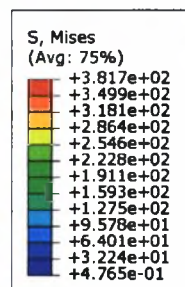


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ  
ΥΛΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

Προσομοίωση της Κατεργασίας Διαμόρφωσης  
Σωλήνων UOE με Πεπερασμένα Στοιχεία

**Μαρία Βάθη**



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



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

Αριθ. Εισ.: 6383/1  
Ημερ. Εισ.: 07-07-2008  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ  
2008  
ΒΑΘ

© 2008 Μαρία Βάθη

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).

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

Πρώτος Εξεταστής  
(Επιβλέπων)

Δρ. Σπύρος Α. Καραμάνος  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων  
Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ Γρηγόριος Χαϊδεμενόπουλος  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Γεώργιος Πετρόπουλος  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων  
Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Σπύρο Καραμάνο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε να αναλάβω την παρούσα διπλωματική εργασία, την καθοδήγησή και πολύτιμη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια της ενασχόλησής μου με αυτή καθώς και τη συμβολή του στην αντιμετώπιση τυχόν δυσκολιών και προβλημάτων που προέκυψαν.

Ακόμη τους προπτυχιακούς, μεταπτυχιακούς και διδακτορικούς φοιτητές του εργαστηρίου της Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών για τη βοήθεια και συμπαράστασή τους τον τελευταίο χρόνο.

Ευχαριστώ επίσης τους καθηγητές μου για τις πολύτιμες γνώσεις που μου παρείχαν αυτά τα 5 χρόνια και που με έκαναν να αγαπήσω αυτή τη σχολή και να προχωρήσω.

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

Πάνω απ' όλα όμως, είμαι ευγνώμων στην οικογένειά μου για την υποστήριξη και συμπαράσταση τους όλα αυτά τα χρόνια και την πίστη που μου έδειξαν πως μπορώ να τα καταφέρω.

Βάθη Μαρία

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Γενικά</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Υποθαλάσσιοι αγωγοί πετρελαίου και φυσικού αερίου</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 Αντοχή σωλήνων σε εξωτερική πίεση</b> .....	<b>4</b>
<b>2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ</b> .....	<b>10</b>
<b>2.1 Προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων</b> .....	<b>10</b>
<b>2.2 Αριθμητικά αποτελέσματα – επιρροή αρχικών ατελειών</b> .....	<b>20</b>
<b>3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΟΟΕ</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1 Περιγραφή της Κατεργασίας ΟΟΕ</b> .....	<b>25</b>
<b>3.2 Προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων</b> .....	<b>29</b>
<b>α. Διαμόρφωση / Δημιουργία του σωλήνα</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2.1. Φάση Πτύχωσης</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2.2. Φάση U (U-ing)</b> .....	<b>37</b>
<b>3.2.3. Φάση O (O-ing)</b> .....	<b>40</b>
<b>3.2.4. Συγκόλληση</b> .....	<b>41</b>
<b>3.2.5. Διαστολή (Expansion)</b> .....	<b>43</b>
<b>β. Άσκηση εξωτερικής πίεσης στο διαμορφωμένο σωλήνα</b> ..	<b>46</b>
<b>3.3 Αριθμητικά αποτελέσματα – διαστάσεις, παραμένουσες τάσεις, αρχικές ατέλειες</b> .....	<b>48</b>
<b>α. Αριθμητικά αποτελέσματα – διαστάσεις</b> .....	<b>48</b>
<b>β. Παραμένουσες Τάσεις</b> .....	<b>51</b>
<b>4. ΑΝΤΟΧΗ ΣΩΛΗΝΩΝ ΟΟΕ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ</b> .....	<b>59</b>
<b>4.1 Επιρροή της περιμετρικής διαστολής στην αντοχή σε εξωτερική πίεση</b> .....	<b>59</b>
<b>4.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με την αντοχή σωλήνων χωρίς την υπόψη κατεργασία</b> .....	<b>61</b>
<b>5. ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	<b>68</b>

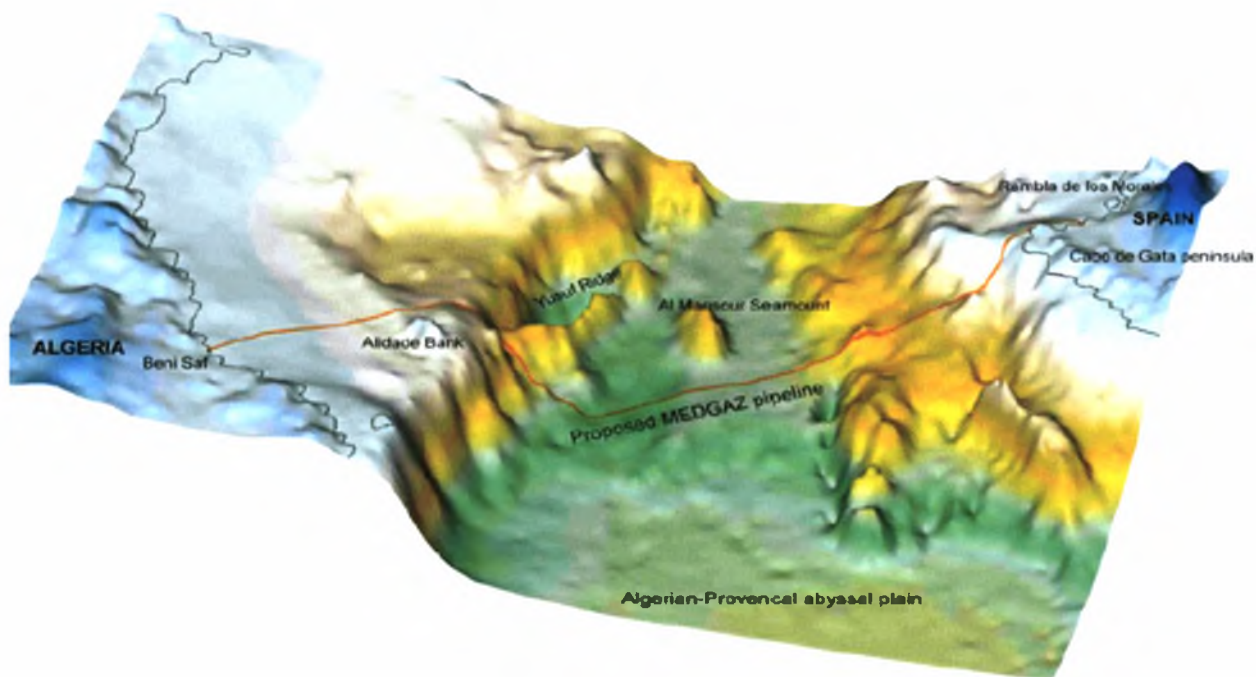
# Προσομοίωση της Κατεργασίας Διαμόρφωσης Σωλήνων ΥΟΕ με Πεπερασμένα Στοιχεία

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Γενικά

Οι αγωγοί πετρελαίου και φυσικού αερίου αποτελούν ένα σημαντικό μέσο συλλογής και μεταφοράς ενεργειακών πόρων. Η χρησιμοποίησή τους οφείλεται στο ότι έχουν αποδειχθεί ως το πλέον αποτελεσματικό μέσο μεταφοράς σε σχέση με άλλα μέσα μεταφοράς. Απαιτούν ένα σημαντικό αρχικό κόστος επένδυσης, αλλά στην διάρκεια ζωής τους (30 - 40 χρόνια) απαιτούν σχετικά μικρό κόστος συντήρησης και λειτουργίας, ενώ χαρακτηρίζονται και από μικρό σχετικά αριθμό ατυχημάτων.

Οι αγωγοί είναι συνήθως σημαντικού μήκους και συχνά συνδέουν διαφορετικά κράτη, καθώς και διαφορετικές ηπείρους. Σε μερικές περιπτώσεις, ένας αγωγός (ή ένα τμήμα του) είναι υποθαλάσσιο (**εικόνα 1.1**). Χαρακτηριστικά παραδείγματα υποθαλάσσιων αγωγών πετρελαίου και φυσικού αερίου αναφέρονται κάτωθι:



**Εικόνα 1.1:** Σχηματική αναπαράσταση του υποθαλάσσιου αγωγού MEDGAZ ο οποίος συνδέει Αλγερία με Ισπανία.

### Αωνιός TRANSMED

Ο αγωγός αυτός διαμέτρου 20 ιντσών μεταφέρει φυσικό αέριο, κατασκευάστηκε το 1983, συνδέει την Τυνησία με την Σικελία, και έχει συνολικό υποθαλάσσιο τμήμα 160 χιλιομέτρων σε μέγιστο βάθος 600 μέτρων. Θεωρείται ένα πολύ πρωτοποριακό έργο για την εποχή του.

## Αγωγός MEDGAZ

Πρόκειται για αγωγό μεταφοράς φυσικού αερίου, ο οποίος είναι υπό κατασκευή. Ο αγωγός συνδέει την Αλγερία με την Ισπανία, και έχει συνολικό υποθαλάσσιο τμήμα 200 χιλιομέτρων σε μέγιστο βάθος 2190 μέτρων (**εικόνα 1.1**). Είναι αγωγός διαμέτρου 24 ιντσών και πάχους 1.17 ιντσών.

## Αγωγός OIP (Ουάν – Ινδία)

Ο αγωγός σχεδιάστηκε στα μέσα της δεκαετίας του '90, και έδωσε το κίνητρο για πολλές ερευνητικές προσπάθειες στην ευρύτερη περιοχή της τεχνολογίας υποθαλάσσιων αγωγών, αλλά δεν κατασκευάστηκε για γεωπολιτικούς λόγους. Το συνολικό μήκος του αγωγού προβλεπόταν να είναι 1139 χιλιόμετρα σε 3500 μέτρα μέγιστο θαλάσσιο βάθος. Ο αγωγός είχε σχεδιαστεί για διάμετρο 24 ιντσών και πάχος 1.625 ιντσών.

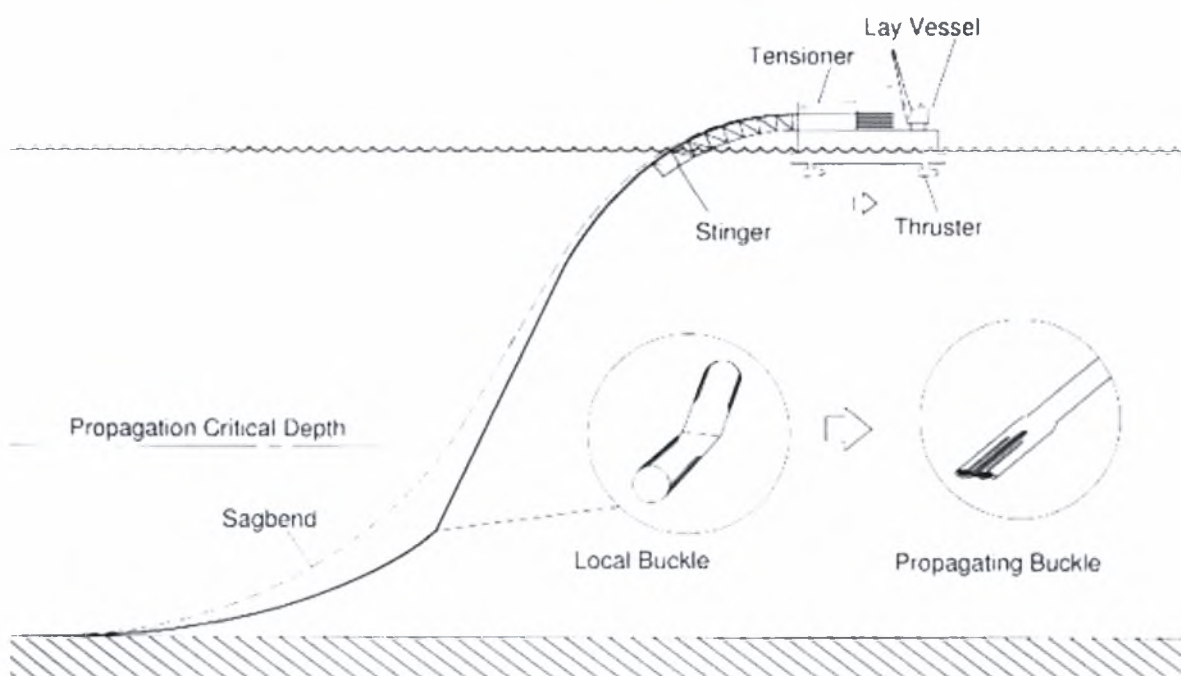
## **1.2 Υποθαλάσσιοι αγωγοί πετρελαίου και φυσικού αερίου**

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί έχουν συνήθως μεγάλο πάχος, διότι θα πρέπει να αντέχουν σε μεγάλες εξωτερικές πιέσεις, λόγω του σχετικά μεγάλου θαλάσσιου βάθους. Η βασική παράμετρος σχεδιασμού είναι η εξωτερική πίεση η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του σωληνωτού αγωγού. Η αστοχία αυτή μπορεί να είναι ιδιαίτερος επικίνδυνη και καταστροφική, ειδικά όταν συνδυαστεί με το φαινόμενο της «διαδιδόμενης ύβωσης». Επίσης, η αστοχία σε εξωτερική πίεση θα πρέπει να εξετάζεται σε συνδυασμό με άλλες καταπονήσεις, όπως διαμήκης κάμψη ή εφελκυσμός. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η εν λόγω συνδυασμένη καταπόνηση παρουσιάζεται κατά την τοποθέτηση (πόντιση) του αγωγού στην θάλασσα. Στην **εικόνα 1.2α**, παρουσιάζεται ένα πλοiάριο πόντισης αγωγών σε θάλασσες μετρίου βάθους. Λόγω του σχήματος του υπό πόντιση αγωγού, η μέθοδος αναφέρεται ως μέθοδος S (S-lay method) και είναι πολύ διαδομένη από την δεκαετία του '70. Η κρίσιμη φάση της πόντισης είναι η στιγμή που ο αγωγός είναι πλέον πολύ κοντά στο βυθό και δέχεται την μέγιστη εξωτερική πίεση, σε συνδυασμό με την κάμψη του σωλήνα (**σχήμα 1.2β**). Στην φάση αυτή, αν η συνδυασμένη καταπόνηση δημιουργήσει τάσεις και παραμορφώσεις που ξεπεράσουν την αντοχή του τοιχώματος του σωλήνα, ο αγωγός θα αστοχήσει με σημαντικές συνέπειες, δεδομένου του τεράστιου κόστους που απαιτείται για την επισκευή του.

Στην φάση της λειτουργίας του, ο σωλήνας οφείλει να αντέχει σε καταπονήσεις που προέρχονται όχι μόνον από την πίεση, η οποία στη φάση της κατασκευής είναι πρωτίστως εσωτερική, αλλά από την κρούση με διάφορα θαλάσσια αντικείμενα (άγκυρες, αλιευτικός εξοπλισμός κτλ.), την σεισμική διέγερση του εδάφους κτλ.

Ο σχεδιασμός των υπόψη αγωγών διαφέρει σημαντικά από το σχεδιασμό των υπόγειων αγωγών οι οποίοι ακολουθούν μία φιλοσοφία σχεδιασμού επιτρεπόμενης τάσης. Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί σχεδιάζονται με την φιλοσοφία των οριακών καταστάσεων (limit-state design). Η φιλοσοφία αυτή επιτρέπει την εμφάνιση πλαστικής παραμόρφωσης στον αγωγό, αλλά ο μηχανικός πρέπει να εξασφαλίσει το ότι αυτές οι πλαστικές παραμορφώσεις δεν οδηγούν σε καταστάσεις αστοχίας, οι οποίες λέγονται και οριακές καταστάσεις.





**Σχήμα 1.2:** (α) τυπικό πλοiάριο πόντσης υποθαλάσσιων αγωγών με τη μέθοδο S. (β) σχηματική αναπαράσταση του αγωγού κατά την πόντση.

Με βάση τα ανωτέρω, μία βασική κατάσταση αστοχίας ενός υποθαλάσσιου αγωγού είναι η αστοχία σε εξωτερική πίεση. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται απλά και «κατάρρευση» (collapse) και η αντιμετώπιση της προϋποθέτει την κατανόηση της μηχανικής (ή δομικής) συμπεριφοράς ενός μεταλλικού σωλήνα ο οποίος υπόκειται σε ομοιόμορφη εξωτερική πίεση. Σημειώνουμε πως το πρόβλημα αυτό σχετίζεται με το κλασικό πρόβλημα της δομικής ευστάθειας ή λυγισμού (buckling) ενός λεπτότοιχου κυλινδρικού κελύφους υπό εξωτερική πίεση. Η βασική διαφορά όμως είναι πως εδώ αναφερόμαστε σε κυλίνδρους με σημαντικό πάχος σε σχέση με την διάμετρό τους, η αστοχία των οποίων συνοδεύεται συνήθως από σημαντική ελαστοπλαστική παραμόρφωση. Το φαινόμενο αυτό θα εξετάσουμε στην επόμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου.

### 1.3 Αντοχή σωλήνων και αγωγών σε εξωτερική πίεση

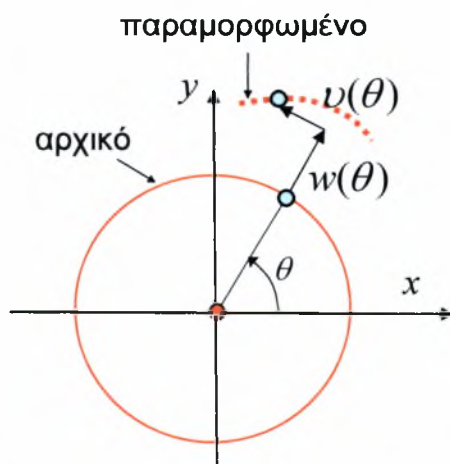
Η αντοχή ενός σωλήνα σε εξωτερική πίεση βασίζεται σε δύο βασικές μορφές αστοχίας και συγκεκριμένα:

- την ελαστική αστοχία κυκλικού δακτυλίου σε ομοιόμορφη εξωτερική πίεση λόγω λυγισμού (δομική αστάθεια)
- την πλαστικοποίηση της διατομής του τοιχώματος του σωλήνα.

Οι δύο ανωτέρω μορφές της αστοχίας εξαρτώνται από το πόσο παχύς είναι ο σωλήνας και συγκεκριμένα από την τιμή του λόγου της διαμέτρου του σωλήνα προς το πάχος του ( $D/t$ ). Σωλήνες οι οποίοι είναι σημαντικού πάχους, με λόγο διαμέτρου προς πάχος μικρότερο του 10, αστοχούν με καθαρή πλαστικοποίηση της διατομής του τοιχώματός τους. Λεπτότοιχοι σωλήνες με λόγο διαμέτρου προς πάχος μεγαλύτερο του 35 περίπου αστοχούν «ελαστικά», σε μία πίεση που δεν απέχει πολύ από την θεωρητική αστοχία λόγω λυγισμού του δακτυλίου.

#### Λυγισμός ελαστικών δακτυλίων

Έστω κυκλικός δακτύλιος σε κατάσταση επίπεδης έντασης με διάμετρο  $D$  και πάχος  $t$ , ο οποίος υπόκειται σε ομοιόμορφη εξωτερική πίεση  $p$ . Η πίεση έχει το χαρακτηριστικό πως είναι πάντοτε κάθετη στην επιφάνεια. Δηλαδή, αν ο δακτύλιος παραμορφωθεί, σε ένα οιοδήποτε σημείο, η διεύθυνση της πίεσης θα είναι κάθετη στην εκάστοτε θέση της (παραμορφωμένης) επιφάνειας (**σχήμα 1.3**).



**Σχήμα 1.3:** Μετατοπίσεις επίπεδου δακτυλίου.

Από την Αντοχή των Υλικών γνωρίζουμε πως ο δακτύλιος υπό την εξωτερική αυτή πίεση θα «συρρικνωθεί» ομοιόμορφα, με ακτινική (προς τα μέσα) μετατόπιση ίση με

$$w_o = -\frac{pR^2}{Et}$$

ενώ η εφαπτομενική μετατόπιση του κάθε σημείου είναι μηδέν

$$v_o = 0$$

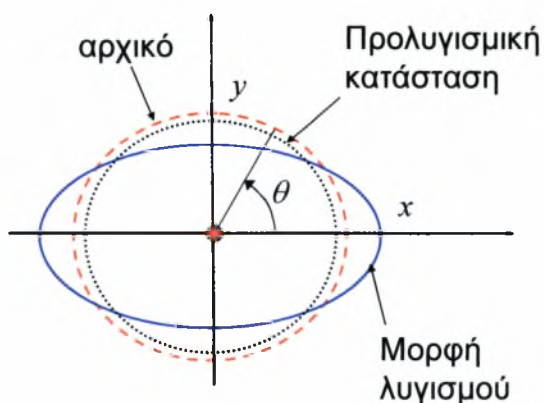
Επίσης, η ορθή τάση κατά την περιμετρική διεύθυνση που αναπτύσσεται στον δακτύλιο είναι ίση με

$$\sigma_\theta = -\frac{pD}{2t}$$

Η ερώτηση που τίθεται είναι κατά πόσον η συγκεκριμένη γραμμική λύση ενδέχεται σε κάποια τιμή της πίεσης να παρουσιάσει «διακλάδωση» προς μία άλλη λύση. Αυτό είναι άλλωστε το φυσικό νόημα του λυγισμού. Εφαρμόζοντας την κλασική θεωρία της ελαστικής ευστάθειας στην συγκεκριμένη γεωμετρία και φόρτιση, όπως περιγράφεται στο βιβλίο των Brush & Almroth (1975), το αποτέλεσμα είναι πως διακλάδωση (δηλαδή λυγισμός) συμβαίνει όταν η πίεση  $p$  φτάσει στην κάτωθι τιμή

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

ενώ το σχήμα που λαμβάνει ο δακτύλιος όταν λυγίζει είναι μορφής οβάλ, και δίνεται μαθηματικά με τον ακόλουθο τύπο σε σχέση με την ακτινική και εφαπτομενική μετατόπιση του τυχαίου σημείου (το οποίο έχει αρχική περιμετρική συντεταγμένη  $\theta$ , όπως φαίνεται στο **σχήμα 1.4**):



**Σχήμα 1.4:** Σχηματική αναπαράσταση λυγισμού δακτυλίου υπό εξωτερική πίεση.

$$w_1 = A \cos 2\theta$$

$$v_1 = -\frac{A}{2} \sin 2\theta$$

όπου  $A$  είναι μία αυθαίρετη σταθερά. Οι ανωτέρω μετατοπίσεις  $w_1, v_1$  οφείλουν να προστεθούν στις μετατοπίσεις της προλυγισμικής κατάστασης  $w_0, v_0$  ώστε να δώσουν τη συνολική μετατόπιση.

Από τη θεωρία του δακτυλίου, η μεταβολή της καμπυλότητας  $k$  στην περιμετρική διεύθυνση είναι ίση με

$$k = \frac{v' - w''}{R^2}$$

και η ροπή κάμψης του τοιχώματος είναι

$$M = EI k$$

με

$$I = \frac{t^3}{12}$$

Με βάση τα ανωτέρω, η συνολική τάση που αναπτύσσεται στο τοίχωμα αμέσως μετά τον λυγισμό είναι το άθροισμα της τάσης λόγω πίεσης και της τάσης λόγω κάμψης

$$\sigma_\theta = -\frac{pD}{2t} \pm \frac{3A}{R^2} \frac{1}{\left(\frac{t^2}{6}\right)} \cos 2\theta$$

Τα ανωτέρω ισχύουν για την περίπτωση που έχουμε ένα επίπεδο δακτύλιο με μικρή διάσταση στην εκτός του επιπέδου του διεύθυνση. Στην περίπτωση αυτή ο δακτύλιος είναι σε κατάσταση επίπεδης έντασης. Αν θεωρήσουμε πως ο εν λόγω δακτύλιος αποτελεί την διατομή ενός σωλήνα μεγάλου μήκους, τότε αυτός βρίσκεται σε κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης και στις ανωτέρω σχέσεις θα πρέπει να αντικαταστήσουμε το  $E$  με το  $E/(1-\nu^2)$ , όπου  $\nu$  είναι ο λόγος του Poisson.

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

#### Μεταλυγισμική ανελαστική συμπεριφορά

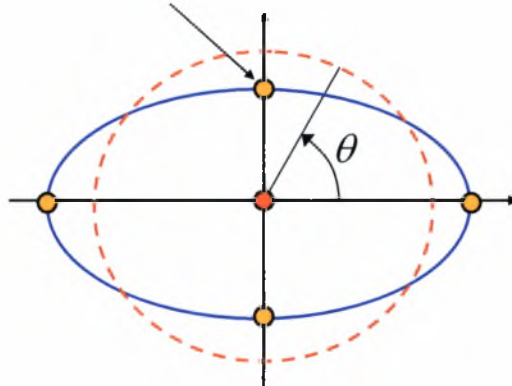
Στην ανωτέρω ελαστική λύση, η τάση μετά το λυγισμό είναι μέγιστη για  $\theta = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ . Αυτό σημαίνει πως μετά το λυγισμό, στα σημεία αυτά αναπτύσσονται σύντομα πλαστικές παραμορφώσεις, οι οποίες όταν πλαστικοποιήσουν πλήρως το τοίχωμα, δημιουργούν έναν μηχανισμό με 4 πλαστικές αρθρώσεις, όπως φαίνεται στο **σχήμα 1.5**.

Αν κάποιος χαράξει τη σχέση πίεσης με την ακόλουθη παράμετρο που ορίζεται

$$\sigma_v = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \approx \frac{D_{\max} - D_{\min}}{2D}$$

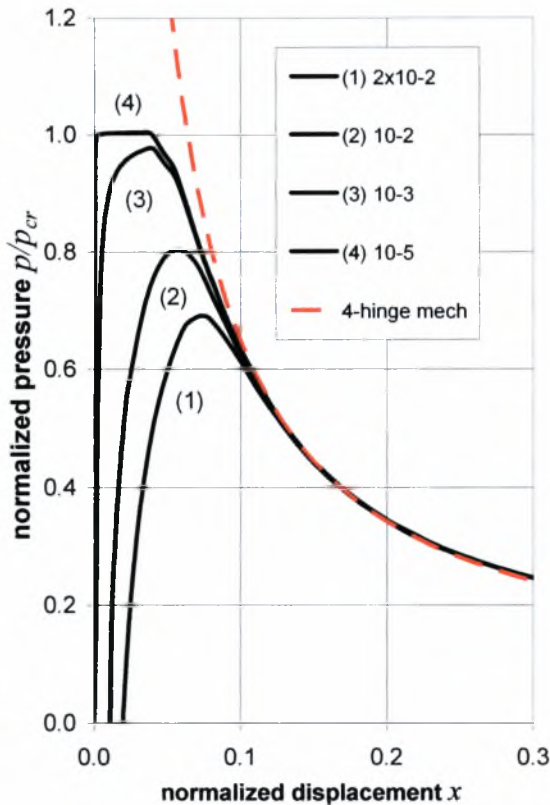
όπου  $D_{\max}$  και  $D_{\min}$  είναι οι τιμές της μέγιστης και ελάχιστης διαμέτρου του δακτυλίου στην παραμορφωμένη κατάσταση, τότε θα παρατηρήσει την καμπύλη του σχήματος. Η απότομη πτώση της αντοχής μετά τον λυγισμό οφείλεται στον σχηματισμό των τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων και της δημιουργίας του μηχανισμού πλαστικής κατάρρευσης. Σημειώνεται πως η υπόψη παράμετρος ονομάζεται και παράμετρος «οβαλοποίησης» της διατομής.

θέση μέγιστης τάσης



**Σχήμα 1.5:** Θέσεις δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων, που συντελούν στην κατάρρευση του δακτυλίου.

Τέλος, η συμπεριφορά αυτή είναι σημαντικά ευαίσθητη σε αρχικές ατέλειες. Μία απλή ανάλυση ενός δακτυλίου για διάφορες τιμές της αρχικής ατέλειας δίνει τα αποτελέσματα του **σχήματος 1.6**, δείχνοντας μία σημαντική μείωση της πίεσης αντοχής του δακτυλίου για αυξανόμενο εύρος αρχικής ατέλειας. Στην περίπτωση αυτή, η αρχική ατέλεια θεωρείται μία αρχική απόκλιση από την πλήρη κυκλικότητα της διατομής (δηλ. μία αρχική «οβαλοποίηση» του δακτυλίου).



**Σχήμα 1.6:** Μεταλυσιμική συμπεριφορά επίπεδου δακτυλίου ( $D/t = 48.8$ ,  $\sigma_y = 483$  MPa) για διαφορετικές τιμές του εύρους της αρχικής ατέλειας. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί σε μία αναλυτική λύση που περιγράφει τον μηχανισμό κατάρρευσης του δακτυλίου.

### Δακτύλιος με αστοχία στην ανελαστική περιοχή

Η ανωτέρω λύση ελαστικού λυγισμού προϋποθέτει πως η τάση την στιγμή του λυγισμού είναι στην ελαστική περιοχή. Για να συμβαίνει αυτό, θα πρέπει να ισχύει η ακόλουθη ανισότητα

$$\sigma_\theta = -\frac{pD}{2t} \leq \sigma_y$$

Εισάγοντας την τιμή της κρίσιμης πίεσης  $p_{cr}$  στην ανωτέρω σχέση, έχουμε την ακόλουθη συνθήκη για λυγισμό στην ελαστική περιοχή

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

Αυτό σημαίνει ότι για χάλυβα  $E = 210$  MPa, και για τάση διαρροής  $\sigma_y$  ίση με 450 MPa (χάλυβας X65), αν ο λόγος διαμέτρου προς πάχος είναι μικρότερος του 23, έχουμε ελαστοπλαστικό λυγισμό. Το όριο αυτό ισχύει για σωλήνες χωρίς αρχική ατέλεια. Στην περίπτωση που έχουμε μικρές αρχικές ατέλειες, το αντίστοιχο όριο



του λόγου  $D/t$  είναι μεγαλύτερο, ώστε το μέγιστο φορτίο να είναι εντός της ελαστικής περιοχής.

Η αστοχία σωλήνων σημαντικού πάχους που εμπίπτουν την κατηγορία αυτή γίνεται με μία «οβάλ» μορφή, παρόμοια με αυτή του ελαστικού λυγισμού. Η πίεση αστοχίας είναι όμως σημαντικά διαφορετική. Σε σωλήνες πολύ μεγάλου πάχους, η οριακή κατάσταση αστοχίας είναι η πλήρης πλαστικότητα, και επομένως, θεωρώντας ότι η περιμετρική τάση είναι ίση με την τάση διαρροής, έχουμε πως αντίστοιχη πίεση είναι

$$p = 2\sigma_y \left( \frac{t}{D} \right)$$

Σε ενδιάμεσες τιμές του λόγου διαμέτρου-προς-πάχος έχουμε μία ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ της ελαστικής συμπεριφοράς και της πίεσης πλήρους πλαστικότητας. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει αναλυτική λύση, και η επίλυση του προβλήματος γίνεται με αριθμητική μέθοδο και περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο για επίλυση με προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων.

## 2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ

### 2.1 Προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων

Για να εξετάσουμε τη μηχανική συμπεριφορά στην περίπτωση που ο λόγος  $D/t$  παίρνει ενδιάμεσες τιμές, θα προσομοιάσουμε την κατάρρευση υπό εξωτερική πίεση δύο τέτοιων αγωγών με αρχική ατέλεια με διαφόρους λόγους  $D/t$  χρησιμοποιώντας το μη γραμμικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

#### 1<sup>η</sup> Περίπτωση : Αγωγός Ι

Κάνουμε τις εξής θεωρήσεις και παραδοχές :

Οι χαρακτηριστικές διαστάσεις του αγωγού είναι :

$$\text{Διάμετρος : } D = 20 \text{ in}$$

$$\text{Πάχος : } t = 1.125 \text{ in}$$

από τα οποία συνάγουμε ότι :

$$D = 20 \text{ in} = 508 \text{ mm} = D_{ext}$$

$$t = 1.125 \text{ in} = 28.575 \text{ mm}$$

και άρα  $D/t = 17.78$ . Επίσης, έχουμε :

$$D_m = D_{ext} - t = 18.875 \text{ in} = 479.425 \text{ mm}$$

$$r_m = D_m / 2 = 239.7125 \text{ mm}$$

$$r_{ext} = D_{ext} / 2 = 254 \text{ mm}$$

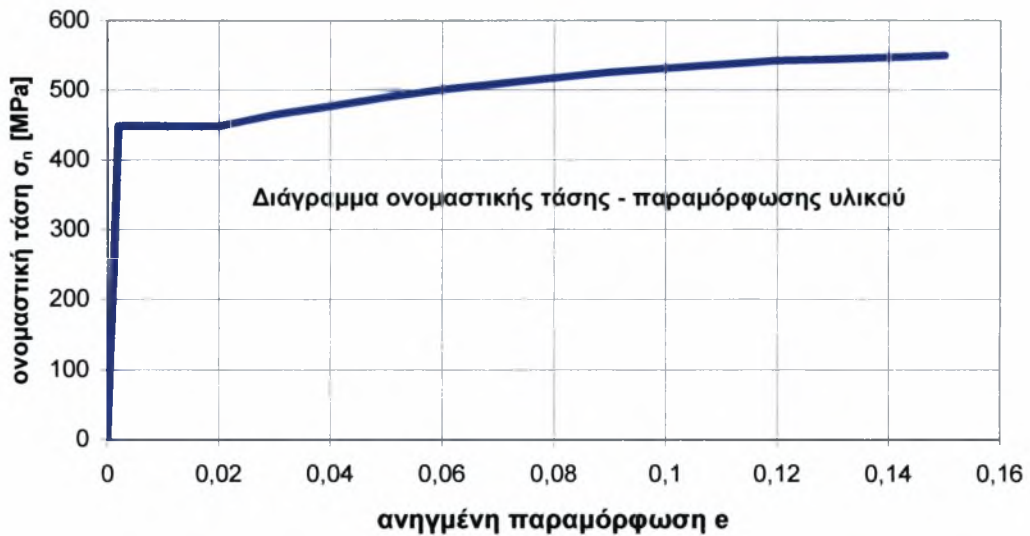
$$r_{int} = r_{ext} - t = 225.425 \text{ mm}$$

Θεωρούμε ότι ο αγωγός έχει :  $\sigma_y = 65 \text{ ksi}$ , μέτρο ελαστικότητας  $E = 210000 \text{ MPa}$  και λόγο Poisson  $\nu = 0.3$  (χάλυβας X65)

οπότε :  $\sigma_y = 65 \text{ ksi} = 448.5 \text{ kPa}$

Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω, θεωρούμε ελαστοπλαστικό υλικό που να έχει τη μορφή που φαίνεται στο **σχήμα 2.1**:





**Σχήμα 2.1 :** Διάγραμμα ονομαστικής τάσης – παραμόρφωσης.

Για να υπολογίσουμε την πραγματική τάση και παραμόρφωση από την ονομαστική τάση και ανηγμένη παραμόρφωση, με βάση τη Μηχανική Υλικών, χρησιμοποιούμε τις εξής 2 σχέσεις :

$$\sigma_T = \sigma \cdot (1 + e)$$

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

όπου :

$\sigma_T$  = η πραγματική τάση [MPa]

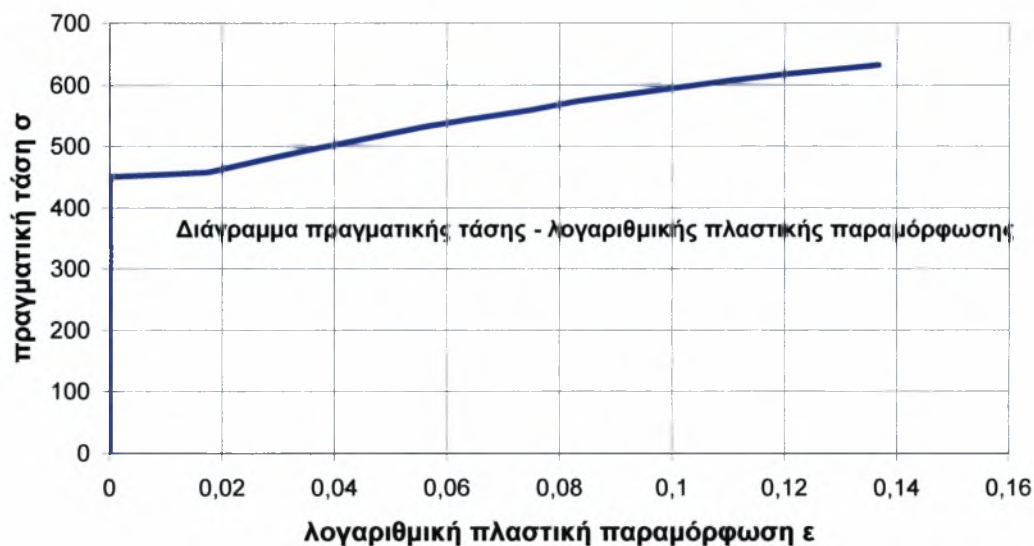
$\sigma$  = η ονομαστική πλαστική παραμόρφωση [MPa]

$\varepsilon_{ln}^p$  = η λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση

$e$  = η ανηγμένη παραμόρφωση

$E$  = το μέτρο ελαστικότητας [MPa]

και έτσι σχεδιάζουμε την καμπύλη πραγματικής τάσης – λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης στο **σχήμα 2.2** :



**Σχήμα 2.2 :** Διάγραμμα πραγματικής τάσης  $\sigma$  – λογαριθμικής παραμόρφωσης  $\varepsilon$  υλικού.

τα σημεία της οποίας (**πίνακας 2.1**) θα χρησιμοποιήσουμε στην ανάλυσή μας.

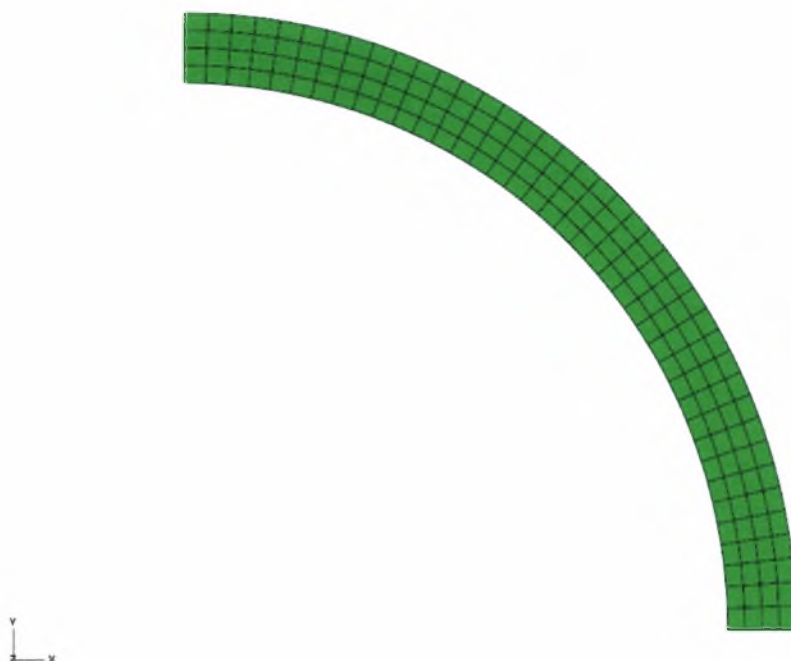
**Πίνακας 2.1 :**

Τιμές πραγματικής τάσης και λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο. Θεωρούμε ιστροπική σκλήρυνση.

Πραγματική τάση $\sigma$ [MPa]	Λογαριθμική πλαστική παραμόρφωση $\varepsilon$
449.397	0.000
452.985	$0.779 * 10^{-2}$
457.470	$0.176 * 10^{-1}$
478.950	$0.273 * 10^{-1}$
496.600	$0.369 * 10^{-1}$
514.500	$0.463 * 10^{-1}$
531.378	$0.557 * 10^{-1}$
545.700	$0.651 * 10^{-1}$
558.900	$0.743 * 10^{-1}$
573.667	$0.834 * 10^{-1}$
584.430	$0.925 * 10^{-1}$
596.625	0.102
607.600	0.110
615.850	0.119
624.150	0.128
632.500	0.137

Θεωρούμε ότι το μοντέλο μας είναι διδιάστατο, μιας και δεν έχουμε κάποια μετατόπιση ως προς z, και ότι έχουμε συμμετρία ως προς τους x και y άξονες, οπότε επιλέγουμε να μελετήσουμε μόνο το ¼ του σωλήνα (στα υπόλοιπα κομμάτια η συμπεριφορά θα είναι ίδια). Ως κέντρο του δακτυλίου επιλέγουμε το (0,0).

Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζουμε το δακτύλιο αυτό, όπως φαίνεται στο **σχήμα 2.3**.



**Σχήμα 2.3 :** Ο δακτύλιος που χρησιμοποιούμε στην προσομοίωση (αγωγός I).

Για τη δημιουργία του πλέγματος, θεωρούμε ότι έχουμε 4 στοιχεία ως προς το πάχος και 40 στοιχεία ως προς την περιφέρεια του τεταρτοκυκλίου. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται, επίσης, είναι τύπου CPE8R, δηλαδή γραμμικά, οκτακομβικά μειωμένης ολοκλήρωσης, επίπεδης παραμόρφωσης στοιχεία συνέχειας.

Θεωρούμε ότι άνω αριστερά έχουμε συμμετρία ως προς τον x άξονα, εφόσον θέλουμε αυτή η πλευρά του σώματος να μπορεί να κινηθεί μόνο στη διεύθυνση του άξονα y, και κάτω δεξιά συμμετρία ως προς τον y άξονα, ώστε να μπορεί η αντίστοιχη πλευρά του σώματος να κινηθεί μόνο στη διεύθυνση του άξονα x.

Τέλος, υποθέτουμε ότι η ανάλυσή μας αποτελείται από 3 βήματα :

α. δημιουργία αρχικής ατέλειας

Αρχικά επιβάλλουμε μια μετατόπιση στον πάνω αριστερά κόμβο έτσι, ώστε να δημιουργήσουμε μια αρχική ατέλεια.

β. αποφόρτιση

Αφήνουμε το σώμα να αποφορτιστεί και να επιστρέψει ελαστικά σε μια θέση η οποία είναι διαφορετική της αρχικής (λόγω της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του υλικού). Επομένως και η ατέλεια που θα έχουμε θα είναι μικρότερη της μετατόπισης που επιβάλαμε.

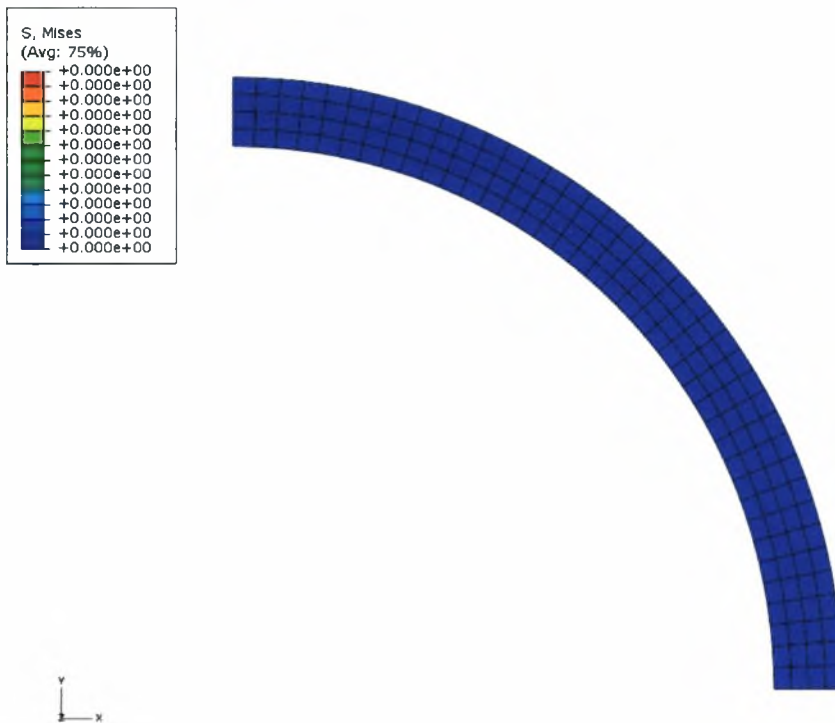
### γ. άσκηση εξωτερικής πίεσης

Ασκούμε εξωτερική πίεση στο δακτύλιο μέχρι την κατάρρευση, για να ελέγξουμε τη συμπεριφορά του.

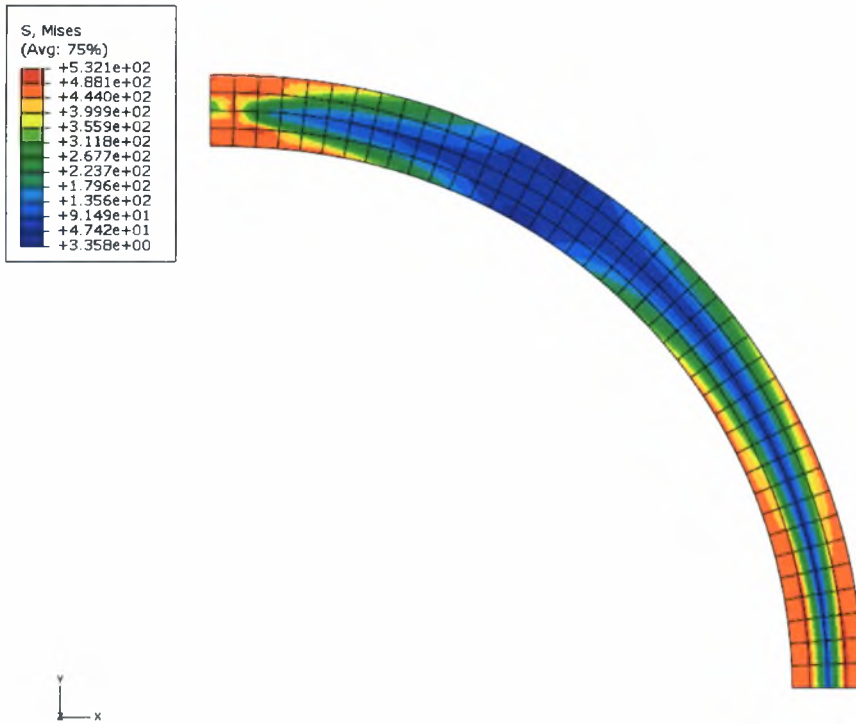
Στα δύο πρώτα χρησιμοποιούμε ανάλυση τύπου static general, ενώ στο τρίτο ανάλυση τύπου static riks με επιλεγμένο αριθμό βημάτων (increments).

Έχοντας κάνει λοιπόν τις απαραίτητες παραδοχές προχωράμε στην προσομοίωση. Αρχικά πραγματοποιούμε την ανάλυση για αρχική μετατόπιση  $u = 10 \text{ mm}$ . Μελέτη για διάφορες τιμές αρχικής μετατόπισης θα πραγματοποιηθεί στην επόμενη ενότητα.

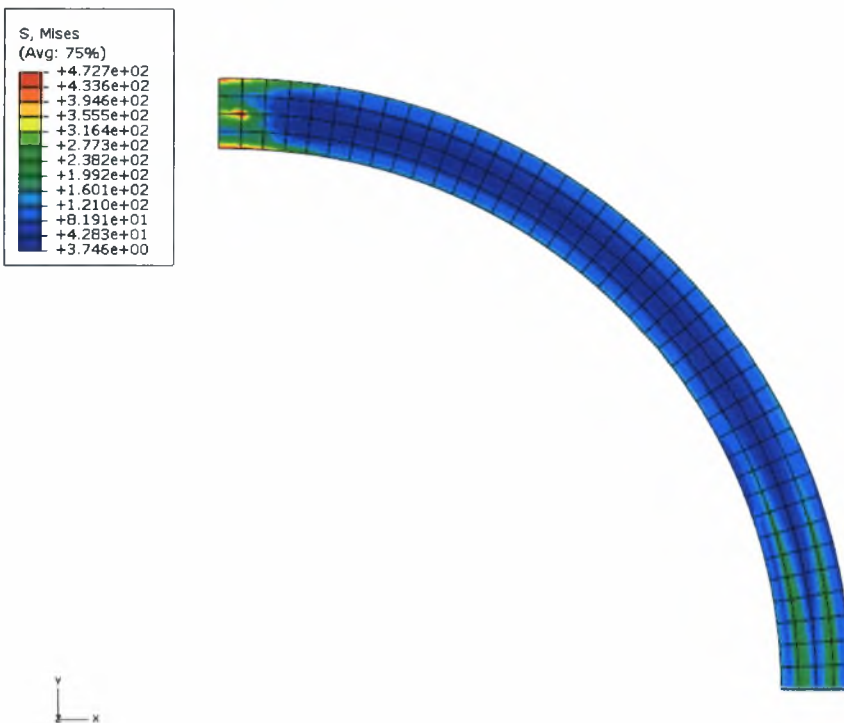
Έτσι παρατηρούμε τις καταστάσεις που παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα :



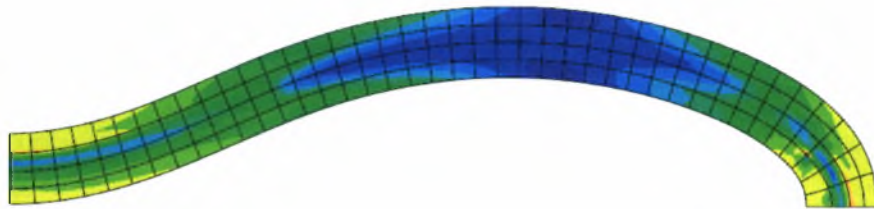
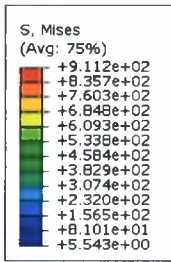
**Σχήμα 2.4** : Ο δακτύλιος πριν παραμορφωθεί (αρχική κατάσταση αγωγού I).



**Σχήμα 2.5 :** Επιβολή αρχικής μετατόπισης και δημιουργία αρχικής στέλειας (αγωγός Ι).



**Σχήμα 2.6 :** Αποφόρτιση του δακτυλίου (αγωγός Ι).



**Σχήμα 2.7 :** Άσκηση εξωτερικής πίεσης μέχρι την κατάρρευση του δακτυλίου (αγωγός I).

Με τη βοήθεια του ABAQUS (από το XY Data για ODB history output και LPF) ή από το status file, βλέπουμε πως η πίεση κατάρρευσης ( $P_{max}$ ) είναι 30.26 MPa.

## 2<sup>η</sup> Περίπτωση : Αγωγός II

Κάνουμε τις εξής θεωρήσεις και παραδοχές :

Οι χαρακτηριστικές διαστάσεις του αγωγού που θα μελετήσουμε :

Διάμετρος :  $D = 20$  in

Πάχος :  $t = 0.75$  in

από τα παραπάνω συνάγουμε ότι :

$$D = 20 \text{ in} = 508 \text{ mm} = D_{ext}$$

$$t = 0.75 \text{ in} = 19.05 \text{ mm}$$

και άρα  $D/t = 26.67$ .

Επίσης, έχουμε :

$$D_m = D_{ext} - t = 19.25 \text{ in} = 488.95 \text{ mm}$$

$$r_m = D_m / 2 = 244.475 \text{ mm}$$

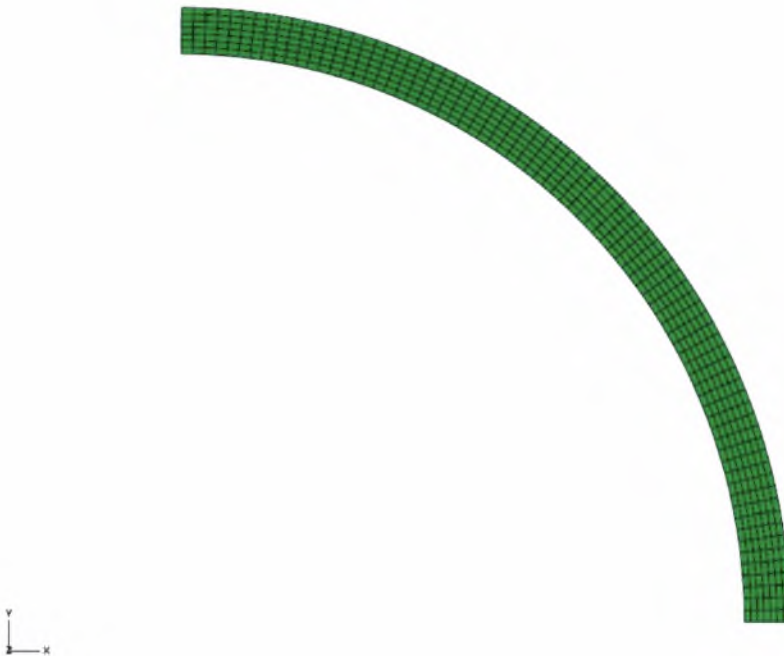
$$r_{ext} = D_{ext} / 2 = 254 \text{ mm}$$

$$r_{\text{int}} = r_{\text{ext}} - t = 234.95 \text{ mm}$$

Θεωρούμε ότι έχουμε το ίδιο υλικό με πριν, δηλαδή χάλυβα X65 και καμπύλη υλικού αυτή του **σχήματος 2.2** με τιμές του **πίνακα 2.1**.

Το μοντέλο μας είναι διδιάστατο όπως και πριν με συμμετρία ως προς τους x και y άξονες, οπότε επιλέγουμε να μελετήσουμε μόνο το ¼ του σωλήνα. Ως κέντρο του δακτυλίου επιλέγουμε το (0,0).

Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζουμε το δακτύλιο αυτό, όπως φαίνεται στο **σχήμα 2.8**.



**Σχήμα 2.8** : Ο δακτύλιος που χρησιμοποιούμε στην προσομοίωση (αγωγός II).

Για τη δημιουργία του πλέγματος, θεωρούμε ότι έχουμε 7 στοιχεία ως προς το πάχος και 77 στοιχεία ως προς την περιφέρεια του τεταρτοκυκλίου. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται, επίσης, είναι τύπου CPE4R, δηλαδή γραμμικά, τετρακομβικά μειωμένης ολοκλήρωσης, επίπεδης παραμόρφωσης στοιχεία συνέχειας.

Θεωρούμε πάλι ότι πάνω αριστερά έχουμε συμμετρία ως προς τον x άξονα και κάτω δεξιά συμμετρία ως προς τον y άξονα.

Τέλος, στην ανάλυσή μας θα χρησιμοποιήσουμε τα ίδια βήματα που χρησιμοποιήσαμε και προηγουμένως :

α. δημιουργία αρχικής ατέλειας

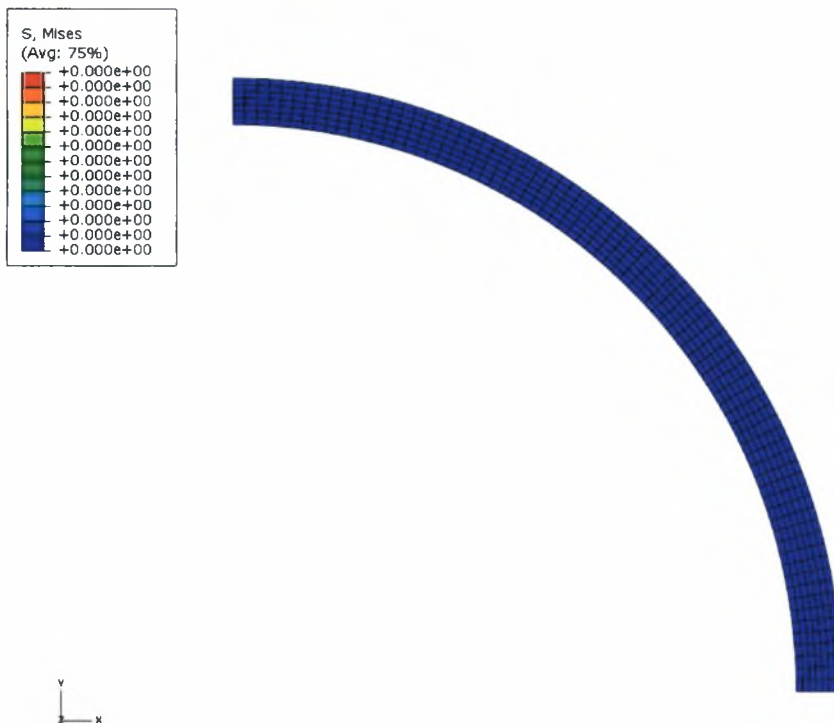
β. αποφόρτιση

### γ. άσκηση εξωτερικής πίεσης

Στα δύο πρώτα χρησιμοποιούμε ανάλυση τύπου static general, ενώ στο τρίτο ανάλυση τύπου static riks με επιλεγμένο αριθμό βημάτων (increments).

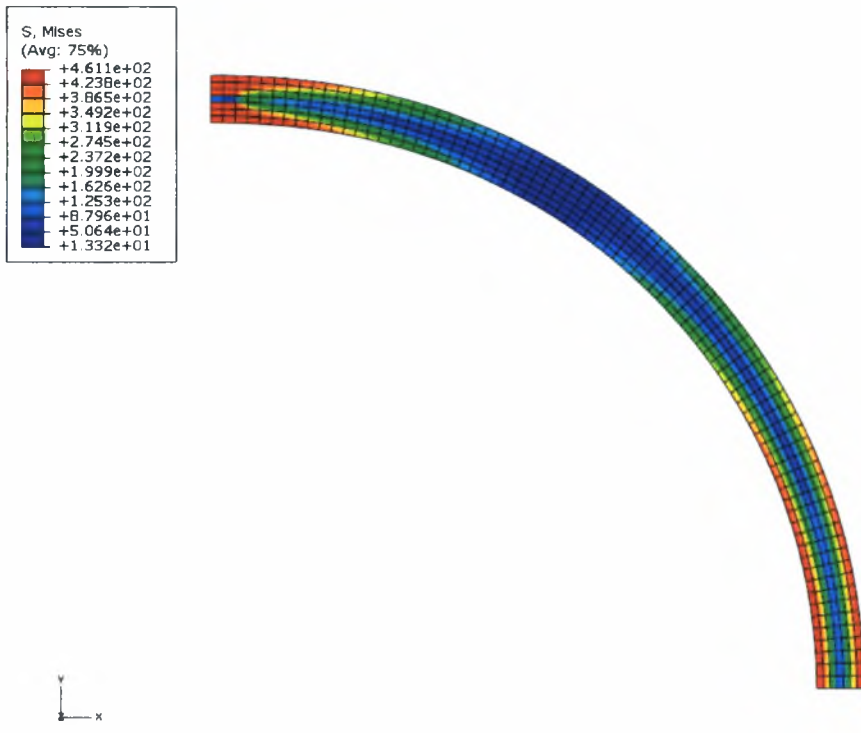
Έχοντας κάνει λοιπόν τις απαραίτητες παραδοχές προχωράμε στην προσομοίωση. Αρχικά πραγματοποιούμε την ανάλυση για αρχική μετατόπιση  $\underline{u} = 10 \text{ mm}$ . Κι εδώ μελέτη για διάφορες τιμές αρχικής μετατόπισης θα πραγματοποιηθεί στην επόμενη ενότητα.

Έτσι παρατηρούμε τις καταστάσεις που παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα :

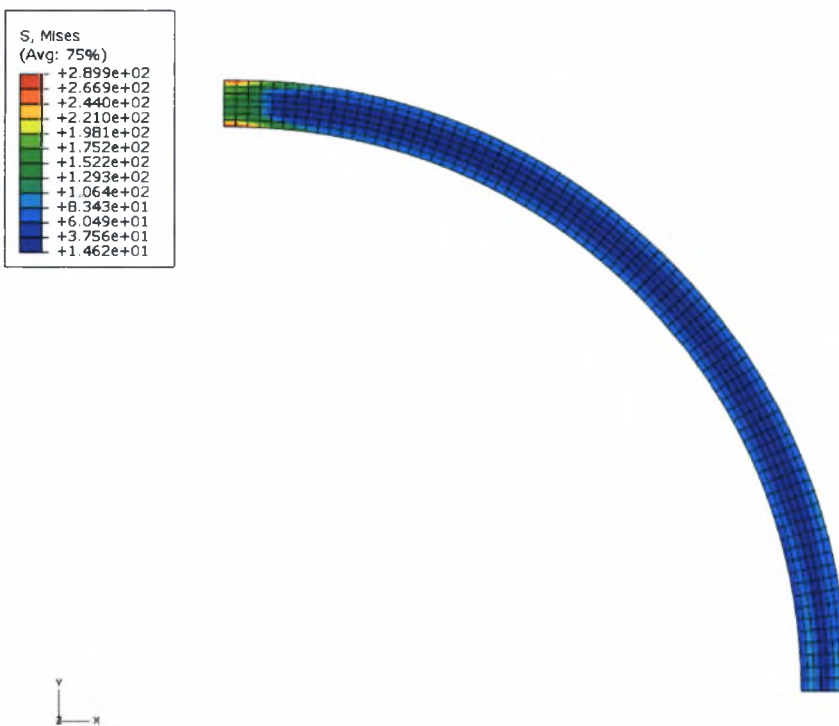


**Σχήμα 2.9 :** Ο δακτύλιος πριν παραμορφωθεί (αρχική κατάσταση αγωγού II).

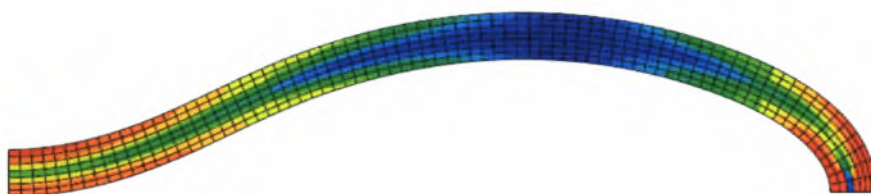
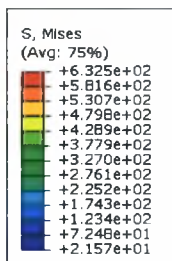




**Σχήμα 2.10 :** Επιβολή αρχικής μετατόπισης και δημιουργία αρχικής στέλειας (αγωγός II).



**Σχήμα 2.11 :** Αποφόρτιση του δακτυλίου (αγωγός II).



**Σχήμα 2.12 :** Άσκηση εξωτερικής πίεσης μέχρι την κατάρρευση του δακτυλίου (αγωγός II).

Με τη βοήθεια του ABAQUS (από το XY Data για ODB history output και LPF) ή από το status file, βλέπουμε πως η πίεση κατάρρευσης ( $P_{max}$ ) είναι 15.1 MPa.

## 2.2 Αριθμητικά αποτελέσματα – επιρροή αρχικών ατελειών

Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς αυτού του αγωγού υπό εξωτερική πίεση, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση που κάναμε προηγουμένως για τις 2 περιπτώσεις αγωγών για διάφορες τιμές αρχικής επιβαλλόμενης μετατόπισης και συγκεκριμένα για  $u = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25$  και 30 mm. Επίσης, χρησιμοποιήσαμε την έννοια της παραμέτρου «οβαλοποίησης» (ovalization) που ορίστηκε προηγουμένως ως εξής :

$$ov = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \approx \frac{D_{max} - D_{min}}{2D}$$

Αν θεωρήσουμε τη μετατόπιση ενός κόμβου πάνω στην πλευρά που κινείται στον x άξονα (κάτω δεξιά) ως  $u_1$  (εφόσον και 1 είναι ο x άξονας) και τη μετατόπιση ενός κόμβου πάνω στην πλευρά που κινείται στον y άξονα (πάνω αριστερά) ως  $u_2$  (2 είναι ο y άξονας), τότε η παράμετρος «οβαλοποίησης» μπορεί να γραφεί στην περίπτωση μας ότι είναι :

$$ov = \frac{|u_1 - u_2|}{D_m}$$

Με τη βοήθεια του ABAQUS υπολογίζουμε τις τιμές πίεσης καθώς και το ovalization με τη βοήθεια των  $u_1$  και  $u_2$  (για τον πάνω αριστερά και κάτω δεξιά κόμβο αντίστοιχα) για κάθε τιμή μετατόπισης.

Στη συνέχεια, ορίζουμε σαν  $ov_0$  το ovalization με το τέλος της αποφόρτισης (αρχική τιμή του ovalization) και  $P_{max}$  τη μέγιστη πίεση (πίεση κατάρρευσης, η πρώτη μέγιστη πίεση στο βήμα της άσκησης της εξωτερικής πίεσης) και με βάση τις τιμές που έχουμε πάρει, φτιάχνουμε τον **πίνακα 2.2** :

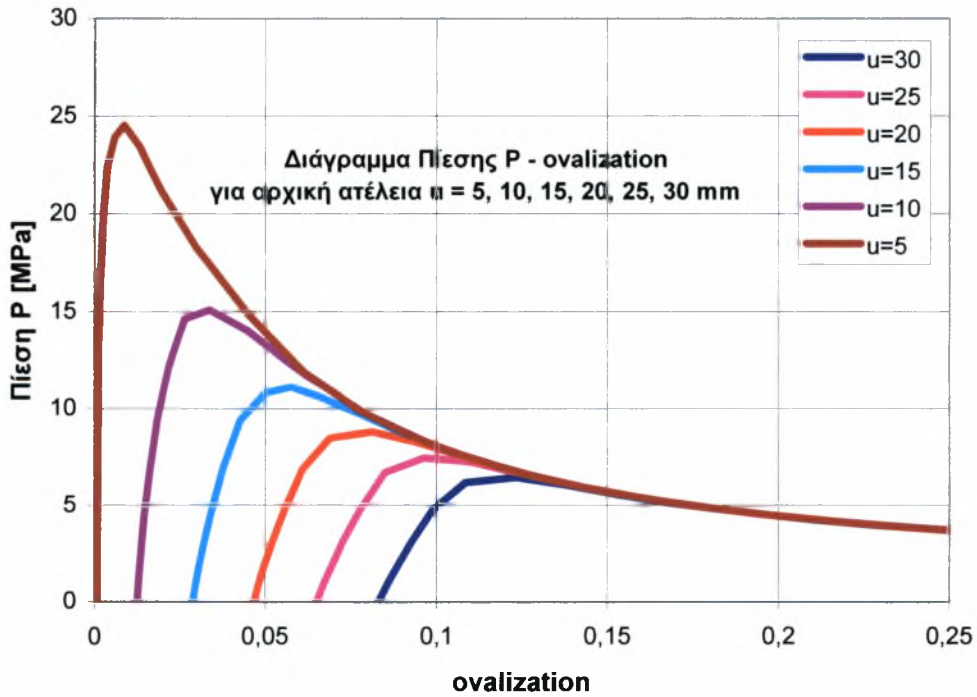
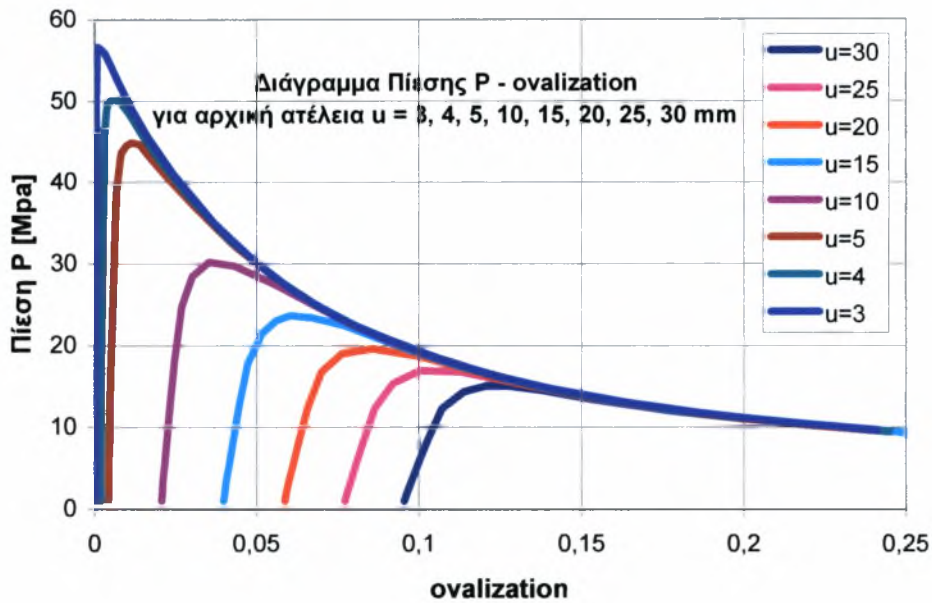
### Πίνακας 2.2

$P_{max}$  και  $ov_0$  για τις διάφορες τιμές μετατοπίσεων

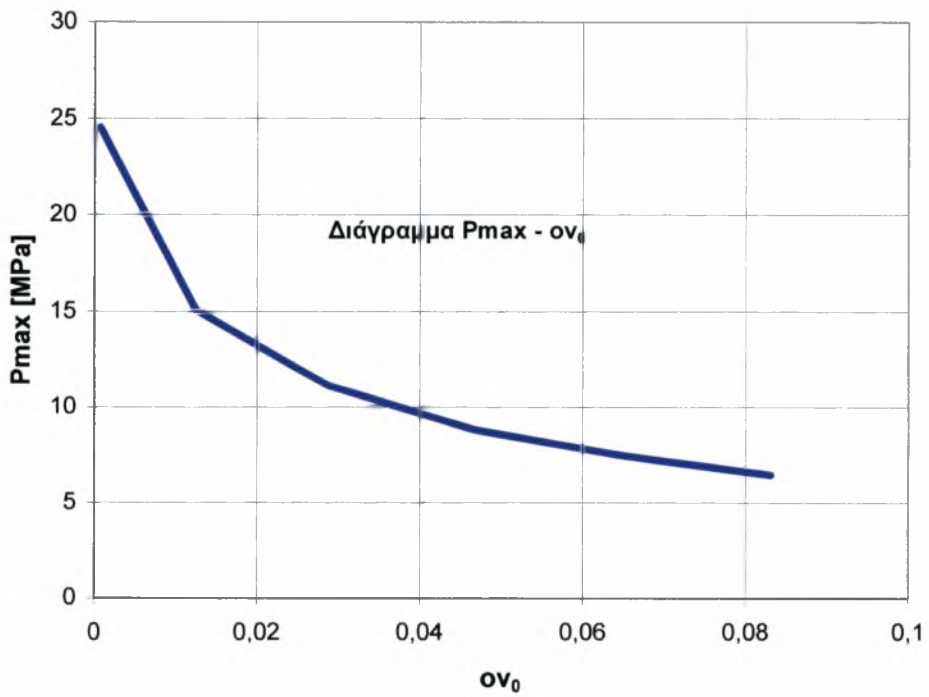
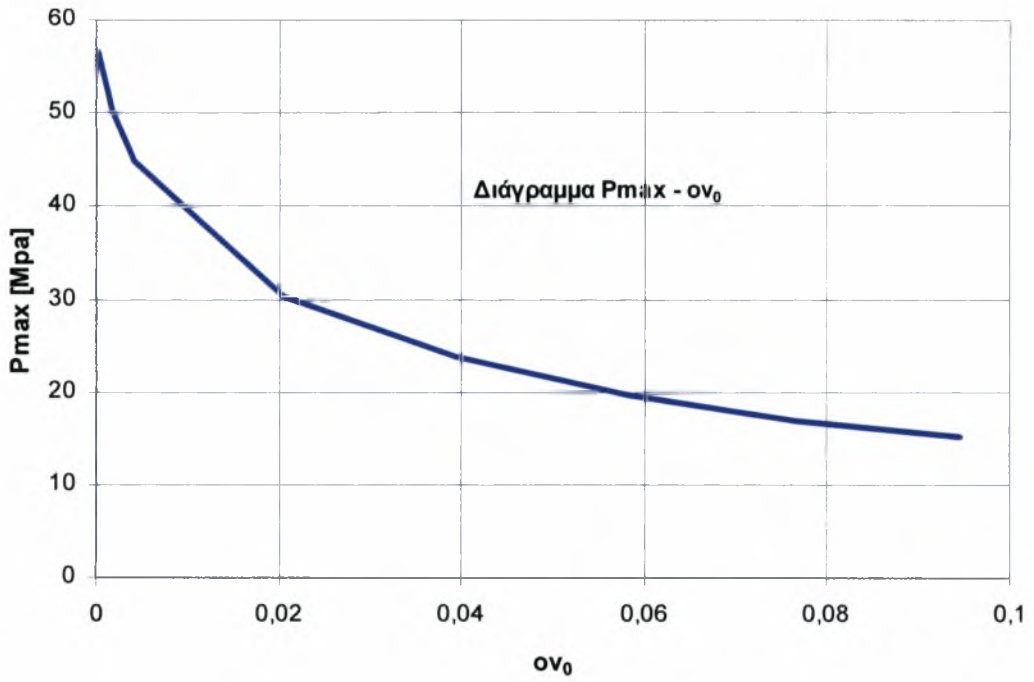
	1 <sup>η</sup> περίπτωση		2 <sup>η</sup> περίπτωση	
	$P_{max}$ [MPa]	$ov_0$	$P_{max}$ [MPa]	$ov_0$
<b>u=30</b>	15,1	$0.945 * 10^{-1}$	6.45	$0.831 * 10^{-1}$
<b>u=25</b>	16,98	$0.764 * 10^{-1}$	7.45	$0.65 * 10^{-1}$
<b>u=20</b>	19,67	$0.58 * 10^{-1}$	8.82	$0.466 * 10^{-1}$
<b>u=15</b>	23,72	$0.393 * 10^{-1}$	11.13	$0.288 * 10^{-1}$
<b>u=10</b>	30,27	$0.204 * 10^{-1}$	15.1	$0.124 * 10^{-1}$
<b>u=5</b>	44,93	$0.416 * 10^{-2}$	24.6	$0.697 * 10^{-3}$
<b>u=4</b>	50,2	$0.173 * 10^{-2}$	43.01	$0.363 * 10^{-4}$
<b>u=3</b>	56,6	$0.301 * 10^{-3}$		

Παρατηρούμε πως για  $u = 0, 1$  και  $2$  mm στην 1<sup>η</sup> περίπτωση και για  $u = 0, 1, 2, 3$  και  $4$  mm στη 2<sup>η</sup> περίπτωση το μέγ  $P_{max}$  είναι πάρα πολύ μεγάλο και το  $ov_0$  είναι πάρα πολύ μικρό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτές τις μετατοπίσεις ο αγωγός δε διαισθάνεται την αρχική ατέλεια μιας και είναι πολύ μικρή και έτσι συμπεριφέρεται ελαστικά και υφίσταται ομοιόμορφη σμίκρυνση. Γι' αυτό το λόγο δεν τις συμπεριλαμβάνουμε στην ανάλυσή μας.

Με βάση τα παραπάνω κατασκευάζουμε τα παρακάτω διαγράμματα που φαίνονται στα **σχήματα 2.13 και 2.14** για τις 2 περιπτώσεις που εξετάσαμε :



**Σχήμα 2.13 :** Διάγραμμα Πίεσης  $P$  - ovalization για τις διάφορες τιμές μετατοπίσεων για τις 2 περιπτώσεις.



Σχήμα 2.14 : Διάγραμμα Μέγιστης Πίεσης  $P_{max}$  -  $\epsilon_0$  για τις διάφορες τιμές μετατοπίσεων.

Όπως είναι αναμενόμενο, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος της αρχικής ατέλειας, τόσο μειώνεται το μέγεθος της μέγιστης πίεσης (κάτι λογικό, εφόσον με μεγαλύτερη ατέλεια ο δακτύλιος οβαλοποιείται περισσότερο, απομακρύνεται από το κυκλικό σχήμα και παίρνει μορφή που μοιάζει με τη μορφή της τελικής αστοχίας).

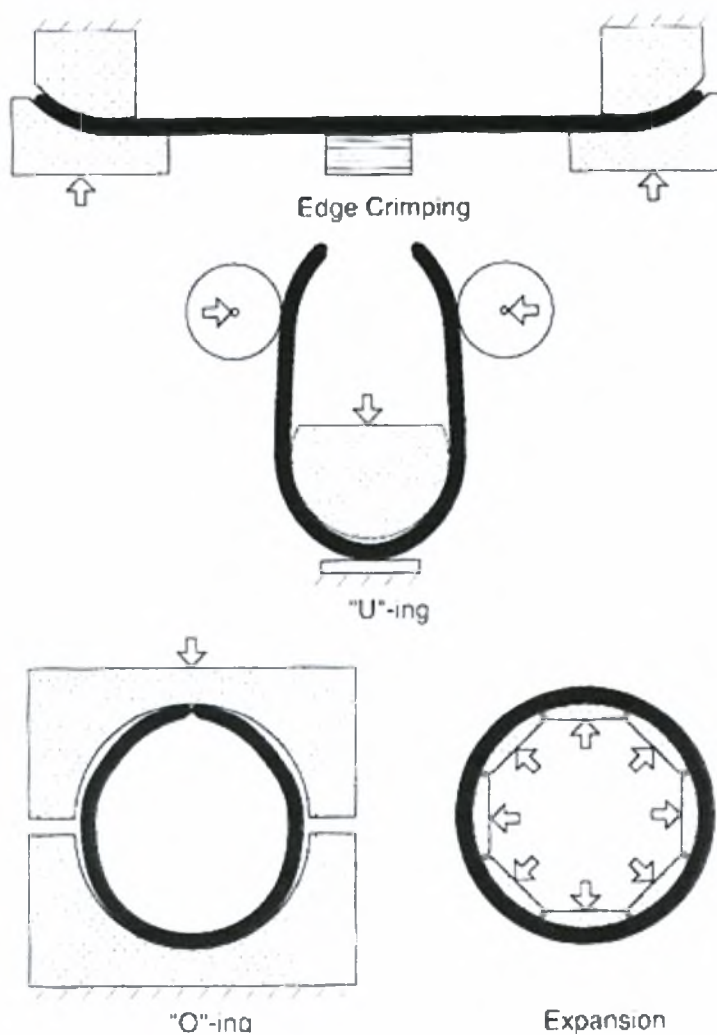
Τέλος, σε σχέση με τις 2 περιπτώσεις που εξετάσαμε, παρατηρούμε πως όσο ο λόγος  $D/t$  αυξάνεται, τόσο μειώνεται η πίεση κατάρρευσης, δηλαδή μειώνεται η αντοχή του αγωγού κάτι το φυσιολογικό βέβαια (με αύξηση του  $D$  ή και μείωση του  $t$  περιμένουμε να μειωθεί η αντοχή).

### 3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ UOE

#### 3.1. Περιγραφή της Κατεργασίας UOE

Οι μεγάλης διαμέτρου σωλήνες που χρησιμοποιούνται σε θαλάσσιες εφαρμογές κατασκευάζονται συνήθως από ελάσματα που έχουν υποστεί διαμόρφωση εν ψυχρώ μέσω της κατεργασίας UOE. Η κατεργασία UOE αποτελεί μια κατεργασία διαμόρφωσης σωλήνων που υλοποιείται σε 4 μηχανικά βήματα : φάση πτύχωσης στα άκρα του σωλήνα, φάση U (U-ing) όπου ο σωλήνας διαμορφώνεται σε μια μορφή U, φάση O (O-ing) όπου ο σωλήνας συμπιέζεται και καταλήγει σε ένα περίπου κυκλικό σχήμα και τα 2 άκρα του συγκολλούνται και τέλος διαστολή (Expansion) που υφίσταται λόγω πίεσης που ασκείται στο εσωτερικό του για βελτίωση της κυκλικότητάς του.

Η κατεργασία UOE έχει πάρει το όνομά της από τα 3 τελευταία από τα 4 παραπάνω μηχανικά βήματα (**U**-ing, **O**-ing, **E**xpansion) και φαίνεται στο **σχήμα 3.1**.



**Σχήμα 3.1** : Η κατεργασία UOE.



Τα 4 αυτά μηχανικά βήματα που πραγματοποιούνται περιγράφονται με λεπτομέρεια παρακάτω και προσομοιάζονται στο μοντέλο που φτιάξαμε στις επόμενες ενότητες.

Η κατεργασία UOE ξεκινά με κόψη των διαμηκών άκρων του ελάσματος με τόννευση προσδίδοντας στο έλασμα το επιθυμητό πλάτος για την κατεργασία. Ταυτόχρονα, τα άκρα λαξεύονται για να διαμορφώσουν αργότερα τα αυλάκια μορφής V στο κυκλικό τμήμα του αγωγού που θα βοηθήσουν στην πραγματοποίηση της συγκόλλησης.

Το πρώτο βήμα διαμόρφωσης περιλαμβάνει την πτύχωση των ακρών του ελάσματος σε κυκλικά τόξα κατά πλάτος περίπου μιας ακτίνας σε κάθε πλευρά. Αυτό επιτυγχάνεται με τη συμπίεση των ακρών του ελάσματος μεταξύ δύο ειδικά διαμορφωμένων καλουπιών, όπως φαίνεται στο **σχήμα 3.2**.



(α)



(β)

**Σχήμα 3.2** : Η φάση πτύχωσης όπως γίνεται στην πραγματικότητα. Το καλούπι που βρίσκεται από κάτω κινείται προς τα πάνω.

Εξαιτίας των μεγάλων δυνάμεων που απαιτούνται, αυτό πραγματοποιείται σε βήματα, στα οποία χρησιμοποιούνται μήκη σωλήνων μιας έως τεσσάρων διαμέτρων σωλήνων ανάλογα με το πάχος τοιχώματος του σωλήνα. Επίσης, είναι διαθέσιμες διάφορες σειρές καλουπιών προκειμένου να προσαρμοστούν στην κατεργασία τα διαφορετικά πάχη και οι διάμετροι σωλήνων που ενδέχεται να έχουμε σε κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα, για ένα δεδομένο σωλήνα επιλέγονται τα καλούπια με τις πιο κατάλληλες εσωτερικές και εξωτερικές ακτίνες ( $\rho_{CRi}$  και  $\rho_{CRO}$ ). Οι σχετικές οριζόντιες θέσεις των καλουπιών μπορούν να ρυθμιστούν για να προσαρμοστούν, σε περίπτωση κακού ταιριάσματος, μεταξύ των ακτινών των καλουπιών και του πάχους του ελάσματος. Το πλάτος του ελάσματος προς πτύχωση, που καθορίζεται από την οριζόντια τοποθέτηση των καλουπιών ( $L_{CR}$ ), μπορεί να επηρεαστεί από το πάχος του ελάσματος και τη χωρητικότητα των φορτίων της κατεργασίας.

Το έλασμα στη συνέχεια προχωρά στη φάση U (U-ing), όπου βρίσκεται αρχικά κεντραρισμένο μεταξύ ενός ζεύγους πλευρικών ραούλων (**σχήμα 3.3α**). Σε πρώτη φάση, το U-runch κινείται προς τα κάτω και κάμπει ολόκληρο το έλασμα μέσω κάμψης τριών σημείων (**σχήμα 3.3β**). Η ακτίνα του U-Punch,  $\rho_U$ , επιλέγεται με τέτοιο τρόπο, ώστε το κατώτερο μισό του ελάσματος να αποκτήσει μια εξωτερική ακτίνα που να πλησιάσει αυτή του τελικού σωλήνα.



Το U-Punch σταματά να κινείται, όταν το έλασμα ακουμπήσει πάνω σε μια σειρά αμονιών που βρίσκονται σε ένα προκαθορισμένο ύψος. Τότε, το U-Punch διατηρείται ακίνητο σε αυτή τη θέση, και τα πλευρικά ράουλα κινούνται προς τα μέσα (**σχήμα 3.3γ**). Η οριζόντια θέση που τοποθετούνται ( $h_r$ ) και η απόσταση που διανύουν ( $\delta_r$ ) επιλέγονται έτσι, ώστε η τελική θέση των ευθέων βραχιόνων του διαμορφωμένου ελάσματος σε σχήμα U (ή αλλιώς "skelp") να είναι σχεδόν κάθετα με το επίπεδο (**σχήμα 3.3δ**)



(α)



(β)



(γ)



(δ)

**Σχήμα 3.3** : Η φάση U όπως γίνεται στην πραγματικότητα : (α) τοποθέτηση, (β) μετατόπιση U-Punch, (γ) κίνηση ραούλων, (δ) αποφόρτιση και μεταβίβαση στην επόμενη φάση.

Το "skelp" μεταβιβάζεται έπειτα στη φάση O (O-ing), η οποία αποτελείται από δύο άκαμπτα καλούπια (ακτίνας  $\rho_o$ ) ημικυκλικής μορφής. Το άνω καλούπι ωθείται προς τα κάτω, αναγκάζοντας το skelp να πάρει μια σχεδόν κυκλική μορφή (**σχήμα 3.4α**). Η διαμόρφωση τελειώνει όταν τα 2 καλούπια έρθουν σε επαφή μεταξύ τους (να συμπέσουν τα κέντρα των ακτίνων καμπυλότητάς τους) (**σχήμα 3.4β**).



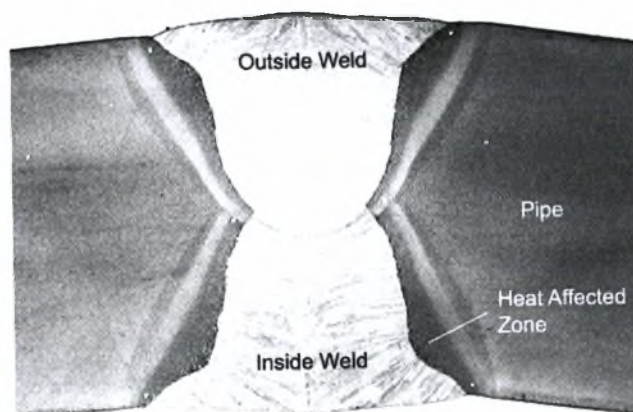
(α)

(β)

(γ)

**Σχήμα 3.4 :** Η φάση Ο όπως γίνεται στην πραγματικότητα : (α) κίνηση πάνω καλουπιού προς τα κάτω, (β) τα καλούπια έρχονται σε επαφή, παύση κίνησης πάνω καλουπιού, (γ) συγκόλληση και αποφόρτιση.

Αφού τελειώσει η φάση Ο, η ραφή του σωλήνα συγκολλάται με συγκόλληση τύπου SAW (Submerged Arc Welding) πρώτα στο εσωτερικό και έπειτα στο εξωτερικό (σχήμα 3.4γ). Έπειτα εκτελείται εκτενής εξέταση με υπέρηχους στη συγκόλληση για τυχόν ελαττώματα προτού να πραγματοποιηθεί διαστολή του σωλήνα.



**Σχήμα 3.5 :** Η συγκόλληση που πραγματοποιείται στο τέλος της φάσης Ο.

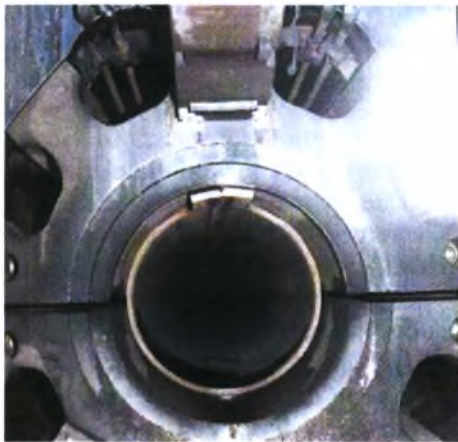
Στο επόμενο βήμα διαμόρφωσης έχουμε τη διαστολή (expansion) η οποία πραγματοποιείται με ένα κώνο διαστολής (mandrel) που τοποθετείται εσωτερικά του σωλήνα. Ο κώνος διαστολής αποτελείται από 8, 10, ή 12 τμήματα. Τα τμήματα επιλέγονται έτσι, ώστε οι ακτίνες τους ( $\rho_E$ ) να πλησιάζουν αυτή του εσωτερικού του σωλήνα. Ο κώνος διαστολής τίθεται σε κίνηση υδραυλικά και κινείται προς τα έξω σε απόσταση μισής έως μιας διαμέτρου (ανάλογα με το πάχος τοιχώματος).



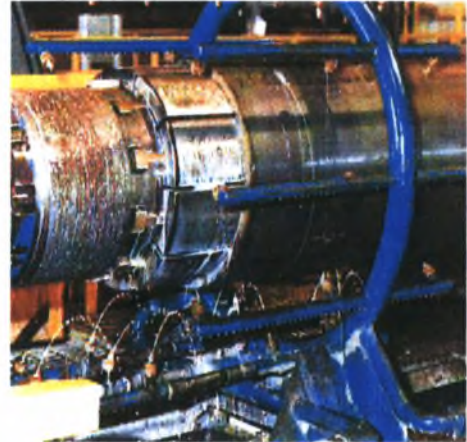
(α)



(β)



(γ)



(δ)

**Σχήμα 3.6 :** Φωτογραφίες (α) της φάσης U, (β) και (γ) της φάσης O και (δ) της διαστολής (Expansion) (Corus Tubes, UK).

Κάθε βήμα διατηρεί κάποια επικάλυψη μεταξύ των επεκτεταμένων και μη επεκτεταμένων τμημάτων του σωλήνα. Η διαστολή βελτιώνει την κυκλικότητα του σωλήνα και τον φέρνει στο επιθυμητό τελικό μέγεθός του. Για να επιτύχουμε χαμηλό ovality, ο σωλήνας επεκτείνεται τυπικά κατά 0.8 - 1.3 % από τη διάμετρό του μετά από το βήμα O.

### 3.2. Προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων

Για να μπορέσουμε να προσομοιάσουμε την κατεργασία διαμόρφωσης σωλήνων UOE με πεπερασμένα στοιχεία, κάναμε κάποιες παραδοχές.

Αρχικά θεωρήσαμε πως όλα τα βήματα γίνονται υπό **συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης** και ότι το μοντέλο μας είναι **διδιάστατο**. Επίσης, θεωρήθηκε ότι έχουμε συμμετρία ως προς τον  $\gamma$  άξονα και άρα μελετήσαμε μόνο το μισό μοντέλο, εφόσον το υπόλοιπο παρουσιάζει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά. Την αρχή των αξόνων (0,0) την τοποθετήσαμε στο κάτω αριστερά σημείο του plate και με βάση αυτό υπολογίσαμε όλες τις διαστάσεις.

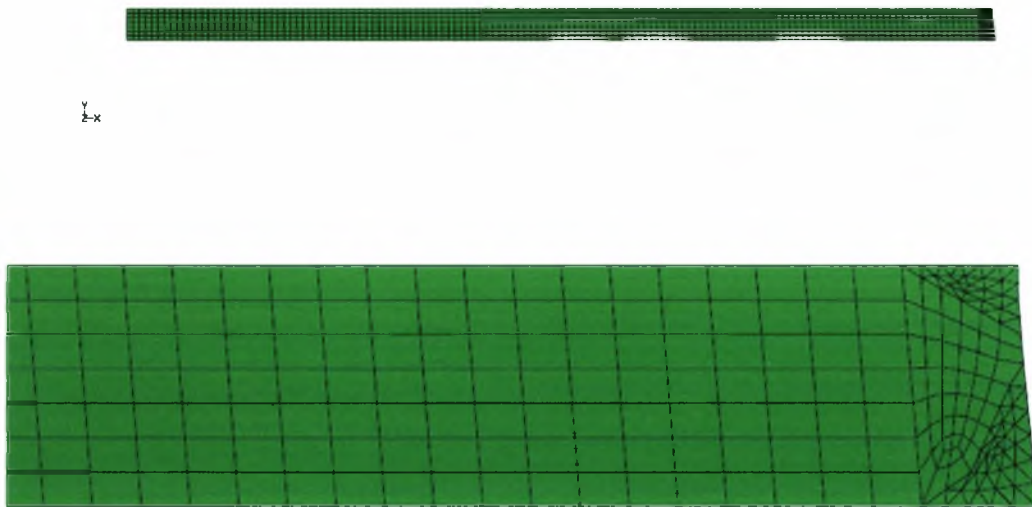


Το συγκεκριμένο πρόβλημα επιλύθηκε με τη βοήθεια του μη γραμμικού κώδικα πεπερασμένων στοιχείων **ABAQUS** χρησιμοποιώντας καμπύλη υλικού με ιστροπική σκλήρυνση (αυτή που χρησιμοποιήσαμε και στον αγωγό του κεφαλαίου 2, **σχήμα 2.2**) (δεν πραγματοποιήθηκε ανάλυση για υλικό με κινηματική σκλήρυνση λόγω εμφάνισης κάποιων προβλημάτων). Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στη διακριτοποίηση του κύριου τμήματος του ελάσματος (πλέγμα – **mesh**) ήταν τύπου **CPE4R**, δηλαδή γραμμικά, τετρακομβικά μειωμένης ολοκλήρωσης, επίπεδης παραμόρφωσης στοιχεία συνέχειας.

Για την προσομοίωση της συγκόλλησης, τοποθετήσαμε από την αρχή της προσομοίωσης το νέο υλικό που δημιουργείται με τη συγκόλληση πάνω στα λαξευμένα άκρα του ελάσματος. Για να μην επηρεάσει την κατεργασία μέχρι και τη φάση 0, θεωρήσαμε στην αρχή ότι το συγκεκριμένο υλικό έχει πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας. Στο βήμα που πραγματοποιείται η συγκόλληση, το υλικό αυτό αντικαταστάθηκε με υλικό όμοιο με αυτό του υπόλοιπου ελάσματος.

Για τη δημιουργία αυτού του καινούριου υλικού χρησιμοποιήσαμε ένα **field variable** μέσα στην εντολή **property** στον ορισμό του ελαστικού μέρους (elastic).

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στο τμήμα της συγκόλλησης ήταν τύπου **CPE3**, δηλαδή γραμμικά, τρικομβικά, επίπεδης παραμόρφωσης στοιχεία συνέχειας.



**Σχήμα 3.7 :** Το έλασμα (plate) με το αντίστοιχο πλέγμα για το μοντέλο για την ανάλυσή μας. Οι συντεταγμένες των σημείων στην άκρη του ελάσματος είναι τέτοιες, ώστε το έλασμα να μη δέχεται μεγάλες τάσεις και πλαστικοποιείται πολύ στο βήμα της συγκόλλησης. Στο τέλος της φάσης 0, το υλικό αυτό της συγκόλλησης μεταβλήθηκε και έγινε ίδιο με το υλικό του κυρίου ελάσματος.

Παρακάτω παρατίθενται οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν στο input file για τον ορισμό και αντικατάσταση του υλικού συγκόλλησης :

```
**  
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=FIELD, VARIABLE=1  
PLATEEL,1.  
**  
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=FIELD, VARIABLE=1  
WELDEL,2.  
**
```

το οποίο το βάζουμε ακριβώς πριν το πρώτο βήμα της ανάλυσης και

```
**  
*FIELD, VARIABLE=1  
WELDEL,1.  
**
```

που το βάζουμε μέσα στο βήμα που πραγματοποιείται η συγκόλληση.

Στις παραπάνω εντολές, PLATEEL είναι το υλικό του ελάσματος και WELDEL το νέο υλικό που δημιουργείται με τη συγκόλληση.

Όλα τα καλούπια διαμόρφωσης προσομοιώθηκαν ως αναλυτικές άκαμπτες (**analytical rigid**) επιφάνειες, ενώ το έλασμα ως παραμορφώσιμο (**deformable**). Η επιφάνεια του ελάσματος ορίζεται ως τέσσερις επιφάνειες που καλύπτουν την περίμετρό της : την πάνω επιφάνεια, την κάτω επιφάνεια, την επιφάνεια με τα αυλάκια μορφής V και την επιφάνεια με τα στοιχεία συγκόλλησης.

Στην εντολή "**Assembly**" θεωρήσαμε στο "Instance Type" για όλα τα σώματα ότι έχουμε "**Independent (mesh on instance)**"

Όσον αφορά στην εντολή "**Interaction**", το ABAQUS καθορίζει την επαφή μεταξύ δύο επιφανειών χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο τύπου "**master-slave**". Οι analytical rigid επιφάνειες αποτελούν την master επιφάνεια σε ένα ζεύγος επαφών. Τα ζεύγη επαφών επιτρέπονται να έχουν "**finite sliding**", ενώ η επαφή θεωρήθηκε ότι ήταν χωρίς τριβή (**frictionless**).

Εξαιρέση αποτελεί ένα ζεύγος επαφών, αυτό μεταξύ της U-Punch και του άκρου του ελάσματος, το οποίο καθορίστηκε χρησιμοποιώντας επαφή "**no-separation**" ("**hard**" **contact**) αντί για frictionless, για να αποφευχθεί η σχετική κίνηση μεταξύ των δύο. Αυτό έγινε για να αποτρέψει το έλασμα να ολισθήσει από το U-Punch καθώς αυτό ωθείται προς τα κάτω. Δηλαδή οι κόμβοι της επιφάνειας "slave" δεν επιτρέπεται να κινηθούν κάθετα προς την επιφάνεια, αλλά μπορούν να ολισθήσουν πάνω στην επιφάνεια.

Υπάρχει ιδιαίτερη μέριμνα επίσης σε κάθε βήμα ποια σώματα είναι «ενεργά» και ποια όχι, δηλαδή ποια χρησιμοποιούνται και υπάρχουν στο συγκεκριμένο βήμα και ποια δεν υπάρχουν επειδή θα χρησιμοποιηθούν σε επόμενο βήμα ή έχουν χρησιμοποιηθεί ήδη και δεν τα χρειαζόμαστε πια. Αυτά που χρησιμοποιούνται και υπάρχουν στο συγκεκριμένο βήμα τα θεωρούμε **active** (είναι το default όταν δημιουργούμε το interaction μεταξύ 2 σωμάτων) και τα υπόλοιπα **inactive**.

Χρησιμοποιήσαμε συνολικά 12 βήματα στην ανάλυσή μας (στην εντολή **"step"**) τα οποία ήταν τα εξής :

### Πτύχωση

1. Μετατόπιση του κάτω καλουπιού προς τα πάνω
2. Αποφόρτιση

### U-ing

3. Μετατόπιση U-Punch
4. Μετατόπιση Roller
5. Αποφόρτιση

### O-ing

6. Μετατόπιση Άνω Ημικυκλικού Καλουπιού – 1
7. Μετατόπιση Άνω Ημικυκλικού Καλουπιού – 2
8. Συγκόλληση + Αποφόρτιση

### Expansion

9. Expansion – 1
10. Expansion – 2
11. Αποφόρτιση

### Εξωτερική Πίεση

12. Εξωτερική πίεση

Στις αποφορτίσεις στα βήματα 5, 8 και 11 (στο 2 δεν είναι ανάγκη), για να αποφύγουμε την κίνηση του ελάσματος προς τα πάνω ή προς τα κάτω λόγω έλλειψης συντοριακών συνθηκών, δεσμεύσαμε έναν κόμβο στο κάτω μέρος του ελάσματος, για να μην μπορεί να φύγει το έλασμα από τη θέση του στο συγκεκριμένο βήμα. Για το λόγο αυτό, τα αμέσως επόμενα βήματα πραγματοποιήθηκαν σε 2 φάσεις (δηλαδή η μετατόπιση του άνω ημικυκλικού καλουπιού και το expansion) : σε 1<sup>η</sup> φάση είχαμε μετακίνηση του καλουπιού μέχρι να έχουμε μια πρώτη επαφή μεταξύ καλουπιού και ελάσματος και σε 2<sup>η</sup> φάση είχαμε άρση της δέσμευσης του κόμβου και συνέχιση της μετατόπισης μέχρι την επιθυμητή τιμή.

Το δεσμευμένο κόμβο δεν τον διατηρήσαμε για πολύ χρόνο, γιατί κάτι τέτοιο οδηγεί σε δημιουργία ανεπιθύμητων τάσεων και παραμορφώσεων στο κάτω μέρος του ελάσματος σε κάποια μετέπειτα βήματα. Σημειωτέον όμως ότι στο τελευταίο βήμα της εξωτερικής πίεσης διατηρήσαμε το δεσμευμένο κόμβο, μιας και αυτό δεν επηρέασε την ανάλυσή μας.

Στα βήματα 1-11 χρησιμοποιήθηκε ανάλυση τύπου **static general**, ενώ στο τελευταίο ανάλυση τύπου **static riks**. Επιπλέον, σε όλα τα βήματα, λόγω ύπαρξης γεωμετρικών μη – γραμμικότητων, ενεργοποιήσαμε την υποεντολή **"nlgeom"**. Η συγκεκριμένη υποεντολή λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της γεωμετρίας, δηλαδή το φορτίο (η εξωτερική πίεση στη συγκεκριμένη περίπτωση) θα είναι σε κάθε στιγμή κάθετο στην επιφάνεια.

Με βάση λοιπόν αυτές τις παραδοχές, προχωρήσαμε στη συνέχεια στην προσομοίωση.

## α. Διαμόρφωση / Δημιουργία του σωλήνα

Η ικανότητα του μοντέλου θα περιγραφεί στη συνέχεια χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα έναν αγωγό 24 in με πάχος τοιχώματος 1.273 in (32.33 mm) και τις μηχανικές ιδιότητες που δόθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο για την προσομοίωση του απλού σωλήνα που δεν έχει υποστεί κατεργασία UOE (**πίνακας 2.1**).

Επίσης, για το υλικό της συγκόλλησης χρησιμοποιήθηκε μέτρο ελαστικότητας  $E = 10000$  MPa και λόγος Poisson  $\nu = 0.3$ .

Επιπλέον, οι παράμετροι διαμόρφωσης της κατεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στον **πίνακα 3.1**.

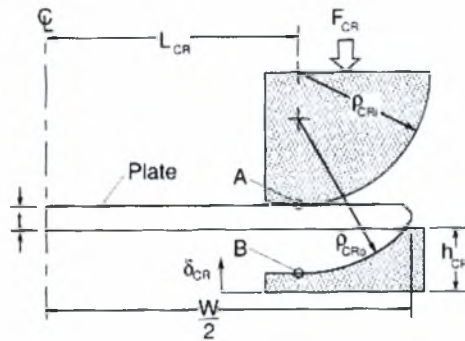
### Πίνακας 3.1

Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση της κατεργασίας UOE.

	Μεταβλητή	Περιγραφή	Τιμή
<b>Έλασμα</b>	$t$	Πάχος του ελάσματος (in - mm)	1.273 (32.33)
	$W$	Πλάτος του ελάσματος (in - mm)	71.00 (1803)
	$X$	Grade του χάλυβα του ελάσματος (ksi - Mpa)	X65 (448.5)
<b>Πτύχωση</b>	$\rho_{CRi}$	Εσωτερική ακτίνα πτύχωσης (in - mm)	10.45 (265.4)
	$\rho_{CRo}$	Εξωτερική ακτίνα πτύχωσης (in - mm)	11.75 (298.5)
	$\delta_{CR}$	Τελικά απόσταση των 2 καλουπιών (in - mm)	0.02 (0.5)
	$L_{CR}$	Οριζόντια απόσταση των καλουπιών (in - mm)	26.64 (676.7)
	$h_{CR}$	Ύψος του εξωτ. καλουπιού πτύχωσης (in - mm)	5.906 (150)
<b>U-ing</b>	$\rho_U$	Ακτίνα του U-Punch (in - mm)	9.70 (246.4)
	$\delta_U$	Απόσταση που διανύει το U-Punch (in - mm)	28.5 (724)
	$\delta_r$	Απόσταση που διανύει το Roller (in - mm)	4.00 (102)
	$h_r$	Οριζόντια θέση του Roller (in - mm)	18.0 (457)
	$\nu_r$	Κάθετη θέση του Anvil (in - mm)	28.5 (724)
<b>O-ing</b>	$\rho_O$	Ακτίνα των ημικυκλικών καλουπιών (in - mm)	11.959 (303.8)
	$\delta_O$	Επικάλυψη των κέντρων των καλουπιών (in - mm)	0.00
<b>Expansion</b>	$\rho_E$	Ακτίνα των τμημάτων για τη διαστολή (in - mm)	10.236 (260)
	$\delta_E$	Ακτινική διαστολή των τμημάτων (in - mm)	0.433 (11)
	$N_E$	Αριθμός των τμημάτων για τη διαστολή	8

Τα τμήματα τοποθετήθηκαν έτσι, ώστε το κέντρο ακτινών τους να είναι στο μέσο της απόστασης μεταξύ των 2 άκρων του ελάσματος στο τέλος του βήματος  $O$  και η ακτίνα τους να είναι μικρότερη από αυτή του ήδη διαμορφωμένου σωλήνα σε κάθε σημείο, για να μπορούν να χωρέσουν στο εσωτερικό του.

### 3.2.1. Φάση Πτύχωσης

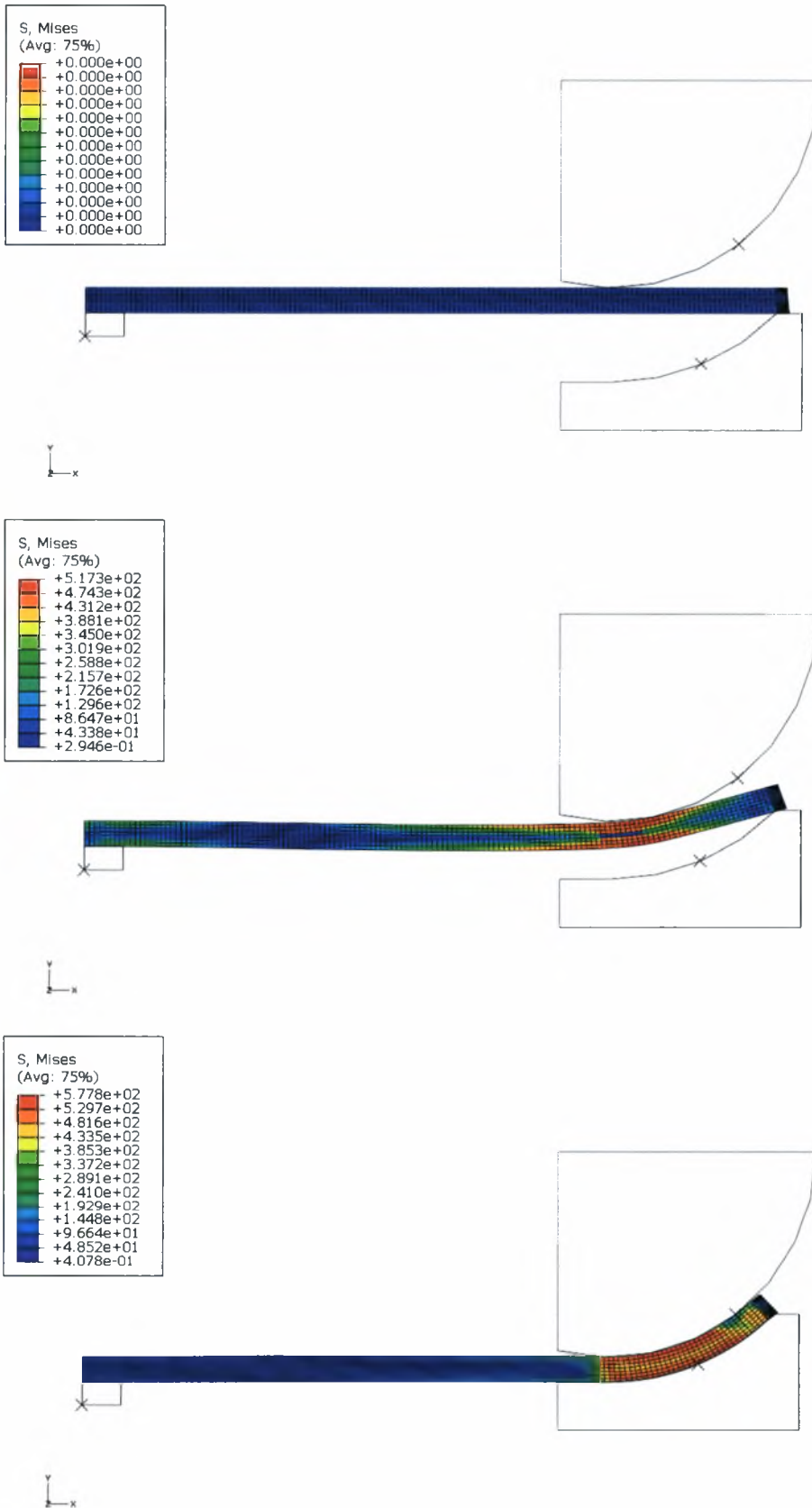


**Σχήμα 3.8:** Φάση Πτύχωσης

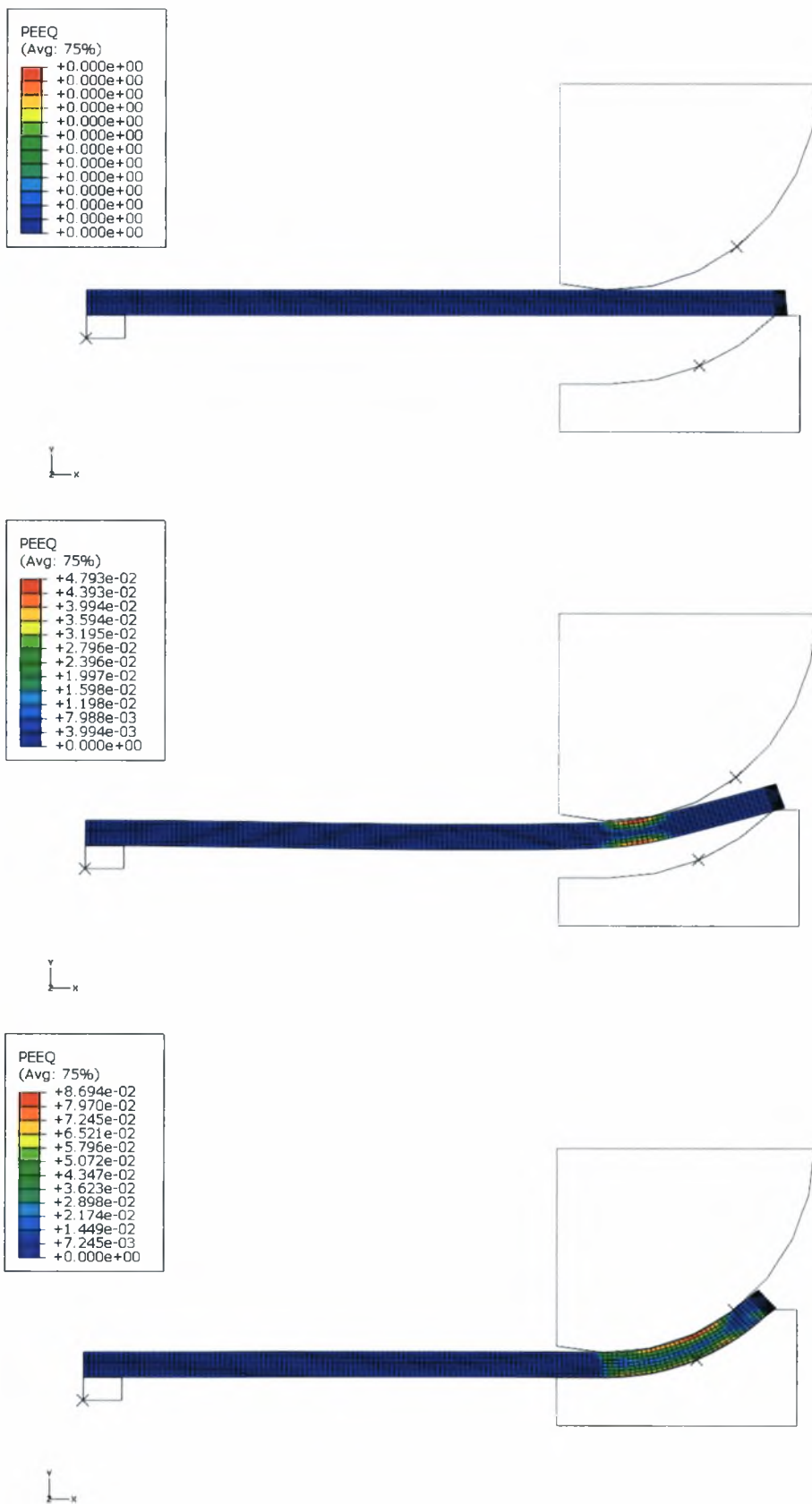
Τα 2 καλούπια που χρησιμοποιούνται για την πτύχωση του ελάσματος προσομοιώνονται ως κυκλικά τόξα με εσωτερικές και εξωτερικές ακτίνες  $\rho_{CRi}$  και  $\rho_{CRo}$ , αντίστοιχα. Η πτύχωση επιτυγχάνεται με το να κινήσουμε το κάτω καλούπι προς τα πάνω (μετατόπιση  $\delta_{CR}$ ), ενώ το πάνω παραμένει ακίνητο.

Το κάτω καλούπι μετατοπίζεται έως ότου τα σημεία A και B στο **σχήμα 3.8** να είναι σε μια απόσταση  $(t + 0.02)$  in ή  $(t + 0.5)$  mm, όπως απεικονίζεται στην ακολουθία διαμορφώσεων που έγιναν με τη βοήθεια του ABAQUS στα **σχήματα 3.9 και 3.10**. Το προστιθέμενο κενό των 0,020 in (0,5 mm) εξασφαλίζει ότι οι δυνάμεις αντίδρασης δε θα γίνουν υπερβολικές. Στο τέλος, τα καλούπια κινούνται μακριά το ένα από το άλλο και το έλασμα παρουσιάζει μικρή αποφόρτιση λόγω ελαστικής επαναφοράς.



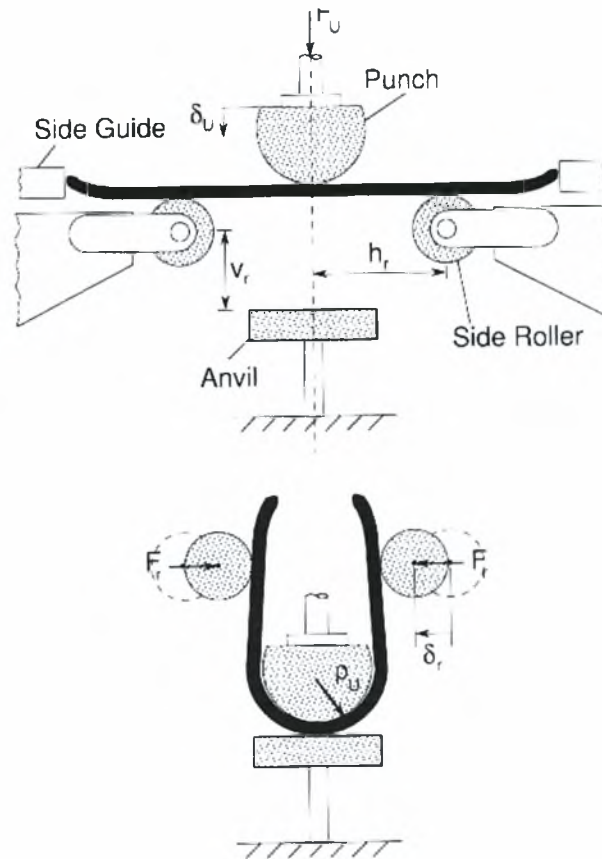


**Σχήμα 3.9 :** Τρεις διαμορφώσεις κατά τη διάρκεια της φάσης πτύχωσης, όπως φαίνεται στο ABAQUS (με τα διαφορετικά χρώματα απεικονίζεται η τάση von Mises).



**Σχήμα 3.10 :** Τρεις διαμορφώσεις κατά τη διάρκεια της φάσης πύκωσης, όπως φαίνεται στο ABAQUS (με τα διαφορετικά χρώματα απεικονίζεται η ισοδύναμη παραμόρφωση PEEQ).

### 3.2.2. Φάση U (U-ing)

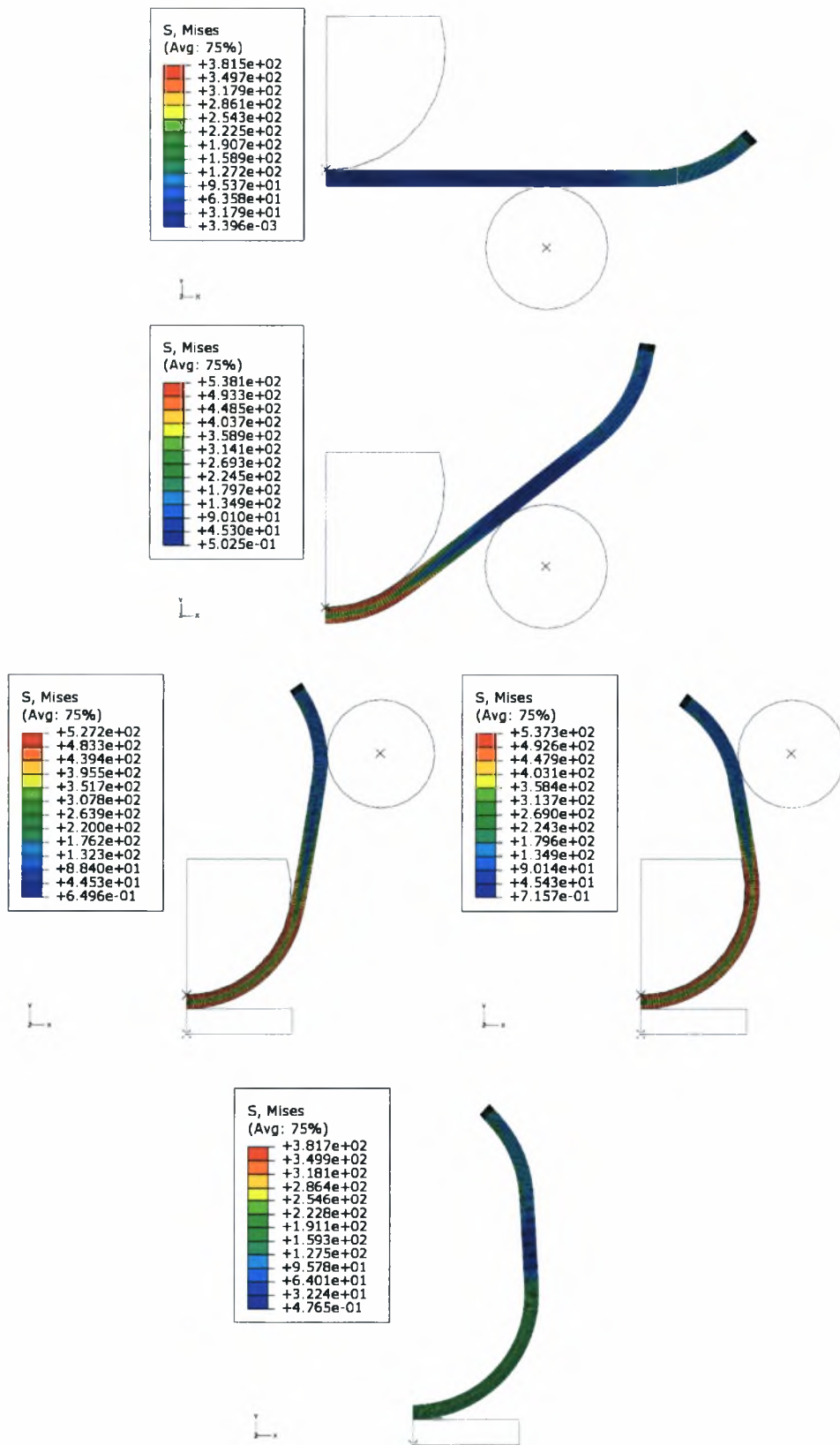


Σχήμα 3.11 : Φάση U

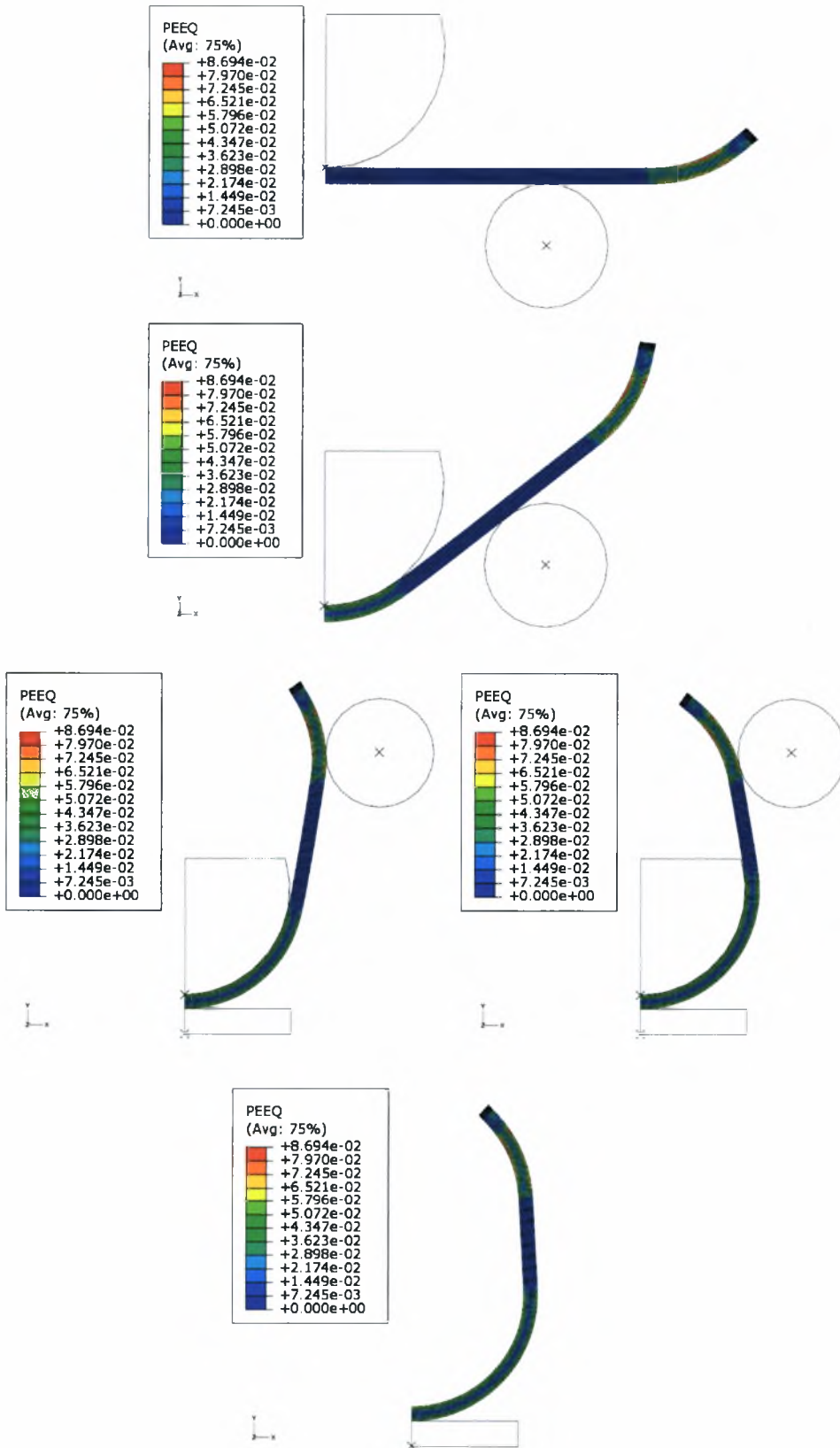
Μια σχηματική αναπαράσταση της φάσης U παρουσιάζεται στο **σχήμα 3.11** και μια σειρά διαμορφώσεων της διαδικασίας στο ABAQUS απεικονίζεται στα **σχήματα 3.12 και 3.13**. Η αναλυτική άκαμπτη (analytical rigid) επιφάνεια του ραούλου μοντελοποιείται ως ένα κυκλικό τμήμα με ακτίνα 5.0 in (127 mm), που το κέντρο του βρίσκεται σε απόσταση  $h_r$  από το κέντρο του ελάσματος (τον άξονα συμμετρίας). Το U-runch μοντελοποιείται ως ένα κυκλικό τόξο με ακτίνα  $\rho_U$ .

Το αμόνι (anvil), που στηρίζει τον αγωγό μόλις διαμορφωθεί, παρουσιάζεται ως μια analytical rigid επιφάνεια τοποθετημένη σε απόσταση  $v_r$  κάτω από το κέντρο των ραούλων. Χρησιμοποιείται επαφή τύπου "frictionless" για τα ράουλα, ενώ για το U-runch χρησιμοποιείται επαφή τύπου "no separation" προκειμένου να αποτραπεί η ολίσθηση του ελάσματος από την U-runch προτού να έρθει το έλασμα σε επαφή με το αμόνι.

Σε πρώτη φάση, το U-runch κινείται προς τα κάτω κατά  $\delta_U$  έως ότου να έρθει το έλασμα σε επαφή με το αμόνι. Η δύναμη του U-runch είναι σχετικά χαμηλή σε αυτό το βήμα. Έπειτα τα ράουλα κινούνται προς το εσωτερικό κατά απόσταση  $\delta_r$  κάμπτοντας τους "βραχίονες" του ελάσματος συνήθως σχεδόν κατακόρυφα. Τα ράουλα έπειτα αποσύρονται και το έλασμα επανέρχεται πίσω στην τελική U-μορφή του, με τους "βραχίονες" να είναι σχεδόν κάθετα με το επίπεδο.

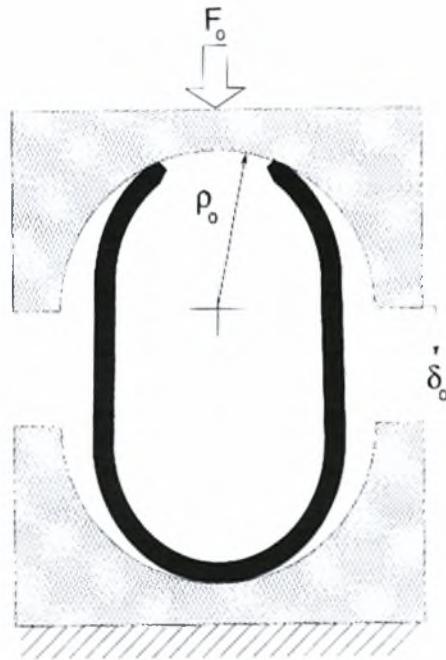


**Σχήμα 3.12 :** Ακολουθία διαμορφώσεων κατά τη διάρκεια της φάσης U, όπως φαίνεται στο ABAQUS (με τα διαφορετικά χρώματα απεικονίζεται η τάση von Mises).



**Σχήμα 3.13 :** Ακολουθία διαμορφώσεων κατά τη διάρκεια της φάσης U, όπως φαίνεται στο ABAQUS (με τα διαφορετικά χρώματα απεικονίζεται η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση PEEQ).

### 3.2.3. Φάση O (O-ing)



Σχήμα 3.14 : Φάση O

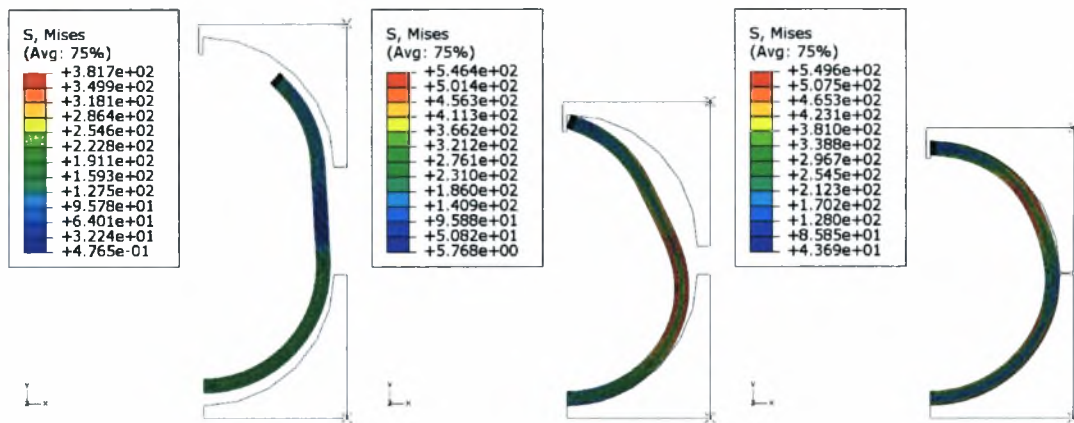
Η φάση O παρουσιάζεται σχηματικά στο **σχήμα 3.14** και τρεις διαμορφώσεις της διαδικασίας στο ABAQUS φαίνονται στα **σχήματα 3.15 και 3.16**. Τα δύο καλούπια μοντελοποιούνται ως κυκλικά τόξα  $90^\circ$  ακτίνας  $\rho_0$ . Το άνω καλούπι έχει ένα κάθετο τμήμα στην κορυφή του που αποτρέπει το έλασμα από το να διαπεράσει τη γραμμή συμμετρίας.

Το άνω καλούπι κινείται προς τα κάτω εξαναγκάζοντας το skelp να προσαρμοστεί σταδιακά στην κυκλική μορφή.

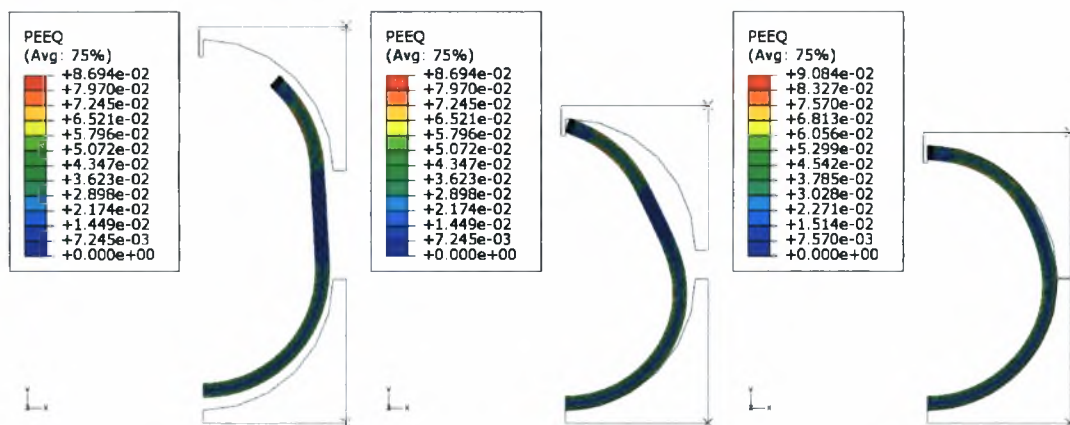
Αυτό το βήμα έχει υψηλή μη γραμμικότητα λόγω του ελάσματος που έρχεται σε επαφή και απομακρύνεται από την εσωτερική επιφάνεια του πάνω καλουπιού καθώς κάμπτεται και λόγω της εκτεταμένης επαφής ολίσθησης ανάμεσα στην άκρη του ελάσματος και στο άνω καλούπι.

Η συμπίεση ολοκληρώνεται, όταν πλησιάσουν όσο γίνεται περισσότερο τα κέντρα των δύο μισών καλουπιών (λόγω του επιπρόσθετου υλικού που βάλαμε για τη συγκόλληση, το άνω καλούπι δεν μπορεί να κατέβει ακριβώς τόσο ώστε να συμπέσουν τα κέντρα των 2 καλουπιών και τελικά η απόσταση που διανύει είναι κάποια χιλιοστά μικρότερη). Επειδή σε αυτό το βήμα διαμορφώνεται αμέσως ολόκληρο το μήκος του αγωγού, η δύναμη που απαιτείται είναι πράγματι πολύ σημαντική.





**Σχήμα 3.15 :** Ακολουθία διαμορφώσεων κατά τη διάρκεια της φάσης O, όπως φαίνεται στο ABAQUS (με τα διαφορετικά χρώματα απεικονίζεται η τάση von Mises).

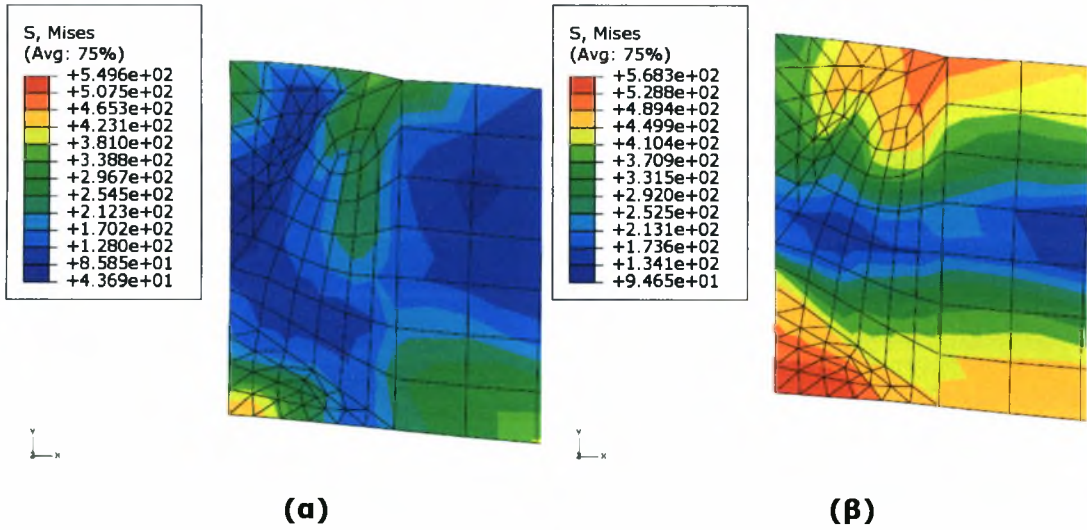


**Σχήμα 3.16 :** Ακολουθία διαμορφώσεων κατά τη διάρκεια της φάσης O, όπως φαίνεται στο ABAQUS (με τα διαφορετικά χρώματα απεικονίζεται η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση PEEQ).

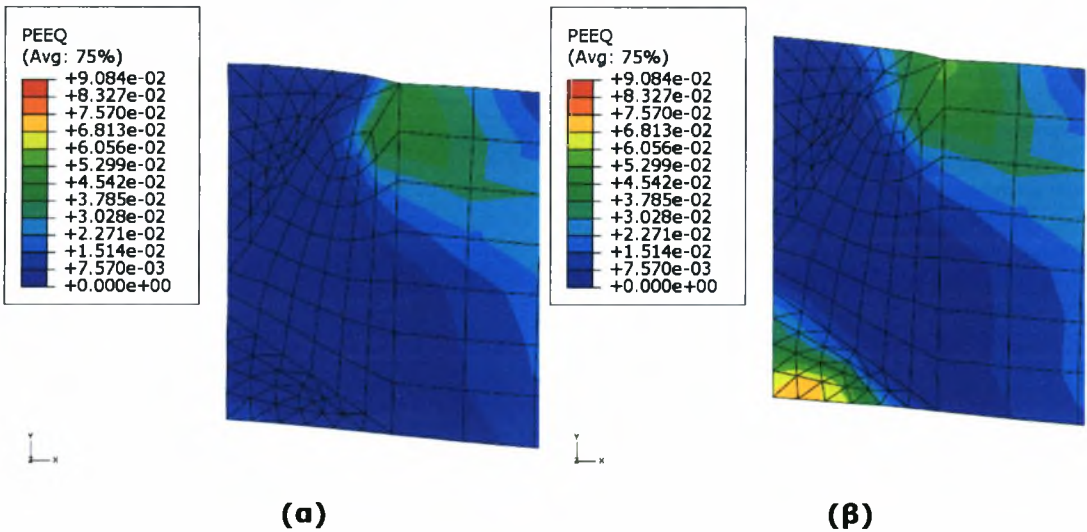
### 3.2.4. Συγκόλληση

Στην πράξη, μετά από τη φάση O, ο σωλήνας συγκολλάται με συγκόλληση τύπου SAW (Submerged Arc Welding). Αυτό είναι ένα σημαντικό βήμα στο οποίο δίνεται ιδιαίτερη προσοχή και συμπεριλαμβάνονται και χειροκίνητοι έλεγχοι, έλεγχοι με υπερήχους και ραδιογραφία που πραγματοποιούνται σε ολόκληρο το μήκος της ραφής.

Στην προσομοίωση, η συγκόλληση μοντελοποιείται με τη μεταβολή του υλικού που έχουμε θεωρήσει στα τρικομβικά στοιχεία από την αρχή με υλικό όμοιο με αυτό του υπόλοιπου ελάσματος. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το έλασμα είναι δεσμευμένο στο κάτω μέρος του. Επίσης, μιας και με αυτό τον τρόπο δεν ακουμπούν απόλυτα όλα τα σημεία του πάνω άκρου του ελάσματος στο καλούπι, μεταφέρουμε χειροκίνητα τους κόμβους αυτούς πάνω στον γ άξονα (μέσω του input file). Αυτό δεν επηρεάζει την ανάλυσή μας μιας και αυτή η μεταφορά είναι πολύ μικρή, της τάξης του χιλιοστού (**σχήματα 3.17 και 3.18**).



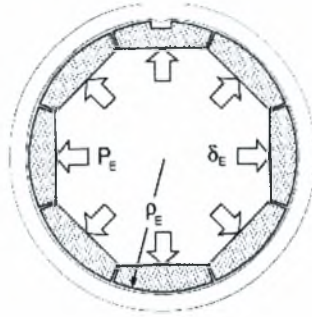
**Σχήμα 3.17 :** Η πάνω άκρη του ελάσματος **(α)** πριν τη συγκόλληση και **(β)** μετά τη συγκόλληση, όπως φαίνεται στο ABAQUS (με τα διαφορετικά χρώματα απεικονίζεται η τάση von Mises).



**Σχήμα 3.18 :** Η πάνω άκρη του ελάσματος **(α)** πριν τη συγκόλληση και **(β)** μετά τη συγκόλληση, όπως φαίνεται στο ABAQUS (με τα διαφορετικά χρώματα απεικονίζεται η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση PEEQ).



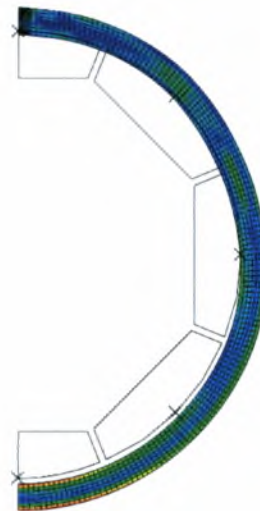
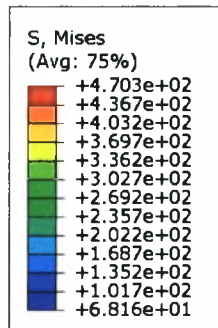
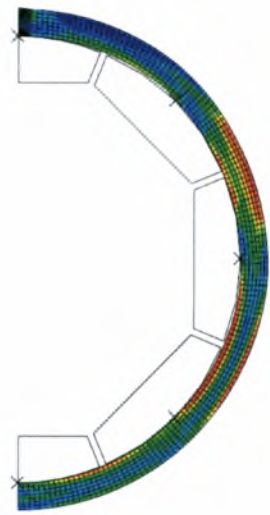
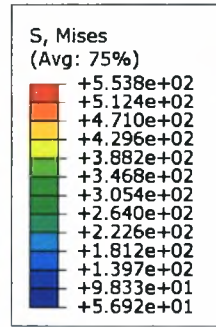
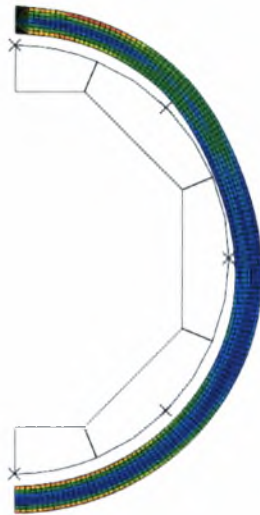
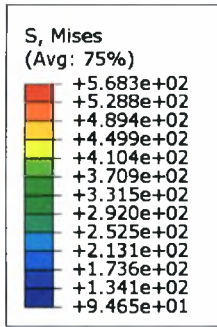
### 3.2.5. Διαστολή (Expansion)



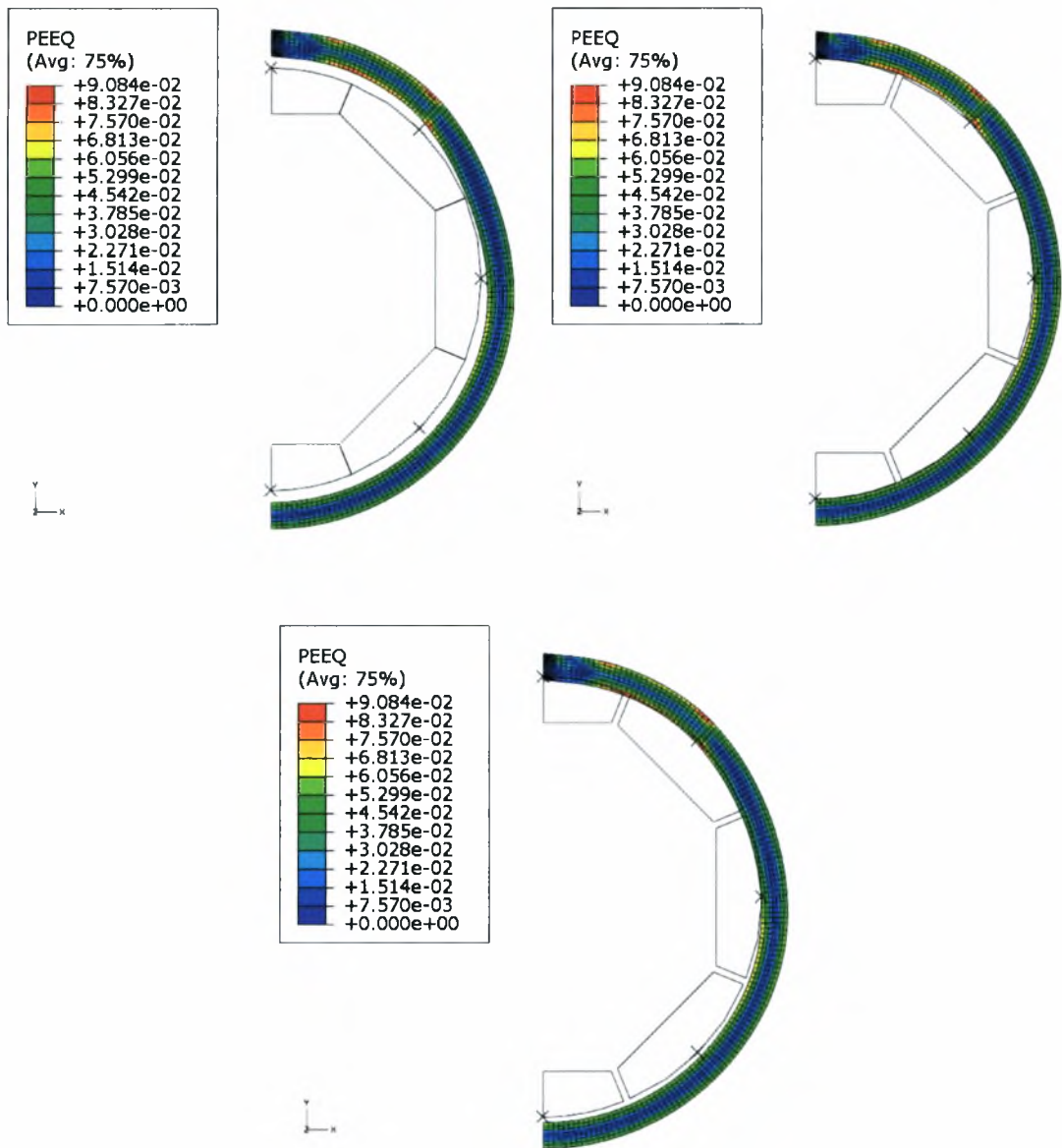
**Σχήμα 3.19 :** Διαστολή (Expansion)

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη διαστολή έχει 8 τμήματα ακτίνας  $r_E$ , όπως φαίνεται στο **σχήμα 3.19**. Τα σημεία αναφοράς σωμάτων των τμημάτων τοποθετούνται στα κέντρα των τόξων. Το κάθε τμήμα επιλέγεται να έχει τέτοια ακτίνα έτσι, ώστε να χωράνε όλα μέσα στον αγωγό.

Η διαστολή ολοκληρώνεται με το να κινήσουμε τα σημεία αναφοράς ακτινικά προς τα έξω κατά μία απόσταση  $\delta_E$ . Στα **σχήματα 3.20 και 3.21** απεικονίζονται 3 διαμορφώσεις του expansion για συνολική διαστολή ίση με 11 mm όπως φαίνεται στο ABAQUS. Στο επόμενο κεφάλαιο θα μελετηθεί η συμπεριφορά του δακτυλίου για διαφορετικές τιμές συνολικής διαστολής.



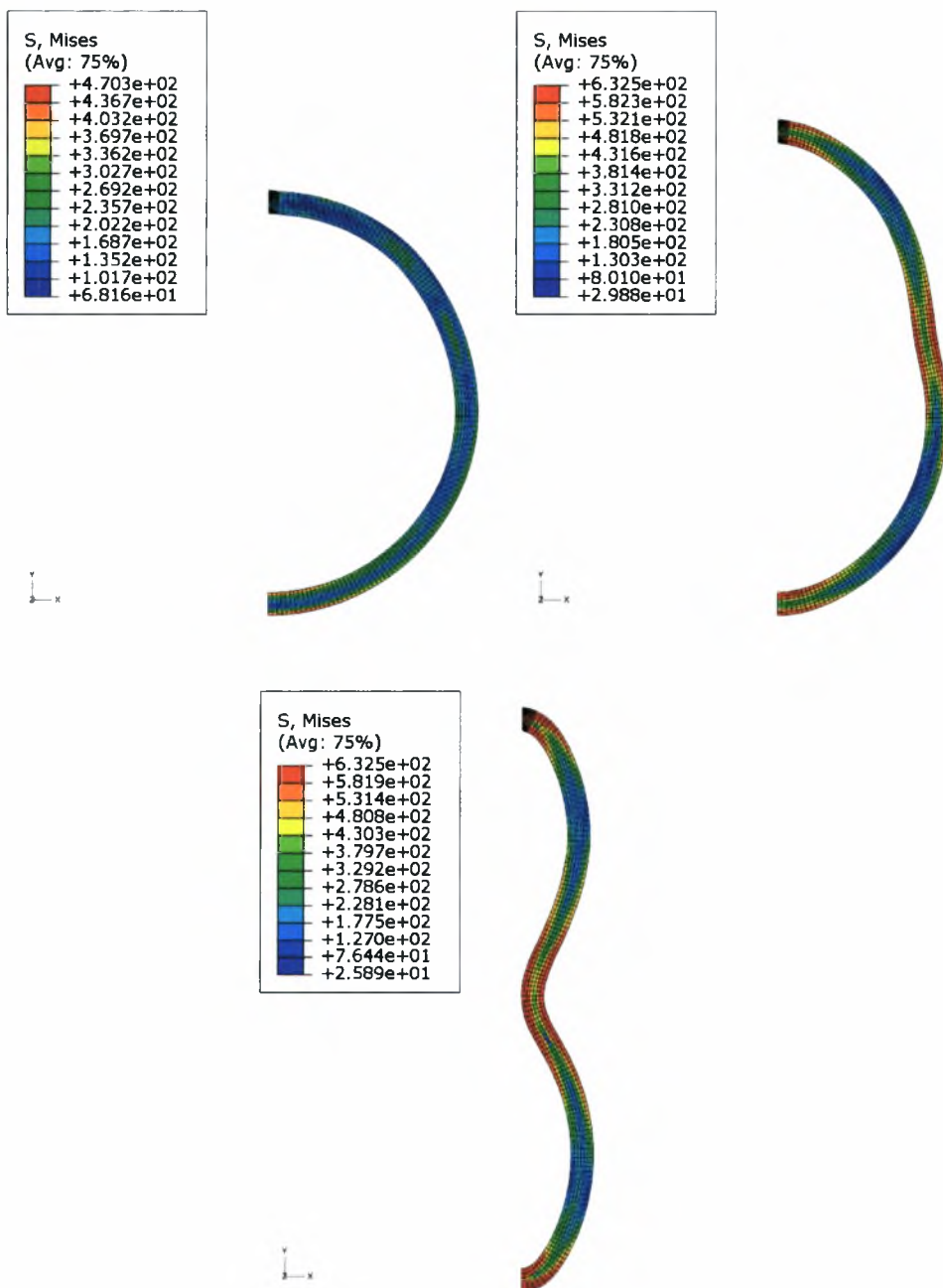
**Σχήμα 3.20** : Τρεις διαμορφώσεις κατά τη διάρκεια του Expansion, όπως φαίνεται στο ABAQUS για συνολική διαστολή ίση με 11 mm (με τα διαφορετικά χρώματα απεικονίζεται η τάση von Mises).



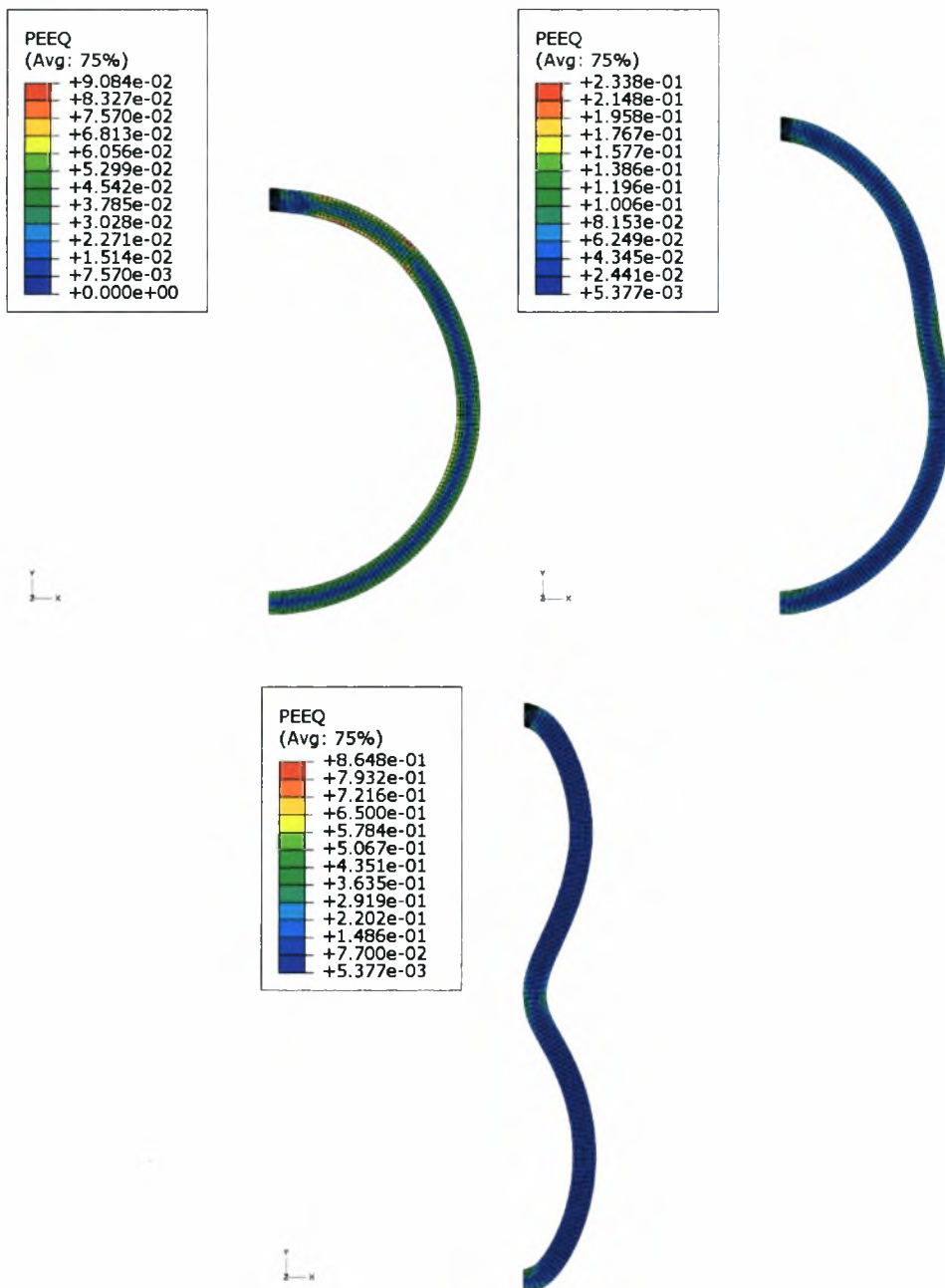
**Σχήμα 3.21 :** Τρεις διαμορφώσεις κατά τη διάρκεια του Expansion, όπως φαίνεται στο ABAQUS για συνολική διαστολή ίση με 11 mm (με τα διαφορετικά χρώματα απεικονίζεται η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση PEEQ).

## β. Άσκηση εξωτερικής πίεσης στο διαμορφωμένο σωλήνα

Αφού τελειώσει η διαστολή και γίνει η αποφόρτιση, ασκούμε στον αγωγό εξωτερική πίεση μέχρι την κατάρρευσή του. Κατ' αυτόν τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε την πίεση κατάρρευσης που είναι το πρώτο μέγιστο που παίρνει η πίεση σε αυτό το βήμα. Είναι λογικό πως η πίεση κατάρρευσης εξαρτάται από την κυκλικότητα που έχει ο αγωγός με το τέλος του προηγούμενου βήματος και από τις μηχανικές ιδιότητες του αγωγού. Για την περίπτωση μας της συνολικής διαστολής των 11 mm, με την άσκηση εξωτερικής πίεσης έχουμε τις παρακάτω διαμορφώσεις των **σχημάτων 3.22 και 3.23** με τη βοήθεια του ABAQUS :



**Σχήμα 3.22 :** Τρεις διαμορφώσεις κατά τη διάρκεια της άσκησης της εξωτερικής πίεσης, όπως φαίνεται στο ABAQUS για συνολική διαστολή ίση με 11 mm (με τα διαφορετικά χρώματα απεικονίζεται η τάση von Mises).



**Σχήμα 3.23** : Τρεις διαμορφώσεις κατά τη διάρκεια της άσκησης της εξωτερικής πίεσης, όπως φαίνεται στο ABAQUS για συνολική διαστολή ίση με 11 mm (με τα διαφορετικά χρώματα απεικονίζεται η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση PEEQ).

Η μορφή του δακτυλίου που παρατηρούμε στο **σχήμα 3.22** αφού έχει επέλθει η κατάρρευση έρχεται σε συμφωνία με τη βασική θεωρία που αναλύσαμε στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο η οποία προβλέπει 4 πλαστικές αρθρώσεις. Όπως παρατηρούμε δηλαδή, έχουμε θέσεις δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων στα 4 σημεία για γωνία

$$\theta = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}, \text{ όπου } 0 \leq \theta < 2\pi .$$

Επίσης, θα μπορούσε ο δακτύλιος να κατέρρευσε σε οριζόντια μορφή και όχι όπως στην περίπτωση μας κάτι το οποίο εξαρτάται από το πώς έχουν γίνει τα προηγούμενα βήματα για τη διαμόρφωσή του.

Τέλος, με τη βοήθεια του ABAQUS (από το XY Data για ODB history output και LPF) ή από το status file, βλέπουμε πως η πίεση κατάρρευσης ( $P_{max}$ ) είναι 35.92 MPa για συνολική διαστολή ίση με 11 mm.

### 3.3. Αριθμητικά αποτελέσματα – διαστάσεις, παραμένουσες τάσεις, αρχικές ατέλειες

Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε καλύτερα τη συμπεριφορά του δακτυλίου σε εξωτερική πίεση, εκτελούμε το πρόγραμμα για το συγκεκριμένο μοντέλο που έχουμε φτιάξει για διάφορες τιμές συνολικής διαστολής. Αυτές οι τιμές θα πρέπει να εκτείνονται ανάμεσα στην τιμή  $u_{Expansion} = 8.2$  mm που θεωρούμε ότι είναι η τιμή που έχουμε πλέον ικανοποιητική επαφή μεταξύ των τμημάτων διαστολής και του σωλήνα (το παρατηρούμε στην προσομοίωση) και την τιμή  $u_{Expansion} = 15$  το πολύ γιατί αν πάμε παραπάνω δεν έχει κάποιο νόημα, τα αποτελέσματα που παίρνουμε δεν ανταποκρίνονται τόσο στην πραγματικότητα. Επομένως επιλέγουμε να πάρουμε τις τιμές συνολικής διαστολής  $u_{Expansion} = 8.3, 9, 10, 10.5, 11, 11.5, 12, 12.5, 13, 13.5, 14, 14.5$  και 15 mm.

#### α. Αριθμητικά αποτελέσματα – διαστάσεις

Ορίζουμε κάποιες παραμέτρους που θα μας βοηθήσουν να σχεδιάσουμε κάποια διαγράμματα για την κατανόηση στη διαφορά που έχουμε στο πάχος και στις διαστάσεις για τις διάφορες τιμές μετατοπίσεων που αναφέραμε πιο πάνω:

$$\delta_E = \Delta - \Delta_o,$$

όπου  $\Delta_o$  είναι το 8.2 mm που αναφέραμε παραπάνω και  $\Delta$  είναι το συνολικό expansion που τελικά παίρνουμε.

Με βάση αυτά, οι παραπάνω τιμές συνολικής διαστολής γίνονται :

#### Πίνακας 3.2

Τιμές  $\delta_E$  για τις διάφορες τιμές συνολικής διαστολής.

$u_{Expansion}$ [mm]	$\delta_E = \Delta - \Delta_o$ [mm]
8.3	0,1
9	0,8
10	1,8
10.5	2,3
11	2,8
11.5	3,3
12	3,8
12.5	4,3
13	4,8
13.5	5,3
14	5,8
14.5	6,3
15	6,8

$$ov_0 = \frac{|D_1 - D_2|}{D_1 + D_2}, \text{ όπου :}$$

$D_1$  = η εξωτερική οριζόντια διάμετρος του αγωγού με το τέλος της φάσης Ο, ακριβώς μετά την αποφόρτιση

$D_2$  = η εξωτερική κάθετη διάμετρος του αγωγού με το τέλος της φάσης Ο, ακριβώς μετά την αποφόρτιση

Οι 2 αυτές διαμέτροι είναι διαφορετικές, εφόσον ο αγωγός δεν είναι απόλυτα κυκλικός (έχει ένα οιονεί ελλειπτικό σχήμα).

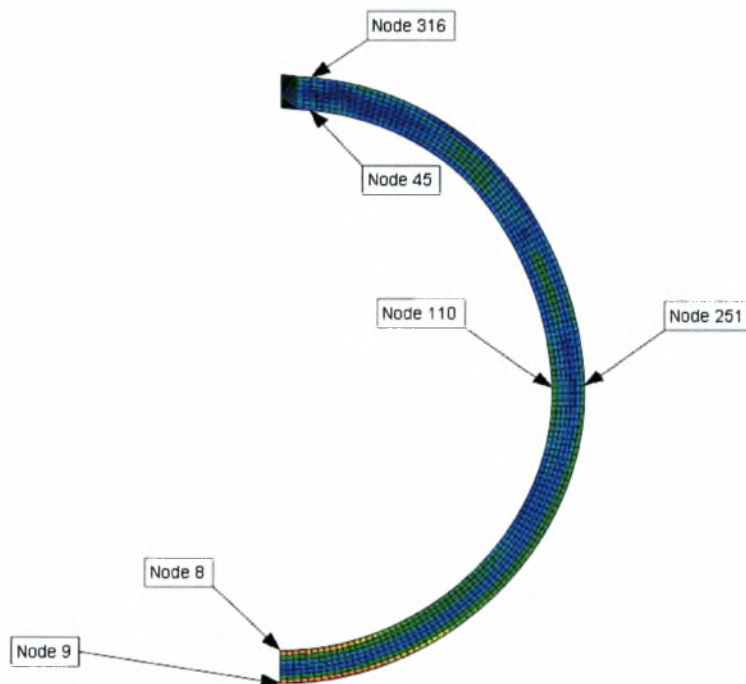
$$t_m = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}, \text{ όπου :}$$

$t_1$  = το πάχος του αγωγού πάνω, 2 στοιχεία μετά τη συγκόλληση (δεν έχει νόημα να το εξετάσουμε στη συγκόλληση), συγκεκριμένα στους κόμβους 45 και 316

$t_2$  = το πάχος του αγωγού στη μέση, συγκεκριμένα στους κόμβους 110 και 251

$t_3$  = το πάχος του αγωγού κάτω, συγκεκριμένα στους κόμβους 8 και 9

$t_m$  = ο μέσος όρος των τριών παχών



**Σχήμα 3.24** : Η θέση των κόμβων που αναφέρονται πιο πάνω.

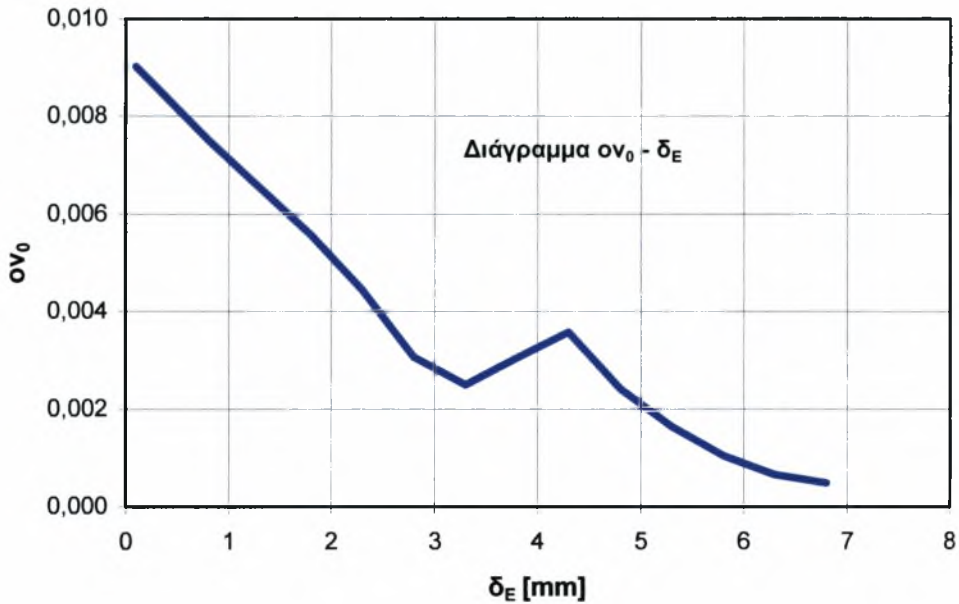


$$\Delta T = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_m}, \text{ όπου :}$$

$t_{\max}$  = το μεγαλύτερο πάχος από τα  $t_1, t_2, t_3$ .

$t_{\min}$  = το μικρότερο πάχος από τα  $t_1, t_2, t_3$ .

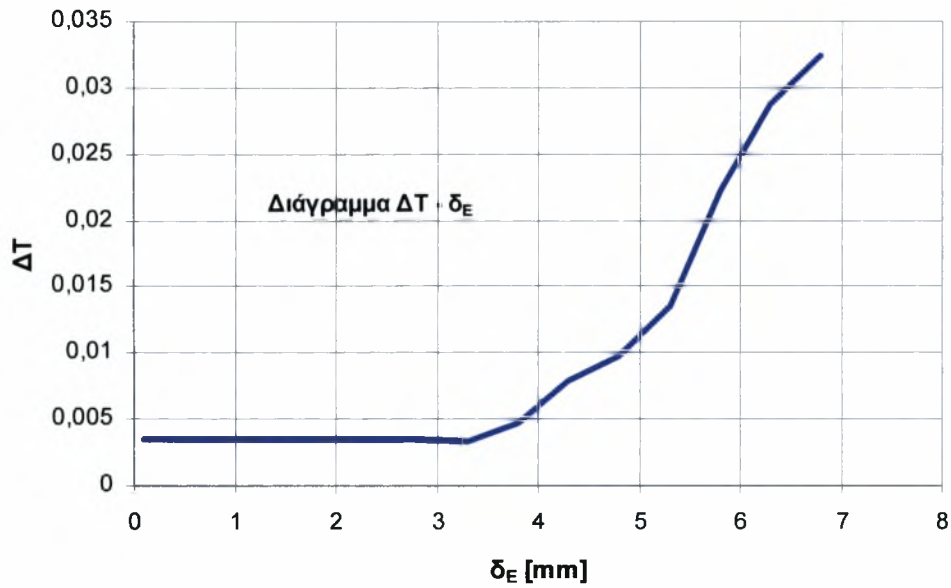
Κι έτσι, φτιάχνουμε τα παρακάτω διαγράμματα :



**Σχήμα 3.25 :** Διάγραμμα  $\sigma\nu_0 - \delta_E$ .

όπου παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το  $\delta_E$ , γενικώς μειώνεται η αρχική ατέλεια ( $\sigma\nu_0$ ), δηλαδή ο αγωγός είναι πιο κυκλικός κάτι το οποίο είναι και λογικό.





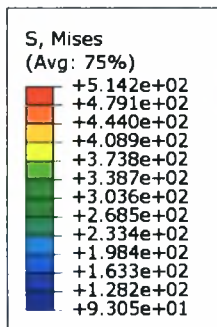
**Σχήμα 3.26 :** Διάγραμμα  $\Delta T - \delta_E$ .

όπου παρατηρούμε και κάτι το οποίο περιμέναμε, δηλαδή ότι με αύξηση του  $\delta_E$  αυξάνεται το  $\Delta T$ , εφόσον ο αγωγός πλαστικοποιείται περισσότερο.

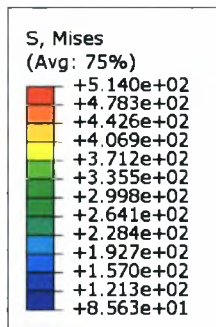
### **β. Παραμένουσες Τάσεις**

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τις παραμένουσες τάσεις για κάθε τιμή μετατόπισης, τρέχουμε το πρόγραμμα για κάθε τιμή και βλέπουμε το τασικό πεδίο που έχει το έλασμα με το τέλος του expansion, μετά την αποφόρτιση.

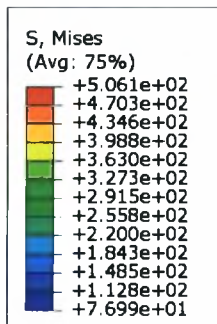
Συγκεκριμένα, έχουμε τις εξής διαμορφώσεις για κάθε τιμή συνολικής διαστολής (expansion):



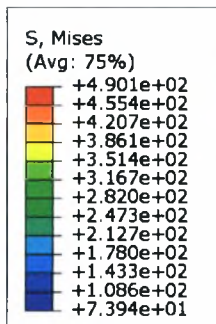
(α)  $u_{Expansion} = 8.3 \text{ mm}$



(β)  $u_{Expansion} = 9 \text{ mm}$

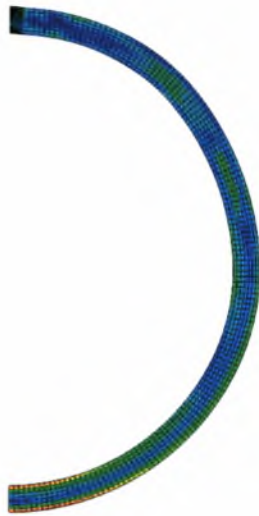
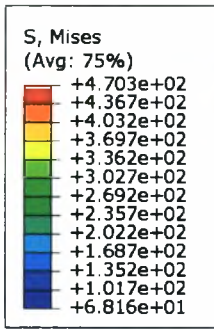


(γ)  $u_{Expansion} = 10$

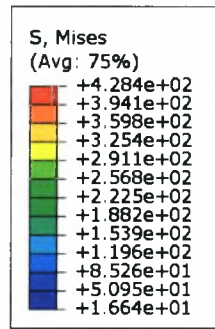


(δ)  $u_{Expansion} = 10.5 \text{ mm}$

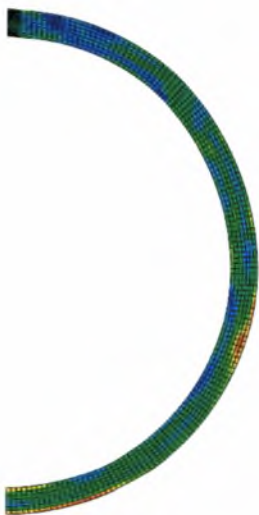
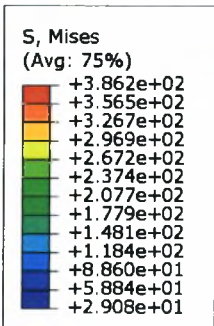
**Σχήμα 3.27 :** Τασικό πεδίο για κάθε τιμή μετατόπισης στο τέλος του Expansion, μετά την αποφόρτιση.



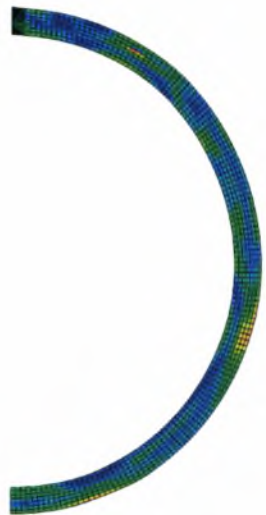
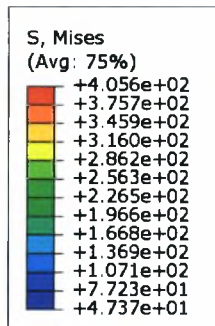
$$(\epsilon) u_{Expansion} = 11 \text{ mm}$$



$$(\sigma) u_{Expansion} = 11.5 \text{ mm}$$

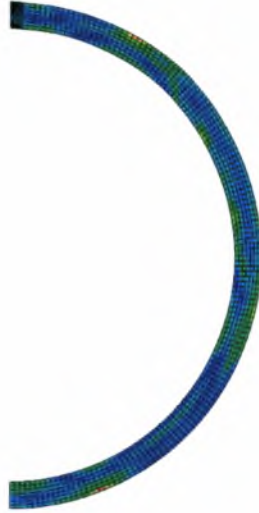
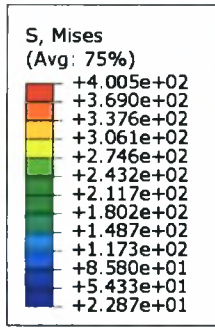


$$(\zeta) u_{Expansion} = 12 \text{ mm}$$

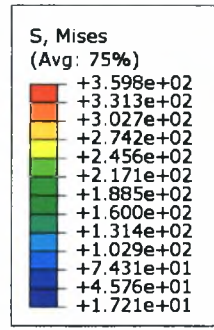


$$(\eta) u_{Expansion} = 12.5 \text{ mm}$$

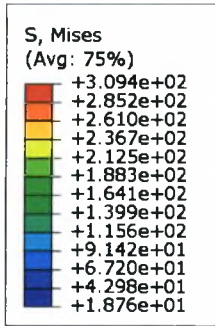
Σχήμα 3.27 (συν.)



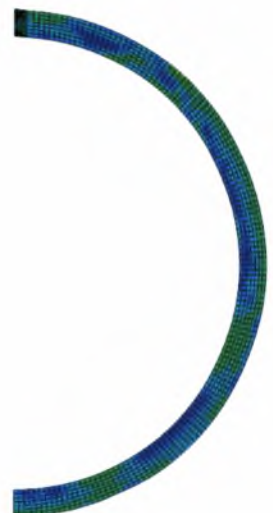
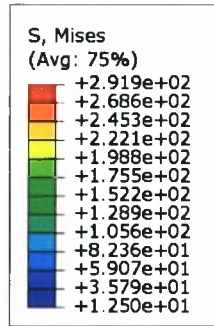
(θ)  $u_{Expansion} = 13 \text{ mm}$



(ι)  $u_{Expansion} = 13.5 \text{ mm}$

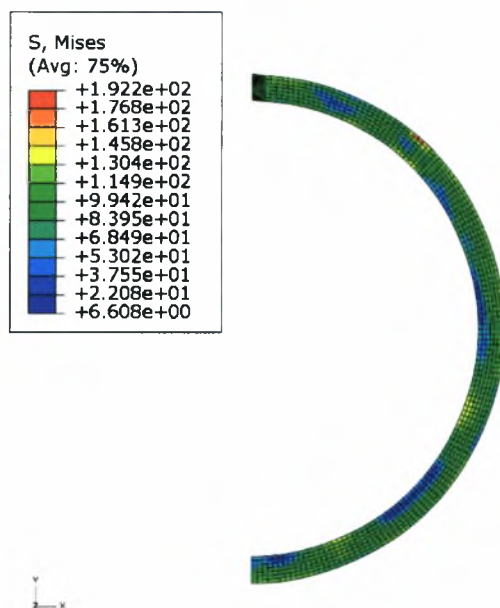


(ια)  $u_{Expansion} = 14 \text{ mm}$



(ιβ)  $u_{Expansion} = 14.5 \text{ mm}$

Σχήμα 3.27 (συν.)

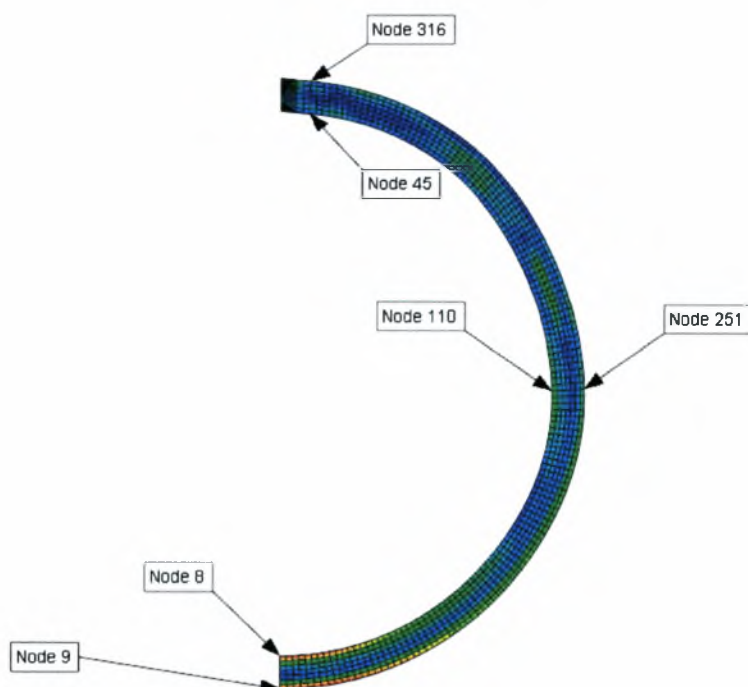


(iv)  $u_{Expansion} = 15 \text{ mm}$

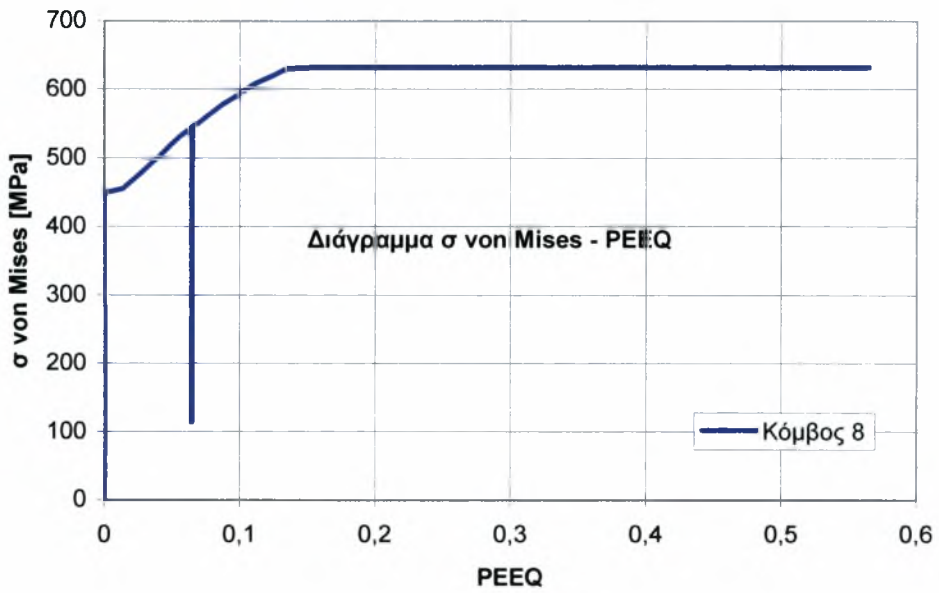
**Σχήμα 3.27 (συν.)**

Όπου παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η τιμή συνολικής διαστολής τόσο μειώνονται οι παραμένουσες τάσεις.

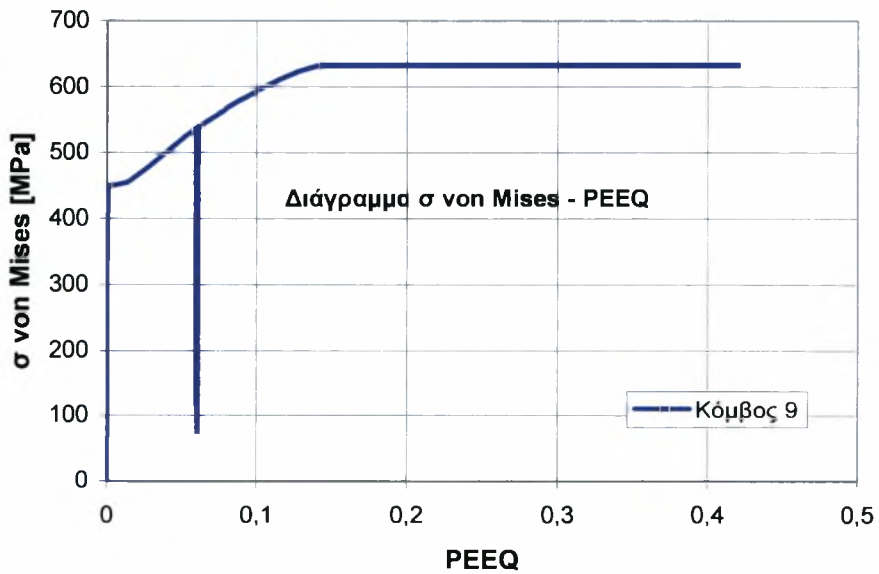
Στη συνέχεια φτιάχνουμε τα διαγράμματα  $\sigma$  von Mises -  $PEEQ$  για τους κόμβους 8, 9, 110 και 251.



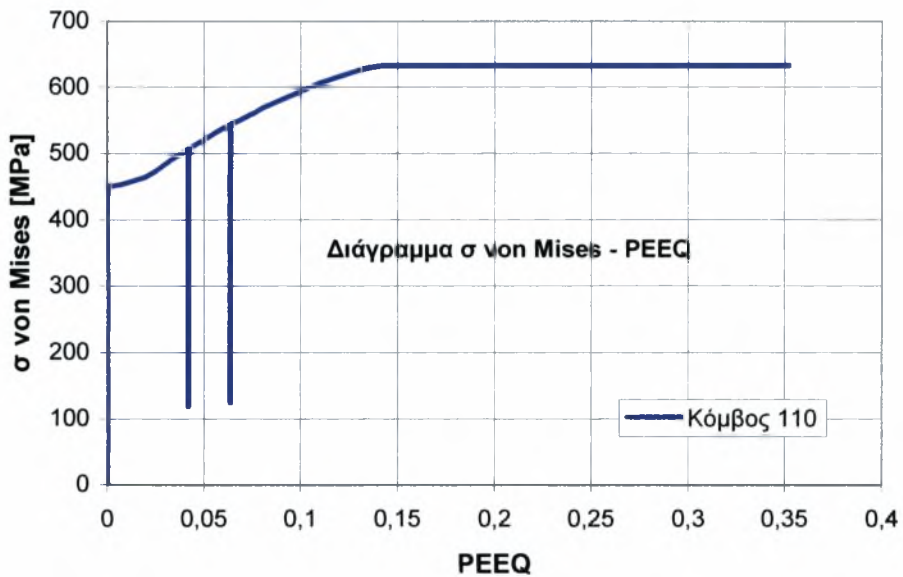
**Σχήμα 3.24**



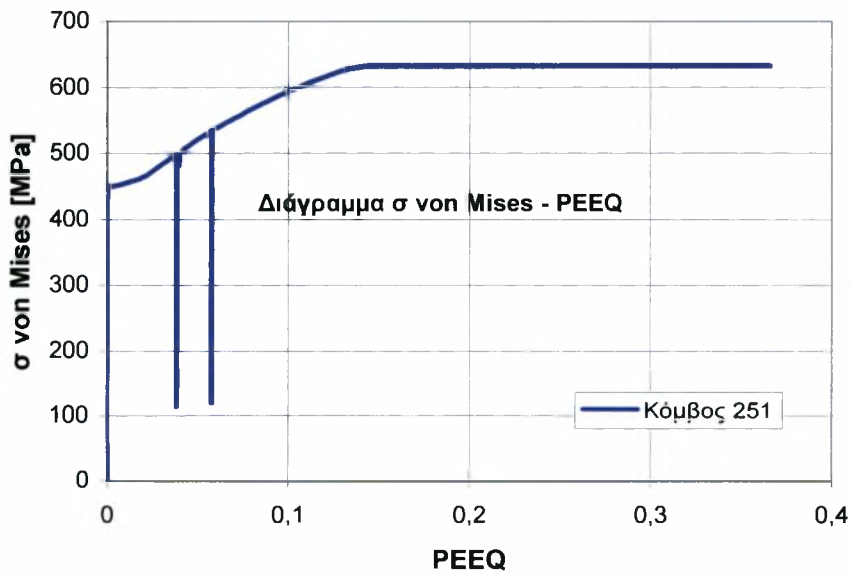
**Σχήμα 3.28 :** Διάγραμμα  $\sigma$  von Mises -  $PEEQ$  για τον κόμβο 8.



**Σχήμα 3.29 :** Διάγραμμα  $\sigma$  von Mises -  $PEEQ$  για τον κόμβο 9.



**Σχήμα 3.30 :** Διάγραμμα  $\sigma$  von Mises -  $PEEQ$  για τον κόμβο 110.



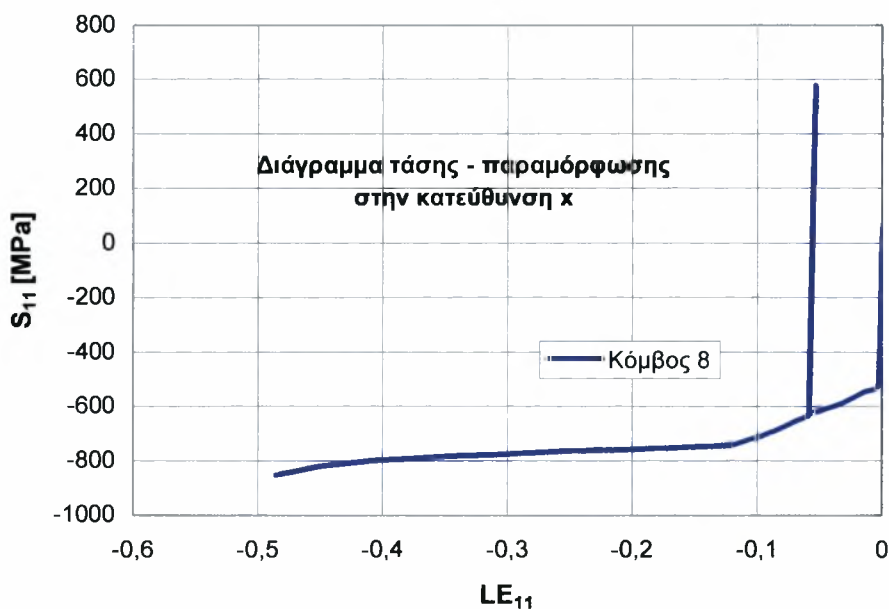
**Σχήμα 3.31 :** Διάγραμμα  $\sigma$  von Mises -  $PEEQ$  για τον κόμβο 251.

Με βάση αυτά τα διαγράμματα, παρατηρούμε πως μετά την κατεργασία υπάρχουν παραμένουσες τάσεις στο σωλήνα (η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση δεν είναι μηδενική) κάτι το λογικό βέβαια, εξαιτίας της συγκόλλησης που έχει προηγηθεί

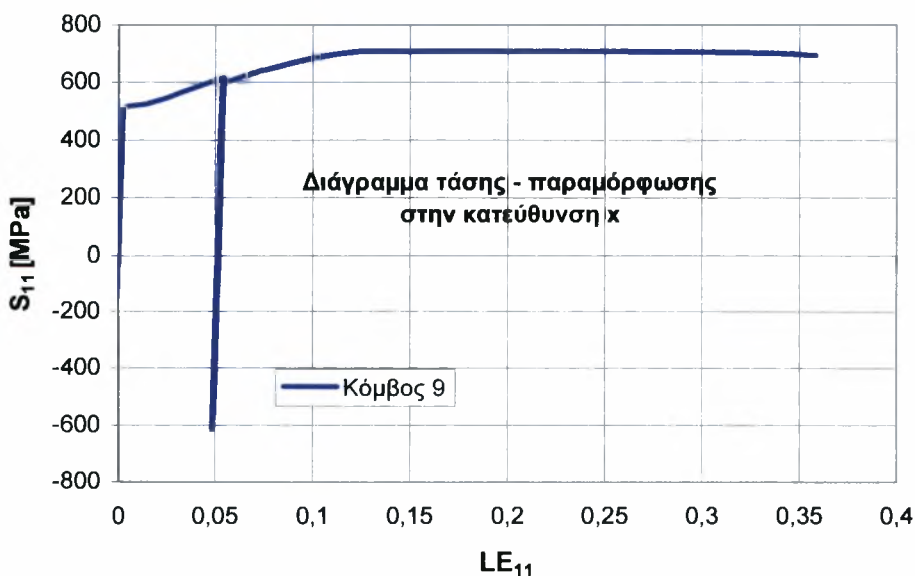


όπως και της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του υλικού που δεν μπορεί να αποφορτιστεί πλήρως έπειτα από την άσκηση φορτίων που του βάζουμε.

Επιπλέον, για καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του αγωγού στα διάφορα βήματα, παίρνουμε και τα διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης στην περιμετρική κατεύθυνση για τους κόμβους 8 και 9 :



Σχήμα 3.32 : Διάγραμμα τάσης  $S_{11}$  - παραμόρφωσης  $LE_{11}$  για τον κόμβο 8.



Σχήμα 3.33 : Διάγραμμα τάσης  $S_{11}$  - παραμόρφωσης  $LE_{11}$  για τον κόμβο 9.

όπου φαίνεται και ότι ο κόμβος 8 θλίβεται, ενώ ο 9 εφελκύεται κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο.

## 4. ΑΝΤΟΧΗ ΣΩΛΗΝΩΝ ΥΟΕ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ

### 4.1 Επιρροή της περιμετρικής διαστολής στην αντοχή σε εξωτερική πίεση

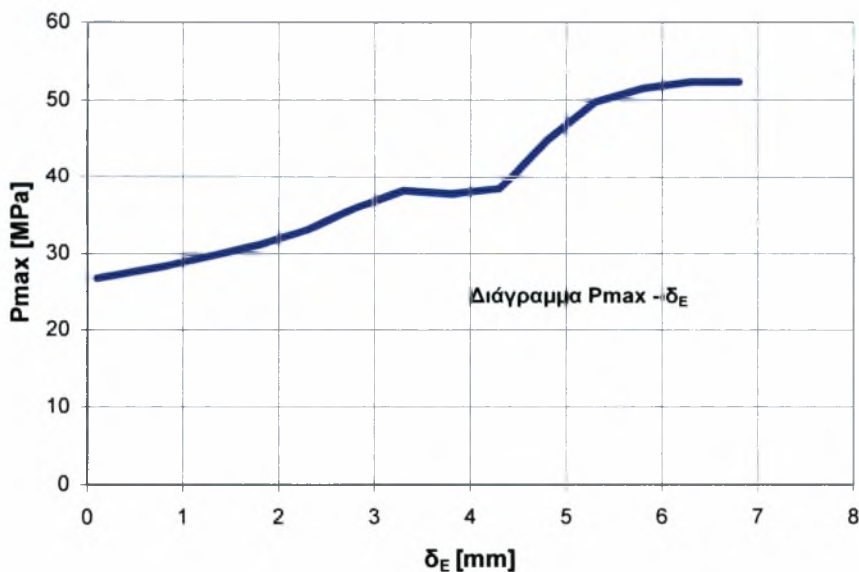
Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε καλύτερα τη συμπεριφορά του δακτυλίου σε εξωτερική πίεση, εκτελούμε το πρόγραμμα για κάθε τιμή συνολικής διαστολής που αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο και υπολογίζουμε τις τιμές πιέσεων κατάρρευσης που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

#### Πίνακας 4.1

Τιμές πιέσεων κατάρρευσης για τις διάφορες τιμές συνολικής διαστολής.

$u_{Expansion}$ [mm]	$P_{max}$ [MPa]
8.3	26.76
9	28.32
10	31.16
10.5	33.08
11	35.92
11.5	38.14
12	37.77
12.5	38.38
13	44.8
13.5	49.71
14	51.45
14.5	52.27
15	52.27

Οπότε, σχεδιάζουμε το διάγραμμα  $P_{max} - \delta_E$  το οποίο έχει την παρακάτω μορφή :



Σχήμα 4.1 : Διάγραμμα  $P_{max} - \delta_E$

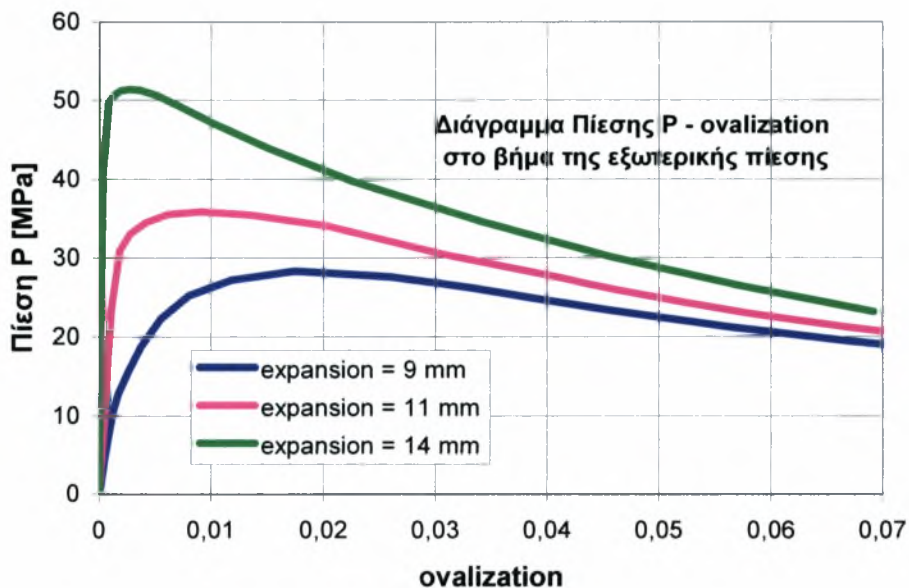
Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνουμε τη συνολική διαστολή, τόσο αυξάνεται η πίεση κατάρρευσης και άρα η αντοχή του σωλήνα.

Έπειτα σχεδιάζουμε το διάγραμμα πίεσης  $P$  - ovalization για 3 χαρακτηριστικές τιμές συνολικής διαστολής  $u_{\text{expansion}} = 9, 11$  και  $14$  στο βήμα της άσκησης της εξωτερικής πίεσης (αφού μόνο εκεί υπάρχει πίεση), όπου το ovalization δίνεται από τον τύπο :

$$ov = \frac{|u_1 - u_2|}{D_m}$$

όπου  $u_1$  είναι η μετατόπιση ενός κόμβου πάνω στην πλευρά που κινείται στον  $x$  άξονα (κάτω δεξιά) και  $u_2$  η μετατόπιση ενός κόμβου πάνω στην πλευρά που κινείται στον  $y$  άξονα.  $D_m$  είναι η μέση διάμετρος.

Το ζητούμενο διάγραμμα είναι το ακόλουθο :



**Σχήμα 4.2 :** Διάγραμμα  $P$  - ovalization για  $u_{\text{expansion}} = 9, 11$  και  $14$  στο βήμα της άσκησης της εξωτερικής πίεσης.

Παρατηρούμε πάλι πως όσο μεγαλώνει η συνολική διαστολή στο βήμα της φάσης  $O$ , τόσο αυξάνεται και η μέγιστη πίεση και μειώνεται η παράμετρος «οβαλοποίησης».

## 4.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με την αντοχή σωλήνων χωρίς την υπόψη κατεργασία.

Για να μπορέσουμε να κάνουμε σύγκριση των όσων υπολογίσαμε προηγουμένως με αγωγούς που δεν έχουν υποστεί κατεργασία UOE και για να έχουμε μια καλύτερη εικόνα, ακολουθούμε την ίδια διαδικασία που ακολουθήσαμε στις ενότητες 2.1 και 2.2 με κάποιες μικρές αλλαγές. Έτσι, κατά τον ίδιο τρόπο έχουμε :

$$\text{Διάμετρος : } D_m = 901.5 * \frac{2}{\pi} = 573.91 \text{ mm}$$

$$\text{Πάχος : } t = 32.33 \text{ mm}$$

Επίσης, έχουμε :

$$r_m = D_m / 2 = 286.96 \text{ mm}$$

$$D_{ext} = D_m + t = 606.24 \text{ mm}$$

$$r_{ext} = D_{ext} / 2 = 303.12 \text{ mm}$$

$$r_{int} = r_{ext} - t = 270.79 \text{ mm}$$

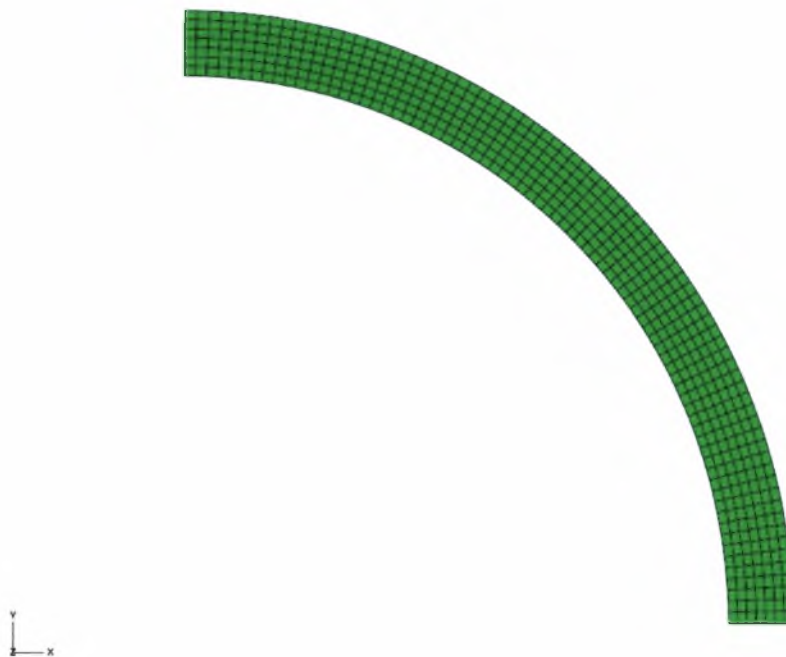
από τα οποία συνάγουμε ότι :

$$D/t = 18.75$$

Το υλικό είναι αυτό που έχουμε χρησιμοποιήσει και πριν, δηλαδή :  $\sigma_y = 65 \text{ ksi} = 448.5 \text{ kPa}$  με τιμές τάσης – παραμόρφωσης του **πίνακα 2.1**, μέτρο ελαστικότητας  $E = 210000 \text{ MPa}$  και λόγο Poisson  $\nu = 0.3$  (χάλυβας X65).

Το μοντέλο μας είναι πάλι διδιάστατο και έχουμε συμμετρία ως προς τους x και y άξονες, οπότε μελετάμε μόνο το ¼ του σωλήνα. Ως κέντρο του δακτυλίου επιλέγουμε επίσης το (0,0).

Κι έτσι με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζουμε το δακτύλιο αυτό, όπως φαίνεται στο **σχήμα 4.3**.



**Σχήμα 4.3** : Ο δακτύλιος που χρησιμοποιούμε στην προσομοίωση.

Για τη δημιουργία του πλέγματος, θεωρούμε ότι έχουμε 7 στοιχεία ως προς το πάχος και 77 στοιχεία ως προς την περιφέρεια του τεταρτοκυκλίου (για να υπάρχει αντιστοιχία με το πλέγμα που έχουμε στον αγωγό που υπέστη κατεργασία UOE). Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται, επίσης, είναι τύπου CPE4R.

Θεωρούμε όπως και πριν ότι  $x$  συμμετρία πάνω αριστερά και  $y$  συμμετρία κάτω δεξιά.

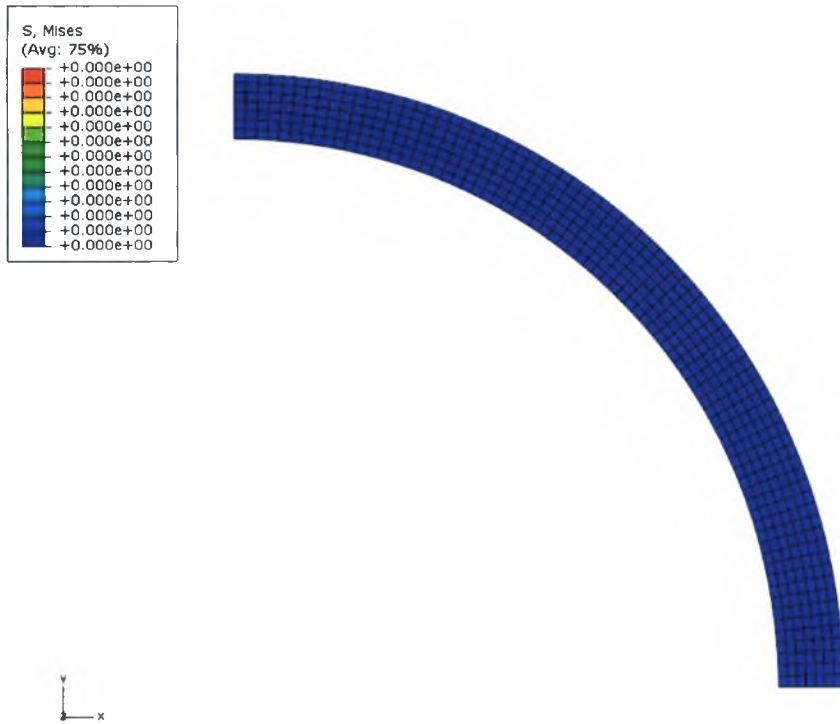
Η ανάλυσή μας αποτελείται από τα ίδια βήματα :

- α. δημιουργία αρχικής ατέλειας
- β. αποφόρτιση
- γ. άσκηση εξωτερικής πίεσης

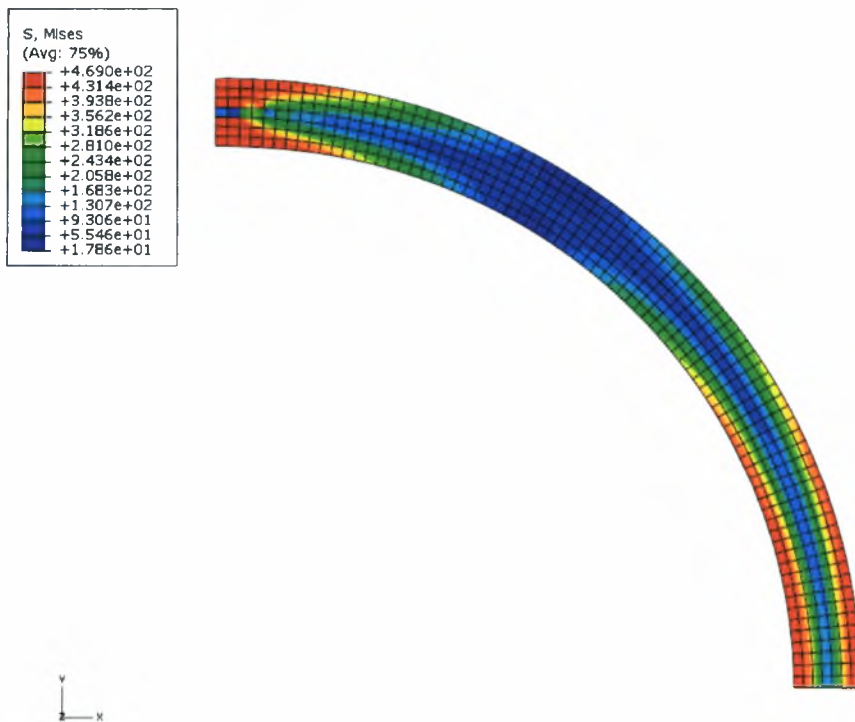
με ανάλυση τύπου static general στα δύο πρώτα και ανάλυση τύπου static riks στο τρίτο.

Έχοντας κάνει λοιπόν τις απαραίτητες παραδοχές προχωράμε στην προσομοίωση. Αρχικά πραγματοποιούμε την ανάλυση για  $\mu = 10 \text{ mm}$  και στη συνέχεια για άλλες τιμές.

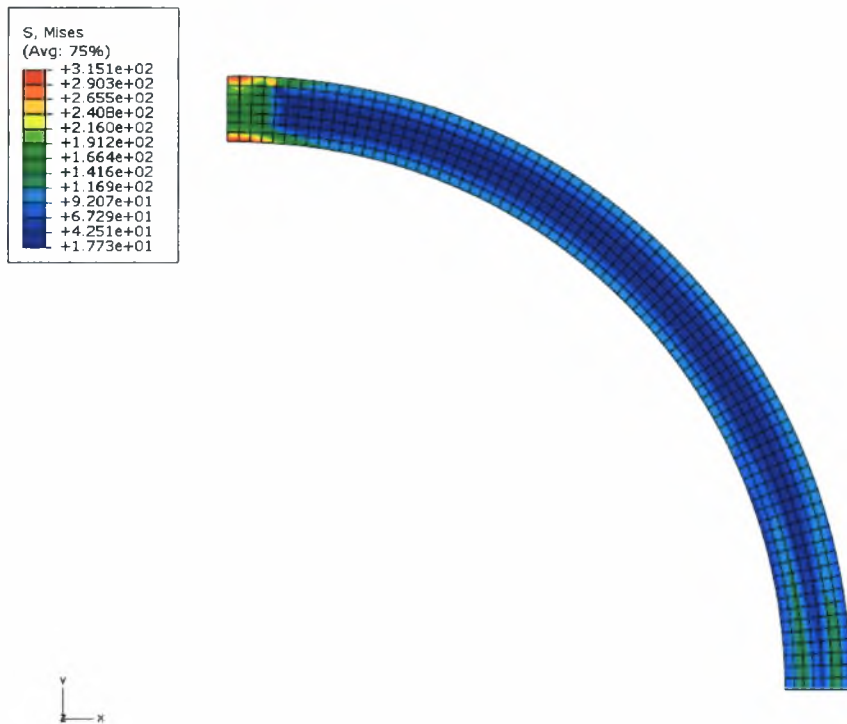
Έτσι παρατηρούμε τις καταστάσεις που παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα :



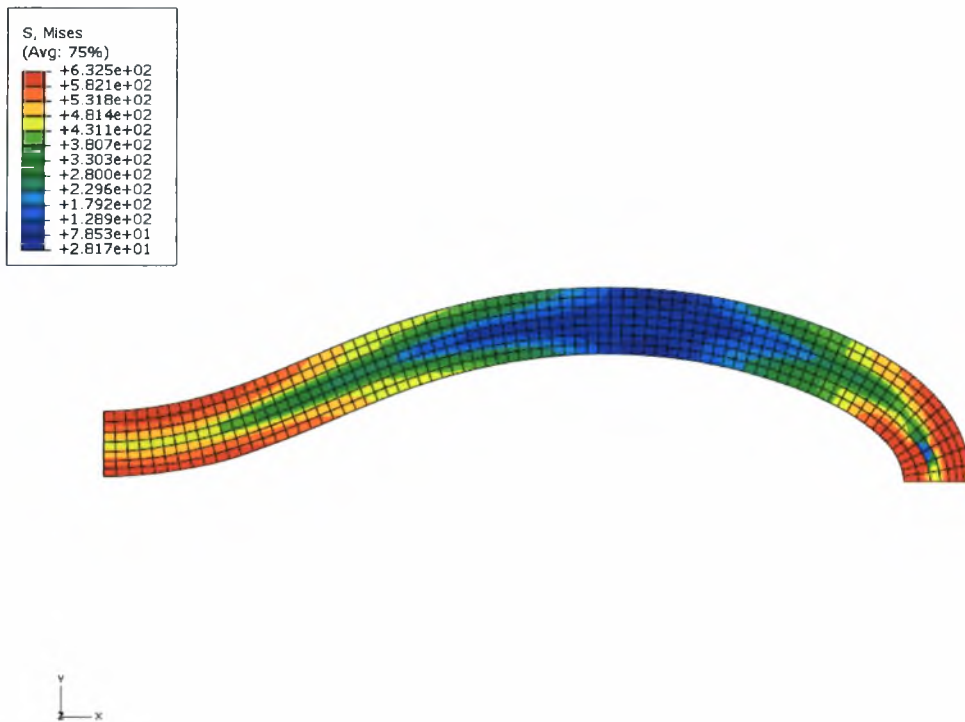
**Σχήμα 4.4 :** Ο δακτύλιος πριν παραμορφωθεί (αρχική κατάσταση).



**Σχήμα 4.5 :** Επιβολή αρχικής μετατόπισης και δημιουργία αρχικής ατέλειας.



**Σχήμα 4.6 :** Αποφόρτιση του δακτυλίου.



**Σχήμα 4.7 :** Άσκηση εξωτερικής πίεσης μέχρι την κατάρρευση του δακτυλίου.

Με τη βοήθεια του ABAQUS (από το XY Data για ODB history output και LPF) ή από το status file, βλέπουμε πως η πίεση κατάρρευσης ( $P_{max}$ ) είναι 30.74 MPa.



Στη συνέχεια υπολογίζουμε τις τιμές πίεσης καθώς και το ovalization με τη βοήθεια των  $u_1$  και  $u_2$  (για τον πάνω αριστερά και κάτω δεξιά κόμβο αντίστοιχα) για τιμές μετατόπισης  $u = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25$  και  $30$  mm.

Επίσης, βρίσκουμε πάλι τα  $\sigma_{v_0}$  και  $P_{\max}$  και φτιάχνουμε τον **πίνακα 4.3** :

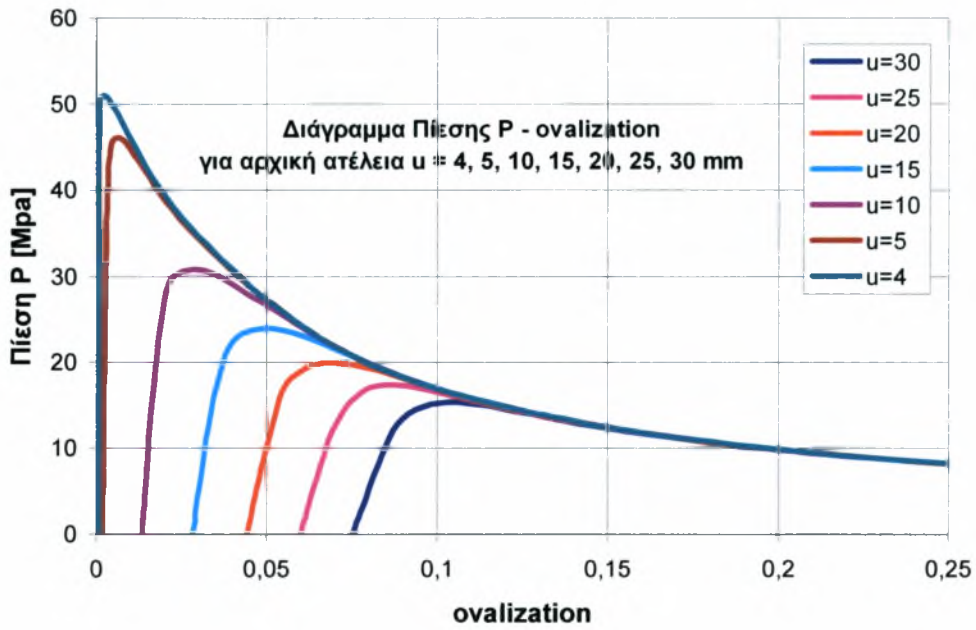
### Πίνακας 4.3

$P_{\max}$  και  $\sigma_{v_0}$  για τις διάφορες τιμές μετατοπίσεων

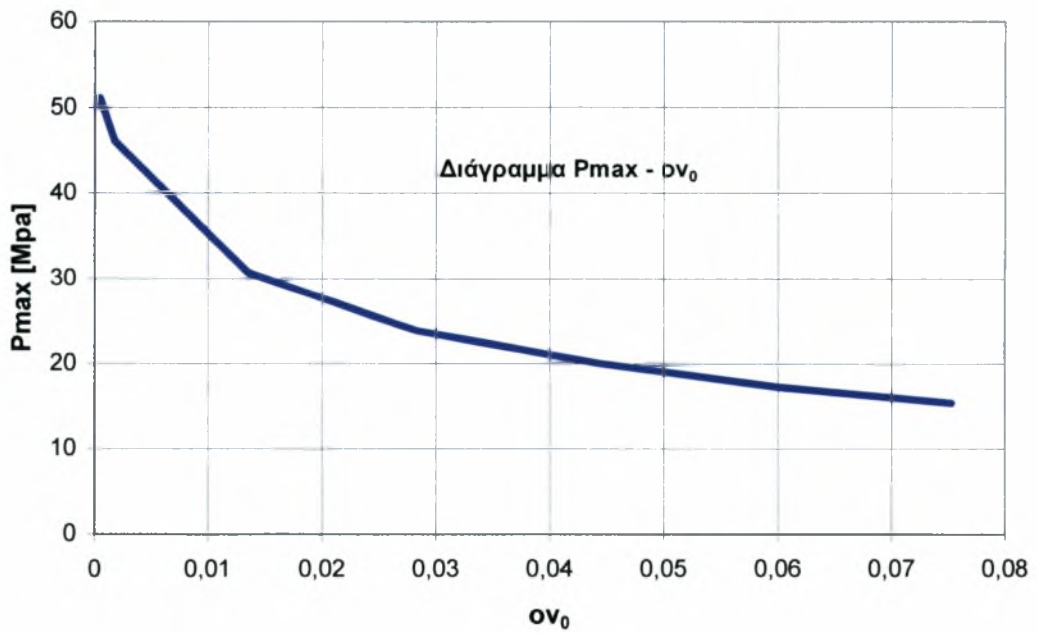
	$P_{\max}$ [MPa]	$\sigma_{v_0}$
<b>u=30</b>	15.41	$0.753 * 10^{-1}$
<b>u=25</b>	17.29	$0.6 * 10^{-1}$
<b>u=20</b>	20.018	$0.443 * 10^{-1}$
<b>u=15</b>	23.87	$0.283 * 10^{-1}$
<b>u=10</b>	30.74	$0.135 * 10^{-1}$
<b>u=5</b>	46.09	$0.175 * 10^{-2}$
<b>u=4</b>	51.08	$0.429 * 10^{-3}$

Παρατηρούμε πως για  $u = 0, 1, 2$  και  $3$  mm το μέν  $P_{\max}$  είναι πάρα πολύ μεγάλο και το μέν  $\sigma_{v_0}$  είναι πάρα πολύ μικρό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτές τις μετατοπίσεις ο αγωγός δε διαισθάνεται την αρχική στέλεια μιας και είναι πολύ μικρή και έτσι συμπεριφέρεται ελαστικά και υφίσταται ομοιόμορφη σμίκρυνση. Γι' αυτό το λόγο δεν τις συμπεριλαμβάνουμε στην ανάλυσή μας.

Με βάση τα παραπάνω κατασκευάζουμε τα παρακάτω διαγράμματα (**σχήματα 4.8 και 4.9**) :



Σχήμα 4.8 : Διάγραμμα Πίεσης  $P$  - ovalization για τις διάφορες τιμές μετατοπίσεων.



Σχήμα 4.9 : Διάγραμμα Μέγιστης Πίεσης  $P_{max}$  -  $\nu_0$  για τις διάφορες τιμές μετατοπίσεων.

Όπως είναι αναμενόμενο, παρατηρούμε ό,τι παρατηρήσαμε και για τον προηγούμενο σωλήνα της ενότητας 2, δηλαδή όσο αυξάνεται το μέγεθος της αρχικής μετατόπισης, τόσο μειώνεται και το μέγεθος της μέγιστης πίεσης  $P_{max}$  (κάτι λογικό, εφόσον με μεγαλύτερη αρχική μετατόπιση και άρα μεγαλύτερη στέλεια ο δακτύλιος οβαλοποιείται περισσότερο, απομακρύνεται από το κυκλικό σχήμα και παίρνει μορφή που μοιάζει με τη μορφή της τελικής αστοχίας).

Επίσης, η μέγιστη πίεση κατάρρευσης που μπορεί να δεχτεί ο αγωγός είναι 51,08 MPa, ενώ μια τυπική τιμή πίεσης κατάρρευσης για ένα αγωγό UOE, , όπως είδαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι 35.92 MPa (περίπου η μεσαία από τις τιμές διαστολής που πήραμε). Δηλαδή, ο αγωγός με την κατεργασία UOE χάνει σε αντοχή περίπου :

$$(51,08 - 35.92) / 51,08 ; 0.297$$

**ή 29.7 %.**

## 5. ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά την κατεργασία διαμόρφωσης σωλήνων UOE με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της διαδικασίας στο μη γραμμικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

Αρχικά μοντελοποιήθηκε και προσομοιώθηκε η κατάρρευση 2 περιπτώσεων αγωγών με καθορισμένες διαστάσεις και διαφορετικό λόγο  $D/t$  υπό εξωτερική πίεση για κατανόηση της μορφής κατάρρευσης δακτυλίων υπό εξωτερική πίεση αλλά και κατανόηση της επίδρασης του λόγου  $D/t$  στην πίεση κατάρρευσης. Παρατηρήθηκε πως ανάλογα με την αρχική μετατόπιση που βάζουμε σε έναν αγωγό για δημιουργία αρχικής ατέλειας αλλά και ανάλογα με τις μηχανικές ιδιότητές του, αυτός μπορεί να αστοχήσει με διαφορετική τιμή εξωτερικής πίεσης. Επίσης, ο λόγος  $D/t$  παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και συγκεκριμένα όσο αυξάνεται, τόσο μειώνεται η πίεση κατάρρευσης του αγωγού, μειώνεται δηλαδή η αντοχή του αγωγού.

Στη συνέχεια έγινε η προσομοίωση της κατεργασίας UOE όπου παρατηρήσαμε τη μεγάλη σημασία και επίδραση που έχει η φάση της διαστολής (*expansion*) στο μέγεθος της πίεσης κατάρρευσης. Αύξηση δηλαδή του *expansion* οδηγούσε σε αύξηση της πίεσης κατάρρευσης και μείωση της παραμέτρου «οβαλοποίησης» ή *ovalization* (βελτίωση της κυκλικότητας αγωγού).

Έπειτα, για κατανόηση των τιμών πίεσης κατάρρευσης που υπολογίσαμε για τις διάφορες τιμές μετατοπίσεων που δοκιμάσαμε, προσομοιάσαμε κατάρρευση ενός αγωγού υπό εξωτερική πίεση με τις ίδιες διαστάσεις χωρίς την υπόψη κατεργασία. Παρατηρήσαμε τελικά πως με την κατεργασία UOE ο αγωγός χάνει σε αντοχή περίπου 29.7 %.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. M.D. Herynk, S. Kyriakides, A. Onoufriou, H.D. Yun (2006), "Effects of the UOE /UOC pipe manufacturing processes on pipe collapse pressure", pp. 533 – 553
2. Toscano et al (2008), "Modeling the UOE Pipe Manufacturing Process", Proceedings of OMAE'08: OMAE2008-5760527th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, Portugal
3. Javier Raffo, Rita G. Toscano, Luciano Mantovano and Eduardo N. Dvorkin, "Numerical Model of UOE Steel Pipes : Forming Process and Structural Behavior"
4. Σπύρου Α. Καραμάνου, Μη Γραμμική Ανάλυση Κατασκευών – Ευστάθεια, Μέρος Β. – Ευστάθεια πλακών, δακτυλίων και κελυφών (Σημειώσεις Μαθήματος), Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Νοέμβριος 2003



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091557