



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ :**

*Ανάλυση της επιρροής της κατεργασίας UOE στην αντοχή υποθαλάσσιων μεταλλικών αγωγών, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων*

**Φοιτήτρια: Αικατερίνη Παππά**



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2005



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

Αριθ. Εισ.: 4527/1  
Ημερ. Εισ.: 15-07-2005  
Δωρεά: Συγγραφέας  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ  
2005  
ΠΑΠ

© 2005 Αικατερίνη Παππά

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



## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Σπύρο Καραμάνο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου.

Ευχαριστώ επίσης τους προπτυχιακούς, μεταπτυχιακούς και διδακτορικούς φοιτητές του εργαστηρίου της Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών για την υποστήριξη και τη βοήθεια τους τον τελευταίο χρόνο.

Θερμές ευχαριστίες στους φίλους και στους συμφοιτητές μου για την εποικοδομητική συνεργασία και την δημιουργία ενός ιδιαίτερα ευχάριστου κλίματος κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Κώστα και Βάγια Παππά για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους, ηθική και οικονομική, όλα αυτά τα χρόνια καθώς και την πίστη που μου έδειξαν στο ότι μπορώ να τα καταφέρω. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην μητέρα μου και στον πατέρα μου καθώς και στους αδερφούς μου Θανάση και Άρη.

Κατερίνα Παππά

# **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

## Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Γενικά.....	3
1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	4
1.3 Στόχος της διπλωματικής εργασίας.....	4

## Κεφάλαιο 2 : Προσομοίωση της παραμόρφωσης σωλήνων υπό εξωτερική πίεση

2.1 Θεωρία αστοχίας δακτυλίου υπό ομοιόμορφη εξωτερική πίεση.....	7
2.2 Ελαστική-πλαστική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων	
2.2.1 Ελαστική ανάλυση.....	8
2.2.2 Ελαστοπλαστική ανάλυση.....	13
2.3 Επιβεβαίωση πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων .....	14
2.4 Περιγραφή της UOE επεξεργασίας .....	17
2.5 Περιγραφή της UO και της UOC επεξεργασίας.....	18
2.6 Περιγραφή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	20

## Κεφάλαιο 3 : Περιγραφή πειραμάτων

3.1 Πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί από Van Foeken και A.M Gresnight.....	23
3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την κρίσιμη τιμή του φορτίου της πίεσης.....	25
3.3 Ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων .....	25

## Κεφάλαιο 4 : Παραμετρική μελέτη

4.1 Γενικά .....	30
4.2 Παραμετρική μελέτη .....	30
4.3 Παραμετρική μελέτη για UO και UOC επεξεργασία .....	46
4.4 Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για τις UOE, UO και UOC επεξεργασίες.....	51
4.5 Διαγράμματα τάσης κατά Mises-ισοδύναμης παραμόρφωσης για τις UOE, UO και UOC επεξεργασίες.....	58

Κεφάλαιο 5 : Σύγκριση με API Bulletin 5C3

5.1 Σύγκριση με API Bulletin 5C3.....	65
Συμπεράσματα.....	73
Βιβλιογραφία.....	74

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή**

### **1.1 Γενικά**

Μια συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος κατασκευής υποθαλάσσιων σωληνωτών μεταλλικών αγωγών σχετικά μεγάλων διαμέτρων, είναι η διαδικασία της κατεργασίας τύπου **UOE** πολύ μεγάλων μεταλλικών επίπεδων ελασμάτων. Τα μεταλλικά αυτά επίπεδα ελάσματα κάμπτονται παίρνοντας μια κυκλική μορφή και στη συνέχεια συγκολλώνται κατά μήκος μιας γενέτειρας. Η περιφέρεια του σωλήνα αρχικά συστέλλεται και στη συνέχεια διαστέλλεται πλαστικά με μηχανικά μέσα, για να αναπτυχθεί με αυτόν τον τρόπο υψηλή αντοχή της κυκλικής μορφής. Αυτή η διαδικασία, εξαιτίας της περιφερειακής συστολής, περιλαμβάνει μια συνολική μείωση του αρχικού πλάτους. Έτσι, στη συνέχεια πραγματοποιείται μια διαστολή ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές διαστάσεις και να μειωθούν οι αρχικές ατέλειες. Αυτά τα μηχανικά βήματα της **UOE** επεξεργασίας προκαλούν μεταβολές στο υλικό και παραμένουσες τάσεις στον τελικό αγωγό.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πειραματική και αναλυτική μελέτη της ικανότητας ενός σωλήνα, να αντισταθεί στην κατάρρευση μετά από φόρτιση εξωτερικής πίεσης κατά τη **UOE** διαδικασία. Αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό, ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων δυο διαστάσεων για τη μελέτη της επίδρασης της εξωτερικής πίεσης κατά την **UOE** επεξεργασία. Το μοντέλο αυτό δίνει μια ποιοτική απεικόνιση της επιρροής της εξωτερικής πίεσης στην αντοχή σωληνωτών μεταλλικών αγωγών σε μεγάλα θαλάσσια βάθη. Παράλληλα, αναπτύχθηκαν αντίστοιχα μοντέλα για τις κατεργασίες με **UO** και **UOC** επεξεργασία οι οποίες είναι συγγενικές με την **UOE** επεξεργασία, έτσι ώστε να συγκρίνουμε την επιρροή της κάθε κατεργασίας στην αντοχή σε εξωτερική πίεση. Τα δυο αυτά μοντέλα περιγράφονται στη συνέχεια αναλυτικότερα. Επίσης, στη συνέχεια μελετώνται αλλαγές στο υλικό και στη γεωμετρία των σωλήνων για τις τρεις αυτές επεξεργασίες.

### 1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

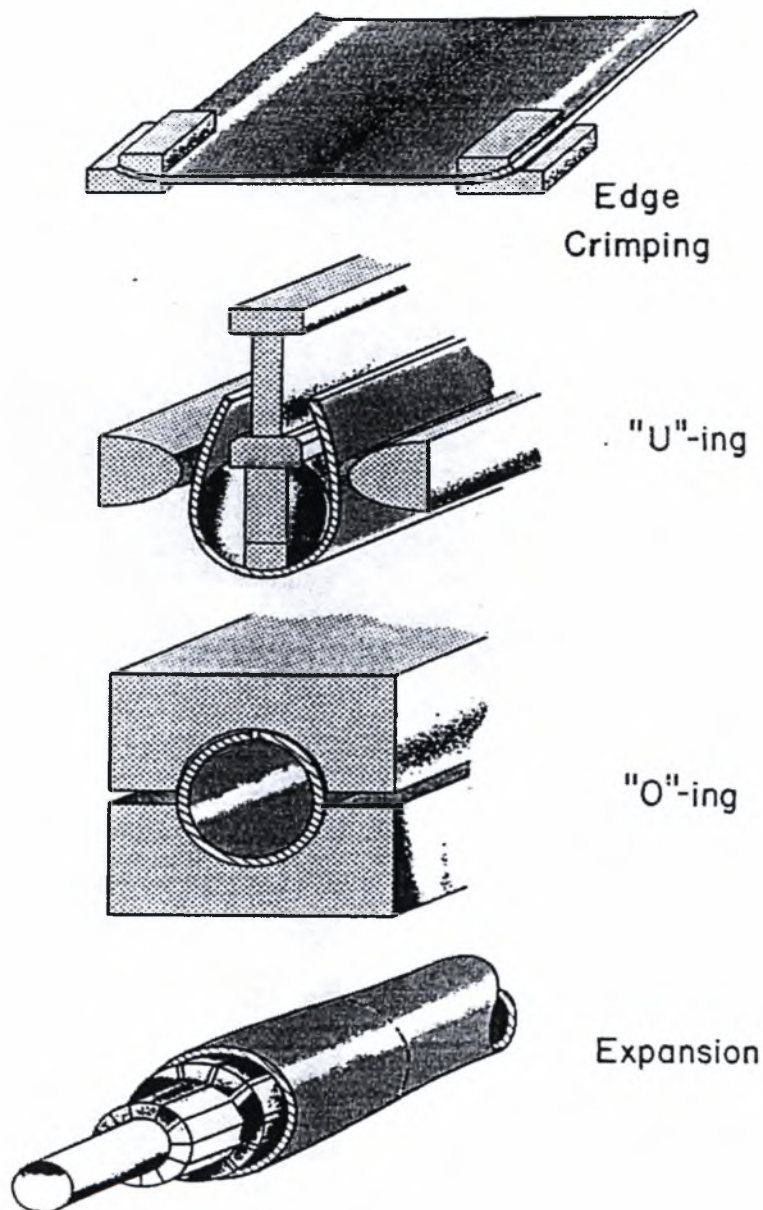
Μια ανάλυση της κατεργασίας **UOE** και της επιρροής της στην αντοχή σε πίεση, παρουσιάστηκε από τους Kyriakides et. al (1991). Η επεξεργασία της κατεργασίας προσομοιώθηκε για ένα σωλήνα με εξωτερική διάμετρο 26 in. (660 mm) και πάχος 1.33 in (33.78mm). Μετά το τέλος της προσομοίωσης υπολογίστηκε το κρίσιμο φορτίο της πίεσης και βρέθηκε ότι η οριακή πίεση με την **UOE** επεξεργασία μειώνεται σε σημαντικό βαθμό. Επίσης, προσομοιώθηκε ένας ίδιος σωλήνας μόνο με περιφερειακή συστολή (χωρίς διαστολή) και βρέθηκε να έχει μικρότερη μείωση στην τιμή του κρίσιμου φορτίου της πίεσης.

Μια άλλη εργασία στο ίδιο αντικείμενο παρουσιάστηκε και από τους Foeken and Gresnigt (1998). Η συνολική μελέτη αποτελείται από πειράματα, τα οποία θα περιγραφούν αναλυτικότερα παρακάτω, υπολογισμούς για την εύρεση του τρόπου σχεδιασμού και των συνθηκών της προσομοίωσης, και τέλος, προσομοίωση και συμπεράσματα. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην επιρροή της επεξεργασίας στην κατάρρευση μετά από επίδραση εξωτερικής πίεσης. Όπως και στην ανάλυση των Kyriakides et. al (1991), παρατηρήθηκε μια σημαντική μείωση του κρίσιμου φορτίου της πίεσης με χρήση της **UOE** επεξεργασίας σε σχέση με κατεργασία χωρίς περιφερειακή διαστολή.

### 1.3 Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα διπλωματική εργασία έχουν προσομοιωθεί οι **UOE**, **UO** και **UOC** επεξεργασίες για λόγους σύγκρισης. Κατά τη **UOE** επεξεργασία αρχικά στρέφουμε το μεταλλικό επίπεδο έλασμα κατά 180° (επεξεργασία "U") και αφού πάρει τη μορφή σωλήνα συστέλλεται έτσι ώστε η συνολική περιφερειακή παραμόρφωση να είναι  $\epsilon_{\theta}=-0.5\%$  (επεξεργασία "O"). Στη συνέχεια, ο σωλήνας αποφορτίζεται και αμέσως μετά διαστέλλεται με συνολική περιφερειακή παραμόρφωση  $\epsilon_{\theta}=1\%$  (επεξεργασία "E"). Στο τέλος, ο σωλήνας αποφορτίζεται κι έτσι ολοκληρώνεται η **UOE** επεξεργασία. Μια σχηματική παρουσίαση των βασικών μηχανικών βημάτων της **UOE** επεξεργασίας φαίνεται στην εικόνα 1.1.





Εικόνα 1.1 Σχηματική απεικόνιση των βημάτων της UOE επεξεργασίας (εικόνα από Kyriakides et al. )

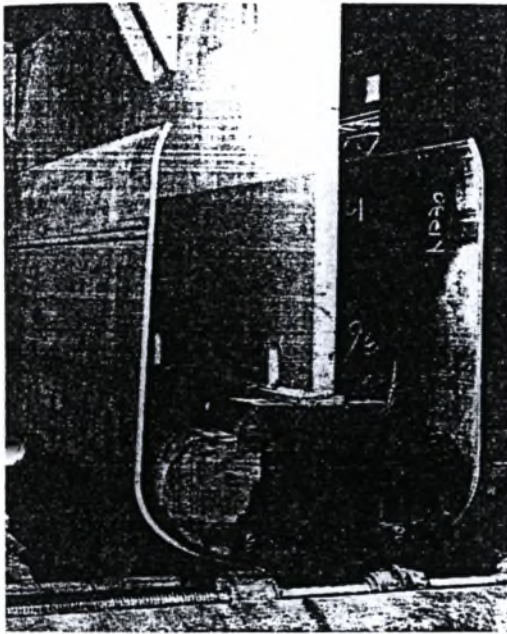
Η UOC επεξεργασία επιτυγχάνεται μόνο με συστολή του σωλήνα κατά  $\epsilon_{\theta} = -1.3\%$  και αποφόρτιση. Τέλος, στην UO επεξεργασία τα βήματα είναι ίδια με αυτά της UOE επεξεργασίας με παράλειψη της διαστολής και της άμεσης αποφόρτισης.

Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης των τριών αυτών κατεργασιών, εφαρμόζεται εξωτερική πίεση στους σωλήνες. Με την σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις τρεις

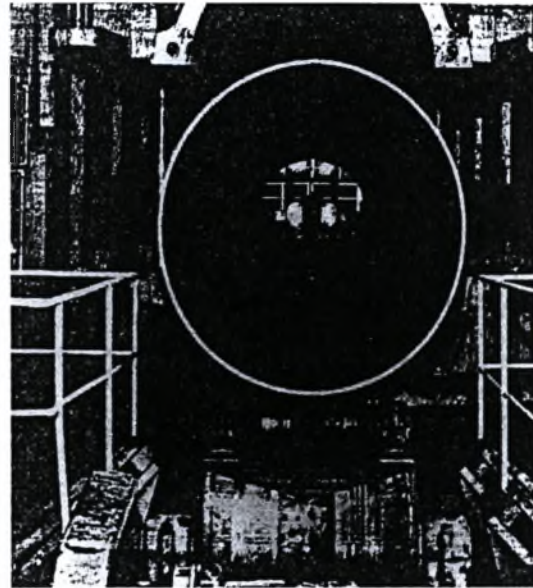
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή

αυτές επεξεργασίες μπορούν να βγουν ικανοποιητικά συμπεράσματα όσον αφορά την επιρροή της κάθε κατεργασίας στην αντοχή των σωλήνων σε εξωτερική πίεση, με σκοπό τη χρήση τους ως αγωγούς για μεγάλα θαλάσσια βάθη.

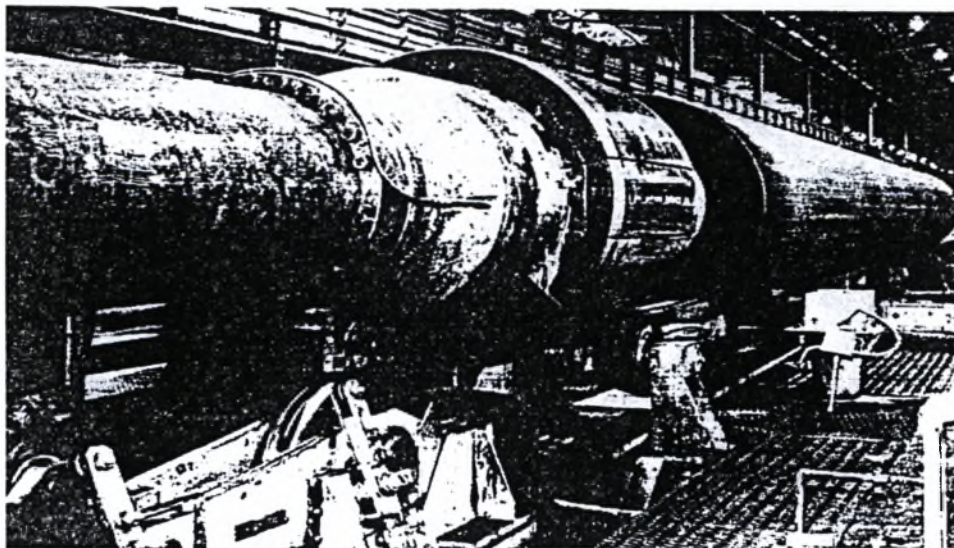
Στις εικόνες 1.2 (a, b, c) παρουσιάζονται κάποιες εικόνες από τις βιομηχανίες μετάλλου Sumitomo.



(a) “U” επεξεργασία



(b) “O” επεξεργασία



(c) “E” επεξεργασία

Εικόνα 1.2 UOE επεξεργασία από βιομηχανίες μετάλλου Sumitomo

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Προσομοίωση της παραμόρφωσης σωλήνων υπό εξωτερική πίεση**

### **2.1 Θεωρία αστοχίας δακτυλίου υπό ομοιόμορφη εξωτερική πίεση**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται δακτύλιοι από χάλυβα. Το κρίσιμο φορτίο ελαστικού λυγισμού υπό εξωτερική πίεση εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας  $E$  και από τη γεωμετρία. Συγκεκριμένα εξαρτάται από το λόγο  $\frac{t}{D}$  και όχι από το  $D$  ή το  $t$  σε απόλυτο μέγεθος, όπου  $t$  είναι το πάχος και  $D$  η διάμετρος του δακτυλίου. Το φορτίο είναι ομοιόμορφη εξωτερική πίεση η οποία είναι πάντα κάθετη στην εκάστοτε παραμορφωμένη επιφάνεια.

Για επίπεδη παραμόρφωση όπου  $\epsilon_x=0$ , η σχέση  $\sigma_\theta-\epsilon_\theta$  θα είναι:

$$\sigma_\theta = \frac{E\epsilon_\theta}{(1-\nu^2)}, \quad (2.1)$$

όπου  $\nu$  είναι ο αριθμός Poisson.

Με πραγματοποίηση ανάλυσης ευστάθειας το κρίσιμο φορτίο λυγισμού προκύπτει να είναι ίσο με:

$$P_{cr} = P_E = \frac{2E}{(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{D_m}\right)^3, \quad (2.2)$$

$$\text{για } \frac{D}{t} \geq \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}},$$

όπου  $\sigma_y$  είναι το όριο διαρροής.

Στην περίπτωση όπου πραγματοποιείται πλαστική ανάλυση ισχύει ο τύπος:

$$P_{cr} = P_y = 2\sigma_y \left(\frac{t}{D_m}\right), \quad (2.3)$$

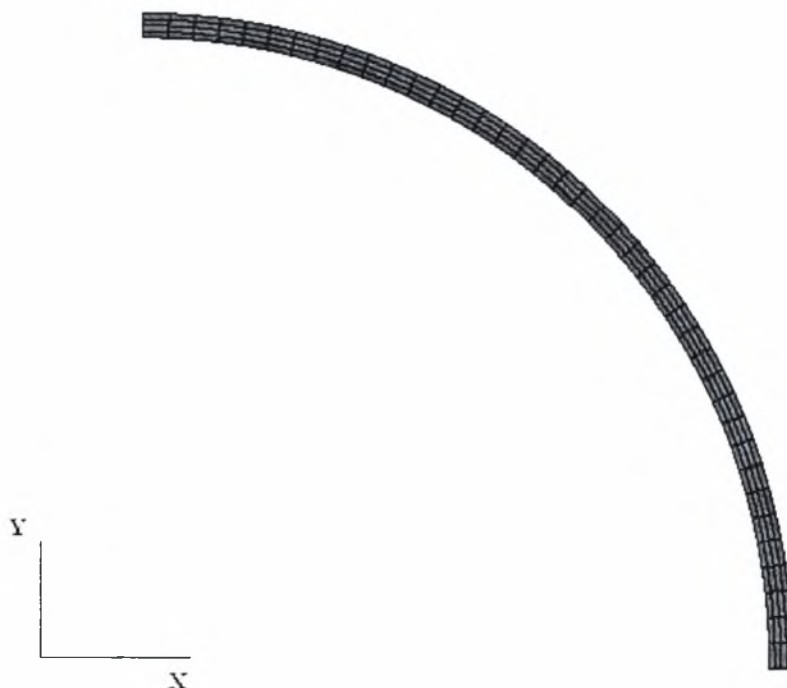
$$\text{για } \frac{D}{t} \leq \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}.$$

## 2.2 Ελαστική-πλαστική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων

### 2.2.1 Ελαστική ανάλυση

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ελαστική ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων για λεπτότοιχο δακτύλιο από χάλυβα, ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του υπό την επίδραση ακτινικής δύναμης και εξωτερικής πίεσης. Η ελαστική ανάλυση που πραγματοποιείται εφαρμόζεται μόνο για μικρές παραμορφώσεις υπό κάποιο ακτινικό φορτίο. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα από την ελαστική ανάλυση προσφέρουν κάποιες χρήσιμες πληροφορίες για την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια του μοντέλου που μελετάται. Πιο συγκεκριμένα, στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus πραγματοποιήθηκε προσομοίωση σε δυο διαστάσεις και ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- i) Δημιουργία του ενός τετάρτου του κύκλου (εφ' όσον υπάρχει συμμετρία), για ακτίνα κύκλου 330 mm και πάχος δακτυλίου 12.7 mm. (Σχήμα 2.1)



Σχήμα 2.1 Το ¼ του δακτυλίου στην απαραμόρφωτη κατάσταση



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Προσομοίωση της παραμόρφωσης σωλήνων υπό εξωτερική πίεση

- ii) Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας  $E=210 \text{ GPa}$ , τάση διαρροής  $\sigma_y=300 \text{ MPa}$  και αριθμό Poisson  $\nu=0.3$ .
- iii) Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι για επίπεδη ένταση (plane strain).
- iv) Για μεγάλες παραμορφώσεις κατά την μοντελοποίηση, οι τιμές πραγματικής τάσης- λογαριθμικής παραμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκαν είναι σύμφωνα με τους τύπους:

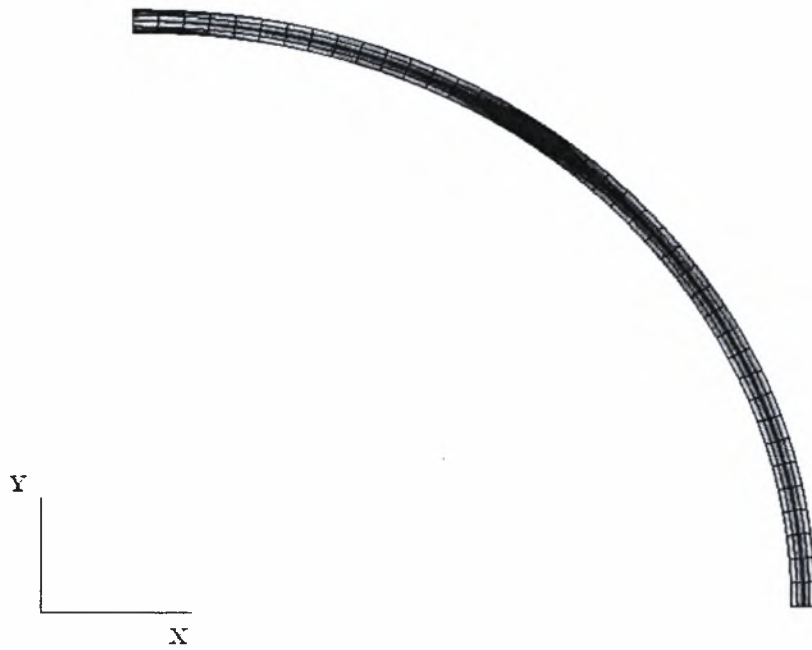
$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.4)$$

και

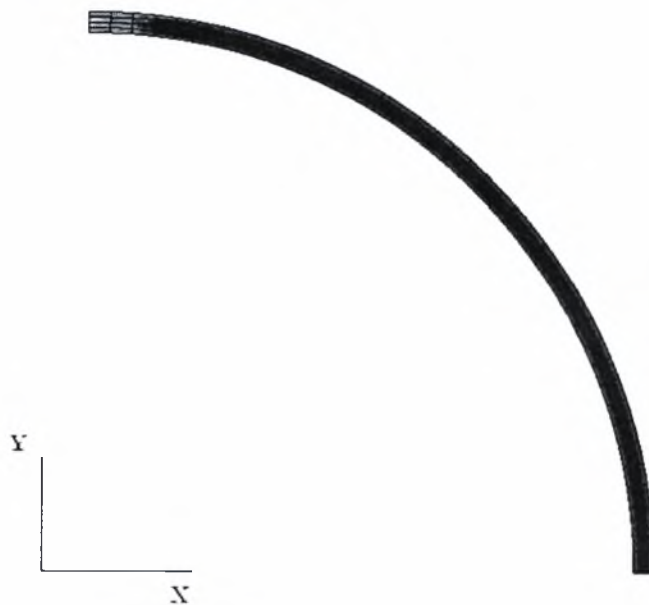
$$\varepsilon^p = \ln(1 + \varepsilon) - \frac{\sigma_T}{E} \quad (2.5)$$

όπου  $\sigma$ : ονομαστική τάση και  $\varepsilon$ : ανηγμένη παραμόρφωση.

- v) Στο πρώτο βήμα ο δακτύλιος φορτίζεται με μια ακτινική δύναμη (Σχήμα 2.2) για να δημιουργηθεί μια αρχική ατέλεια, στο δεύτερο βήμα αποφορτίζεται (Σχήμα 2.3) και στο τρίτο βήμα εφαρμόζεται μια εξωτερική πίεση έως ότου επέλθει η κατάρρευση (Σχήμα 2.4).



**Σχήμα 2.2 Φόρτιση του δακτυλίου με μια ακτινική δύναμη**

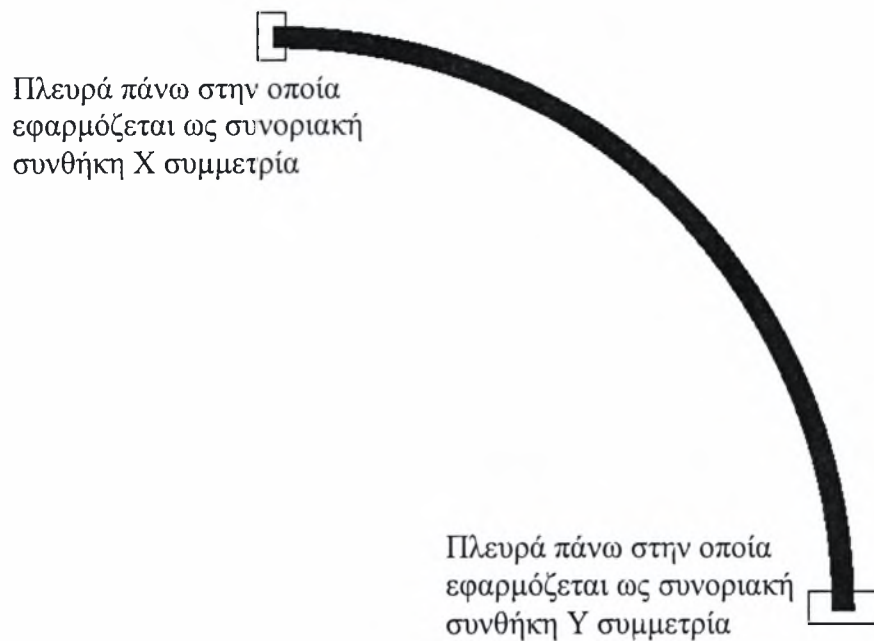


**Σχήμα 2.3 Αποφόρτιση του δακτυλίου**



**Σχήμα 2.4 Παραμόρφωση λόγω της εφαρμογής εξωτερικής πίεσης**

- vi) Τα δύο πρώτα βήματα για την αριθμητική επίλυση χρησιμοποιούν "static general" ανάλυση και το τρίτο "static riks" ανάλυση.
- vii) Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν είναι για την αριστερή πλευρά του δακτυλίου X συμμετρία και για την κάτω πλευρά του δακτυλίου Y συμμετρία όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5.



**Σχήμα 2.5 Συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται**

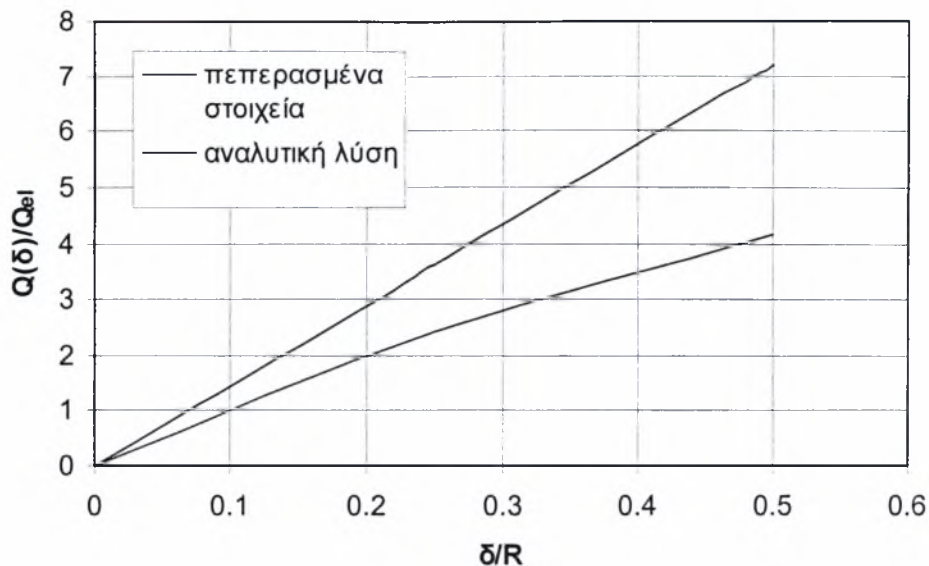
Η γραμμική ελαστική λύση για ένα δακτύλιο που φορτίζεται με δύο θλιπτικά αντιδιαμετρικά φορτία  $Q$ , που δρουν στη διεύθυνση της διαμέτρου του δακτυλίου με μετατόπιση  $\delta$  είναι η ακόλουθη (Timoshenko and Gere 1961):

$$Q_{el}(\delta) = \frac{1.12E}{(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{R}\right)^3 \delta \quad (2.6),$$

όπου  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας,  $\nu$  είναι ο αριθμός Poisson,  $t$  είναι το πάχος δακτυλίου και  $R$  είναι η ακτίνα του δακτυλίου.

Τα αποτελέσματα για την περίπτωση μηδενικής πίεσης παρατίθενται στο σχήμα 2.6. Η αναλυτική λύση για μηδενική πίεση έχει προκύψει από τον τύπο (2.4) και συγκρίνεται στο σχήμα 2.6 με τη λύση που προκύπτει με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.





**Σχήμα 2.6** Σύγκριση αναλυτικής λύσης και λύσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Για μικρές μετατοπίσεις η γραμμική λύση είναι πολύ κοντά με αυτή του μοντέλου. Από την άλλη, οι γεωμετρικές μη γραμμικότητες είναι υπεύθυνες για την παρέκκλιση των δύο λύσεων καθώς το φορτίο αυξάνει.

### 2.2.2 Ελαστοπλαστική ανάλυση

Η πλαστική λύση για δακτύλιο που φορτίζεται με δύο θλιπτικά φορτία  $Q$ , που δρουν στη διεύθυνση της διαμέτρου του δακτυλίου με μετατόπιση  $\delta$  είναι η ακόλουθη:

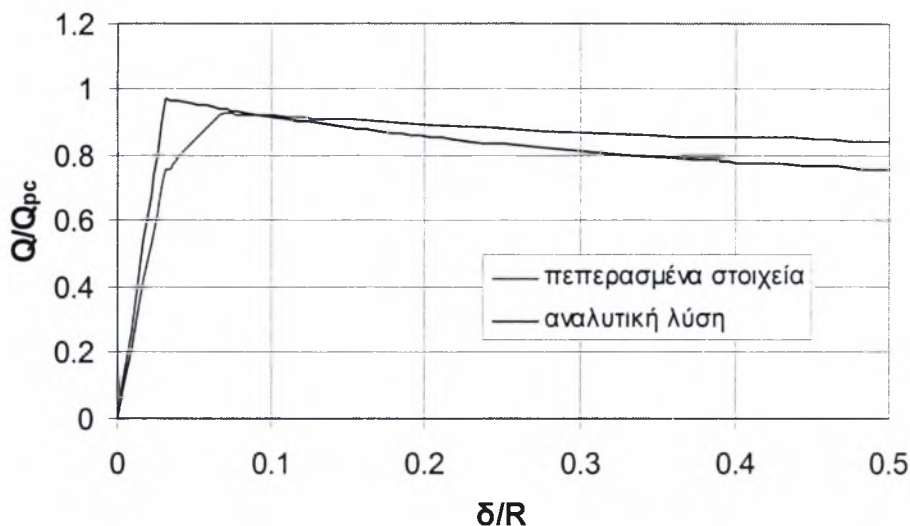
$$Q_{pl}(\delta) = 4 \frac{M_p}{\beta} = \frac{\sigma_y^* t^2}{2\beta} \quad (2.7),$$

$$\text{όπου } \beta = R \sqrt{1 + \frac{2\delta}{R} - \frac{\delta^2}{R^2}}.$$

Στο σχήμα 2.7 φαίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την ελαστοπλαστική λύση με μηδενική εξωτερική πίεση και υπό την επίδραση του ακτινικού φορτίου μόνο

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Προσομοίωση της παραμόρφωσης σωλήνων υπό εξωτερική πίεση

που έχει υπολογιστεί με βάση τον τύπο (2.5), η οποία συγκρίνεται με τη λύση που έχει προκύψει με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.



0,

**Σχήμα 2.7 Σύγκριση αναλυτικής λύσης και λύσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων**

Όπως είναι προφανές, το απλοποιημένο μοντέλο παρουσιάζει κάποια δικαιολογημένη απόκλιση από τη πλαστική λύση, η οποία όμως μπορεί να θεωρηθεί μικρή, επομένως το μοντέλο αυτό αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση για την πρόβλεψη του κρίσιμου φορτίου.

### 2.3 Επιβεβαίωση πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

Κατά την προσομοίωση, έπρεπε να αποφασιστεί το είδος του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί. Έτσι πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων όπου διαφοροποιούνταν ο αριθμός των κόμβων κατά το πάχος και κατά την περιφέρεια του δακτυλίου. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικά πειράματα με χρήση πεπερασμένων στοιχείων και ως προς το είδος του πλέγματος δοκιμάζοντας 4-κομβικό και 8-κομβικό πλέγμα αντίστοιχα.

Για να αποφασιστεί το τελικό πλέγμα θα πρέπει η μέγιστη τιμή της πίεσης στα διαγράμματα πίεσης – ovalization που προκύπτουν από την ανάλυση με πεπερασμένα

στοιχεία να είναι κοντά στην τιμή που προκύπτει από την αριθμητική ανάλυση. Η αναλυτική λύση για σχετικά λεπτότοιχο δακτύλιο είναι όπως ήδη έχουμε αναφέρει:

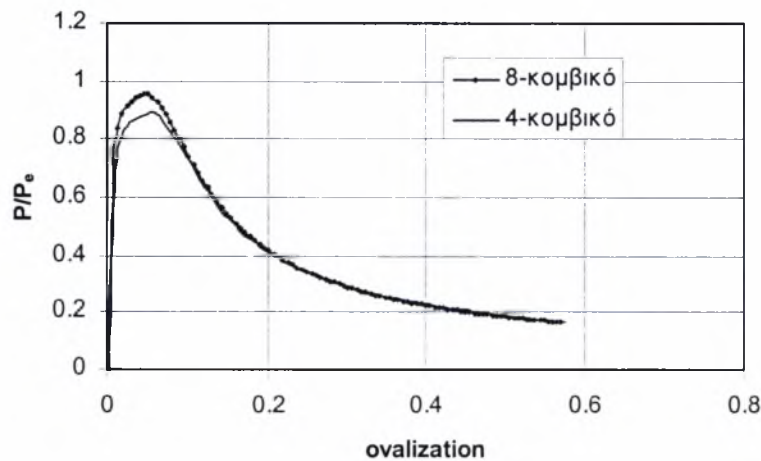
$$P_{cr} = P_e = \frac{2E}{(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{D_m} \right)^3.$$

ενώ το ovalization (οv) δίνεται από τον τύπο:

$$ov = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} = \frac{2(R + \delta_H) - 2(R + \delta_V)}{2R} = \frac{\delta_H + \delta_V}{R} \quad (2.8),$$

όπου  $\delta_H$ : η οριζόντια μετατόπιση και  $\delta_V$ : η κατακόρυφη μετατόπιση. Το αρχικό ovalization θα πρέπει να είναι αρκετά μικρό ώστε οι αρχικές ατέλειες να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες.

Έτσι για μια μικρή αρχική δύναμη (δηλαδή για μια μικρή αρχική παραμόρφωση) για τον ίδιο αριθμό στοιχείων (ενδεικτικά χρησιμοποιούνται 4 στοιχεία κατά το πάχος και 40 κατά το ένα τέταρτο της περιφέρειας) για 8-κομβικό και 4-κομβικό πλέγμα, η σύγκρισή τους για το διάγραμμα πίεσης-ovalization φαίνεται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8 Σύγκριση 4-κομβικού και 8-κομβικού πλέγματος

Στην περίπτωση αυτή από ανάλυση ευστάθειας με χρήση του τύπου (2.2), προκύπτει ότι  $P_{cr}=3.105$  MPa και από ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων είναι για 4-κομβικό πλέγμα:  $P_{cr}= 2.78$  MPa ενώ για 8-κομβικό πλέγμα:  $P_{cr}=2.963$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Προσομοίωση της παραμόρφωσης σωλήνων υπό εξωτερική πίεση

MPa. Όπως φαίνεται λοιπόν, για το 8-κομβικό πλέγμα το κρίσιμο θεωρητικό φορτίο προσεγγίζεται καλύτερα.

Αντίστοιχα, δοκιμάζοντας διαφορετική πυκνότητα κατά το πάχος του σωλήνα και κατά την περιφέρεια, έχουν προκύψει ενδεικτικά τα παρακάτω αποτελέσματα για πολύ μικρή αρχική ατέλεια, που παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 2.1 για 8-κομβικά στοιχεία.

Είδος στοιχείου	Αριθμός στοιχείων κατά το πάχος	Αριθμός στοιχείων κατά το ¼ της περιφέρειας	Κρίσιμη τιμή $P_{cr}$ (MPa)
8-κομβικό	1	32	2.833
	2	32	2.962
	3	32	2.964
	4	32	2.984
	1	40	2.886
	2	40	2.964
	3	40	2.984
	4	40	3.04

**Πίνακας 2.1 Σύγκριση για διαφορετική πυκνότητα**

Όπως φαίνεται, οι διαφορές είναι πολύ μικρής τάξεως μεγέθους, όμως συμπεραίνεται πως καθώς πυκνώνει το πλέγμα από ένα σημείο και μετά, η διαφοροποίηση στην τιμή του κρίσιμου φορτίου δεν είναι μεγάλη.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για διαφορετική αρχική παραμόρφωση. Είναι λογικό πως όσο μικρότερη είναι η αρχική παραμόρφωση τόσο πιο κοντά είναι η τιμή του κρίσιμου φορτίου από την ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, στην τιμή από αναλυτική λύση με βάση τον τύπο (2.2). Έτσι, για 8-κομβικό πλέγμα με 4 στοιχεία κατά το πάχος και 40 κατά το ¼ της περιφέρειας του σωλήνα, προέκυψαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

	Ακτινική δύναμη [N]	Κρίσιμη τιμή φορτίου [MPa]
Θεωρητική τιμή		3.105
Χρήση πεπερασμένων στοιχείων	-10	3.073
	-60	2.963
	-100	1.613

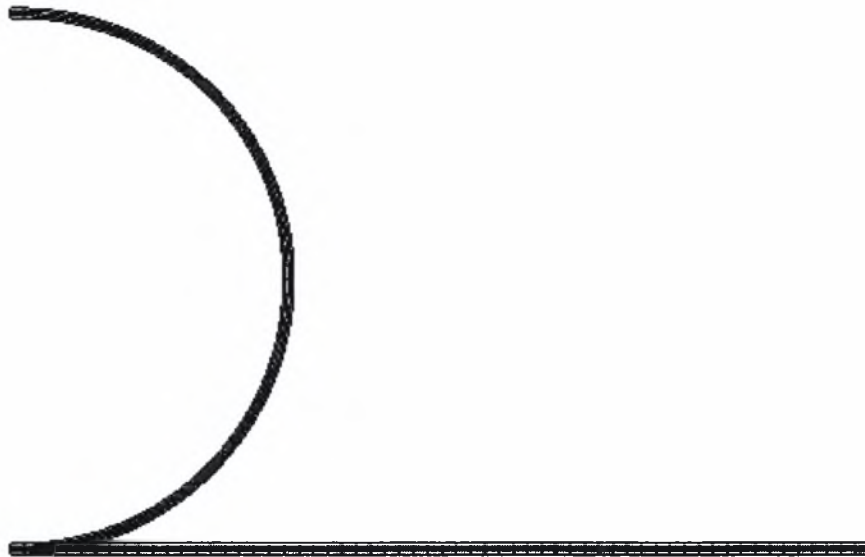
**Πίνακας 2.2 Σύγκριση για διαφορετική αρχική ατέλεια**

Καθώς λοιπόν μικραίνει η αρχική δύναμη (και κατά συνέπεια η αρχική παραμόρφωση) η κρίσιμη τιμή του φορτίου από ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων προσεγγίζει την κρίσιμη τιμή του φορτίου από αναλυτική λύση.

#### **2.4 Περιγραφή της UOE επεξεργασίας**

Η μέθοδος επεξεργασίας **UOE** έχει επιρροή στην συμπεριφορά της κατάρρευσης των σωληνωτών αγωγών. Το μοντέλο που περιγράφεται με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, προσομοιώνει τη μέθοδο επεξεργασίας **UOE**. Ο υπολογισμός είναι βασισμένος στη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων **ABAQUS**. Η **UOE** επεξεργασία μπορεί να προσομοιωθεί από τις ακόλουθες πέντε φάσεις:

i) Το μεταλλικό επίπεδο έλασμα το οποίο έχει μήκος ίσο με την περιφέρεια του σωλήνα που πρόκειται να επεξεργαστεί, στρέφεται κατά  $180^{\circ}$  ώστε να δημιουργηθεί ο σωλήνας, αυξάνοντας σταδιακά την καμπυλότητα έως ότου το μεταλλικό επίπεδο έλασμα να πάρει την κυκλική του μορφή με την απαιτούμενη εξωτερική διάμετρο. Η στροφή αυτή, πραγματοποιείται με χρήση κατάλληλης υποεντολής από το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων. Κρατείται δηλαδή στερεωμένη με κατάλληλη συνοριακή συνθήκη η μια πλευρά του ελάσματος και η άλλη στρέφεται κατά  $180^{\circ}$  με την υποεντολή που έχει αναφερθεί πιο πάνω. Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.9) φαίνεται πως στρέφεται το έλασμα.



**Σχήμα 2.9** Απαραμόρφωτη και παραμορφωμένη κατάσταση μετά τη στροφή

ii) Στο βήμα αυτό, ο σωλήνας φορτίζεται στους εξωτερικούς κόμβους με ακτινικές μετατοπίσεις κατά την X και Y διεύθυνση έως ότου να επιτευχθεί μια συνολική παραμόρφωση  $\epsilon_{\theta}=-0.5\%$ . Αυτό πραγματοποιείται με τη χρήση κατάλληλων συνοριακών συνθηκών.

iii) Στη συνέχεια ο σωλήνας αποφορτίζεται με απενεργοποίηση των συνοριακών συνθηκών που έχουν χρησιμοποιηθεί στο προηγούμενο βήμα.

iv) Μετά από αυτό, ο σωλήνας διαστέλλεται με ακτινικές μετατοπίσεις στους εσωτερικούς κόμβους κατά την X και Y διεύθυνση για να επιτευχθεί μια συνολική παραμόρφωση  $\epsilon_{\theta}=1\%$ .

v) Στο τελευταίο βήμα ο σωλήνας αποφορτίζεται και έτσι, ολοκληρώνεται η **UOE** επεξεργασία.



## **2.5 Περιγραφή της UO και της UOC επεξεργασίας**

Για λόγους σύγκρισης της συμπεριφοράς της κατάρρευσης των σωληνωτών αγωγών για διαφορετικές επεξεργασίες, πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση με τη χρήση

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Προσομοίωση της παραμόρφωσης σωλήνων υπό εξωτερική πίεση

πεπερασμένων στοιχείων, των **UO** και **UOC** επεξεργασιών. Τα δύο αυτά μοντέλα περιγράφονται παρακάτω.

- **UO επεξεργασία**

Η **UO** επεξεργασία μπορεί να προσομοιωθεί από τις ακόλουθες τρεις φάσεις:

i) Όπως και στη **UOE**, το μεταλλικό επίπεδο έλασμα στρέφεται κατά  $180^{\circ}$  αυξάνοντας σταδιακά την καμπυλότητα έως ότου να πάρει την κυκλική του μορφή με την απαιτούμενη εξωτερική διάμετρο. Η στροφή αυτή, πραγματοποιείται κατά τον ίδιο τρόπο όπως περιγράφηκε στην πρώτη φάση για την **UOE** επεξεργασία.

ii) Στο βήμα αυτό, ο σωλήνας φορτίζεται στους εξωτερικούς κόμβους με ακτινικές μετατοπίσεις κατά την X και Y διεύθυνση έως ότου να επιτευχθεί μια συνολική παραμόρφωση  $\epsilon_{\theta} = -0.5\%$ . Αυτό πραγματοποιείται με τη χρήση κατάλληλων συνοριακών συνθηκών.

iii) Στη συνέχεια ο σωλήνας αποφορτίζεται με απενεργοποίηση των συνοριακών συνθηκών που έχουν χρησιμοποιηθεί στο προηγούμενο βήμα. Με αυτό τον τρόπο ολοκληρώνεται η **UO** επεξεργασία που όπως διαπιστώνεται είναι η ίδια με την **UOE** επεξεργασία με παράλειψη των βημάτων iv και v.

- **UOC επεξεργασία**

Για λόγους σύγκρισης με τις κατεργασίες **UOE** και **UO** μοντελοποιείται και η **UOC** επεξεργασία στην οποία αντί για την τελική διαστολή (expansion) πραγματοποιείται συστολή (compression). Η **UOC** επεξεργασία μπορεί να προσομοιωθεί από τις ακόλουθες τρεις φάσεις:

i) Πραγματοποιείται στροφή κατά  $180^{\circ}$ , κατά τον ίδιο τρόπο όπως περιγράφηκε στην πρώτη φάση για την **UOE** επεξεργασία.

ii) Στο βήμα αυτό, ο σωλήνας φορτίζεται στους εξωτερικούς κόμβους με ακτινικές μετατοπίσεις κατά την X και Y διεύθυνση έως ότου να επιτευχθεί μια συνολική



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Προσομοίωση της παραμόρφωσης σωλήνων υπό εξωτερική πίεση

παραμόρφωση  $\varepsilon_{\theta}=-1.3\%$ . Αυτό πραγματοποιείται με τη χρήση κατάλληλων συνοριακών συνθηκών.

iii) Για να ολοκληρωθεί η UOC επεξεργασία ο σωλήνας αποφορτίζεται με απενεργοποίηση των συνοριακών συνθηκών που έχουν χρησιμοποιηθεί στο προηγούμενο βήμα. Κατά την αποφόρτιση του σωλήνα, η παραμένουσα παραμόρφωση είναι  $\varepsilon_{\theta}=-1\%$ .

### 2.6 Περιγραφή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Για την κατασκευή και ανάλυση των μοντέλων έχει χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Το μοντέλο στο οποίο πραγματοποιείται η ανάλυση είναι διδιάστατο. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση είναι τα CPE8 (επίπεδης παραμόρφωσης). Για να καταλήξουμε στο πλήθος των κόμβων που θα χρησιμοποιηθούν κατά το πάχος και κατά την περιφέρεια του δακτυλίου, προηγήθηκε μια σειρά πειραμάτων όπου διαφοροποιούνταν το πλέγμα κατά το πάχος και κατά την περιφέρεια συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με την αναλυτική λύση. Επίσης, πραγματοποιήθηκε και μια σειρά πειραμάτων για να καταλήξουμε και στο είδος των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν στο πλέγμα (μεταξύ 4-κομβικού και 8-κομβικού πλέγματος). Τελικά, κατά το πάχος του δακτυλίου χρησιμοποιούνται τέσσερα και κατά την περιφέρεια 320 8-κομβικά στοιχεία αντίστοιχα, για το μοντέλο του οποίου τα δεδομένα έχουν αναφερθεί στα παραπάνω.

Κατά την ανάλυση λαμβάνονται υπόψη και οι γεωμετρικές μη-γραμμικότητες που δημιουργούνται λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων χρησιμοποιώντας σε όλα τα βήματα της ανάλυσης, την εντολή "nlgeom" στο ABAQUS. Κατά την δημιουργία του μοντέλου της UOE επεξεργασίας χρησιμοποιείται στην ανάλυση μόνο ο μισός σωλήνας εφ' όσον υπάρχει συμμετρία. Το κάτω άκρο είναι στερεωμένο σε όλη την ανάλυση και αυτό στο πρόγραμμα ABAQUS πραγματοποιείται με την εντολή για τις συνοριακές συνθήκες: "ENCASTRE".

Η όλη επεξεργασία πραγματοποιείται σε 6 βήματα. Για τα πρώτα 5 βήματα ακολουθείται η αριθμητική επίλυση με τη χρήση του αλγόριθμου "static general" ενώ για το τελευταίο βήμα ο αλγόριθμος "static riks".



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Προσομοίωση της παραμόρφωσης σωλήνων υπό εξωτερική πίεση

Στο πρώτο βήμα της ανάλυσης πρέπει, όπως ήδη έχει αναφερθεί, να στραφεί το ένα άκρο του μεταλλικού επιπέδου ελάσματος κατά  $180^{\circ}$  ώστε να αποκτήσει κυκλική μορφή. Όμως το μοντέλο είναι διδιάστατο και για να πραγματοποιηθεί αυτή η στροφή θα πρέπει να δεσμευτεί η πλευρά που πρέπει να στρίψει, σε έναν κόμβο αναφοράς (reference node). Οι κινηματικά εξαρτημένοι κόμβοι ακολουθούν την στροφή του κόμβου αναφοράς ώστε να προσομοιωθεί η κυκλική μορφή του άκαμπτου μεταλλικού επιπέδου. Αυτό πραγματοποιείται με την χρήση της υποεντολής "kinematic coupling".

Στο δεύτερο βήμα, για να επιτευχθεί η συστολή του μοντέλου κατά  $\epsilon_{\theta}=-0.5\%$  υπολογίζεται σε κάθε εξωτερικό κόμβο η μετατόπιση που θα πρέπει να έχει κατά τον X και Y άξονα αντίστοιχα. Θεωρείται λοιπόν, η μισή περιφέρεια του δακτυλίου και υπολογίζεται η γωνία  $\theta$  που αντιστοιχεί σε κάθε κόμβο. Τότε οι μετατοπίσεις σε κάθε κόμβο θα είναι:

$$U_x = -w_0 \sin\theta \quad (2.9)$$

και

$$U_y = w_0 \cos\theta \quad (2.10)$$

όπου  $w_0 = \epsilon_{\theta} R$ .

Αυτές οι μετατοπίσεις εφαρμόζονται σε κάθε κόμβο με κατάλληλες συνοριακές συνθήκες (displacement/rotation).

Στο τρίτο βήμα της ανάλυσης γίνεται αποφόρτιση με τη χρήση των υποεντολών "op=NEW" και "op=MOD" για όλες τις συνοριακές συνθήκες.

Στο επόμενο βήμα πρέπει να επιτευχθεί μια διαστολή του μοντέλου από την εσωτερική πλευρά κατά  $\epsilon_{\theta}=1\%$ . Σε αυτή την περίπτωση η μετατόπιση στους δυο άξονες πραγματοποιείται για κάθε κόμβο που βρίσκεται από την εσωτερική πλευρά του δακτυλίου. Κατά τον ίδιο τρόπο που υπολογίστηκαν στο δεύτερο βήμα οι μετατοπίσεις για την περίπτωση αυτή θα είναι:

$$U_x = w_0 \sin\theta \quad (2.11)$$

και

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Προσομοίωση της παραμόρφωσης σωλήνων υπό εξωτερική πίεση

$$U_y = -w_0 \cos \theta \quad (2.12).$$

Στο πέμπτο βήμα όπως και στο τρίτο γίνεται αποφόρτιση κατά τον ίδιο τρόπο.

Η **UOE** επεξεργασία έχει πλέον ολοκληρωθεί. Κατά την ανάλυση που πραγματοποιείται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο που έχει περιγραφεί για την **UOE** επεξεργασία εφαρμόζεται στο έκτο βήμα εξωτερική πίεση έως ότου το μοντέλο να καταρρεύσει. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να υπολογιστεί η αντοχή σωληνωτών μεταλλικών αγωγών, που είναι και το ζητούμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αντίστοιχα, στη **UO** επεξεργασία τα βήματα i-iii είναι τα ίδια με την **UOE** επεξεργασία. Σαν τέταρτο βήμα εδώ χρησιμοποιείται η εφαρμογή της εξωτερικής πίεσης έως ότου το μοντέλο να καταρρεύσει.

Τέλος, κατά την **UOC** επεξεργασία το πρώτο βήμα είναι το ίδιο με τα προηγούμενα. Στο δεύτερο βήμα για να επιτευχθεί η συστολή του μοντέλου κατά  $\epsilon_\theta = -1.3\%$  υπολογίζεται σε κάθε εξωτερικό κόμβο η μετατόπιση που θα πρέπει να έχει κατά τον X και Y άξονα αντίστοιχα. Οι μετατοπίσεις σε κάθε κόμβο υπολογίζονται από τους τύπους (2.9) και (2.10). Αυτές οι μετατοπίσεις εφαρμόζονται σε κάθε κόμβο με κατάλληλες συνοριακές συνθήκες (displacement/rotation).

Στο τρίτο βήμα της ανάλυσης γίνεται αποφόρτιση με τη χρήση των υποεντολών "op=NEW" και "op=MOD" για όλες τις συνοριακές συνθήκες και τέλος, στο τέταρτο βήμα εφαρμόζεται εξωτερική πίεση έως ότου να υπάρξει κατάρρευση.

Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης των τριών επεξεργασιών μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα και να γίνει η σύγκρισή τους όσον αφορά την επιρροή της κάθε κατεργασίας στην αντοχή υπό εξωτερική πίεση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Περιγραφή πειραμάτων

### 3.1 Πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί από Van Foeken and Gresnigt (1998)

Στην ανάλυση αυτή έχουν πραγματοποιηθεί κάποια πειράματα σε τρεις σωλήνες για τον υπολογισμό της κρίσιμης τιμής του φορτίου της πίεσης, με χρήση της UOE επεξεργασίας. Ο πίνακας 1. παρουσιάζει τις διαστάσεις για κάθε σωλήνα που επεξεργάζεται.

Όνομα σωλήνα	Τύπος επεξεργασίας	Πάχος t [mm] (in)	Διάμετρος D [mm] (in)	Ovalization [%]	D/t
C1	UOE	11.55 (0.4547)	509.5 (20.06)	0.246	44.1
C3	UOE	19.04 (0.7496)	508. (20.)	0.108	26.7
C4	UOE	23.65 (0.9311)	525.7 (20.07)	0.086	22.2

**Πίνακας 1. Διαστάσεις σωλήνων που χρησιμοποιούνται στα πειράματα**

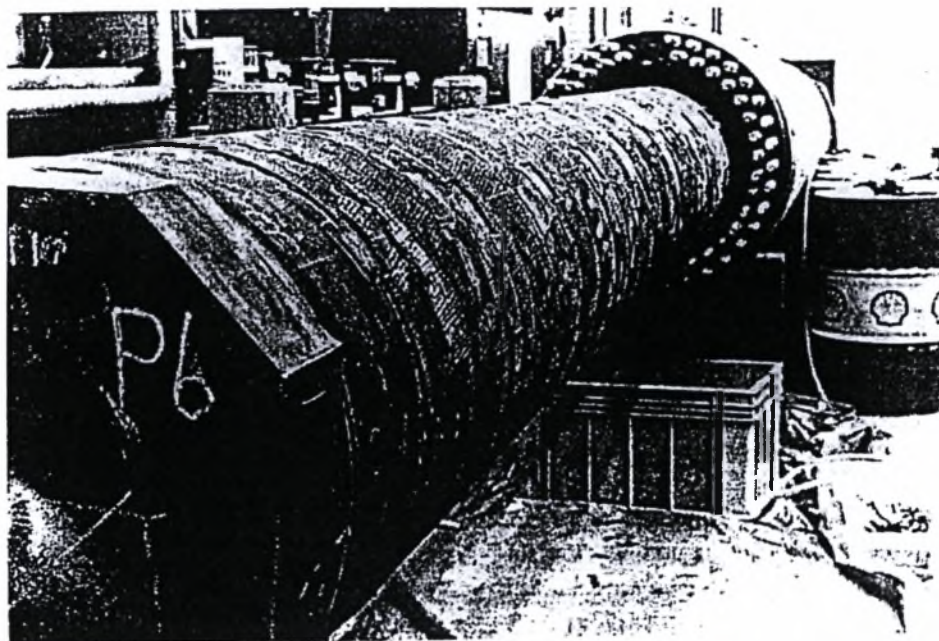
Για κάθε σωλήνα, λαμβάνονται δύο δοκίμια κατά την περιφερειακή διεύθυνση και δύο κατά την ακτινική διεύθυνση και καταγράφονται οι ιδιότητες τους. Τα αποτελέσματα για τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού των σωλήνων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Όνομα Πειράματος	Διεύθυνση	$\sigma_y$ N/mm <sup>2</sup> (ksi)	$\sigma_u$ N/mm <sup>2</sup> (ksi)	$\epsilon_u$ %	Necking %
C1	Ακτινικά	479 (69.5)	568 (82.4)	39	40
	Περιφερειακά	429 (62.3)	575 (83.5)	41	41
C3	Ακτινικά	474 (68.8)	527 (76.4)	28	27
	Περιφερειακά	457 (66.3)	548 (79.5)	28	30
C4	Ακτινικά	450 (65.3)	534 (77.6)	33	35
	Περιφερειακά	466 (67.6)	560 (81.3)	31	38

**Πίνακας 2. Ιδιότητες του υλικού για κάθε σωλήνα**

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Περιγραφή πειραμάτων

Για την πραγματοποίηση της πειραματικής ανάλυσης χρησιμοποιείται ένας θάλαμος πίεσης, ο οποίος αποτελείται από δύο σωλήνες (28 in. και 36 in.). Ο μικρότερος σωλήνας (28 in.) μπαίνει στο εσωτερικό του μεγαλύτερου (36 in.). Στη μια άκρη ένα λεπτό έλασμα, με πάχος 200 mm (7.87 in.), συγκολλείται στους δύο σωλήνες. Στην άλλη άκρη, ένας χαλύβδινος δακτύλιος συγκολλείται ανάμεσα στους σωλήνες. Αυτή η άκρη του θαλάμου πίεσης, μπορεί να κλείσει από ένα έλασμα πάχους 200 mm. Η ικανότητα του θαλάμου πίεσης είναι περίπου 40 MPa. (Σχήμα 3.1)



**Σχήμα 3.1** Θάλαμος πίεσης (R.J van Foeken και A.M Gresnight ,1998)

Στη συνέχεια, στο εσωτερικό του θαλάμου πίεσης τοποθετείται ο σωλήνας που πρόκειται να επεξεργαστεί και ο θάλαμος κλείνει και γεμίζει με λάδι. Η πίεση αυξάνει σταδιακά στο εσωτερικό έως ότου επέλθει η κατάρρευση του σωλήνα που μελετάται. Η πίεση εφαρμόζεται από μια αντλία ελεγχόμενου όγκου. Η κατάρρευση ορίζεται από μια ξαφνική πτώση πίεσης. Μετά από αυτή την πτώση πίεσης το πείραμα ολοκληρώνεται. Στη συνέχεια αφαιρείται το λάδι από το θάλαμο και μετά ο σωλήνας που μελετάται. Η υψηλότερη πίεση λαμβάνεται ως πίεση κατάρρευσης. Η πίεση αυτή, έχει μετρηθεί από ένα ηλεκτρονικό μετρητή πίεσης που είναι

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Περιγραφή πειραμάτων

τοποθετημένος σε ένα από τα ελάσματα. Η πίεση μετράται συνεχώς και καταγράφεται σαν συνάρτηση του χρόνου.

#### 3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την κρίσιμη τιμή του φορτίου της πίεσης

Για την τιμή του κρίσιμου φορτίου της πίεσης, πραγματοποιήθηκαν κάποιες προβλέψεις με τη χρήση του BS 8010. Από τα πειραματικά αποτελέσματα, μπορεί να συμπεριληφθεί ως συμπέρασμα το γεγονός ότι η πίεση κατάρρευσης για τον σωλήνα με την UOE επεξεργασία είναι χαμηλότερη από την πρόβλεψη μέσω του BS 8010. Τα αποτελέσματα της σύγκρισής τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. (Πίνακας 3.)

Όνομα Πειράματος	Τύπος επεξεργασίας	Αποτελέσματα των τεστ [bar] (ksi)	BS 8010 [bar] (ksi)
C1	UOE	45.6 (0.66)	50 (0.73)
C3	UOE	176 (2.55)	225 (3.27)
C4	UOE	230 (3.34)	356 (5.17)

Πίνακας 3. Σύγκριση αποτελεσμάτων της πίεσης κατάρρευσης

#### 3.3 Ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Με τη χρήση του προγράμματος των πεπερασμένων στοιχείων του ABAQUS πραγματοποιήσαμε ανάλυση για τους σωλήνες C1, C3 και C4, χρησιμοποιώντας τα ίδια δεδομένα για τις ιδιότητες του υλικού και τις διαστάσεις, όπως ακριβώς παρουσιάζονται στους παραπάνω πίνακες. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε αρχικώς για τα δεδομένα των τεμαχίων που έχουν ληφθεί από την περιφερειακή διεύθυνση και στη συνέχεια για αυτά από την ακτινική διεύθυνση.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Περιγραφή πειραμάτων

- **Σωλήνας C1**

Πάχος δακτυλίου:  $t=11.55\text{mm}$

Εξωτερική διάμετρος  $D=509.5\text{mm}$ , ακτίνα  $R=254.75\text{mm}$

$$\frac{D}{t}=44.11$$

Μέση ακτίνα  $R_m=248.975\text{mm}$ , μέση διάμετρος  $D_m= 497.95\text{mm}$

$$\frac{D_m}{t}=43.11$$

#### **i) Περίπτωση περιφερειακής διεύθυνσης**

Τάση διαρροής:  $\sigma_y=429\text{ N/mm}^2$

Είναι  $\sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = 22.125$  και ισχύει  $\frac{D_m}{t} > 22.125$  άρα ο τύπος που χρησιμοποιείται για

την εύρεση του κρίσιμου φορτίου της πίεσης είναι ο τύπος (2.2) και είναι  $P_{cr}=P_e=5.76\text{MPa}$ .

Με τη χρήση του προγράμματος των πεπερασμένων στοιχείων για την **UOE** επεξεργασία όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, η κρίσιμη τιμή για την πίεση είναι  $P_{cr}=3.98\text{MPa}$ .

#### **ii) Περίπτωση ακτινικής διεύθυνσης**

Τάση διαρροής:  $\sigma_y=479\text{ N/mm}^2$

Είναι  $\sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = 20.938$  και ισχύει  $\frac{D_m}{t} > 20.938$  άρα ο τύπος που χρησιμοποιείται για την

εύρεση του κρίσιμου φορτίου της πίεσης είναι ο τύπος (2.2) και είναι  $P_{cr}=P_e=5.76\text{MPa}$ .

Με τη χρήση του προγράμματος των πεπερασμένων στοιχείων για την **UOE** επεξεργασία όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, η κρίσιμη τιμή για την πίεση είναι  $P_{cr}=3.99\text{MPa}$ .



- **Σωλήνας C3**

Πάχος δακτυλίου:  $t=19.04\text{mm}$

Διάμετρος  $D=508\text{mm}$  ακτίνα  $R=254\text{mm}$

$$\frac{D}{t}=26.68$$

Μέση ακτίνα  $R_m=244.48\text{mm}$ , μέση διάμετρος  $D_m= 488.96\text{mm}$

$$\frac{D_m}{t}=25.68$$

**i) Περίπτωση περιφερειακής διεύθυνσης**

Τάση διαρροής:  $\sigma_y=457\text{ N/mm}^2$

Είναι  $\sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = 21.436$  και ισχύει  $\frac{D_m}{t} > 21.436$  άρα ο τύπος που χρησιμοποιείται για

την εύρεση του κρίσιμου φορτίου της πίεσης είναι ο τύπος (2.2) και είναι  $P_{cr}=P_e=27.25\text{MPa}$ .

Με τη χρήση του προγράμματος των πεπερασμένων στοιχείων για την **UOE** επεξεργασία όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, η κρίσιμη τιμή για την πίεση είναι  $P_{cr}=14.5\text{MPa}$ .

**ii) Περίπτωση ακτινικής διεύθυνσης**

Τάση διαρροής:  $\sigma_y=474\text{ N/mm}^2$

Είναι  $\sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = 21.048$  και ισχύει  $\frac{D_m}{t} > 21.048$  άρα ο τύπος που χρησιμοποιείται για την

εύρεση του κρίσιμου φορτίου της πίεσης είναι ο τύπος (2.2) και είναι  $P_{cr}=P_e=5.76\text{MPa}$ .

Με τη χρήση του προγράμματος των πεπερασμένων στοιχείων για την **UOE** επεξεργασία όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, η κρίσιμη τιμή για την πίεση είναι  $P_{cr}=14.59\text{MPa}$ .

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Περιγραφή πειραμάτων

- **Σωλήνας C4**

Πάχος δακτυλίου:  $t=23.65\text{mm}$

Διάμετρος  $D=525.7\text{mm}$  ακτίνα  $R=262.85\text{mm}$

$$\frac{D}{t}=22.23$$

Μέση ακτίνα  $R_m=251.025\text{mm}$ , μέση διάμετρος  $D_m= 502.05\text{mm}$

$$\frac{D_m}{t}=21.228$$

#### **i) Περίπτωση περιφερειακής διεύθυνσης**

Τάση διαρροής:  $\sigma_y=466 \text{ N/mm}^2$

Είναι  $\sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = 21.23$  και ισχύει  $\frac{D_m}{t} < 21.23$  άρα ο τύπος που χρησιμοποιείται για την

εύρεση του κρίσιμου φορτίου της πίεσης είναι ο τύπος (2.3) και είναι  $P_{cr}=P_y=43.9\text{MPa}$ .

Με τη χρήση του προγράμματος των πεπερασμένων στοιχείων για την **UOE** επεξεργασία όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, η κρίσιμη τιμή για την πίεση είναι  $P_{cr}=21.08\text{MPa}$ .

#### **ii) Περίπτωση ακτινικής διεύθυνσης**

Τάση διαρροής:  $\sigma_y=450 \text{ N/mm}^2$

Είναι  $\sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = 21.6$  και ισχύει  $\frac{D_m}{t} < 21.6$  άρα ο τύπος που χρησιμοποιείται για την

εύρεση του κρίσιμου φορτίου της πίεσης είναι ο τύπος (2.3) και είναι  $P_{cr}=P_e=42.4\text{MPa}$ .

Με τη χρήση του προγράμματος των πεπερασμένων στοιχείων για την **UOE** επεξεργασία όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, η κρίσιμη τιμή για την πίεση είναι  $P_{cr}=21.22\text{MPa}$ .



### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Περιγραφή πειραμάτων

Ο Πίνακας 5. παρουσιάζει συγκριτικά τα αποτελέσματα μεταξύ των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν από τους Foeken και Gresnigt και αυτών με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Όνομα σωλήνα	Διεύθυνση	Αποτελέσματα R.J van Foeken και A.M Gresnigt	Αποτελέσματα πεπερασμένων στοιχείων
C1	Περιφερειακά	4.56	3.98
	Ακτινικά		3.99
C3	Περιφερειακά	17.6	14.5
	Ακτινικά		14.59
C4	Περιφερειακά	23.0	21.1
	Ακτινικά		21.22

**Πίνακας 5. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την κρίσιμη τιμή της πίεσης [MPa]**

Τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, έχουν σχετικά μικρές αποκλίσεις από αυτά που πραγματοποιήθηκαν μέσω πειραμάτων. Μπορεί να θεωρηθεί λοιπόν, πως με χρήση πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να γίνει μια πολύ καλή πρόβλεψη του κρίσιμου φορτίου.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Παραμετρική μελέτη**

### **4.1 Γενικά**

Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη όπου προσομοιώθηκαν τέσσερις σωλήνες για δύο υλικά για δύο περιπτώσεις σκλήρυνσης (isotropic και kinematic hardening) για το κάθε υλικό για την **UOE** επεξεργασία. Στη συνέχεια, για τους τέσσερις αυτούς σωλήνες μελετήθηκαν η **UO** και **UOC** επεξεργασία για το ένα από τα δύο υλικά (για το υλικό 2) για τον ένα περιορισμό όσον αφορά την σκλήρυνση (για το isotropic hardening). Έτσι, αμέσως μετά πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με αυτά για την **UOE** επεξεργασία. Για όλα τα μοντέλα σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα πίεσης-ovalization, ενώ για το σωλήνα I σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης κατά την περιμετρική διεύθυνση καθώς και τα διαγράμματα τάσης κατά Mises-ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης.

### **4.2 Παραμετρική μελέτη**

Τα σημεία που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση για τα υλικά για τους σωλήνες, προκύπτουν από δι-γραμμικό διάγραμμα ονομαστικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης .

#### Υλικό 1

Τάση διαρροής  $\sigma_y=300$  MPa

Μέτρο ελαστικότητας  $E=210$  GPa

$E'=0$

- i) σκλήρυνση: isotropic hardening
- ii) σκλήρυνση: kinematic hardening

#### Υλικό 2

Τάση διαρροής  $\sigma_y=300$  MPa

Μέτρο ελαστικότητας  $E=210$  GPa

$E'=E/400=525$

- i) σκλήρυνση: isotropic hardening

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Παραμετρική μελέτη

- ii) σκλήρυνση: kinematic hardening

### • ΣΩΛΗΝΑΣ Ι

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά προσομοιώθηκε με χρήση πεπερασμένων στοιχείων για την επεξεργασία **UOE**, ο σωλήνας Ι του οποίου τα δεδομένα παρατίθενται παρακάτω.

#### Γεωμετρία

Διάμετρος  $D=660.4$  mm (26 inch)

Πάχος  $t=12.7$  mm (0.5 inch)

$$\frac{D}{t}=52$$

#### Αναλυτική λύση

Τάση διαρροής  $\sigma_y=300$ MPa, μέτρο ελαστικότητας  $E=210$ GPa

Εξωτερική διάμετρος  $D_{ext}=660.4$  mm, ακτίνα  $R_{ext}=330.2$  mm

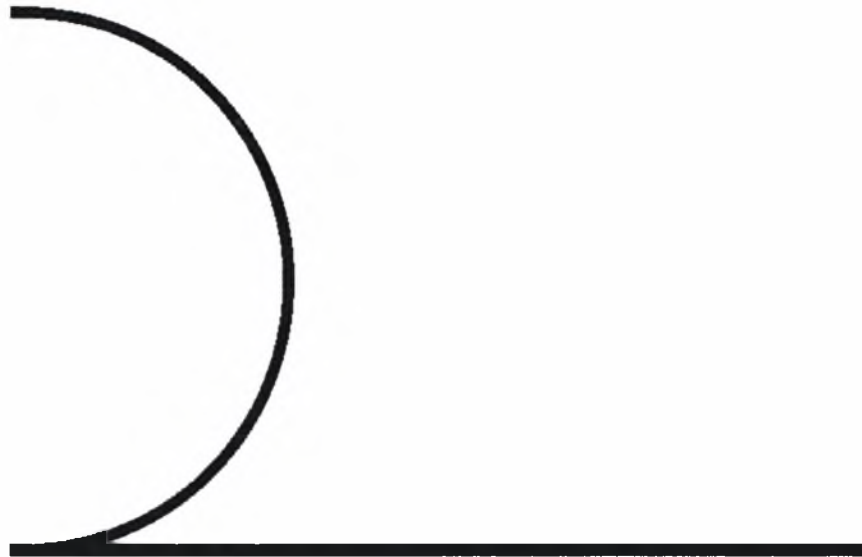
Μέση ακτίνα  $R_m=323.85$  mm, μέση διάμετρος  $D_m=647.7$  mm

$$\frac{D_m}{t}=51$$

Ισχύει  $\sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}=26.45$  και είναι  $\frac{D_m}{t}>26.45$  επομένως από τύπο (2.2) είναι

$$P_{cr}=P_e=\frac{2E}{(1-\nu^2)}\left(\frac{t}{D_m}\right)^3=3.48 \text{ MPa.}$$

Στα σχήματα (4.1), (4.2), (4.3), (4.4), (4.5), και (4.6) φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο παραμορφώνεται ο σωλήνας Ι στα διάφορα στάδια (steps) της ανάλυσης.



Σχήμα 4.1 Απαραμόρφωτη και παραμορφωμένη κατάσταση κατά τη στροφή του μεταλλικού επιπέδου ελάσματος



Σχήμα 4.2 Κατανομή τάσεων κατά von Mises του  $\frac{1}{4}$  του σωλήνα μετά το βήμα της περιφερειακής συστολής κατά  $\epsilon_\theta = -0.5\%$



**Σχήμα 4.3 Παραμόρφωση του  $\frac{1}{4}$  του σωλήνα μετά το βήμα της αποφόρτισης από την περιφερειακή συστολή**



**Σχήμα 4.4 Παραμόρφωση του  $\frac{1}{4}$  του σωλήνα μετά το βήμα της περιφερειακής διαστολής κατά  $\epsilon_{\theta}=1\%$**



**Σχήμα 4.5** Παραμόρφωση του  $\frac{1}{4}$  του σωλήνα μετά το βήμα της αποφόρτισης από την περιφερειακή διαστολή, πριν την επιβολή της εξωτερικής πίεσης



**Σχήμα 4.6** Παραμόρφωση του  $\frac{1}{4}$  σωλήνα μετά το βήμα της επιβολής εξωτερικής πίεσης

**Κρίσιμες τιμές φορτίου**

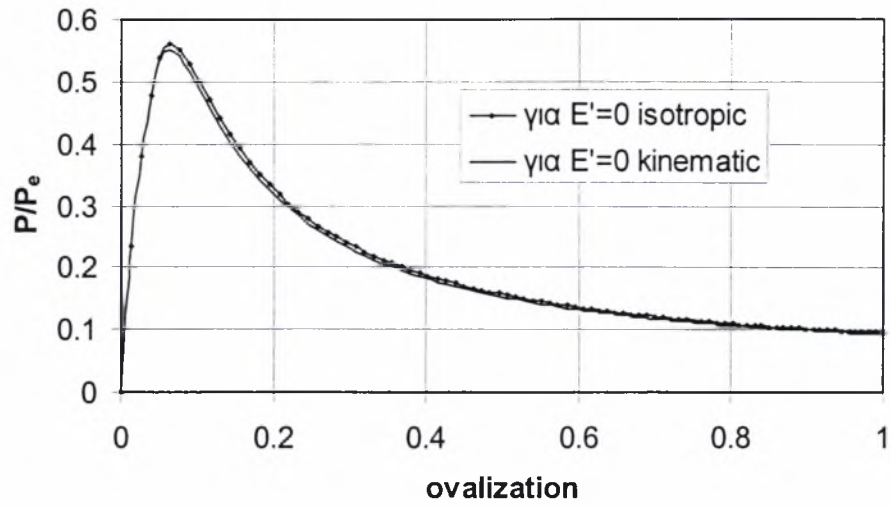
Από την ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, οι κρίσιμες τιμές του φορτίου ( $P_{cr}$ ) που προέκυψαν για τον σωλήνα I παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1.

	<b>Περίπτωση hardening</b>	<b>Κρίσιμο φορτίο <math>P_{cr}</math> (MPa)</b>
Υλικό1 (για $E'=0$ )	Isotropic	1.947
	Kinematic	1.916
Υλικό 2 (για $E'=E/400$ )	Isotropic	2.248
	Kinematic	2.149
Θεωρητική τιμή κρίσιμης πίεσης		3.479

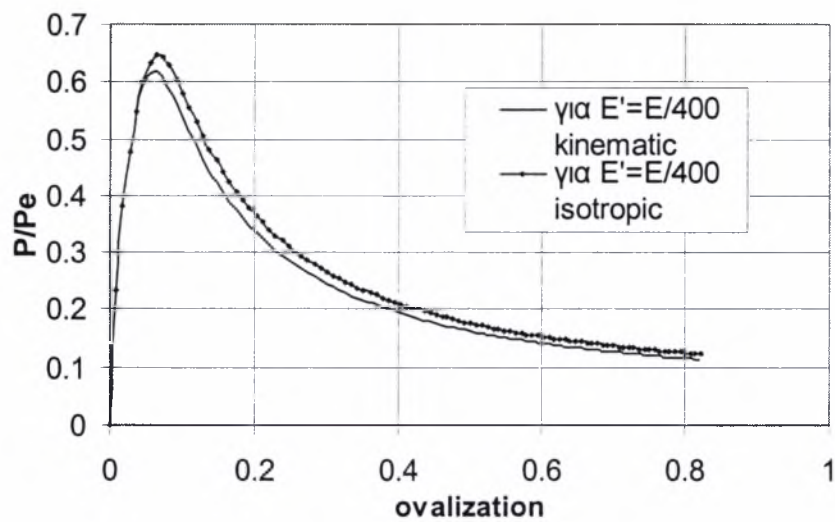
**Πίνακας 4.1 Κρίσιμη τιμή του φορτίου για όλες τις περιπτώσεις για το σωλήνα I**

Για τις δυο περιπτώσεις hardening, και για τα δυο υλικά στην περίπτωση που χρησιμοποιείται isotropic hardening, το κρίσιμο φορτίο είναι μεγαλύτερο απ' ό τι για kinematic hardening. Η πτώση της τιμής του κρίσιμου φορτίου με χρήση της UOE επεξεργασίας σε σχέση με την θεωρητική τιμή κρίσιμης πίεσης είναι σημαντική. (π.χ για το υλικό 2 για isotropic hardening είναι της τάξεως του 35% )

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται το κρίσιμο φορτίο σε σχέση με το ovalization για το σωλήνα I, καθώς και η σύγκριση του κάθε υλικού για διαφορετική σκλήρυνση (hardening).



Σχήμα 4.7 Σύγκριση ισοτροπικής-κινηματικής κράτωσης για το υλικό 1 ( $E'=0$ )



Σχήμα 4.8 Σύγκριση isotropic-kinematic για το υλικό 2 ( $E'=E/400$ )



• ΣΩΛΗΝΑΣ II

Στη συνέχεια, προσομοιώθηκε με χρήση πεπερασμένων στοιχείων ένας δεύτερος σωλήνας του οποίου τα δεδομένα παρατίθενται παρακάτω.

**Γεωμετρία**

Διάμετρος  $D=711.2$  mm (28 inch)

Πάχος  $t=19.05$  mm (0.75 inch)

$$\frac{D}{t}=37.33$$

**Αναλυτική λύση**

Τάση διαρροής  $\sigma_y=300$ MPa, μέτρο ελαστικότητας  $E=210$ GPa

Εξωτερική διάμετρος  $D_{ext}=711.2$  mm, ακτίνα  $R_{ext}=330.2$  mm

Μέση ακτίνα  $R_m=346.075$  mm, μέση διάμετρος  $D_m=692.15$  mm

$$\frac{D_m}{t}=36.33$$

Ισχύει  $\sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}=26.45$  και είναι  $\frac{D_m}{t}>26.45$  επομένως από τύπο (2.2) είναι

$$P_{cr}=P_e=\frac{2E}{(1-\nu^2)}\left(\frac{t}{D_m}\right)^3=9.625 \text{ MPa.}$$

**Κρίσιμες τιμές φορτίου**

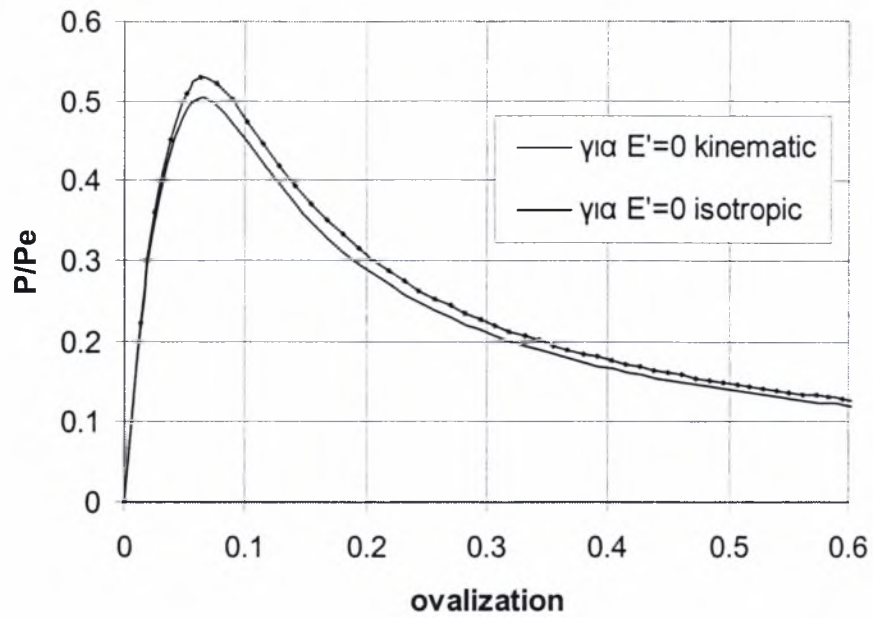
Από την ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, οι κρίσιμες τιμές του φορτίου ( $P_{cr}$ ) που προέκυψαν για τον σωλήνα II παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2.

	<b>Περίπτωση hardening</b>	<b>Κρίσιμο φορτίο <math>P_{cr}</math> (MPa)</b>
Υλικό 1 (για $E'=0$ )	Isotropic	5.01
	Kinematic	4.86
Υλικό 2 (για $E'=E/400$ )	Isotropic	5.29
	Kinematic	4.93
Θεωρητική τιμή κρίσιμης πίεσης		9.625

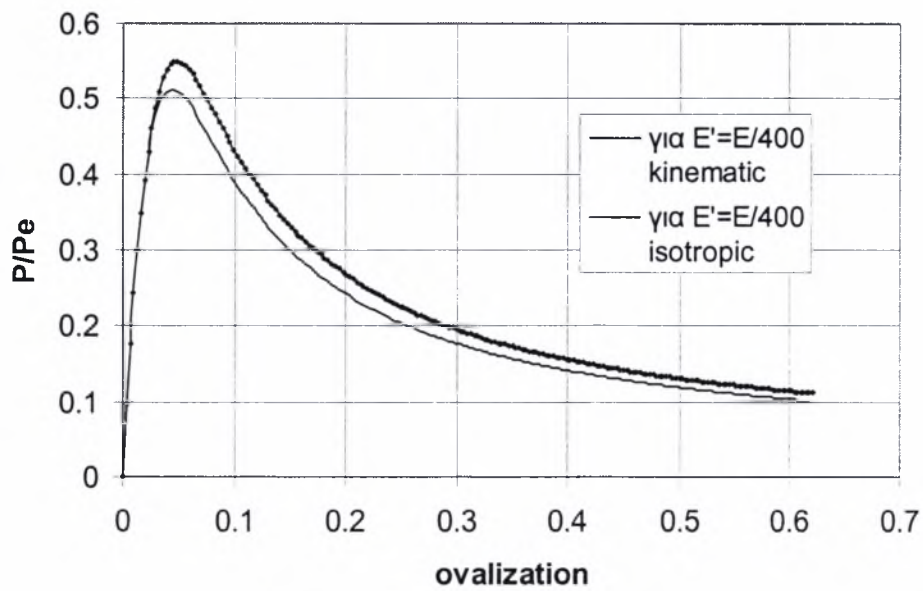
**Πίνακας 4.2 Κρίσιμη τιμή του φορτίου για όλες τις περιπτώσεις για το σωλήνα II**

Όπως και για την περίπτωση του σωλήνα I, για τις δυο περιπτώσεις hardening, και για τα δυο υλικά στην περίπτωση που χρησιμοποιείται isotropic hardening, το κρίσιμο φορτίο είναι μεγαλύτερο απ' ό τι για kinematic hardening. Η πτώση της τιμής του κρίσιμου φορτίου με χρήση της UOE επεξεργασίας σε σχέση με την θεωρητική τιμή της κρίσιμης πίεσης είναι σημαντική.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται το κρίσιμο φορτίο σε σχέση με το ovalization για το σωλήνα II, καθώς και η σύγκριση του κάθε υλικού για διαφορετική σκλήρυνση (hardening).



Σχήμα 4.9 Σύγκριση isotropic-kinematic για το υλικό 1 ( $E'=0$ )



Σχήμα 4.10 Σύγκριση isotropic-kinematic για το υλικό 2 ( $E'=E/400$ )

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Παραμετρική μελέτη

- **ΣΩΛΗΝΑΣ ΙΙΙ**

Στη συνέχεια προσομοιώθηκε με χρήση πεπερασμένων στοιχείων ο σωλήνας ΙΙΙ του οποίου τα δεδομένα παρατίθενται παρακάτω.

### Γεωμετρία

Διάμετρος  $D=508$  mm (20 inch)

Πάχος  $t=25.4$  mm (1 inch)

$$\frac{D}{t}=20$$

### Αναλυτική λύση

Τάση διαρροής  $\sigma_y=300$ MPa, μέτρο ελαστικότητας  $E=210$ GPa

Εξωτερική διάμετρος  $D_{ext}=508$  mm, ακτίνα  $R_{ext}=254$  mm

Μέση ακτίνα  $R_m=241.3$  mm, μέση διάμετρος  $D_m=482.6$  mm

$$\frac{D_m}{t}=19$$

Ισχύει  $\sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}=26.45$  και είναι  $\frac{D_m}{t}<26.45$  επομένως από τύπο (2.3) είναι  $P_{cr}=\frac{2\sigma_y t}{D_m}$

$$P_y=2\sigma_y\left(\frac{t}{D_m}\right)=31.58 \text{ MPa.}$$

**Κρίσιμες τιμές φορτίου**

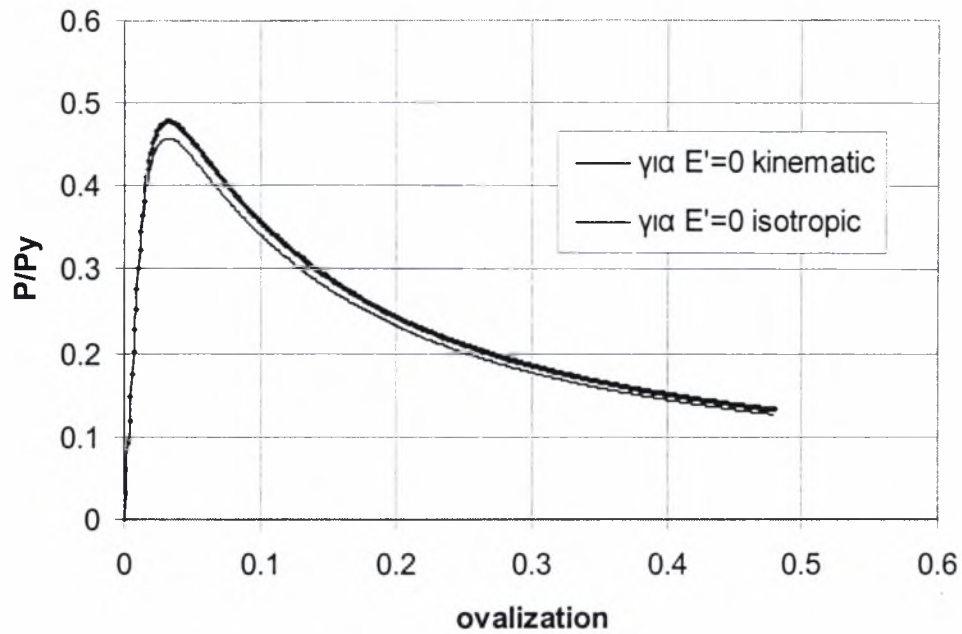
Από την ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, οι κρίσιμες τιμές του φορτίου ( $P_{cr}$ ) που προέκυψαν για τον σωλήνα III παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3.

	<b>Περίπτωση hardening</b>	<b>Κρίσιμο φορτίο <math>P_{cr}</math> (MPa)</b>
Υλικό1 (για $E'=0$ )	Isotropic	15.087
	Kinematic	14.447
Υλικό 2 (για $E'=E/400$ )	Isotropic	20.228
	Kinematic	17.59
Θεωρητική τιμή κρίσιμης πίεσης		31.58

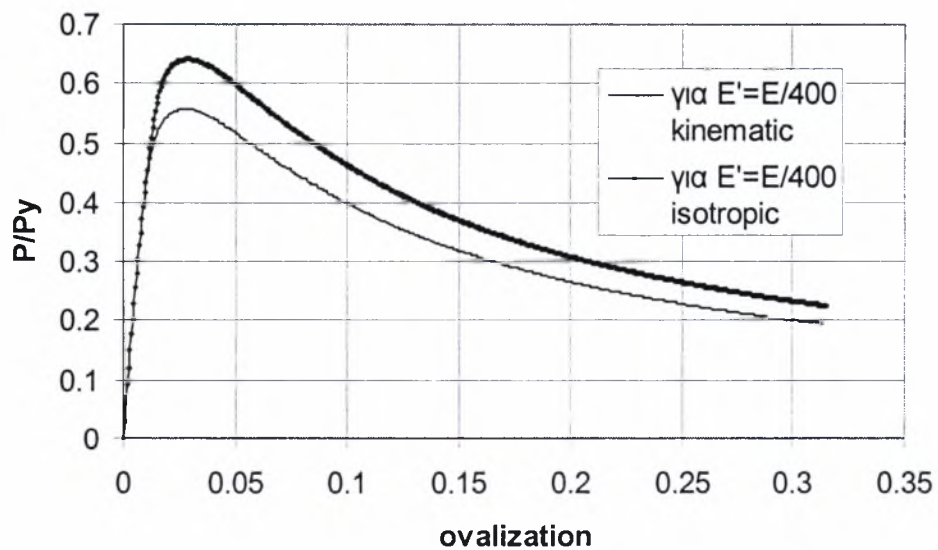
**Πίνακας 4.3 Κρίσιμη τιμή του φορτίου για όλες τις περιπτώσεις για το σωλήνα III**

Και για την περίπτωση του σωλήνα III λοιπόν, για την περίπτωση που χρησιμοποιείται isotropic hardening, το κρίσιμο φορτίο είναι μεγαλύτερο απ' ότι για kinematic hardening. Η πτώση της τιμής του κρίσιμου φορτίου με χρήση της UOE επεξεργασίας σε σχέση με την θεωρητική τιμή της κρίσιμης πίεσης είναι σημαντική. (π.χ για το υλικό 2 για isotropic hardening είναι της τάξεως του 36% )

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η σύγκριση του κρίσιμου φορτίου σε σχέση με το ovalization για το σωλήνα III για το κάθε υλικό με διαφορετική σκλήρυνση (hardening).



Σχήμα 4.9 Σύγκριση isotropic-kinematic για το υλικό 1 ( $E'=0$ )



Σχήμα 4.10 Σύγκριση isotropic-kinematic για το υλικό 2 ( $E'=E/400$ )

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Παραμετρική μελέτη

### • ΣΩΛΗΝΑΣ IV

Τέλος, προσομοιώθηκε με χρήση πεπερασμένων στοιχείων ο σωλήνας IV του οποίου τα δεδομένα παρατίθενται παρακάτω.

#### Γεωμετρία

Διάμετρος  $D=406.4$  mm (16 inch)

Πάχος  $t=25.4$  mm (1 inch)

$$\frac{D}{t}=16$$

#### Αναλυτική λύση

Τάση διαρροής  $\sigma_y=300$ MPa, μέτρο ελαστικότητας  $E=210$ GPa

Εξωτερική διάμετρος  $D_{ext}=406.4$  mm, ακτίνα  $R_{ext}=203.2$  mm

Μέση ακτίνα  $R_m=190.5$  mm, μέση διάμετρος  $D_m=381$  mm

$$\frac{D_m}{t}=15$$

Ισχύει  $\sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}=26.45$  και είναι  $\frac{D_m}{t}<26.45$  επομένως από τύπο (2.3) η οριακή πίεση

είναι  $P_y=2\sigma_y\left(\frac{t}{D_m}\right)=40$  MPa.

**Κρίσιμες τιμές φορτίου**

Από την ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, οι κρίσιμες τιμές του φορτίου ( $P_{cr}$ ) που προέκυψαν για τον σωλήνα IV παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4.

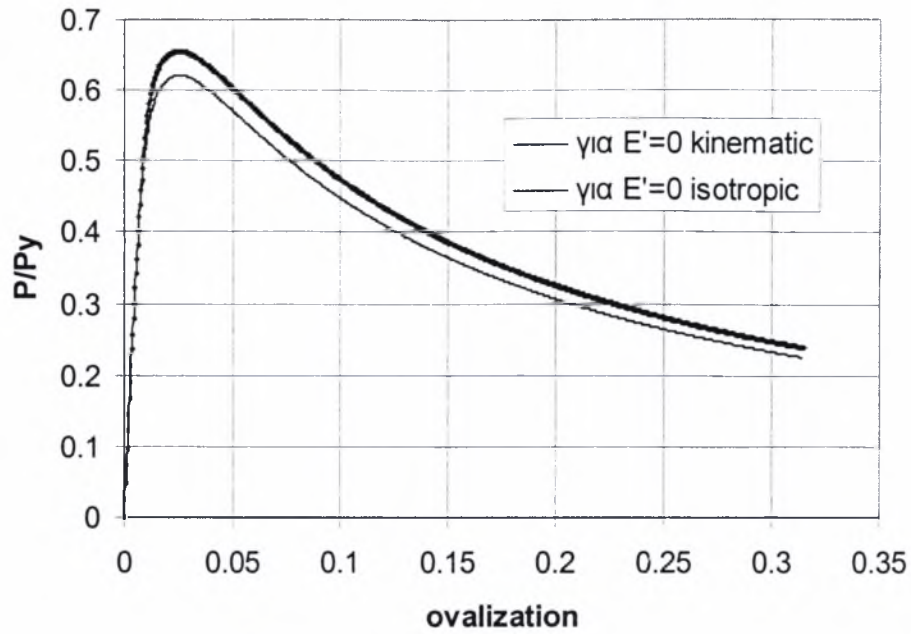
	<b>Περίπτωση hardening</b>	<b>Κρίσιμο φορτίο <math>P_{cr}</math> (MPa)</b>
Υλικό 1 (για $E'=0$ )	Isotropic	26.191
	Kinematic	24.825
Υλικό 2 (για $E'=E/400$ )	Isotropic	33.687
	Kinematic	28.466
Θεωρητική τιμή κρίσιμης πίεσης		40

**Πίνακας 4.4 Κρίσιμη τιμή του φορτίου για όλες τις περιπτώσεις για το σωλήνα IV**

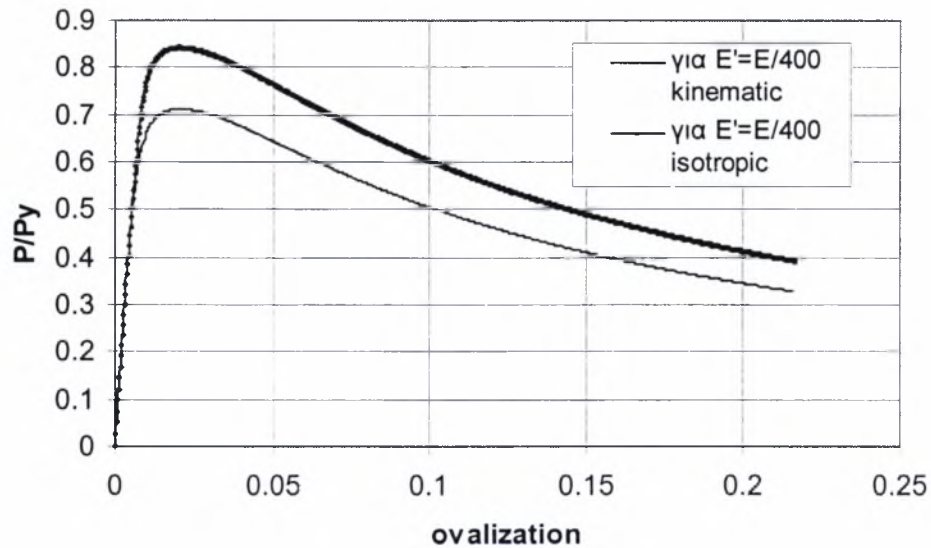
Τέλος, και για την περίπτωση του σωλήνα IV για τις δυο περιπτώσεις hardening, και για τα δυο υλικά στην περίπτωση που χρησιμοποιείται isotropic hardening, το κρίσιμο φορτίο είναι μεγαλύτερο απ' ό τι για kinematic hardening. Η πτώση της τιμής του κρίσιμου φορτίου με χρήση της **UOE** επεξεργασίας σε σχέση με την θεωρητική τιμή της κρίσιμης πίεσης είναι πιο μικρή. (π.χ για το υλικό 2 για isotropic hardening είναι της τάξεως του 16% )

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η σύγκριση του κρίσιμου φορτίου σε σχέση με το ovalization για το σωλήνα IV για το κάθε υλικό με διαφορετική σκλήρυνση (hardening).





Σχήμα 4.11 Σύγκριση isotropic-kinematic για το υλικό 1 ( $E'=0$ )



Σχήμα 4.12 Σύγκριση isotropic-kinematic για το υλικό 2 ( $E'=E/400$ )

Για τους τέσσερις σωλήνες λοιπόν και για τα δύο υλικά, προκύπτει ότι το κρίσιμο φορτίο για τις δύο περιπτώσεις υλικών είναι πάντα μεγαλύτερο για isotropic απ' ότι για kinematic hardening. Τέλος, παρατηρείται πως όσο μικραίνει ο λόγος  $D/t$ , τόσο

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Παραμετρική μελέτη

πιο μεγάλη είναι η διαφορά μεταξύ της κρίσιμης τιμής της πίεσης για τις δυο περιπτώσεις hardening.

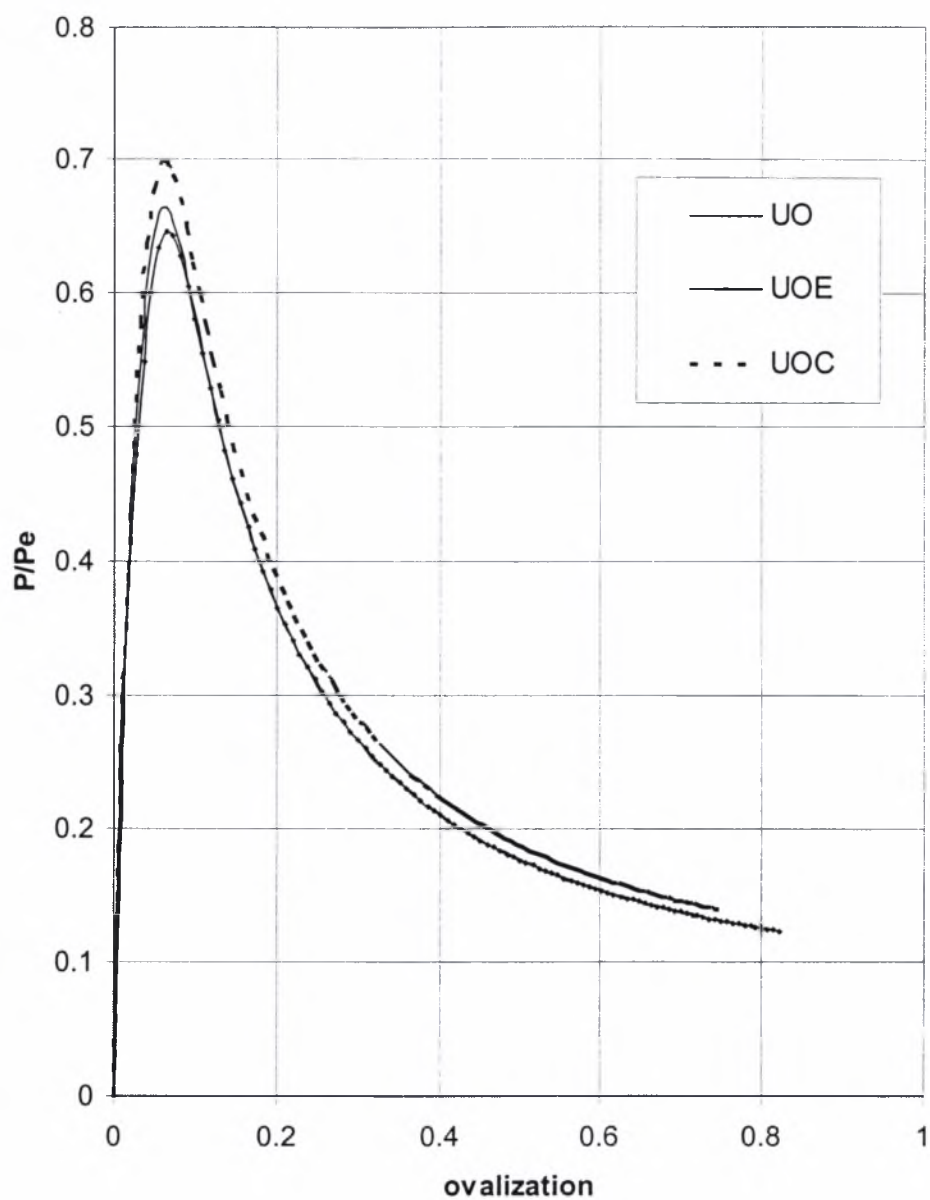
### 4.3 Παραμετρική μελέτη για UO και UOC επεξεργασία

Για τους τέσσερις σωλήνες που περιγράφηκαν παραπάνω πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη για το υλικό 2 ( $E'=E/400=525$ ) με χρήση κατά την ανάλυση isotropic hardening, για τις επεξεργασίες UO και UOC. Τα αποτελέσματα για το κρίσιμο φορτίο παρουσιάζονται στον πίνακα 4.5.

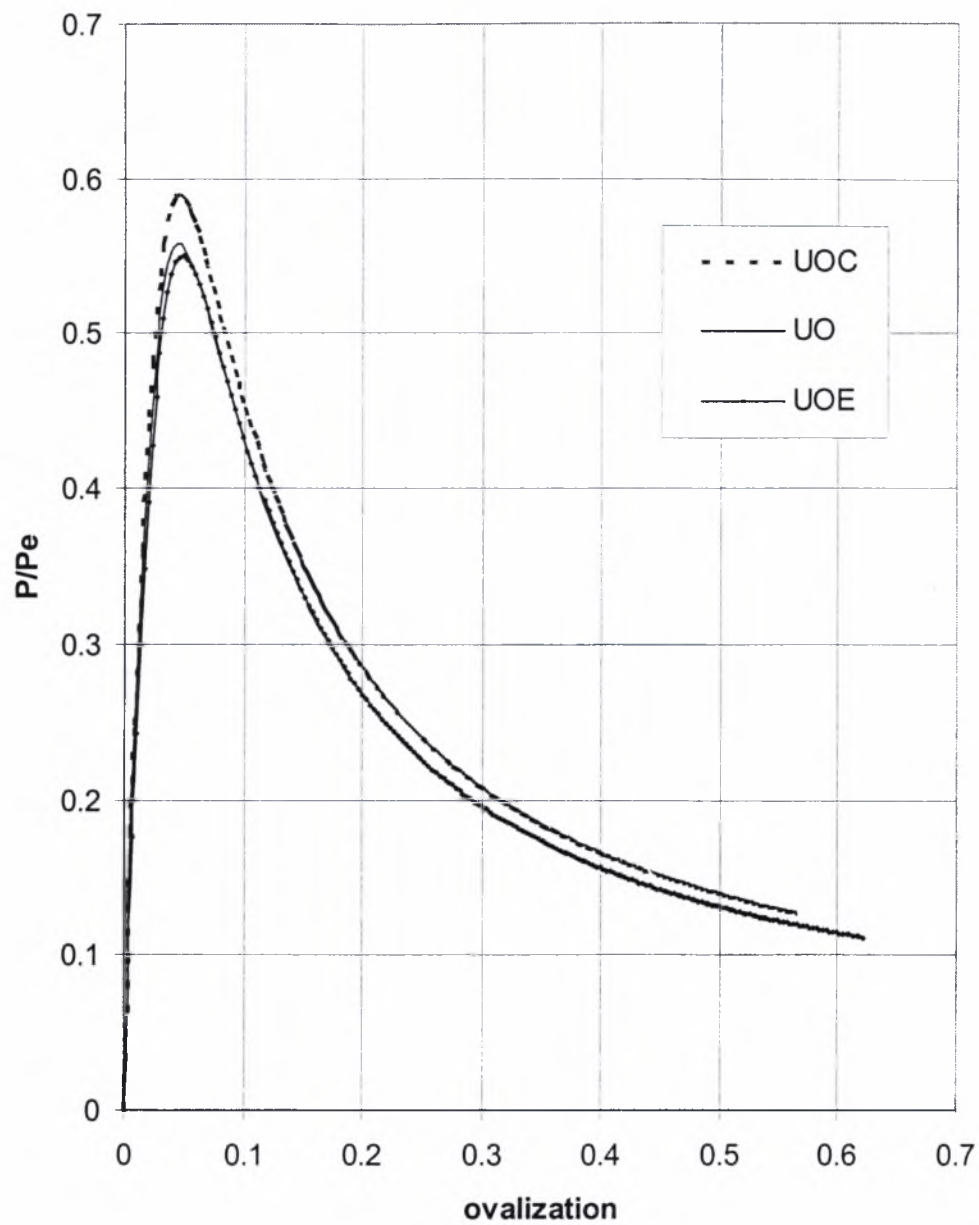
Σωλήνας	Κρίσιμο φορτίο για UO επεξεργασία (MPa)	Κρίσιμο φορτίο για UOC επεξεργασία (MPa)	Κρίσιμο φορτίο για UOE επεξεργασία (MPa)	Κρίσιμο φορτίο από αναλυτικούς τύπους (MPa)
I	2.311	2.432	2.248	3.479
II	5.367	5.667	5.29	9.625
III	20.509	21.314	20.228	31.58
IV	33.823	35.814	33.687	40

**Πίνακας 4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την κρίσιμη τιμή του φορτίου**

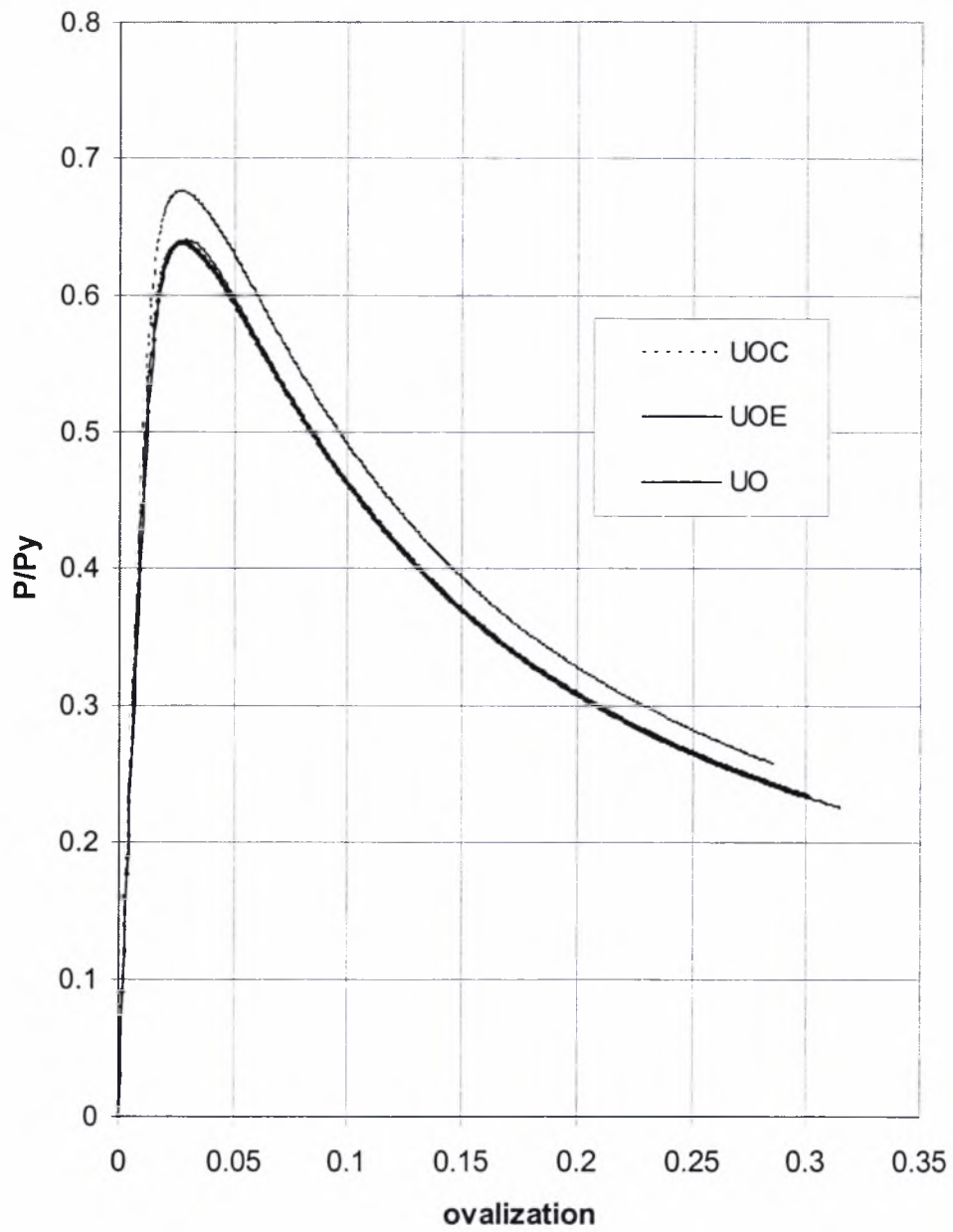
Πιο συγκεκριμένα η σύγκριση των τριών επεξεργασιών για τους τέσσερις σωλήνες όσον αφορά το κρίσιμο φορτίο παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα.



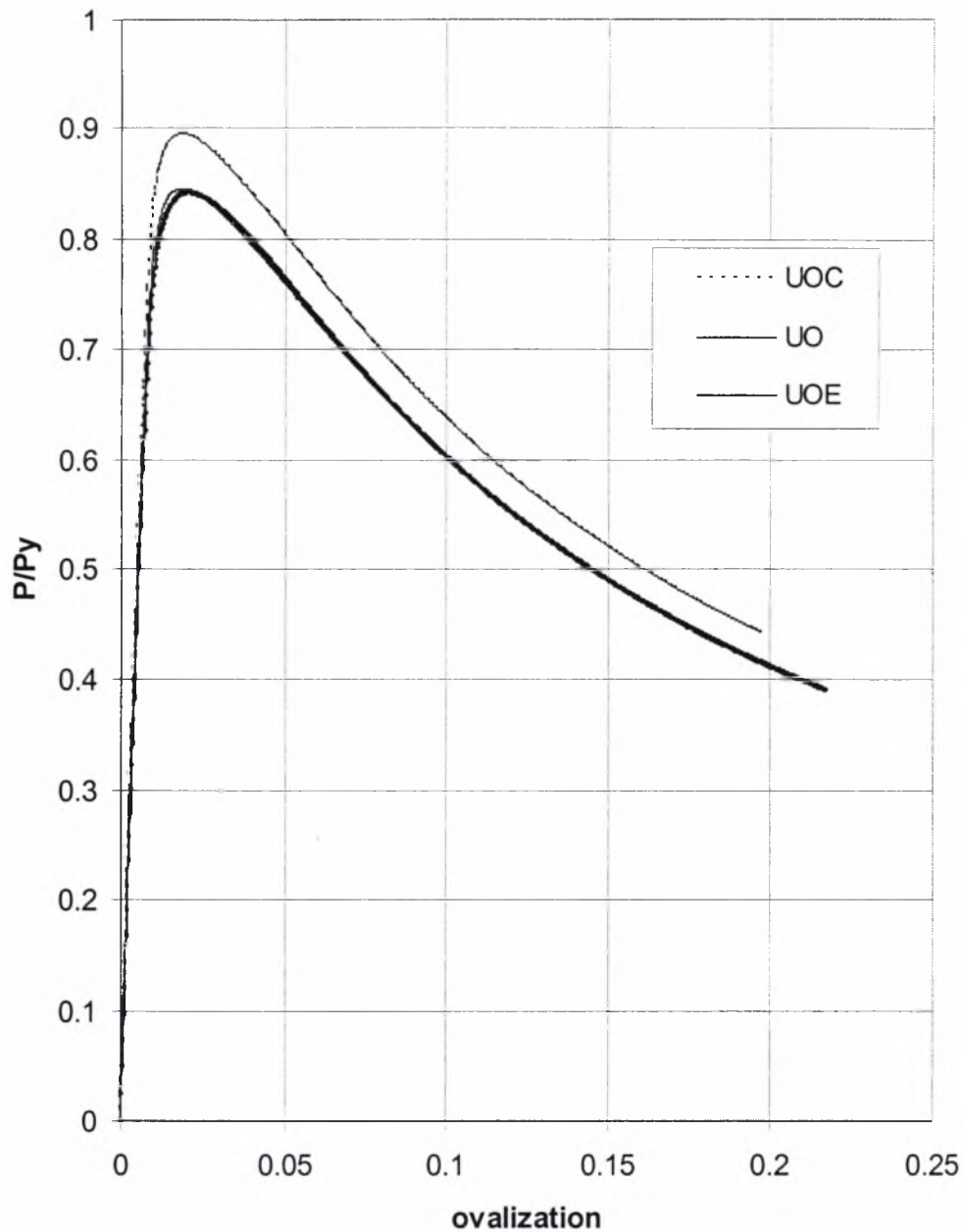
Σχήμα 4.13 Σύγκριση τιμών του κρίσιμου φορτίου για τις τρεις επεξεργασίες για το σωλήνα I



Σχήμα 4.14 Σύγκριση τιμών του κρίσιμου φορτίου για τις τρεις επεξεργασίες για το σωλήνα II



Σχήμα 4.15 Σύγκριση τιμών του κρίσιμου φορτίου για τις τρεις επεξεργασίες για το σωλήνα III



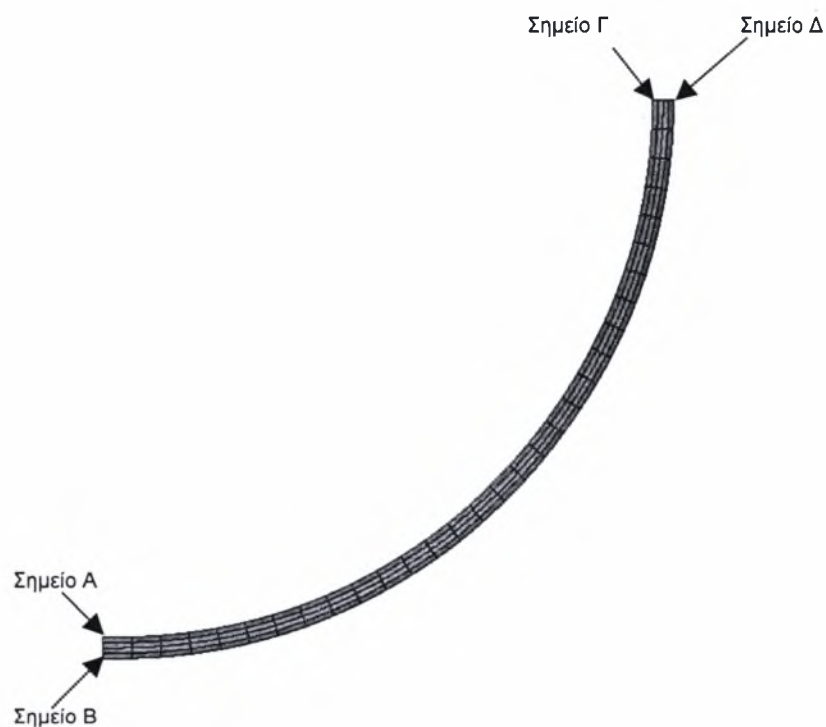
**Σχήμα 4.16 Σύγκριση τιμών του κρίσιμου φορτίου για τις τρεις επεξεργασίες για το σωλήνα IV**

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για την κρίσιμη τιμή της πίεσης μεταξύ των τριών επεξεργασιών, προκύπτει πως και για τις τέσσερις περιπτώσεις των σωλήνων κατά τη **UOC** επεξεργασία το κρίσιμο φορτίο είναι πάντα μεγαλύτερο, ενώ για κατά την **UOE** επεξεργασία το κρίσιμο φορτίο είναι πάντα μικρότερο.

#### 4.4 Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για τις UOE, UO και UOC επεξεργασίες

Μετά την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης και της ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, προκύπτουν κάποια αποτελέσματα σε σχέση με τις τιμές που λαμβάνει η τάση σε σχέση με την παραμόρφωση κατά την περιμετρική διεύθυνση μετά το τέλος της κάθε επεξεργασίας. Έτσι, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα διαγράμματα περιμετρικής τάσης-παραμόρφωσης για την ανάλυση του σωλήνα I, για το υλικό 1 και το είδος σκλήρυνσης isotropic hardening για τις τρεις κατεργασίες.

Τα σημεία που μελετώνται είναι τα A, B, Γ και Δ που φαίνονται στο κάτω σχήμα.



Σχήμα 4.17

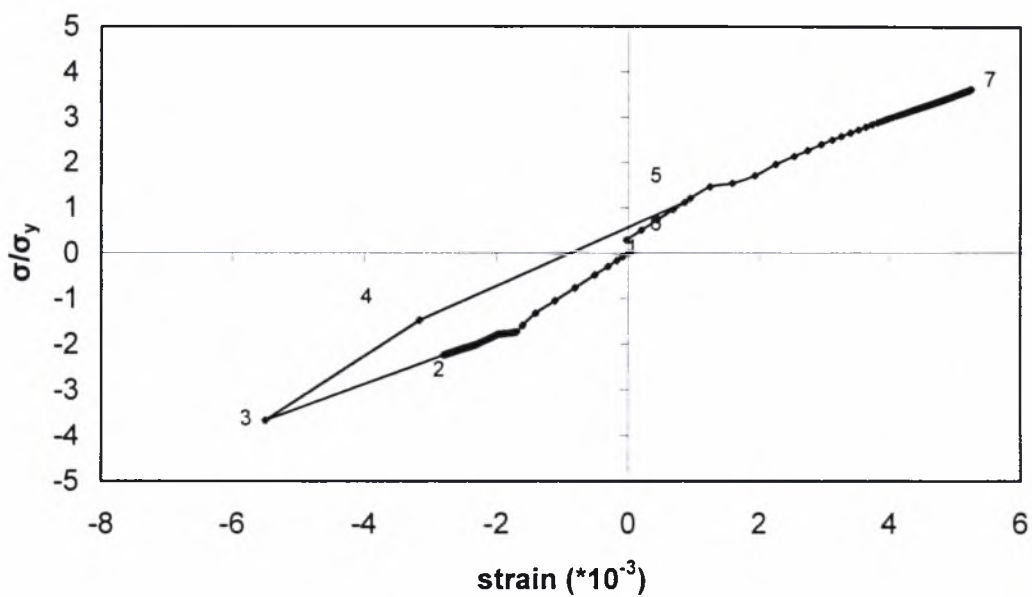
Οι διαδρομές που παρουσιάζονται σε κάθε διάγραμμα αντιστοιχούν σε:

- 1-2: κάμψη
- 2-3: συστολή κατά  $\epsilon_{\theta}=-0.5\%$
- 3-4: αποφόρτιση
- 4-5: διαστολή κατά  $\epsilon_{\theta}=1\%$
- 5-6: αποφόρτιση

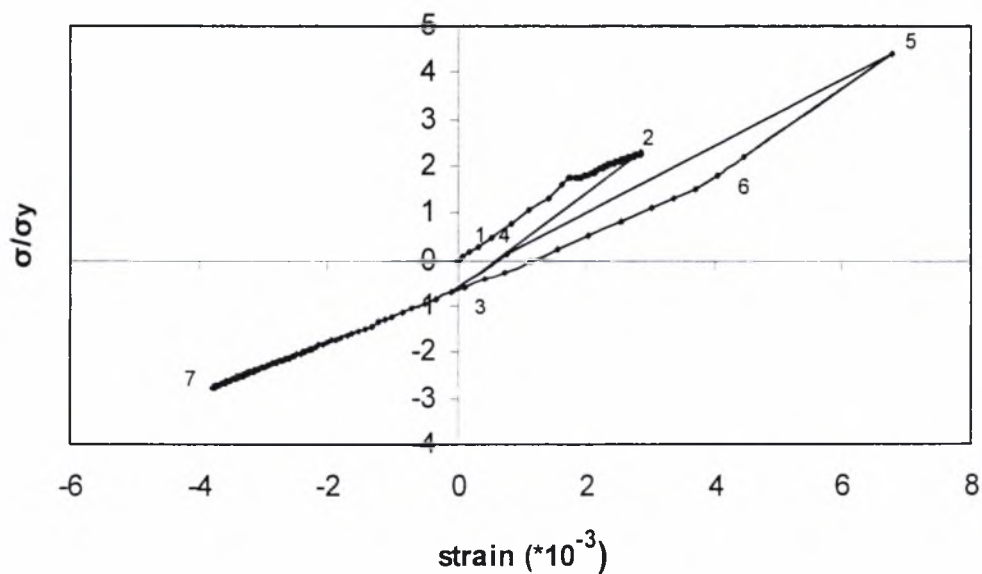
#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Παραμετρική μελέτη

- 6-7: επιβολή εξωτερικής πίεσης

Έτσι λοιπόν για τα σημεία Α, Β, Γ και Δ του σωλήνα Ι για την **UOE** επεξεργασία παρουσιάζονται τα διαγράμματα στα παρακάτω σχήματα.

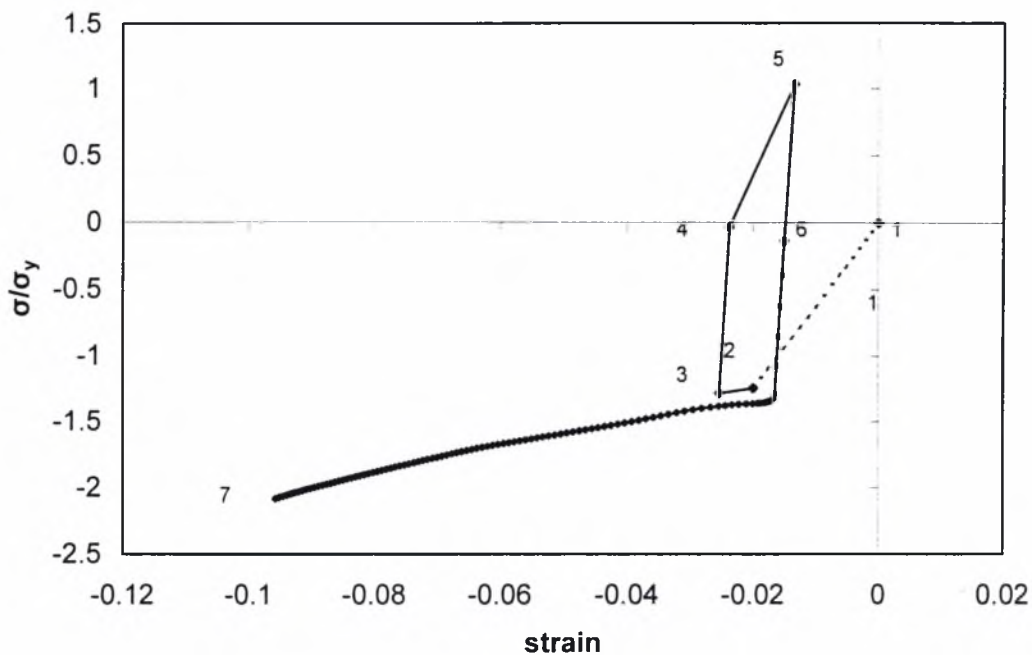


Σχήμα 4.18 Διάγραμμα περιμετρικής τάσης-παραμόρφωσης για την **UOE** επεξεργασία

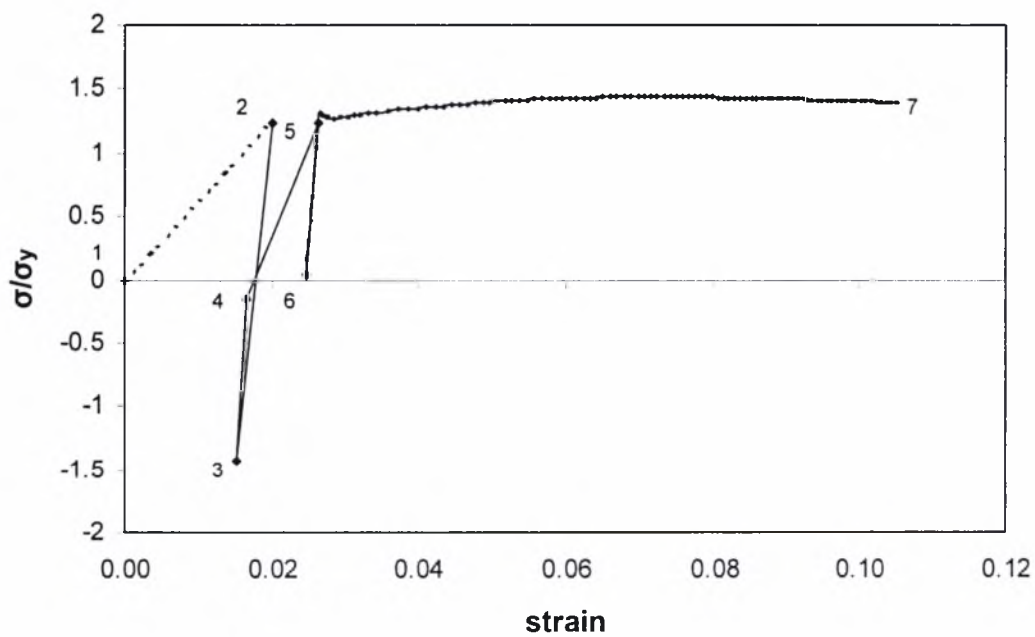


Σχήμα 4.19 Διάγραμμα περιμετρικής τάσης-παραμόρφωσης για την **UOE** επεξεργασία για το σημείο Β





Σχήμα 4.20 Διάγραμμα περιμετρικής τάσης-παραμόρφωσης για την UOE επεξεργασία για το σημείο Γ

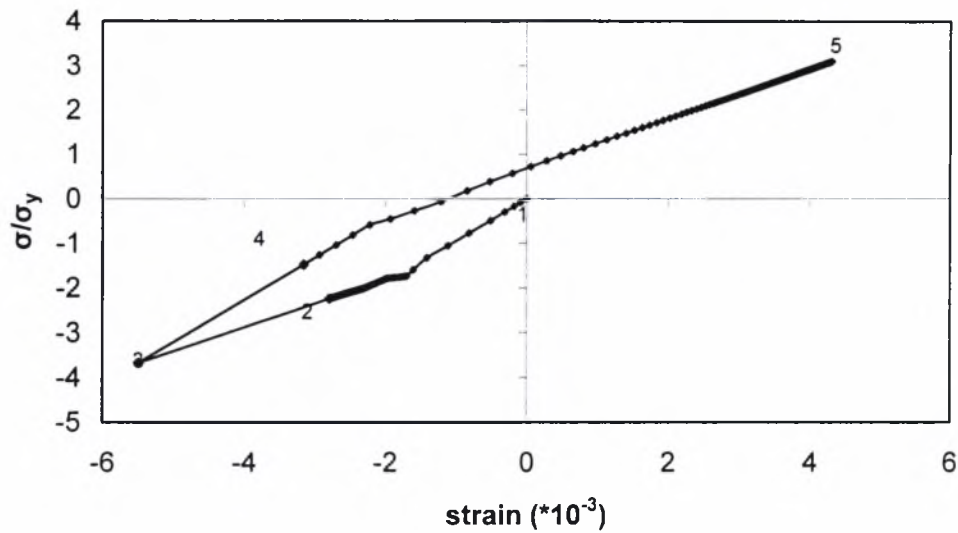


Σχήμα 4.21 Διάγραμμα περιμετρικής τάσης-παραμόρφωσης για την UOE επεξεργασία για το σημείο Δ

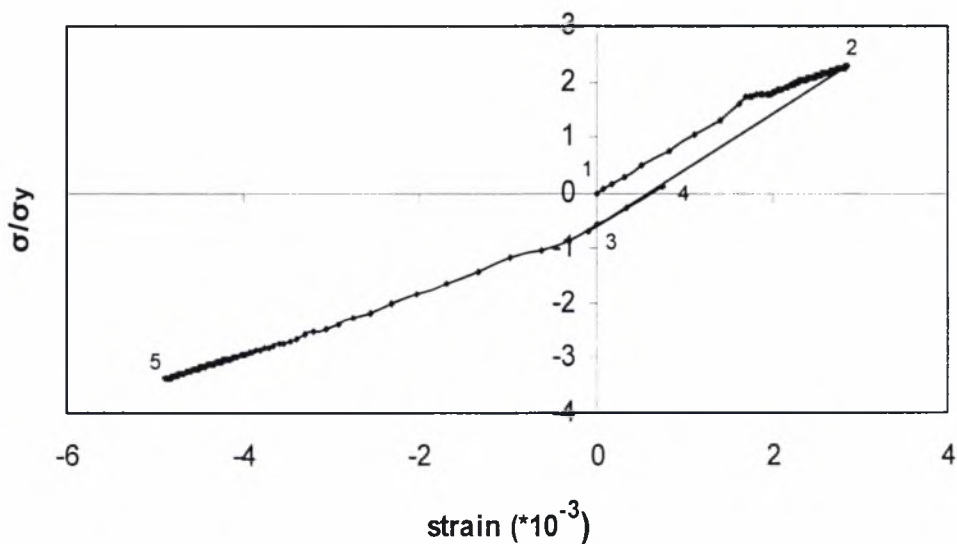
#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Παραμετρική μελέτη

Τα αντίστοιχα διαγράμματα για την **UO** επεξεργασία παρουσιάζονται παρακάτω. Οι διαδρομές που παρουσιάζονται σε κάθε διάγραμμα για 1-4 είναι ίδιες με τα παραπάνω με τη διαφορά για 4-5, όπου:

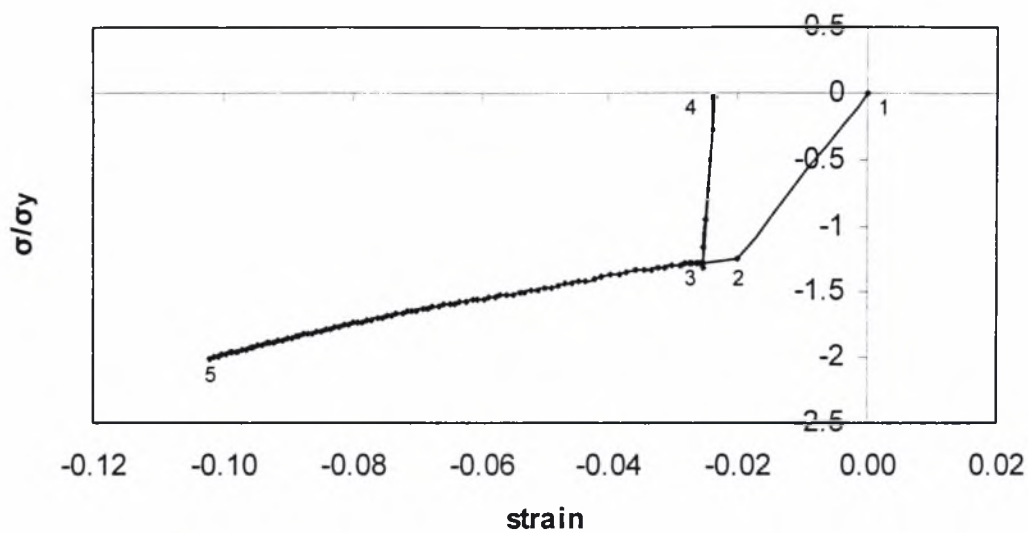
4-5: επιβολή εξωτερικής πίεσης



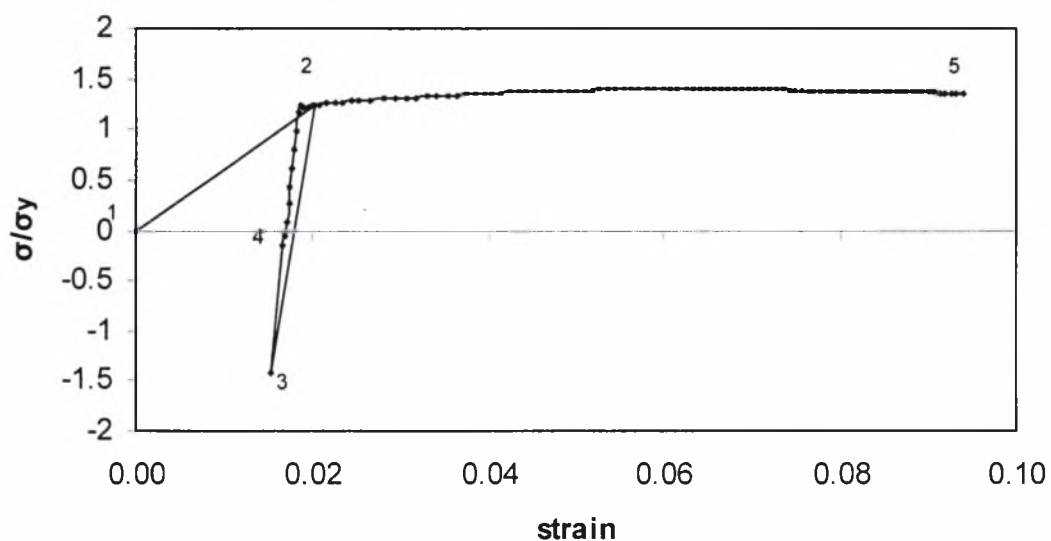
Σχήμα 4.22 Διάγραμμα περιμετρικής τάσης-παραμόρφωσης για την **UO** επεξεργασία για το σημείο **A**



Σχήμα 4.23 Διάγραμμα περιμετρικής τάσης-παραμόρφωσης για την **UO** επεξεργασία για το σημείο **B**



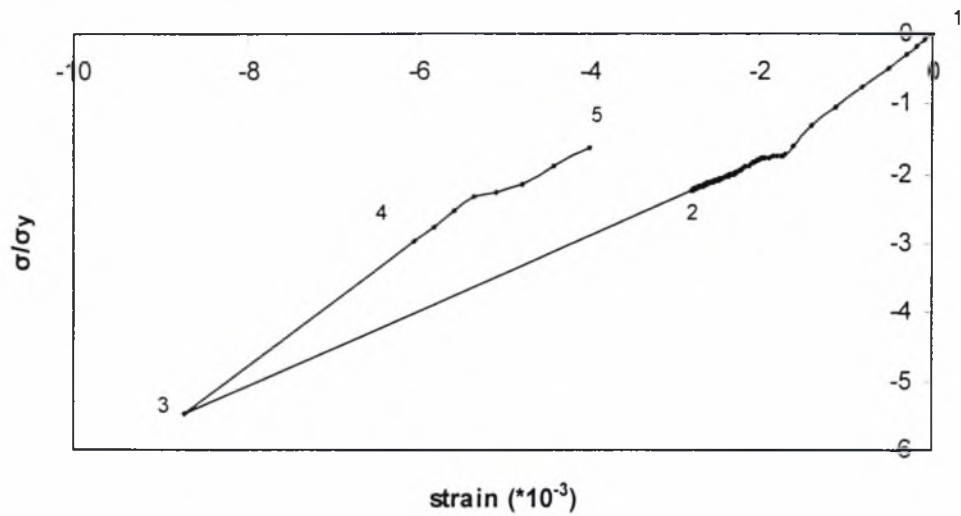
Σχήμα 4.24 Διάγραμμα περιμετρικής τάσης-παραμόρφωσης για την UO επεξεργασία για το σημείο Γ



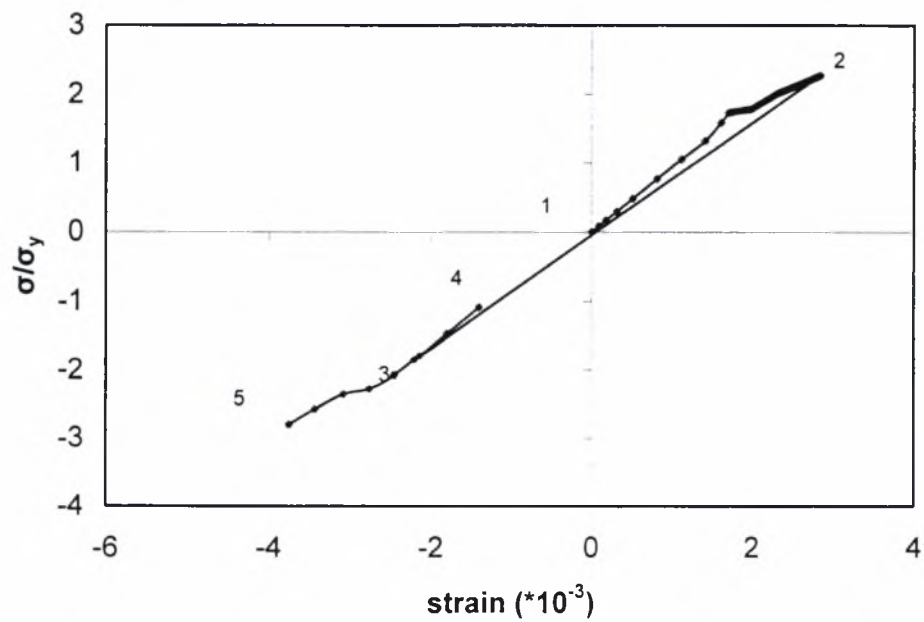
Σχήμα 4.25 Διάγραμμα περιμετρικής τάσης-παραμόρφωσης για την UO επεξεργασία για το σημείο Δ

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Παραμετρική μελέτη

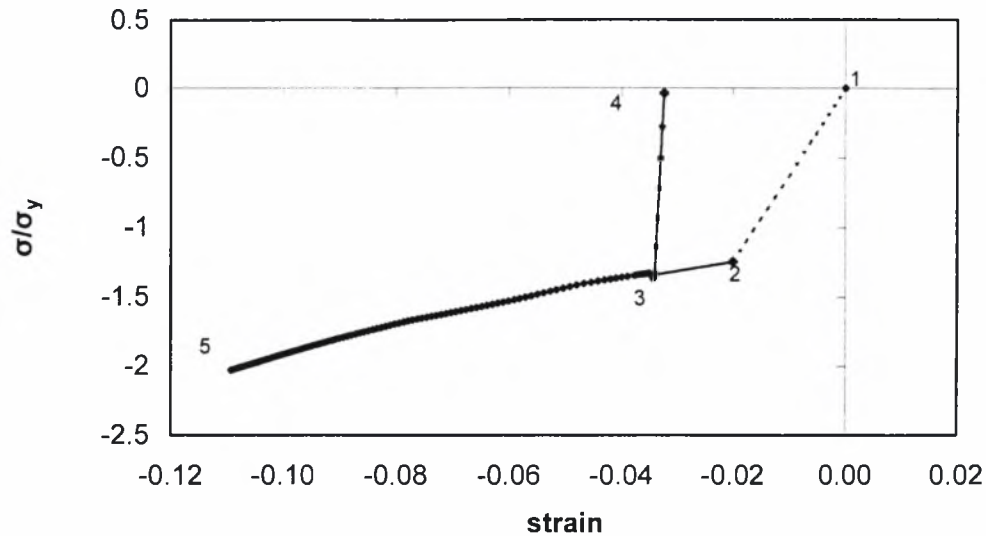
Τα αντίστοιχα διαγράμματα για την **UOC** επεξεργασία παρουσιάζονται παρακάτω.



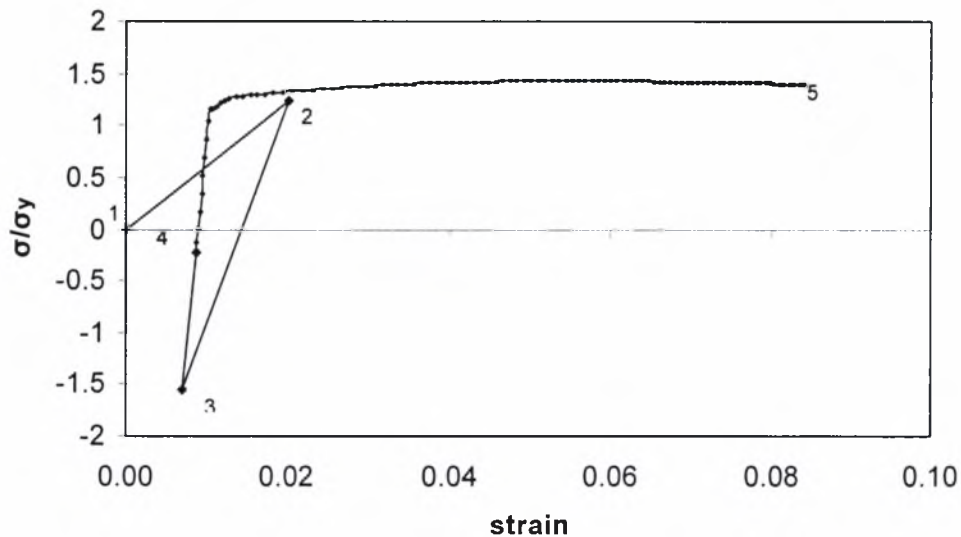
Σχήμα 4.26 Διάγραμμα περιμετρικής τάσης-παραμόρφωσης για την **UOC** επεξεργασία για το σημείο A



Σχήμα 4.27 Διάγραμμα περιμετρικής τάσης-παραμόρφωσης για την **UOC** επεξεργασία για το σημείο B



Σχήμα 4.28 Διάγραμμα περιμετρικής τάσης-παραμόρφωσης για την UOC επεξεργασία για το σημείο Γ



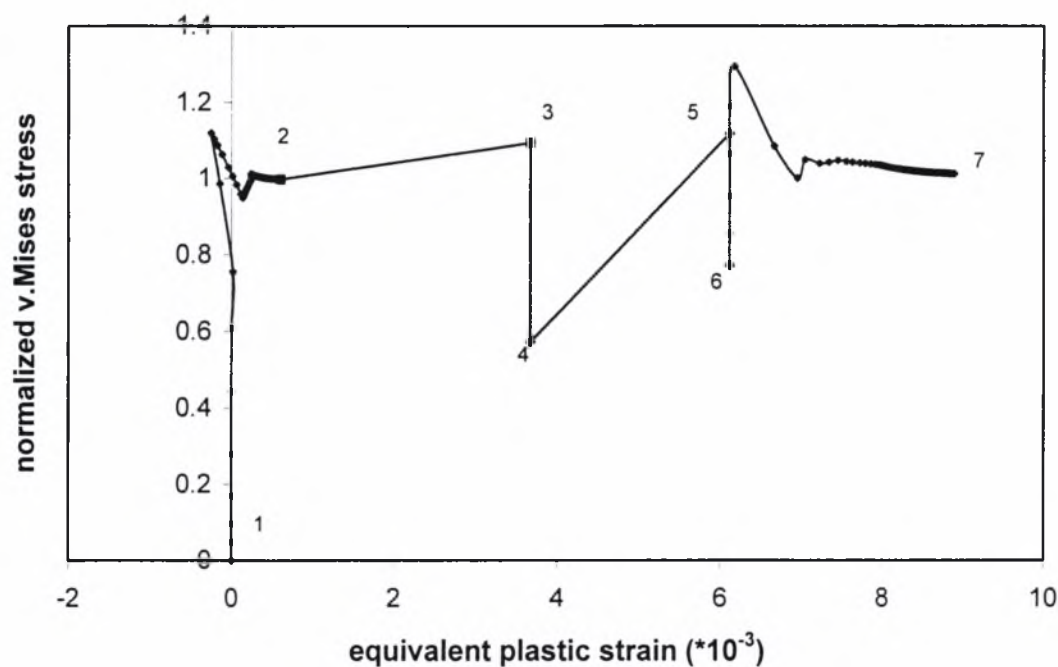
Σχήμα 4.29 Διάγραμμα περιμετρικής τάσης-παραμόρφωσης για την UOC επεξεργασία για το σημείο Δ

Είναι φανερό, πως κατά τις τρεις επεξεργασίες υπάρχουν αυξομειώσεις όσον αφορά τις τάσεις κατά την περιμετρική διεύθυνση κατά τις διαδικασίες της φόρτισης και της αποφόρτισης. Στα σημεία Α και Δ μετά το τέλος της διαδικασίας της διαστολής οι παραμένουσες τάσεις είναι μικρότερες σε σχέση με την περίπτωση που δεν υπάρχει διαστολή (UO και UOC κατεργασία).

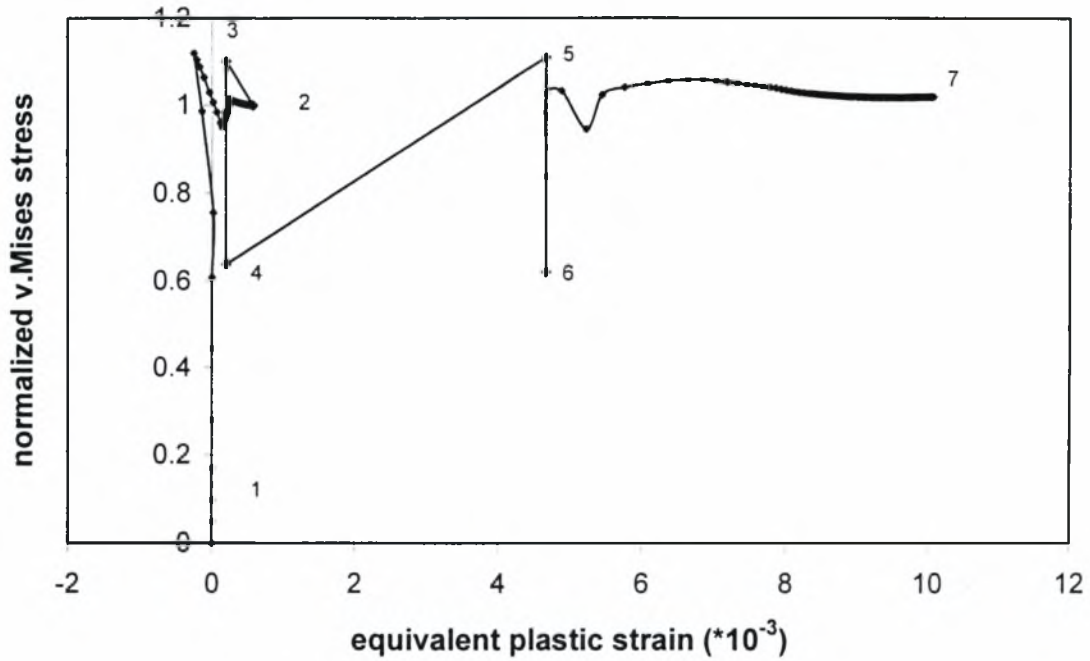
#### 4.5 Διαγράμματα τάσης κατά Mises-ισοδύναμης παραμόρφωσης για τις UOE, UO και UOC επεξεργασίες

Τέλος, προκύπτουν κάποια αποτελέσματα σε σχέση με τις τιμές που λαμβάνει η τάση κατά Mises σε σχέση με την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση μετά το τέλος της κάθε επεξεργασίας. Έτσι, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα διαγράμματα τάσης κατά Mises-ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για την ανάλυση του σωλήνα I, για το υλικό 1 και το είδος σκλήρυνσης isotropic hardening για τις τρεις κατεργασίες.

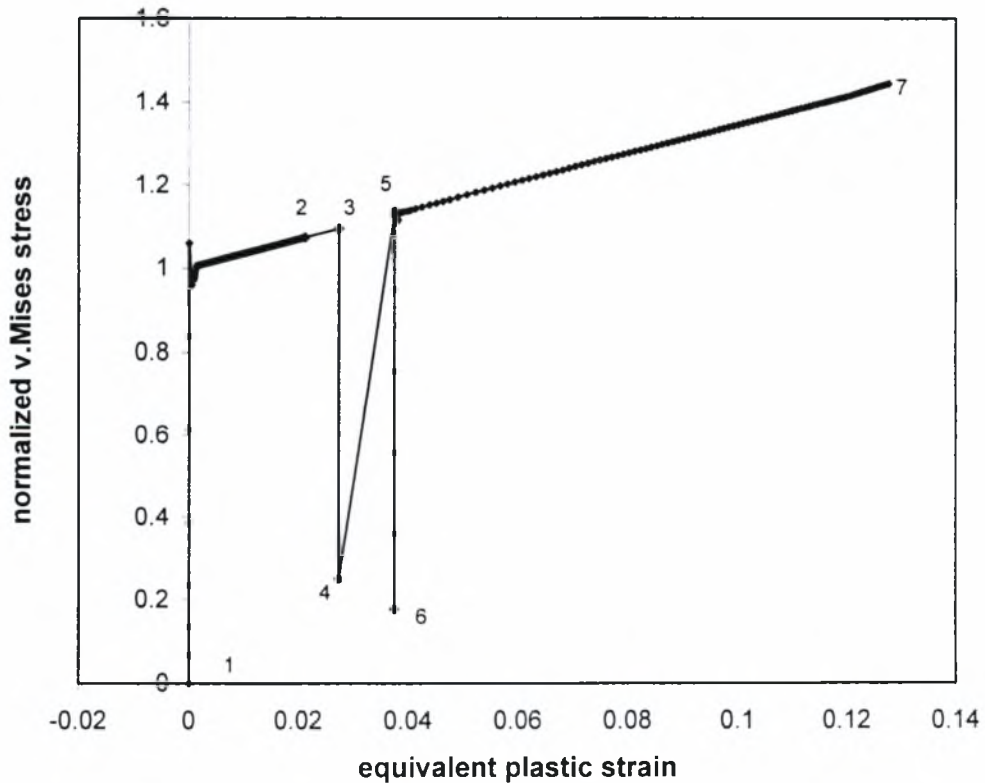
Τα σημεία που μελετώνται είναι τα A, B, Γ και Δ όπως και για τα παραπάνω διαγράμματα. Οι διαδρομές που περιγράφονται είναι ίδιες με τα παραπάνω.



Σχήμα 4.30 Διάγραμμα τάσης κατά Mises-ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για το σημείο A

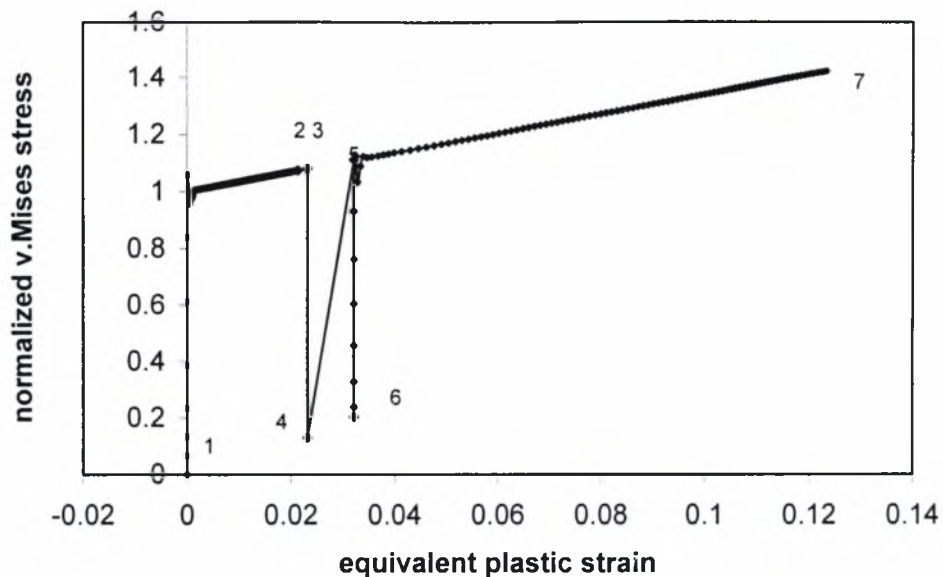


Σχήμα 4.31 Διάγραμμα τάσης κατά Mises-ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για το σημείο Β



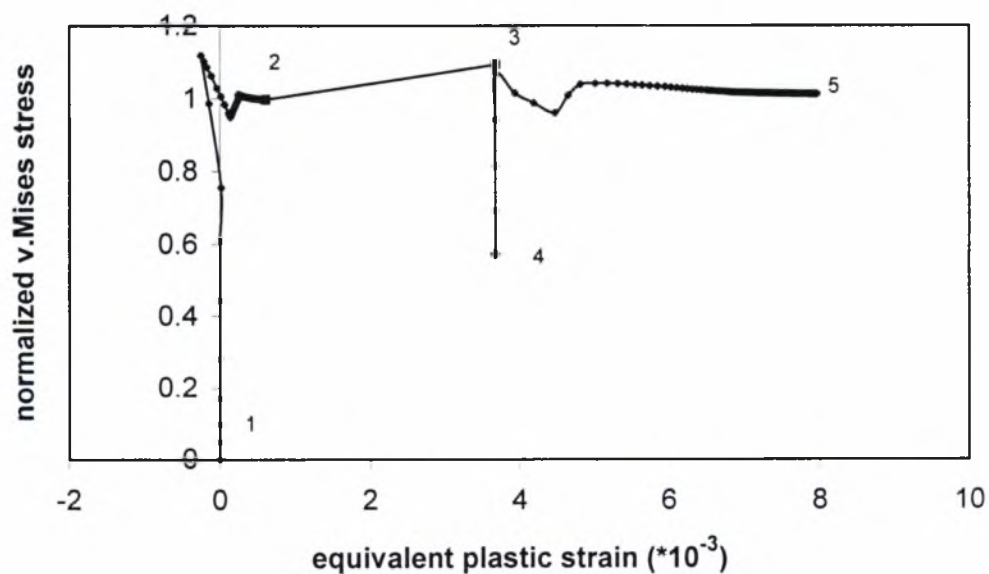
Σχήμα 4.32 Διάγραμμα τάσης κατά Mises-ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για το σημείο Γ



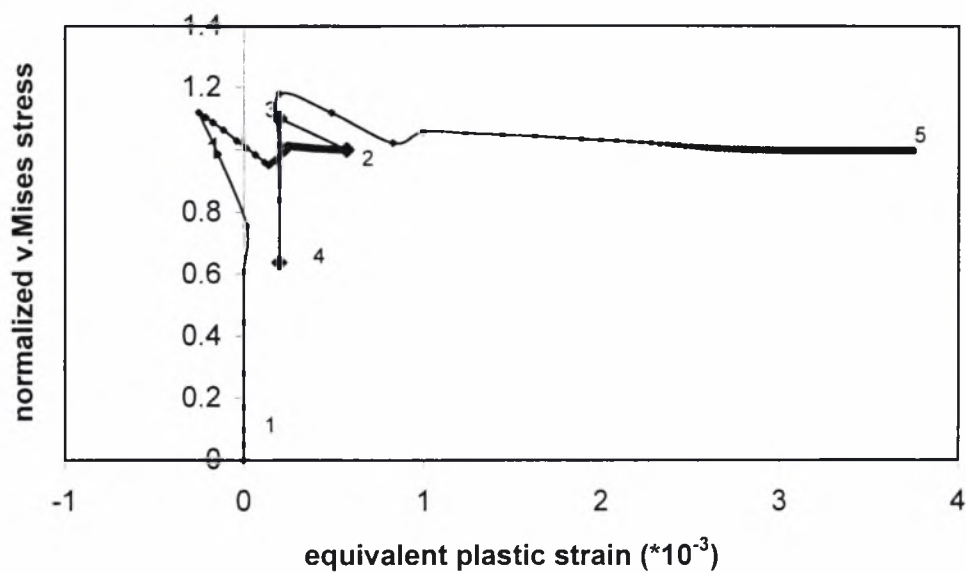


Σχήμα 4.33 Διάγραμμα τάσης κατά Mises-ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης

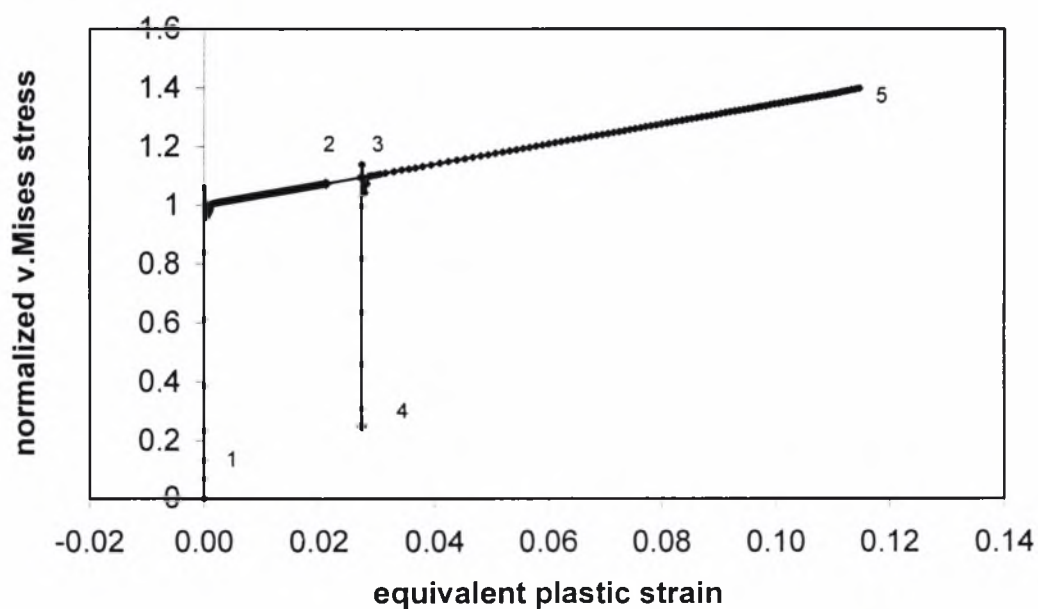
Τα αντίστοιχα διαγράμματα για την UO επεξεργασία παρουσιάζονται παρακάτω.



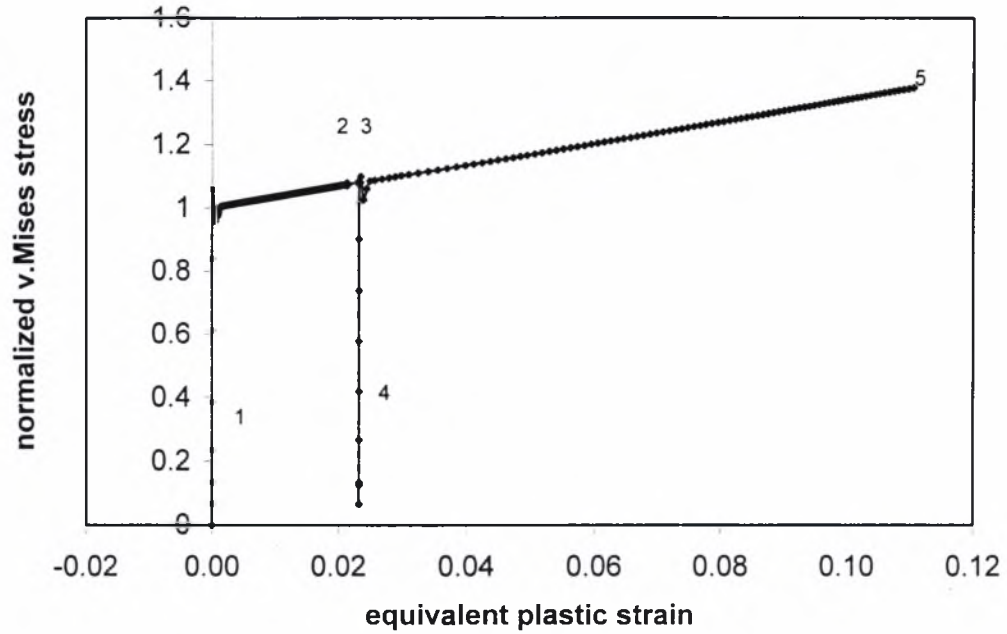
Σχήμα 4.34 Διάγραμμα τάσης κατά Mises-ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για την UO επεξεργασία για το σημείο A



Σχήμα 4.35 Διάγραμμα τάσης κατά Mises-ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για την UO επεξεργασία για το σημείο Β

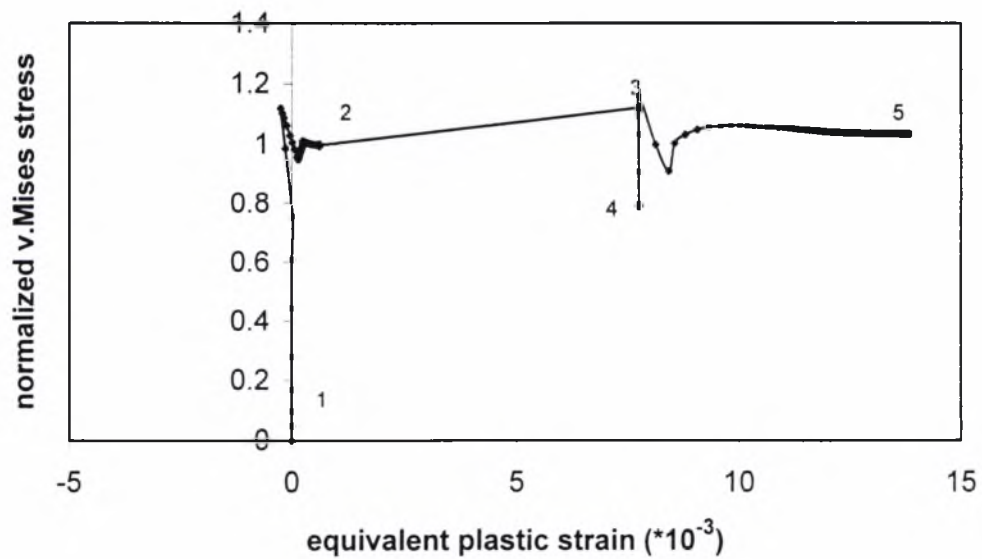


Σχήμα 4.36 Διάγραμμα τάσης κατά Mises-ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για την UO επεξεργασία για το σημείο Γ

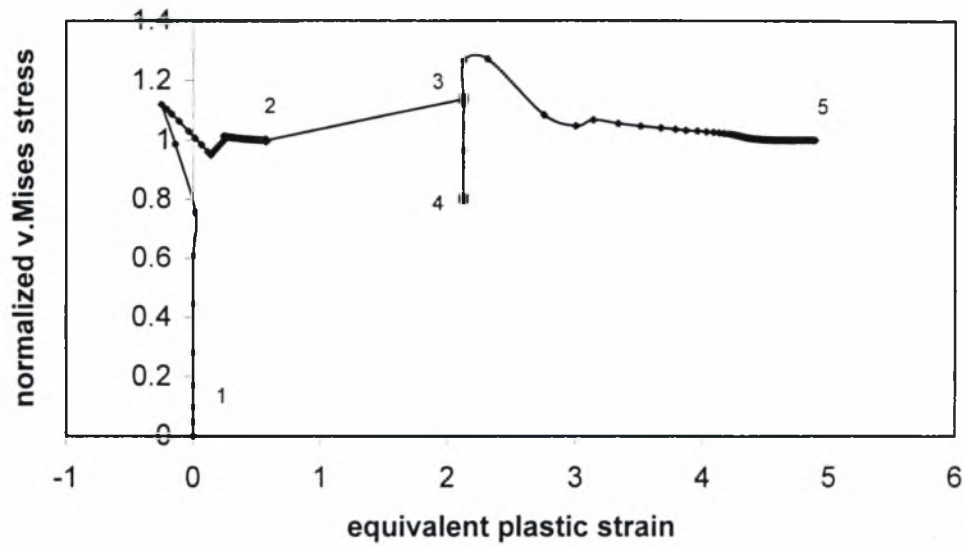


Σχήμα 4.37 Διάγραμμα τάσης κατά Mises-ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για την UO επεξεργασία για το σημείο Δ

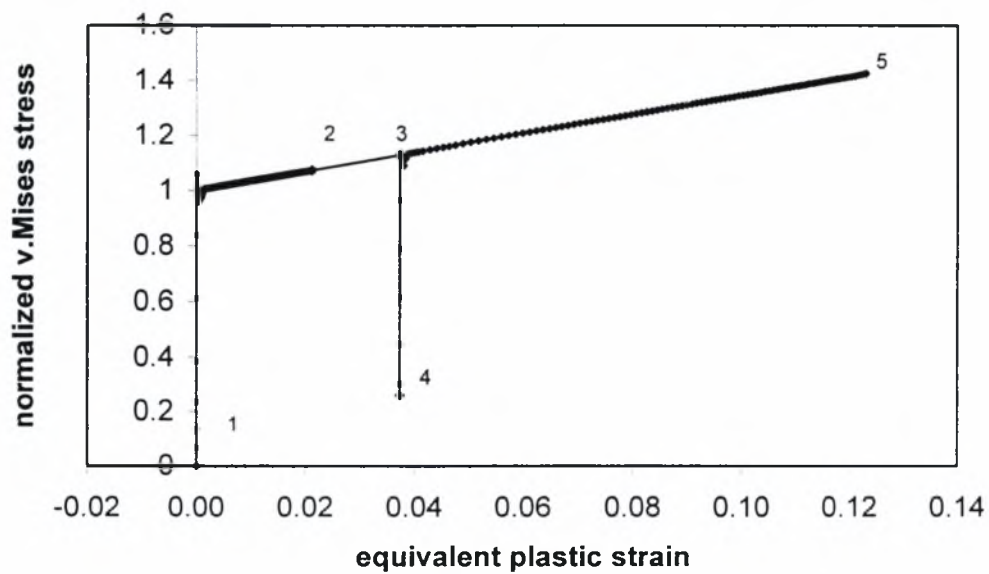
Τα αντίστοιχα διαγράμματα για την UOC επεξεργασία παρουσιάζονται παρακάτω.



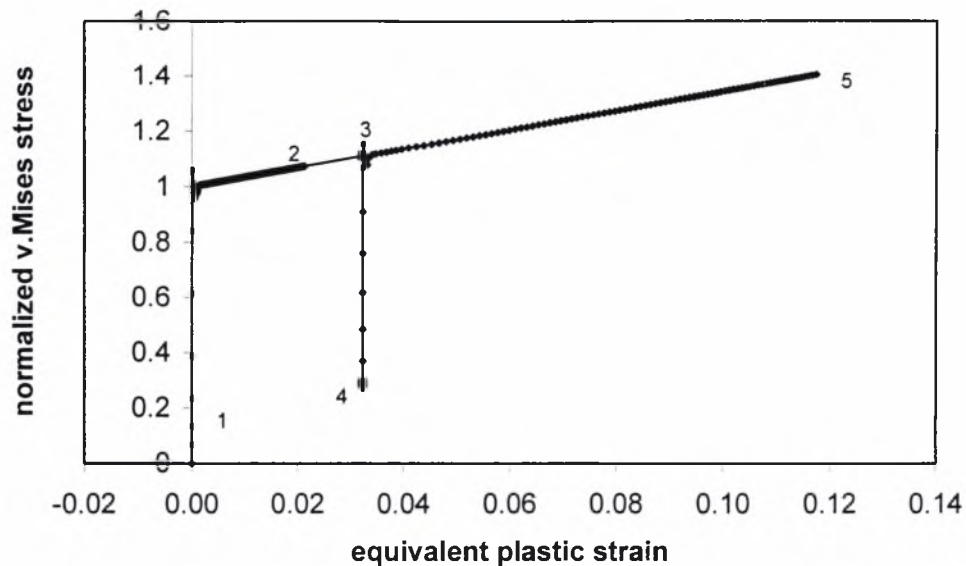
Σχήμα 4.38 Διάγραμμα τάσης κατά Mises-ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για την UOC επεξεργασία για το σημείο Α



Σχήμα 4.39 Διάγραμμα τάσης κατά Mises-ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για την UOC επεξεργασία για το σημείο Β



Σχήμα 4.40 Διάγραμμα τάσης κατά Mises-ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για την UOC επεξεργασία για το σημείο Γ



**Σχήμα 4.41** Διάγραμμα τάσης κατά Mises-ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για την UOC επεξεργασία για το σημείο Δ

Τέλος, είναι φανερό, πως και στη περίπτωση αυτή κατά τις τρεις επεξεργασίες υπάρχουν αυξομειώσεις όσον αφορά τις τάσεις κατά την περιμετρική διεύθυνση κατά τις διαδικασίες της φόρτισης και της αποφόρτισης. Στα σημεία Β και Γ μετά το τέλος της διαδικασίας της διαστολής οι τάσεις κατά Mises είναι μικρότερες σε σχέση με την περίπτωση που δεν υπάρχει διαστολή (UO και UOC κατεργασία).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Σύγκριση με API Bulletin 5C3

### 5.1 Σύγκριση με API Bulletin 5C3

Σε αυτό το κεφάλαιο συγκρίνονται οι τιμές του κρίσιμου φορτίου της πίεσης που έχουν βρεθεί με χρήση πεπερασμένων στοιχείων για τους σωλήνες I, II και III, με τις τιμές που προκύπτουν από τους τύπους API Bulletin 5C3 (5.1), (5.2), (5.3) και (5.4). Οι τέσσερις αυτοί τύποι, αντιπροσωπεύουν τέσσερις πιέσεις κατάρρευσης. Η κρίσιμη τιμή για έναν σωλήνα αντιστοιχεί στην μικρότερη τιμή των τεσσάρων.

#### Πίεση κατάρρευσης λόγω διαρροής (Yield strength collapse pressure formula)

$$P_{\sigma y} = 2\sigma_y \left[ \frac{(D/t) - 1}{(D/t)^2} \right] \quad (5.1)$$

Το  $P_{\sigma y}$  είναι σε μονάδες πίεσης ίδιες με αυτές του  $\sigma_y$ . Το εύρος  $D/t$  που μπορεί να εφαρμοστεί ο τύπος (5.1) όπως φαίνεται στον πίνακα 5.1.

Grade†	D/t Range*
H-40	16.40 and less
-50	15.24 " "
J-K-55	14.81 " "
-60	14.44 " "
-70	13.85 " "
C-75 & E	13.60 " "
L-N-80	13.38 " "
C-90	13.01 " "
C-T-95 & X	12.85 " "
-100	12.70 " "
P-105 & G	12.57 " "
P-110	12.44 " "
-120	12.21 " "
Q-125	12.11 " "
-130	12.02 " "
S-135	11.92 " "
-140	11.84 " "
-150	11.67 " "
-155	11.59 " "
-160	11.52 " "
-170	11.37 " "
-180	11.23 " "

Πίνακας 5.1 Εύρος  $D/t$  για τύπο πίεσης κατάρρευσης λόγω διαρροής. Grade του χάλυβα είναι η τάση διαρροής σε ksi

**Πλαστική πίεση κατάρρευσης (Plastic collapse pressure formula)**

$$P_p = \sigma_y \left[ \frac{A}{D/t} - B \right] - C \quad (5.2)$$

Το  $P_p$  και το  $\sigma_y$  είναι στις ίδιες μονάδες πίεσης και το εύρος  $D/t$  που μπορεί να εφαρμοστεί ο τύπος (5.2) φαίνεται στον πίνακα 5.2. Στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται επίσης οι σταθερές A, B, και C για τα διάφορα  $D/t$ .

Grade†	A	B	C	D/t Range*
H-40	2.950	0.0465	754	16.40 to 27.01
-50	2.976	0.0515	1056	15.24 to 25.63
J-K-55	2.991	0.0541	1206	14.81 to 25.01
-60	3.005	0.0566	1356	14.44 to 24.42
-70	3.037	0.0617	1656	13.85 to 23.38
C-75 & E	3.054	0.0642	1806	13.60 to 22.91
L-N-80	3.071	0.0667	1955	13.38 to 22.47
C-90	3.106	0.0718	2254	13.01 to 21.69
C-T-95 & X	3.124	0.0743	2404	12.85 to 21.33
-100	3.143	0.0768	2553	12.70 to 21.00
P-105 & G	3.162	0.0794	2702	12.57 to 20.70
P-110	3.181	0.0819	2852	12.44 to 20.41
-120	3.219	0.0870	3151	12.21 to 19.88
Q-125	3.239	0.0895	3301	12.11 to 19.63
-130	3.258	0.0920	3451	12.02 to 19.40
S-135	3.278	0.0946	3601	11.92 to 19.18
-140	3.297	0.0971	3751	11.84 to 18.97
-150	3.336	0.1021	4053	11.67 to 18.57
-155	3.356	0.1047	4204	11.59 to 18.37
-160	3.375	0.1072	4356	11.52 to 18.19
-170	3.412	0.1123	4660	11.37 to 17.82
-180	3.449	0.1173	4966	11.23 to 17.47

**Πίνακας 5.2 Σταθερές A, B, C και εύρος D/t για πλαστική πίεση κατάρρευσης**



**Πίεση μεταβατικής κατάρρευσης (Transition collapse pressure formula)**

Το ελάχιστο της πίεσης κατάρρευσης για την μεταβατική ζώνη από την ελαστική στην πλαστική πίεση υπολογίζεται από τον τύπο (5.3).

$$P_T = \sigma_y \left[ \frac{F}{D/t} - G \right] \quad (5.3)$$

Το  $P_T$  και το  $\sigma_y$  είναι στις ίδιες μονάδες πίεσης και το εύρος  $D/t$  που μπορεί να εφαρμοστεί ο τύπος (5.3) φαίνεται στον πίνακα 5.3. Στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται επίσης οι σταθερές  $F$ ,  $G$  για τα διάφορα  $D/t$ .

Grade†	F	G	D/t Range*
H-40	2.063	0.0325	27.01 to 42.64
-50	2.003	0.0347	25.63 to 38.83
J-K-55	1.989	0.0360	25.01 to 37.21
-60	1.983	0.0373	24.42 to 35.73
-70	1.984	0.0403	23.38 to 33.17
C-75 & E	1.990	0.0418	22.91 to 32.05
L-N-80	1.998	0.0434	22.47 to 31.02
C-90	2.017	0.0466	21.69 to 29.18
C-T-95 & X	2.029	0.0482	21.33 to 28.36
-100	2.040	0.0499	21.00 to 27.60
P-105 & G	2.053	0.0515	20.70 to 26.89
P-110	2.066	0.0532	20.41 to 26.22
-120	2.092	0.0565	19.88 to 25.01
Q-125	2.106	0.0582	19.63 to 24.46
-130	2.119	0.0599	19.40 to 23.94
S-135	2.133	0.0615	19.18 to 23.44
-140	2.146	0.0632	18.97 to 22.98
-150	2.174	0.0666	18.57 to 22.11
-155	2.188	0.0683	18.37 to 21.70
-160	2.202	0.0700	18.19 to 21.32
-170	2.231	0.0734	17.82 to 20.60
-180	2.261	0.0769	17.47 to 19.93

**Πίνακας 5.3 Σταθερές F, G και εύρος D/t για πίεση μεταβατικής κατάρρευσης**

- Σωλήνας I

Στην περίπτωση αυτή ο λόγος D/t είναι D/t=52 και χρησιμοποιώντας τους τύπους (5.1), (5.2), (5.3) και (5.4) προκύπτει για  $\sigma_y=300\text{MPa}= 43.5\text{ksi}$ ,  $P_{\sigma_y}=11.32\text{ MPa}$ ,  $P_p=2.986$ ,  $P_T=1.65\text{MPa}$  και  $P_E= 2.394\text{ MPa}$ . Στον πίνακα 5.5 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων για την πίεση κατάρρευσης, που προέκυψαν από τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, από θεωρητική λύση και από τη χρήση των παραπάνω τύπων.

	Περίπτωση hardening	Κρίσιμο φορτίο $P_{cr}$ (MPa)
Υλικό 1 (για $E'=0$ )	Isotropic	1.947
	Kinematic	1.916
Υλικό 2 (για $E'=E/400$ )	Isotropic	2.248
	Kinematic	2.149
Θεωρητική τιμή κρίσιμης πίεσης		3.479
Τύπος πίεσης κατάρρευσης τάσης διαρροής (5.1)		11.32
Τύπος πλαστικής πίεσης κατάρρευσης (5.2)		2.986
Μεταβατικός τύπος πίεσης κατάρρευσης (5.3)		1.65
Τύπος ελαστικής πίεσης κατάρρευσης (5.4)		2.394

**Πίνακας 5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την πίεση κατάρρευσης για τον σωλήνα I**

Επομένως, η κρίσιμη τιμή της πίεσης για τον σωλήνα I είναι  $P_{cr}=1.65\text{MPa}$ .

**Σωλήνας II**

Σε αυτή την περίπτωση ο λόγος D/t είναι D/t=37.33 και χρησιμοποιώντας τους τύπους (5.1), (5.2), (5.3) και (5.4) προκύπτει για  $\sigma_y=300\text{MPa}= 43.5\text{ksi}$ ,  $P_{\sigma_y}=15.64\text{MPa}$ ,  $P_p=3.7$ ,  $P_T=6.27\text{MPa}$  και  $P_E= 6.572\text{MPa}$ . Στον πίνακα 5.6 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων για την πίεση κατάρρευσης, που προέκυψαν από τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, από θεωρητική λύση και από τη χρήση των παραπάνω τύπων.

	<b>Περίπτωση hardening</b>	<b>Κρίσιμο φορτίο <math>P_{cr}</math> (MPa)</b>
Υλικό 1 (για $E'=0$ )	Isotropic	5.103
	Kinematic	5.29
Υλικό 2 (για $E'=E/400$ )	Isotropic	4.85
	Kinematic	4.93
Θεωρητική τιμή κρίσιμης πίεσης		9.625
Τύπος πίεσης κατάρρευσης τάσης διαρροής (5.1)		15.64
Τύπος πλαστικής πίεσης κατάρρευσης (5.2)		3.7
Μεταβατικός τύπος πίεσης κατάρρευσης (5.3)		6.27
Τύπος ελαστικής πίεσης κατάρρευσης (5.4)		6.572

**Πίνακας 5.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την πίεση κατάρρευσης για τον σωλήνα II**

Επομένως, η κρίσιμη τιμή της πίεσης για τον σωλήνα II είναι  $P_{cr}=3.7\text{MPa}$ .

• Σωλήνας III

Στην περίπτωση αυτή ο λόγος  $D/t$  είναι  $D/t=20$  και χρησιμοποιώντας τους τύπους (5.1), (5.2), (5.3) και (5.4) προκύπτει για  $\sigma_y=300\text{MPa}= 43.5\text{ksi}$ ,  $P_{\sigma_y}=28.5 \text{ MPa}$ ,  $P_p=24.28$ ,  $P_T=20.43\text{MPa}$  και  $P_E= 44.85 \text{ MPa}$ . Στον πίνακα 5.7 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων για την πίεση κατάρρευσης, που προέκυψαν από τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, από θεωρητική λύση και από τη χρήση των παραπάνω τύπων.

	<b>Περίπτωση hardening</b>	<b>Κρίσιμο φορτίο <math>P_{cr}</math> (MPa)</b>
Υλικό1 (για $E'=0$ )	Isotropic	15.087
	Kinematic	14.447
Υλικό 2 (για $E'=E/400$ )	Isotropic	20.228
	Kinematic	17.59
Αναλυτική λύση		31.58
Τύπος πίεσης κατάρρευσης τάσης διαρροής (5.1)		28.5
Τύπος πλαστικής πίεσης κατάρρευσης (5.2)		24.28
Μεταβατικός τύπος πίεσης κατάρρευσης (5.3)		20.43
Τύπος ελαστικής πίεσης κατάρρευσης (5.4)		44.85

**Πίνακας 5.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την πίεση κατάρρευσης για τον σωλήνα III**

Επομένως, η κρίσιμη τιμή της πίεσης για τον σωλήνα III είναι  $P_{cr}=20.43\text{MPa}$ .

• Σωλήνας IV

Στην περίπτωση αυτή ο λόγος  $D/t$  είναι  $D/t=16$  και χρησιμοποιώντας τους τύπους (5.1), (5.2), (5.3) και (5.4) προκύπτει για  $\sigma_y=300\text{MPa}= 43.5\text{ksi}$ ,  $P_{\sigma y}=35.16 \text{ MPa}$ ,  $P_p=35.38$ ,  $P_T=28.05\text{MPa}$  και  $P_E= 89.94 \text{ MPa}$ . Στον πίνακα 5.8 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων για την πίεση κατάρρευσης, που προέκυψαν από τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, από αναλυτική λύση και από τη χρήση των παραπάνω τύπων.

	<b>Περίπτωση hardening</b>	<b>Κρίσιμο φορτίο <math>P_{cr}</math> (MPa)</b>
Υλικό1 (για $E'=0$ )	Isotropic	26.191
	Kinematic	24.825
Υλικό 2 (για $E'=E/400$ )	Isotropic	33.687
	Kinematic	28.466
Αναλυτική λύση		40
Τύπος πίεσης κατάρρευσης τάσης διαρροής (5.1)		35.16
Τύπος πλαστικής πίεσης κατάρρευσης (5.2)		35.38
Μεταβατικός τύπος πίεσης κατάρρευσης (5.3)		28.05
Τύπος ελαστικής πίεσης κατάρρευσης (5.4)		89.94

**Πίνακας 5.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την πίεση κατάρρευσης για τον σωλήνα IV**

Επομένως, η κρίσιμη τιμή της πίεσης για τον σωλήνα IV είναι  $P_{cr}=28.05\text{MPa}$ .

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της επιρροής της εξωτερικής πίεσης στην αντοχή σωληνωτών χαλύβδινων αγωγών με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα προέκυψαν μετά από παραμετρική μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε τέσσερις σωλήνες από τους οποίους οι δυο ήταν λεπτότοιχοι. Κατά τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δυο υλικά που διαφέρουν στο  $E'$  (για το υλικό 1 είναι  $E'=0$  και για το υλικό 2 είναι  $E'=E/400$ ) και δυο είδη σκλήρυνσης (isotropic και kinematic). Επίσης τα αποτελέσματα για την **UOE**, κατεργασία συγκρίθηκαν και με αυτά για τις συγγενικές **UO** και **UOC** επεξεργασίες.

Για τις δυο περιπτώσεις hardening, και για τα δυο υλικά στην περίπτωση που χρησιμοποιείται isotropic hardening, το κρίσιμο φορτίο είναι μεγαλύτερο απ' ό,τι για kinematic hardening. Επίσης, παρατηρήθηκε πως όσο μικραίνει ο λόγος  $D/t$ , τόσο πιο μεγάλη είναι η διαφορά μεταξύ της κρίσιμης τιμής της πίεσης για τις δυο περιπτώσεις hardening. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για την κρίσιμη τιμή της πίεσης μεταξύ των τριών επεξεργασιών, προκύπτει πως και για τις τέσσερις περιπτώσεις των σωλήνων κατά τη **UOC** επεξεργασία το κρίσιμο φορτίο είναι πάντα μεγαλύτερο, ενώ κατά την **UOE** επεξεργασία το κρίσιμο φορτίο είναι πάντα μικρότερο. Η κατεργασία **UOE** προκαλεί πτώση της αντοχής σε σχέση με την θεωρητική τιμή της πίεσης αστοχίας δακτυλίου. Οι κατεργασίες **UO** και **UOC** προκαλούν επίσης μείωση της αντοχής σε εξωτερική πίεση αλλά όχι στον ίδιο βαθμό με την κατεργασία **UOE**.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] S. Kyriakides and E. Corona (1991), "*OTC 6758 On the effect of the UOE Manufacturing Process on the Collapse Pressure of Long Tubes*", and F.J Fischer.
- [2] R.J van Foeken and A.M Gresnigt (1998), "*Buckling and Collapse of UOE manufactured steel pipes PR-238-9423*".
- [3] S.A Karamanos (1996), "*Stability of pressurized long inelastic cylinders under radial transverse loads*".
- [4] API BULLETIN 5C3 (1989), "*Bulletin on Formulas and Calculations for Casing, Tubing, Drill Pipe and Line Pipe Properties*".

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074513



