αυτής συνεπάγεται μείωση της ακαμψίας του σωλήνα και της ενέργειας απορρόφησης. Για κάποια τιμή της πίεσης ο δρόμος ισορροπίας ξεπερνά ένα οριακό σημείο και στη συνέχεια προχωρά με αρνητική κλίση (αστάθεια). Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι για ένα μακρύ σωλήνα ($L > 10D$) αυτή η πίεση συμπίπτει με την πίεση διαδιδόμενης ύβωσης. Πολύ σημαντική αποδείχθηκε η επίδραση των συνοριακών συνθηκών ειδικά στα κελύφη σχετικά μικρού μήκους. Έγινε επίσης, σύγκριση με πειραματικά δεδομένα για σωλήνες χωρίς πίεση η οποία κατέληξε σε πολύ καλή συσχέτιση των αποτελεσμάτων.

Τέλος, αναπτύχθηκε απλοποιητικό μοντέλο για τη δισδιάστατη και την τρισδιάστατη περίπτωση που ερμηνεύει ποιοτικά τις διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν την απόκριση, παρέχοντας συγκρίσιμα στοιχεία με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο βασίζεται σε ένα μηχανισμό τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων για την περιγραφή της αστοχίας της διατομής του κελύφους. Αυτή η θεώρηση επικυρώνεται από τις παρατηρήσεις σε πειράματα καθώς και από την αριθμητική προσομοίωση. Στο τρισδιάστατο μοντέλο λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση των μεμβρανικών δυνάμεων και εξάγονται αποτελέσματα που ως σκοπό έχουν την καλύτερη κατανόηση της αστοχίας σωλήνων υπό πίεση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Abbasian, F. and Parfitt, S. H. L., 1995, "Collapse and Post-Collapse Behavior of Tubulars: a Simple Approach", *Proceedings, SPE Production & Operations Symp.*, Oklahoma City, OK, paper SPE 29458.
- [2] Brush, D. O. and B. O. Almroth, 1975, *Buckling of Bars, Plates, and Shells*, McGraw-Hill.
- [3] Burton, R. H. and Craig, J. M., 1963, "An investigation into the energy absorbing properties of metal tubes loaded in the transverse direction", *B.Sc. (Eng.) Report*, University of Bristol, Bristol, U.K.
- [4] DeRuntz, J. A. and Hodge, P. G., 1963, "Crushing of a tube between rigid plates", *Journal of Applied Mechanics*, ASME, No. 30, pp. 391 - 395.
- [5] Duan, L., Chen, W. F. and Loh, J. T., 1993, "Analysis of Dented Tubular Members Using Moment Curvature Approach", *Thin-Walled Structures*, Vol. 15, pp. 15-41.
- [6] Ellinas, C. and Walker, C. A., 1985, "Damage on Offshore Tubular Bracing Members", *Int. Assoc. Bridges and Structural Engineering*, Vol. 42, pp. 253-261.
- [7] Ghosh, S. K., Johnson, W., Reid, S. R. and Yu, T. X., 1981, "On Thin Rings and Short Tubes Subjected to Centrally Opposed Concentrated Loads", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 23, pp. 183 - 194.
- [8] Hibbit, H. D., Karlsson, B. I., and Sorensen, 2001, *Theory Manual*, ABAQUS, version 6.2, USA.
- [9] Hoo Fatt, M. S. 1998, "Plastic Failure of Pipelines", *8th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Montreal, Canada, pp. 119-126.
- [10] Hoo Fatt, M. S. and Wierzbicki, T., 1991, "Denting Analysis of Ring Stiffened Cylindrical Shells", *Proceedings of the 1st European Offshore Mechanics Symposium*, Trondheim, Norway, pp. 153 - 163.
- [11] Hvan, C., Bruschi, R., Tominez, M. and Vitali, L., 1990, "Risk of Pipe Damage from Dragging Anchors", *1st European Offshore Mechanics Symposium*, Trondheim, Norway, pp. 388-398.
- [12] Karamanos, S. A., 1996, "Stability of Pressurized Long Inelastic Cylinders Under Radial Transverse Loads", *Computational Mechanics*, Vol.117, No.2, pp.150-155.
- [13] 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
- [14] Kyriakides, S. and Park, T.-D., 1996, "On the Collapse of Dented Cylinders Under External Pressure", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 38, pp. 557-578.
- [15] Leu D.-K., 1999, Finite-Element Simulation of the Lateral Compression of Aluminum Tube Between Rigid Plates", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 41, pp. 621-638.
- [16] Mandke, J. S., 1990, "Evaluation of Offshore Pipeline Failure Data for Gulf of Mexico", *Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference*, OMAE, Houston, TX, pp. 57-61.

- [17] Mellem, T., Spiten, J., Verley, R. and Moshagen, H., 1996, "Trawl Board Impacts on Pipelines", *Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference*, OMAE, Vol. V, pp. 165-178.
- [18] Nogueira, A. C., 1998, "Link-Beam Model for Dynamic Buckle Propagation in Pipelines", *Proceedings, 8th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Montreal, Canada, pp. 107-113.
- [19] Palmer, A. C. and Martin, J. H., 1975, "Buckle Propagation in Submarine Pipelines", *Nature*, Vol. 254, pp. 46-48.
- [20] Reddy, T. Y. and Reid, S. R., 1979, "On obtaining material properties from the ring compression test", *Nuclear Engineering & Design*, No. 52, pp. 257 - 263.
- [21] Redwood, R. G., 1964, Discussion of the paper by J. A. DeRuntz and P. G. Hodge, 1963, *Journal of Applied Mechanics*, ASME, No. 31, pp. 357 - 358.
- [22] Reid, S. R. and Bell, W. W., 1982, "Influence of Strain Hardening on the Deformation of Thin Rings Subjected to Opposed Concentrated Loads.", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 18, No. 8, pp. 643 - 658.
- [23] Reid, S. R. and Reddy, T. Y., 1978, "Effects of strain hardening on the lateral compression of tubes between rigid plates", *International Journal of Solids and Structures*, No. 14, pp. 213 - 225.
- [24] Reid, S. R., 1983, "Laterally Compressed Metal Tubes as Impact Energy Absorbers", *Structural Crashworthiness*, Edited by N. Jones and T. Wierzbicki, Butterworths.
- [25] Reid, S. R., 1985, "Metal Tubes as Impact Energy Absorbers", *Metal Forming and Impact Mechanics*, Edited by S. R. Reid, Pergamon Press, New York.
- [26] Taby, J. and Moan, T., 1985, "Collapse and Residual Strength of Damaged Tubular Members", *Proceedings 4th Int. Conf. Behavior of Offshore Structures*, BOSS 85, Delft, The Netherlands.
- [27] Timoshenko, S. and Gere, J. M., 1961, *Theory of Elastic Stability*, Second Edition, McGraw-Hill, New York, NY.
- [28] Watson, A. R., Reid, S. R., Johnson, W. and Thomas, S. G., 1976, "Large deformations of thin-walled circular tubes under transverse loading - II", *International Journal of Mechanical Sciences*, No. 18, pp. 387 - 397.
- [29] Wierzbicki, T. and Suh, M. S., 1988, "Indentation of Tubes under Combined Loading", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 30, No. 3/4, pp. 229-248.
- [30] Wildschut, H. and ter Avest, F. J., 1984, "The Influence of the Pipe Wall Thickness on the Resistance to External Damage of Steel Gas Transmission Pipe Lines", *Report 84M/33/0145058-E/WID/VLT*, Metaalinstituut TNO, Apeldoorn, The Netherlands.
- [31] Yeh, M. K. and Kyriakides, S., 1986, "On the Collapse of Inelastic Thick-Walled Tubes Under External Pressure", *Journal of Energy Resources Technology*, ASME, Vol. 108, pp. 35-47.
- [32] Young, W. C. and Budynas, R. G., *Roark's Formulas for Stress and Strain*, Chapter 13, Seventh Edition, McGraw-Hill.
- [33] Zeinoddini, M., Harding, J. E., Parke, G. A. R., 1999, "Dynamic Behavior of Axially Pre-Loaded Tubular Steel members of Offshore Structures Subjected to Impact Damage", *Ocean Engineering*, Vol. 26, pp. 963-978.

- [34] Zeinoddini, M., Harding, J. E., Parke, G. A. R., 2000, "Contribution of Ring Resistance in the Behavior of Steel Tubes Subjected to a Lateral Impact", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 42, pp. 2303-2320.

ΕΥΓΓΡΑΦΕΑΣ	
ΤΙΤΛΟΣ	
ΛΗΞΗ	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΔΑΝΕΙΖΟΜΕΝΟΥ
7-11-02	901
31/01/03	ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΥ
6-6-03	ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΥ
2 2	

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
 Τηλ.: 74.760 -61

