

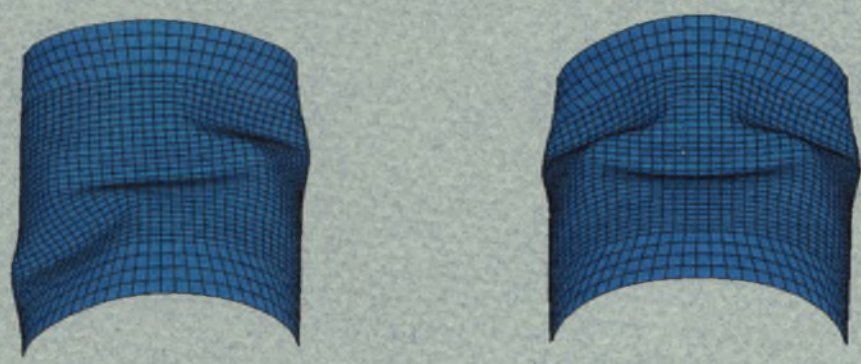


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΔΑΜΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ :**

***Κόπωση Υπόγειων Σωληνωτών Χαλύβδινων Αγωγών υπό την Παρουσία Τοπικού Αυγισμού. Προσομοίωση Πεπερασμένων Στοιχείων και Σχεδιασμός.***



**Επιβλέπων : Σ. Α. Καραμάνος, Επίκουρος Καθηγητής**

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.: 4531/1  
Ημερ. Εισ.: 15-07-2005  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ  
2005  
ΔΑΜ

© 2005 Ευαγγελία Δαμά

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

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Κωνσταντίνος Παπαδημητρίου  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Στους γονείς μου

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα 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. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Παπαδημητρίου και Καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

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.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω τις ευχαριστίες προς την οικογένεια μου για την συμπαράσταση που μου έχουν δείξει και για το σπουδαίο τρόπο σκέψης που μου έχουν μεταδώσει.

Ευαγγελία Δαμά

Κόπωση Υπόγειων Σωληνωτών Χαλύβδινων Αγωγών υπό την Παρουσία Τοπικού Λυγισμού.  
Προσομοίωση Πεπερασμένων στοιχείων και σχεδιασμός.

ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΔΑΜΑ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2005

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Σπύρος Α. Καραμάνος, Επίκουρος Καθηγητής

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα εργασία μελετά την κόπωση χαλύβδινων αγωγών υπό την παρουσία τοπικού λυγισμού μορφής ύβωσης. Η διερεύνηση γίνεται αριθμητικά με χρήση μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα ABAQUS και βασίζεται σε πειραματικές δοκιμές που διεξήχθησαν από το Ολλανδικό Ίδρυμα Ερευνών (TNO, Gresnigt, 2002). Αρχικά περιγράφεται ο εξοπλισμός και η διεξαγωγή των πειραμάτων η οποία περιλάμβανε κυκλική φόρτιση του αγωγού σε κάμψη και σε εσωτερική πίεση υπό την παρουσία τοπικού λυγισμού μορφής ύβωσης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αριθμητική προσομοίωση του πρώτου και δεύτερου σταδίου των πειραμάτων κατά την οποία χρησιμοποιούνται στοιχεία κελύφους και λαμβάνεται υπόψη η μη γραμμικότητα της γεωμετρίας και του υλικού. Μετά από σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτει ότι βρίσκονται σε συμφωνία. Επιπλέον γίνεται παραμετρική μελέτη όσον αφορά την επίδραση του βάθους ύβωσης και της εσωτερικής πίεσης στο εύρος των λογαριθμικών παραμορφώσεων. Τέλος σύμφωνα με τις σχέσεις των Basquin, Coffin-Manson και Miner υπολογίζεται η αντοχή σε κόπωση. Ο υπολογισμός του αριθμού κύκλων φόρτισης πριν τη θραύση (διάρκεια ζωής) γίνεται βάσει μετρήσεων, από την αριθμητική ανάλυση που έχει προηγηθεί, του εύρους των κύριων παραμορφώσεων στη κρίσιμη περιοχή για δημιουργία ρήγματος (περιοχή σχηματισμού της τοπικής ύβωσης στην άνω γενέτειρα του αγωγού).

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

### **Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή**

1.1 Περιγραφή του φυσικού προβλήματος.....	1
1.2 Πειραματικές δοκιμές και αριθμητική ανάλυση.....	1
1.3 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας.....	2

### **Κεφάλαιο 2 : Περιγραφή των πειραμάτων**

2.1 Εισαγωγή.....	4
2.2 Περιγραφή πρώτου σταδίου των πειραματικών δοκιμών.....	4
2.3 Περιγραφή δεύτερου σταδίου των πειραματικών δοκιμών .....	9

### **Κεφάλαιο 3 : Προσομοίωση πρώτου σταδίου των πειραματικών δοκιμών**

3.1 Εισαγωγή.....	12
3.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού.....	12
3.3 Ιδιότητες του υλικού του αγωγού.....	13
3.4 Πλέγμα και στοιχεία κελύφους πεπερασμένων στοιχείων.....	14
3.5 Συνοριακές συνθήκες.....	15
3.6 Βήματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.....	15
3.7 Σύγκριση αριθμητικής ανάλυσης με τα πειράματα.....	22

### **Κεφάλαιο 4 : Προσομοίωση δεύτερου σταδίου των πειραματικών δοκιμών**

4.1 Εισαγωγή.....	24
4.2 Βήματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, πρώτου πειράματος.....	24
4.3 Βήματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, δεύτερου πειράματος .....	28
4.4 Βήματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, τρίτου πειράματος .....	31
4.5 Σύγκριση αριθμητικών-πειραματικών αποτελεσμάτων, πρώτου πειράματος.....	33
4.6 Σύγκριση αριθμητικών-πειραματικών αποτελεσμάτων, δεύτερου πειράματος .....	38
4.7 Σύγκριση αριθμητικών-πειραματικών αποτελεσμάτων, τρίτου πειράματος .....	42

## Κεφάλαιο 5 : Περιμετρική μελέτη

5.1 Εισαγωγή.....	43
5.2 Επίδραση του βάθους ύβωσης στο εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση, $D/t=76$ μοντέλο 1 <sup>ο</sup> .....	44
5.3 Επίδραση του βάθους ύβωσης στη μέγιστη τιμή του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση για $D/t=50.6$ και $D/t=94.9$ μοντέλο 1 <sup>ο</sup> .....	49
5.4 Επίδραση της εσωτερικής πίεσης στο εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση, μοντέλο 1 <sup>ο</sup> .....	51
5.5 Επίδραση της εσωτερικής πίεσης στο εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη περιφερειακή διεύθυνση, μοντέλο 2 <sup>ο</sup> .....	54

## Κεφάλαιο 6 : Υπολογισμός της αντοχής σε κόπωση

6.1 Εισαγωγή.....	58
6.2 Σχέσεις υπολογισμού της αντοχής σε κόπωση.....	58
6.2 Υπολογισμός της αντοχής σε κόπωση, πρώτου πειράματος.....	59
6.2 Υπολογισμός της αντοχής σε κόπωση, δεύτερου πειράματος.....	61
Συμπεράσματα.....	62
Βιβλιογραφία.....	64



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το κίνητρο έρευνας που διεξήχθη στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας. Παρατίθεται το φυσικό πρόβλημα για τη μελέτη του οποίου διεξήχθησαν πειραματικές δοκιμές υποστηριζόμενες από αριθμητική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές ενότητες της διπλωματικής εργασίας.

### 1.1 Περιγραφή του φυσικού προβλήματος.

Ένα φαινόμενο αστοχίας υπόγειων χαλύβδινων σωληνώσεων αποτελεί ο τοπικός λυγισμός μορφής ύβωσης ο οποίος προκαλείται λόγω των καμπτικών φορτίων που υφίσταται ο εκάστοτε αγωγός από το περιβάλλον έδαφος. Εντούτοις, ένας αγωγός υπό την παρουσία τοπικής ύβωσης και δεδομένου ότι δεν υπάρχουν ρωγμές στα τοιχώματά του μπορεί να βρίσκεται σε λειτουργία για την οποία είναι σχεδιασμένος (μεταφορά ρευστού ή αερίου). Ωστόσο, τα σημεία κοντά στην περιοχή της ύβωσης παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις παραμορφώσεων οι οποίες υπό την παρουσία κυκλικής φόρτισης συχνά οδηγούν στην δημιουργία ρωγμών. Συνεπώς για να αποφευχθεί αστοχία του αγωγού λόγω κόπωσης, σε περίπτωση εντοπισμού τοπικής ύβωσης, είναι πολύ σημαντικό να αποφασισθεί το αν είναι απαραίτητη ή όχι η επιδιόρθωση του ελαττωματικού τμήματος των σωληνώσεων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία της επιδιόρθωσης εκτός του ότι είναι αρκετά χρονοβόρα είναι και ιδιαίτερα δαπανηρή. Το υψηλό κόστος έγκειται συνήθως στο γεγονός ότι ο αγωγός θα πρέπει να κλείσει, να αποστραγγιστεί και στη συνέχεια να επισκευαστεί. Αν βέβαια ο αγωγός είναι υποθαλάσσιος ή διασχίζει ποτάμι το κόστος επισκευής είναι ακόμα υψηλότερο.

### 1.2 Πειραματικές δοκιμές και αριθμητική ανάλυση.

Για την μελέτη του προαναφερθέντος προβλήματος, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν αναλυτικά μοντέλα που να υπολογίζουν παραμορφώσεις στις κρίσιμες περιοχές (περιοχή ύβωσης) όσον αφορά παραμέτρους όπως η διάμετρος, το πάχος, η μορφή λυγισμού, το βάθος ύβωσης και ο τύπος της κυκλικής φόρτισης (με κάμψη ή εσωτερική πίεση), διεξήχθησαν από το Ολλανδικό Ίδρυμα Ερευνών (Gresnigt, 2002)

συνολικά τρία πειράματα, τα οποία στη συνέχεια υποστηρίχθηκαν από αριθμητική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα ABAQUS.

Στόχος των πειραματικών δοκιμών ήταν να υπολογιστούν οι παραμορφώσεις στη περιοχή της τοπικής ύβωσης ώστε να γίνει μια εκτίμηση του επιπέδου ασφαλείας και της απομένουσας διάρκειας ζωής σωληνώσεων παρόμοιων με κάποιες υπόγειες σωληνώσεις σε ποταμό κοντά στο Rotterdam, στην Ολλανδία. Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων, στη παρούσα εργασία διερευνάται αριθμητικά το παραπάνω φυσικό πρόβλημα με χρήση μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων.

### 1.3 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας.

Το κείμενο της διπλωματικής εργασίας, χωρίζεται στις εξής ενότητες οι οποίες καταλαμβάνουν τα κεφάλαια δυο έως έξι αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των πειραματικών δοκιμών. Παρατίθεται φωτογραφικό υλικό όσον αφορά τον πειραματικό εξοπλισμό και αναλυτικές επεξηγήσεις σχετικά με την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η προσομοίωση του πρώτου σταδίου της πειραματικής διαδικασίας, το οποίο είναι κοινό και για τα τρία πειράματα και αφορά τη προσομοίωση του τοπικού λυγισμού μορφής ύβωσης του αγωγού.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η προσομοίωση του δεύτερου σταδίου της πειραματικής διαδικασίας για το πρώτο, δεύτερο και τρίτο πείραμα αντίστοιχα. Επίσης γίνεται σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής παραμετρική μελέτη με βάση την αριθμητική ανάλυση δυο μοντέλων βασισμένων στο πρώτο και δεύτερο πείραμα αντίστοιχα. Στο πρώτο μοντέλο μελετάται το πώς επηρεάζεται το εύρος των λογαριθμικών παραμορφώσεων, κατά τη διαμήκη διεύθυνση, από το βάθος ύβωσης και την εσωτερική πίεση. Επιπλέον μελετάται η επίδραση του βάθους ύβωσης στο εύρος των λογαριθμικών παραμορφώσεων κατά τη διαμήκη διεύθυνση για δυο άλλες περιπτώσεις του λόγου  $D/t$ . Στο δεύτερο μοντέλο μελετάται η επίδραση της εσωτερικής πίεσης στο εύρος των παραμορφώσεων κατά την περιφερειακή διεύθυνση.

Στο έκτο κεφάλαιο υπολογίζεται η αντοχή σε κόπωση σύμφωνα με τις σχέσεις των Basquin, Coffin-Manson και τον κανόνα του Miner. Ο υπολογισμός γίνεται βάσει του εύρους των κύριων παραμορφώσεων στην περιοχή της τοπικής

ύβωσης. Επίσης γίνεται σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων όσον αφορά τη διάρκεια ζωής.

Τα τελικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας, που προέκυψαν από την συνολική ανάλυση, παρουσιάζονται στο έβδομο κεφάλαιο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των πειραματικών δοκιμών που διεξήχθησαν από το Ολλανδικό Ίδρυμα Ερευνών (TNO, Gresnigt, 2002). Στόχος των πειραμάτων ήταν να εκτιμηθεί το επίπεδο ασφάλειας και να υπολογιστεί η απομένουσα διάρκεια ζωής κυλινδρικών αγωγών από χάλυβα σε κυκλική φόρτιση με κάμψη και με εσωτερική πίεση, υπό την παρουσία τοπικού λυγισμού μορφής ύβωσης. Συνολικά διεξήχθησαν τρία πειράματα στα οποία οι αγωγοί που χρησιμοποιήθηκαν είχαν κοινά χαρακτηριστικά. Αρχικά ο κάθε αγωγός υποβλήθηκε σε κάμψη μέχρι να σχηματιστεί το επιθυμητό βάθος ύβωσης. Στη συνέχεια, στο πρώτο και δεύτερο πείραμα, εφαρμόστηκε κυκλική φόρτιση με κάμψη και εσωτερική πίεση αντίστοιχα μέχρι να δημιουργηθεί ρωγμή λόγω κόπωσης στο τοίχωμα του αγωγού. Στο τρίτο πείραμα, επεβλήθησαν περίπου το ένα τέταρτο των κύκλων φόρτισης με εσωτερική πίεση που οδηγούν σε αστοχία και στη συνέχεια αυξήθηκε η εσωτερική πίεση μονοτονικά έως ότου να αστοχήσει το υλικό. Ο υπολογισμός του επιπέδου ασφαλείας λειτουργίας και της απομένουσας διάρκειας ζωής του αγωγού έγινε βάσει μετρήσεων των παραμορφώσεων από μηκυνσιόμετρα τα οποία τοποθετήθηκαν στα κρίσιμα σημεία (περιοχή τοπικής ύβωσης) στην άνω γενέτειρα της επιφάνειας των αγωγών, πριν από τη επιβολή των κύκλων φόρτισης στην παραμορφωμένη κατάσταση.

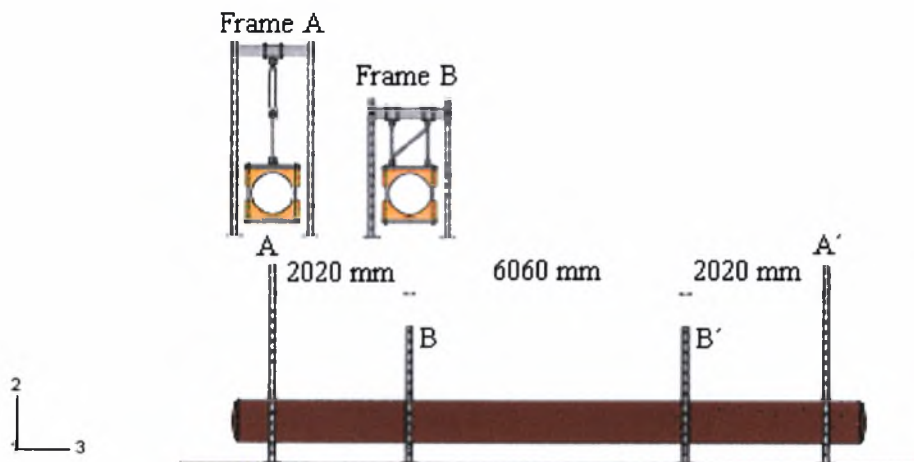
### 2.2 Περιγραφή πρώτου σταδίου των πειραματικών δοκιμών

Στο πρώτο στάδιο των πειραματικών δοκιμών, το οποίο είναι κοινό και για τα τρία πειράματα, δημιουργείται στον αγωγό τοπικός λυγισμός μορφής ύβωσης. Τα χαρακτηριστικά των αγωγών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων είναι τα εξής :

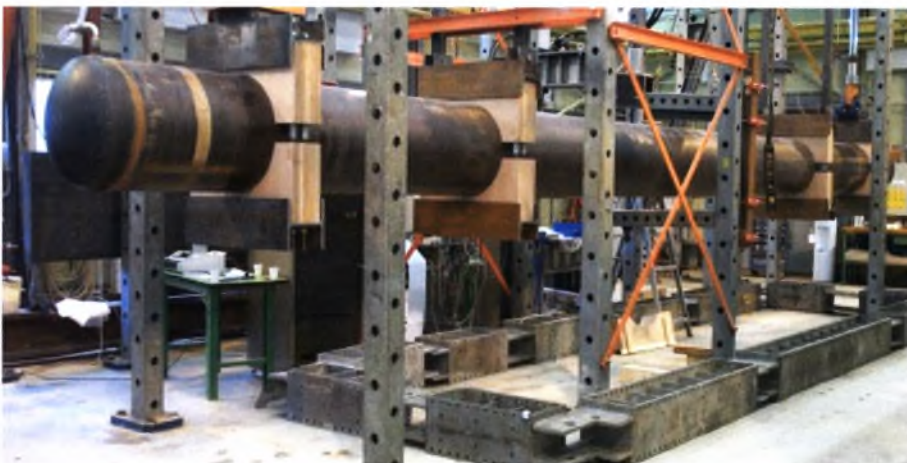
- Διάμετρος:  $D_{out} = 610.7 \text{ mm}$
- Πάχος:  $t = 8.03 \text{ mm}$
- Μήκος:  $L_0 = 12000 \text{ mm}$
- Λόγος διαμέτρου προς πάχος:  $D_0/t = 76$
- Τάση διαρροής:  $\sigma_0 = 313 \text{ N/mm}^2$

- Μέτρο ελαστικότητας:  $E = 210.000 \text{ MPa}$
- Λόγος Poisson:  $\nu = 0.3$

Στα σχήματα 2.1 και 2.2 παρουσιάζονται η πειραματική διάταξη και ο πειραματικός εξοπλισμός αντίστοιχα. Ο αγωγός στηρίζεται στα σημεία B και B'. Στο σημείο B (άρθρωση) περιορίζονται οι βαθμοί ελευθερίας  $U_1, U_2, U_3$  (μετατοπίσεις ως προς τους άξονες 1, 2 & 3) και  $UR_2, UR_3$ , (στροφές ως προς τους άξονες 2 & 3) ενώ στο σημείο B' (κύλιση) περιορίζονται οι βαθμοί ελευθερίας  $U_1, U_2$  και  $UR_2, UR_3$ . Οι διατάξεις στα σημεία A και A' επιτρέπουν την κίνηση προς τη θετική και αρνητική διεύθυνση του άξονα 2 καθιστώντας έτσι δυνατή την επιβολή κυκλικής φόρτισης σε κάμψη “τεσσάρων σημείων”, (four-point-bending) μέσω υδραυλικών γρύλων. Το τμήμα των διατάξεων A και B με το οποίο έρχεται σε επαφή ο αγωγός είναι ξύλινο έτσι ώστε να μην προκαλούνται παραμορφώσεις στα σημεία επαφής. Τα άκρα του αγωγού είναι κλειστά ώστε κάθε αγωγός να μπορεί να περιέχει νερό σε ελεγχόμενη πίεση.

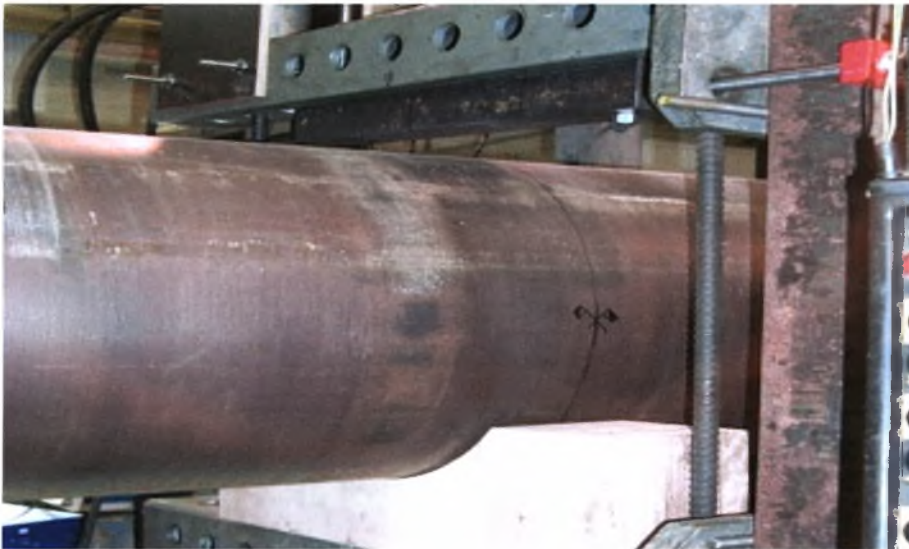


Σχήμα 2.1 Πειραματική διάταξη.



Σχήμα 2.2 Πειραματικός εξοπλισμός.

Για να προκληθεί τοπικός λυγισμός επεβλήθη στον αγωγό καμπτική φόρτιση μέσω των μηχανισμών τύπου A. Συγκεκριμένα, αρχικά στις διατομές A και A' επεβλήθη κάποια μικρή μετατόπιση  $U_2$  ως προς την θετική διεύθυνση του άξονα 2. Στη συνέχεια για να δημιουργηθεί η ύβωση ακριβώς στο μέσο του αγωγού εφαρμόστηκε δύναμη μέσω ενός διεισδυτή στο πάνω τμήμα της διατομής του ενώ ταυτόχρονα τοποθετήθηκε μια ξύλινη πλάκα στο κάτω τμήμα. Η ξύλινη πλάκα, στην οποία υπήρχε μια κυκλική διαμόρφωση για να εφαρμόζει πάνω στην επιφάνεια του αγωγού, χρησίμευε ώστε να συγκρατεί και να στηρίζει τον αγωγό κατά τη διάρκεια εφαρμογής της δύναμης. Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται ο αγωγός όπου συγκρατείται από την πλάκα λίγο πριν εφαρμοστεί η δύναμη από τον διεισδυτή. Μετά την εφαρμογή της δύναμης από τον διεισδυτή, για να επιτευχθεί το επιθυμητό βάθος ύβωσης, επεβλήθη περαιτέρω μετατόπιση  $U_2$  στις διατομές A και A'.



**Σχήμα 2.3** Εφαρμογή της δύναμης από τον διεισδυτή με στόχο την δημιουργία τοπικού λυγισμού ακριβώς στο μέσο του αγωγού.

Για την μέτρηση των λογαριθμικών παραμορφώσεων τοποθετήθηκαν μηχανοσιόμετρα (strain gauges) στην περιοχή δημιουργίας του τοπικού λυγισμού, στα σημεία και στην κατεύθυνση όπου οι ερευνητές θεώρησαν πιο κρίσιμη την δημιουργία ρωγμής. Τα μηχανοσιόμετρα τοποθετήθηκαν στην παραμορφωμένη κατάσταση, πριν την επιβολή των κύκλων φόρτισης, σε σημεία κοιλότητας (valleys) καθώς και εκεί όπου η κύρτωση είναι “προς τα έξω,, (edges). Στα σχήματα 2.4, 2.5, 2.6 και 2.7 παρουσιάζονται η μορφή του τοπικού λυγισμού και τα σημεία τοποθέτησης των μηχανοσιόμετρων για τα πειράματα 1, 2 και 3 αντίστοιχα.



Σχήμα 2.4 Μορφή του τοπικού λυγισμού στα πειράματα 1 & 2.

Στα δυο πρώτα πειράματα η μορφή του τοπικού λυγισμού είναι κοινή. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4, δημιουργήθηκε μια κύρια ύβωση στο μέσο του αγωγού (εκεί όπου προκάλεσε την ατέλεια ο διεισδυτής) και δυο δευτερεύουσες, εκατέρωθεν και συμμετρικά της κύριας ύβωσης.



Σχήμα 2.5 Σημεία τοποθέτησης των μηχανοσιόμετρων, στα πειράματα 1 & 2.

Στο πρώτο πείραμα, στο οποίο ο αγωγός υπεβλήθη σε κυκλική φόρτιση με κάμψη, τα μηχανοσιόμετρα τοποθετήθηκαν κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Οι ερευνητές επέλεξαν αυτή τη διεύθυνση διότι οι παραμορφώσεις κατά τη διαμήκη διεύθυνση ήταν σαφώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες κατά την περιφερειακή. Στο δεύτερο πείραμα, στο οποίο επεβλήθη κυκλική φόρτιση με εσωτερική πίεση, η κρίσιμη διεύθυνση είναι η περιφερειακή. Εντούτοις τα μηχανοσιόμετρα τοποθετήθηκαν και σε αυτή τη περίπτωση κατά τη διαμήκη διεύθυνση.

Όσον αφορά τα σημεία τοποθέτησης, επιλέχθηκαν τρία σημεία στην περιοχή της κύριας ύβωσης και δυο στη περιοχή της δευτερεύουσας ύβωσης (σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.6 Μορφή του τοπικού λυγισμού στο 3° πείραμα.



Σχήμα 2.7 Σημεία τοποθέτησης των μηχανομετρών, στο 3° πείραμα .

Στο τρίτο πείραμα λόγω της κάμψης δημιουργήθηκε μια κύρια ύβωση στο μέσο του αγωγού και δυο δευτερεύουσες προς την ίδια κατεύθυνση σε σχέση με την κύρια ύβωση (σχήμα 2.6). Λόγω της εσωτερικής πίεσης, όπως και στο δεύτερο πείραμα, η κρίσιμη διεύθυνση είναι η περιφερειακή. Ωστόσο και σε αυτή τη περίπτωση τα μηχανομετρα τοποθετήθηκαν κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Όσον αφορά τα σημεία τοποθέτησης επιλέχθηκαν και σε αυτή την περίπτωση τρία σημεία στην περιοχή της κύριας ύβωσης και δυο στη περιοχή της δευτερεύουσας ύβωσης.



### 2.3 Περιγραφή δευτέρου σταδίου των πειραματικών δοκιμών

Κατά τη διεξαγωγή του δευτέρου σταδίου των πειραματικών δοκιμών, υπό την παρουσία του τοπικού λυγισμού (ο οποίος δημιουργήθηκε στο πρώτο στάδιο) και μετά την εγκατάσταση των μηκυνσιομέτρων, ο κάθε αγωγός υποβλήθηκε σε διαφορετική φόρτιση μέχρι το σημείο δημιουργίας ρωγμής στο τοίχωμα του. Παρακάτω παρουσιάζεται η ακριβής διαδικασία φόρτισης που ακολουθήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων 1, 2 και 3 αντίστοιχα.

- **Πείραμα 1<sup>ο</sup>**

Στο πρώτο πείραμα, αρχικά η εσωτερική πίεση αυξήθηκε και διατηρήθηκε σταθερή στο 0.1 MPa. Στη συνέχεια ο αγωγός υποβλήθηκε σε κύκλους φόρτισης με κάμψη μέχρι να αστοχήσει το υλικό. Το παραπάνω πραγματοποιήθηκε επιβάλλοντας στις διατομές A και A' μετατόπιση με εύρος  $\Delta u$  κατά την διεύθυνση του άξονα 2, μέσω των εμβόλων τύπου A (σχήμα 2.1). Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκαν 100 κύκλοι φόρτισης με  $\Delta u=50\text{mm}$  (-20mm και +30mm) και στη συνέχεια 98 κύκλοι φόρτισης με  $\Delta u=75\text{mm}$  (-30mm και +45mm), όπου και επήλθε αστοχία. Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται ο αγωγός τη στιγμή όπου έχει ανοίξει η ρωγμή στο τοίχωμα του και βγαίνει νερό από το εσωτερικό του. Παρατηρούμε ότι η ρωγμή έχει σχηματιστεί στην άκρη της περιοχής της κύριας ύβωσης.



**Σχήμα 2.8** Διαρροή του αγωγού, μετά από 98 κύκλους φόρτισης με  $\Delta u=75\text{mm}$ , στο 1<sup>ο</sup> πείραμα..

- **Πείραμα 2°**

Στο δεύτερο πείραμα αρχικά επεβλήθησαν τέσσερις κύκλοι φόρτισης με  $\Delta u = 30\text{mm}$  (-10mm και +20mm) υπό σταθερή πίεση  $p=1\text{ bar}$ . Στη συνέχεια η μετατόπιση στις διατομές A & A' διατηρήθηκε σταθερή και ο αγωγός υποβλήθηκε σε 2658 κύκλους φόρτισης με εσωτερική πίεση 0.5 έως 10 bar, όπου και επήλθε αστοχία. Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η διεύθυνση και η τοποθεσία της ρωγμής. Παρατηρούμε ότι η ρωγμή έχει σχηματιστεί στην άκρη της περιοχής της κύριας ύβωσης κατά την διαμήκη διεύθυνση και πολύ κοντά σε ένα από τα σημεία τοποθέτησης των μηκυσιομέτρων.



Σχήμα 2.9 Διεύθυνση και τοποθεσία ρωγμής, στο 2° πείραμα.

- **Πείραμα 3°**

Στο τρίτο πείραμα αρχικά επεβλήθησαν πεντακόσιοι κύκλοι φόρτισης με εσωτερική πίεση 0.5 έως 10 bar (1/4 της αναμενόμενης διάρκειας ζωής). Στη συνέχεια αυξήθηκε η καμπτική ροπή αυξάνοντας την μετατόπιση κατά 50mm στις διατομές στα σημεία στήριξης A και A'. Τέλος η εσωτερική πίεση αυξήθηκε μονοτονικά μέχρι την αστοχία του υλικού. Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζεται ο αγωγός ακριβώς μετά την αστοχία. Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι η ρωγμή δημιουργήθηκε σε διαφορετική περιοχή από αυτήν που είχε δημιουργηθεί η ύβωση.



**Σχήμα 2.10** Αστοχία αγωγού, στο 3<sup>ο</sup> πείραμα.

Στο σχήμα 2.11 παρουσιάζεται ο αγωγός λίγο πριν την αστοχία σε εσωτερική πίεση 100 bar. Είναι εμφανές το γεγονός ότι με την επιβολή της εσωτερικής οι πτυχώσεις ύβωσης ομαλοποιούνται.



**Σχήμα 2.11** Αγωγός υπό εσωτερική πίεση 100 bar, στο 3<sup>ο</sup> πείραμα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΩΤΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

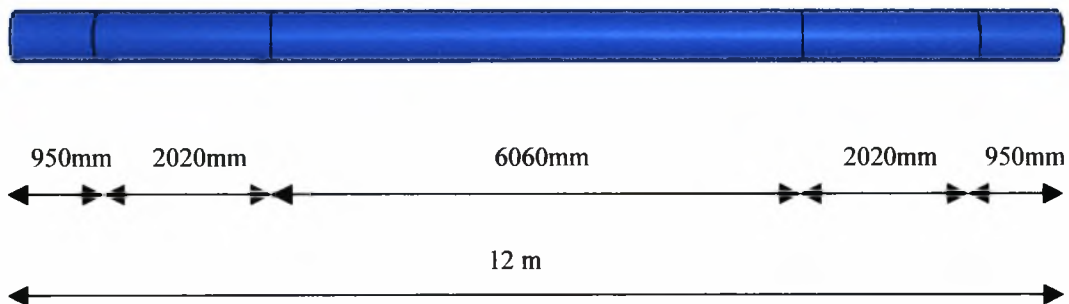
### 3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση του πρώτου σταδίου των πειραματικών δοκιμών με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης στον αγωγό δημιουργείται τοπικός λυγισμός μορφής ύβωσης (local buckling). Λόγω του ότι οι πειραματικές παρατηρήσεις δείχνουν ότι το σχήμα του τοπικού λυγισμού ενδέχεται να μην είναι συμμετρικό προσομοιώθηκε ολόκληρος ο αγωγός έτσι ώστε να πάρουμε την ακριβή μορφή του τοπικού λυγισμού. Η προσομοίωση έγινε με τετρακομβικά στοιχεία κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης (S4R), ενώ θεωρήθηκε μη γραμμική γεωμετρία με ελαστοπλαστικό υλικό και μοντέλο ιστροπικής κράτυνσης με κριτήριο διαρροής “Von Mises,,. Σε όλες τις περιπτώσεις κατασκευάστηκε πλέγμα πυκνότερο στην περιοχή σχηματισμού της τοπικής ύβωσης, ενώ στο υπόλοιπο του κελύφους το πλέγμα ήταν πιο αραιό.

### 3.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού

Η γεωμετρία του αγωγού σχεδιάστηκε στο Part Module του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού, όπως προέκυψαν από μετρήσεις (Gresnigt, 2002) είναι τα ακόλουθα:

- Εξωτερική διάμετρος:  $D_{out} = 610.7 \text{ mm}$
- Μέση ακτίνα του κελύφους:  $R=301.33 \text{ mm}$
- Λόγος διαμέτρου προς πάχος:  $D / t = 76$
- Πάχος:  $t = 8.03 \text{ mm}$



Σχήμα 3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού

Οι μη γραμμικότητες που αφορούν τη γεωμετρία του αγωγού κατά τη δημιουργία της τοπικής κύρτωσης λαμβάνονται υπόψη με την ενεργοποίηση της εντολής “nlgeom,, στο Step Module.

### 3.3 Ιδιότητες του υλικού του αγωγού

Ο αγωγός που αναλύεται υφίσταται μεγάλες παραμορφώσεις και για αυτό έπρεπε να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του υλικού κατάλληλα. Θεωρήθηκε ελαστοπλαστικό γραμμικά κρατυνόμενο υλικό και μοντέλο ισοτροπικής κράτυνσης με κριτήριο διαρροής “Von Mises,, Στο ABAQUS στην ελαστική περιοχή δόθηκαν οι εξής τιμές:

- Μέτρο ελαστικότητας:  $E = 210.000 \text{ MPa}$
- Λόγος Poisson:  $\nu = 0.3$

Όσον αφορά τη πλαστική περιοχή χρησιμοποιήθηκαν τιμές της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης αφού πρώτα τροποποιήθηκαν σε τιμές πραγματικής τάσης και λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης σύμφωνα με τους τύπους:

$$\sigma_t = \sigma_{nom} (1 + \epsilon_{nom}) \quad \epsilon^{pl} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) - \frac{\sigma_t}{E}$$

όπου  $\sigma_t$ ,  $\sigma_{nom}$ ,  $\epsilon^{pl}$ ,  $\epsilon_{nom}$  είναι η πραγματική τάση, η ονομαστική τάση, η πλαστική λογαριθμική παραμόρφωση και η πραγματική ονομαστική παραμόρφωση αντίστοιχα. Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι παραπάνω τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.

$\sigma_t$ (MPa)	$\epsilon^{pl}$
313.467	0
315.348	0.005982
317.695	0.013398
395.894	0.099609
482.294	0.178942
576.893	0.25241
679.693	0.32082

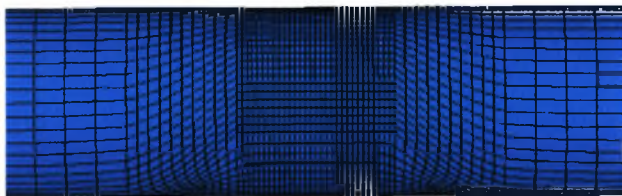
**Πίνακας 3.1** Τιμές ονομαστικής τάσης, παραμόρφωσης και πραγματικής τάσης, πλαστικής παραμόρφωσης.

### 3.4 Πλέγμα και στοιχεία κελύφους πεπερασμένων στοιχείων

Το πλέγμα σχεδιάστηκε πυκνότερο στη περιοχή κοντά στο μέσο του αγωγού κατά τη περιφερειακή καθώς και τη διαμήκη διεύθυνση και αραιότερο στον υπόλοιπο αγωγό. Συνολικά αποτελείται από 6400 κόμβους και 6356 στοιχεία. Στα σχήματα 3.2, 3.3, 3.4 παρουσιάζονται εικόνες από το πλέγμα.



Σχήμα 3.2 Πλέγμα Πεπερασμένων Στοιχείων.



Σχήμα 3.3 Δόμηση πλέγματος γύρω από τη μεσαία διατομή, στο πάνω μέρος του αγωγού.

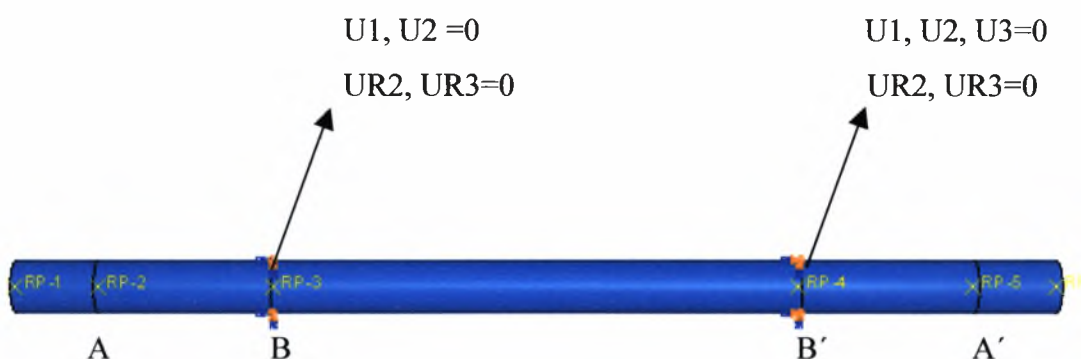


Σχήμα 3.4 Δόμηση πλέγματος γύρω από τη μεσαία διατομή, στο κάτω μέρος του αγωγού.

Στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία κελύφους S4R, τα οποία είναι 4-κομβικά στοιχεία κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης. Τα στοιχεία κελύφους είναι κατάλληλα για γεωμετρίες στις οποίες η μια διάσταση είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με κάποια άλλη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το πάχος είναι πολύ μικρότερο σε σύγκριση με τις υπόλοιπες διαστάσεις του αγωγού.

### 3.5 Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες καθορίστηκαν στο Load Module. Οι στηρίξεις στα σημεία B και B' είναι κύλιση και άρθρωση αντίστοιχα. Στο σημείο B δεσμεύτηκαν οι βαθμοί ελευθερίας U1, U2 (μετατόπιση στους άξονες 1 & 2 αντίστοιχα) και UR2, UR3 (στροφή στους άξονες 2 & 3 αντίστοιχα). Στο σημείο B' δεσμεύτηκαν οι βαθμοί ελευθερίας U1, U2, U3 και UR2, UR3.



Σχήμα 3.5 Συνοριακές Συνθήκες

Τα “καπάκια,, (capped ends) στα άκρα του σωλήνα προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας την εντολή “Kinematic-Coupling,,. Οι κόμβοι στις διατομές στα άκρα του σωλήνα μέσω αυτής της εντολής δεσμεύονται με κάποια σημεία αναφοράς (Reference Point –1, Ref. Point –6), τα οποία βρίσκονται στο κέντρο της διατομής. Έτσι, ολόκληρη η διατομή εκτελεί την ίδια κίνηση με το σημείο αναφοράς με τον οποίο είναι συνδεδεμένη. Με “Kinematic-Coupling,, συνδέονται επίσης οι διατομές A, B, B', A' με τα σημεία αναφοράς Ref Point 2, 3, 4, 5 αντίστοιχα.

### 3.6 Βήματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

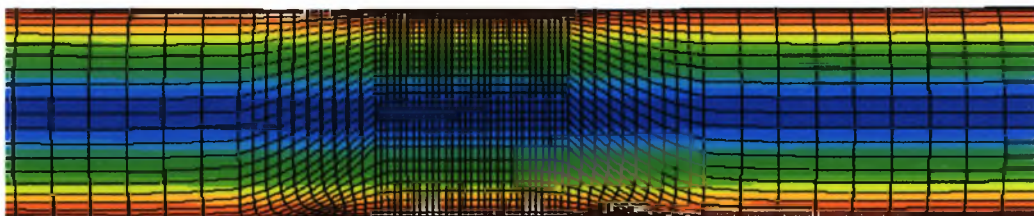
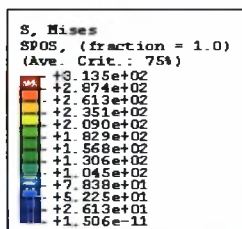
Τα βήματα της ανάλυσης καθορίστηκαν στο Step Module. Τα βήματα 1, 2, 3, 4 και 5 είναι κοινά στην προσομοίωση των δύο πρώτων πειραμάτων, ενώ η προσομοίωση του τρίτου πειράματος διαφέρει ως προς το δεύτερο βήμα, στο οποίο εφαρμόζεται λίγο μεγαλύτερη δύναμη από τον διεισδυτή. Η διαφοροποίηση αυτή έγινε για να επιτευχθεί η επιθυμητή μορφή λυγισμού η οποία στο τρίτο πείραμα διαφέρει από τα δυο πρώτα.

**Βήμα 1<sup>ο</sup>**

Στο πρώτο βήμα, στα σημεία αναφοράς RF-2 και RF-5 επιβάλλεται στον αγωγό μετατόπιση  $U_2=37.36$  mm ως προς τον άξονα 2. Οι κόμβοι στις διατομές στα παραπάνω σημεία, μέσω της εντολής Kinematic- Coupling, εκτελούν την ίδια κίνηση.



Σχήμα 3.6 Φόρτιση στο 1<sup>ο</sup> βήμα.

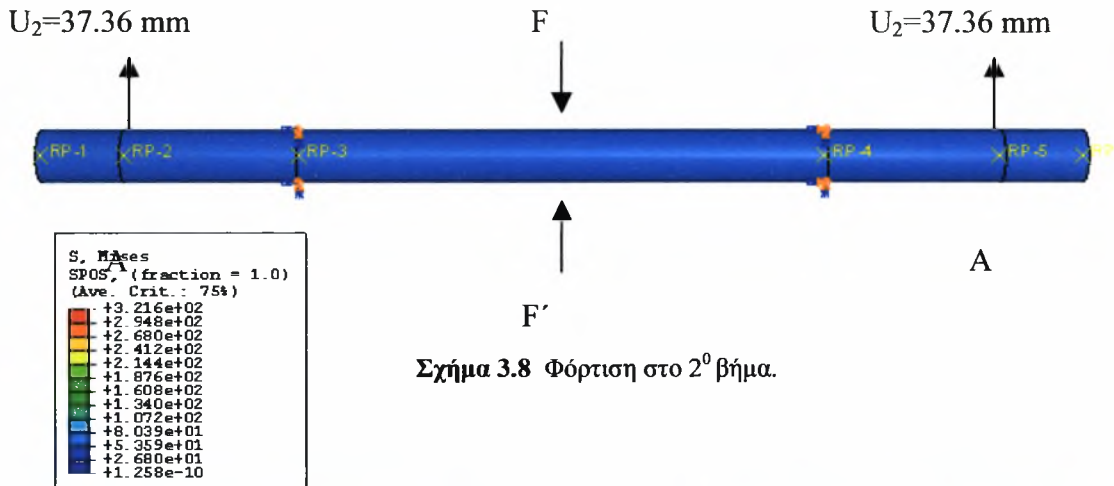


Σχήμα 3.7 Κατανομή τάσης Von Mises στο 1<sup>ο</sup> βήμα.

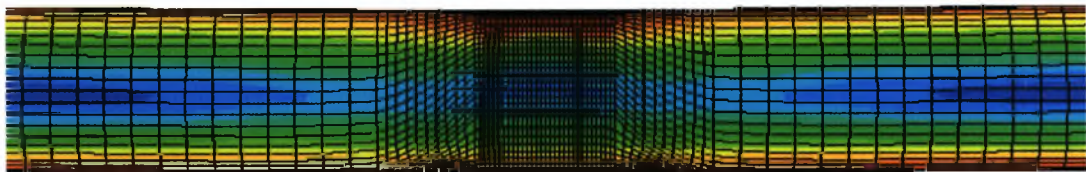
**Βήμα 2<sup>ο</sup>**

Στο δεύτερο βήμα, στα πειράματα 1 & 2 διατηρείται η μετατόπιση στον άξονα 2 σταθερή και εφαρμόζεται στο μέσο του αγωγού συγκεντρωμένη δύναμη  $F=50$  kN. Ταυτόχρονα το μέσο του αγωγού στηρίζεται με μια ίδια κατά μέτρο και αντίθετης φοράς δύναμη  $F'=-50$  kN. Ο λόγος εφαρμογής της δύναμης  $F$  είναι η δημιουργία τοπικού λυγισμού στο μέσο του αγωγού και όχι σε κάποιο άλλο σημείο. Στο τρίτο πείραμα η δύναμη που ασκείται είναι παρόμοια ( $F=55$  kN).





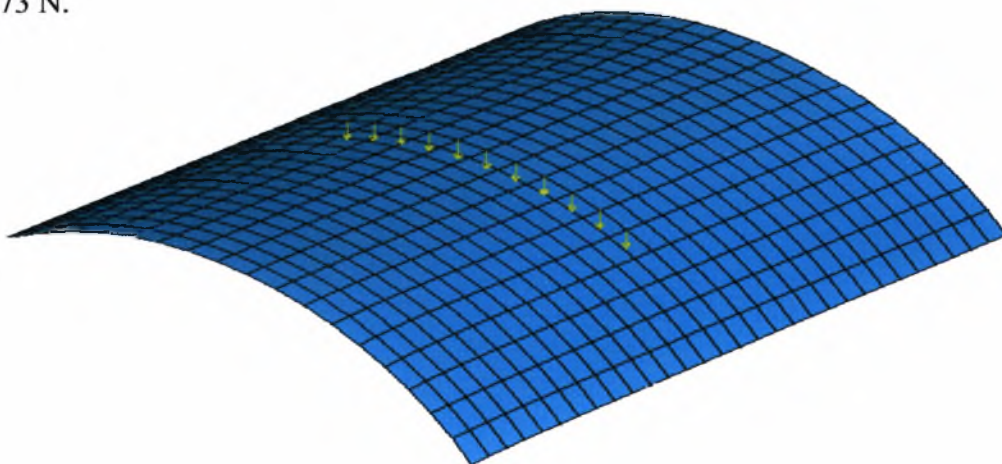
Σχήμα 3.8 Φόρτιση στο 2<sup>ο</sup> βήμα.



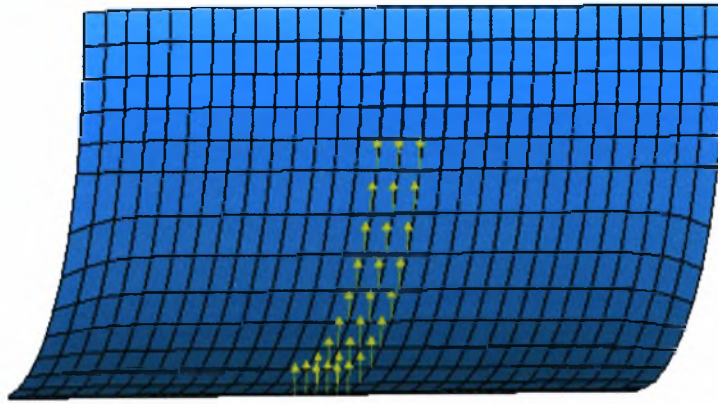
Σχήμα 3.9 Κατανομή τάσης Von Mises στο 2<sup>ο</sup> βήμα.



Παρακάτω παρουσιάζονται τα ακριβή σημεία εφαρμογής των δυνάμεων  $F$  και  $F'$ . Στο πρώτο και δεύτερο πείραμα η δύναμη  $F$  ασκείται στο πάνω μέρος της διατομής του αγωγού σε 11 κόμβους του πλέγματος σε κάθε έναν από τους οποίους εφαρμόζονται 4545.45N. Ενώ η δύναμη  $F'$  ασκείται στο κάτω μέρος της διατομής του αγωγού σε 63 κόμβους του πλέγματος σε κάθε έναν από τους οποίους εφαρμόζονται 793.65 N. Στο τρίτο πείραμα σε κάθε κόμβο που ασκείται η δύναμη  $F$  εφαρμόζονται 5000kN ενώ στους κόμβους που ασκείται η δύναμη  $F'$  εφαρμόζονται 873 N.



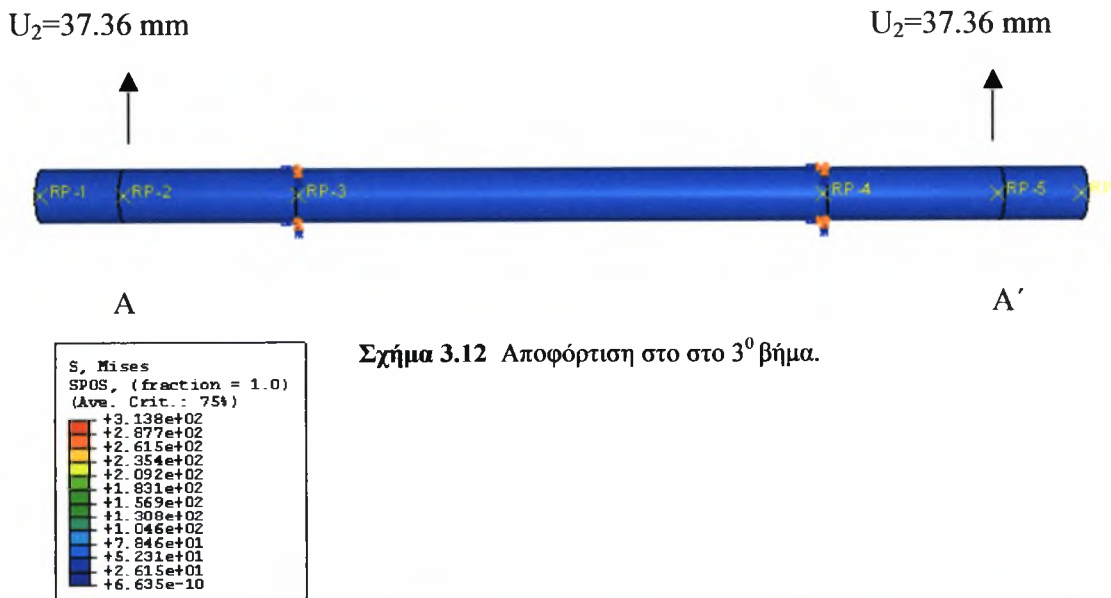
Σχήμα 3.10 Εφαρμογή δύναμης  $F$ , στο πάνω μέρος του αγωγού.



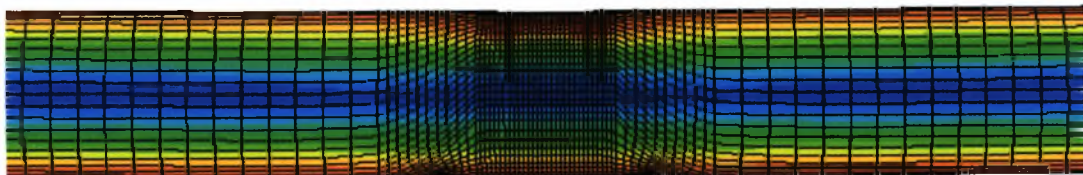
Σχήμα 3.11 Εφαρμογή δύναμης  $F'$ , στο κάτω μέρος του αγωγού.

**Βήμα 3<sup>ο</sup>**

Στο τρίτο βήμα, γίνεται αποφόρτιση του αγωγού από τις δυνάμεις  $F$  και  $F'$ , διατηρώντας και πάλι την μετατόπιση στον άξονα 2 σταθερή. Η αποφόρτιση πραγματοποιείται μέσω της εντολής “Cload, op=new,,



Σχήμα 3.12 Αποφόρτιση στο 3<sup>ο</sup> βήμα.



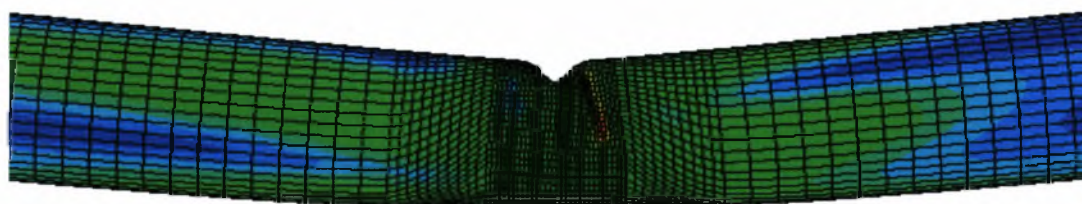
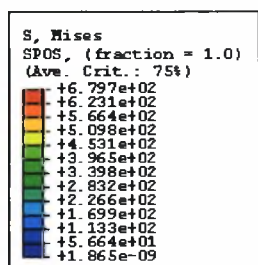
Σχήμα 3.13 Κατανομή τάσης Von Mises στο 3<sup>ο</sup> βήμα.

**Βήμα 4<sup>ο</sup>**

Στο τέταρτο βήμα, στα σημεία αναφοράς RF-2 και RF-5 εφαρμόζεται στον αγωγό επιπλέον μετατόπιση  $U_2=200\text{mm}$  ως προς τον άξονα 2.



Σχήμα 3.14 Φόρτιση στο 4<sup>ο</sup> βήμα.



Σχήμα 3.15 Κατανομή τάσης Von Mises στο 4<sup>ο</sup> βήμα.

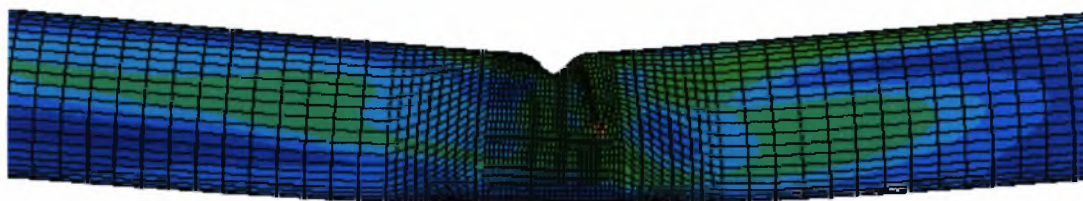


**Βήμα 5<sup>ο</sup>**

Στο πέμπτο βήμα, γίνεται αποφόρτιση του αγωγού μέσω της εντολής “Boundary, op=new,..”. Στο τέλος αυτού του βήματος ο αγωγός στα σημεία A και A’ έχει μετατοπισθεί κατά  $U_2=166\text{ mm}$  ως προς τον άξονα 2.

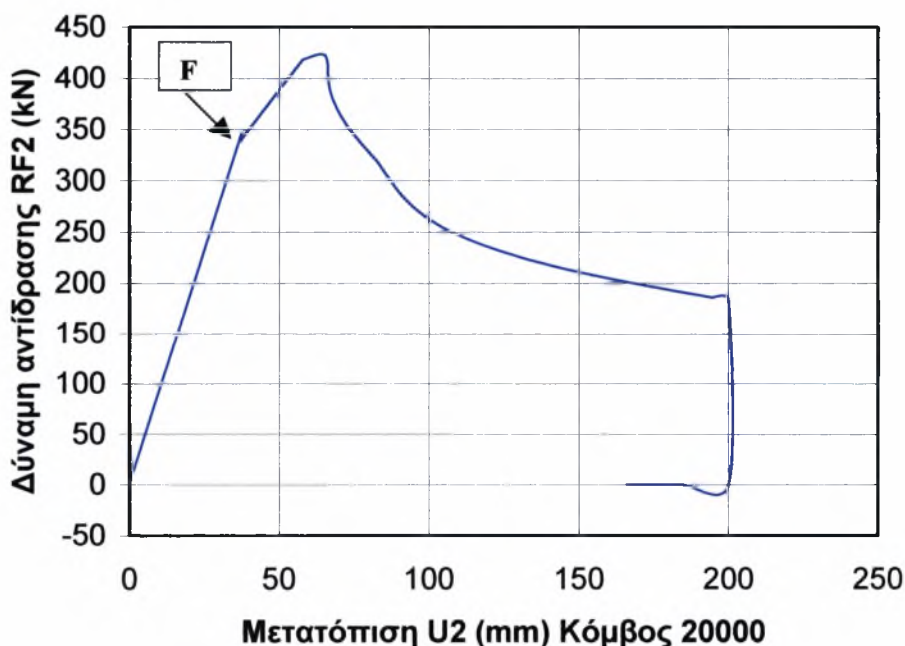


Σχήμα 3.16 Αποφόρτιση στο 5<sup>ο</sup> βήμα.

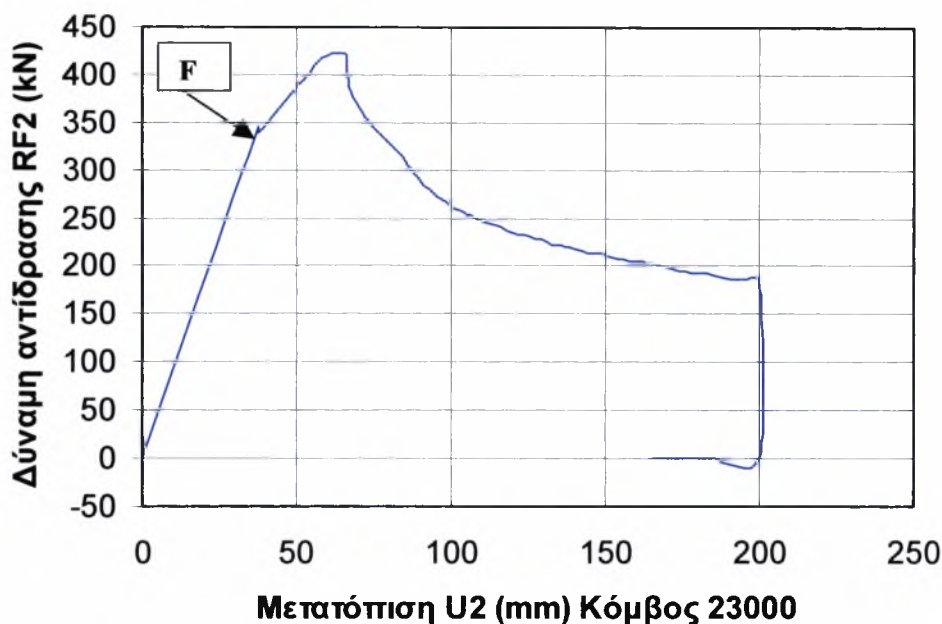


Σχήμα 3.17 Κατανομή τάσης Von Mises στο 5<sup>ο</sup> βήμα.

Στη συνέχεια στα σχήματα 3.18 έως 3.21 παρουσιάζονται τα διαγράμματα δύναμης μετατόπισης ( $RF_2-U_2$ ) κατά τη διάρκεια των πέντε βημάτων της προσομοίωσης του πρώτου σταδίου, όσον αφορά την προσομοίωση των δυο πρώτων πειραμάτων και την προσομοίωση του τρίτου πειράματος αντίστοιχα. Οι μετρήσεις των τιμών που χρησιμοποιήθηκαν για τα διαγράμματα έχουν γίνει στους κόμβους 20000 και 23000, οι οποίοι αντιστοιχούν στα σημεία αναφοράς RP-2 και RP-5 (σχήμα 3.5). Οι παραπάνω κόμβοι είναι συνδεδεμένοι μέσω της εντολής “Kinematic-Coupling”, με τις διατομές A και Ά στις οποίες επιβάλλεται η μετατόπιση  $U_2$  στο τέταρτο βήμα (σχήμα 3.14). Το σημείο F στα παρακάτω διαγράμματα αντιστοιχεί στο σημείο επιβολής της δύναμης από τον διεισδυτή στο δεύτερο βήμα της ανάλυσης.

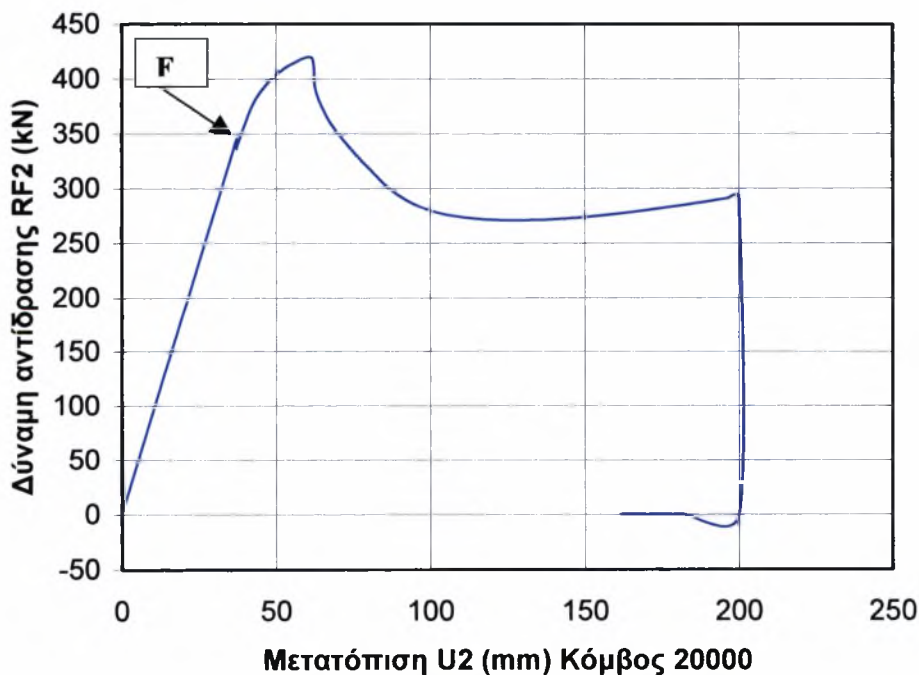


Σχήμα 3.18 Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης στον κόμβο 20000, για τη μορφή λυγισμού των πειραμάτων 1 & 2.

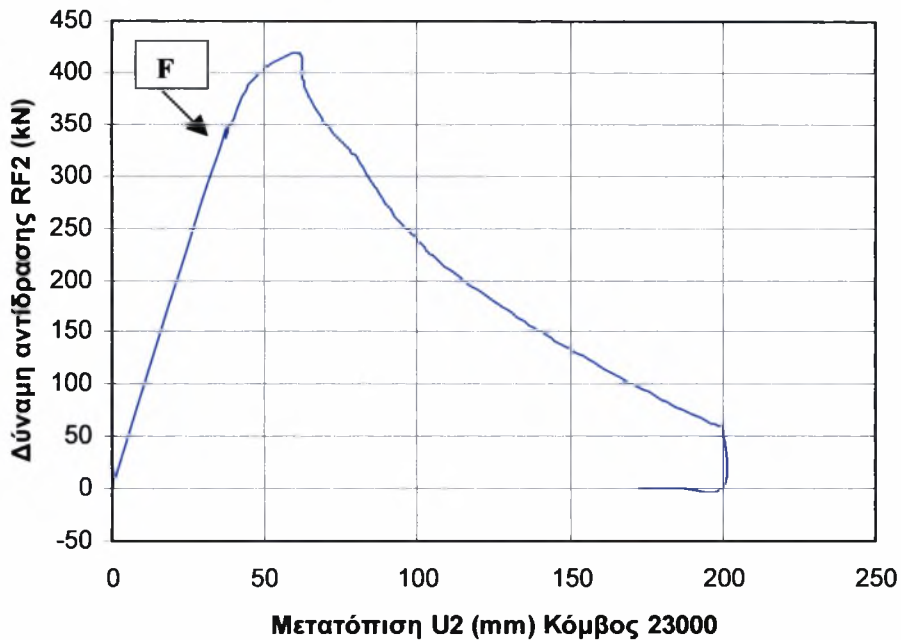


Σχήμα 3.19 Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης στον κόμβο 23000, για τη μορφή λυγισμού των πειραμάτων 1 & 2.

Από τα παραπάνω διαγράμματα (σχήματα 3.18 & 3.19), τα οποία αντιστοιχούν στην μορφή λυγισμού των δυο πρώτων πειραμάτων, παρατηρούμε ότι η δύναμη αντίδρασης είναι πρακτικά η ίδια στους κόμβους 20000 και 23000. Το παραπάνω συμβαίνει λόγω συμμετρίας της συγκεκριμένης μορφής λυγισμού (βλέπε σχήμα 2.4)



Σχήμα 3.20 Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης στον κόμβο 20000, για τη μορφή λυγισμού του 3<sup>ου</sup> πειράματος.

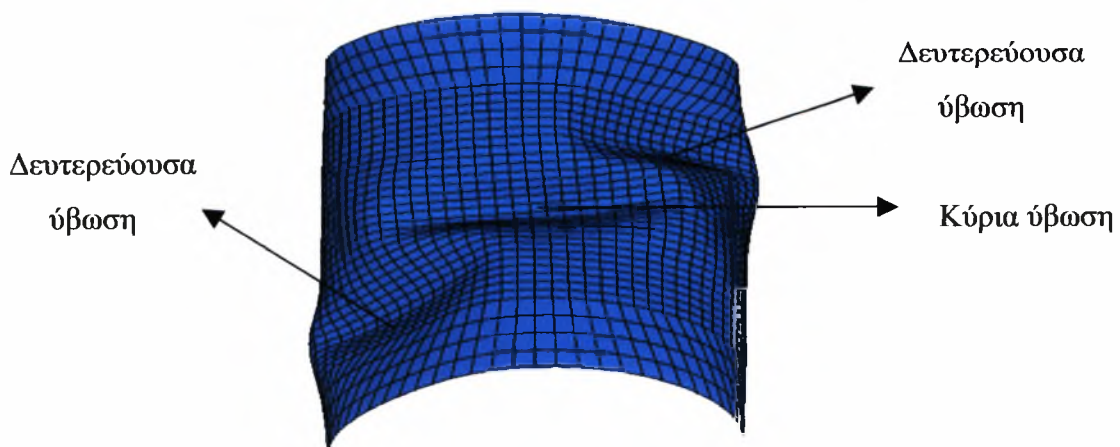


Σχήμα 3.21 Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης στον κόμβο 23000, για τη μορφή λυγισμού του 3<sup>ο</sup> πειράματος.

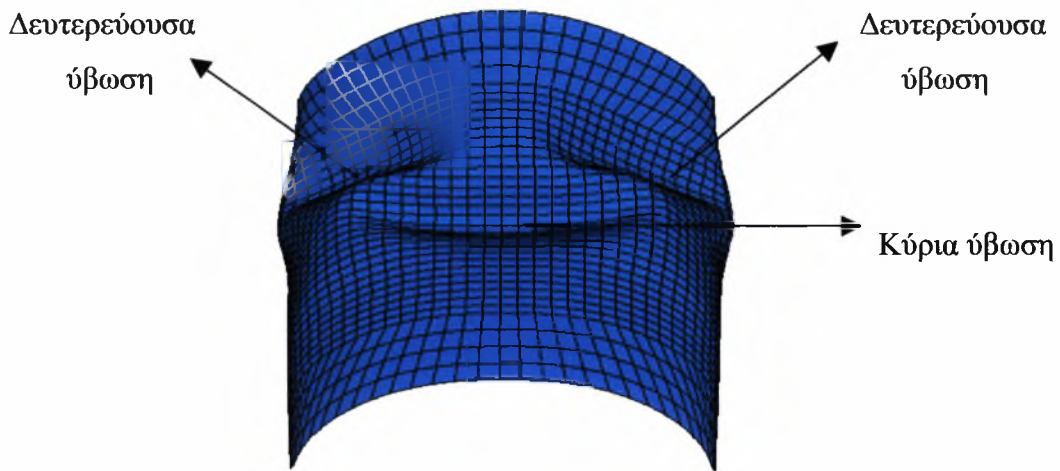
Από τα διαγράμματα 3.20 και 3.21 παρατηρούμε ότι η δύναμη αντίδρασης δεν είναι ίδια στους κόμβους 20000 και 23000. Το παραπάνω συμβαίνει λόγω μη συμμετρίας της μορφής λυγισμού του τρίτου πειράματος (βλέπε σχήμα 2.6).

### 3.7 Σύγκριση αριθμητικής ανάλυσης με τα πειράματα

Στα σχήματα 3.22 και 3.23 παρουσιάζεται η μορφή του τοπικού λυγισμού μετά το πρώτο στάδιο προσομοίωσης σύμφωνα με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η μορφή του τοπικού λυγισμού για το πρώτο και δεύτερο πείραμα είναι κοινή, ενώ διαφέρει στο τρίτο πείραμα.



Σχήμα 3.22 Μορφή τοπικού λυγισμού των πειραμάτων 1 & 2, σύμφωνα με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 3.23 Μορφή τοπικού λυγισμού του 3<sup>ου</sup> πειράματος, σύμφωνα με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Από τα παραπάνω σχήματα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στο πρώτο και δεύτερο πείραμα έχει δημιουργηθεί μια κύρια ύβωση στο μέσο του αγωγού και δυο δευτερεύουσες αντιδιαμετρικά της κύριας ύβωσης, ενώ στο τρίτο πείραμα μια κύρια ύβωση στο μέσο του αγωγού και δυο δευτερεύουσες προς την ίδια κατεύθυνση της κύριας ύβωσης, ακριβώς όπως και στις πειραματικές δοκιμές.



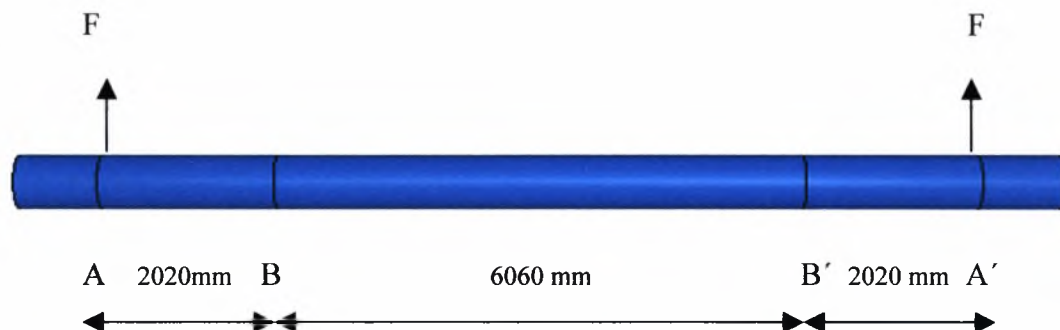
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

### 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση του δεύτερου σταδίου της ανάλυσης με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης, στα δυο πρώτα πειράματα, εφαρμόζεται κυκλική φόρτιση. Στο πρώτο πείραμα κυκλική φόρτιση με κάμψη και στο δεύτερο κυκλική φόρτιση με εσωτερική πίεση. Στο τρίτο πείραμα μελετάται το πως επηρεάζει η μονοτονική αύξηση της εσωτερικής πίεσης, με δεδομένη αρχική ατέλεια, την συμπεριφορά του αγωγού. Επιπλέον παρατίθενται τα αποτελέσματα σύγκρισης των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.

### 4.2 Βήματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, 1<sup>ου</sup> πειράματος

Όσον αφορά το πρώτο πείραμα, η προσομοίωση του δεύτερου σταδίου της ανάλυσης έγινε σε 16 βήματα (βήμα 6-βήμα 22). Αρχικά στον αγωγό εφαρμόστηκε εσωτερική πίεση  $p=0.1\text{MPa}$  η οποία, στα υπόλοιπα βήματα, διατηρήθηκε σταθερή. Στη συνέχεια επεβλήθησαν τέσσερις κύκλοι φόρτισης με κάμψη. Το παραπάνω πραγματοποιήθηκε επιβάλλοντας στις διατομές A και A' μετατόπιση με εύρος  $\Delta u$  κατά την διεύθυνση του άξονα 2, μέσω των εμβόλων τύπου A (σχήμα 2.1). Συγκεκριμένα επεβλήθησαν δυο κύκλοι φόρτισης με  $\Delta u=33.3\text{mm}$  και άλλοι δυο κύκλοι φόρτισης με  $\Delta u=50\text{mm}$ . Οι τιμές  $\Delta u=33.3\text{mm}$  και  $\Delta u=50\text{mm}$  είναι οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ( $\Delta u=50$  &  $\Delta u=75$ ) πολλαπλασιασμένες επί  $2/3$ . Ο συγκεκριμένος μειωτικός συντελεστής ( $2/3$ ) χρησιμοποιήθηκε έτσι ώστε να υπάρχει συμφωνία αναλυτικού μοντέλου και πειραματικών δοκιμών. Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά, ο υπολογισμός του μειωτικού συντελεστή και στη συνέχεια όλα τα βήματα της ανάλυσης.



Σχήμα 4.1 Δυνάμεις που ασκούνται στον αγωγό.



Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροπών για την παραπάνω φόρτιση. Οι στροφές  $\phi_1$  και  $\phi_2$ , οι οποίες αντιστοιχούν στις δυο περιοχές του διαγράμματος ροπών, δίνονται από τους εξής τύπους:

$$\phi_1 = \frac{M \cdot 3030}{EI}, \quad \phi_2 = \frac{M \cdot 1010}{EI}$$



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα ροπών για τη φόρτιση του σχήματος 4.1.

Η συνολική βύθιση του αγωγού ( $U$  μετατόπιση ως προς τον άξονα 2) στα σημεία  $A$  και  $A'$  (σχήμα 4.1) μπορεί να υπολογιστεί ως η διαφορά της βύθισης λόγω της στροφής  $\phi_1$  ( $U_1$ ) από την βύθιση λόγω της στροφής  $\phi_2$  ( $U_2$ ), δηλαδή  $U = U_2 + U_1 = \phi_1 \cdot 2020 + \phi_2 \cdot 2020 \cdot (2/3)$ . Με αντικατάσταση των παραπάνω τύπων η συνολική βύθιση τελικά δίνεται από τον τύπο:  $U = \frac{M}{EI} \cdot 7.481 \cdot 10^6$ , όπου  $M = F \cdot 2020$  και  $EI = E \pi R_{\text{εσ}}^3 t = 144.9 \cdot 10^{12}$ . Για δύναμη  $F = 300 \text{ kN}$ , η συνολική βύθιση που υπολογίζεται από αυτή τη μεθοδολογία είναι  $U = 32 \text{ mm}$ . Ωστόσο στις πειραματικές δοκιμές η συνολική βύθιση που μετρήθηκε ήταν  $U = 48 \text{ mm}$ , την οποία εάν πολλαπλασιάσουμε με τον συντελεστή  $2/3$  βρίσκουμε την θεωρητική συνολική βύθιση ( $32 \text{ mm}$ ). Συνεπώς για να υπάρχει συμφωνία μεταξύ αναλυτικού μοντέλου και πειραμάτων θα πρέπει οι τιμές της βύθισης που έχουν μετρηθεί πειραματικά να πολλαπλασιάζονται με τον συντελεστή  $2/3$ .

### Βήμα 6<sup>ο</sup>

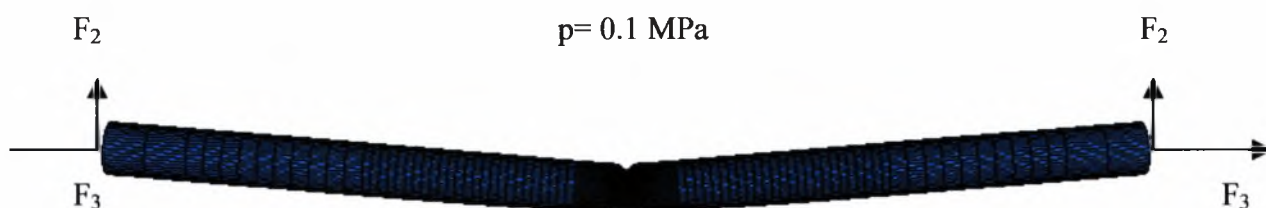
Στο έκτο βήμα, στον αγωγό επεβλήθη εσωτερική πίεση  $p = 0.1 \text{ MPa}$ . Στα άκρα του αγωγού εφαρμόστηκαν οι δυνάμεις  $F_2$  και  $F_3$ , οι οποίες είναι οι συνιστώσες ως προς τους άξονες 2 και 3, της συνολικής δύναμης που ασκείται στα “καπάκια”, λόγω πίεσης. Η συνολική δύναμη δίνεται από τον τύπο :

$$F_p = (\pi R_{\text{εσ}}^2) p$$

όπου,  $R_{\text{εσ}}$  είναι η εσωτερική ακτίνα του αγωγού και  $p$  η εσωτερική πίεση.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η εσωτερική ακτίνα είναι  $297.3 \text{ mm}$  και η πίεση είναι  $0.1 \text{ MPa}$ , έτσι σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο η συνολική δύναμη είναι  $F_p = 27774.2 \text{ N}$ .

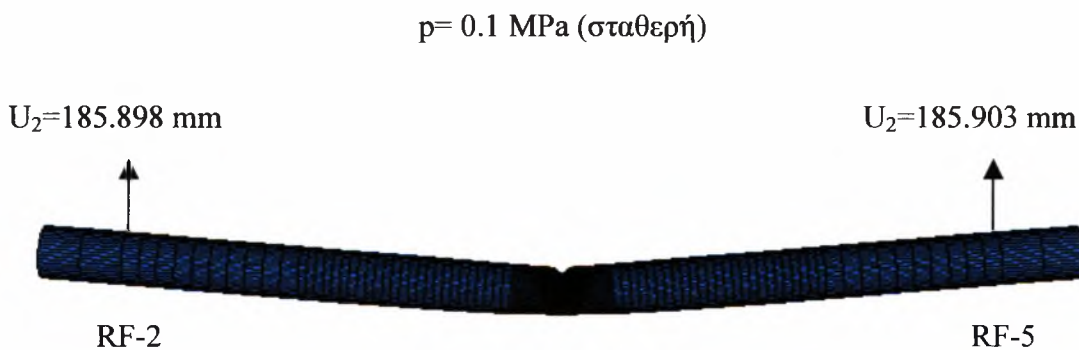
Παρακάτω παρατίθεται αναλυτικά ο υπολογισμός των συνιστωσών,  $F_2$  και  $F_3$ , της συνολικής δύναμης της πίεσης που ασκείται στα “καπάκια,, του αγωγού. Στο σημείο αναφοράς RF-1 η στροφή του αγωγού ως προς τον άξονα 1 είναι:  $\varphi=UR_1=0.082289 \text{ rad} = 4.7148124^\circ$  και οι αντίστοιχες συνιστώσες της δύναμης  $F_p$  είναι:  $F_3=-F_p \cos\varphi=-27680.2\text{N}$  και  $F_2=F_p \sin\varphi=2282.9\text{N}$ . Στο σημείο αναφοράς RF-6 η στροφή του αγωγού ως προς τον άξονα 1 είναι:  $\varphi=UR_1=-0.082235\text{rad} = -4.71151789^\circ$  και οι αντίστοιχες συνιστώσες της δύναμης  $F_p$  είναι  $F_2=F_p \sin\varphi=2281.3\text{N}$  και  $F_3=F_p \cos\varphi=-27680.4\text{N}$ .



Σχήμα 4.3 Φόρτιση στο 6<sup>ο</sup> βήμα.

### Βήμα 7<sup>ο</sup>

Στο έβδομο βήμα, στα σημεία αναφοράς RF-2 και RF-5 επιβάλλεται στον αγωγό μετατόπιση  $U_2=185.898\text{mm}$  (+20mm) και  $U_2=185.903\text{mm}$  (+20mm) αντίστοιχα, ως προς τον άξονα 2.



Σχήμα 4.4 Φόρτιση στο 7<sup>ο</sup> βήμα.

### Βήμα 8<sup>ο</sup>

Στο όγδοο βήμα, γίνεται αποφόρτιση του αγωγού μέσω της εντολής “Boundary, op=new,, διατηρώντας την εσωτερική πίεση σταθερή στα 0.1 MPa.

**Βήμα 9<sup>ο</sup>**

Στο ένατο βήμα, στα σημεία αναφοράς RF-2 και RF-5 επιβάλλεται στον αγωγό μετατόπιση  $U_2=152.598\text{mm}$  (-13.3mm) και  $U_2=152.603\text{mm}$  (-13.3mm) αντίστοιχα, ως προς τον άξονα 2.

**Βήμα 10<sup>ο</sup>**

Στο δέκατο βήμα, γίνεται αποφόρτιση του αγωγού μέσω της εντολής “Boundary, op=new,, διατηρώντας την εσωτερική πίεση σταθερή στα 0.1 MPa. Επομένως, ο πρώτος κύκλος φόρτισης με  $\Delta u=33.3\text{mm}$  πραγματοποιείται στα βήματα έξι έως δέκα. Στα βήματα 11, 12, 13 και 14, τα οποία αποτελούν επανάληψη των βημάτων 7, 8, 9 και 10 αντίστοιχα, πραγματοποιείται ο δεύτερος κύκλος φόρτισης με  $\Delta u=33.3\text{mm}$ .

**Βήμα 15<sup>ο</sup>**

Στο δεκατοπέμπτο βήμα, στα σημεία αναφοράς RF-2 και RF-5 επιβάλλεται στον αγωγό μετατόπιση  $U_2=195.898\text{mm}$  (+30mm) και  $U_2=195.903\text{mm}$  (+30mm) αντίστοιχα, ως προς τον άξονα 2.

**Βήμα 16<sup>ο</sup>**

Στο δεκατοέκτο βήμα, γίνεται αποφόρτιση του αγωγού μέσω της εντολής “Boundary, op=new,, διατηρώντας την εσωτερική πίεση σταθερή στα 0.1 MPa.

**Βήμα 17<sup>ο</sup>**

Στο δεκατοέβδομο βήμα, στα σημεία αναφοράς RF-2 και RF-5 επιβάλλεται στον αγωγό μετατόπιση  $U_2=145.898\text{mm}$  (-20mm) και  $U_2=145.903\text{mm}$  (-20mm) αντίστοιχα, ως προς τον άξονα 2.

**Βήμα 18<sup>ο</sup>**

Στο δεκατοόγδοο βήμα, γίνεται αποφόρτιση του αγωγού μέσω της εντολής “Boundary, op=new,, διατηρώντας την εσωτερική πίεση σταθερή στα 0.1 MPa. Ο δεύτερος κύκλος φόρτισης με  $\Delta u=50\text{mm}$  πραγματοποιείται στα βήματα δεκαπέντε έως δεκαοκτώ. Στα βήματα 19, 20, 21 και 22, τα οποία αποτελούν επανάληψη των βημάτων 15, 16, 17 και 18 αντίστοιχα, πραγματοποιείται ο δεύτερος κύκλος φόρτισης με  $\Delta u=50\text{mm}$ .

### 4.3 Βήματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, 2<sup>ου</sup> πειράματος

Στο δεύτερο πείραμα, η προσομοίωση του δεύτερου σταδίου της ανάλυσης έγινε σε 14 βήματα (βήμα 6-βήμα 19). Αρχικά υπό σταθερή εσωτερική πίεση  $p=0.1$  MPa εφαρμόστηκαν δυο κύκλοι φόρτισης με  $\Delta u=20\text{mm}$ . Η τιμή  $\Delta u=20\text{mm}$  είναι η τιμή που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ( $\Delta u=30\text{mm}$ ) πολλαπλασιασμένη επί  $2/3$ . Στη συνέχεια επεβλήθησαν δυο κύκλοι φόρτισης με εσωτερική πίεση η οποία κυμαινόταν από  $0.05$  έως  $0.1$  MPa. Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά όλα τα βήματα της ανάλυσης.

#### Βήμα 6<sup>ο</sup>

Στο έκτο βήμα, στον αγωγό επεβλήθη εσωτερική πίεση  $p=0.1$  MPa. Στα άκρα του αγωγού εφαρμόστηκαν οι δυνάμεις  $F_2$  και  $F_3$ , οι οποίες είναι οι συνιστώσες ως προς τους άξονες 2 και 3, της συνολικής δύναμης που ασκείται στα καπάκια λόγω πίεσης. Η συνολική δύναμη δίνεται από τον τύπο :

$$F_p = (\pi R_{\text{εσ}}^2) p$$

όπου,  $R_{\text{εσ}}$  είναι η εσωτερική ακτίνα του αγωγού και  $p$  η εσωτερική πίεση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η εσωτερική ακτίνα είναι  $297.3\text{mm}$  και η πίεση είναι  $0.1\text{MPa}$ , έτσι σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο η συνολική δύναμη είναι  $F_p=27774.2\text{N}$ . Παρακάτω παρατίθεται αναλυτικά ο υπολογισμός των συνιστωσών,  $F_2$  και  $F_3$ , της συνολικής δύναμης της πίεσης που ασκείται στα “καπάκια”, του αγωγού. Στο σημείο αναφοράς RF-1 η στροφή του αγωγού ως προς τον άξονα 1 είναι:  $\varphi=UR_1=0.082289 \text{ rad} = 4.7148124^\circ$  και οι αντίστοιχες συνιστώσες της δύναμης  $F_p$  είναι:  $F_3=-F_p \cos\varphi=-27680.2\text{N}$  και  $F_2= F_p \sin\varphi=2282.9\text{N}$ . Στο σημείο αναφοράς RF-6 η στροφή του αγωγού ως προς τον άξονα 1 είναι:  $\varphi=UR_1=-0.082235\text{rad}=-4.71151789^\circ$  και οι αντίστοιχες συνιστώσες της δύναμης  $F_p$  είναι:  $F_2=F_p \sin\varphi=2281.3\text{N}$  και  $F_3= F_p \cos \varphi=-27680.4\text{N}$ .



Σχήμα 4.5 Φόρτιση στο 6<sup>ο</sup> βήμα.

**Βήμα 7°**

Στο έβδομο βήμα, στα σημεία αναφοράς RF-2 και RF-5 επιβάλλεται στον αγωγό μετατόπιση  $U_2=179.198\text{mm}$  (+13.3mm) και  $U_2=179.203\text{mm}$  (+13.3mm) αντίστοιχα, ως προς τον άξονα 2.



Σχήμα 4.6 Φόρτιση στο 7<sup>ο</sup> βήμα.

**Βήμα 8°**

Στο όγδοο βήμα, γίνεται αποφόρτιση του αγωγού μέσω της εντολής “Boundary, op=new,, διατηρώντας την εσωτερική πίεση σταθερή στα 0.1 MPa.

**Βήμα 9°**

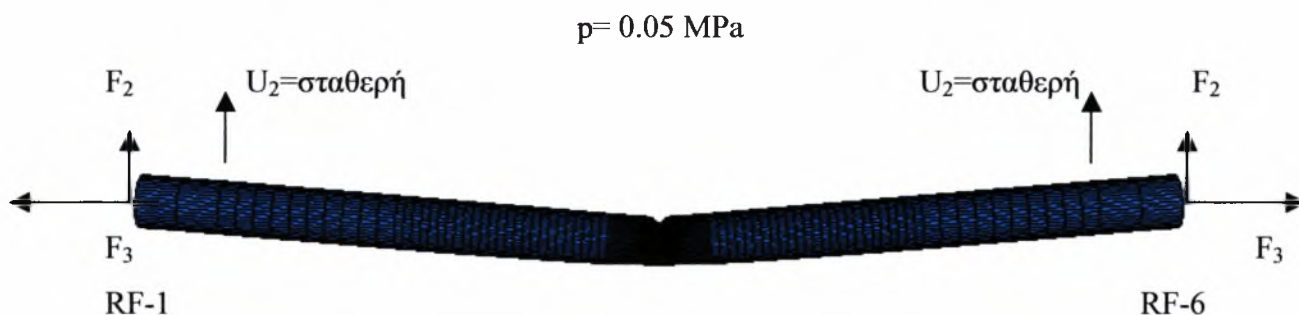
Στο ένατο βήμα, στα σημεία αναφοράς RF-2 και RF-5 επιβάλλεται στον αγωγό μετατόπιση  $U_2=159.298\text{mm}$  (-6.6mm) και  $U_2=159.303\text{mm}$  (-6.6mm) αντίστοιχα, ως προς τον άξονα 2.

**Βήμα 10°**

Στο δέκατο βήμα, γίνεται αποφόρτιση του αγωγού μέσω της εντολής “Boundary, op=new,, διατηρώντας την εσωτερική πίεση σταθερή στα 0.1 MPa. Ο πρώτος κύκλος φόρτισης με  $\Delta u=20\text{mm}$  πραγματοποιείται στα βήματα έξι έως δέκα. Στα βήματα 11, 12, 13 και 14, τα οποία αποτελούν επανάληψη των βημάτων 7, 8, 9 και 10 αντίστοιχα, πραγματοποιείται ο δεύτερος κύκλος φόρτισης με  $\Delta u=20\text{mm}$ .

**Βήμα 15°**

Στο δεκατοπέμπτο βήμα, εφαρμόζεται εσωτερική πίεση  $p=0.05\text{MPa}$ , διατηρώντας τη μετατόπιση  $U_2$  στα σημεία RF-2 και RF-5 σταθερή.

Σχήμα 4.7 Φόρτιση στο 15<sup>ο</sup> βήμα.

Παρακάτω παρατίθεται αναλυτικά ο υπολογισμός των συνιστωσών,  $F_2$  και  $F_3$ , της συνολικής δύναμης της πίεσης που ασκείται στα “καπάκια,, του αγωγού. Στο σημείο αναφοράς RF-1 η στροφή του αγωγού ως προς τον άξονα 1 είναι:  $\varphi = UR_1 = 0.0808027 \text{ rad} = 4.62965368^\circ$  και οι αντίστοιχες συνιστώσες της δύναμης  $F_p$  είναι:  $F_3 = -F_p \cos \varphi = -13841.8 \text{ N}$  και  $F_2 = F_p \sin \varphi = 1120.9 \text{ N}$ . Στο σημείο αναφοράς RF-6 η στροφή του αγωγού ως προς τον άξονα 1 είναι:  $\varphi = UR_1 = -0.0808051 \text{ rad} = -4.6297911^\circ$  και οι αντίστοιχες συνιστώσες της δύναμης  $F_p$  είναι:  $F_3 = F_p \cos \varphi = 13842.13 \text{ N}$  και  $F_2 = F_p \sin \varphi = 1116.77 \text{ N}$ .

### Βήμα 16<sup>ο</sup>

Στο δεκατοέκτο βήμα, εφαρμόζεται εσωτερική πίεση  $p = 1 \text{ MPa}$ , διατηρώντας τη μετατόπιση  $U_2$  στα σημεία RF-2 και RF-5 σταθερή. Στο σημείο αναφοράς RF-1 οι συνιστώσες της δύναμης  $F_p$  είναι:  $F_3 = -F_p \cos \varphi = -276836 \text{ N}$  και  $F_2 = F_p \sin \varphi = 22418 \text{ N}$ . Στο σημείο αναφοράς RF-6 οι συνιστώσες της δύναμης  $F_p$  είναι:  $F_3 = F_p \cos \varphi = 276842.6$  και  $F_2 = F_p \sin \varphi = 22335.4 \text{ N}$ .

### Βήμα 17<sup>ο</sup>

Στο δεκατοπέμπτο βήμα, εφαρμόζεται εσωτερική πίεση  $p = 0.05 \text{ MPa}$ , διατηρώντας τη μετατόπιση  $U_2$  στα σημεία RF-2 και RF-5 σταθερή. Ο πρώτος κύκλος φόρτισης με εσωτερική πίεση πραγματοποιείται στα βήματα δεκαπέντε έως δεκαεπτά. Στα βήματα 18 και 19, τα οποία αποτελούν επανάληψη των βημάτων 16 και 17 αντίστοιχα, πραγματοποιείται ο δεύτερος κύκλος φόρτισης.

#### 4.4 Βήματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, 3<sup>ου</sup> πειράματος

Στο τρίτο πείραμα, η προσομοίωση του δεύτερου σταδίου της ανάλυσης έγινε σε 8 βήματα (βήμα6-βήμα13). Αρχικά διατηρώντας την μετατόπιση  $U_2$  σταθερή στα σημεία RF-2 και RF-5 επεβλήθη εσωτερική πίεση  $p=0.1$  MPa και εφαρμόστηκαν δυο κύκλοι φόρτισης με εσωτερική πίεση που κυμαινόταν από 0.05 έως 1 MPa. Στη συνέχεια στα σημεία RF-2 και RF-5 επεβλήθη στον αγωγό μετατόπιση  $U_2=50$ mm ως προς τον άξονα 2 και αυξήθηκε η εσωτερική πίεση έως την αστοχία του αγωγού. Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά όλα τα βήματα της ανάλυσης.

##### Βήμα 6°

Στο έκτο βήμα, στον αγωγό επεβλήθη εσωτερική πίεση  $p=0.1$ MPa, διατηρώντας τη μετατόπιση  $U_2$  στα σημεία RF-2 και RF-5 σταθερή. Στα άκρα του αγωγού εφαρμόστηκαν οι δυνάμεις  $F_2$  και  $F_3$ , οι οποίες είναι οι συνιστώσες ως προς τους άξονες 2 και 3, της συνολικής δύναμης που ασκείται στα καπάκια λόγω πίεσης. Η συνολική δύναμη δίνεται από τον τύπο :

$$F_p = (\pi R_{\text{εσ}}^2) p$$

όπου,  $R_{\text{εσ}}$  είναι η εσωτερική ακτίνα του αγωγού και  $p$  η εσωτερική πίεση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η εσωτερική ακτίνα είναι 297.3mm και η πίεση είναι 0.1MPa, έτσι σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο η συνολική δύναμη είναι  $F_p=27774.2$ N. Παρακάτω παρατίθεται αναλυτικά ο υπολογισμός των δυνάμεων  $F_2$  και  $F_3$ . Στο σημείο αναφοράς RF-1 η στροφή του αγωγού ως προς τον άξονα 1 είναι:  $\varphi=UR_1=0.0856979$ rad= $4.91012798^\circ$  και οι αντίστοιχες συνιστώσες της δύναμης  $F_p$  είναι:  $F_3=-F_p \cos\varphi=-27672.3$ N και  $F_2=F_p \sin\varphi=2377.3$ N. Στο σημείο αναφοράς RF-6 η στροφή του αγωγού ως προς τον άξονα 1 είναι:  $\varphi=UR_1=-0.0800825$ rad= $-4.58838926^\circ$  και οι αντίστοιχες συνιστώσες της δύναμης  $F_p$  είναι:  $F_3=F_p \cos\varphi=27685.2$ N και  $F_2=F_p \sin\varphi=2221.85$ N.



Σχήμα 4.8 Φόρτιση στο 6° βήμα.

**Βήμα 7°**

Στο έβδομο βήμα, εφαρμόζεται εσωτερική πίεση  $p=0.05$  MPa, διατηρώντας τη μετατόπιση  $U_2$  στα σημεία RF-2 και RF-5 σταθερή. Στο σημείο αναφοράς RF-1 οι συνιστώσες της δύναμης  $F_p$  είναι:  $F_3=-F_p \cos \varphi=-13836.15$  N και  $F_2= F_p \sin \varphi=1188.65$ .

Στο σημείο αναφοράς RF-6 οι συνιστώσες της δύναμης  $F_p$  είναι:  $F_3=F_p \cos \varphi=13842.6$  N και  $F_2= F_p \sin \varphi=1110.9$  N.

**Βήμα 8°**

Στο όγδοο βήμα, εφαρμόζεται εσωτερική πίεση  $p=1$  MPa, διατηρώντας τη μετατόπιση  $U_2$  στα σημεία RF-2 και RF-5 σταθερή.

**Βήμα 9°**

Στο ένατο βήμα, εφαρμόζεται εσωτερική πίεση  $p=0.05$  MPa, διατηρώντας τη μετατόπιση  $U_2$  στα σημεία RF-2 και RF-5 σταθερή. Ο πρώτος κύκλος φόρτισης με εσωτερική πίεση πραγματοποιείται στα βήματα επτά έως εννέα. Στα βήματα 11 και 11, τα οποία αποτελούν επανάληψη των βημάτων 8 και 9 αντίστοιχα, πραγματοποιείται ο δεύτερος κύκλος φόρτισης.

**Βήμα 12°**

Στο δωδέκατο βήμα, στα σημεία αναφοράς RF-2 και RF-5 επιβάλλεται στον αγωγό μετατόπιση  $U_2=50$  mm ως προς τον άξονα 2.



Σχήμα 4.9 Φόρτιση στο 12° βήμα.

**Βήμα 13°**

Στο δεκατο τρίτο βήμα, εφαρμόζεται εσωτερική μονοτονικά αυξανόμενη.



$$p = 11.3 \text{ MPa}$$

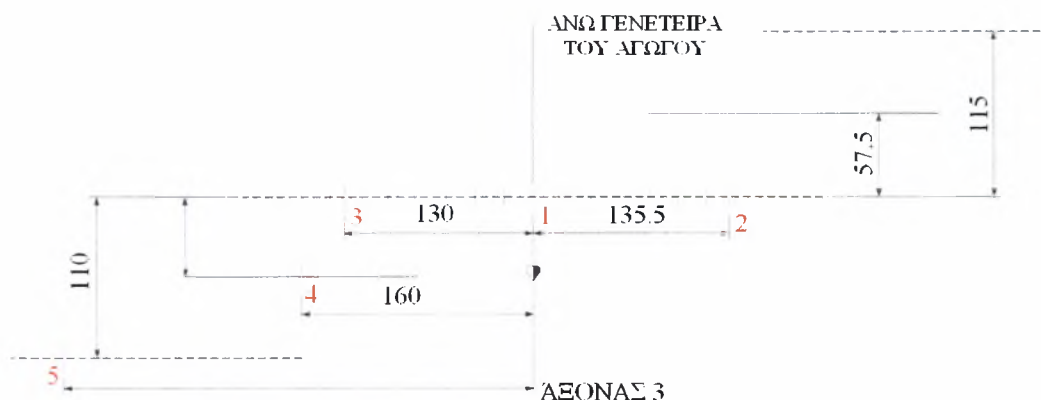


Σχήμα 4.10 Φόρτιση στο 13<sup>ο</sup> βήμα.

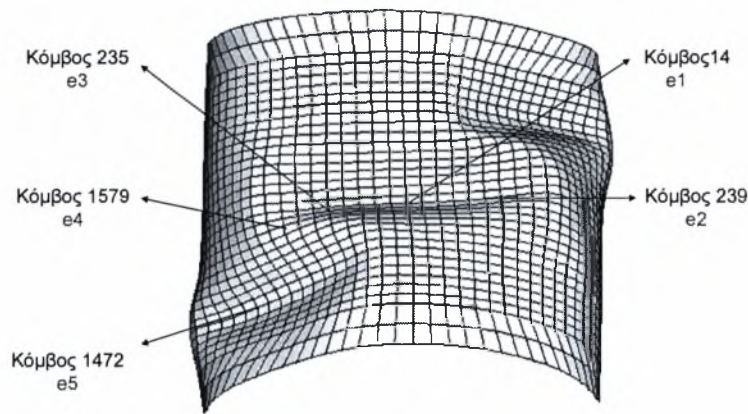
Στο σημείο αναφοράς RF-1 οι συνιστώσες της δύναμης  $F_p$  είναι:  $F_3 = -F_p \cos\varphi = -3137591.181 \text{ N}$  και  $F_2 = F_p \sin\varphi = 74996.43 \text{ N}$ . Στο σημείο αναφοράς RF-6 οι συνιστώσες της δύναμης  $F_p$  είναι:  $F_3 = F_p \cos\varphi = 3137580.121$  και  $F_2 = F_p \sin\varphi = 75457.65 \text{ N}$

#### 4.5 Σύγκριση αριθμητικών–πειραματικών αποτελεσμάτων, Πείραμα 1<sup>ο</sup>

Ο υπολογισμός των λογαριθμικών παραμορφώσεων έγινε στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού στα σημεία όπου τα μηκυνσιόμετρα (strain gauges) είχαν τοποθετηθεί κατά τη διάρκεια του πειράματος (Σχήμα 4.11). Κατά την πειραματική διαδικασία τα μηκυνσιόμετρα τοποθετήθηκαν κατά την διαμήκη διεύθυνση, στην παραμορφωμένη κατάσταση πριν από την επιβολή των κύκλων φόρτισης με εσωτερική πίεση. Τα σημεία των πειραματικών μετρήσεων  $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5$  αντιστοιχούν στους κόμβους του πλέγματος 14, 319, 235, 1579 και 1472 αντίστοιχα (Σχήμα 4.12). Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα ακριβή σημεία της τοποθέτησης των μηκυνσιομέτρων σύμφωνα με τις πειραματικές δοκιμές.



Σχήμα 4.11 Σημεία τοποθέτησης των μηκυνσιομέτρων, σύμφωνα με τις πειραματικές δοκιμές



**Σχήμα 4.12** Σημεία μέτρησης στην αριθμητική ανάλυση του 1<sup>ου</sup> πειράματος, αντίστοιχα με τις θέσεις μέτρησης στο πείραμα.

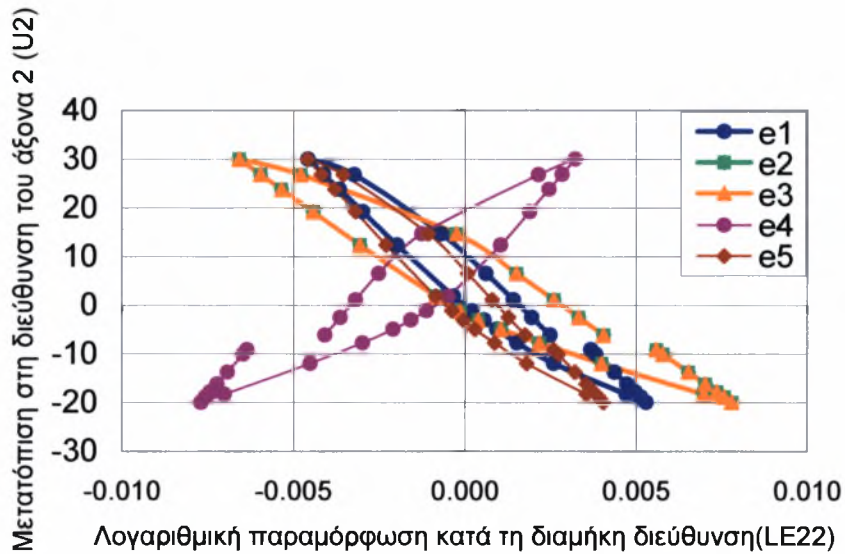
Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα όσον αφορά το εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση ( $\Delta LE22$ ) μετά τον πρώτο κύκλο φόρτισης, υπό σταθερή πίεση ( $p=0.1\text{MPa}$ ), για  $\Delta u=50\text{mm}$  και  $\Delta u=75\text{mm}$  αντίστοιχα.

**Εύρος λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση,**  
**για  $\Delta u=50\text{mm}$  και  $\Delta u=75\text{mm}$ ,  $p=0.1\text{MPa}$  (σταθερή)**

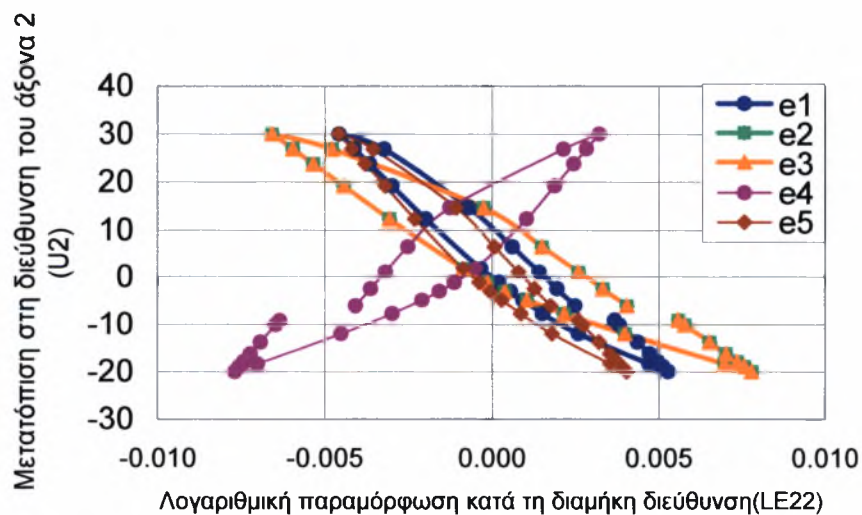
Σημείο Μέτρησης	$\Delta u=50\text{mm}$		$\Delta u=75\text{mm}$	
	$\Delta LE22$ Πειραματικό	$\Delta LE22$ Αριθμητικό	$\Delta LE22$ Πειραματικό	$\Delta LE22$ Αριθμητικό
<b>e1 (14)</b>	$6.1 \times 10^{-3}$	$6.48 \times 10^{-3}$	$14.1 \times 10^{-3}$	$9.87 \times 10^{-3}$
<b>e2 (319)</b>	$9.5 \times 10^{-3}$	$9.33 \times 10^{-3}$	$21 \times 10^{-3}$	$14.4 \times 10^{-3}$
<b>e3 (235)</b>	$9.4 \times 10^{-3}$	$9.33 \times 10^{-3}$	$19 \times 10^{-3}$	$14.4 \times 10^{-3}$
<b>e4 (1579)</b>	$7.3 \times 10^{-3}$	$7.06 \times 10^{-3}$	$18.5 \times 10^{-3}$	$10.9 \times 10^{-3}$
<b>e5 (1472)</b>	$5.8 \times 10^{-3}$	$5.37 \times 10^{-3}$	$14.5 \times 10^{-3}$	$8.64 \times 10^{-3}$

**Πίνακας 4.1** Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών τιμών του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση, μετά τον πρώτο κύκλο φόρτισης, για  $\Delta u=50\text{mm}$  και για  $\Delta u=75\text{mm}$ ,  $p=0.1\text{MPa}$  (σταθερή).

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι πάρα πολύ κοντά στις πειραματικές μετρήσεις όσον αφορά τη περίπτωση όπου το εύρος της μετατόπισης είναι  $\Delta u=50\text{mm}$  και αρκετά κοντά στη περίπτωση όπου είναι  $\Delta u=75\text{mm}$ . Στα σχήματα 4.13 και 4.14 παρουσιάζονται τα διαγράμματα μετατόπισης( $U_2$ )-λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τον διαμήκη άξονα (LE22), μετά τον πρώτο κύκλο φόρτισης υπό σταθερή πίεση ( $p=0.1\text{MPa}$ ) για  $\Delta u=50\text{mm}$  και  $\Delta u=75\text{mm}$  αντίστοιχα.

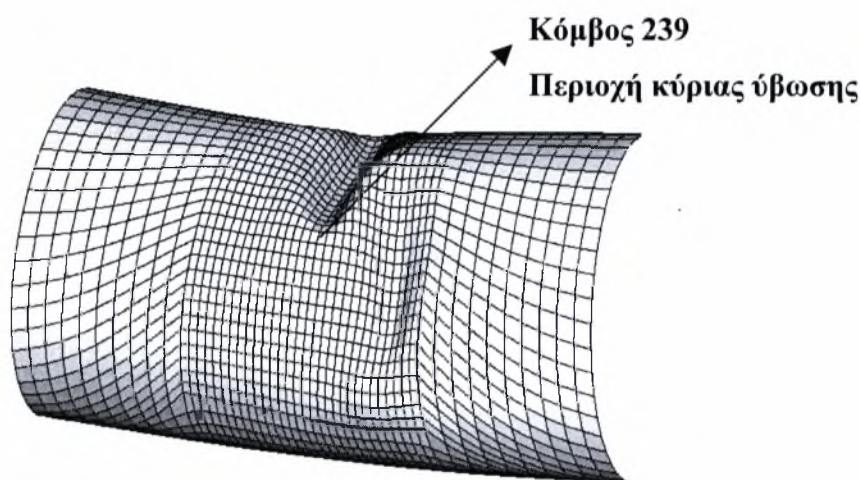


**Σχήμα 4.13** Διάγραμμα μετατόπισης -λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση , για  $\Delta u=50\text{mm}$  και  $p=0.1\text{MPa}$  (σταθερή).



**Σχήμα 4.14** Διάγραμμα μετατόπισης -λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση , για  $\Delta u=75\text{mm}$  και  $p=0.1\text{MPa}$  (σταθερή)..

Κατά τη διεξαγωγή του πρώτου πειράματος η αστοχία επήλθε μετά από 98 κύκλους φόρτισης με μετατόπιση εύρους  $\Delta u=75\text{mm}$ . Η ρωγή εμφανίστηκε κατά την περιφερειακή διεύθυνση στην περιοχή της κύριας ύβωσης (2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, σχήμα 2.6). Σύμφωνα με τα αριθμητικά αποτελέσματα οι λογαριθμικές παραμορφώσεις κατά τη διαμήκη διεύθυνση είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στην περιφερειακή. Συνεπώς το γεγονός ότι το ρήγμα δημιουργήθηκε κατά την περιφερειακή διεύθυνση υποστηρίζεται από την αριθμητική ανάλυση. Η μέγιστη τιμή του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την διαμήκη διεύθυνση εμφανίζεται στον κόμβο 239 ο οποίος έχει τη θέση που φαίνεται στο σχήμα 4.15. Ο κόμβος βρίσκεται στην άκρη της περιοχής της κύριας ύβωσης, εκεί όπου δημιουργήθηκε το ρήγμα κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.



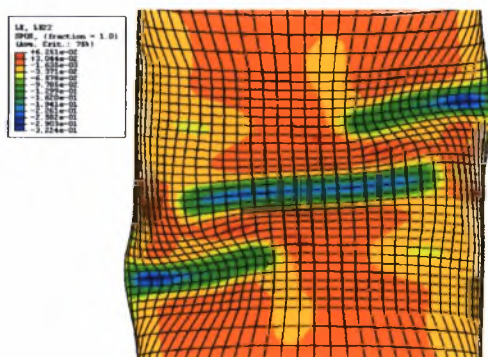
**Σχήμα 4.15** Σημείο εκτίμησης δημιουργίας ρωγής, σύμφωνα με την αριθμητική ανάλυση.

Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την διαμήκη διεύθυνση και η αντίστοιχη κατά τη περιφερειακή, στον κόμβο 239, μετά τον πρώτο και δεύτερο κύκλο φόρτισης για  $\Delta u=75\text{mm}$ . Είναι χαρακτηριστικό το ότι το εύρος της παραμόρφωσης στη διαμήκη διεύθυνση είναι 5.5 φορές μεγαλύτερη από το εύρος της παραμόρφωσης κατά την περιφερειακή διεύθυνση μετά το πρώτο κύκλο φόρτισης και πέντε φορές μεγαλύτερο μετά το δεύτερο. Συνεπώς τα αριθμητικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν απόλυτα τα πειραματικά όσον αφορά όχι μόνο τη τοποθεσία αλλά και τη διεύθυνση της ρωγής.

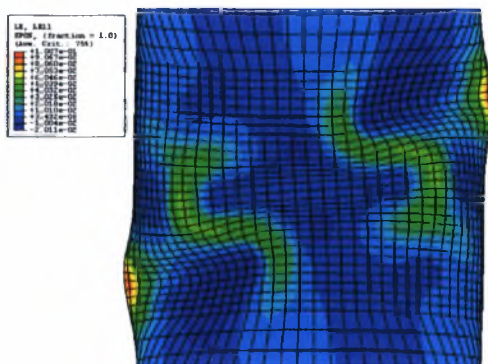
Κόμβος	MAX ΔLE22		ΔLE11	
	1 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης	1 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης
239	$25.1 \times 10^{-3}$	$25.4 \times 10^{-3}$	$4.63 \times 10^{-3}$	$4.99 \times 10^{-3}$

**Πίνακας 4.2** Μέγιστη τιμή του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη και εύρος λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την περιφερειακή διεύθυνση στον κόμβο 239.

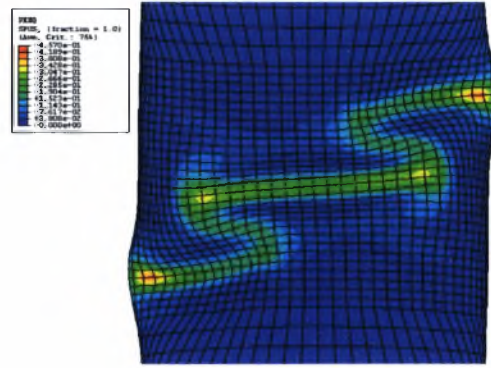
Στα σχήματα 4.16, 4.17 και 4.18 παρουσιάζεται η κατανομή των λογαριθμικών παραμορφώσεων κατά τη διαμήκη και περιφερειακή διεύθυνση και η κατανομή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης από όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η περιοχή εμφάνισης του ρήγματος είναι ιδιαίτερα ενταμένη.



**Σχήμα 4.16** Κατανομή λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την διαμήκη διεύθυνση (LE22) στη περιοχή τοπικής ύβωσης, στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού.



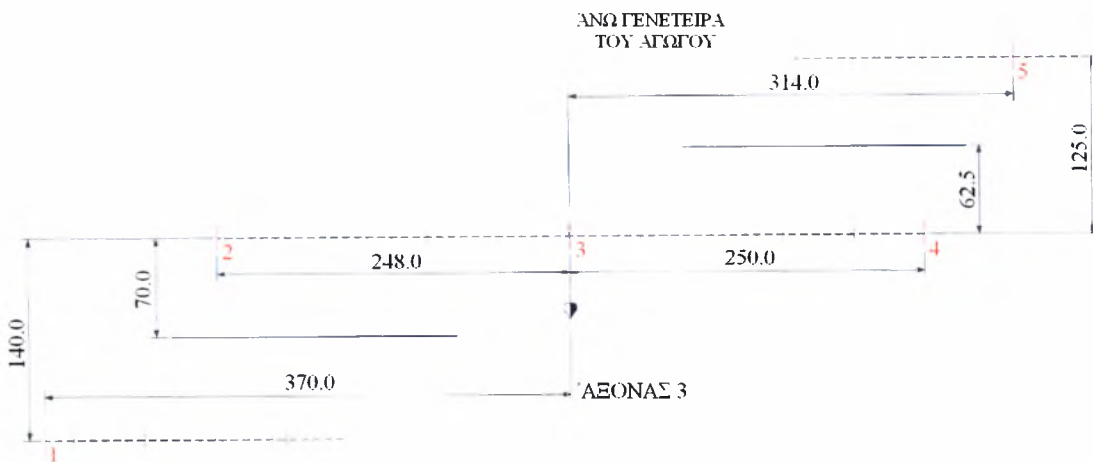
**Σχήμα 4.17** Κατανομή λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την περιφερειακή διεύθυνση (LE11) στη περιοχή τοπικής ύβωσης, στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού.



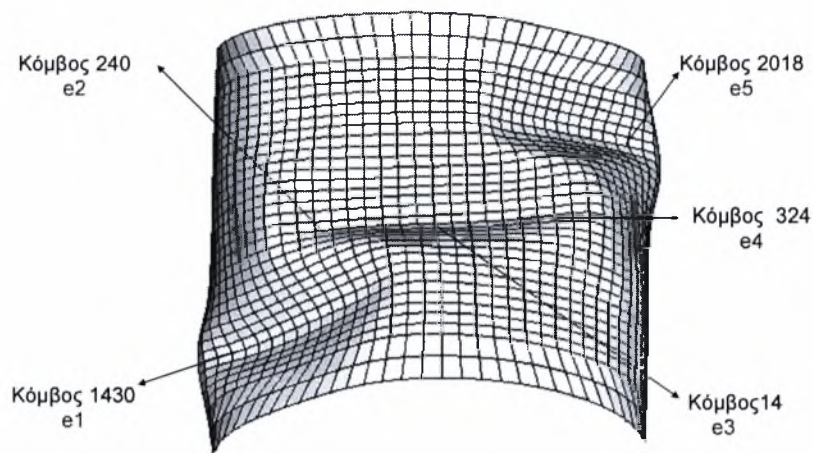
**Σχήμα 4.18** Κατανομή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης (PEEQ) στη περιοχή τοπικής ύβωσης, στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού.

#### 4.6 Σύγκριση αριθμητικών–πειραματικών αποτελεσμάτων, Πείραμα 2<sup>ο</sup>

Στο δεύτερο πείραμα λόγω της εσωτερικής πίεσης στην οποία υπόκειται ο αγωγός η κρίσιμη διεύθυνση είναι η περιφερειακή. Ωστόσο κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων τα μηκυνσιόμετρα τοποθετήθηκαν κατά την διαμήκη διεύθυνση, στην παραμορφωμένη κατάσταση και πριν από την επιβολή των κύκλων φόρτισης. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα σημεία τοποθέτησης των μηκυνσιομέτρων του δεύτερου πειράματος είναι διαφορετικά από του πρώτου. Τα σημεία των πειραματικών μετρήσεων e1, e2, e3, e4, e5 αντιστοιχούν στους κόμβους του πλέγματος 1430, 240, 14, 324 και 2018 αντίστοιχα. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα ακριβή σημεία της τοποθέτησης των μηκυνσιόμετρων, τα οποία βρίσκονται στην άνω γενέτειρα του αγωγού.



**Σχήμα 4.19** Σημεία τοποθέτησης των μηκυνσιόμετρων, σύμφωνα με τις πειραματικές δοκιμές.



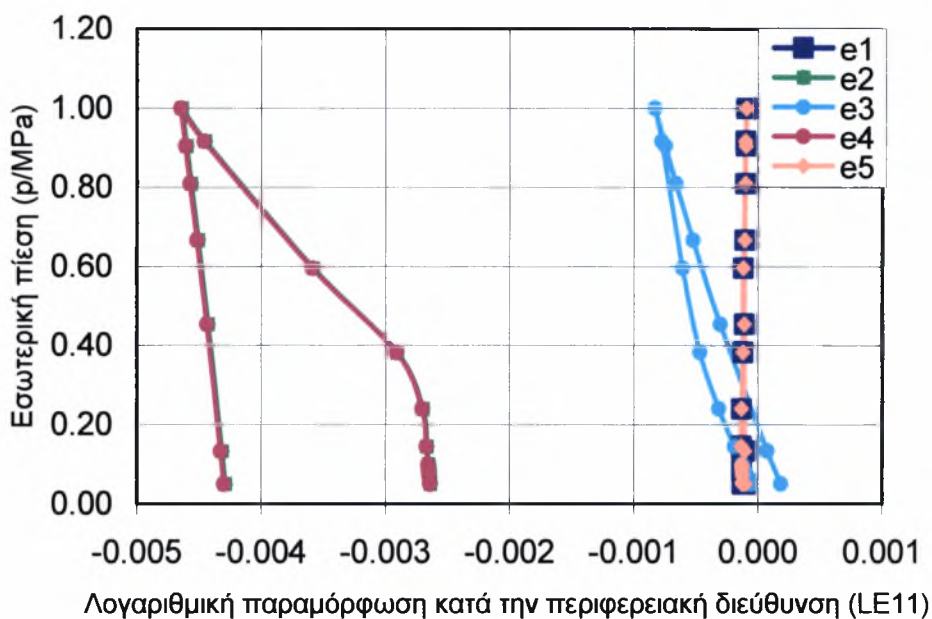
**Σχήμα 4.20** Σημεία μέτρησης στην αριθμητική ανάλυση του 2<sup>ου</sup> πειράματος, αντίστοιχα με τις θέσεις μέτρησης στο πείραμα.

Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα όσον αφορά το εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση μετά τον πρώτο κύκλο φόρτισης υπό σταθερή πίεση ( $p=1\text{bar}$ ) για  $\Delta u=30\text{mm}$ . Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα προσεγγίζουν σε πάρα πολύ ικανοποιητικό βαθμό τις αντίστοιχες τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων.

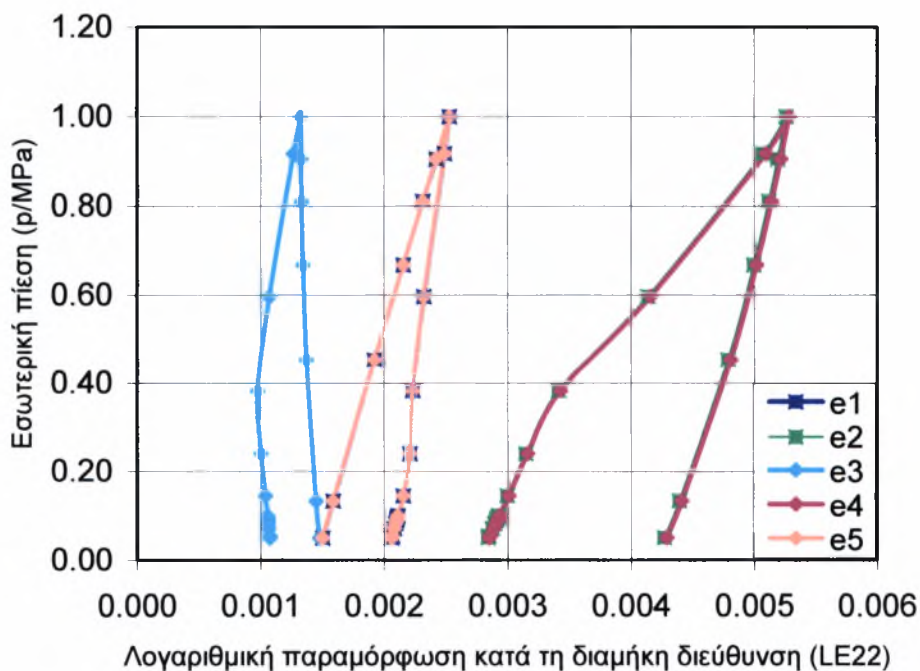
Σημείο Μέτρησης	$\Delta E_{22}$ Πειραματικό	$\Delta E_{22}$ Αριθμητικό
e1(1430)	$5.625 \times 10^{-3}$	$6.07 \times 10^{-3}$
e2(240)	$2.25 \times 10^{-3}$	$3.57 \times 10^{-3}$
e3(14)	$2.1 \times 10^{-3}$	$3.53 \times 10^{-3}$
e4(324)	$3.4 \times 10^{-3}$	$3.59 \times 10^{-3}$
e5(2018)	$5.275 \times 10^{-3}$	$6.06 \times 10^{-3}$

**Πίνακας 4.3** Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών τιμών του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση, μετά τον πρώτο κύκλο φόρτισης, για  $\Delta u=30\text{mm}$  και  $p=0.1\text{MPa}$  (σταθερή).

Στα σχήματα 4.21 και 4.22 παρατίθενται τα διαγράμματα εσωτερικής πίεσης (p)-λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την περιφερειακή διεύθυνση (LE11) και κατά την διαμήκη (LE22) αντίστοιχα μετά τον πρώτο κύκλο φόρτισης.



Σχήμα 4.21 Διάγραμμα εσωτερικής πίεσης-λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την περιφερειακή διεύθυνση.



Σχήμα 4.22 Διάγραμμα εσωτερικής πίεσης-λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την διαμήκη διεύθυνση.

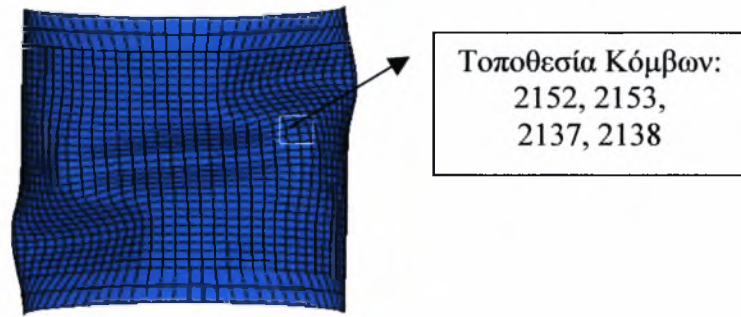


Κατά τη διεξαγωγή του δεύτερου πειράματος η αστοχία επήλθε μετά από 2658 κύκλους φόρτισης με εσωτερική πίεση. Η ρωγμή εμφανίστηκε κατά την διαμήκη διεύθυνση κοντά στην περιοχή της κύριας ύβωσης (2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, σχήμα 2.7). Σύμφωνα με τα αριθμητικά αποτελέσματα οι λογαριθμικές παραμορφώσεις κατά την περιφερειακή διεύθυνση είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στην διαμήκη. Συνεπώς το γεγονός ότι το ρήγμα δημιουργήθηκε κατά την διαμήκη διεύθυνση επιβεβαιώνεται από την αριθμητική ανάλυση. Το παραπάνω μπορεί να επιβεβαιωθεί από τον πίνακα 4.4 στον οποίο παρατίθενται οι μέγιστες τιμές του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την περιφερειακή διεύθυνση και οι αντίστοιχες κατά τη διαμήκη για διάφορα πιθανά σημεία τα οποία βρίσκονται στην κρίσιμη περιοχή για δημιουργία ρωγμής.

Κόμβος	MAX ΔLE11		ΔLE22	
	1 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης	1 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης
2152	$3.4 \times 10^{-3}$	$1.87 \times 10^{-3}$	$1.89 \times 10^{-3}$	$0.569 \times 10^{-3}$
2137	$2.7 \times 10^{-3}$	$1.57 \times 10^{-3}$	$0.666 \times 10^{-3}$	$0.711 \times 10^{-3}$
2153	$2.61 \times 10^{-3}$	$1.53 \times 10^{-3}$	$2.17 \times 10^{-3}$	$0.746 \times 10^{-3}$
2138	$2.03 \times 10^{-3}$	$1.34 \times 10^{-3}$	$1.79 \times 10^{-3}$	$0.522 \times 10^{-3}$

**Πίνακας 4.4** Μέγιστη τιμή του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη περιφερειακή διεύθυνση και εύρος λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την διαμήκη στη κρίσιμη περιοχή για δημιουργία ρωγμής.

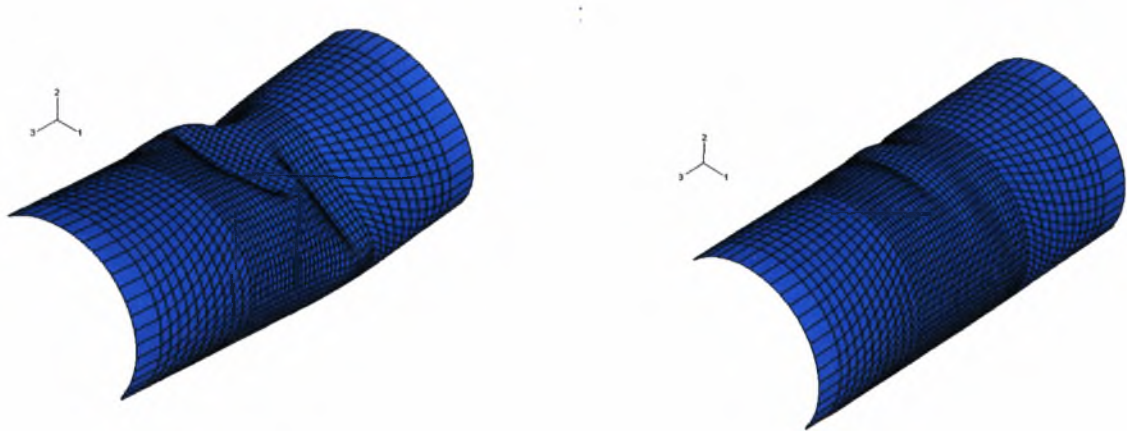
Στο σχήμα 4.23 παρουσιάζεται η κρίσιμη περιοχή για δημιουργία ρωγμής. Συγκρίνοντας με τις πειραματικές δοκιμές καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι και στην περίπτωση του δεύτερου πειράματος τα αριθμητικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τα πειραματικά ως προς την τοποθεσία αλλά και τη διεύθυνση της ρωγμής.



Σχήμα 4.23 Κρίσιμη περιοχή για δημιουργία ρωγμής.

#### 4.7 Σύγκριση αριθμητικών–πειραματικών αποτελεσμάτων, Πείραμα 3<sup>ο</sup>

Κατά τη διεξαγωγή του τρίτου πειράματος παρατηρήθηκε ότι αυξάνοντας μονοτονικά την εσωτερική πίεση οι πτυχώσεις της ύβωσης άρχισαν να ομαλοποιούνται και τελικά η ατέλεια σχεδόν εξαφανίστηκε (βλέπε σχήμα 2.11). Το παραπάνω επιβεβαιώνεται απόλυτα από την αριθμητική ανάλυση. Στο σχήμα 4.24 παρουσιάζεται ο αγωγός πριν και μετά την επιβολή εσωτερικής πίεσης, όπου είναι εμφανές ότι η τοπική ύβωση ομαλοποιείται.

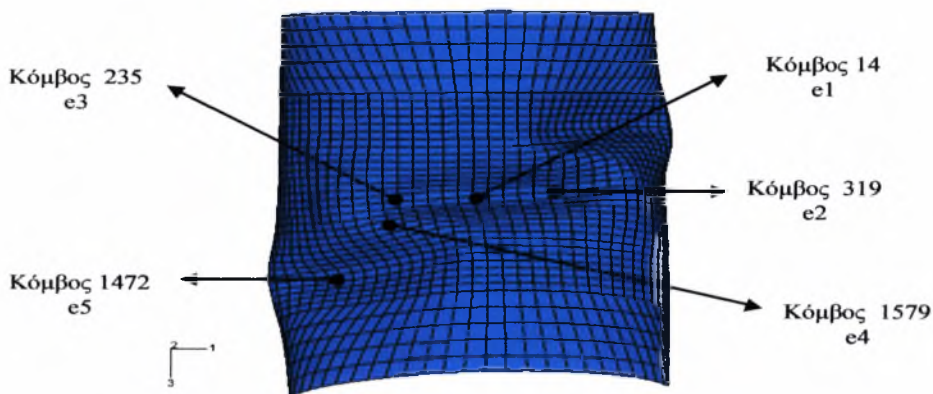


Σχήμα 4.24 Μορφή τοπικής ύβωσης πριν και μετά την μονοτονική αύξηση της εσωτερικής πίεσης.

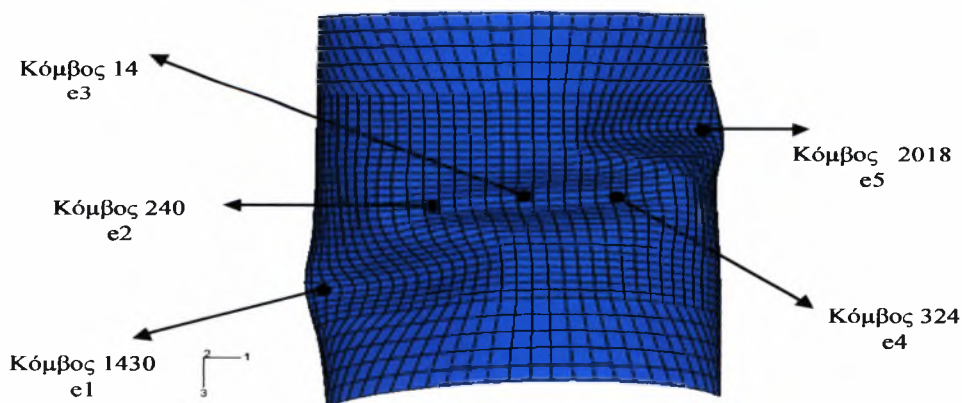
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

### 5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης όσον αφορά την αριθμητική ανάλυση δυο μοντέλων βασισμένων στο πρώτο και δεύτερο πείραμα αντίστοιχα. Στο πρώτο μοντέλο μελετάται η επίδραση του βάθους ύβωσης και της εσωτερικής πίεσης στο εύρος των παραμορφώσεων κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Επίσης μελετάται για δυο περιπτώσεις του λόγου  $D/t$  η επίδραση του βάθους ύβωσης στη μέγιστη τιμή του εύρους της παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Στο δεύτερο μοντέλο μελετάται η επίδραση της εσωτερικής πίεσης στο εύρος των λογαριθμικών παραμορφώσεων κατά τη περιφερειακή διεύθυνση. Στα σχήματα 5.1 και 5.2 παρουσιάζονται τα σημεία μέτρησης των παραμορφώσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση της παραμετρικής μελέτης.



Σχήμα 5.1 Σημεία μέτρησης των παραμορφώσεων, 1° μοντέλο.



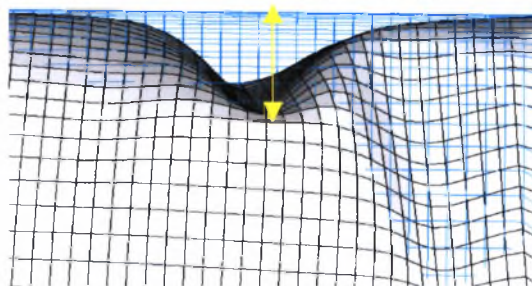
Σχήμα 5.2 Σημεία μέτρησης των παραμορφώσεων, 2° μοντέλο.

## 5.2 Επίδραση του βάθους ύβωσης στο εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση, $D/t=76$ , $1^\circ$ μοντέλο

Η μελέτη της επίδρασης του βάθους ύβωσης στο εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση έγινε χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο βασισμένο στην αριθμητική ανάλυση του πρώτου πειράματος η οποία παρουσιάστηκε στα κεφάλαια τρία και τέσσερα. Η διαφοροποίηση έγκειται στο τέταρτο βήμα της ανάλυσης (Κεφάλαιο 3, σχήμα 3.14) κατά το οποίο επεβλήθη στα σημεία αναφοράς RF-2 και RF-5 μετατόπιση κατά τον άξονα δυο  $U_2=150\text{mm}$ ,  $U_2=200\text{mm}$  και  $U_2=250\text{mm}$  ώστε να επιτευχθούν διαφορετικά βάθη ύβωσης. Στα σχήματα 5.3, 5.4 και 5.5 παρουσιάζεται το βάθος της ύβωσης για τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις. Στη πρώτη περίπτωση το βάθος της ύβωσης είναι 71mm, και αντιστοιχεί στο 12% της διαμέτρου. Στη δεύτερη περίπτωση είναι 90 mm και αντιστοιχεί στο 15% της διαμέτρου, ενώ στην τρίτη περίπτωση είναι 103mm και αντιστοιχεί στο 17% της διαμέτρου.

- Α' Περίπτωση

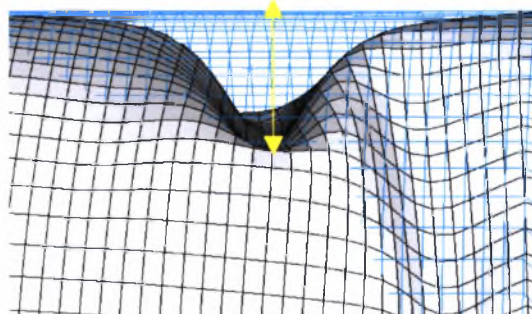
$$d_0 = 71\text{mm}$$



Σχήμα 5.3 Βάθος Ύβωσης, Περίπτωση Α, μετακίνηση των εμβόλων στο βήμα 4 κατά 150mm.

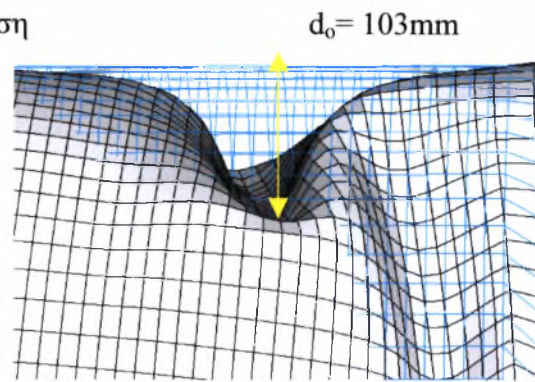
- Β' Περίπτωση

$$d_0 = 90\text{mm}$$



Σχήμα 5.4 Βάθος Ύβωσης Περίπτωση Β, μετακίνηση των εμβόλων στο 4<sup>ο</sup> βήμα κατά 200mm.

- Γ' Περίπτωση



Σχήμα 5.5 Βάθος Ύβωσης, Περίπτωση Γ, μετακίνηση των εμβόλων στο βήμα 4 κατά 250mm.

Στους πίνακες 5.1 και 5.2 παρατίθενται οι τιμές του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την διαμήκη διεύθυνση ΔLE22 μετά τον πρώτο και δεύτερο κύκλο φόρτισης για Δu=33.3mm και Δu=50mm αντίστοιχα.

**Εύρος λογαριθμικής παραμόρφωσης ΔLE22, για Δu=33.3mm**

Σημεία Μετρήσεων	ΔLE22 Βάθος Ύβωσης 71mm		ΔLE22 Βάθος Ύβωσης 90mm		ΔLE22 Βάθος Ύβωσης 103mm	
	1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης
	<b>e1 (14)</b>	$7.11 \times 10^{-3}$	$5.36 \times 10^{-3}$	$6.48 \times 10^{-3}$	$5.23 \times 10^{-3}$	$6.16 \times 10^{-3}$
<b>e2 (319)</b>	$10.1 \times 10^{-3}$	$7.37 \times 10^{-3}$	$9.33 \times 10^{-3}$	$7.1 \times 10^{-3}$	$8.37 \times 10^{-3}$	$6.7 \times 10^{-3}$
<b>e3 (235)</b>	$10.1 \times 10^{-3}$	$7.36 \times 10^{-3}$	$9.33 \times 10^{-3}$	$7.09 \times 10^{-3}$	$8.36 \times 10^{-3}$	$6.69 \times 10^{-3}$
<b>e4 (1579)</b>	$8.25 \times 10^{-3}$	$5.49 \times 10^{-3}$	$7.06 \times 10^{-3}$	$5.07 \times 10^{-3}$	$5.69 \times 10^{-3}$	$4.39 \times 10^{-3}$
<b>e5 (1472)</b>	$6.50 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$5.37 \times 10^{-3}$	$4.69 \times 10^{-3}$	$4.78 \times 10^{-3}$	$4.4 \times 10^{-3}$

Πίνακας 5.1 Εύρος της παραμόρφωσης, κατά τη διαμήκη διεύθυνση, για Δu=33.3mm.

Από τον πίνακα 5.1 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι, στη περίπτωση όπου  $\Delta u=33.3\text{mm}$ , το εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση μειώνεται με την αύξηση του βάθους ύβωσης και στους δυο κύκλους φόρτισης. Επίσης στο δεύτερο κύκλο φόρτισης το εύρος της παραμόρφωσης είναι μικρότερο από ότι στον πρώτο.

**Εύρος λογαριθμικής παραμόρφωσης  $\Delta LE_{22}$ , για  $\Delta u=50\text{mm}$**

Σημεία Μετρήσεων	$\Delta LE_{22}$ Βάθος Ύβωσης 71mm		$\Delta LE_{22}$ Βάθος Ύβωσης 90mm		$\Delta LE_{22}$ Βάθος Ύβωσης 103mm	
	1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης
	<b>e1 (14)</b>	$11.2 \times 10^{-3}$	$10.8 \times 10^{-3}$	$9.87 \times 10^{-3}$	$9.68 \times 10^{-3}$	$9.23 \times 10^{-3}$
<b>e2 (319)</b>	$16.5 \times 10^{-3}$	$16 \times 10^{-3}$	$14.4 \times 10^{-3}$	$14.19 \times 10^{-3}$	$12.7 \times 10^{-3}$	$12.7 \times 10^{-3}$
<b>e3 (235)</b>	$16.5 \times 10^{-3}$	$16 \times 10^{-3}$	$14.4 \times 10^{-3}$	$14.19 \times 10^{-3}$	$12.7 \times 10^{-3}$	$12.7 \times 10^{-3}$
<b>e4 (1579)</b>	$13.2 \times 10^{-3}$	$12.4 \times 10^{-3}$	$10.9 \times 10^{-3}$	$10.5 \times 10^{-3}$	$8.72 \times 10^{-3}$	$8.56 \times 10^{-3}$
<b>e5 (1472)</b>	$11.3 \times 10^{-3}$	$11.3 \times 10^{-3}$	$8.64 \times 10^{-3}$	$8.58 \times 10^{-3}$	$7.50 \times 10^{-3}$	$7.51 \times 10^{-3}$

**Πίνακας 5.2** Εύρος Λογαριθμικής Παραμόρφωσης, κατά τη διαμήκη διεύθυνση, για  $\Delta u=50\text{mm}$ .

Από τον πίνακα 5.2 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι, στη περίπτωση όπου  $\Delta u=50\text{mm}$ , το εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση μειώνεται με την αύξηση του βάθους ύβωσης και στους δυο κύκλους φόρτισης. Επίσης στο δεύτερο κύκλο φόρτισης το εύρος είναι σχεδόν ίδιο με αυτό στον πρώτο κύκλο φόρτισης. Στους πίνακες 5.3 και 5.4 παρουσιάζονται τα σημεία όπου εμφανίζεται η μέγιστη τιμή του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης  $\Delta LE_{22}$  μετά τον πρώτο και δεύτερο κύκλο φόρτισης για  $\Delta u=33.3\text{mm}$  και  $\Delta u=50\text{mm}$  αντίστοιχα.

$\Delta u=33.3\text{mm}$	Μέγιστο $\Delta LE22$		Κόμβος
Βάθος Ύβωσης	1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	
71mm	$18.9 \times 10^{-3}$	$12 \times 10^{-3}$	238
90mm	$17.1 \times 10^{-3}$	$10.9 \times 10^{-3}$	239
103mm	$16.6 \times 10^{-3}$	$11.4 \times 10^{-3}$	239

Πίνακας 5.3 Μέγιστη τιμή του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης μετά τον πρώτο και δεύτερο κύκλο φόρτισης , για  $\Delta u=33.3\text{mm}$ .

$\Delta u=50\text{mm}$	Μέγιστο $\Delta LE22$		Κόμβος
Βάθος Ύβωσης	1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	
71mm	$29.1 \times 10^{-3}$	$28.7 \times 10^{-3}$	238
90mm	$25.1 \times 10^{-3}$	$25.4 \times 10^{-3}$	239
103mm	$25.2 \times 10^{-3}$	$24.8 \times 10^{-3}$	239

Πίνακας 5.4 Μέγιστη τιμή του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης μετά τον πρώτο και δεύτερο κύκλο φόρτισης , για  $\Delta u=50\text{mm}$ .

Από τους παραπάνω πίνακες μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η αύξηση του βάθους ύβωσης συντελεί σε μια μικρή σχετικά μείωση της τιμής του μέγιστου εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης. Ωστόσο η τοποθεσία στην οποία εμφανίζεται (κόμβοι 238, 239 οι οποίοι βρίσκονται στην άκρη της περιοχής της κύριας ύβωσης) παραμένει η ίδια. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής συγκέντρωσης παραμορφώσεων SNCF έτσι ώστε να γίνει μια καλύτερη σύγκριση του ποσοστού της παραμόρφωσης.

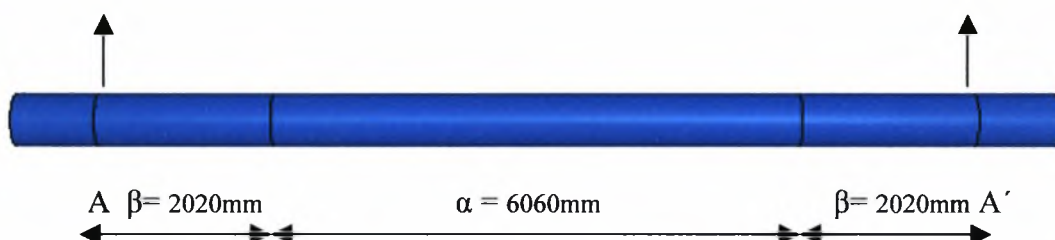
Ο συντελεστής συγκέντρωσης παραμόρφωσης ορίζεται ως:

$$SNCF = \frac{\Delta E}{\Delta \varepsilon_{nom}}$$

όπου,  $\Delta E$  η τιμή του μέγιστου εύρους της πραγματικής λογαριθμικής παραμόρφωσης στην ύβωση (που εδώ υπολογίζεται από την αριθμητική ανάλυση) και  $\Delta \varepsilon_{nom}$  η τιμή του μέγιστου εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης που υπολογίζεται από απλή στατική εφαρμοζόμενη στην κάμψη της δοκού. Συγκεκριμένα ισχύει:

$$\Delta \varepsilon_{nom} = \frac{\Delta \sigma_{max}}{E} = \frac{\Delta M}{EI} R = \frac{\Delta F \beta}{\pi R^2 t} = \frac{6R\Delta u}{\beta(3\alpha + 2\beta)}$$

όπου,  $R$  είναι η ακτίνα του αγωγού ( $R = 305 \text{ mm}$ ),  $\alpha$ ,  $\beta$  οι αποστάσεις που φαίνονται στο σχήμα 5.6 ( $\alpha = 6060 \text{ mm}$ ,  $\beta = 2020 \text{ mm}$ ) και  $\Delta u$  το εύρος της μετατόπισης που επιβάλλεται στις διατομές του αγωγού στα σημεία  $A$  και  $A'$  (σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.6

Με βάση τις τιμές από τους πίνακες 5.4 και 5.5 γίνονται οι παρακάτω υπολογισμοί του συντελεστή SNCF. Γενικά, οι τιμές του SNCF φανερώνουν πως το τοπικό μέγιστο εύρος παραμόρφωσης είναι μίας τάξης μεγέθους μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ονομαστικό.

Βάθος Υβωσης	Συντελεστής SNCF			
	$\Delta u=33.3 \text{ mm}$		$\Delta u=50 \text{ mm}$	
	1 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης	1 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης
<b>71mm</b>	13.9	8.8	14.3	14
<b>90mm</b>	12.6	8	12.3	12.5
<b>103mm</b>	12.2	8.4	12.4	12.2

Πίνακας 5.5 Συντελεστής SNCF, για  $\Delta u=33.3 \text{ mm}$  και  $\Delta u=50 \text{ mm}$ .



### 5.3 Επίδραση του βάθους ύβωσης στη μέγιστη τιμή του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση για $D/t=50.6$ και $D/t=94.9$ , 1<sup>ο</sup> μοντέλο

Τα χαρακτηριστικά των αγωγών που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη μελέτη, η οποία βασίστηκε στην αριθμητική ανάλυση του πρώτου πειράματος, είναι τα ίδια με αυτά που αναφέρονται στη παράγραφο 5.2 εκτός από την διάμετρο. Στην πρώτη περίπτωση η διάμετρος και ο λόγος διαμέτρου προς πάχος είναι  $D_{out} = 406.4$  mm και  $D_o/t = 50.6$ , ενώ στην δεύτερη περίπτωση είναι  $D_{out} = 762$  mm και  $D_o/t = 94.9$ . Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα όσον αφορά τη μέγιστη τιμή του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την διαμήκη διεύθυνση ΔLE22 μετά τον πρώτο και δεύτερο κύκλο φόρτισης για  $\Delta u=33.3$ mm και  $\Delta u=50$ mm αντίστοιχα. Στον πίνακα 5.6 για τη περίπτωση όπου  $D_{out} = 406.4$  mm και  $D_o/t = 50.6$  και στον πίνακα 5.7 για την περίπτωση όπου  $D_{out} = 762$  mm και  $D_o/t = 94.9$ .

#### Α Περίπτωση ( $D_{out} = 406.4$ mm και $D_o/t = 50.6$ )

Βάθος Ύβωσης	Κόμβος	ΔLE22			
		Δu=33.3mm		Δu=50mm	
		1 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης	1 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης
66mm	154	$15.5 \times 10^{-3}$	$6.06 \times 10^{-3}$	$15.8 \times 10^{-3}$	$11.4 \times 10^{-3}$
88.5mm	155	$15.6 \times 10^{-3}$	$6.7 \times 10^{-3}$	$16.4 \times 10^{-3}$	$13 \times 10^{-3}$
103mm	156	$15.4 \times 10^{-3}$	$6.93 \times 10^{-3}$	$16.5 \times 10^{-3}$	$13.5 \times 10^{-3}$

Πίνακας 5.6 Μέγιστη τιμή του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης, για  $D_o/t = 50.6$ .

Είναι σημαντικό ότι και σε αυτή τη περίπτωση η μέγιστη τιμή του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση εμφανίζεται στην άκρη της περιοχής της κύριας ύβωσης (κόμβοι 154, 155, 156). Από τον πίνακα 5.6 παρατηρούμε ότι για τον συγκεκριμένο λόγο διαμέτρου προς πάχος ( $D_o/t = 50.6$ ) το βάθος ύβωσης δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τα αποτελέσματα.

**Β Περίπτωση (D<sub>out</sub> = 762 mm και D<sub>o</sub>/t = 94.9)**

Βάθος Ύβωσης	ΔLE22			
	Δu=33.3mm		Δu=50mm	
	1 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης	1 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης
<b>53mm</b>	19.2×10 <sup>-3</sup> Κόμβος 147	15.4×10 <sup>-3</sup> Κόμβος 147	30.4×10 <sup>-3</sup> Κόμβος147	28×10 <sup>-3</sup> Κόμβος147
<b>84mm</b>	19.5×10 <sup>-3</sup> Κόμβος1311	17.3×10 <sup>-3</sup> Κόμβος1311	31×10 <sup>-3</sup> Κόμβος1311	28.8×10 <sup>-3</sup> Κόμβος1311
<b>98mm</b>	15.6×10 <sup>-3</sup> Κόμβος1297	13.8×10 <sup>-3</sup> Κόμβος1311	28.4×10 <sup>-3</sup> Κόμβος1181	30.4×10 <sup>-3</sup> Κόμβος1181

Πίνακας 5.7 Μέγιστη τιμή του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης, για D<sub>o</sub>/t = 94.9.

Οι κόμβοι 147, 1311, 1297 που αναφέρονται στον πίνακα 5.7 βρίσκονται στην περιοχή της κύριας ύβωσης ενώ ο κόμβος 1181 στην άκρη της περιοχής της δευτερεύουσας ύβωσης. Για τον συγκεκριμένο λόγο διαμέτρου προς πάχος (D<sub>o</sub>/t = 94.9) το βάθος ύβωσης δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τα αποτελέσματα. Στον πίνακα 5.8 παρουσιάζεται ο συντελεστής συγκέντρωσης παραμορφώσεων με βάση τα αποτελέσματα των πινάκων 5.6 και 5.7 από τον οποίο φαίνεται πιο εποπτικά η ελάχιστη επίδραση του βάθους ύβωσης στις παραπάνω περιπτώσεις.

Βάθος Ύβωσης	Συντελεστής SNCF							
	D <sub>o</sub> /t = 50.6				D <sub>o</sub> /t = 94.9			
	Δu=33.3mm		Δu=50mm		Δu=33.3mm		Δu=50mm	
	1 <sup>ος</sup> κύκλος	2 <sup>ος</sup> κύκλος	1 <sup>ος</sup> κύκλος	2 <sup>ος</sup> κύκλος	1 <sup>ος</sup> κύκλος	2 <sup>ος</sup> κύκλος	1 <sup>ος</sup> κύκλος	2 <sup>ος</sup> κύκλος
<b>71mm</b>	17.2	6.73	11.64	8.4	11.32	9.08	11.94	11
<b>90mm</b>	17.3	7.44	12	9.6	11.5	10.2	12.17	11.31
<b>103mm</b>	17.1	7.7	12.15	9.9	9.2	8.14	11.15	11.94

Πίνακας 5.8 Συντελεστής SNCF για τις περιπτώσεις όπου D<sub>o</sub>/t = 50.6 και D<sub>o</sub>/t = 94.9.

## 5.4 Επίδραση της εσωτερικής πίεσης στο εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση, 1<sup>ο</sup> μοντέλο

Τα χαρακτηριστικά των αγωγών που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη μελέτη, η οποία βασίστηκε στην αριθμητική ανάλυση του πρώτου πειράματος, είναι τα ίδια με αυτά που αναφέρονται στη παράγραφο 5.2. Στους πίνακες 5.8 έως 5.11 παρατίθενται οι τιμές του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την διαμήκη διεύθυνση, για τον πρώτο και δεύτερο κύκλο φόρτισης, με σταθερή εσωτερική πίεση 0.1MPa, 0.4MPa, 0.7MPa, και 4MPa, για  $\Delta u=33.3\text{mm}$  και  $\Delta u=50\text{mm}$  αντίστοιχα.

### Πρώτος κύκλος φόρτισης, $p$ =σταθερή, για $\Delta u=33.3\text{mm}$ .

Σημεία Μετρήσεων	$\Delta LE22$ $p=0.1\text{MPa}$	$\Delta LE22$ $p=0.4\text{MPa}$	$\Delta LE22$ $p=0.7\text{MPa}$	$\Delta LE22$ $p=4\text{MPa}$
e1 (14)	$6.48 \times 10^{-3}$	$6.15 \times 10^{-3}$	$6.48 \times 10^{-3}$	$6.30 \times 10^{-3}$
e2 (319)	$9.33 \times 10^{-3}$	$9.26 \times 10^{-3}$	$9.23 \times 10^{-3}$	$9.48 \times 10^{-3}$
e3 (235)	$9.33 \times 10^{-3}$	$9.26 \times 10^{-3}$	$9.22 \times 10^{-3}$	$9.48 \times 10^{-3}$
e4 (1579)	$7.06 \times 10^{-3}$	$7.07 \times 10^{-3}$	$7.09 \times 10^{-3}$	$9.80 \times 10^{-3}$
e5 (1472)	$5.37 \times 10^{-3}$	$5.32 \times 10^{-3}$	$5.34 \times 10^{-3}$	$6.04 \times 10^{-3}$

Πίνακας 5.9 Εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης, υπό την επίδραση σταθερής εσωτερικής πίεσης μετά τον πρώτο κύκλο φόρτισης, για  $\Delta u=33.3\text{mm}$ .

### Δεύτερος κύκλος φόρτισης, $p$ =σταθερή, για $\Delta u=33.3\text{mm}$ .

Σημεία Μετρήσεων	$\Delta LE22$ $p=0.1\text{MPa}$	$\Delta LE22$ $p=0.4\text{MPa}$	$\Delta LE22$ $p=0.7\text{MPa}$	$\Delta LE22$ $p=4\text{MPa}$
e1 (14)	$6.48 \times 10^{-3}$	$5.27 \times 10^{-3}$	$5.30 \times 10^{-3}$	$5.6 \times 10^{-3}$
e2 (319)	$9.33 \times 10^{-3}$	$7.16 \times 10^{-3}$	$7.23 \times 10^{-3}$	$7.76 \times 10^{-3}$
e3 (235)	$9.33 \times 10^{-3}$	$7.16 \times 10^{-3}$	$7.22 \times 10^{-3}$	$7.76 \times 10^{-3}$
e4 (1579)	$7.06 \times 10^{-3}$	$5.10 \times 10^{-3}$	$5.16 \times 10^{-3}$	$6.07 \times 10^{-3}$
e5 (1472)	$5.37 \times 10^{-3}$	$4.76 \times 10^{-3}$	$4.81 \times 10^{-3}$	$5.39 \times 10^{-3}$

Πίνακας 5.10 Εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης, υπό την επίδραση σταθερής εσωτερικής πίεσης μετά τον δεύτερο κύκλο φόρτισης, για  $\Delta u=33.3\text{mm}$ .

**Πρώτος κύκλος φόρτισης,  $p$ =σταθερή, για  $\Delta u=50\text{mm}$ .**

Σημεία Μετρήσεων	$\Delta LE22$ $p=0.1\text{MPa}$	$\Delta LE22$ $p=0.4\text{ MPa}$	$\Delta LE22$ $p=0.7\text{ MPa}$	$\Delta LE22$ $p=4\text{ MPa}$
e1 (14)	$9.87 \times 10^{-3}$	$9.81 \times 10^{-3}$	$9.75 \times 10^{-3}$	$10.8 \times 10^{-3}$
e2 (319)	$14.4 \times 10^{-3}$	$14.4 \times 10^{-3}$	$14.4 \times 10^{-3}$	$14.5 \times 10^{-3}$
e3 (235)	$14.4 \times 10^{-3}$	$14.4 \times 10^{-3}$	$14.4 \times 10^{-3}$	$14.5 \times 10^{-3}$
e4 (1579)	$10.9 \times 10^{-3}$	$11.1 \times 10^{-3}$	$11.3 \times 10^{-3}$	$13.4 \times 10^{-3}$
e5 (1472)	$8.64 \times 10^{-3}$	$8.79 \times 10^{-3}$	$9.01 \times 10^{-3}$	$10 \times 10^{-3}$

**Πίνακας 5.11** Εύρος της Λογαριθμικής Παραμόρφωσης, υπό την επίδραση σταθερής εσωτερικής πίεσης μετά τον πρώτο κύκλο φόρτισης, για  $\Delta u=50\text{mm}$ .

**Δεύτερος κύκλος φόρτισης,  $p$ =σταθερή, για  $\Delta u=50\text{mm}$ .**

Σημεία Μετρήσεων	$\Delta LE22$ $p=0.1\text{MPa}$	$\Delta LE22$ $p=0.4\text{ MPa}$	$\Delta LE22$ $p=0.7\text{ MPa}$	$\Delta LE22$ $p=4\text{ MPa}$
e1 (14)	$9.87 \times 10^{-3}$	$9.65 \times 10^{-3}$	$9.63 \times 10^{-3}$	$13.4 \times 10^{-3}$
e2 (319)	$14.4 \times 10^{-3}$	$14.2 \times 10^{-3}$	$14.1 \times 10^{-3}$	$14.8 \times 10^{-3}$
e3 (235)	$14.4 \times 10^{-3}$	$14.1 \times 10^{-3}$	$14.1 \times 10^{-3}$	$14.8 \times 10^{-3}$
e4 (1579)	$10.9 \times 10^{-3}$	$10.7 \times 10^{-3}$	$10.8 \times 10^{-3}$	$12.2 \times 10^{-3}$
e5 (1472)	$8.64 \times 10^{-3}$	$8.73 \times 10^{-3}$	$8.93 \times 10^{-3}$	$10.3 \times 10^{-3}$

**Πίνακας 5.12** Εύρος της Λογαριθμικής Παραμόρφωσης, υπό την επίδραση σταθερής εσωτερικής πίεσης μετά τον δεύτερο κύκλο φόρτισης, για  $\Delta u=50\text{mm}$ .

Με βάση τα αποτελέσματα που παρατίθενται στους πίνακες 5.9 έως 5.12 μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι όσον αφορά τις τρεις πρώτες περιπτώσεις το εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την αύξηση της τιμής της εσωτερικής πίεσης η οποία διατηρείται σταθερή. Στη τέταρτη περίπτωση το εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης αυξάνεται αρκετά. Στους πίνακες 5.13 και 5.14 παρουσιάζονται τα σημεία εμφάνισης μέγιστης τιμής του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης μετά τον πρώτο κύκλο

φόρτισης με εσωτερική πίεση 0.1MPa, 0.4 MPa, 0.7 MPa, και 4 MPa για  $\Delta u=33.3\text{mm}$  και  $\Delta u=50\text{mm}$  αντίστοιχα.

Πίεση (MPa)	Μέγιστη $\Delta LE22$ ( $\Delta u=33.3\text{mm}$ )		Κόμβος	
	1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης		
<b>p=0.1 MPa</b>	$17.1 \times 10^{-3}$	$10.9 \times 10^{-3}$	239	
<b>p=0.4 MPa</b>	$16.5 \times 10^{-3}$	$10.7 \times 10^{-3}$	239	238
<b>p=0.7 MPa</b>	$15.8 \times 10^{-3}$	$10.2 \times 10^{-3}$	239	
<b>p=4 MPa</b>	$18.5 \times 10^{-3}$	$10.3 \times 10^{-3}$	1430	238

Πίνακας 5.13 Μέγιστη τιμή του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης, για  $\Delta u=33.3\text{mm}$ .

Πίεση (MPa)	Μέγιστη $\Delta LE22$ ( $\Delta u=50\text{mm}$ )		Κόμβος	
	1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης		
<b>p=0.1 MPa</b>	$25.1 \times 10^{-3}$	$25.4 \times 10^{-3}$	239	
<b>p=0.4 MPa</b>	$23.9 \times 10^{-3}$	$24.8 \times 10^{-3}$	239	
<b>p=0.7 MPa</b>	$22.9 \times 10^{-3}$	$25.1 \times 10^{-3}$	238	
<b>p=4 MPa</b>	$28.4 \times 10^{-3}$	$30.1 \times 10^{-3}$	1430	238

Πίνακας 5.14 Μέγιστη τιμή του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης, για  $\Delta u=50\text{mm}$ .

Οι κόμβοι 238, 239 βρίσκονται στην άκρη της περιοχής της κύριας ύβωσης, ενώ ο κόμβος 1430 στη περιοχή της δευτερεύουσας ύβωσης. Με βάση τις τιμές από

τους πίνακες 5.13 και 5.14 γίνονται οι παρακάτω υπολογισμοί του συντελεστή SNCF από τον οποίο φαίνεται πιο εποπτικά το γεγονός ότι η εσωτερική πίεση στις τρεις πρώτες περιπτώσεις δεν επηρεάζει σημαντικά το εύρος των λογαριθμικών παραμορφώσεων κατά τη διαμήκη διεύθυνση ενώ στη τέταρτη περίπτωση η επίδραση είναι αρκετά σημαντική.

Πίεση (MPa)	Συντελεστής SNCF			
	$\Delta u=33.3\text{mm}$		$\Delta u=50\text{mm}$	
	1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης
<b>p=0.1</b>	12.6	8	12.3	12.5
<b>p=0.4</b>	12.15	7.8	11.7	12.2
<b>p=0.7</b>	11.6	7.5	11.2	12.3
<b>p=4</b>	13.6	7.6	13.9	14.8

Πίνακας 5. Συντελεστής SNCF, για  $\Delta u=33.3\text{mm}$  και  $\Delta u=50\text{mm}$ .

### 5.5 Επίδραση της εσωτερικής πίεσης στην μεταβολή της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη περιφερειακή διεύθυνση, 2<sup>ο</sup> μοντέλο

Η μελέτη της επίδρασης της εσωτερικής πίεσης στο εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά τη περιφερειακή διεύθυνση έγινε χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο βασισμένο στην αριθμητική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων του δεύτερου πειράματος η οποία παρουσιάστηκε στα κεφάλαια τρία και τέσσερα. Τα χαρακτηριστικά του αγωγού που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη αριθμητική ανάλυση είναι τα ίδια με αυτά που αναφέρονται στη παράγραφο 5.2. Στους πίνακες 5.16 και 5.17 παρατίθενται οι τιμές του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την περιφερειακή διεύθυνση ΔLE11, μετά τον πρώτο και δεύτερο κύκλο φόρτισης, με εσωτερική πίεση που κυμαίνεται στην πρώτη περίπτωση από 0.05 έως 1 MPa στη δεύτερη περίπτωση από 0.05 έως 2 MPa και στη τρίτη περίπτωση από 0.05 έως 3 MPa.

**1<sup>ος</sup> Κύκλος Φόρτισης**

Σημεία Μετρήσεων	$\Delta LE11$ $p=0.05-1MPa$	$\Delta LE11$ $p=0.05-2MPa$	$\Delta LE11$ $p=0.05-3 MPa$
e1 (1430)	$0.0412 \times 10^{-3}$	$0.181 \times 10^{-3}$	$0.4 \times 10^{-3}$
e2 (240)	$2 \times 10^{-3}$	$3.21 \times 10^{-3}$	$3.71 \times 10^{-3}$
e3 (14)	$1.02 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	$1.95 \times 10^{-3}$
e4 (324)	$2 \times 10^{-3}$	$3.21 \times 10^{-3}$	$3.72 \times 10^{-3}$
e5 (2018)	$0.041 \times 10^{-3}$	$0.181 \times 10^{-3}$	$0.399 \times 10^{-3}$

**Πίνακας 5.16** Εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την περιφερειακή διεύθυνση για  $p=0.05-2MPa$ ,  $p=0.05-1MPa$  και  $p=0.05-3 MPa$ , μετά τον πρώτο κύκλο φόρτισης.

**2<sup>ος</sup> Κύκλος Φόρτισης**

Σημεία Μετρήσεων	$\Delta LE11$ $p=0.05-1MPa$	$\Delta LE11$ $p=0.05-2MPa$	$\Delta LE11$ $p=0.05-3 MPa$
e1 (1430)	$0.0177 \times 10^{-3}$	$0.112 \times 10^{-3}$	$0.207 \times 10^{-3}$
e2 (240)	$0.349 \times 10^{-3}$	$0.741 \times 10^{-3}$	$1.11 \times 10^{-3}$
e3 (14)	$1.02 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	$1.96 \times 10^{-3}$
e4 (324)	$0.347 \times 10^{-3}$	$0.738 \times 10^{-3}$	$1.10 \times 10^{-3}$
e5 (2018)	$0.0175 \times 10^{-3}$	$0.112 \times 10^{-3}$	$0.206 \times 10^{-3}$

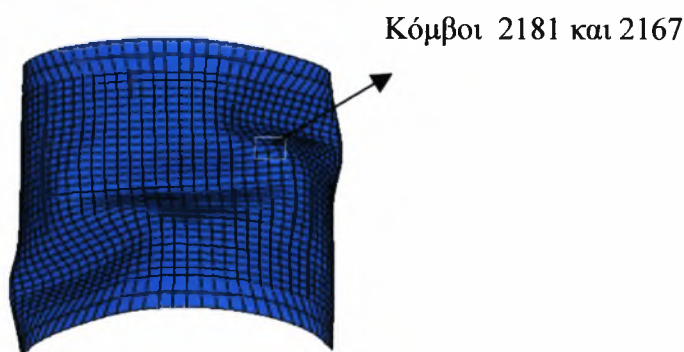
**Πίνακας 5.17** Εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την περιφερειακή διεύθυνση για  $p=0.05-2MPa$ ,  $p=0.05-1MPa$  και  $p=0.05-3 MPa$ , μετά τον δεύτερο κύκλο φόρτισης.

Από τους πίνακες 5.16 και 5.17 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η αύξηση της εσωτερικής πίεσης οδηγεί σε αύξηση του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την περιφερειακή διεύθυνση. Στον πίνακα 5.18 παρουσιάζονται τα σημεία εμφάνισης της μέγιστης τιμής της λογαριθμικής παραμόρφωσης  $\Delta LE11$  μετά τον πρώτο και δεύτερο κύκλο φόρτισης για  $p=0.05-1 MPa$ ,  $p=0.05-2 MPa$  και  $p=0.05-3 MPa$ .

MAX ΔLE11 p=0.05-1MPa		MAX ΔLE11 p=0.05-2MPa		MAX ΔLE11 p=0.05-3 MPa	
1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης
$3.9 \times 10^{-3}$	$1.94 \times 10^{-3}$	$8.80 \times 10^{-3}$	$2.77 \times 10^{-3}$	$13.7 \times 10^{-3}$	$3.84 \times 10^{-3}$
Κόμβος 2181	Κόμβος 2167	Κόμβος 2181	Κόμβος 2181	Κόμβος 2181	Κόμβος 2167

**Πίνακας 5.18** Μέγιστη τιμή του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την περιφερειακή διεύθυνση για p=0.05-1MPa, p=0.05-2MPa και p=0.05-3 MPa.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι κόμβοι 2181 και 2167, στους οποίους εμφανίζεται η μέγιστη τιμή του εύρους της παραμόρφωσης, δεν συμπίπτουν με κάποια από τα σημεία των μετρήσεων του δεύτερου πειράματος. Στο σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η ακριβής τοποθεσία των παραπάνω κόμβων, η οποία είναι κοντά στην περιοχή της κύριας ύβωσης, όπου η κύρτωση είναι προς τα έξω.



**Σχήμα 5.6** Περιοχή εμφάνισης μέγιστης τιμής του εύρους της λογαριθμικής παραμόρφωσης κατά την περιφερειακή διεύθυνση.

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής συγκέντρωσης παραμορφώσεων SNCF έτσι ώστε να γίνει μια καλύτερη σύγκριση του ποσοστού της παραμόρφωσης. Ο συντελεστής συγκέντρωσης παραμόρφωσης ορίζεται ως:

$$SNCF = \frac{\Delta E}{\Delta \varepsilon_{nom}}$$



όπου,  $\Delta E$  η τιμή του μέγιστου εύρους της πραγματικής λογαριθμικής παραμόρφωσης στην ύβωση (που εδώ υπολογίζεται από την αριθμητική ανάλυση) και  $\Delta \varepsilon_{nom}$  το ονομαστικό εύρος της παραμόρφωσης κατά την περιφερειακή διεύθυνση. Το ονομαστικό εύρος υπολογίζεται από την σχέση:

$$\Delta \varepsilon_{nom} = \frac{\Delta P R}{tE} \left(1 - \frac{\nu}{2}\right)$$

όπου,  $\Delta P$  είναι η μεταβολή της εσωτερικής πίεσης,  $R$  η ακτίνα,  $t$  το πάχος,  $E$  το μέτρο ελαστικότητας και  $\nu$  ο λόγος Poisson. Στον πίνακα 5.19 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή SNCF, για τις περιπτώσεις όπου  $\Delta p=0.95$  MPa,  $\Delta p=1.95$  MPa και  $\Delta p=2.95$  MPa, βάσει των μετρήσεων που παρατίθενται στον πίνακα 5.18. Οι τιμές του SNCF φανερώνουν πως το τοπικό μέγιστο εύρος παραμόρφωσης είναι μίας τάξης μεγέθους μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ονομαστικό.

Συντελεστής SNCF					
$\Delta p=0.95$ MPa		$\Delta p=1.95$ MPa		$\Delta p=2.95$ MPa	
1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	1 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης	2 <sup>ος</sup> κυκλ. φόρτισης
26.7	13.3	29.4	9.3	30.2	8.5

**Πίνακας 5.19** Συντελεστής SNCF για τις περιπτώσεις όπου  $\Delta p=0.95$  MPa,  $\Delta p=1.95$  MPa και  $\Delta p=2.95$  MPa.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

### 6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο υπολογίζεται η αντοχή σε κόπωση χαλύβδινου κυλινδρικού αγωγού στον οποίο επιβάλλεται κυκλική φόρτιση σε κάμψη και σε εσωτερική πίεση υπό την παρουσία τοπικού λυγισμού μορφής ύβωσης. Η αντίστοιχη αριθμητική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάστηκε στα κεφάλαια τρία και τέσσερα. Ο υπολογισμός γίνεται βάσει μετρήσεων του εύρους των κύριων παραμορφώσεων (το οποίο υπολογίστηκε από την αριθμητική ανάλυση) στη περιοχή σχηματισμού της τοπικής ύβωσης. Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση (διάρκεια ζωής) υπολογίζεται από το συνδυασμό των σχέσεων των Basquin και Coffin-Manson. Όσον αφορά το πρώτο πείραμα στο οποίο το εύρος της παραμόρφωσης μεταβάλλεται χρησιμοποιείται επίσης ο κανόνας του Miner. Επίσης γίνεται σύγκριση της διάρκειας ζωής που εκτιμάται από την αριθμητική ανάλυση με τη διάρκεια ζωής που υπολογίστηκε από τις πειραματικές δοκιμές.

### 6.2 Σχέσεις υπολογισμού της αντοχής σε κόπωση

Για κόπωση με μηχανικές τάσεις κάτω από το όριο διαρροής ισχύει ο νόμος του Basquin ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_f' (2N_f)^b \quad (6.1)$$

όπου,  $\Delta\sigma$  είναι το εύρος της τάσης,  $\sigma_f'$  είναι η τάση θραύσης,  $N_f$  είναι ο αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση και  $b$  είναι σταθερά του υλικού η οποία κυμαίνεται μεταξύ των τιμών  $-0.05 < b < -0.12$ . Επίσης στην ελαστική περιοχή η σχέση που συνδέει το εύρος της παραμόρφωσης με το εύρος της τάσης είναι η εξής:

$$\Delta\varepsilon_e = \frac{\Delta\sigma}{E} \quad (6.2)$$

όπου,  $\Delta\varepsilon_e$  είναι το εύρος της ελαστικής παραμόρφωσης και  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας. Συνδυάζοντας τις σχέσεις 6.1 και 6.2 καταλήγουμε στην εξής σχέση:

$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma_f' (2N_f)^b}{E} \quad (6.3)$$

η οποία συνδέει τον αριθμό των κύκλων φόρτισης πριν τη θραύση με το εύρος της ελαστικής παραμόρφωσης.

Για κόπωση με μηχανικές τάσεις πάνω από το όριο διαρροής ισχύει ο νόμος των Coffin-Manson ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (6.4)$$

όπου,  $\Delta \varepsilon_p$  είναι το εύρος της πλαστικής παραμόρφωσης,  $\varepsilon_f'$  είναι η επιμήκυνση θραύσης,  $N_f$  είναι ο αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση και  $c$  είναι σταθερά του υλικού η οποία κυμαίνεται μεταξύ των τιμών  $-0.10 < c < -0.7$ . Το συνολικό εύρος της παραμόρφωσης είναι το άθροισμα του εύρους της ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης, δηλαδή:

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_e + \Delta \varepsilon_p \quad (6.5)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση (6.5) τις σχέσεις (6.3) και (6.4) καταλήγουμε στη σχέση:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (6.6)$$

η οποία συνδέει τον αριθμό των κύκλων φόρτισης πριν τη θραύση με το συνολικό εύρος της παραμόρφωσης. Στη περίπτωση όπου το εύρος της συνολικής παραμόρφωσης μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια ζωής του υλικού, η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η επαλληλία των φορτίων κόπωσης, σύμφωνα με τον κανόνα του Miner:

$$\sum_i \frac{N_i}{N_{f_i}} = 1 \quad (6.7)$$

όπου,  $(i)$  είναι ο τύπος της φόρτισης,  $N_{f_i}$  είναι ο αριθμός των κύκλων μέχρι τελικής θραύσης (διάρκεια ζωής) όταν υπάρχει εξολοκλήρου φόρτιση τύπου  $i$  και  $\frac{N_i}{N_{f_i}}$  είναι το ποσοστό της συνολικής διάρκειας ζωής που καταναλίσκεται μετά από  $N_i$  κύκλους στο τμήμα  $i$ .

### 6.3 Υπολογισμός αντοχής σε κόπωση, 1<sup>ο</sup> Πείραμα

Ο υπολογισμός της αντοχής σε κόπωση γίνεται σύμφωνα με την σχέση (6.6) βάσει μετρήσεων του εύρους των κύριων παραμορφώσεων στη κρίσιμη περιοχή για δημιουργία ρήγματος (περιοχή τοπικής ύβωσης στην άνω γενέτειρα του αγωγού).

Στον πίνακα 6.1 παρατίθενται οι τιμές του εύρους των κύριων παραμορφώσεων μετά τον δεύτερο κύκλο φόρτισης (στον κόμβο 239).

Κύκλος φόρτισης	$\Delta E_{\text{principal}}$ ( $\Delta u=50\text{mm}$ )	$\Delta E_{\text{principal}}$ ( $\Delta u=75\text{mm}$ )
2 <sup>ος</sup>	$11.2 \times 10^{-3}$	$25.9 \times 10^{-3}$

**Πίνακας 6.1** Τιμές του εύρους των κύριων παραμορφώσεων μετά τον δεύτερο κύκλο φόρτισης στον κόμβο 239.

Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης πριν από τη θραύση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση (6.6) και τις τιμές του πίνακα 6.1, τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 6.2. Στη σχέση (6.6), στη συγκεκριμένη περίπτωση το μέτρο ελαστικότητας είναι  $E=210000$  MPa, η τάση θραύσης είναι  $\sigma_f'=500$  MPa, η επιμήκυνση θραύσης είναι  $\varepsilon_f'=40\%$  και για τις σταθερές b,c γίνονται οι παραδοχές  $b=-0.10$  και  $c=-0.7$ .

Κύκλος φόρτισης	$N_f$ ( $\Delta u=50\text{mm}$ )	$N_f$ ( $\Delta u=75\text{mm}$ )
2 <sup>ος</sup>	320	80

**Πίνακας 6.2** Αριθμός των κύκλων φόρτισης πριν από τη θραύση σύμφωνα με την σχέση (6.6).

Ωστόσο επειδή στο πρώτο πείραμα το εύρος της συνολικής παραμόρφωσης μεταβάλλεται θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο κανόνας του Miner (σχέση 6.7) ο οποίος στη συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1$$

όπου,  $n_1$  ( $n_1=100$ ) είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που πραγματοποιήθηκαν με εύρος παραμόρφωσης  $\Delta u=50\text{mm}$ ,  $n_2$  είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που πραγματοποιήθηκαν με εύρος παραμόρφωσης  $\Delta u=75\text{mm}$ ,  $N_1$  ( $N_1=320$ ) είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι τελικής θραύσης με εύρος παραμόρφωσης  $\Delta u=50\text{mm}$  που εκτιμάται από τη σχέση (6.6) και  $N_2$  ( $N_2=80$ ) είναι ο αριθμός των

κύκλων φόρτισης μέχρι τελικής θραύσης με εύρος παραμόρφωσης  $\Delta u=75\text{mm}$  που εκτιμάται από τη σχέση (6.6). Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στη σχέση του Miner εκτιμάται ότι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι τελικής θραύσης (διάρκεια ζωής του αγωγού) είναι  $n_2=55$  (κύκλοι φόρτισης) ενώ σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα η διαρροή έγινε μετά από 98 κύκλους. Συνεπώς η αριθμητική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων δίνει μια καλή εκτίμηση της διάρκειας ζωής, δεδομένης της απλής μορφής των τύπων (6.6) και (6.7).

### 6.3 Υπολογισμός αντοχής σε κόπωση, 2<sup>ο</sup> Πείραμα

Στον πίνακα 6.3 παρατίθενται οι τιμές του εύρους των κύριων παραμορφώσεων μετά τον πρώτο και δεύτερο κύκλο φόρτισης, για  $p=0.05-1$  MPa (στον κόμβο 239).

Κύκλος φόρτισης	$\Delta E_{\text{principal}}$ ( $\Delta p=0.95$ MPa)
1 <sup>ος</sup>	$4.06 \times 10^{-3}$
2 <sup>ος</sup>	$1.61 \times 10^{-3}$

**Πίνακας 6.3** Τιμές του εύρους των κύριων παραμορφώσεων μετά τον πρώτο και δεύτερο κύκλο φόρτισης στον κόμβο 239

Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης πριν από τη θραύση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση (6.6) και τις τιμές του πίνακα 6.2, τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 6.4. Στη σχέση (6.6), στη συγκεκριμένη περίπτωση το μέτρο ελαστικότητας είναι  $E=210000$  MPa, η τάση θραύσης είναι  $\sigma_f'=500$  MPa, η επιμήκυνση θραύσης είναι  $\varepsilon_f'=40\%$  και για τις σταθερές b,c γίνονται οι παραδοχές  $b=-0.10$  και  $c=-0.7$ .

Κύκλος φόρτισης	$N_f$ ( $\Delta p=0.95$ MPa)
1 <sup>ος</sup>	2550
2 <sup>ος</sup>	6206

**Πίνακας 6.4** Αριθμός των κύκλων φόρτισης πριν από τη θραύση σύμφωνα με την σχέση 6.6.

Από τη σχέση (6.7) υπολογίζεται η διάρκεια ζωής του αγωγού  $n_2=6206$  (κύκλοι φόρτισης) ενώ σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα η αστοχία επήλθε μετά από 2658 κύκλους. Εδώ ο τύπος (6.6) δεν δίνει μια τόσο καλή εκτίμηση της διάρκειας ζωής.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία μελετά την κόπωση χαλύβδινων αγωγών υπό την παρουσία τοπικού λυγισμού. Η διερεύνηση γίνεται αριθμητικά με χρήση μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα ABAQUS και βασίζεται σε πειραματικές δοκιμές που διεξήχθησαν από το Ολλανδικό Ίδρυμα Ερευνών (TNO, Gresnigt, 2002). Οι πειραματικές δοκιμές περιλάμβαναν κυκλική φόρτιση του αγωγού σε κάμψη και σε εσωτερική πίεση υπό την παρουσία τοπικού λυγισμού μορφής ύβωσης. Η προσομοίωση των πειραμάτων παρουσιάζεται αναλυτικά και έπειτα από σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτει ότι βρίσκονται σε συμφωνία. Επιπλέον γίνεται παραμετρική μελέτη όσον αφορά την επίδραση του βάθους ύβωσης και της εσωτερικής πίεσης στο εύρος των λογαριθμικών παραμορφώσεων. Η παραμετρική μελέτη γίνεται χρησιμοποιώντας δυο αριθμητικά μοντέλα βασισμένα στη προσομοίωση του πρώτου και δεύτερου πειράματος που διεξήχθησαν από το TNO. Αρχικά μελετάται η επίδραση του βάθους ύβωσης, για λόγο διαμέτρου προς πάχος  $D/t = 76$ , στο εύρος των λογαριθμικών παραμορφώσεων κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης, η οποία βασίστηκε στη προσομοίωση του πρώτου πειράματος, δείχνουν ότι η αύξηση του βάθους ύβωσης συντελεί σε μια σχετικά μικρή μείωση του εύρους των παραμορφώσεων κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Για λόγο διαμέτρου προς πάχος  $D/t = 50.6$  και  $D/t = 94.9$  προκύπτει ότι το εύρος των λογαριθμικών παραμορφώσεων κατά τη διαμήκη διεύθυνση δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την αύξηση του βάθους ύβωσης. Στη συνέχεια μελετάται η επίδραση της εσωτερικής πίεσης στο εύρος των λογαριθμικών παραμορφώσεων κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης, η οποία βασίστηκε και σε αυτή τη περίπτωση στη προσομοίωση του πρώτου πειράματος, δείχνουν ότι όταν η επιβολή της εσωτερικής πίεσης είναι μικρότερη των 10 MPa δεν επηρεάζει ιδιαίτερα το εύρος των παραμορφώσεων. Ωστόσο στη περίπτωση όπου η πίεση ξεπερνά τα 10 MPa το εύρος της λογαριθμικής παραμόρφωσης αυξάνεται αρκετά. Επίσης μελετάται η επίδραση της εσωτερικής πίεσης στο εύρος των λογαριθμικών παραμορφώσεων κατά τη περιφερειακή διεύθυνση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης, η οποία βασίστηκε στη προσομοίωση του δεύτερου πειράματος, δείχνουν ότι η αύξηση της εσωτερικής πίεσης συντελεί στην αύξηση του εύρους των παραμορφώσεων κατά τη περιφερειακή διεύθυνση. Τέλος υπολογίζεται η αντοχή σε κόπωση χαλύβδινου

αγωγού στον οποίο επιβάλλεται κυκλική φόρτιση σε κάμψη και σε εσωτερική πίεση υπό την παρουσία τοπικής ύβωσης. Ο υπολογισμός γίνεται βάση μετρήσεων του εύρους των κύριων παραμορφώσεων (από την αριθμητική ανάλυση που έχει προηγηθεί) στη κρίσιμη περιοχή για δημιουργία ρήγματος (άνω γενέτειρα στη περιοχή σχηματισμού τοπικής ύβωσης). Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση (διάρκεια ζωής) υπολογίζεται αναλυτικά χρησιμοποιώντας απλές εκφράσεις των Basquin, Coffin-Manson και Miner.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

[1] TNO, O.D.Dijkstra, T.Nicolaas, A.M.Gresnigt, Reliability and Remaining Lifetime of Pipelines with Local Buckles and Dents, Juni 2002, "Report NO 006.11734".

[2] A.M.Gresnigt., S.A Karamanos., E. Giakoumatos, O.D.Dijkstra, Kreber J. "Fatigue Failure of Buckled Pipelines,, International Conference on Pipeline Engineering & Construction, ASCE, San Diego, CA, August 2004.

[3] Norman E. Dowling, Mechanical Behavior of Materials, Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue, Prentice-Hall International Editions.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074713

