



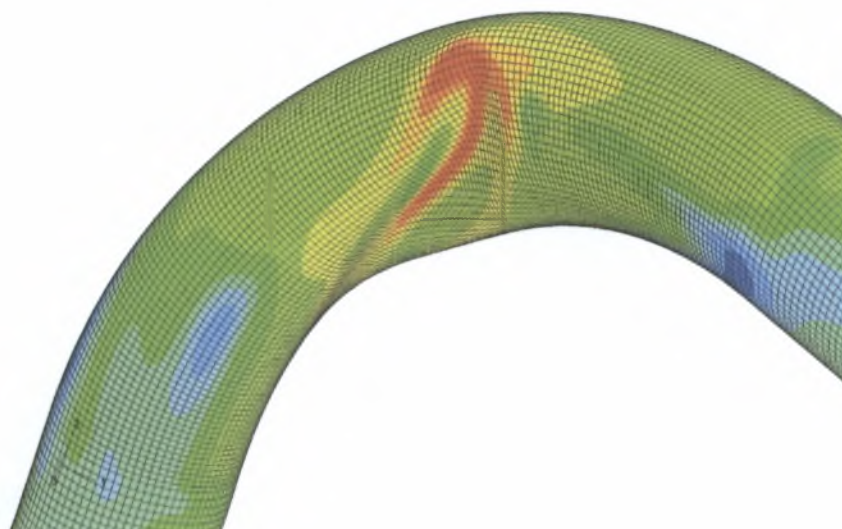
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΟΡΙΑΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ
ΚΑΙ ΚΑΜΨΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΤΣΟΥΒΑΛΑΣ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΣΠΥΡΟΣ. Α. ΚΑΡΑΜΑΝΟΣ
ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ : ΚΩΝ/ΝΟΣ ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ
ΓΡΗΓΟΡΗΣ ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ

ΒΟΛΟΣ
29/09/2003



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

Αριθ. Εισ.: 2428/1
Ημερ. Εισ.: 04-03-2004
Δωρεά:
Ταξιδετικός Κωδικός: ΠΤ ΜΜΒ
2003
ΤΣΟ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000070540

Σε όλους όσους μου στάθηκαν αυτά τα πέντε χρόνια

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	1
1.1.1 <i>Συνεπίπεδη Κάμψη Καμπύλων Σωλήνων (In-Plane Bending)</i>	1
1.1.2 <i>Αντιεπίπεδη Κάμψη Καμπύλων Σωλήνων (Out-Of-Plane Bending)</i>	2
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	3
1.2.1 <i>Δομή της Παρούσας Εργασίας</i>	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΤΝΟ	5
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	5
2.2.1 <i>Συνεπίπεδη Κάμψη</i>	5
2.2.2 <i>Αντιεπίπεδη Κάμψη</i>	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΣΥΝΕΠΙΠΕΔΗΣ ΚΑΜΨΗΣ	12
(IN-PLANE BENDING)	12
3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	12
3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΤΝΟ ΓΙΑ ΣΥΝΕΠΙΠΕΔΗ ΚΑΜΨΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ.....	12
3.3 ΑΣΤΟΧΙΑ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ.....	16
3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΥΝΕΠΙΠΕΔΗΣ ΚΑΜΨΗΣ.....	19
3.4.1 <i>Αποτελέσματα Προσομοίωσης Δοκιμίων 70 ως 75 και 81 ως 84</i>	19
3.4.2 <i>Αποτελέσματα Προσομοίωσης Δοκιμίου 80 (Συνεπίπεδη Κάμψη)</i>	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΑΝΤΙΕΠΙΠΕΔΗΣ ΚΑΜΨΗΣ	33
(OUT-OF-PLANE BENDING)	33
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	33
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΝΤΙΕΠΙΠΕΔΗΣ ΚΑΜΨΗΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ.....	36
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 80 ΥΠΟ ΚΑΜΨΗΣ ΚΑΙ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ 1ΑΤΜ.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ	41
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	41
5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	41
5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	43
5.4 ΕΙΚΟΝΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	49
5.5 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΟΥ ΚΑΜΠΥΛΟΥ ΣΩΛΗΝΑ.....	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΑΓΩΓΟ	59
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	59
6.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΓΩΓΟΥ.....	59
6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΕΝΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΑΣΕΩΝ.....	61
6.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΠΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΡΤΩΣΗΣ.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 - ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	77
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΙΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ...	77

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Τα καμπύλα τμήματα σωληνώσεων (elbows) χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανικές σωληνώσεις. Εξαιτίας της ικανότητας τους να παραλάβουν σημαντικές παραμορφώσεις, μπορούν να υφίστανται σημαντικές θερμικές συστολο-διαστολές και μπορούν να απορροφούν ποικίλα, εξωτερικά ασκούμενα, φορτία, όπως π.χ. οι σεισμικές δονήσεις ή τα τυχηματικά φορτία (εκρήξεις κτλ.).

Μετά την πρωτοποριακή εργασία του Von Karman [1], όπου παρουσίασε για πρώτη φορά ένα θεωρητικό μοντέλο για τις ελαστικές τάσεις που αναπτύσσονται σε κάμψη καμπύλων σωλήνων, εντός του επιπέδου τους και αφού αυτό διευρύνθηκε από τον Vigness [2] για να συμπεριλάβει και την κάμψη εκτός του επιπέδου τους πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την ευκαμψία και τα πεδία των τάσεων των καμπύλων σωλήνων, υποθέτοντας ελαστική συμπεριφορά. Έχουν παρουσιαστεί αναλυτικές λύσεις, υποστηριζόμενες από πειραματικά δεδομένα, για κάμψη αυτών, εντός και εκτός του επιπέδου που ορίζουν το καμπύλο με το ευθύγραμμο τμήμα του σωλήνα, υπό εσωτερική πίεση [3], [4], [5], [6]. Οι ανωτέρω εργασίες αποτελούν τη βάση για τις κανονιστικές διατάξεις που ακολουθούνται σήμερα για το σχεδιασμό σωληνώσεων (π.χ. [7]).

Η ανάπτυξη των υπολογιστικών μεθόδων (π.χ. πεπερασμένα στοιχεία), έχει συμβάλει στην αριθμητική προσομοίωση και τον υπολογισμό της απόκρισης των καμπύλων σωλήνων. Ο Margal [8], συνδυάζοντας την θεωρία καμπύλων δοκών με τη θεωρία κελυφών, πρότεινε ένα ειδικό πεπερασμένο στοιχείο για την ανάλυση τάσεων σε σωλήνες. Ο Sobel [9] μελέτησε τη γραμμική απόκριση σε κάμψη, ελαστικών καμπύλων σωλήνων, συγκρίνοντας προηγούμενα αναλυτικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα που πήρε χρησιμοποιώντας τα δύο υπολογιστικά πακέτα ELBOW και MARC, και παρουσίασε αποτελέσματα για τους συντελεστές ευκαμψίας και συγκέντρωσης τάσεων. Βασισμένοι στην κινηματική των λεπτότοιχων σωλήνων, οι Ohtsubo και Watanabe [10] ανέπτυξαν στοιχεία «δακτυλίου» για την ανάλυση τάσεων σε καμπύλους σωλήνες. Σε πιο πρόσφατες δημοσιεύσεις έχουν αναπτυχθεί αρκετά στοιχεία για ειδικές χρήσεις, τα οποία συνδυάζουν την παραμόρφωση της διατομής με τη διαμήκη παραμόρφωση του ευθύγραμμου τμήματος [11], [12], [13], [14]. Αρκετά από αυτά τα στοιχεία περιλαμβάνονται σήμερα σε εμπορικά υπολογιστικά πακέτα όπως π.χ. ABAQUS, MARC, ADINA.

1.1.1 Συνεπίπεδη Κάμψη Καμπύλων Σωλήνων (In-Plane Bending)

Σε μια σειρά πειραμάτων οι Sobel & Newman [15], [16] και Dhalla [17], ερεύνησαν την μέγιστη αντοχή καμπύλων σωλήνων ($D/t=39$, $R/r=3$) υπό «θετικές» καμπτικές ροπές (σχήμα 1.1)

και ανέφεραν διαφοροποιήσεις της τάσης και της παραμόρφωσης πάνω στη διατομή του σωλήνα και κατά μήκος αυτού. Τα πειραματικά δεδομένα συγκρίθηκαν με αριθμητικά αποτελέσματα από στοιχεία κελύφους (shell elements) και απλοποιημένα στοιχεία καμπύλου σωλήνα (elbow elements). Ο Gresnigt [18] παρουσίασε πειραματικά αποτελέσματα για κάμψη καμπύλων σωλήνων με γωνίες 30° και 60° με θετικές και αρνητικές καμπτικές ροπές. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται στην παρούσα εργασία με αποτελέσματα από την αριθμητική προσομοίωση της πειραματικής τους διάταξης με τη βοήθεια του προγράμματος ABAQUS. Οι Suzuki και Nasu [19] παρουσίασαν δύο πειράματα στα οποία υπέβαλαν υπό κλειστές καμπτικές ροπές καμπύλους σωλήνες 12-inch με $D/t=46.3$ και 24-inch με $D/t=64.9$. Η πειραματική απόκριση συγκρίθηκε με αριθμητικά αποτελέσματα από 4-κομβικά στοιχεία κελύφους. Σε μια πρόσφατη δημοσίευση, ο Tan [20] παρουσίασε ένα πείραμα υπό θετική καμπτική ροπή και ένα υπό αρνητική σε παχείς 90° σωλήνες ($D/t=10.5$) από ανοξείδωτο χάλυβα. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αποτελέσματα από πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements) και σωλήνα (elbow elements).

Οι Gresnigt & Van Foeken [24], [25], παρουσίασαν ένα αναλυτικό μοντέλο για την ελαστοπλαστική παραμόρφωση της διατομής των καμπύλων σωλήνων, εισάγοντας ένα διορθωτικό παράγοντα για να ληφθεί υπ' όψιν και η επιρροή από το συνορεύων ευθύγραμμο τμήμα αυτού. Τα αποτελέσματα τους ήταν, σε αρκετά μεγάλο ποσοστό, σύμφωνα με αυτά των πειραμάτων.

Χρησιμοποιώντας το στοιχείο ELBOW31B του πακέτου ABAQUS, οι Shaleby and Younan [26], [27] ανέλυσαν καμπύλους σωλήνες από χάλυβα με λόγο ακτίνας $Torus, R$, προς την ακτίνα του σωλήνα, r , ίσο με 3 ($R/r=3$) και για διάφορες τιμές του λόγου διαμέτρου του σωλήνα, D , προς το πάχος, t , αυτού που κυμαίνονταν μεταξύ 15.5 και 97 ($15.5 \leq D/t \leq 97$), υπό αρνητικές και θετικές ροπές (σχήμα 1.1) και εσωτερική πίεση, υποθέτοντας σταθερή καμπυλότητα κατά μήκος του καμπύλου μέρους.

Ο Chattopadhyay et al. [28] με το γενικής χρήσεως πρόγραμμα NISA ανέλυσαν καμπύλους σωλήνες 90° και μεγάλου πάχους ($D/t \leq 25$) χρησιμοποιώντας εικοσακομβικά στερεά στοιχεία πλήρους ολοκλήρωσης, και στη συνέχεια εφαρμόζοντας μια διαδικασία παρεμβολής πρότειναν απλοποιημένες εκφράσεις για τη μέγιστη (οριακή) ροπή σε συνάρτηση με την πίεση και τον λόγο καμπυλότητας $h = \frac{Rt}{r^2}$ (σχήμα 1.2).

1.1.2 Αντιεπίπεδη Κάμψη Καμπύλων Σωλήνων (Out-Of-Plane Bending)

Ο Hilsenkopf [21] ανέφερε πειραματικά αποτελέσματα για λεπτότοιχους ($D/t=89.5$) σωλήνες από ανοξείδωτο χάλυβα και παχείς ($D/t=13.4$) σωλήνες από Φερίτη υπό αντιεπίπεδη και συνεπίπεδη κάμψη, σε συνδυασμό με την λειτουργική τους ικανότητα. Επιπλέον μελετήθηκαν οι επιρροή της πίεσης, της θερμοκρασίας, της κυκλικής φόρτισης και των δευτερευουσών τάσεων.

Επιπλέον η εργασία του Gresnigt [18] περιλαμβάνει και out-of-plane πειραματικά αποτελέσματα για 90° σωλήνες με $D/t=53.33$ υπό διάφορες εσωτερικές πιέσεις, τα οποία επίσης συγκρίνονται με αριθμητικά αποτελέσματα στην παρούσα εργασία. Σε μια σειρά πρόσφατων δημοσιεύσεων των Mourad & Younan [22] & [23] εξετάστηκε η επιρροή διαφόρων σχεδιαστικών παραμέτρων στην μέγιστη αντοχή καμπύλων σωλήνων υπό out-of-plane κάμψη και εσωτερική πίεση με τη βοήθεια του ELBOW32 στοιχείου του υπολογιστικού πακέτου ABAQUS και υπολογίστηκε η μέγιστη αντοχή καμπύλων σωλήνων, των οποίων ο λόγος $h = \frac{Rt}{r^2}$ (σχήμα 1.2) παίρνει τιμές από 0.0632 ως 0.04417, όταν αυτοί υπόκεινται σε κάμψη εκτός του επιπέδου (out-of-plane) του σωλήνα, με αυξανόμενη τιμή της εσωτερικής πίεσης, χρησιμοποιώντας και πάλι το στοιχείο ELBOW32 του ABAQUS. Τέλος οι Mourad & Younan [22] & [23] έκαναν συγκρίσεις με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις για συνεπίπεδη (in-plane) κάμψη.

1.2 Σκοπός Της Παρούσας Εργασίας

Στις παραπάνω εργασίες η παραμόρφωση της διατομής του καμπύλου σωλήνα αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα που επηρεάζει τη συμπεριφορά των σωλήνων κατά την κάμψη τους. Συγκεκριμένα, η μέγιστη αντοχή σε κάμψη αυτών, συνδέεται με παραμορφώσεις πέρα του ελαστικού ορίου και με σημαντικές παραμορφώσεις της διατομής τους. Έτσι, για να μελετηθεί η απόκριση των σωλήνων σε οριακές καταστάσεις, απαιτείται να ληφθούν υπ' όψιν τόσο η μη-γραμμικότητα του υλικού όσο και οι γεωμετρικές μη-γραμμικότητες που μπορεί να προκαλέσουν αστάθεια και μετέπειτα αστοχία.

1.2.1 Δομή της Παρούσας Εργασίας

Στην παρούσα εργασία, στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των πειραμάτων του ερευνητικού ιδρύματος TNO. Τα πειράματα αυτά αποσκοπούσαν στην έρευνα της απόκρισης καμπύλων σωλήνων μικρής καμπυλότητας ($R/t=6$) σε συνεπίπεδη και αντεπίπεδη κάμψη υπό ταυτόχρονη επίδραση εσωτερικής πίεσης.

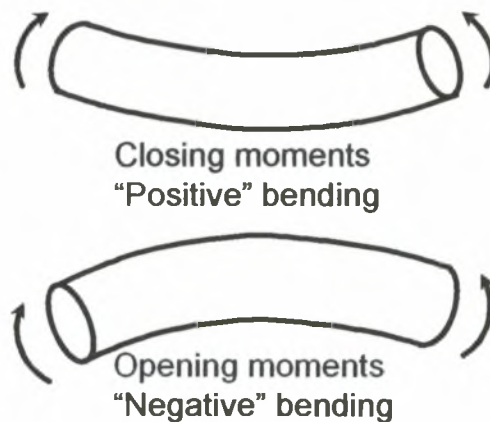
Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται προσομοίωση της απόκρισης καμπύλων σωλήνων υπό ταυτόχρονη δράση θετικών ή αρνητικών ροπών κάμψης, εντός του επιπέδου (in-plane bending) του σωλήνα, και εσωτερικής πίεσης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μέγιστη αντοχή και αστοχία λεπτότοιχων ($D/t=90$) και μετρίως λεπτότοιχων καμπύλων σωλήνων ($D/t = 55.17$). Επίσης γίνεται σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του TNO [17] και σχολιασμός αυτών.

Εν συνεχεία, στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας διεξάγεται αντίστοιχη μελέτη για την ταυτόχρονη επίδραση ροπών κάμψης, εκτός του επιπέδου (out-of-plane bending) του σωλήνα, και εσωτερικής πίεσης, σε σχετικά λεπτούς σωλήνες ($D/t = 55.17$) και γίνεται σύγκριση με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα από την εργασία του TNO (Ίδρυμα Ερευνών της Ολλανδίας) [17] και

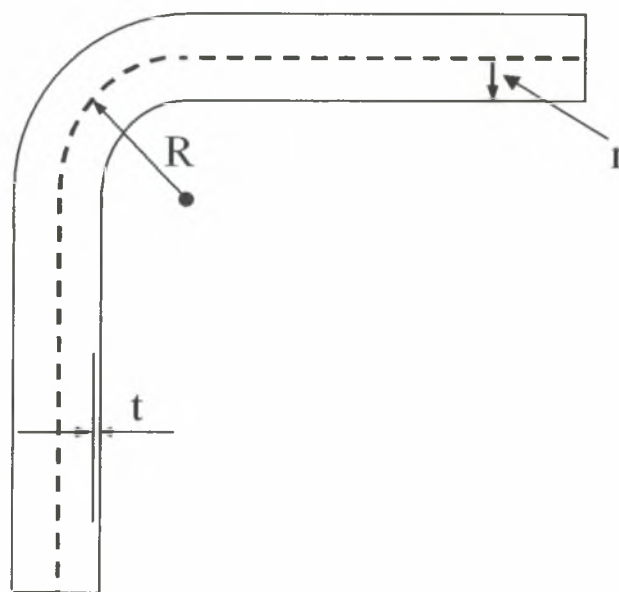
σχολιασμός αυτών. Παράλληλα μελετάται η συμπεριφορά στις ίδιες συνθήκες 2 διαφορετικών στοιχείων κελύφους

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια παραμετρική αριθμητική μελέτη για την ταυτόχρονη επίδραση των ροπών κάμψης εκτός του επιπέδου (out-of-plane bending) του σωλήνα και της εσωτερικής πίεσης σε σωλήνες γωνίας 90° για διάφορες τιμές D/t και εσωτερικής πίεσης καθώς και σχολιασμός αυτών.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ανάλυση της δομικής συμπεριφοράς αγωγού μεταφοράς ύδατος πραγματικών διαστάσεων. Η ανάλυση έγινε σε δύο σκέλη. Στο πρώτο έγινε μία γενική γραμμική ανάλυση τάσεων (global analysis) στην κατασκευή όταν αυτή βρίσκεται υπό την επίδραση του ιδίου βάρους του αγωγού και του ύδατος αλλά και εσωτερική πίεση, ενώ στο δεύτερο έγινε τοπική ανάλυση κύρωσης (local stability analysis) στα καμπύλα τμήματα του αγωγού όταν αυτά υποβάλλονται σε συνεπίπεδη ή αντιεπίπεδη κάμψη και εσωτερική πίεση.



Σχήμα 1.1 : Συμβάσεις για τους όρους «θετική» κάμψη και «αρνητική» κάμψη



Σχήμα 1.2 : Χαρακτηριστικά μεγέθη σωλήνα για την εξίσωση $h=Rt/r^2$ (λόγος καμπυλότητας).

Κεφάλαιο 2 - Πειράματα Ερευνητικού Ιδρύματος TNO

2.1 Εισαγωγή

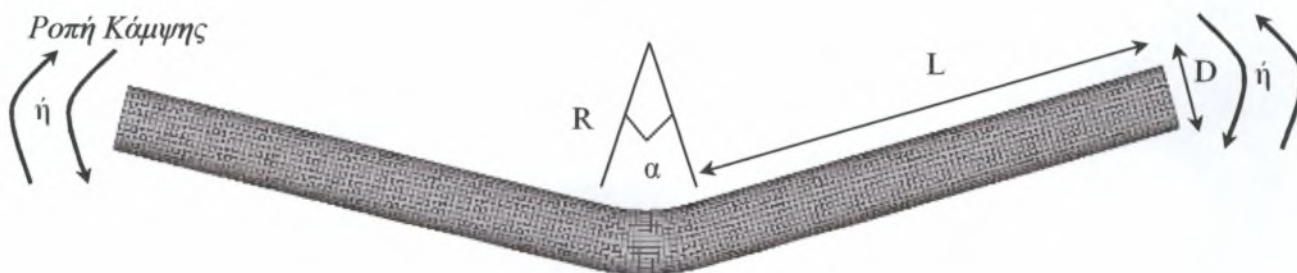
Το 1985 στο Institute of Building Materials and Structures του TNO (κρατικό ερευνητικό ίδρυμα της Ολλανδίας), το οποίο εδρεύει στην πόλη Delft, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων που αποσκοπούσαν στην έρευνα της απόκρισης καμπύλων σωλήνων μικρής καμπυλότητας ($R/r=6$) σε συνεπίπεδη και αντεπίπεδη κάμψη υπό ταυτόχρονη επίδραση εσωτερικής πίεσης. Ακολουθεί η περιγραφή των πειραματικών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν και των πειραματικών διαδικασιών που ακολουθήθηκαν.

2.2 Χαρακτηριστικά Πειραμάτων

2.2.1 Συνεπίπεδη Κάμψη

- Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης 10 Δοκιμών 70-75 και 81-84

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα πειράματα που έγιναν για να μελετηθεί η απόκριση καμπύλων σωλήνων με γωνίες 30° και 60° τα οποία γειτνιάζουν με ευθύγραμμα τμήματα σε συνεπίπεδη κάμψη υπό την ταυτόχρονη επίδραση θετικών ή αρνητικών ροπών και εσωτερικής πίεσης. Οι σωλήνες είχαν $D/t = 90$ και $D/t = 55.17$. Στο *σχήμα 2.1* φαίνονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των σωλήνων που χρησιμοποιήθηκαν στα υπ' όψη πειράματα.

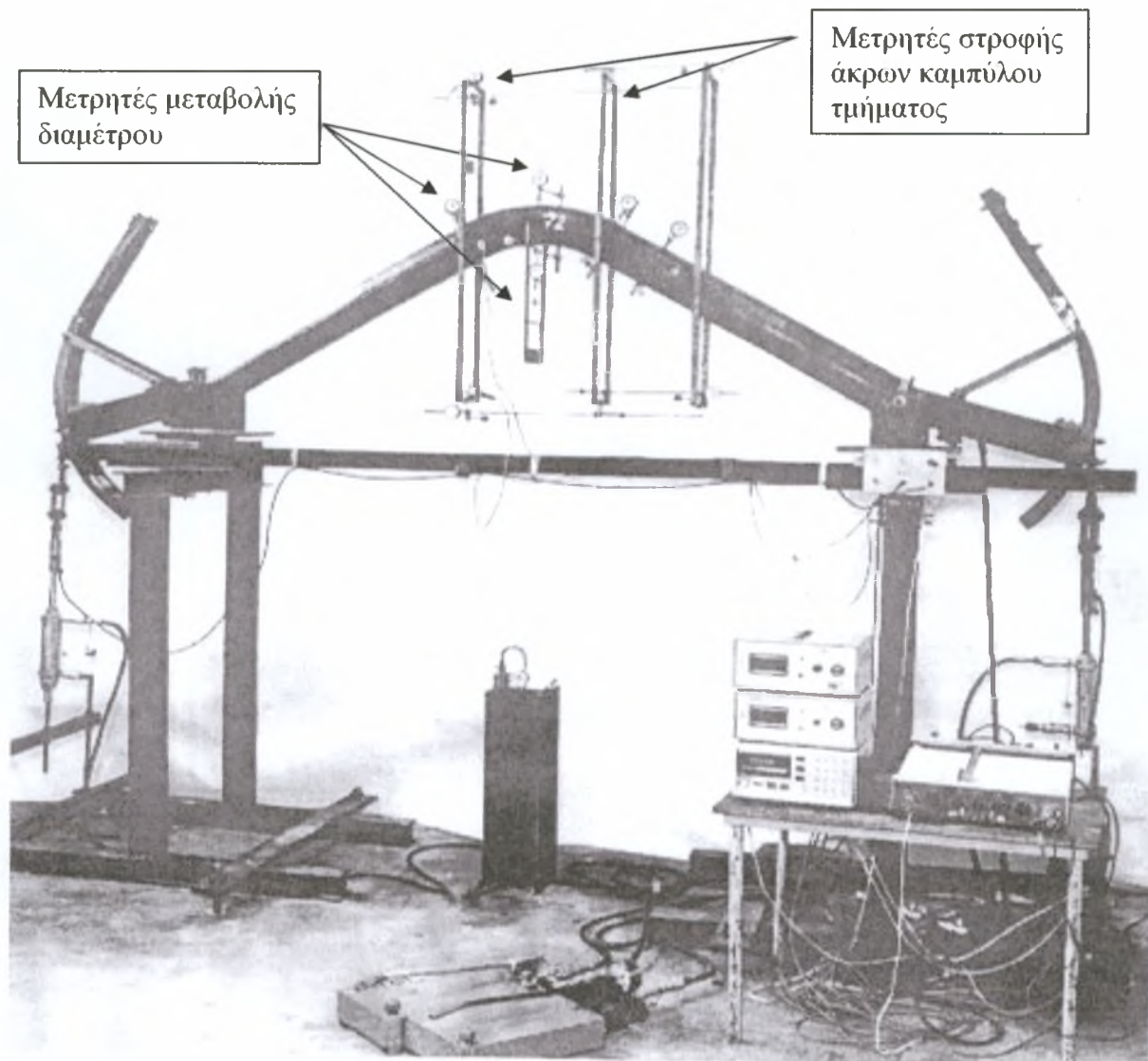


Σχήμα 2.1 : Γενική Μορφή και Χαρακτηριστικά Μεγέθη Δοκιμών Που Χρησιμοποιήθηκαν Στα Πειράματα Του Ιδρύματος TNO

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σωλήνων που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον *πίνακα 2.1*: Σε όλα τα δοκίμια το πάχος του ευθύγραμμου τμήματος ήταν 3.0 mm και του καμπύλου μέρους 2.9 mm. Το υλικό των σωλήνων έχει σημείο διαρροής $\sigma_y = 380$ MPa και μέτρο ελαστικότητας $E = 210$ GPa. Στο *σχήμα 2.2* φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα.

Δοκίμιο	D (mm)	t (mm)	R (mm)	Γωνία	Πίεση (atm)	Κάμψη
70	160	2,9	480	30°	0	Θετική
71	160	2,9	480	30°	0	Αρνητική
72	160	2,9	480	60°	0	Θετική
73	160	2,9	480	60°	0	Αρνητική
74	160	2,9	480	30°	86	Θετική
75	160	2,9	480	30°	86	Αρνητική
81	261	2,9	772	30°	0	Θετική
82	261	2,9	772	30°	0	Αρνητική
83	261	2,9	772	60°	0	Θετική
84	261	2,9	772	60°	0	Αρνητική

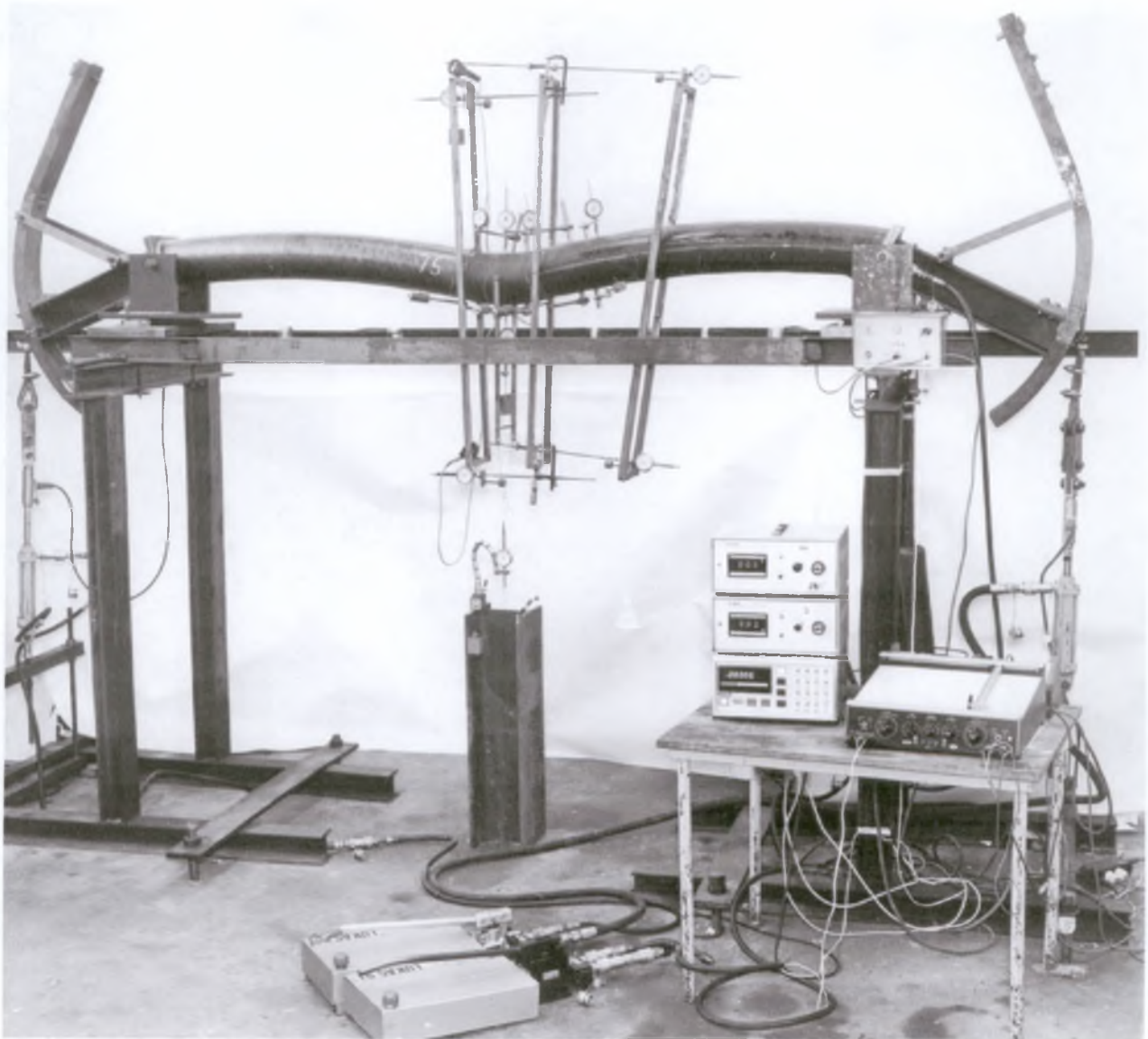
Πίνακας 2.1 : Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Δοκιμών των Πειράματα του Ιδρύματος ΤΝΟ



Σχήμα 2.2 : Πειραματική διάταξη δοκιμών 70-75 & 81-84 του ιδρύματος ΤΝΟ. Εδώ φαίνεται το δοκίμιο 72

Ο σωλήνας λαμβάνει καμπτικές ροπές συμμετρικά από τους δύο μηχανισμούς στα άκρα του, ενώ η στροφή των διατομών μετριέται με κατάλληλες μετρητικές διατάξεις που είναι συνδεδεμένες με τα δύο ευμεγέθη μεταλλικά πλαίσια που είναι συγκολλημένα στις άκρες του καμπύλου τμήματος, όπως φαίνονται στο *σχήμα 2.2*. Παράλληλα με τη βοήθεια δύο πλαισίων, στο κέντρο του καμπύλου τμήματος, μετρήθηκε η μεταβολή της κεντρικής διατομής αυτού του τμήματος του σωλήνα. Τέλος με κατάλληλους μετρητές στο δεξί άκρο του καμπύλου τμήματος και πάνω στο ευθύγραμμο τμήμα μετρήθηκε η στροφή του δεξιού ευθύγραμμου τμήματος του σωλήνα.

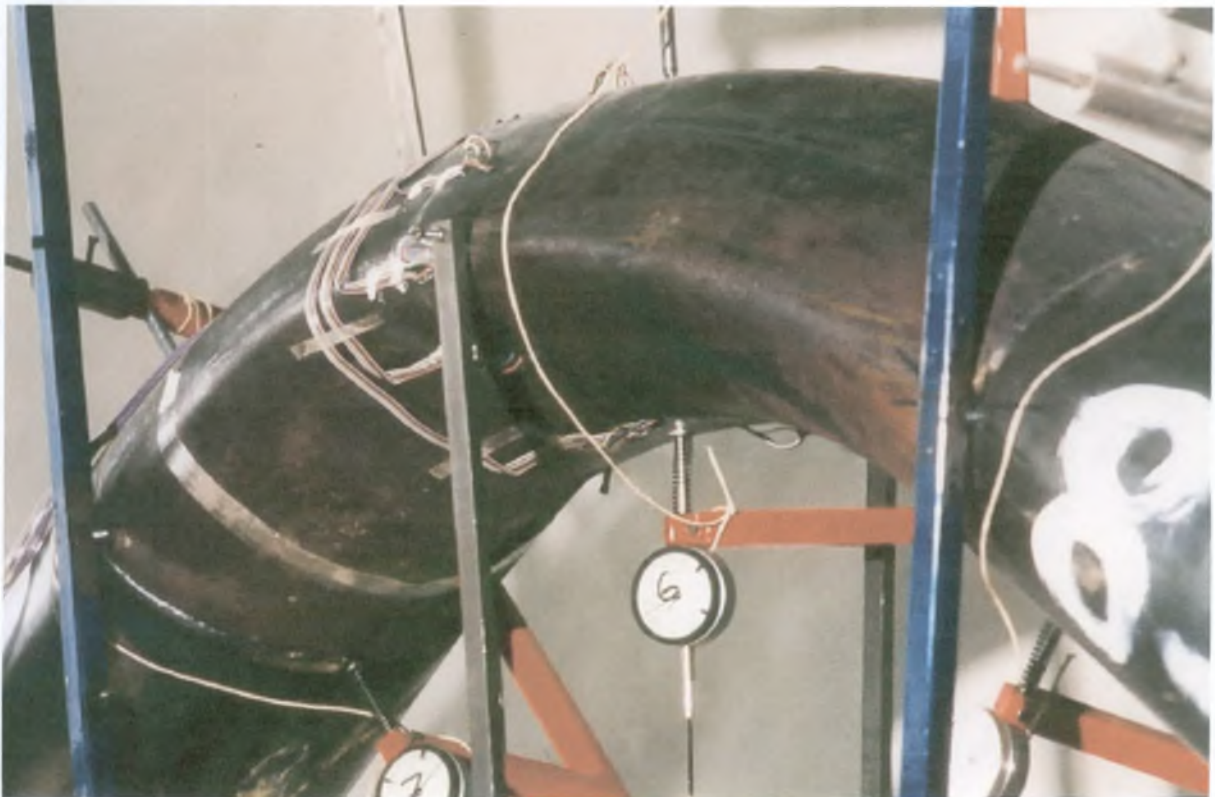
Στα *σχήματα 2.4, 2.5, 2.6* φαίνονται οι σωλήνες των δοκιμών 82, 83, 84 στο τέλος των αντίστοιχων πειραμάτων.



Σχήμα 2.3 : Παραμόρφωση του δοκιμίου 75 στο τέλος του πειράματος. Το δοκίμιο ήταν υπο εσωτερική πίεση 86 atm.



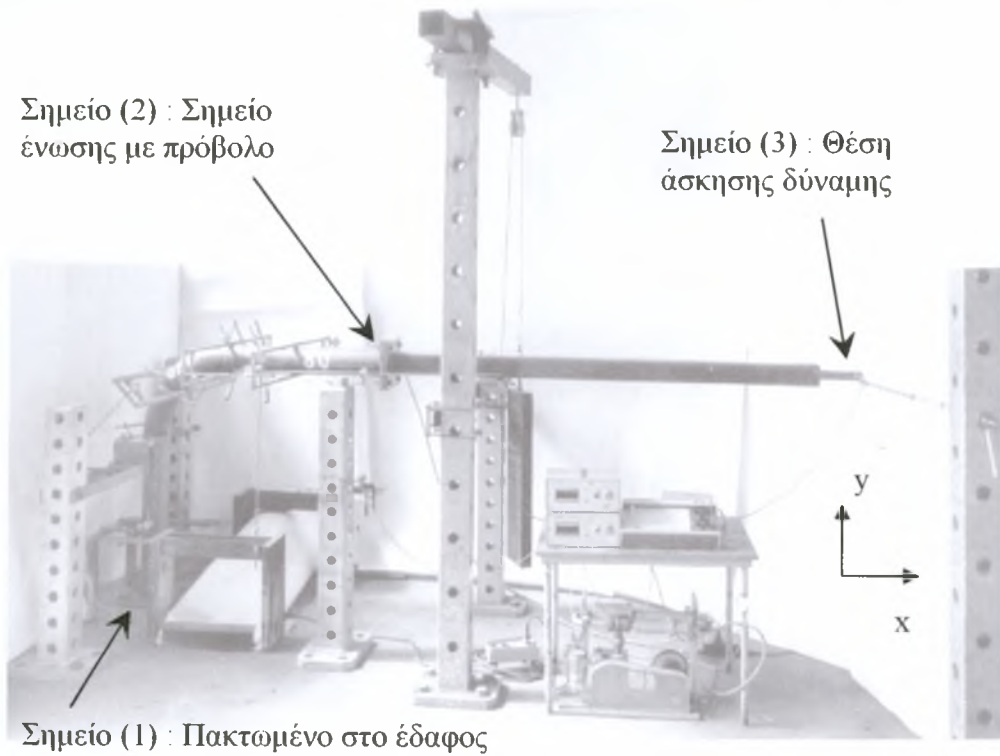
Σχήμα 2.4 : Παραμόρφωση του δοκιμίου 82 στο τέλος του πειράματος



Σχήμα 2.5 : Αστοχία δοκιμίου 83 (Cross-Sectional Flattening)



Σχήμα 2.6: Αστοχία δοκιμίου 84 (Local Buckling)



Σχήμα 2.7 : Πειραματική Διάταξη Δοκιμίου Tube 80

R (mm)	D (mm)	t (mm)	α	L (mm)
480	160	2.9 - 3.0	90°	2660

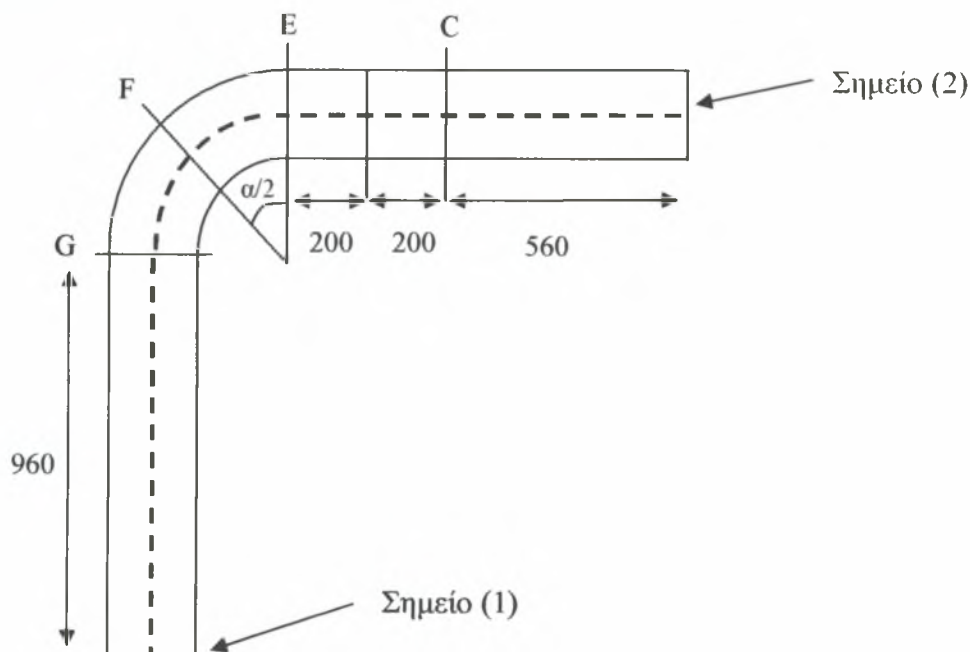
Πίνακας 2.2 : Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίου 80

- Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης Δοκιμίου 80

Εκτός των σωλήνων με καμπύλα τμήματα 30° και 60° οι ανωτέρω διαδικασίες ακολουθήθηκαν και σε σωλήνες, των οποίων τα χαρακτηριστικά φαίνονται στα *σχήματα 2.7, 2.8* και τον *πίνακα 2.2*. Το δοκίμιο είναι καμπύλος σωλήνας συνολικής γωνίας $\alpha = 90^\circ$ και πακτωμένος στο έδαφος στο σημείο (1). Στο σημείο (2) έχει ενωθεί πρόβολος μήκους $L = 2660$ mm και στο ελεύθερο άκρο, σημείο (3), εφαρμόζεται η κατακόρυφη δύναμη (Σχήμα 2.7).

Αρχικά τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε θετικές και αρνητικές καμπτικές ροπές καθώς και σε αντιεπίπεδη κάμψη με ταυτόχρονη επίδραση εσωτερικής πίεσης που έλαβε τιμές 0, 29, 58, 86, 115 atm για να μελετηθεί η απόκριση τους στην ελαστική περιοχή. Δεδομένου ότι η P_y από τον *τύπο 2.1* είναι $P_y = 143.3$ atm, οι χρησιμοποιούμενες τιμές της εσωτερικής πίεσης αντιστοιχούν σε 0%, 20%, 40%, 60%, 80% της P_y , όπου P_y είναι η πίεση πλήρους πλαστικότητας και προκύπτει από τον τύπο :

$$P_y = 2\sigma_y \left(\frac{t}{D} \right) \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.8 : Σημεία Μέτρησης Δοκιμίου Tube 80 (Όλες οι διαστάσεις είναι σε mm)

2.2.2 Αντιεπίπεδη Κάμψη

Τα πειράματα διεξήχθησαν στο δοκίμιο 80 και αποσκοπούσαν στο να εξεταστεί η απόκριση καμπύλων τμημάτων σωλήνων με γωνία 90° σε αντιεπίπεδη κάμψη (Out-Of-Plane Bending) για διάφορα επίπεδα της εσωτερικής πίεσης που έπαιρνε τιμές 0%, 20%, 40%, 60%, 80% της P_y όπως και στα προηγούμενα πειράματα. Οι διάταξη που χρησιμοποιήθηκε σε αυτά τα πειράματα είναι αυτή που περιγράφηκε παραπάνω για τα δοκίμια tube 80 υπο συνεπίπεδη κάμψη, με μόνη διαφορά ότι στο σημείο (3) ασκήθηκε οριζόντια δύναμη, στον άξονα z (σχήμα 2.7).

Εξαιτίας της περιπλοκότητας του φαινομένου σε αυτήν την περίπτωση οι ερευνητές του ΤΝΟ άλλαξαν τον τρόπο μέτρησης των στροφών. Η δύναμη ασκείται στον άξονα z σε αυτήν την περίπτωση, όμως κατά την διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε στρέψη μαζί με κάμψη σημαντικών διατομών και κυρίως πάνω στο καμπύλο τμήμα, γεγονός που είχε σαν συνέπεια να μην έχουμε καθαρή στροφή γύρω από τον άξονα y, αλλά να εμφανίζεται και στροφή γύρω από τον άξονα x. Εξαιτίας αυτών των αποτελεσμάτων η στροφή μετρήθηκε και πάνω στον άξονα x μεταξύ των σημείων G – C και πάνω στον άξονα y μεταξύ των σημείων G – E με κατάλληλες διατάξεις. Η παραμόρφωση στη διατομή του σωλήνα μετρήθηκε στα σημεία E, F και G.

Κεφάλαιο 3 - Προσομοίωση Πειραμάτων Συνεπίπεδης Κάμψης (In-Plane Bending)

3.1 Γενική Περιγραφή Μοντέλων

Το υπολογιστικό πακέτο ABAQUS χρησιμοποιείται εξαιτίας των μεγάλων δυνατοτήτων του για προεπεξεργασία, για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του (post processing) καθώς και της μεγάλης βιβλιοθήκης πεπερασμένων στοιχείων που διαθέτει. Παράλληλα οι μέθοδοι επίλυσης που χρησιμοποιεί είναι γενικά αξιόπιστες και έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε παλιότερες σχετικές εργασίες [22], [23], [30].

Σε όλες τις προσομοιώσεις γίνεται χρήση μιας μη-γραμμικής προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία, που λαμβάνει υπ' όψιν τη μη-γραμμικότητα του υλικού για μεγάλες παραμορφώσεις και της γεωμετρίας της κατασκευής. Αυτές οι απαιτήσεις ικανοποιούνται από τη βιβλιοθήκη πεπερασμένων στοιχείων και των μεθόδων επίλυσης που χρησιμοποιεί το ABAQUS. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται τα στοιχεία κελύφους για λεπτότοιχους σωλήνες S8R5, για σωλήνες σημαντικού πάχους S8R, το τετρακομβικό στοιχείο κελύφους S4R καθώς και το στοιχείο «σωλήνα» (Elbow) ELBOW32. Σε κάποιες περιπτώσεις γίνεται σύγκριση μεταξύ των στοιχείων υπό τις ίδιες συνθήκες, για καθαρά ακαδημαϊκούς λόγους.

3.2 Προσομοίωση των Πειραμάτων TNO για Συνεπίπεδη Κάμψη Καμπύλων Σωλήνων

Οι προεπεξεργασίες των μοντέλων έγινε εξ' ολοκλήρου στο module CAE του ABAQUS, κατά το ένα τέταρτο εξαιτίας των συμμετριών που εμφανίζονται στην συνεπίπεδη κάμψη (in-plane bending) κατά τους άξονες x και z. Χρησιμοποιήθηκε αρχικά το στοιχείο κελύφους S8R5 το οποίο είναι ένα οκτακομβικό στοιχείο με μειωμένη ολοκλήρωση και πέντε βαθμούς ελευθερίας (3 μετατοπίσεις και 2 στροφές πάνω στην επιφάνεια του) και τέσσερις σταθμούς ολοκλήρωσης. Εν συνεχεία χρησιμοποιήθηκε το S8R που είναι παρόμοιο με το S8R5 αλλά έχει 6 βαθμούς ελευθερίας. Τα μοντέλα είχαν 18 στοιχεία περιφερειακά. Κατά το πάχος χρησιμοποιήθηκαν πέντε σημεία ολοκλήρωσης τύπου Simpson. Λήφθηκε υπ' όψιν η μη-γραμμικότητα του υλικού για πλαστικές μεγάλες παραμορφώσεις.

Επίσης χρησιμοποιήθηκε και το στοιχείο S4R το οποίο είναι ένα τετρακομβικό στοιχείο μειωμένης ολοκλήρωσης και ένα σταθμό ολοκλήρωσης. Συγκεκριμένα τα στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης χρησιμοποιούν τόσα σημεία ολοκλήρωσης, σε κάθε κόμβο, όσα είναι απαραίτητα για να υπολογιστεί η συνεισφορά στο δυνατό έργο, των τάσικών πεδίων που είναι μία τάξη μεγέθους

χαμηλότερη από τις εξισώσεις παρεμβολής που χρησιμοποιεί το κάθε στοιχείο. Αντίθετα οι πίνακες της μάζας και των κατανεμημένων φορτίων υπολογίζονται κανονικά.

Παράλληλα χρησιμοποιήθηκαν σε κάποιες περιπτώσεις και τα στοιχεία «σωλήνα» ELBOW32 τα οποία χρησιμοποιούν πολυώνυμα 2^{ου} βαθμού για να περιγράψουν την διαμήκη παραμόρφωση και αναπτύγματα Fourier μέχρι 6^{ου} βαθμού για να περιγράψουν την αλλαγή της γεωμετρίας του σωλήνα. Ο λόγος χρησιμοποίησής τους είναι καθαρά για λόγους σύγκρισης με τα στοιχεία κελύφους όσον αφορά το μέγιστο φορτίο και γενικότερα τη δομική συμπεριφορά των δοκιμίων.

Η πίεση επιβλήθηκε σε ένα πρώτο βήμα μαζί με τη δύναμη που εξομοίωνε την αξονική επίδραση της στην άκαμπτη ακραία πλάκα (Capped-End Force). Η δύναμη αυτή εφαρμόστηκε στον reference node σαν ένα συγκεντρωμένο φορτίο με φορά έξω από το σωλήνα και ήταν πάντα κάθετη στην ακραία διατομή. Εν συνεχεία η πίεση και η capped-end force παρέμειναν σταθερές.

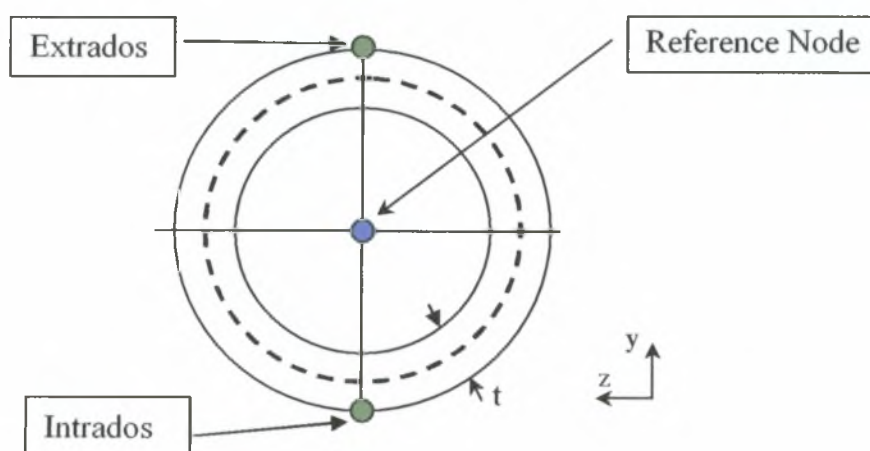
Η ροπή εφαρμόστηκε έμμεσα ασκώντας μία στροφή γύρω από τον άξονα z σταδιακά, σε έναν κόμβο αναφοράς (reference node) του άκρου (σχήμα 3.1) με τον οποίο είχαν «συνδεθεί» όλοι οι κόμβοι της ακραίας «ελεύθερης» διατομής του ευθύγραμμου τμήματος του σωλήνα χρησιμοποιώντας την εντολή “Kinematic Coupling” του ABAQUS. Αυτή η σύνδεση εξαναγκάζει όλους τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων αυτών να κινούνται σύμφωνα με την κίνηση του reference node. Η συνθήκη αυτή κρίθηκε απαραίτητη για να προσομοιωθεί η πραγματική συνοριακή συνθήκη του πειράματος. Συγκεκριμένα στα πειράματα η ροπή εφαρμοζόταν πάνω σε μία άκαμπτη πλάκα που ήταν συγκολλημένη πάνω στο άκρο του ευθύγραμμου τμήματος. Αυτή ακριβώς η πλάκα εξομοιώνεται με την εντολή Kinematic Coupling που εφαρμόστηκε στην παρούσα ανάλυση. Επιπλέον ο κόμβος αναφοράς είχε δεσμευμένους (ίσους με μηδέν) όλους τους βαθμούς ελευθερίας του εκτός των μετατοπίσεων x, y και της στροφής γύρω από τον άξονα z, ώστε να αποφεύγεται και η κίνηση στερεού σώματος που θα δημιουργούσε μηχανισμό.

Η εφαρμογή της στροφής έγινε με δύο διαφορετικές μεθοδολογίες, οι οποίες υποστηρίζονται από το ABAQUS. Ο λόγος ήταν να δειχθεί κατά πόσο είναι αξιόπιστες και συνεπώς αν και κατά πόσο δίνουν τα ίδια αποτελέσματα. Η πρώτη μέθοδος ήταν η κλασική μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε και για την εφαρμογή της πίεσης (displacement control) ενώ η δεύτερη ονομάζεται τροποποιημένος αλγόριθμος RIKS (modified RIKS algorithm).

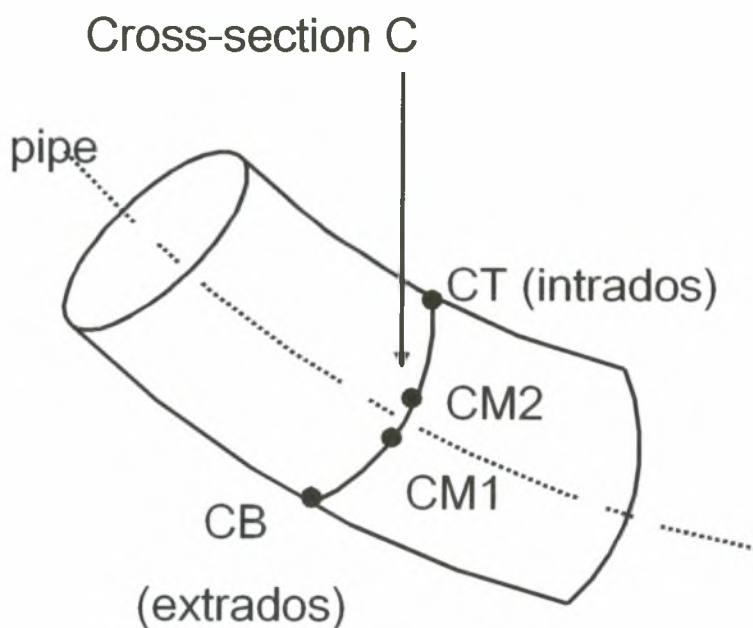
Ο αλγόριθμος RIKS ακολουθεί διαφορετική προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος καθώς θεωρεί το μέγεθος του φορτίου που ασκείται ως επιπλέον άγνωστο, έτσι λύνει ταυτόχρονα για τα φορτία και τις μετατοπίσεις. Για αυτό το λόγο χρειάζεται μια επιπλέον ποσότητα για να ελέγχει την πρόοδο της λύσης. Αυτή είναι το «μήκος τόξου» (Arc Length) κατά μήκος της καμπύλης της ισορροπίας μεταξύ φορτίου-μετατόπισης. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία ενδείκνυται για προβλήματα στα οποία περιμένουμε αστάθεια, όπως π.χ. είναι η κύρτωση (buckling).

Για να υπάρξει ακριβής σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων στα στοιχεία κελύφους και της πειραματικής διάταξης, χρησιμοποιήθηκαν τα σημεία κοντά στον άξονα CM1 και CM2, τα οποία φαίνονται στο *σχήμα 3.2* και αντιπροσωπεύουν τη στροφή που μέτρησαν τα πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα (*σχήμα 2.2*). Σημειώνεται πως τα στοιχεία ELBOW32 δίνουν αποτελέσματα για τη στροφή της διατομής από τον στροφικό βαθμό ελευθερίας που διαθέτουν και έτσι δίνουν μια αντιπροσωπευτική τιμή της στροφής της διατομής. Η στροφή αυτή αναμένεται να συμπίπτει με τη στροφή που υπολογίζεται από τα σημεία CT και CB της διατομής

Για τη συμπεριφορά του υλικού χρησιμοποιήθηκε ελαστοπλαστικός χάλυβας με τάση διαρροής $\sigma_y = 380 \text{ MPa}$, μέτρο ελαστικότητας $E = 210 \text{ GPa}$ και λόγο Poisson $\nu = 0.3$. Η καμπύλη ονομαστικής τάσης και ανηγμένης παραμόρφωσης σ - ϵ μετά τη διαρροή φαίνεται αναλυτικά στον *πίνακα 3.1* και γραφικά στο *σχήμα 3.3*



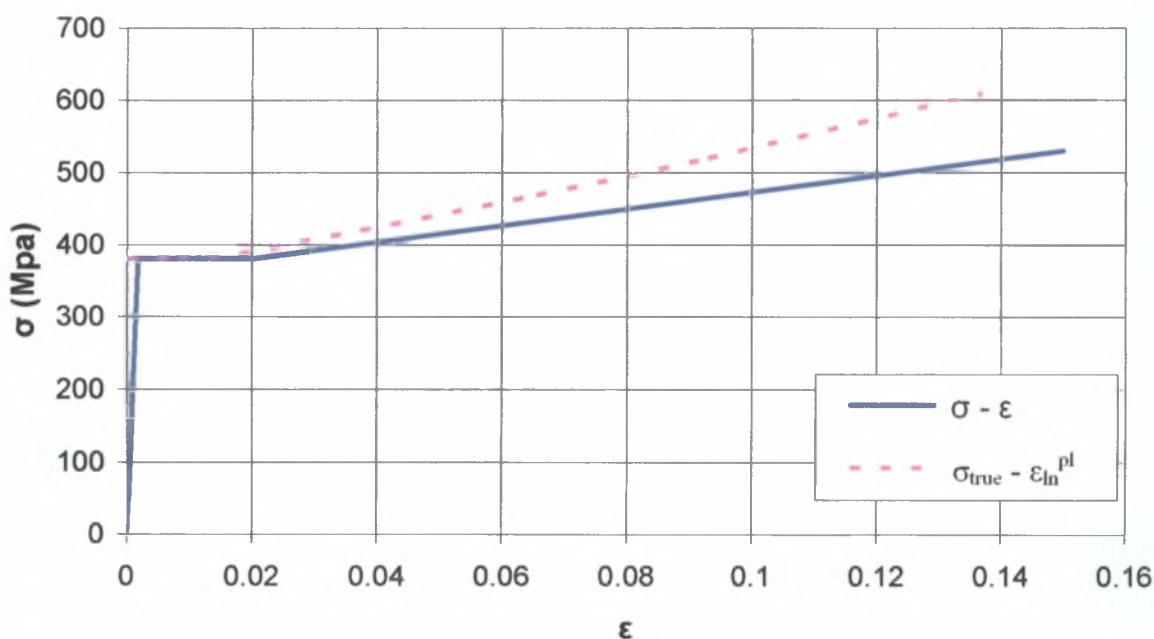
Σχήμα 3.1: Ακραία διατομή ελεύθερου άκρου του ευθύγραμμου τμήματος δοκιμίων.



Σχήμα 3.2 : Σημεία μέτρησης δοκιμίων 70-75 και 81-84

σ (Mpa)		ϵ	
Nominal	TRUE	Engineering	Logarithmic plastic
380.00	380.69	0.001809524	0
380.00	383.80	0.01	0.008122712
380.00	387.60	0.02	0.017956913
391.54	403.29	0.03	0.027638392
403.08	419.20	0.04	0.037224507
437.69	468.33	0.07	0.065428514
472.30	519.53	0.1	0.092836227
530.00	609.50	0.15	0.136859561

Πίνακας 3.1: Οι τιμές της ονομαστικής (Nominal) τάσης και μηχανικές (Engineering) της παραμόρφωσης και οι αντίστοιχες τιμές TRUE και Logarithmic Plastic Strain (τύποι 3.1, 3.2)



Σχήμα 3.3 : Καμπύλη σ - ϵ του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των πειραμάτων του TNO σε σύγκριση με τις τιμές που προκύπτουν από τους τύπους 3.1 & 3.2

Στις στήλες Nominal stress και engineering strain είναι οι τιμές της ονομαστικής τάσης σ , σε MPa, και της ανηγμένης παραμόρφωσης ϵ . Το ABAQUS όμως, απαιτεί τις τιμές της πραγματικής τάσης σ_{true} και της λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης ϵ_{ln}^{pl} για την ανάλυση. Οι ζητούμενες τιμές δίνονται από τις εξισώσεις 3.1 και 3.2, αν το υλικό είναι ισότροπο.

$$\sigma_{TRUE} = \sigma_{Nominal} (1 + \epsilon_{Nominal}) \quad (3.1)$$

$$\epsilon_{ln}^{pl} = \ln(1 + \epsilon_{Nominal}) - \left(\frac{\sigma_{TRUE}}{E} \right) \quad (3.2)$$

3.3 Αστοχία Λεπτότοιχων Καμπύλων Σωλήνων

Μετά την αρχή της πλαστικοποίησης του υλικού, ο καμπύλος σωλήνας είναι ικανός να δεχτεί περαιτέρω φόρτιση χωρίς απώλεια της αντοχής του. Παρ'όλα αυτά σε κάποιο σημείο αρχίζουν να εμφανίζονται έντονες τοπικές παραμορφώσεις εξαιτίας μεγάλων παραμορφώσεων των διατομών (cross-sectional ovalisation) ή τον τοπικό λυγισμό (κύρτωση).

Πειραματικές μελέτες και αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η απόκριση ενός καμπύλου σωλήνα υπό θετική κάμψη (closing moment) καταλήγει σε αστάθεια «οριακού φορτίου» και η κατασκευή αστοχεί εξαιτίας του ότι η διατομή γίνεται πάρα πολύ «επίπεδη» με τη βοήθεια ενός μηχανισμού τεσσάρων ισαπέχοντων πλαστικών αρθρώσεων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.20 που συμφωνεί με το σχήμα 2.5.

Στην περίπτωση της αρνητικής κάμψης (opening moment) παρατηρείται μια εντελώς διαφορετική απόκριση (δοκίμια 82, 84). Η απόκριση είναι σημαντικά πιο δύσκαμπτη από την περίπτωση της θετικής κάμψης. Επιπλέον παρουσιάζεται τοπική κύρτωση στην «εξωτερική» πλευρά της διατομής του σωλήνα, όπως παρατηρείται στα πειράματα (σχήματα 2.4 και 2.6) και επιβεβαιώνεται από τα αριθμητικά αποτελέσματα (σχήμα 3.22 - δοκίμιο 84).

Με τη χρήση ενός απλού επιχειρήματος μπορεί να επιβεβαιωθεί η θέση της κύρτωσης πάνω στη διατομή του σωλήνα, λαμβάνοντας υπ'όψιν το σχήμα της παραμορφωμένης διατομής πριν την κύρτωση. Αυτό το επιχείρημα προτάθηκε για πρώτη φορά και επιβεβαιώθηκε από τους Seide & Weingarten [31] για την περίπτωση απλής κάμψης ελαστικών λεπτών κυλίνδρων οι οποίοι είναι αρχικά ευθύγραμμοι και των οποίων η διατομή δεν παραμορφώνεται. Εν συνεχεία ο Axelrad [32] χρησιμοποίησε αυτό το επιχείρημα για να ελέγξει την κύρτωση ελαστικών σωλήνων υπό κάμψη, λαμβάνοντας υπ'όψιν την παραμόρφωση της διατομής. Μία επιβεβαίωση της υπόθεσης του Axelrad με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάστηκε πρόσφατα [33]. Η επέκταση αυτής της υπόθεσης για κάμψη ανελαστικών σωλήνων έγινε πρόσφατα [34] και παρουσιάζεται παρακάτω.

Το επιχείρημα βασίζεται στην κάτωθι εξίσωση (3.3) της τάσης κύρτωσης για κυλινδρικά κελύφη υπό ομοιόμορφη θλιπτική τάση σ_u στην διαμήκη διεύθυνση.

$$\sigma_{u,cr} = \eta C (t/r) \quad (3.3)$$

όπου C είναι ένας παράγοντας που συμπεριλαμβάνει τις αρχικές ατέλειες [35], και η ($0 < \eta < 1$) είναι ένας παράγοντας μείωσης της πλαστικότητας που εξαρτάται από το επίπεδο της τάσης [36]. Αν $C=0.605$ και $\eta=1$, τότε η (3.3) γίνεται ο κλασικός τύπος για ελαστική κύρτωση λεπτότοιχων μεταλλικών κυλινδρικών κελυφών [37]. Στην περίπτωση των καμπύλων σωλήνων υπό κάμψη, οι διαμήκεις τάσεις δεν είναι ομοιόμορφες πάνω στη διατομή του και η διατομή αυτή δεν είναι πλέον κυλινδρική εξαιτίας της παραμόρφωσης. Έτσι η εξίσωση 3.3 δεν μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα.

Παρ'όλα αυτά μπορεί να εφαρμοστεί τοπικά. Υποθέτουμε ότι η διατομή κυρτώνεται στο σημείο όπου η τοπική θλιπτική διαμήκης τάση φτάνει την τιμή

$$\sigma'_{u,cr} = \eta C(t/r') \quad (3.4)$$

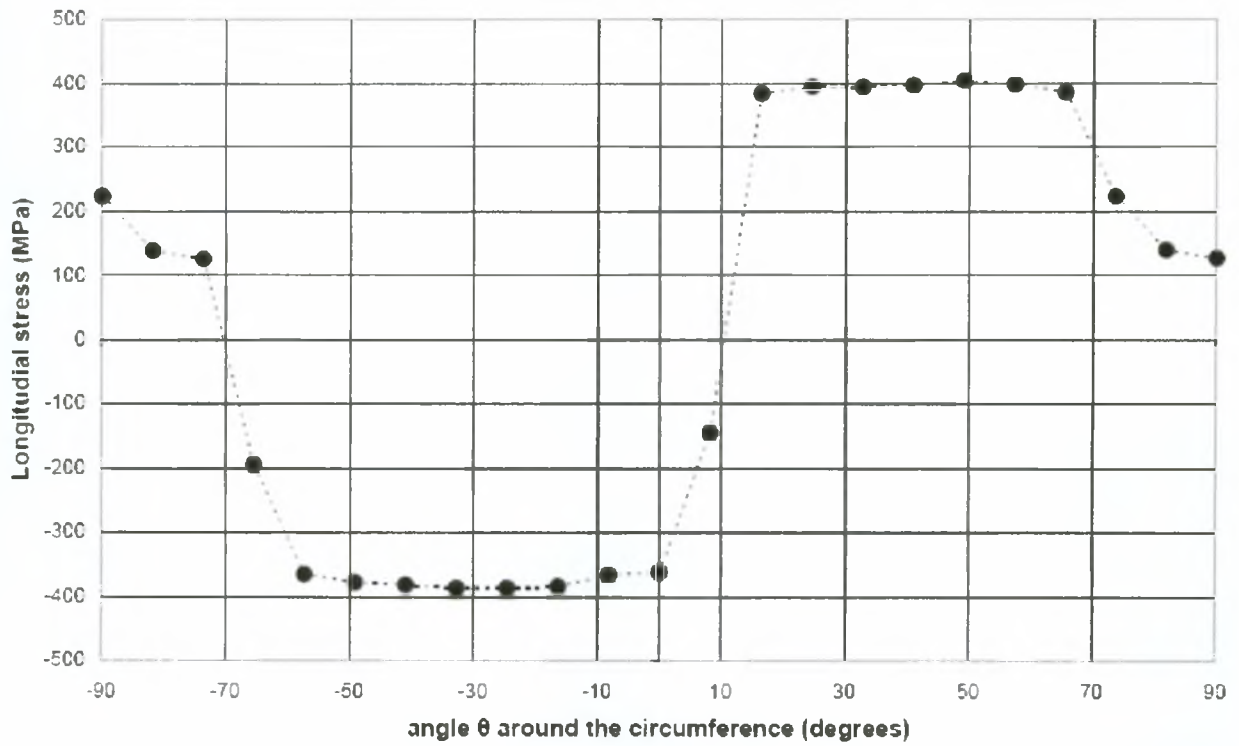
όπου $1/r'$ είναι η τοπική καμπυλότητα στεφανιού του τείχους του σωλήνα σε μία συγκεκριμένη θέση πάνω στην περιφέρεια. Η τιμή της τοπικής καμπυλότητας στεφανιού υπολογίζεται από την εξίσωση 3.5 [37] :

$$1/r' = 1/r + \left(\frac{dv}{d\theta} - \frac{d^2w}{d\theta^2} \right) / r^2 \quad (3.5)$$

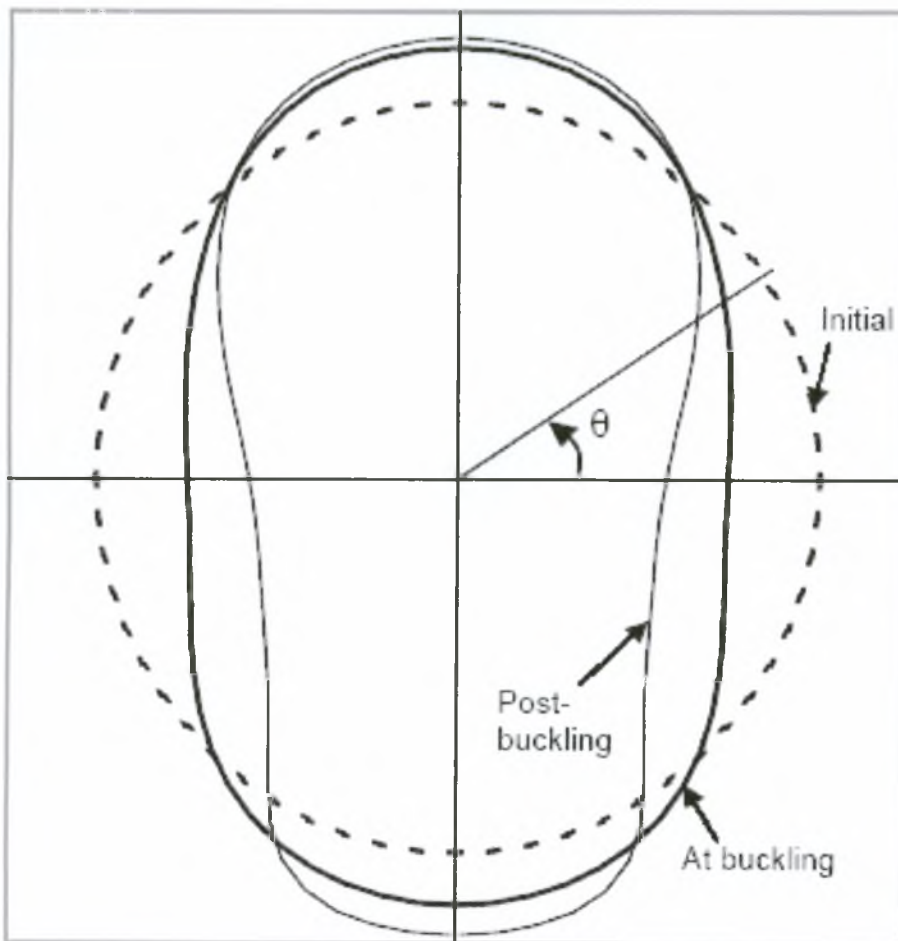
όπου w , v η ακτινική και η εφαπτομενική μετατόπιση ενός σημείου του σωλήνα στο επίπεδο του.

Η θέση πάνω στη διατομή στην οποία η διαμήκης τάση φτάνει πρώτη σε μια τιμή ίση με την αντίσταση σε κύρτωση $\sigma'_{u,cr}$ (εξίσωση 3.4) είναι επικίνδυνη και σε αυτή εμφανίζεται η κύρτωση.

Σε σωλήνες υπό αρνητική κάμψη, εμφανίζεται παραμόρφωση της διατομής και σε κάποια σημεία στην «εξωτερική» επιφάνεια της διατομής όπου το τοίχωμα είναι σχεδόν επίπεδο, γεγονός που αντιστοιχεί σε μικρή τοπική καμπυλότητα $1/r'$ (σχήματα 2.6 και 3.22). Συνεπώς από την εξίσωση 3.4 προκύπτει ότι σε εκείνα τα σημεία θα έχουμε μικρή αντίσταση σε κύρτωση. Επιπλέον το πεδίο των διαμηκών τάσεων στην κεντρική διατομή του δοκιμίου 84 στη φάση που συμβαίνει η κύρτωση, όπως αυτό προκύπτει από ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (σχήμα 3.4) [34], παρουσιάζει μία έντονη συγκέντρωση ανελαστικών θλιπτικών τάσεων σε μια περιοχή όπου $-60^\circ < \theta < 0^\circ$. Σε αυτήν ακριβώς την περιοχή παρατηρείται και η κύρτωση.



Σχήμα 3.4: Διαμήκεις τάσεις περιφερειακά στην κεντρική διατομή του δοκιμίου 84 κατά την κύρτωση, [34]



Σχήμα 3.5 : Παραμόρφωση της κεντρικής διατομής του δοκιμίου 84, [34].

3.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Συνεπίπεδης Κάμψης

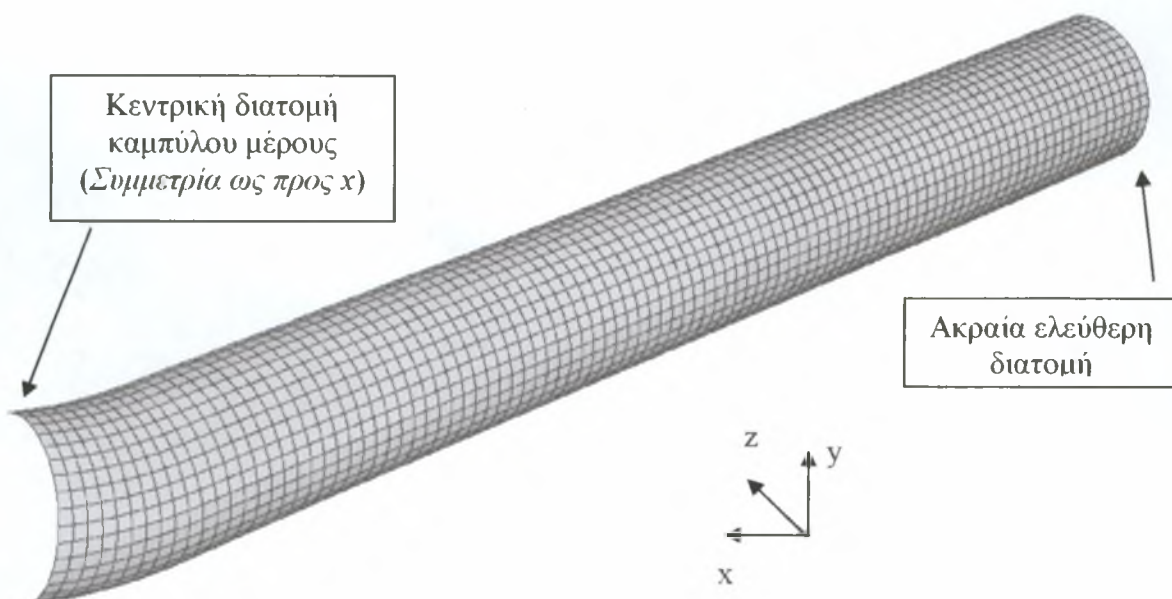
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της συνεπίπεδης κάμψης, (in-plane bending) τμημάτων καμπύλων σωλήνων με γωνίες 30° και 60° , τα οποία γειτνιάζουν με ευθύγραμμα τμήματα. Οι σωλήνες αυτοί είναι όμοιοι με τα δοκίμια των πειραμάτων του ΤΝΟ. Τα δοκίμια αναλύθηκαν με τη βοήθεια του ABAQUS και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα.

3.4.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Δοκιμίων 70 ως 75 και 81 ως 84

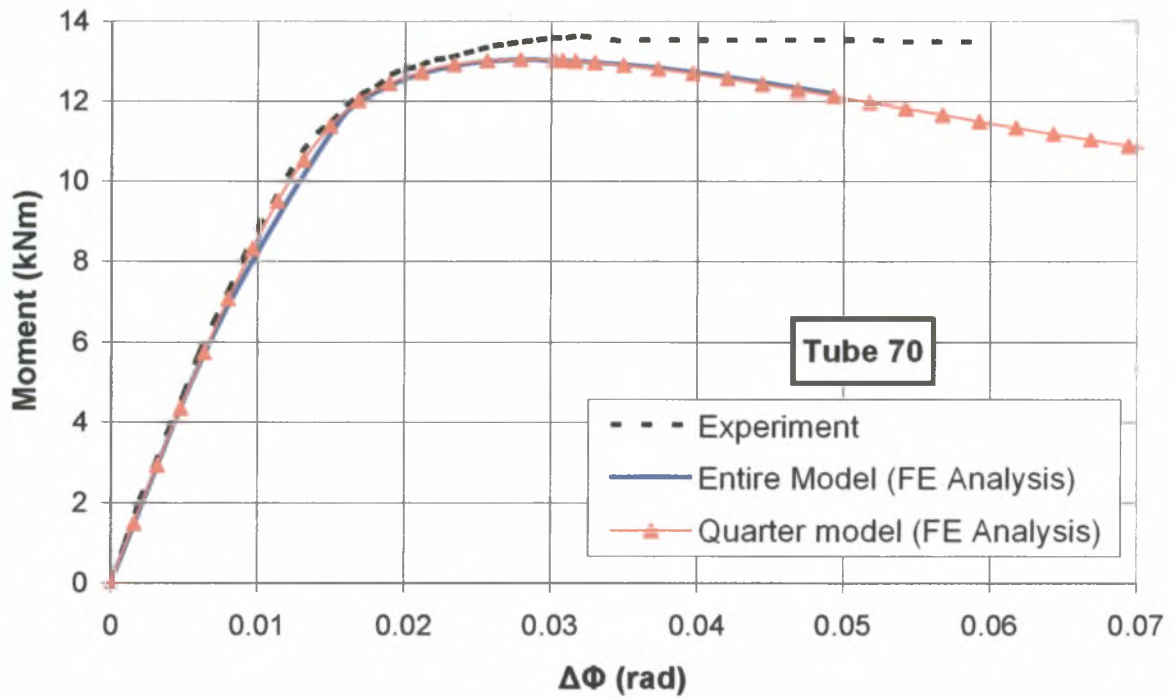
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα για τα δοκίμια 70-75 και 81-84 (συνολικά δέκα δοκίμια). Τα διαγράμματα δίνουν τη ροπή, σε kNm, στον κόμβο αναφοράς (σχήμα 3.1) ως προς τη στροφή των σημείων CM1-CM2 (σχήμα 3.2), η οποία αναφέρεται σε rad.

Στο σχήμα 3.6 φαίνεται ένα τυπικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για τα μοντέλα 70-75 και 81-84. Στο σύνολο τους τα μοντέλα σχεδιάστηκαν κατά το ένα τέταρτο καθώς στην συνεπίπεδη κάμψη υπάρχει συμμετρία ως προς τον άξονα z κατά μήκος του αγωγού και συμμετρία ως προς x περιφερειακά, στο μέσο του καμπύλου τμήματος του δοκιμίου.

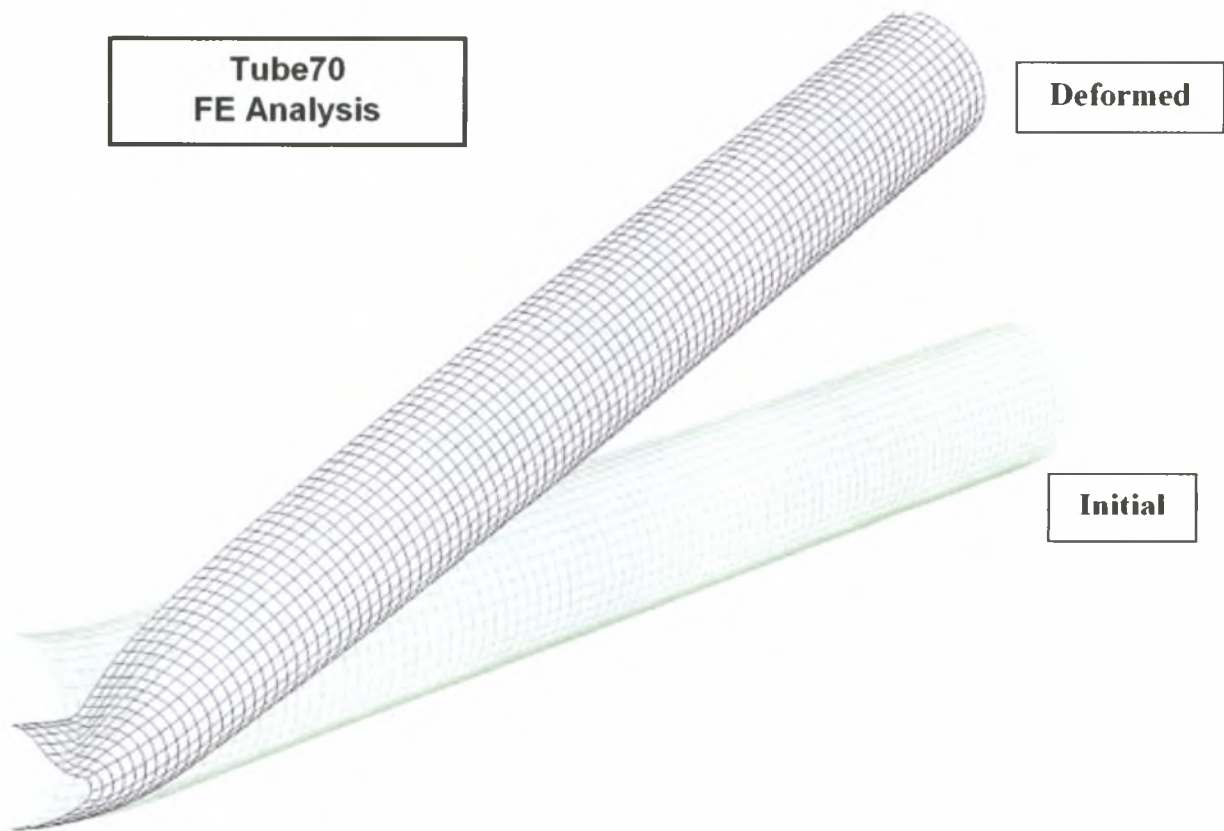
Στο μοντέλο 70 έγιναν δύο αναλύσεις. Μία ανάλυση με ολόκληρο το μοντέλο και μία με το ένα τέταρτο αυτού. Σκοπός της ανάλυσης ήταν να εξεταστεί η ορθότητα της παραδοχής των συμμετριών που εφαρμόστηκαν στην ανάλυση με το ένα τέταρτο του δοκιμίου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 3.7 και 3.8



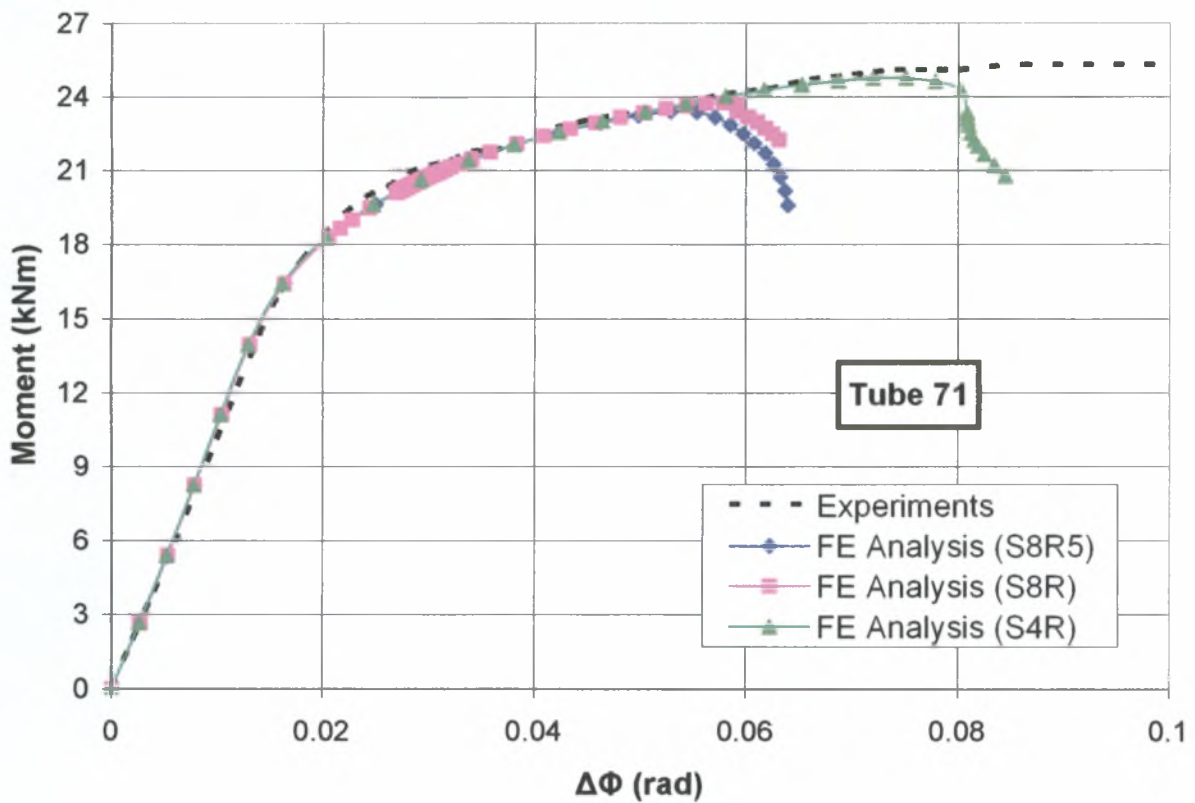
Σχήμα 3.6 : Τυπικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για τα μοντέλα 70-75 και 81-84



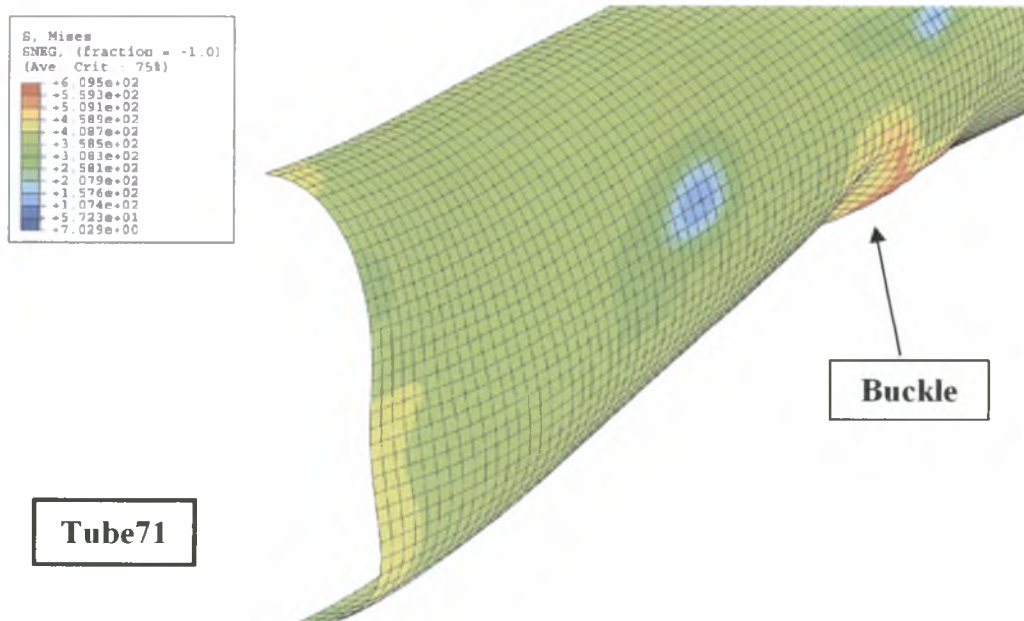
Σχήμα 3.7 : Αποτελέσματα προσομοίωσης δοκιμίου 70. Σύγκριση προσομοίωσης ολόκληρου του δοκιμίου με το ενός τέταρτο αυτού. Διάγραμμα σχετικής στροφής σημείων CM1,CM2 - ροπή στο άκρο.



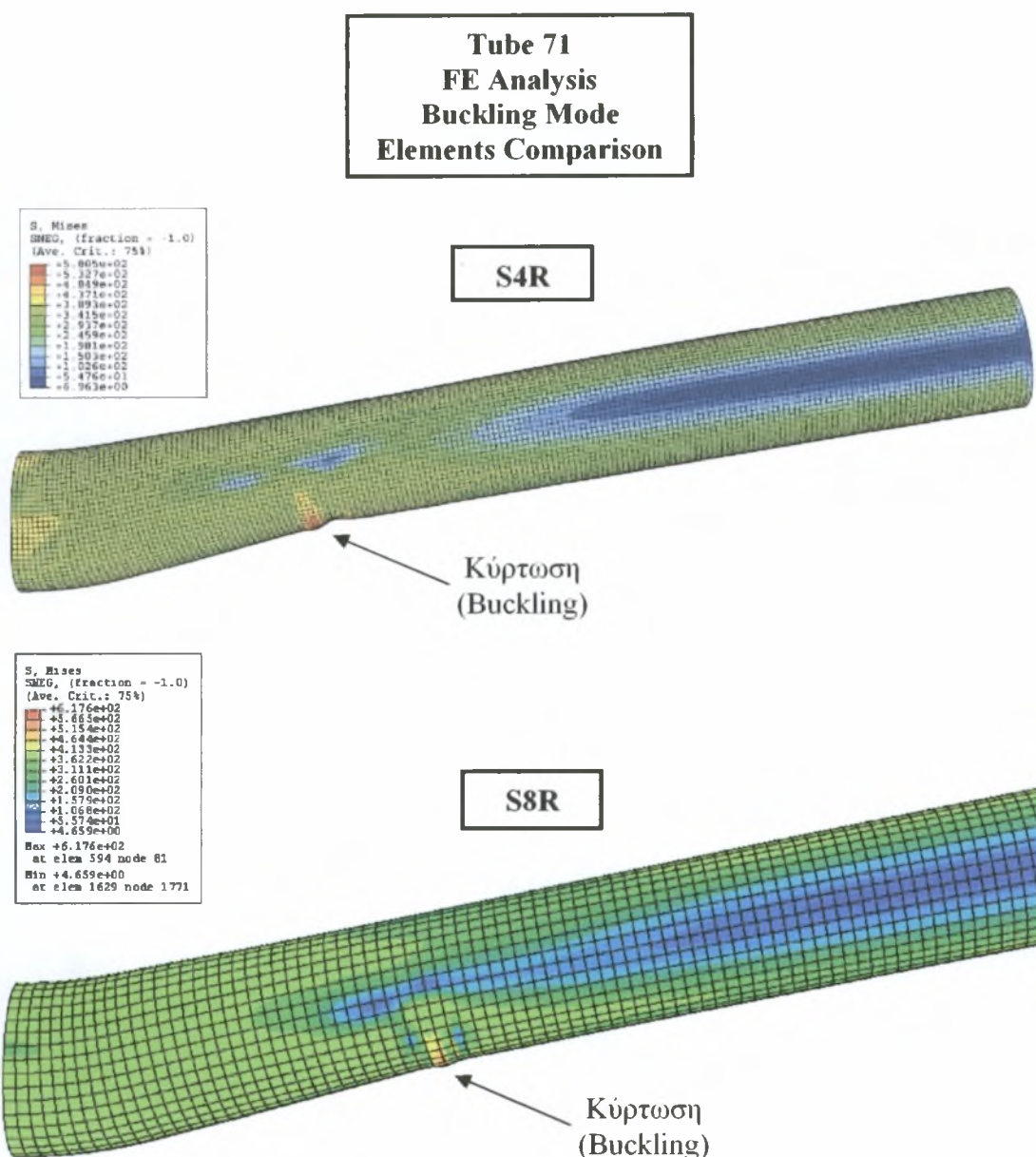
Σχήμα 3.8 : Υπέρθυση απαράμορφωτης (initial) και παραμορφωμένης (deformed) μορφής του δοκιμίου 70.



Σχήμα 3.9: Σύγκριση προσομοιώσεων δοκιμίου 71 με τα στοιχεία S8R5, S8R, S4R με τα πειραματικά αποτελέσματα. Διάγραμμα σχετικής στροφής σημείων CM1, CM2 με τη ροπή στο άκρο.



Σχήμα 3.10 : Λεπτομέρεια από το δοκίμιο 71 μετά την αστοχία (S4R).



Σχήμα 3.11 : Σύγκριση μοντέλων του δοκιμίου 71 με στοιχεία S4R και S8R τη στιγμή που αστοχεί λόγω τοπικού λυγισμού.

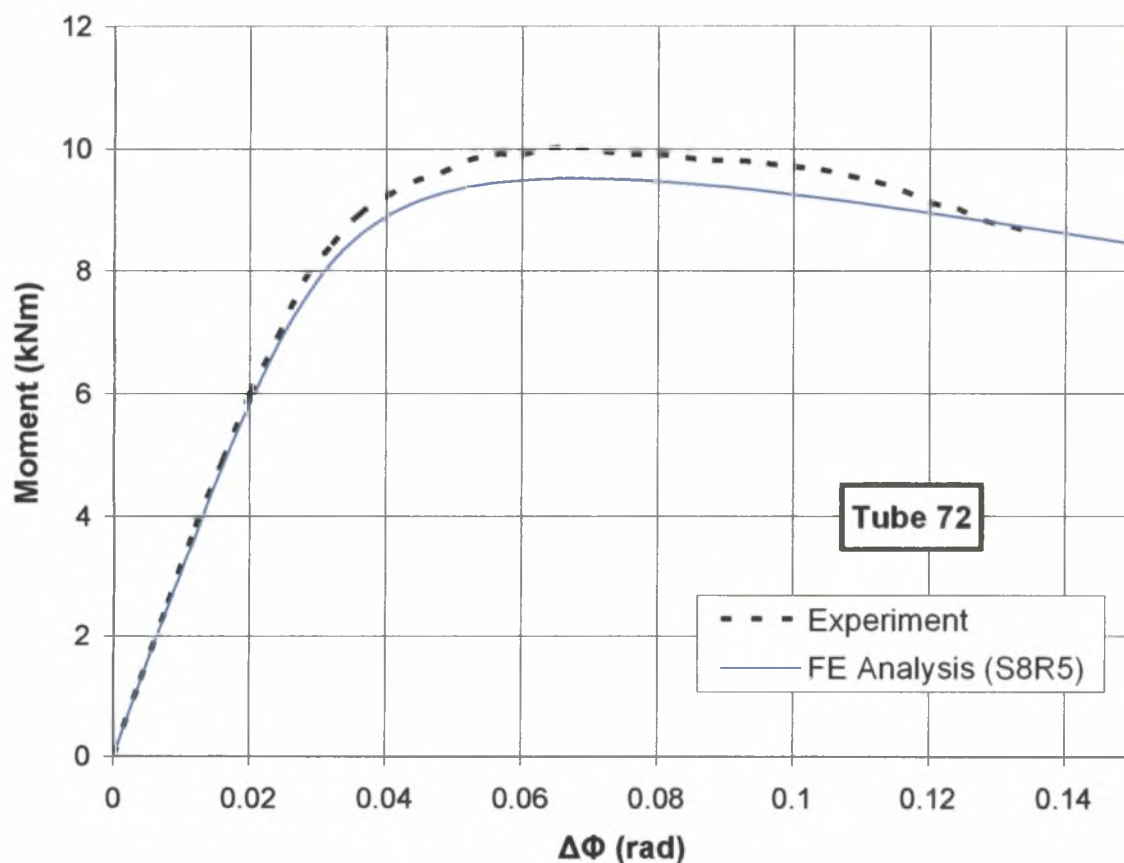
Από το *σχήμα 3.7* είναι προφανές ότι οι δύο προσομοιώσεις για το δοκίμιο 70 δίνουν τα ίδια αποτελέσματα. Σε σύγκριση με το αντίστοιχο πείραμα παρατηρείται μικρότερη τιμή κατά 5% για τη μέγιστη ροπή αντοχής του σωλήνα. Επίσης κατά το ελαστικό μέρος της απόκρισης υπάρχει ταύτιση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Γενικά η σύγκριση κρίνεται πολύ καλή.

Στο *σχήμα 3.9* παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του δοκιμίου 71. παρατηρήθηκε αδυναμία των στοιχείων S8R5 και S8R να προβλέψουν τη συμπεριφορά των πειραμάτων σε σχέση με το σημείο τοπικού λυγισμού (κύρτωσης). Αντίθετα το S4R δίνει καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τα πειραματικά αποτελέσματα, ούτε αυτά όμως είναι απολύτως ικανοποιητικά. Σε παραμετρικές μελέτες που έγιναν με πυκνότερα πλέγματα με το S8R5 και το S4R, τα αποτελέσματα δεν διέφεραν αισθητά. Το θέμα αυτό (του ακριβούς υπολογισμού του

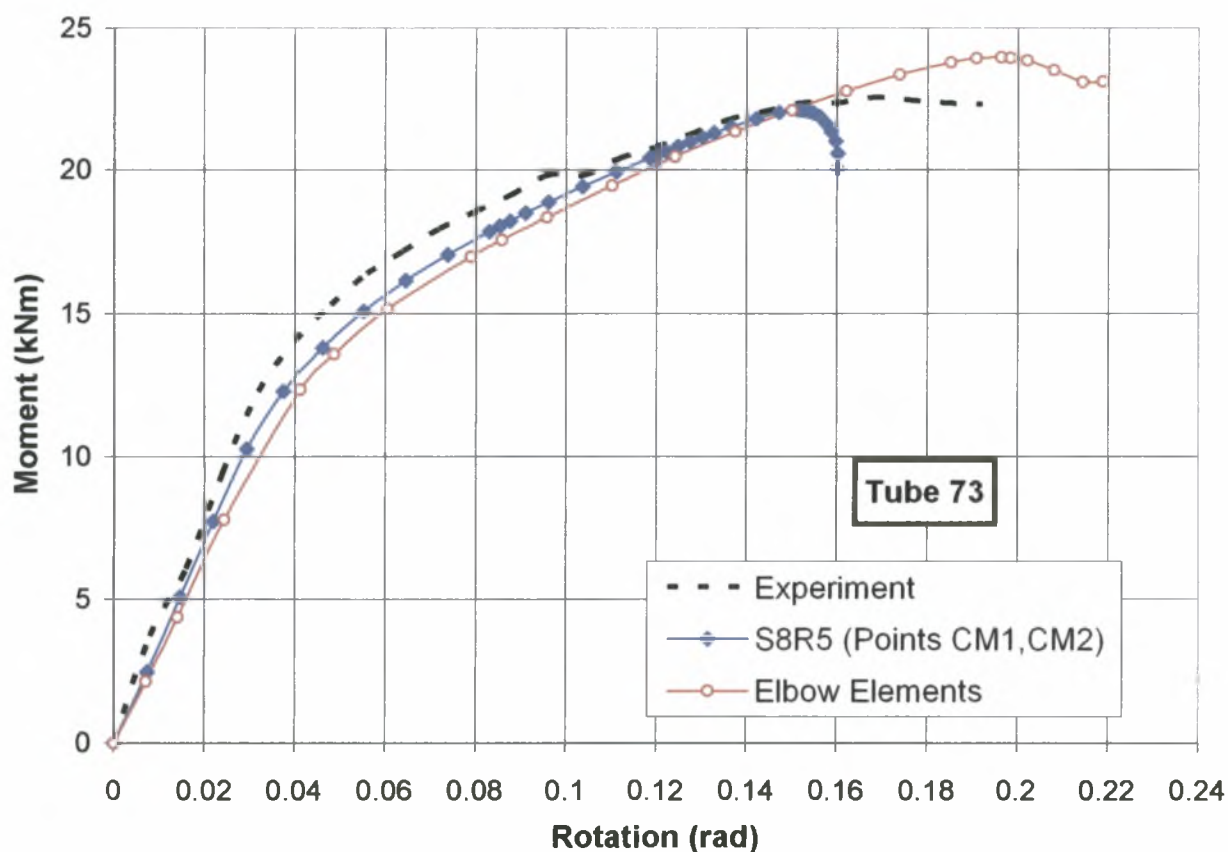
σημείου τοπικής αστοχίας) είναι πολύ περίπλοκο και δεν μπορεί να εξιχνιαστεί στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Η απόκριση του δοκιμίου 72, που φαίνεται στο *σχήμα 3.12*, είναι πολύ καλή, και παρατηρείται διαφορά στην τιμή της μέγιστης ροπής της τάξεως του 5%, όπως και στο δοκίμιο 70. Επίσης οι καμπύλες ταυτίζονται στο ελαστικό τους τμήμα.

Στο δοκίμιο 73 (*σχήμα 3.13*) όπως και στο δοκίμιο 71 παρατηρείται μία παρόμοια αδυναμία του στοιχείου S8R5 να προβλέψει τη συμπεριφορά το δοκιμίου λόγω τοπικής αστοχίας σε σχέση με τα πειράματα. Εδώ έγινε μία προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί το στοιχείο ELBOW32. Ήταν αναμενόμενο ότι η συμπεριφορά των στοιχείων «σωλήνα», ELBOW32, δεν θα ήταν και η πλέον αξιόπιστη για προβλήματα κύρτωσης (buckling). Παρ' όλα αυτά, το στοιχείο ELBOW32 έδωσε αρκετά καλά αποτελέσματα σημειώνοντας μια υπερεκτίμηση της μέγιστης ροπής κατά 5% σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Σημειώνεται επίσης πως οι διαφορές στην ελαστική περιοχή είναι μικρές. Οι διαφορές αυτές μπορούν να εξηγηθούν από το γεγονός ότι η στροφή υπολογίζεται στα στοιχεία αυτά ως η μέση στροφή της υπόψη διατομής, ενώ στα πειράματα μετρήθηκε με βάση την στροφή στο μέσο ύψος της διατομής (*σχήμα 3.2*).



Σχήμα 3.12 : Σύγκριση προσομοίωσης δοκιμίου 72 με πειραματικά αποτελέσματα. Διάγραμμα σχετικής στροφής σημείων CM1,CM2 - ροπή στο άκρο.

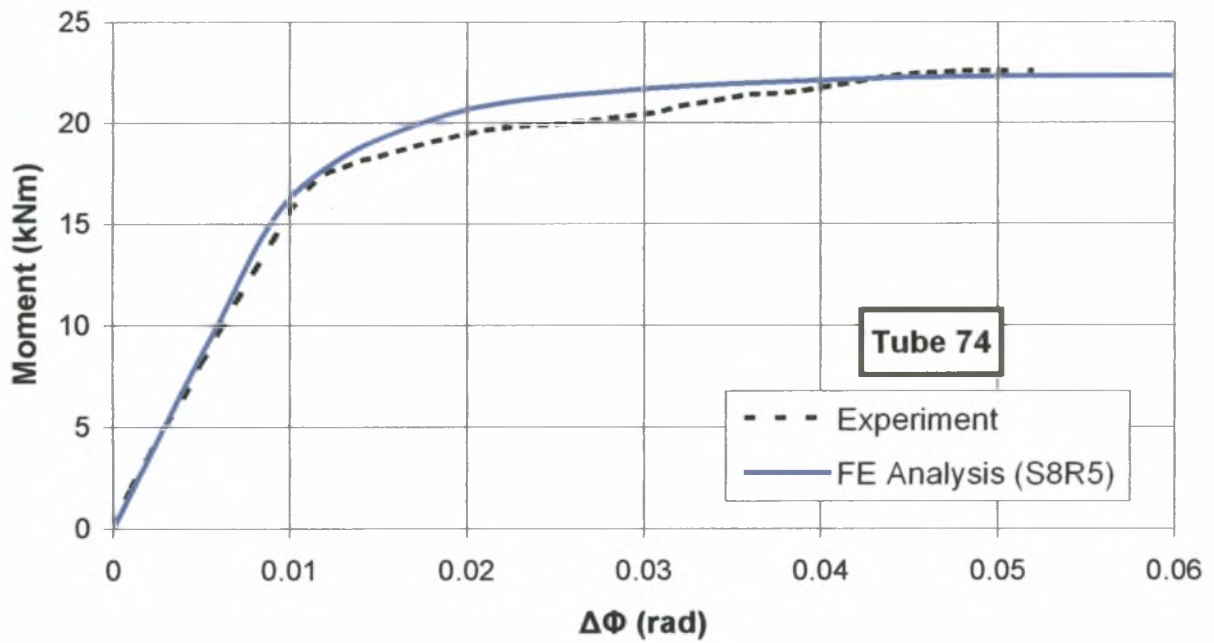


Σχήμα 3.13: Σύγκριση προσομοίωσης με στοιχεία S8R5 και στοιχεία «σωλήνα» δοκιμίου 73 με πειραματικά αποτελέσματα. Διάγραμμα σχετικής στροφής σημείων CM1,CM2 - ροπή στο άκρο

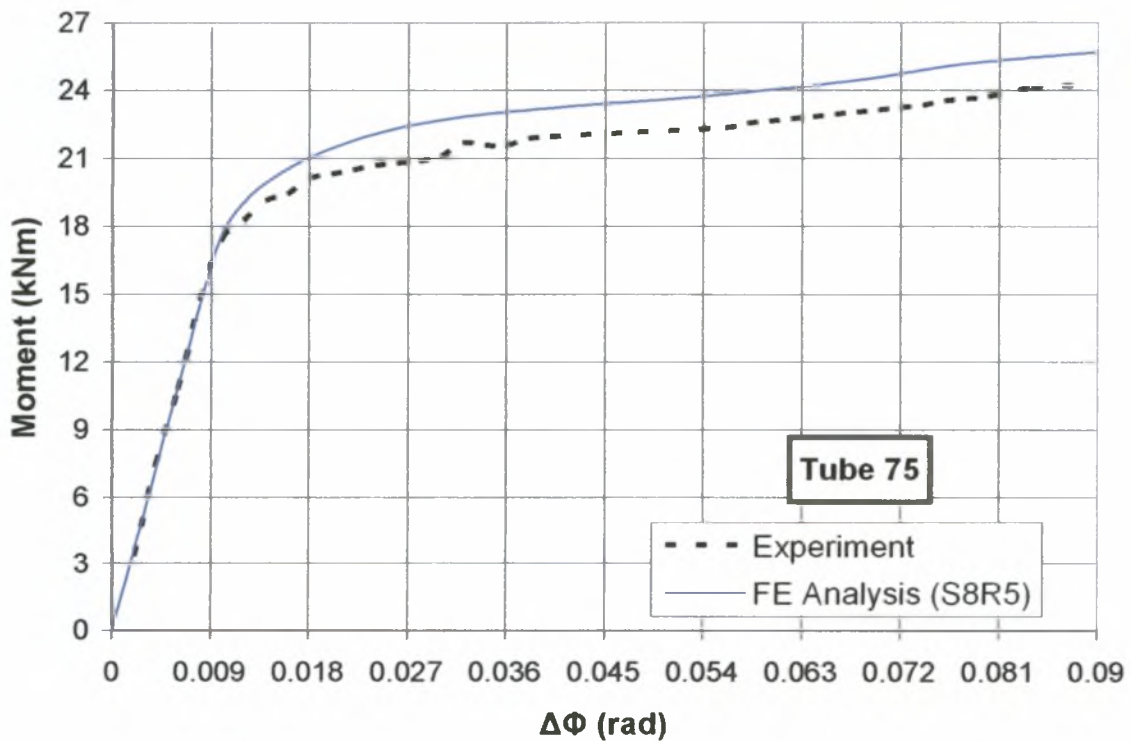
Τα δοκίμια 74 και 75 είναι τα μόνα που υποβλήθηκαν σε κάμψη με ταυτόχρονη εσωτερική πίεση ίση με 60% της P_y (86 atm). Συγκεκριμένα, η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων προέβλεψε με καλή ακρίβεια τη συμπεριφορά του δοκιμίου σε σχέση με την οριακή του κατάσταση, κάτι που προκύπτει και από τη σύγκριση των σχημάτων 2.3 και 3.16 για το δοκίμιο 75.

Παράλληλα συγκρίνοντας το σχήμα 3.7 και σχήμα 3.9 με το σχήμα 3.14 και σχήμα 3.15 αντίστοιχα, προκύπτει η ευεργετική συνεισφορά της πίεσης στην αύξηση της δυσκαμψίας των δοκιμίων που στην περίπτωση της θετικής κάμψης που αγγίζει το 50%, ενώ στην περίπτωση της αρνητικής αρκετά λιγότερο.

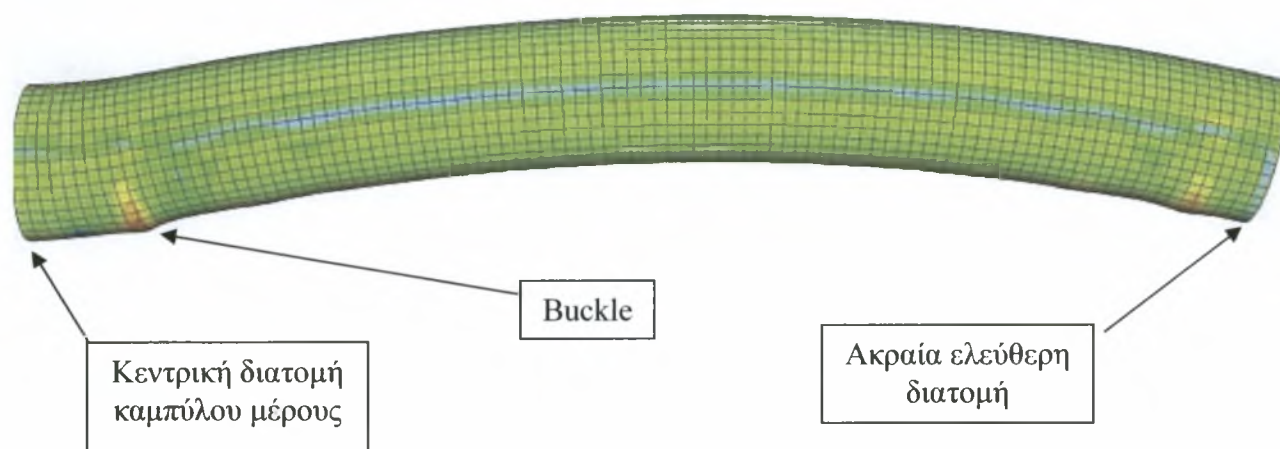
Ακολουθούν τα αποτελέσματα για τα δοκίμια 81, 82, 83, 84 (σχήματα 3.17, 3.18, 3.19, 3.21)



Σχήμα 3.14: Σύγκριση προσομοίωσης δοκιμίου 74 με πειραματικά αποτελέσματα. Διάγραμμα σχετικής στρωφής σημείων CM1,CM2 - ροπή στο άκρο.



Σχήμα 3.15 : Σύγκριση προσομοίωσης δοκιμίου 75 με πειραματικά αποτελέσματα. Διάγραμμα σχετικής στρωφής σημείων CM1,CM2 - ροπή στο άκρο.

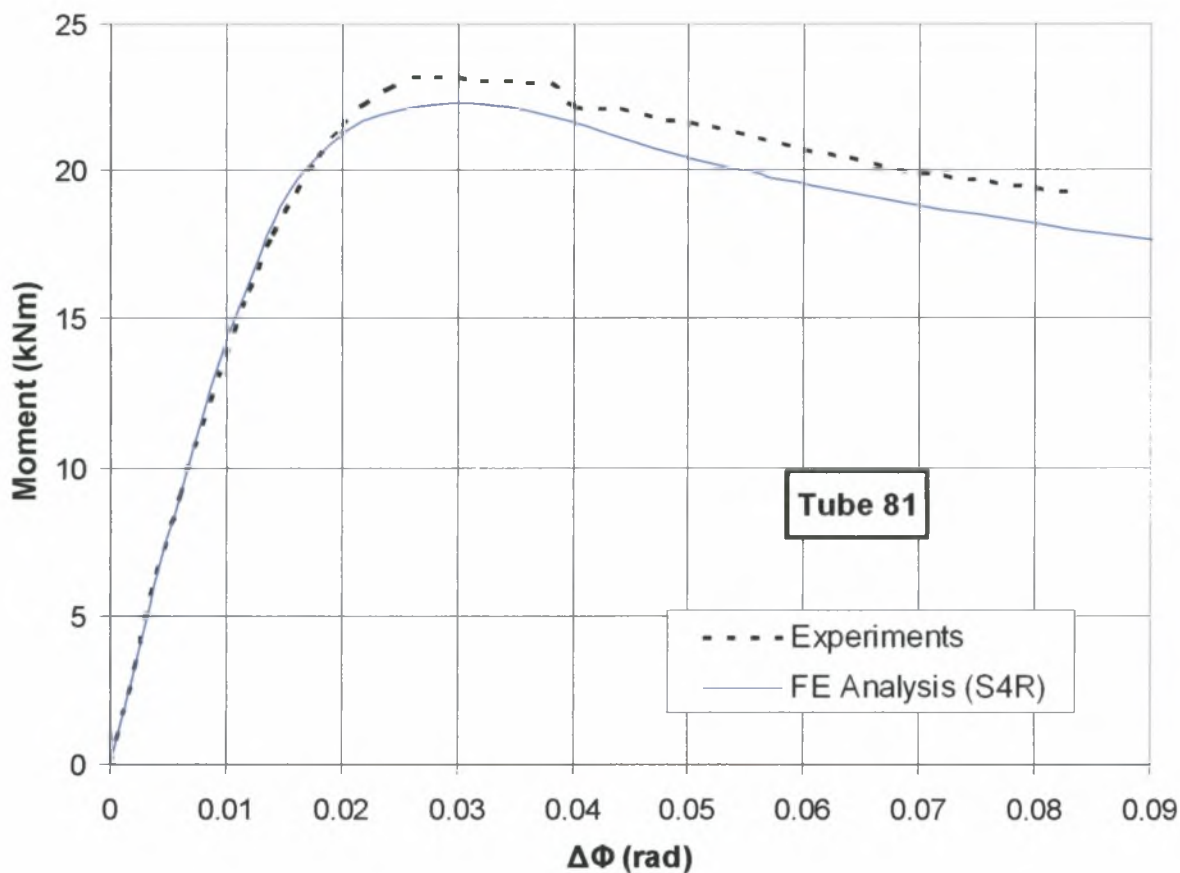


Σχήμα 3.16 : Αστοχία δοκιμίου 75 (FE Analysis)

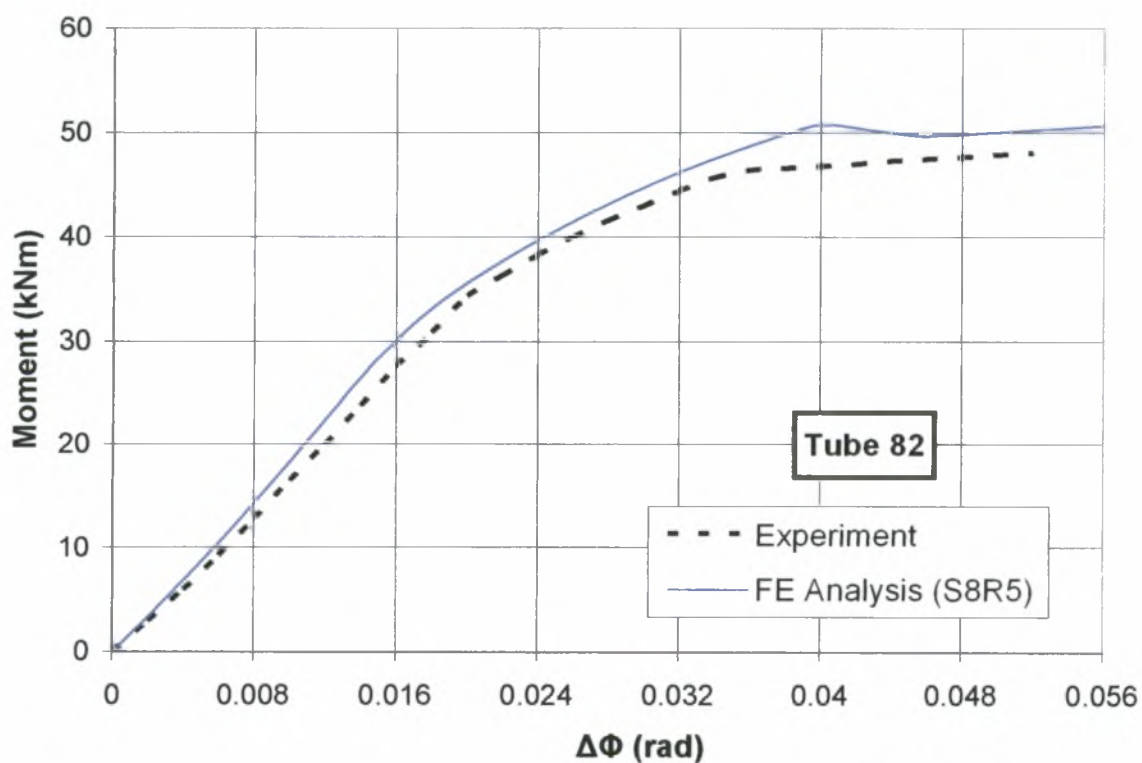
Από το *σχήμα 3.17* φαίνεται ότι η απόκριση του δοκιμίου 81 στην ελαστική περιοχή ταυτίζεται με τα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ στην πλαστική περιοχή το μοντέλο εκτιμά τη μέγιστη ροπή αντοχής που είναι μικρότερη κατά 4% από αυτή που έδειξαν τα πειράματα. Γενικά η σύγκριση θεωρείται επιτυχής.

Στα *σχήματα 3.18, 3.19, 3.21* παρατηρείται μια πολύ καλή συμφωνία των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα των πειραμάτων στην ελαστική περιοχή, αλλά όταν το υλικό ξεκινάει να πλαστικοποιείται υπάρχουν διαφορές. Στις τρεις περιπτώσεις έχουμε μια υπερεκτίμηση της οριακής ροπής κατά 10%, 7% και 15% αντίστοιχα. Παρόλα αυτά τα μοντέλα επιτυγχάνουν να εντοπίσουν την περιοχή στην οποία συμβαίνει η αστοχία λόγω κύρτωση. Το γεγονός ότι στις περιπτώσεις της αρνητικής κάμψης παρατηρείται μία περαιτέρω αύξηση του μέγιστου φορτίου, κάτι που έχει παρατηρηθεί και σε προηγούμενες δημοσιεύσεις, οφείλεται στο γεγονός ότι, παρότι λόγω της κύρτωση έχουμε αλλοίωση της διατομής, η κύρτωση καταστρέφει την διατομή κοντά στον κεντροβαρικό άξονα. Συνεπώς η διατομή δεν έχει καταστραφεί στις άνω και κάτω ίνες και έχει ακόμα μεγάλη ροπή αδράνειας και επομένως αντέχει και την περαιτέρω φόρτιση η οποία θα σταματήσει, το πιθανότερο, από επόμενο τοπικό λυγισμό (buckle) που ενδεχομένως να συμβεί σε κάποιο σημείο του γειτονικού ευθύγραμμου τμήματος (*σχήμα 3.10*).

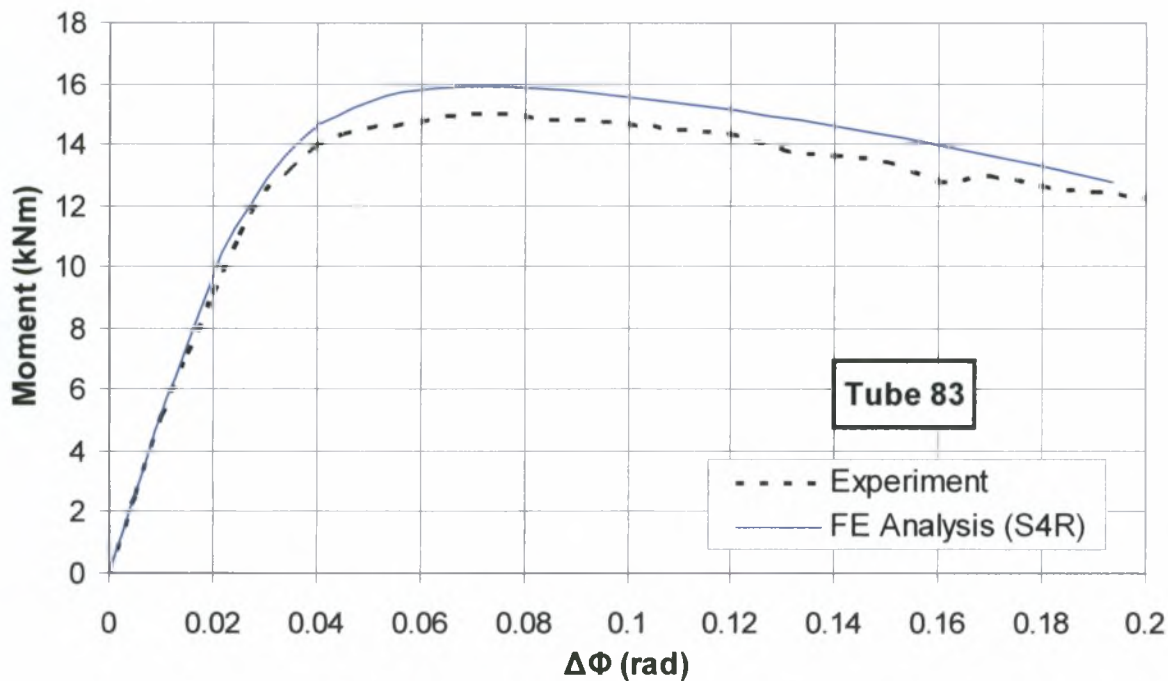
Στα *σχήματα 3.20, 3.22* φαίνονται οι παραμορφωμένες καταστάσεις των δοκιμίων 83 και 84 όπως προέκυψαν από την προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων. Οι μορφές τους είναι όμοιες με αυτές που παρατηρήθηκαν στα πειράματα (*σχήματα 2.5 και 2.6*)



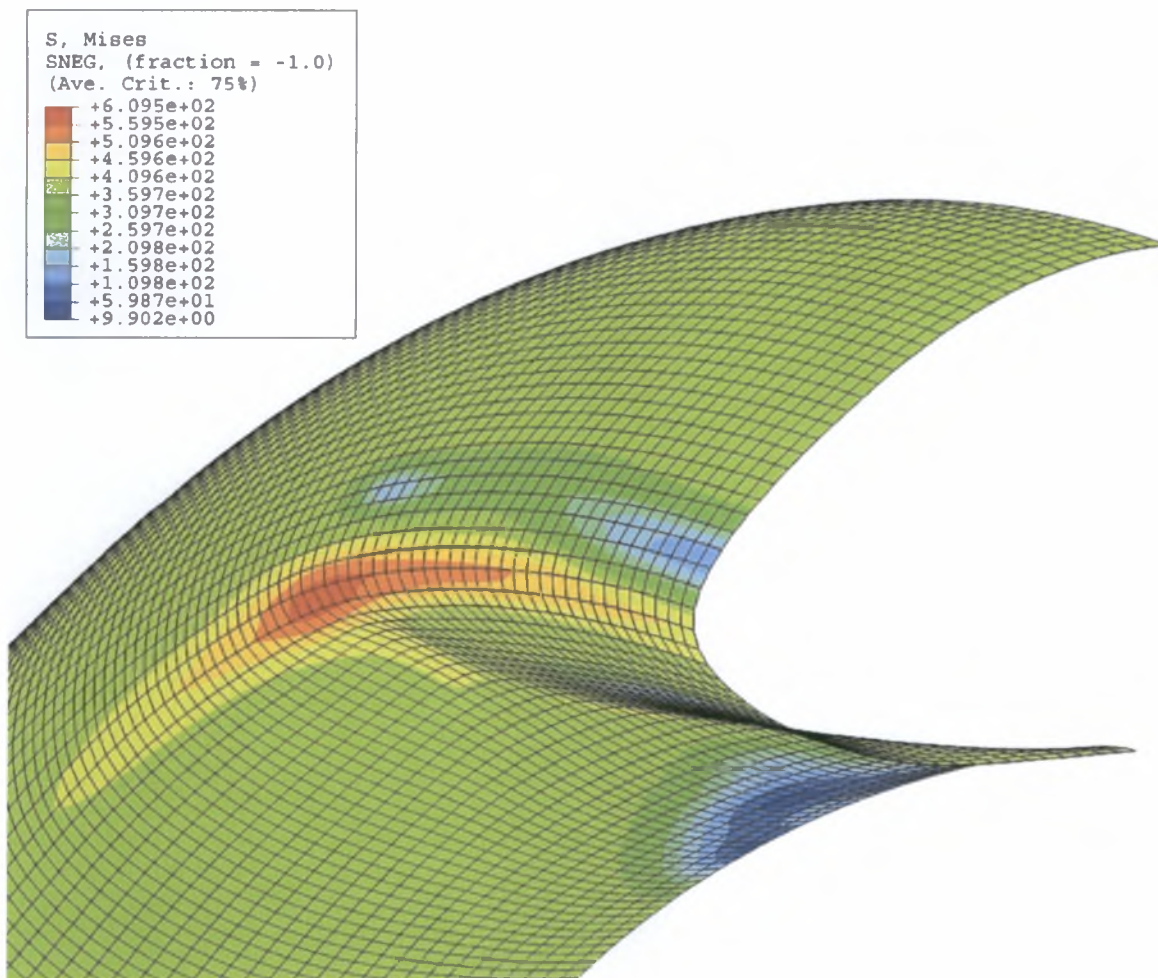
Σχήμα 3.17 : Σύγκριση προσομοίωσης δοκιμίου 81 με πειραματικά αποτελέσματα. Διάγραμμα σχετικής στρωφής σημείων CM1,CM2 - ροπή στο άκρο.



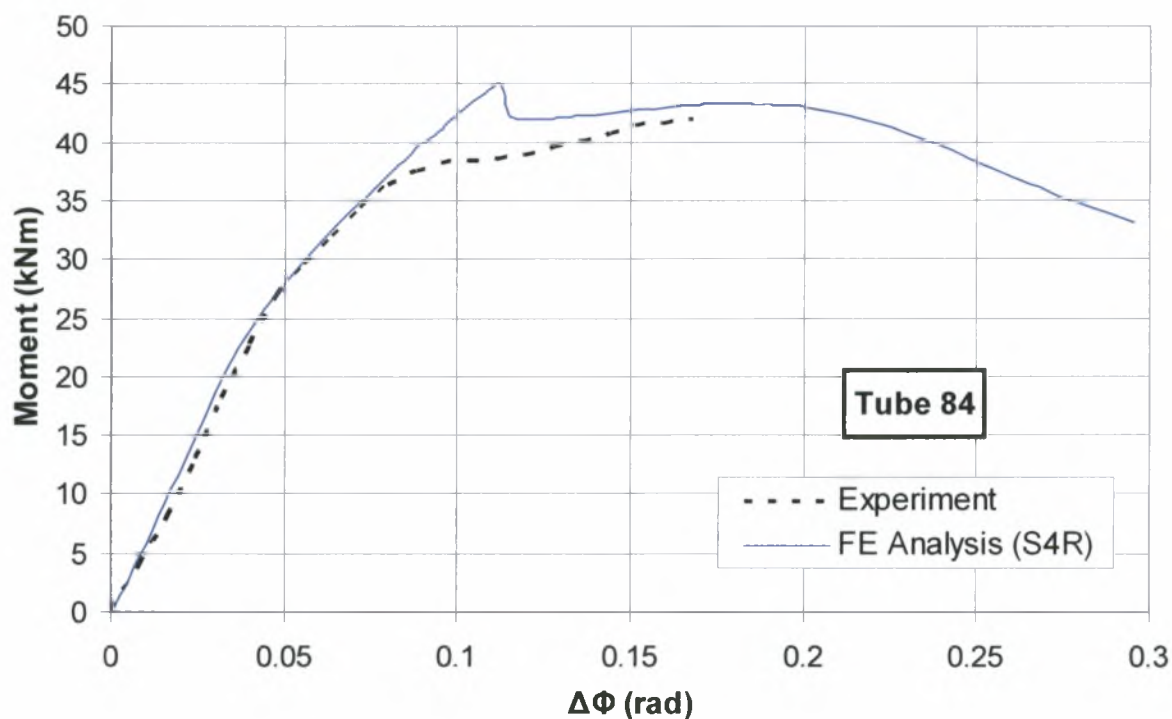
Σχήμα 3.18 : Σύγκριση προσομοίωσης δοκιμίου 82 με πειραματικά αποτελέσματα. Διάγραμμα σχετικής στρωφής σημείων CM1,CM2 - ροπή στο άκρο.



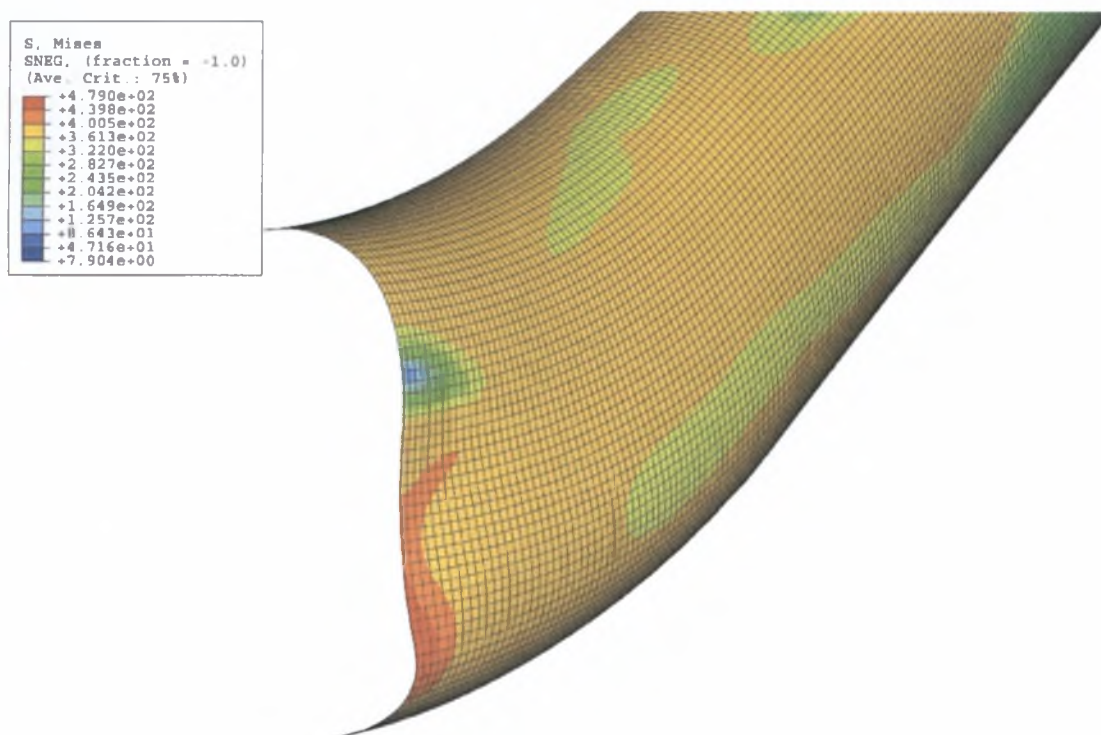
Σχήμα 3.19 : Σύγκριση προσομοίωσης δοκιμίου 83 με πειραματικά αποτελέσματα. Διάγραμμα σχετικής στροφής σημείων CM1,CM2 - ροπή στο άκρο.



Σχήμα 3.20 : Κατάρρευση δοκιμίου 83 και κατανομή ισοδύναμης τάσης κατά V. Mises.



Σχήμα 3.21 : Σύγκριση προσομοίωσης δοκιμίου 84 με πειραματικά αποτελέσματα. Διάγραμμα σχετικής στρωφής σημείων CM1,CM2 - ροπή στο άκρο.



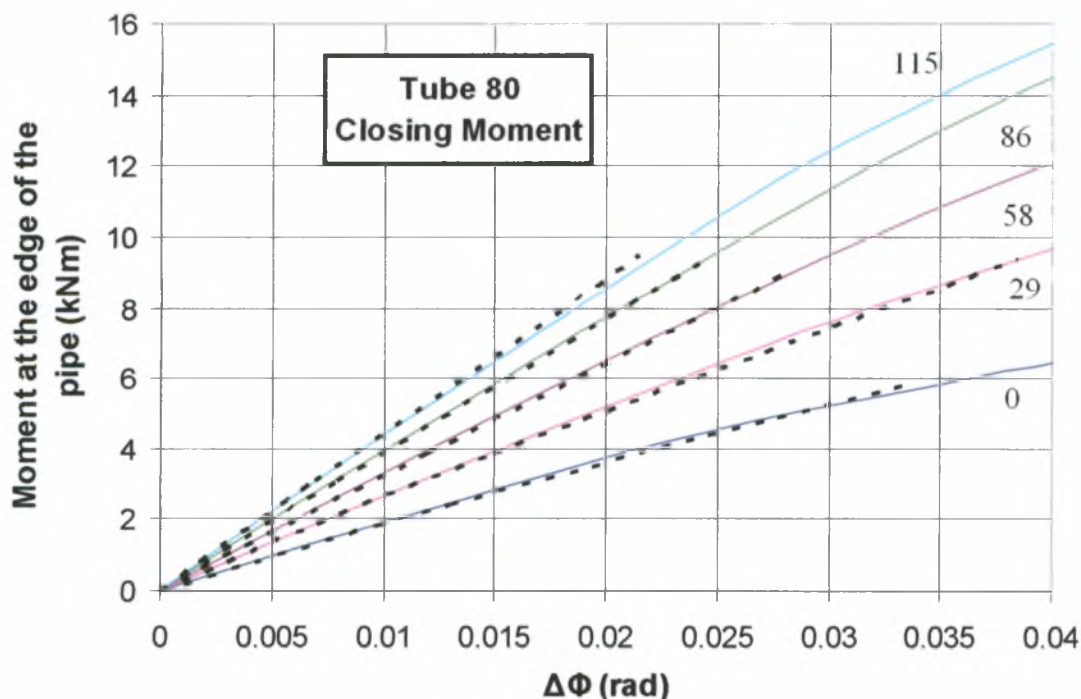
Σχήμα 3.22 : Κατάρρευση δοκιμίου 84 και κατανομή ισοδύναμης τάσης κατά V. Mises.

3.4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Δοκιμίου 80 (Συνεπίπεδη Κάμψη)

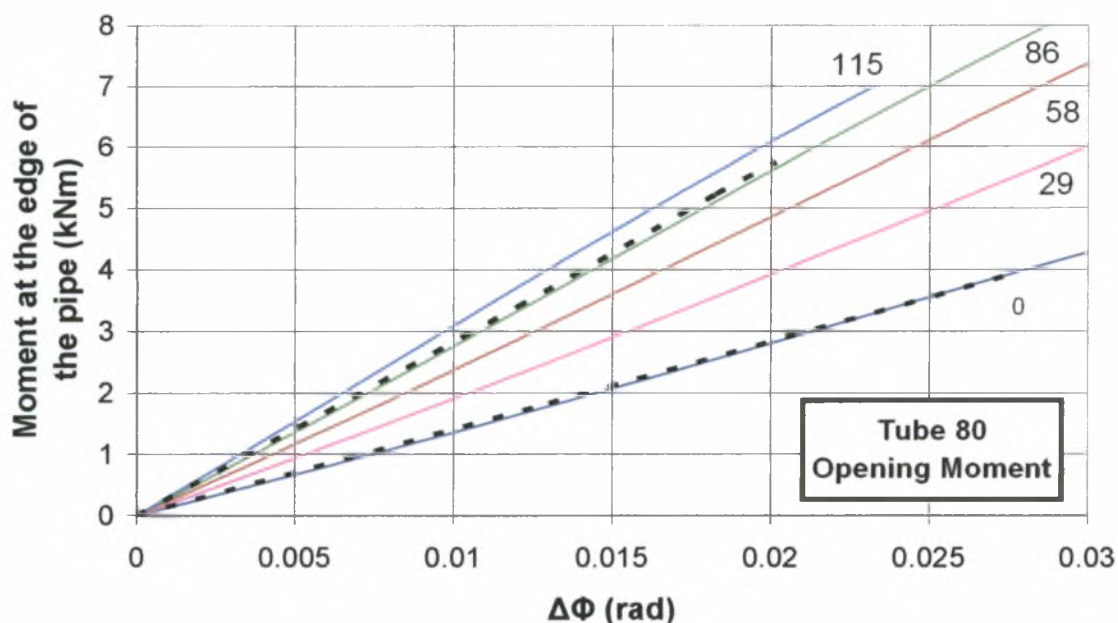
Το δοκίμιο προτού υποβληθεί σε ροπή μέχρι την αστοχία, υποβλήθηκε σε συνεπίπεδη κάμψη στην ελαστική περιοχή. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο *σχήμα 2.7* και το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση στο *σχήμα 3.26* και η προσομοίωση έγινε με στοιχεία S8R5. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 14000 στοιχεία. Όσον αφορά το πρόβολο (σημεία (2), (3) *σχήμα 2.7*), ο οποίος στα πειράματα ήταν ένα σχετικά άκαμπτο στέλεχος συγκολλημένο πάνω στο ελεύθερο άκρο του σωλήνα, χρησιμοποιήθηκαν 2 στοιχεία ELBOW32 με σχετικά μεγάλο πάχος σε σύγκριση με το δοκίμιο tube 80, για να επιτευχθεί η αυξημένη δυσκαμψία του προβόλου των πειραμάτων. Και εδώ χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι παράμετροι ανάλυσης, όπως και στη σειρά 70-75 και 81-84. Μεταξύ άλλων χρησιμοποιήθηκε η εντολή Kinematic Coupling του ABAQUS για την προσομοίωση της συγκολλημένης πλάκας στο ελεύθερο άκρο του σωλήνα. Η στροφή $\Delta\Phi$ είναι η σχετική στροφή των σημείων G – E (*σχήμα 2.8*). Οι μετρήσεις γίνονται σε αντίστοιχα σημεία CM1, CM2 κοντά στον άξονα του δοκιμίου πάνω στα G – E.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στο *σχήμα 3.23* και *σχήμα 3.25* για θετική κάμψη και στο *σχήμα 3.24* για αρνητική κάμψη.

Σε αντίθεση με την θετική κάμψη, στην αρνητική κάμψη το ΤΝΟ διεξήγαγε πειράματα μόνο για δύο τιμές της P_y , 0% και 60%. Στο *σχήμα 3.24* φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την ελαστική περιοχή. Παρατηρείται μια πολύ καλή συμφωνία της προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα.

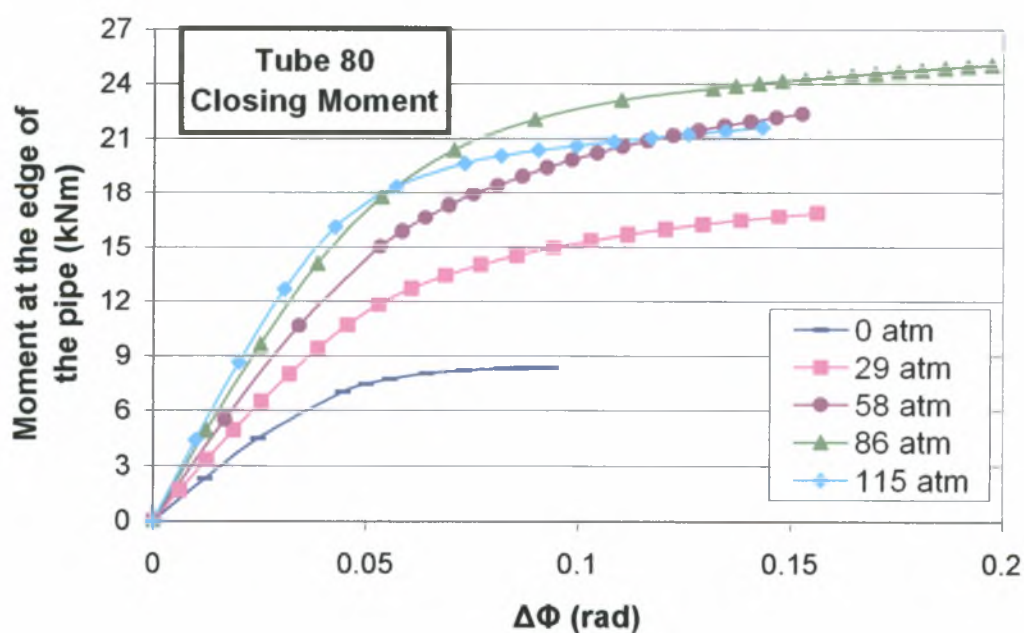


Σχήμα 3.23 : Σύγκριση προσομοίωσης δοκιμίου 80 υπό θετική κάμψη και διάφορες τιμές της P_y (σε atm) με πειραματικά αποτελέσματα. Διάγραμμα στροφής - ροπής στην ελαστική περιοχή.

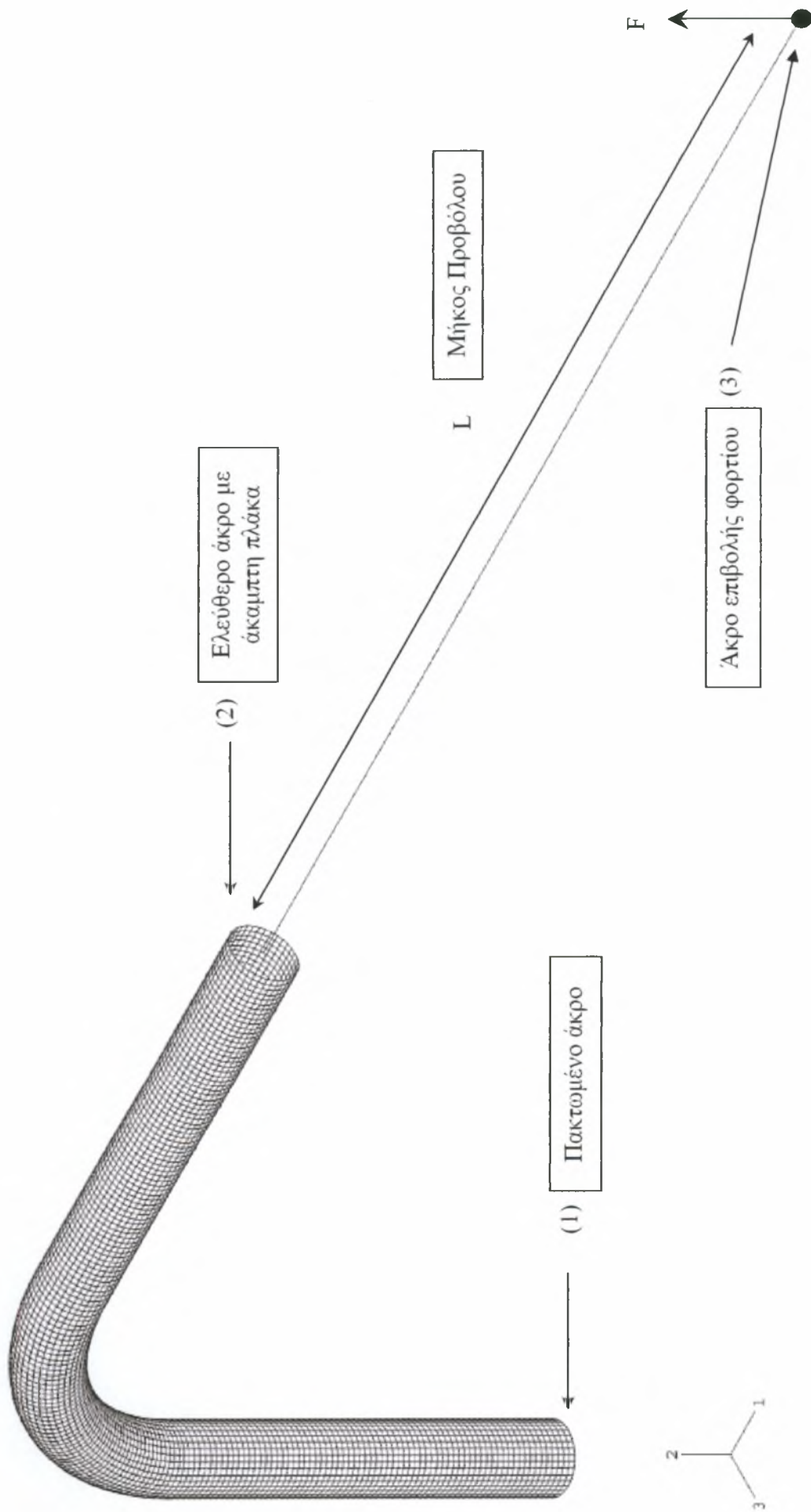


Σχήμα 3.24 : Σύγκριση προσομοίωσης δοκιμίου 80 υπό αρνητική κάμψη και διάφορες τιμές της P_y (σε atm) με πειραματικά αποτελέσματα. Διάγραμμα στροφής - ροπής στην ελαστική περιοχή.

Στο σχήμα 3.25 παρουσιάζεται μια μικρή παραμετρική μελέτη που δείχνει την απόκριση του δοκιμίου 80 σε συνεπίεδη θετική κάμψη (closing moment) για διαφορετικές τιμές της πίεσης. Σημειώνεται πως για την ανάλυση αυτή δεν υπήρχαν πειραματικά αποτελέσματα. Παρατηρείται πως η πίεση επιδρά θετικά στην οριακή αντοχή μέχρι την πίεση των 86 atm. Από αυτήν την τιμή και μετά η πίεση δρα αντίστροφα μειώνοντας την μέγιστη (οριακή) ροπή του δοκιμίου, καθώς η έντονη πλαστικοποίηση της διατομής από την πίεση υπερκαλύπτει τη θετική συνεισφορά στην αναστολή της παραμόρφωσης της διατομής όπως έχει δειχτεί στο [27], [29]



Σχήμα 3.25 : Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης δοκιμίου 80 υπό θετική κάμψη και διάφορες τιμές της P_y . Διάγραμμα στροφής - ροπής.



Σχήμα 3.26: Τυπικό μοντέλο προσομοίωσης πειραμάτων συνεπίπεδης κάμψης δοκμίου 80.

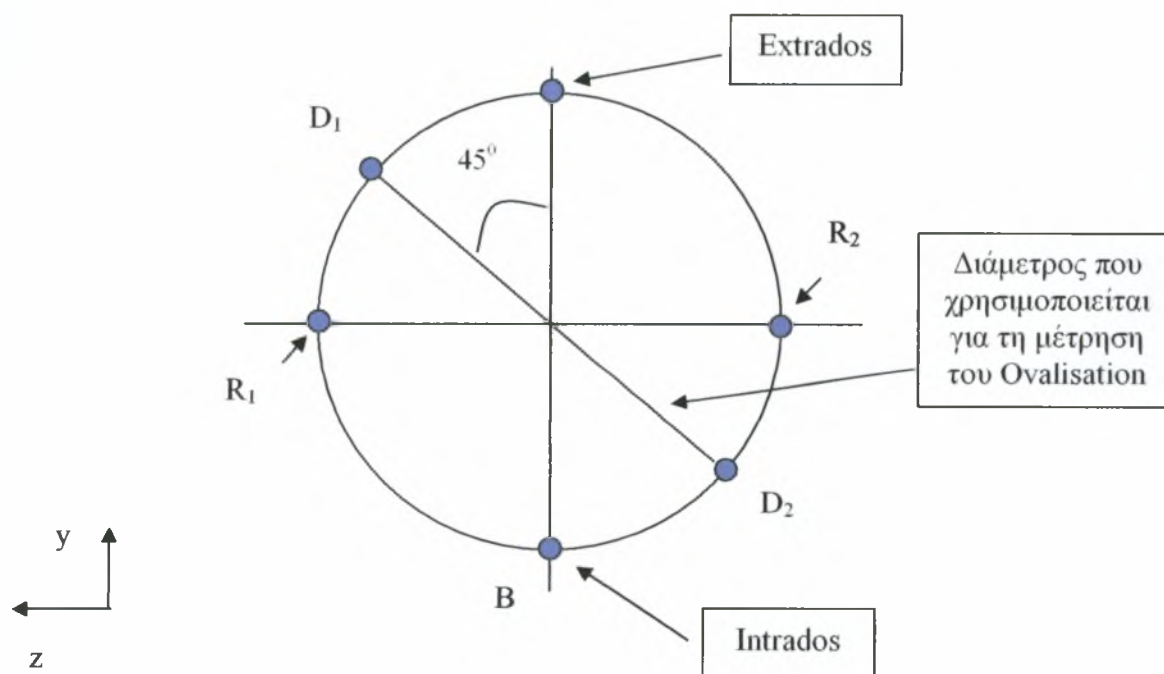
Κεφάλαιο 4 - Προσομοίωση Πειραμάτων Αντιεπίπεδης Κάμψης (Out-of-Plane Bending)

4.1 Εισαγωγή

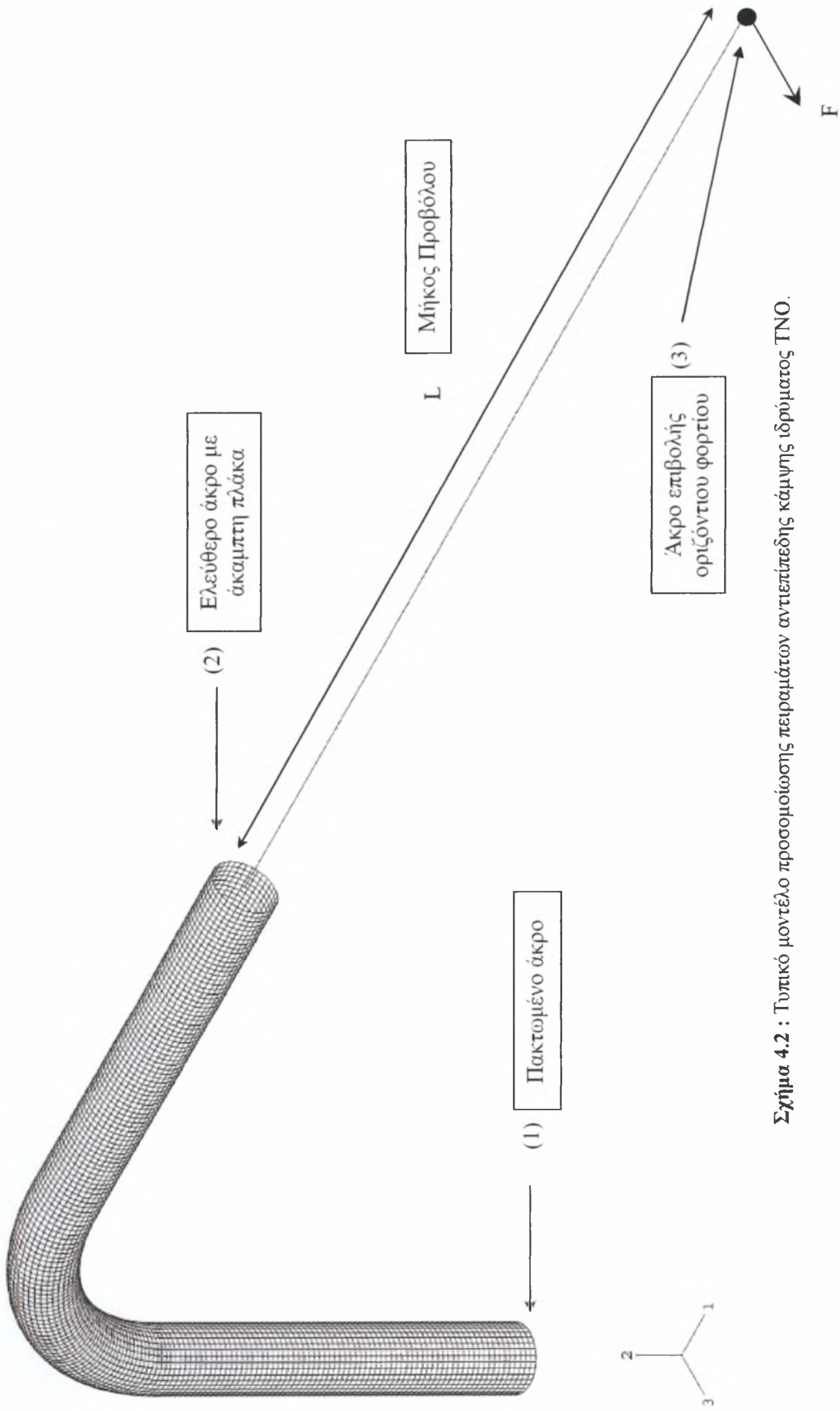
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση των πειραμάτων του TNO για την αντιεπίπεδη κάμψη.

Οι στροφές των διατομών έχουν υπολογιστεί από σχετικές μετατοπίσεις χαρακτηριστικών των κόμβων όπως έγινε στα αντίστοιχα σημεία της πειραματικής διάταξης. Όσον αφορά τις μεταβολές των διαμέτρων στις αντίστοιχες διατομές οι μετρήσεις έγιναν στις 45° από τους κύριους άξονες, στα σημεία που έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 2.2.2. και τα οποία φαίνονται στο *σχήμα 4.1*. Στο *σχήμα 4.2* φαίνεται ένα τυπικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των πειραμάτων. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε και σε αυτήν την περίπτωση είναι αυτό της συνεπίπεδης κάμψης. Τα αντίστοιχα σημεία του *σχήματος 2.7* φαίνονται στο *σχήμα 4.2*

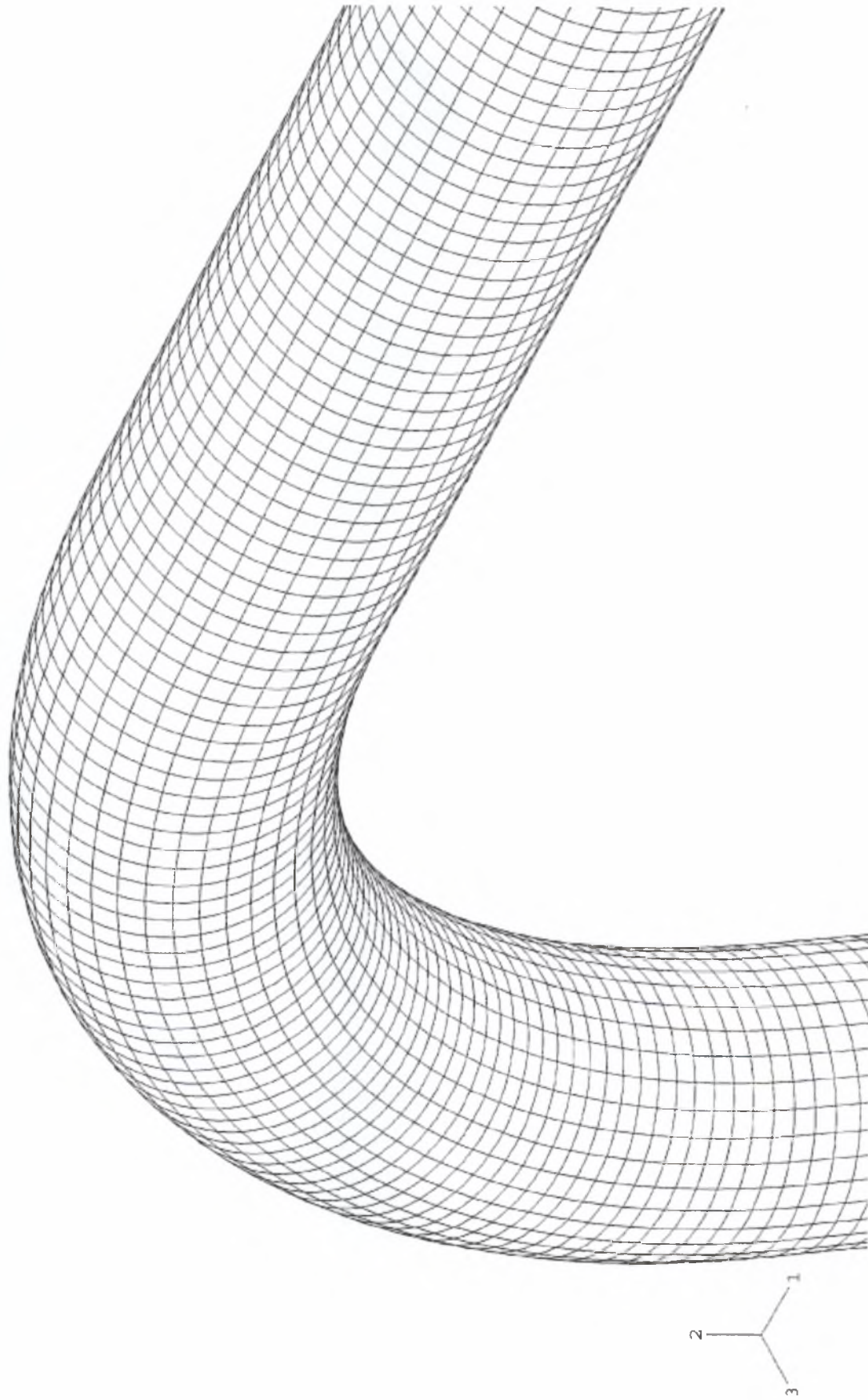
Οι χαρακτηριστικές διατομές, δηλαδή αυτές στις οποίες έγιναν οι μετρήσεις, θεωρούνται αυτές που χρησιμοποιήθηκαν και στην συνεπίπεδη κάμψη του δοκιμίου 80 και φαίνονται στο *σχήμα 2.8*.



Σχήμα 4.1 : Σημεία μέτρησης μεταβολής διατομής σε τυχαία σημαντική διατομή.



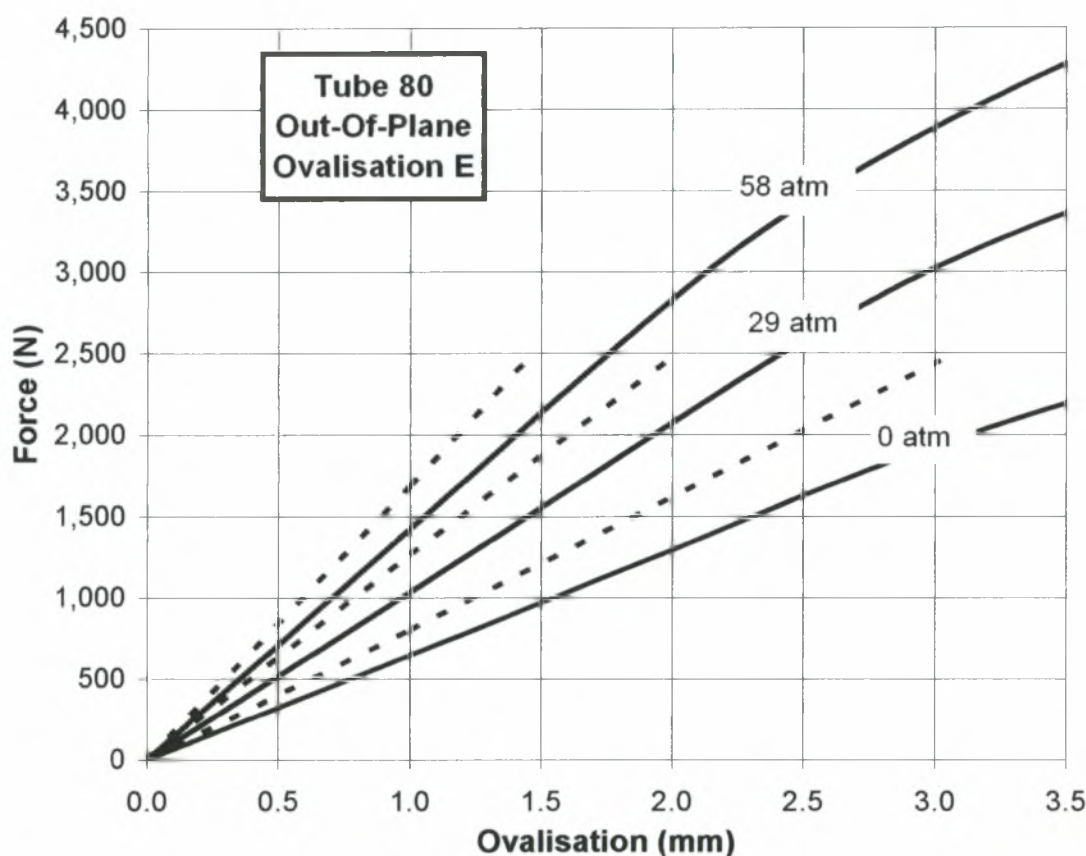
Σχήμα 4.2 : Τυπικό μοντέλο προσομοίωσης πειραμάτων αντιπέπεδης κάμψης ιδρύματος ΤΝΟ.



Σχήμα 4.3 : Λεπτομέρεια πλέγματος τυπικού μοντέλου προσομοίωσης δοκμίου 80 (στοιχεία S4R).

4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Αντιεπίπεδης Κάμψης Και Σύγκριση Με Πειράματα

Στα παρακάτω σχήματα δείχνονται με διακεκομμένη γραμμή τα πειραματικά αποτελέσματα και με συνεχή γραμμή τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Στο σχήμα 4.4 φαίνεται η μεταβολή της διαμέτρου D στη διατομής E σε σχέση με τη δύναμη που ασκείται στην άκρη του προβόλου. Η διάμετρος D ορίζεται από τα δύο σημεία D_1 και D_2 (σχήμα 4.1) και η μεταβολή της διατομής ορίζεται (Ovalisation) ως η διαφορά του μήκος της σε κάθε στιγμή της προσομοίωσης από την αρχική

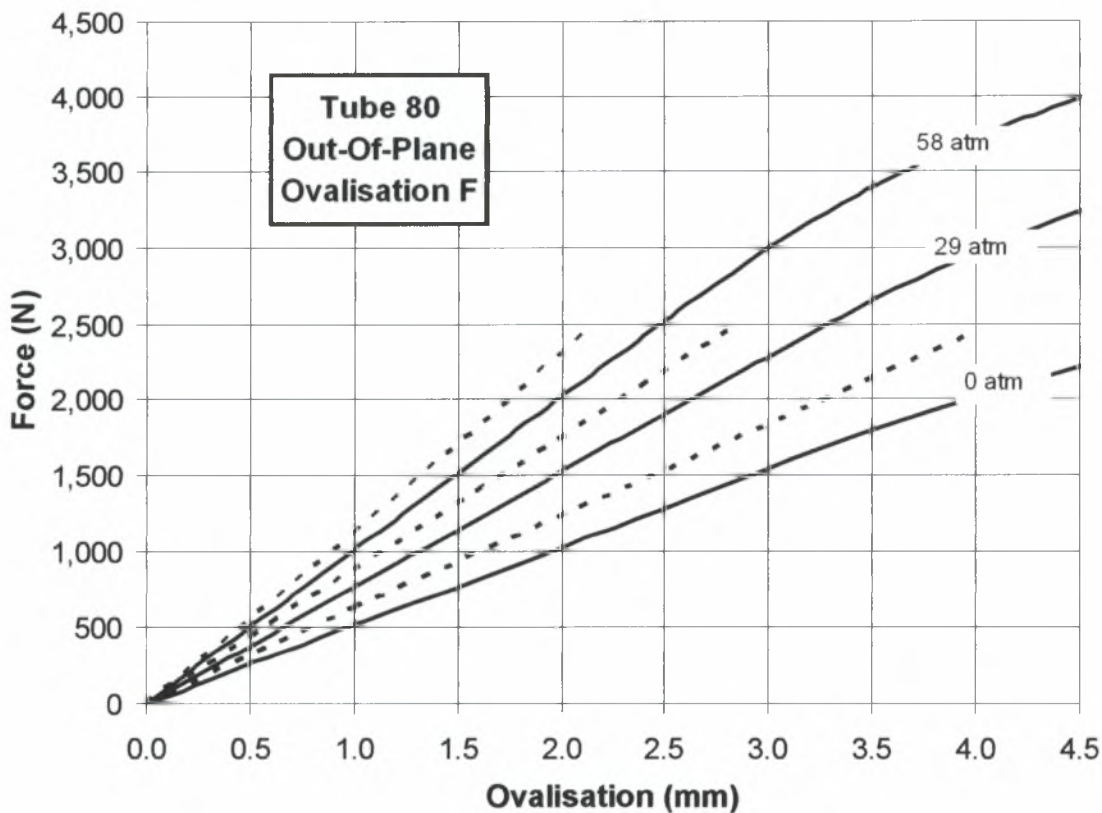


Σχήμα 4.4 : Διάγραμμα μεταβολής της διατομής E σε σχέση με τη δύναμη στο άκρο του προβόλου.

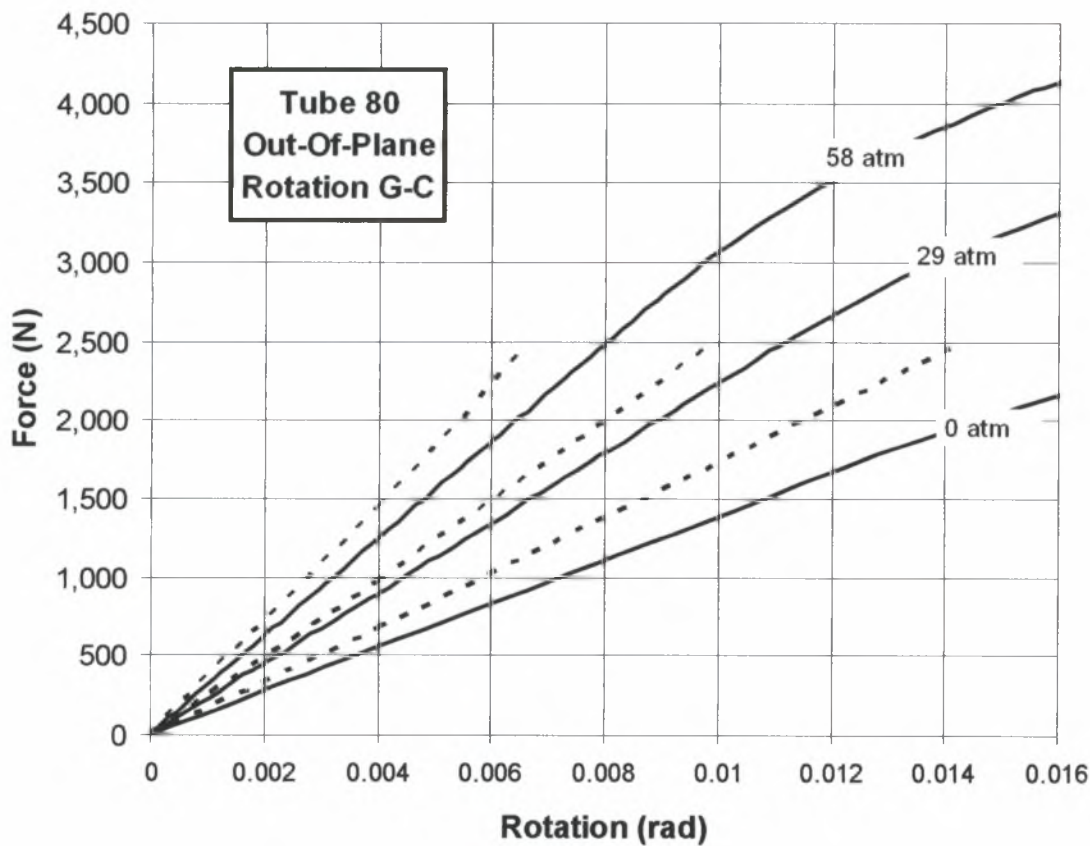
Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι τα μοντέλα υποεκτιμούν την απόκριση των σωλήνων σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα κατά 15% περίπου.

Στο σχήμα 4.5 φαίνεται η μεταβολή των διαμέτρων της διατομής F σε σχέση με τη δύναμη που ασκείται στο άκρο του προβόλου. Τα αποτελέσματα είναι και εδώ αντίστοιχα με του σχήματος 4.4. Ενώ στο σχήμα 4.6 δείχνεται η στροφή μεταξύ των σημείων G και C γύρω από τον άξονα x .

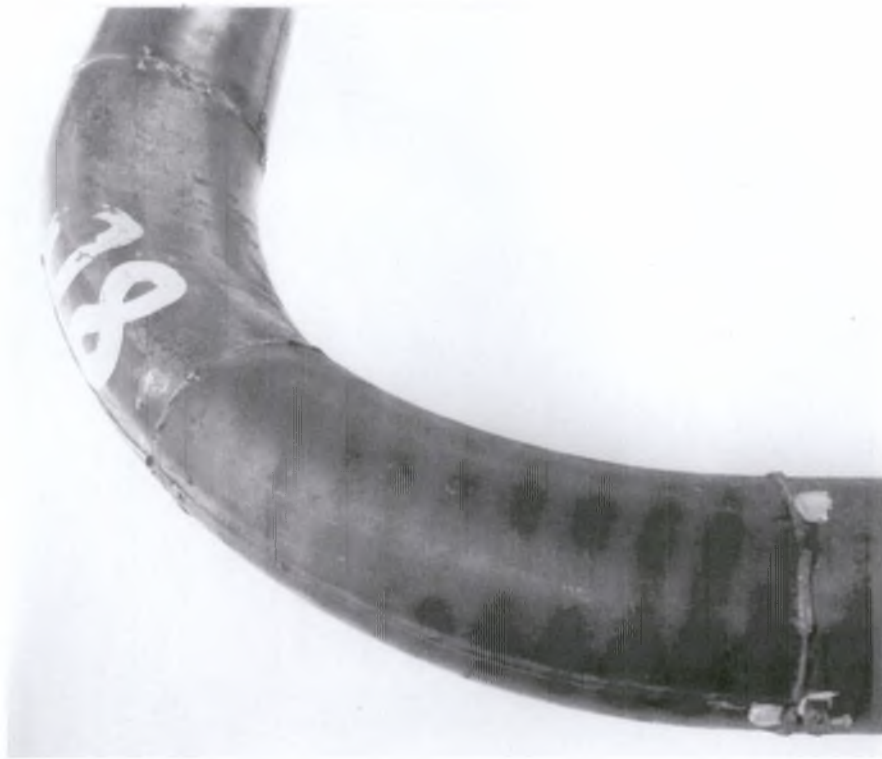
Σε όλα τα αποτελέσματα αυτού του δοκιμίου παρατηρείται πως η προσομοίωση υποεκτιμά την απόκριση των δοκιμίων. Στην περίπτωση της διατομής F η διαφορά με τα πειραματικά αποτελέσματα κυμαίνεται στο 15%. Ενώ στη περίπτωση της στροφής των G , C φτάνει και το 20%.



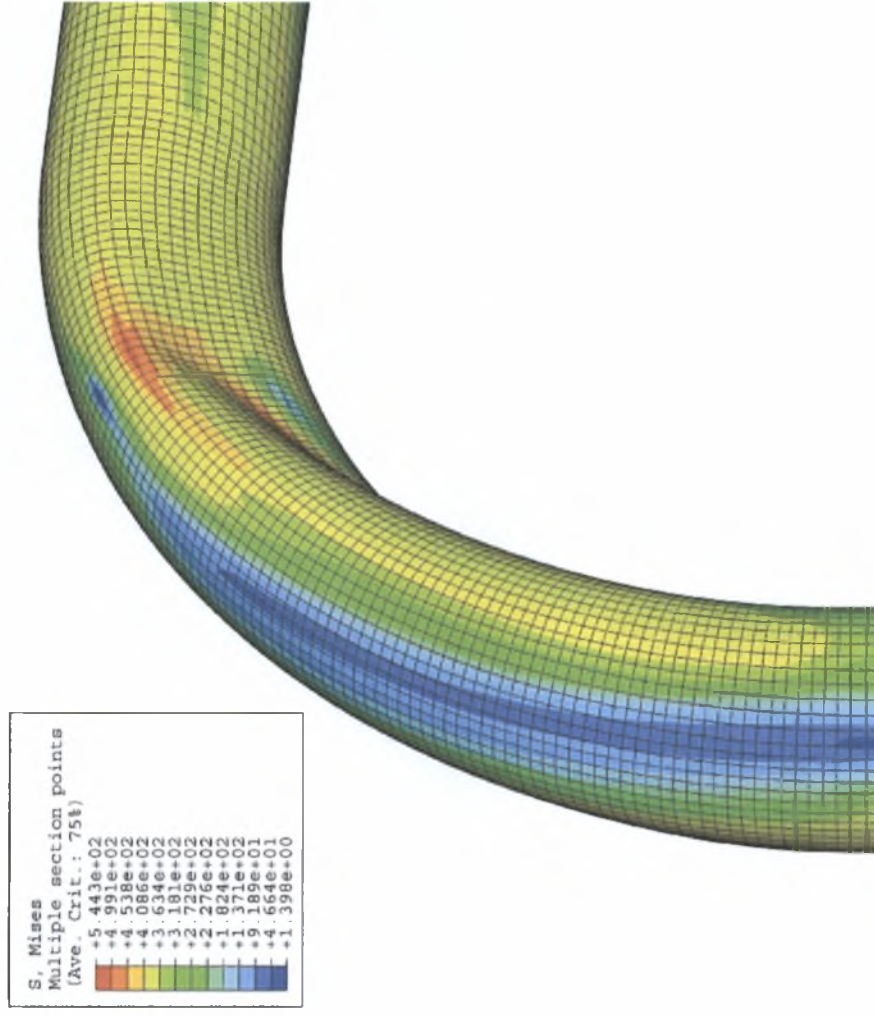
Σχήμα 4.5 : Διάγραμμα μεταβολής της διατομής F σε σχέση με τη δύναμη στο άκρο του προβόλου.



Σχήμα 4.6 : Διάγραμμα σχετικής στροφής διαμέτρων G-C γύρω από τον άξονα x σε σχέση με τη δύναμη στο άκρο του προβόλου.



Σχήμα 4.7 : Αστοχία δοκμίου 80 υπό αντιεπιπέδη κάμψη.
Πείραμα ιδρύματος ΤΝΟ.



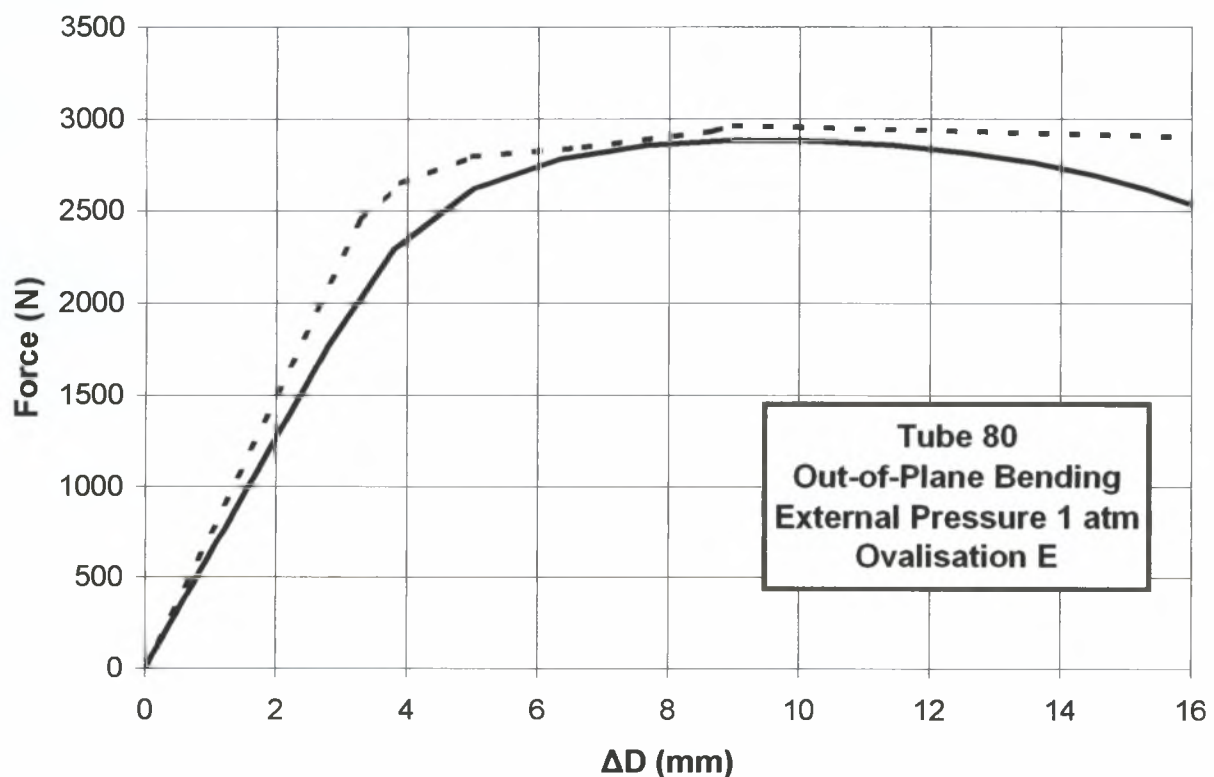
Σχήμα 4.8: Αστοχία δοκμίου 80 υπό αντιεπιπέδη κάμψη.
Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία SAR.

4.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Δοκιμίου 80 υπό Κάμψη και Εξωτερική Πίεση 1atm

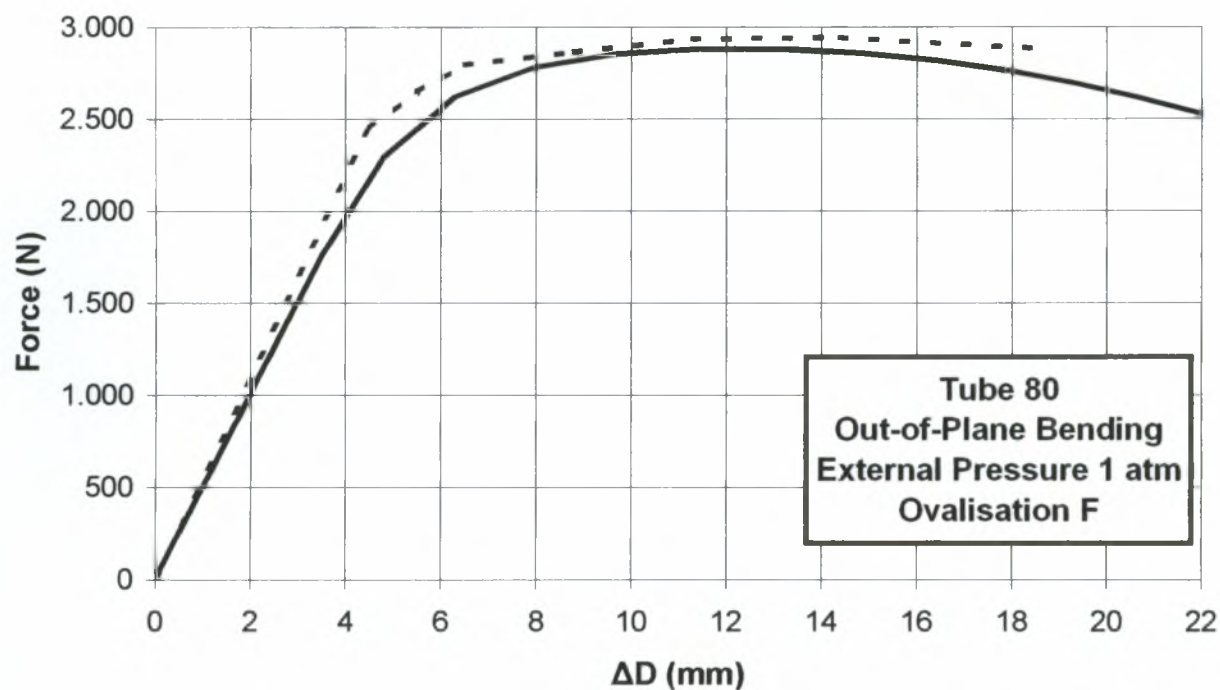
Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα από την αντιεπίπεδη κάμψη του δοκιμίου 80 και εξωτερική πίεση 1 atm. Στα διαγράμματα παρουσιάζονται με διακεκομμένη γραμμή τα πειραματικά αποτελέσματα και με συνεχή η προσομοίωση.

Στο *σχήμα 4.9* δίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη μεταβολή της διαμέτρου της διατομής E σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Παρατηρούμε ότι η προσομοίωση έχει μία καλή συμφωνία με τα πειράματα στην ελαστική περιοχή που δεν διατηρείται όσο το δοκίμιο προσεγγίζει την πλαστική περιοχή. Αντίθετα έχουμε μία πολύ καλή πρόβλεψη του μέγιστου φορτίου. Γενικά θα μπορούμε να πούμε ότι το δοκίμιο φαίνεται πιο δύσκαμπτο από την προσομοίωση. Αντίστοιχα συμπεράσματα μπορούμε να βγάλουμε και για τη μεταβολή της διαμέτρου της διατομής F (*σχήμα 4.10*).

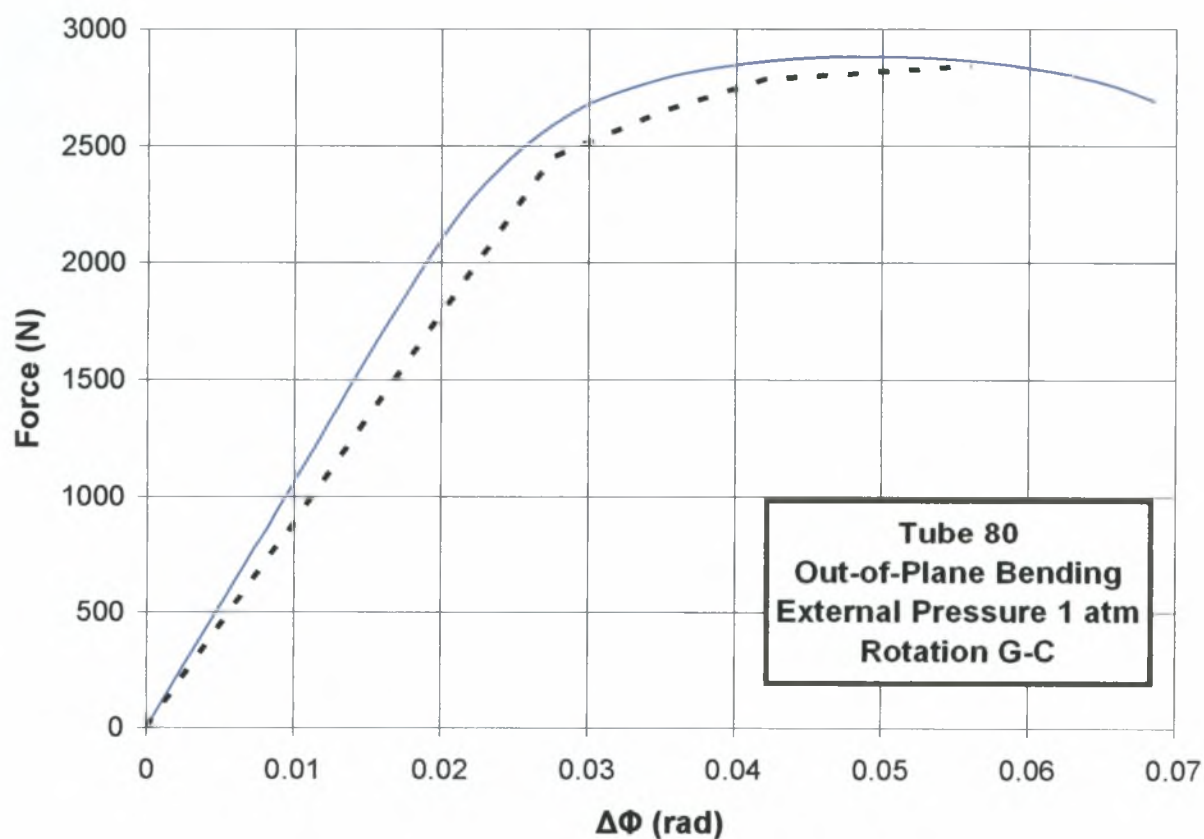
Αντίθετα αν εξετάσουμε την προσομοίωση από τη σκοπιά της σχετικής στροφής των διαμέτρων G, C (*σχήμα 4.11*) παρατηρούμε ότι παρόλο που έχουμε μια αρκετά καλή προσεγγιστική λύση, το μοντέλο ότι συμπεριφέρεται πιο δύσκαμπτα από το πείραμα.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα μεταβολής της διατομής E σε σχέση με τη δύναμη στο άκρο του προβόλου



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα μεταβολής της διατομής F σε σχέση με τη δύναμη στο άκρο του προβόλου.



Σχήμα 4.11 : Διάγραμμα σχετικής στροφής διαμέτρων G-C γύρω από τον άξονα x σε σχέση με τη δύναμη στο άκρο του προβόλου.

Κεφάλαιο 5 - Παραμετρική Μελέτη

5.1 Εισαγωγή

Σε μια προσπάθεια να διερευνηθεί περαιτέρω η απόκριση σωλήνων 90° με τρεις χαρακτηριστικούς λόγους D/t και σταθερή ακτίνα διαμήκους καμπυλότητας R υπό την ταυτόχρονη επίδραση εσωτερικής πίεσης και ροπής κάμψης, έγινε παραμετρική μελέτη για τιμές της εσωτερικής πίεσης που ήταν 0%, 20%, 40% της πίεσης πλήρους πλαστικότητας $P_s = 2\sigma_s \left(\frac{t}{D}\right)$. Οι αναλύσεις αφορούν συνεπίπεδη και αντιεπίπεδη κάμψη.

5.2 Περιγραφή Μοντέλων Παραμετρικής Μελέτης

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σωλήνων και οι τιμές της εσωτερικής πίεσης που χρησιμοποιήθηκαν στην παραμετρική μελέτη, καθώς και η διαδικασία που ακολουθήθηκαν σε αυτήν. Στον πίνακα 5.1 φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν. Η ακτίνα καμπυλότητας του άξονα των σωλήνων R είναι ίδια για όλα τα μοντέλα και ίση με 480 mm. Το υλικό των μοντέλων ήταν αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση των πειραμάτων του TNO (πίνακας 3.1). Στον πίνακα 5.2 φαίνονται οι τιμές της εσωτερικής πίεσης που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη.

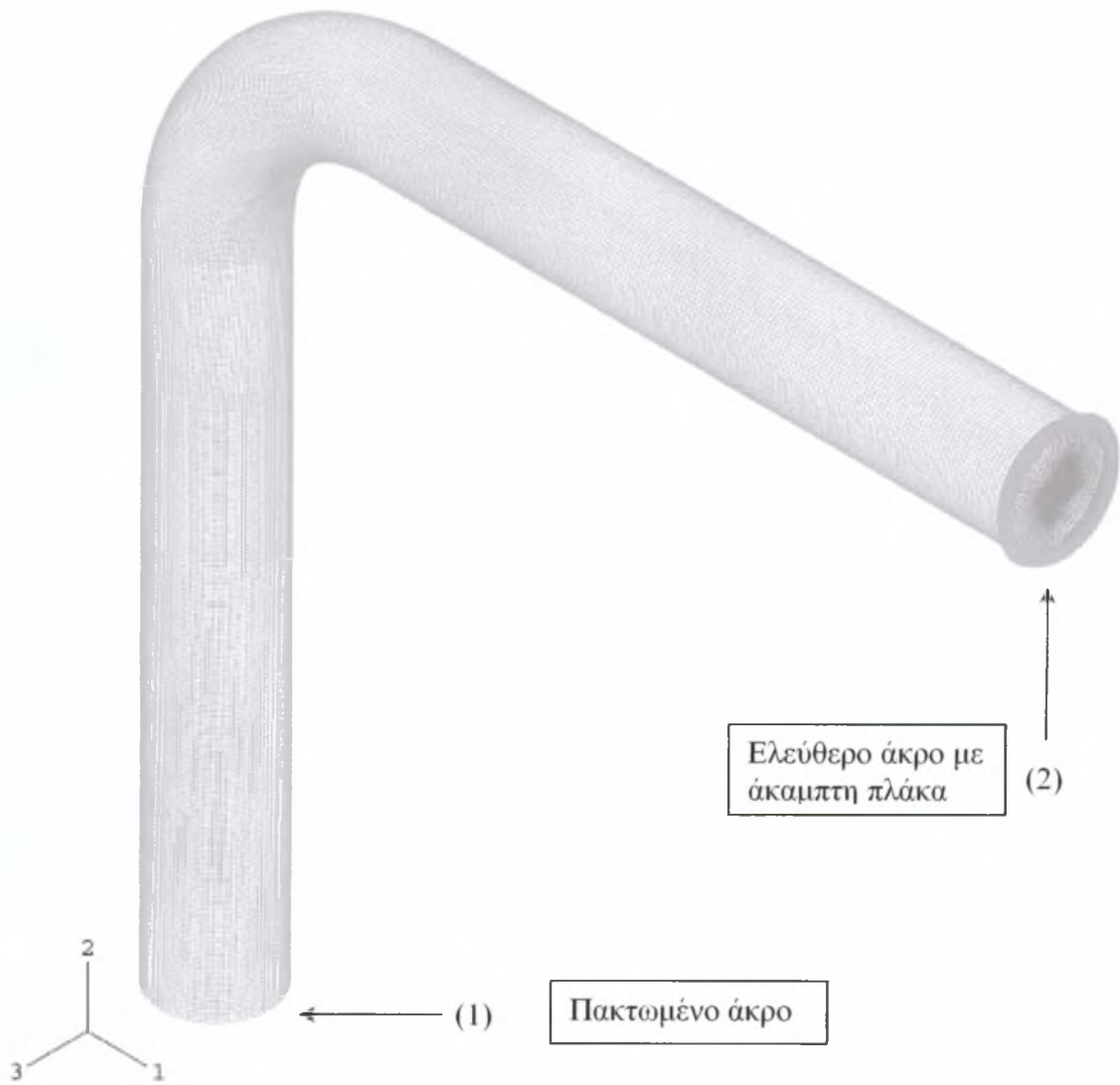
Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιήθηκε μια μη-γραμμική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, που λαμβάνει υπ' όψιν τη μη γραμμικότητα του υλικού και της γεωμετρίας της κατασκευής. Συγκεκριμένα σε όλα τα μοντέλα χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά το στοιχείο S4R, τα χαρακτηριστικά του οποίου έχουν περιγραφεί στην παράγραφο 3.2. Στο μοντέλο με D/t=90 χρησιμοποιήθηκαν 45000 στοιχεία, με D/t=55 χρησιμοποιήθηκαν 50000 στοιχεία και με D/t=20 χρησιμοποιήθηκαν 47000 στοιχεία. Στα σχήματα 5.1 και 5.2 φαίνεται το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για τα μοντέλα. Η διατομή (1) ήταν πακτωμένη ενώ η διατομή (2) ήταν ελεύθερη. Το πλέγμα ήταν πιο πυκνό στο καμπύλο τμήμα.

Name	D/t	D (mm)	t (mm)	D _m (mm)	R/r	h	L (mm)
Elbow I	90	270	3	267	3.596	0.0808	1620
Elbow II	55	165	3	162	5.926	0.2195	990
Elbow III	20	165	8.25	156.75	6.124	0.6447	990

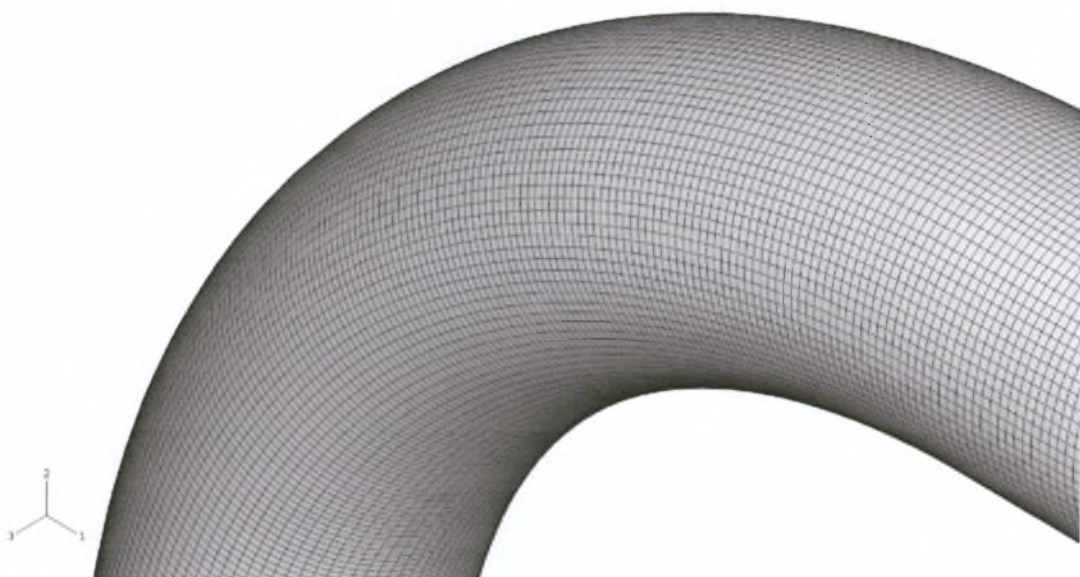
Πίνακας 5.1 : Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων παραμετρικής μελέτης.

Name	D/t	P _y (Mpa)	0%	20%	40%
Elbow I	90	8.54	0.0	1.7	3.4
Elbow II	55	14.07	0.0	2.8	5.6
Elbow III	20	40.00	0.0	8.0	16.0

Πίνακας 5.2 : Χρησιμοποιούμενες τιμές της εσωτερικής πίεσης στην παραμετρική μελέτη.



Σχήμα 5.1: Πλέγμα τυπικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στην παραμετρική μελέτη



Σχήμα 5.2 : Λεπτομέρεια πλέγματος τυπικού μοντέλου παραμετρικής μελέτης

Η ανάλυση έγινε σε δύο βήματα (steps). Στο πρώτο βήμα εφαρμόστηκε σταδιακά η εσωτερική πίεση και η δύναμη στο «καπάκι» της ακραίας διατομής, η οποία προσομοιώνει την αξονική επίδραση της πίεσης στο άκρο του αγωγού (Capped-End Force). Η δύναμη αυτή εφαρμόστηκε πάνω στον κεντρικό κόμβο αναφοράς (Reference Node) της ακραίας διατομής και ορίστηκε ως follower force ώστε να είναι κάθετη σε αυτήν. Στον κεντρικό κόμβο είχαν συνδεθεί χρησιμοποιώντας την εντολή "Kinematic Coupling" του ABAQUS, όλοι οι κόμβοι της ακραίας «ελεύθερης» διατομής του ευθύγραμμου τμήματος του σωλήνα. Ουσιαστικά αυτή η σύνδεση εξαναγκάζει όλους τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων αυτών να κινούνται σύμφωνα με την κίνηση του Reference node, προσομοιάζοντας μία άκαμπτη πλάκα «κολλημένη» στην ακραία διατομή.

Στο δεύτερο βήμα εφαρμόστηκε σταδιακά μία στροφή πάνω στον κεντρικό κόμβο της ακραίας διατομής ενώ διατηρήθηκαν σταθερή η εσωτερική πίεση και η δύναμη στο reference node από το προηγούμενο βήμα. Για αντιεπίπεδη κάμψη η στροφή που εφαρμόστηκε ήταν γύρω από τον άξονα 2 και για την συνεπίπεδη γύρω από τον άξονα 3.

5.3 Αποτελέσματα

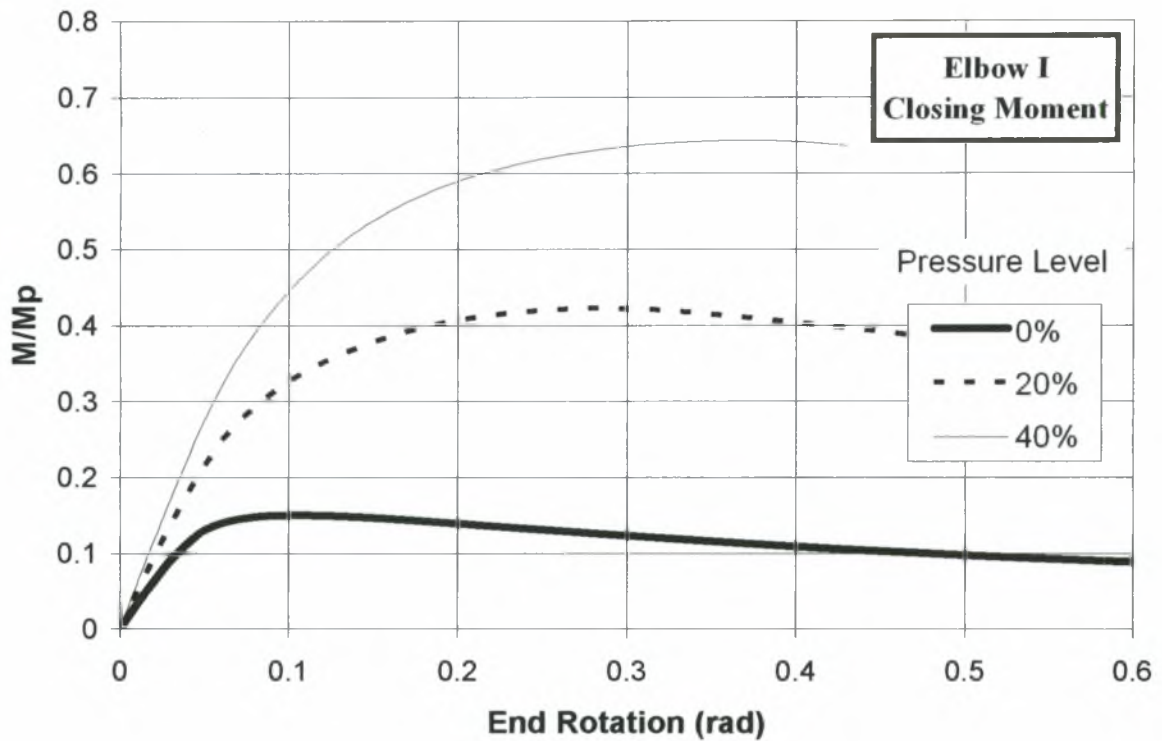
Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζεται η στροφή στο άκρο του αγωγού σε σχέση με την καμπτική ροπή, η οποία έχει αδιαστατοποιηθεί με τη βοήθεια του μεγέθους M_p , που είναι η ροπή πλήρους πλαστικότητας

$$M_p = \sigma_y (D_m)^2 t \quad (5.1)$$

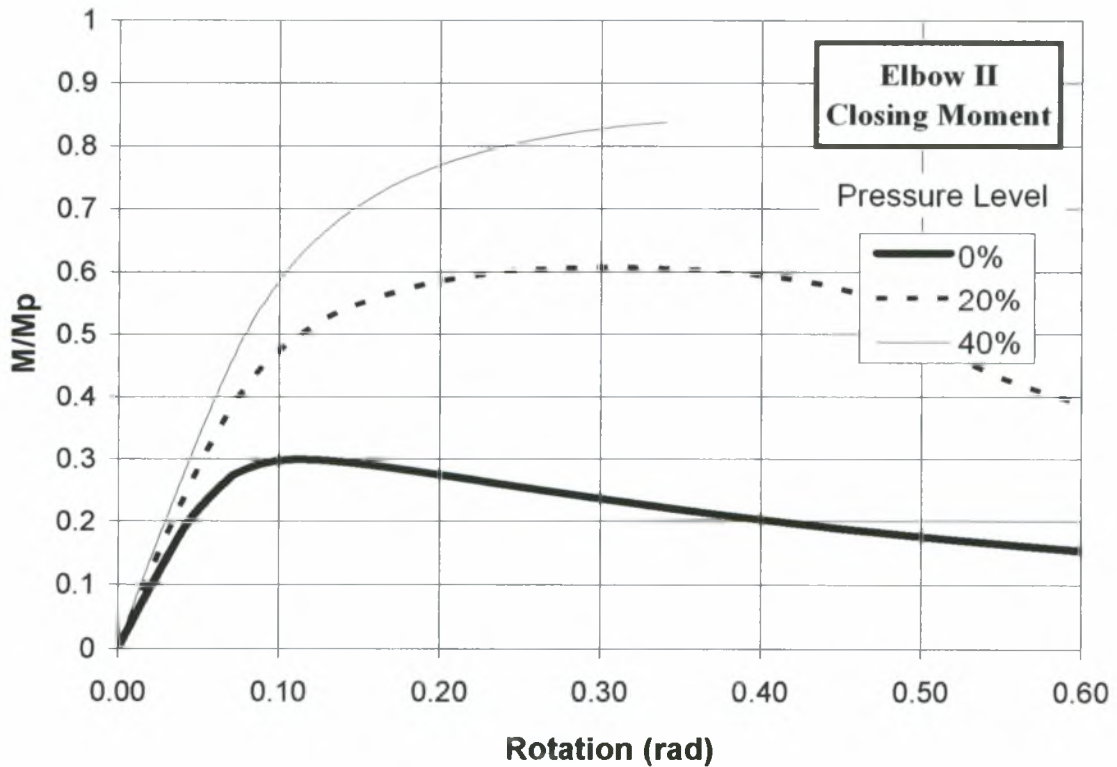
όπου σ_y είναι η τάση διαρροής του υλικού, D_m είναι η μέση διάμετρος του σωλήνα, t είναι το πάχος του σωλήνα. Ο λόγος M/M_p δείχνει κατά πόσο έχει πλαστικοποιηθεί το υλικό κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Όσο μεγαλύτερος είναι τόσο πιο πολύ «εκμεταλλευόμαστε» το υλικό του σωλήνα.

Επίσης εξαιτίας του γεγονότος ότι λόγω της εφαρμογής της πίεσης στο πρώτο βήμα, και της αντίστοιχης δύναμης στο «καπάκι», ο σωλήνας έχει στραφεί κατά μία μικρή γωνία. Αυτή η μικρή γωνία αφαιρείται από τη συνολική στροφή (End Rotation), έτσι ώστε τα διαγράμματα να ξεκινούν από την αρχή των αξόνων.

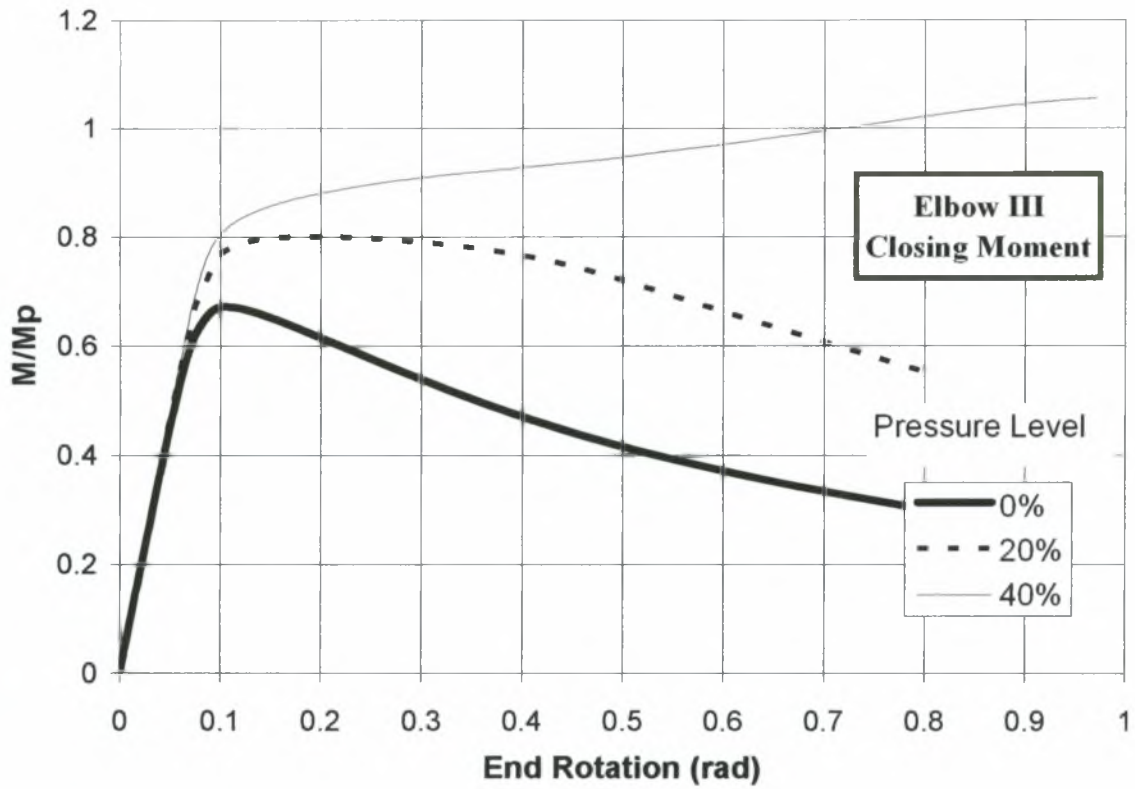
•Συνεπίπεδη Κάμψη



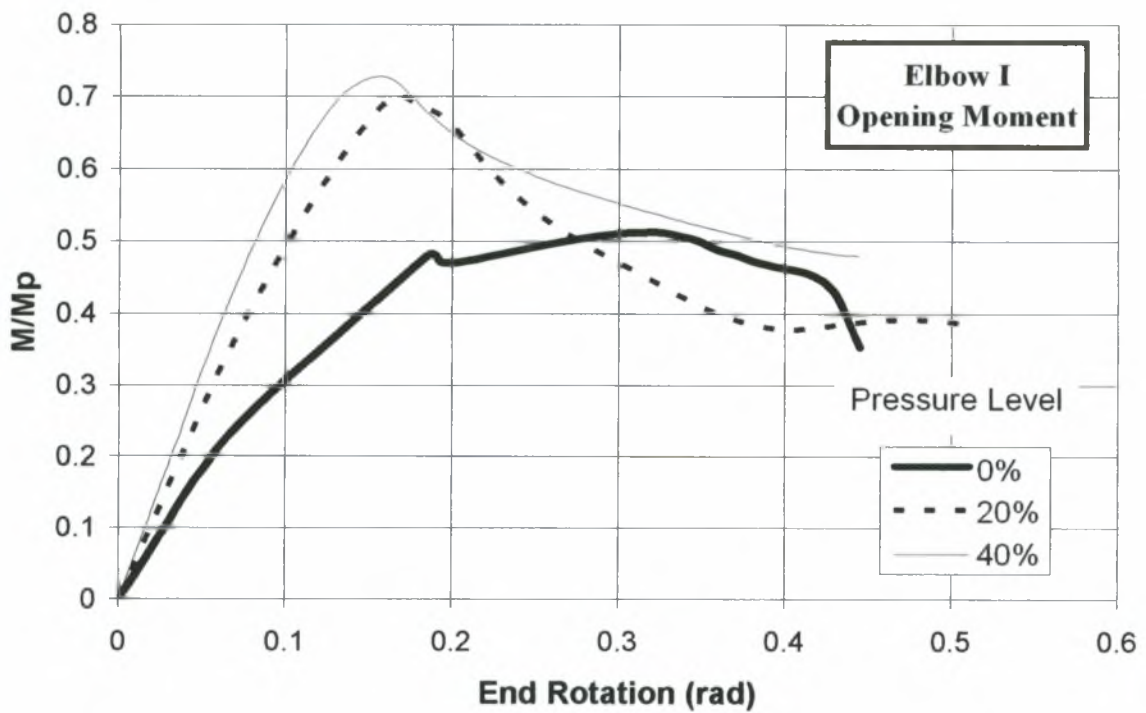
Σχήμα 5.3: Διάγραμμα στροφής – ροπής για το Elbow I υπό θετική κάμψη και διάφορα επίπεδα πίεσης



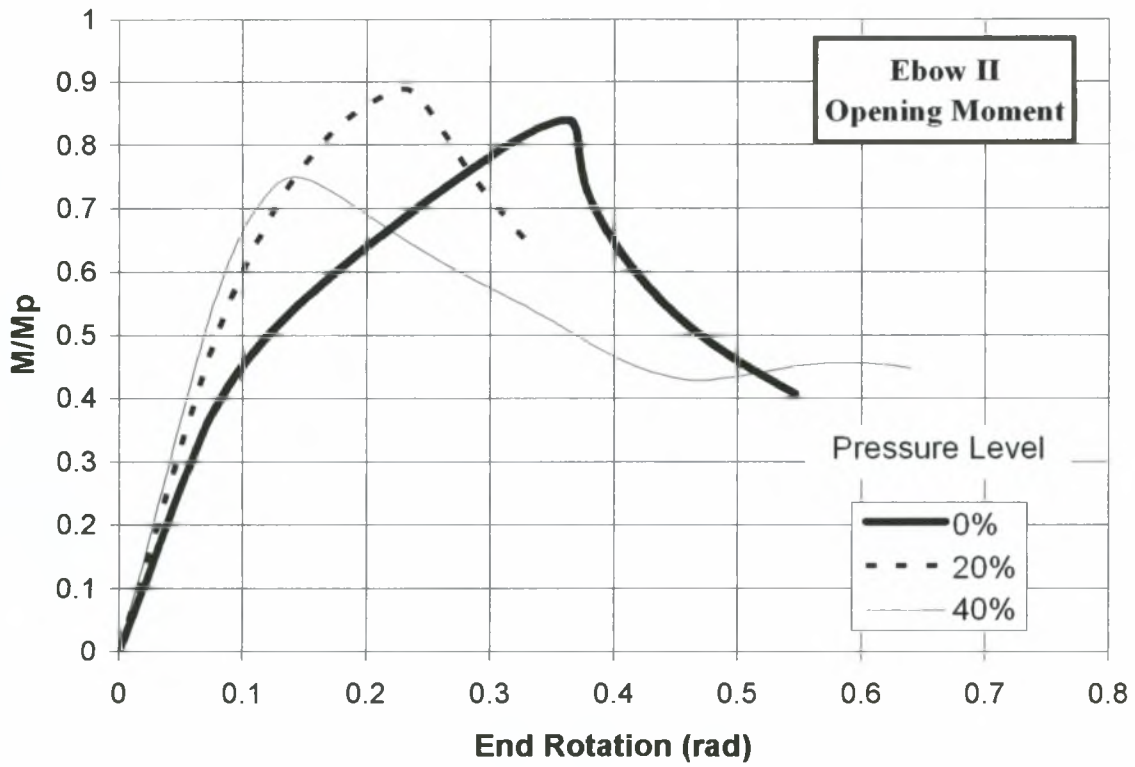
Σχήμα 5.4: Διάγραμμα στροφής – ροπής για το Elbow II υπό θετική κάμψη και διάφορα επίπεδα πίεσης



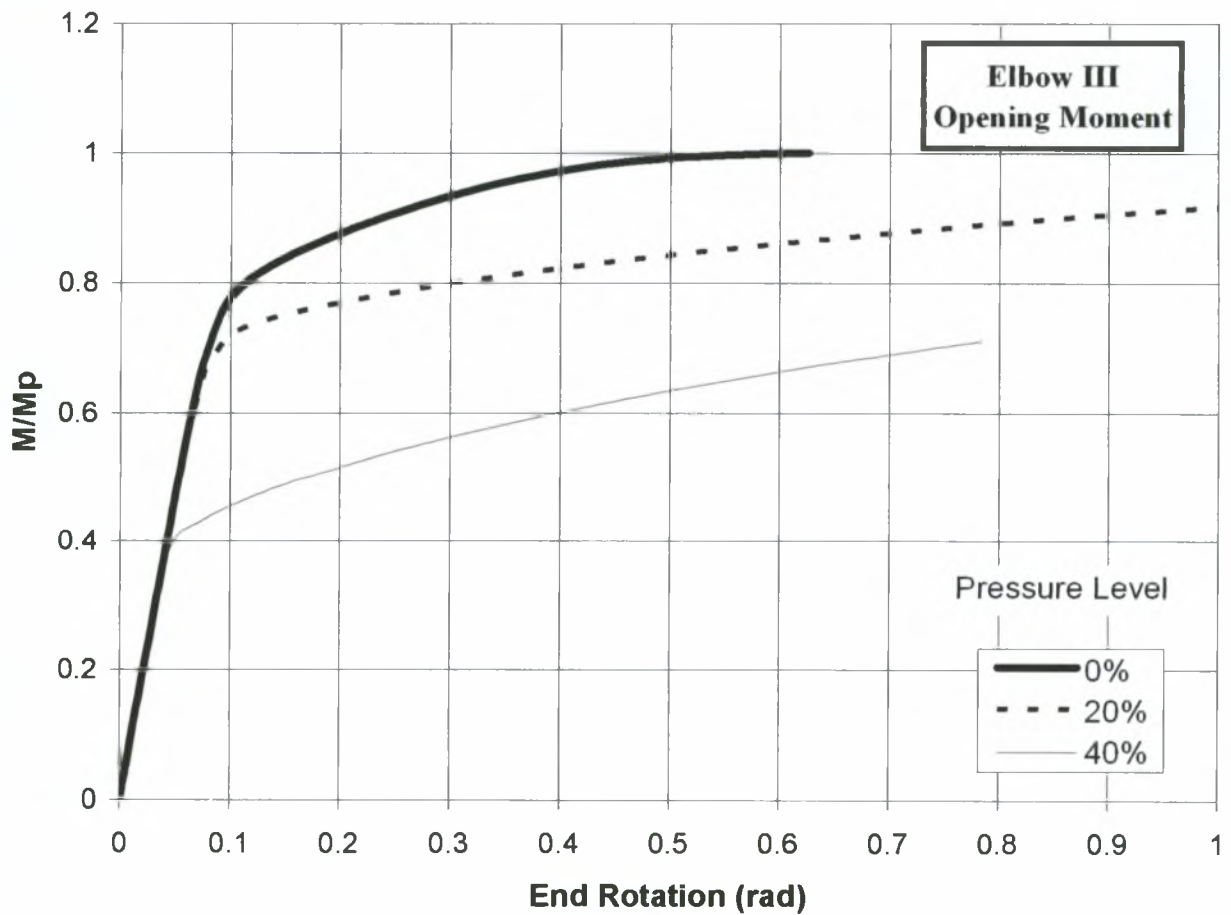
Σχήμα 5.5: Διάγραμμα στροφής – ροπής για το Elbow III υπό θετική κάμψη και διάφορα επίπεδα πίεσης



Σχήμα 5.6 : Διάγραμμα στροφής – ροπής για το Elbow I υπό αρνητική κάμψη και διάφορα επίπεδα πίεσης

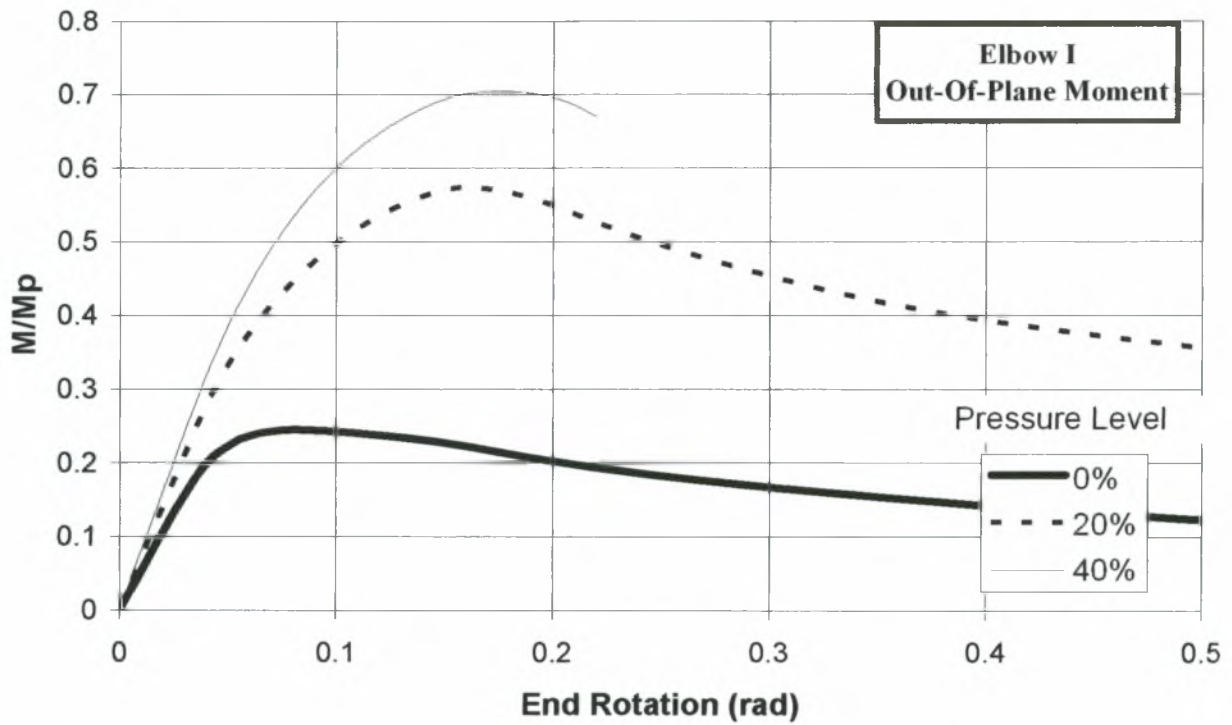


Σχήμα 5.7: Διάγραμμα στροφής – ροπής για το Elbow II υπό αρνητική κάμψη και διάφορα επίπεδα πίεσης

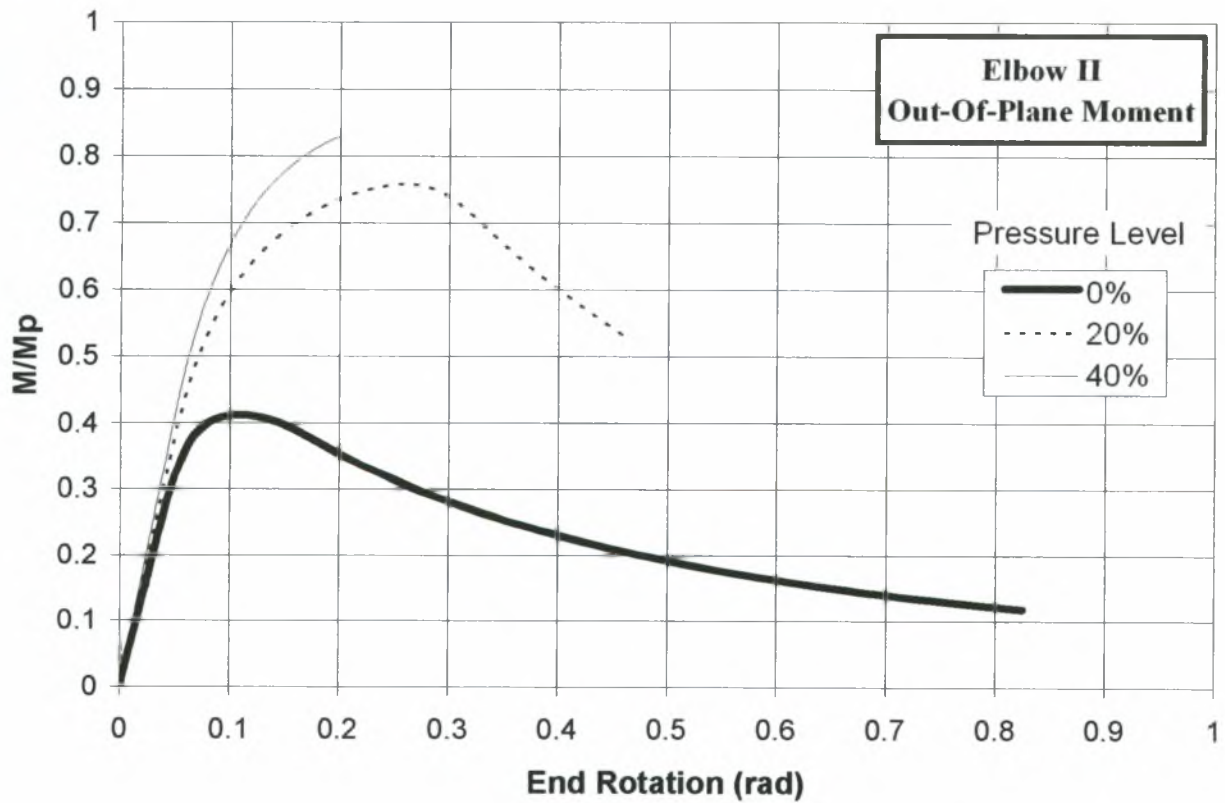


Σχήμα 5.8: Διάγραμμα στροφής – ροπής για το Elbow III υπό αρνητική κάμψη και διάφορα επίπεδα πίεσης

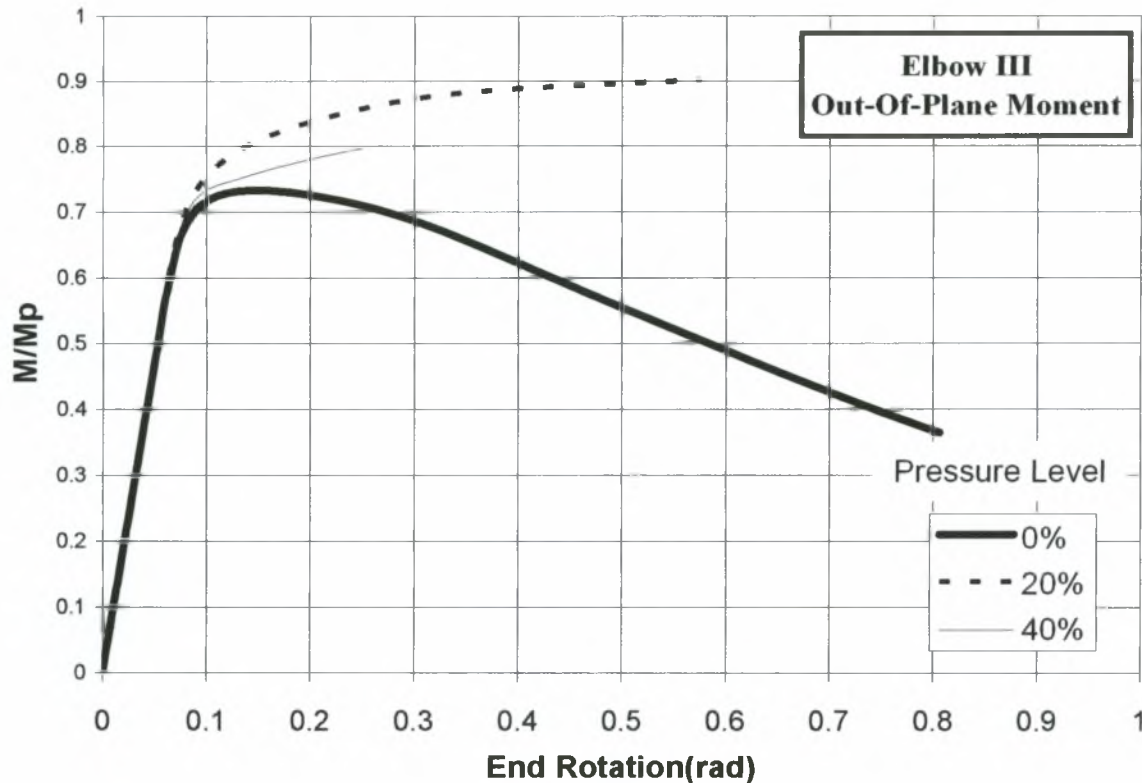
• Αντιεπίπεδη Κάμψη



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα στροφής – ροπής για το Elbow I υπό αντιεπίπεδη κάμψη και διάφορα επίπεδα πίεσης



Σχήμα 5.10: Διάγραμμα στροφής – ροπής για το Elbow II υπό αντιεπίπεδη κάμψη και διάφορα επίπεδα εσωτερικής πίεσης



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα στροφής – ροπής για το Elbow III υπό αντιεπίπεδη κάμψη και διάφορα επίπεδα εσωτερικής πίεσης

Παρατηρώντας τα διαγράμματα 5.3 ως 5.11 μπορούν να βγουν κάποια ενδιαφέροντα γενικά συμπεράσματα. Είναι εμφανές ότι στην συνεπίπεδη θετική κάμψη η πίεση επηρεάζει θετικά (αυξάνει) τον λόγο M/M_p δηλαδή την αντοχή του σωλήνα για σταθερό D/t . Επίσης ο λόγος D/t δείχνει να αυξάνει την αντοχή για σταθερή πίεση. Στην αντιεπίπεδη κάμψη τα δοκίμια δείχνουν να έχουν παρόμοια συμπεριφορά με την θετική κάμψη, ενώ ο λόγος φαίνεται γενικότερα να έχει μεγαλύτερη τιμή για σταθερό D/t και αντίστοιχη τιμή της πίεσης από τη θετική κάμψη, με τις διαφορές να μειώνονται όσο αυξάνεται η πίεση.

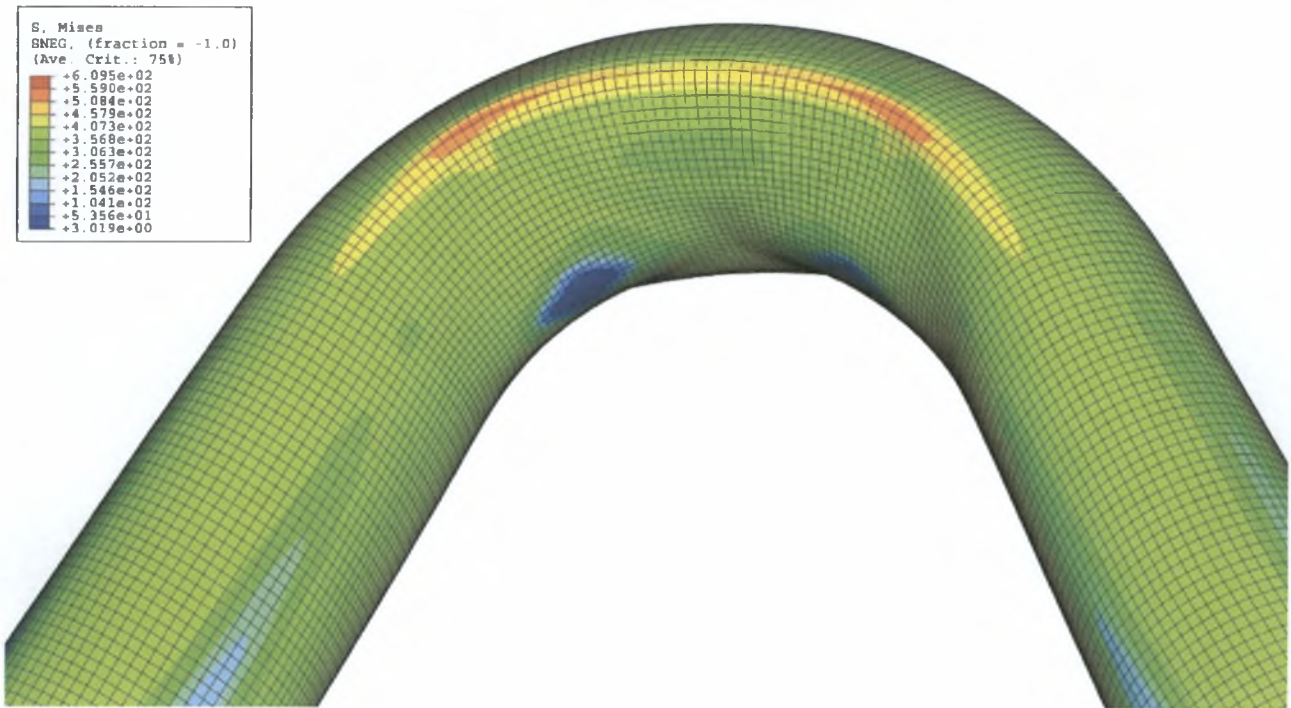
Στην συνεπίπεδη αρνητική κάμψη δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή γενικά συμπεράσματα, εκτός από το σωλήνα μεγάλου πάχους Elbow III όπου φαίνεται να έχει ακριβώς τη αντίθετη συμπεριφορά από τις άλλες δύο περιπτώσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τιμή της εσωτερικής πίεσης ίση με 40% της P_y ο λόγος δείχνει να μειώνεται όσο αυξάνει το πάχος, ενώ η γενικότερη απόκριση του σωλήνα να γίνεται ελαφρώς πιο δύσκαμπτη.

Αν συγκρίνουμε τις τιμές του λόγου M/M_p για τις τρεις περιπτώσεις συμπεραίνουμε ότι στην αρνητική συνεπίπεδη κάμψη έχουμε τις μεγαλύτερες τιμές με την αντιεπίπεδη κάμψη να ακολουθεί και την θετική συνεπίπεδη κάμψη να έχει τις μικρότερες. Τέλος παρατηρούμε ότι για το σωλήνα με μεγάλο πάχος Elbow III η αποκρίσεις ταυτίζονται και για τα τρία είδη κάμψης.

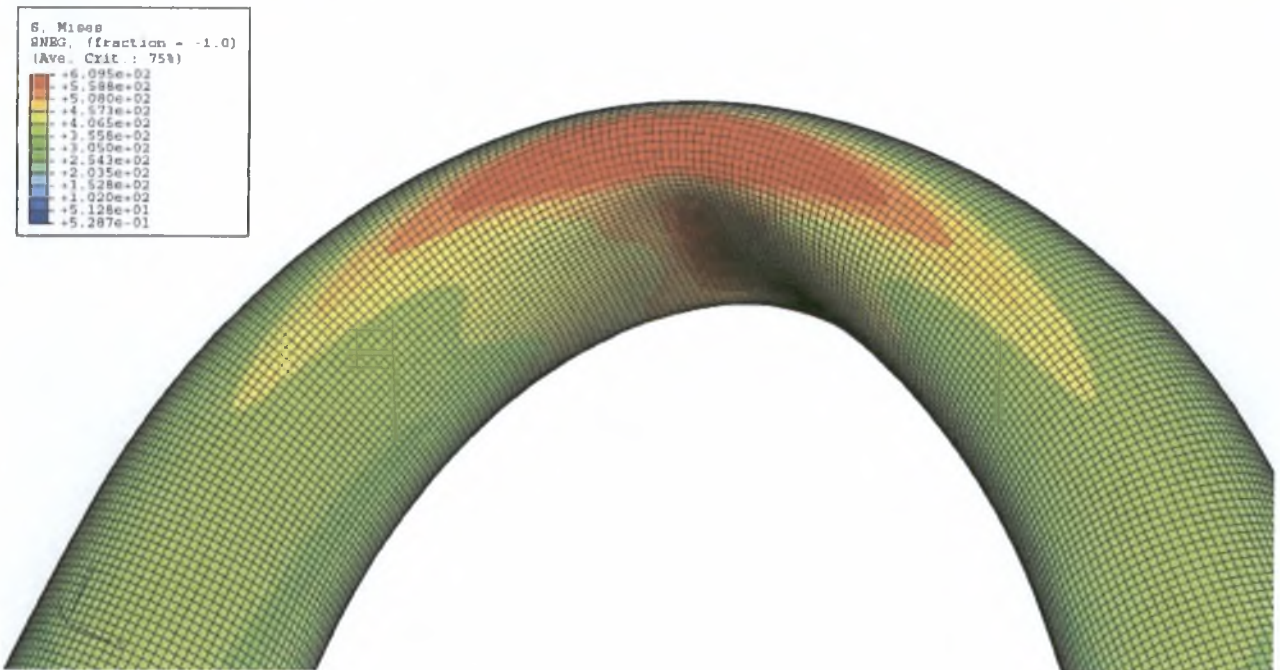
5.4 Εικόνες Δοκιμίων Παραμετρικής Μελέτης

•Θετική Κάμψη

0% Εσωτερική Πίεση

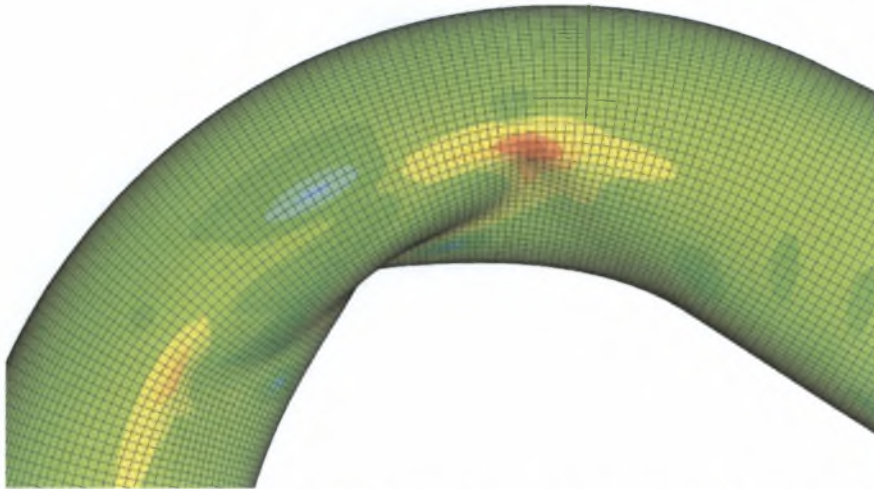


Σχήμα 5.12: Μορφή αστοχίας Elbow I υπό θετική κάμψη και 0 atm εσωτερική πίεση

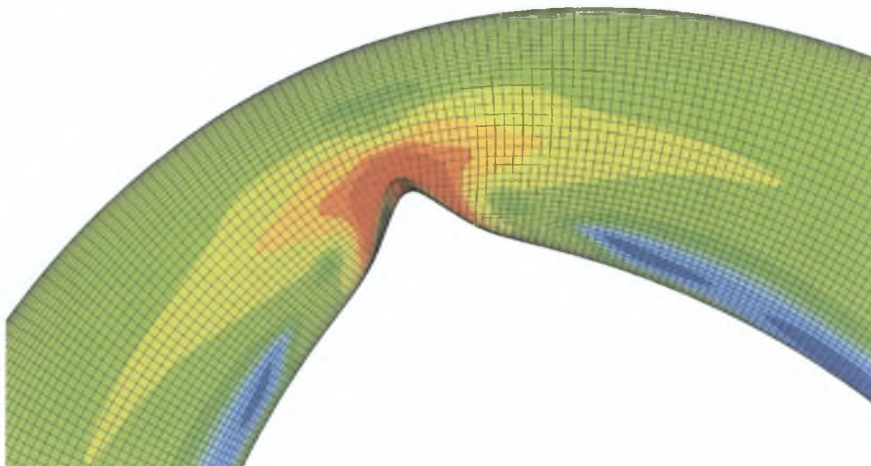


Σχήμα 5.13 : Μορφή αστοχίας Elbow III υπό θετική κάμψη και 0 atm εσωτερική πίεση

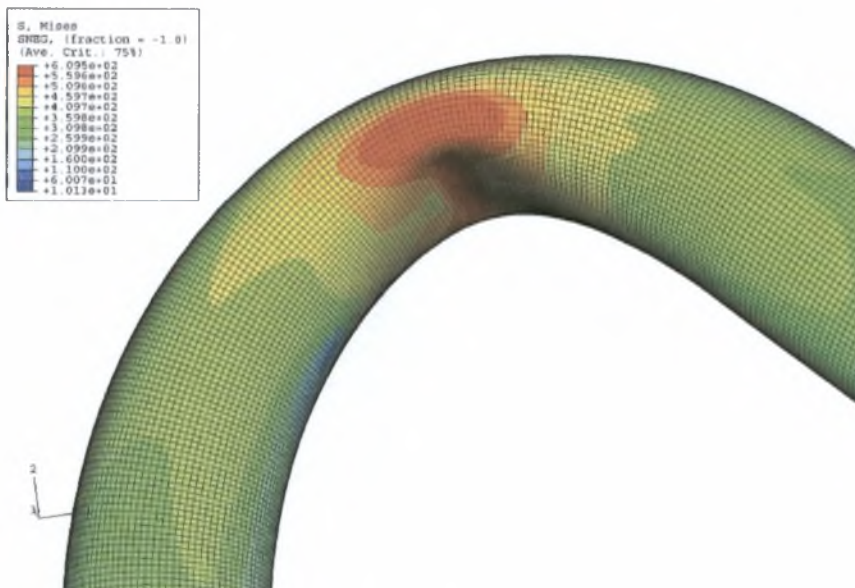
20% Εσωτερική Πίεση



Σχήμα 5.14 : Μορφή αστοχίας Elbow I υπό θετική κάμψη και 20% εσωτερική πίεση



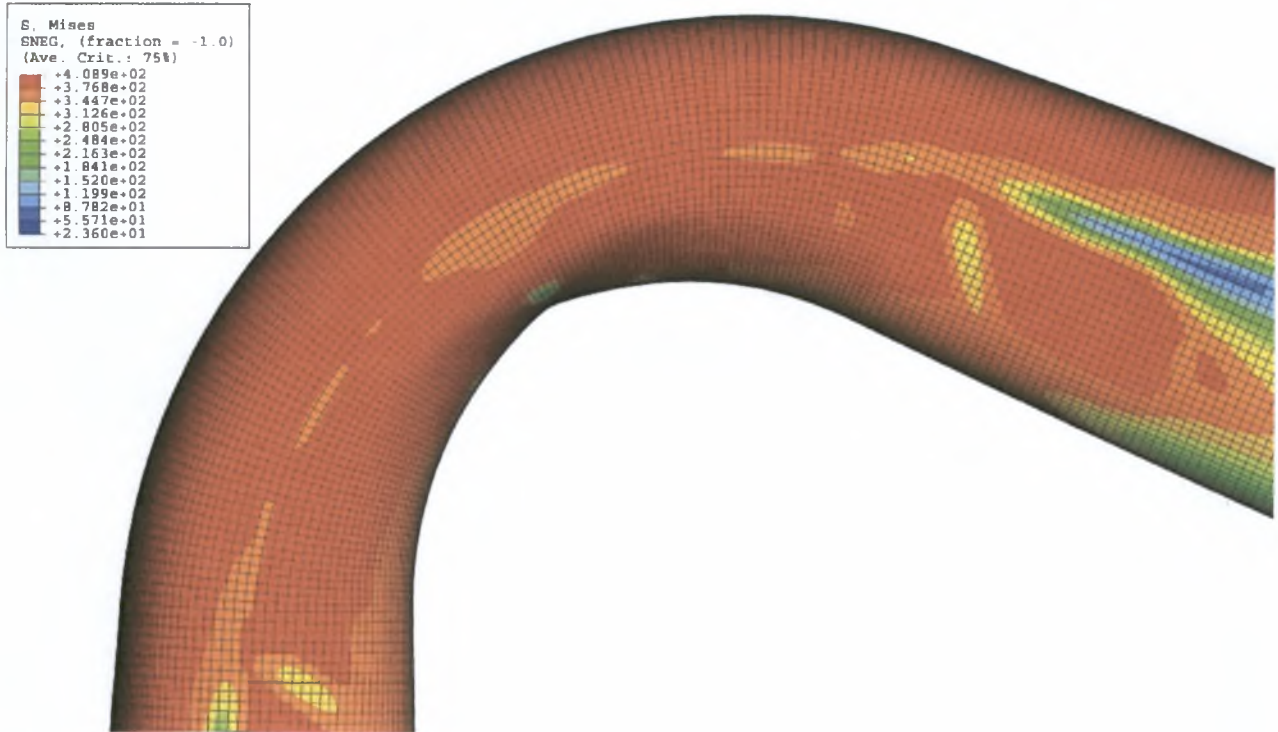
Σχήμα 5.15 : Μορφή αστοχίας Elbow II υπό θετική κάμψη και 20% εσωτερική πίεση



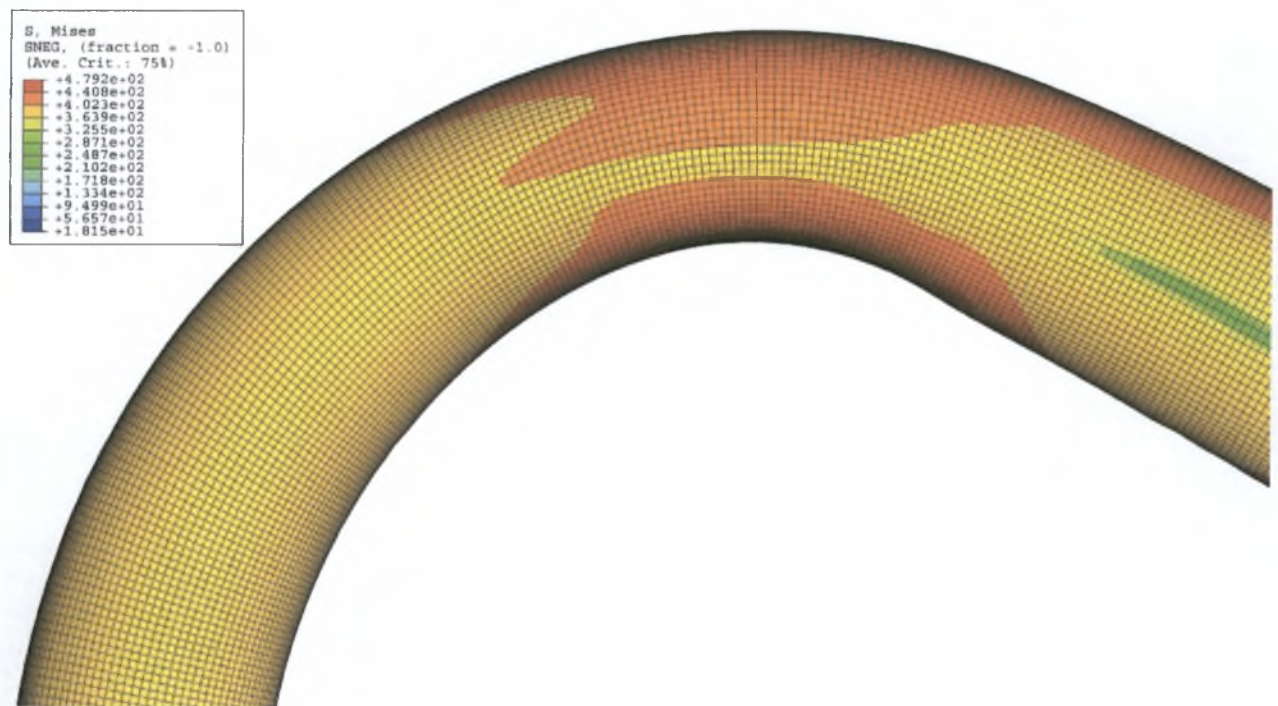
Σχήμα 5.16 : Μορφή αστοχίας Elbow III υπό θετική κάμψη και 20% εσωτερική πίεση



40% Εσωτερική Πίεση



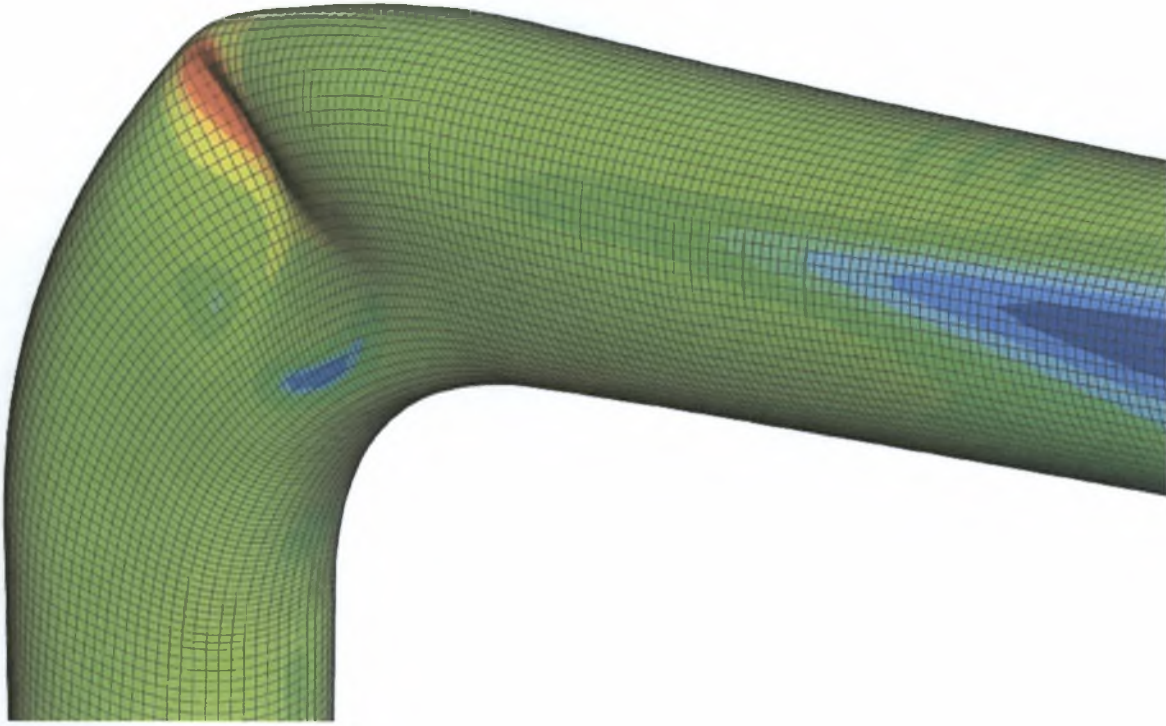
Σχήμα 5.17 : Μορφή αστοχίας Elbow I υπό θετική κάμψη και 40% εσωτερική πίεση



Σχήμα 5.18 : Μορφή αστοχίας Elbow III υπό θετική κάμψη και 40% εσωτερική πίεση

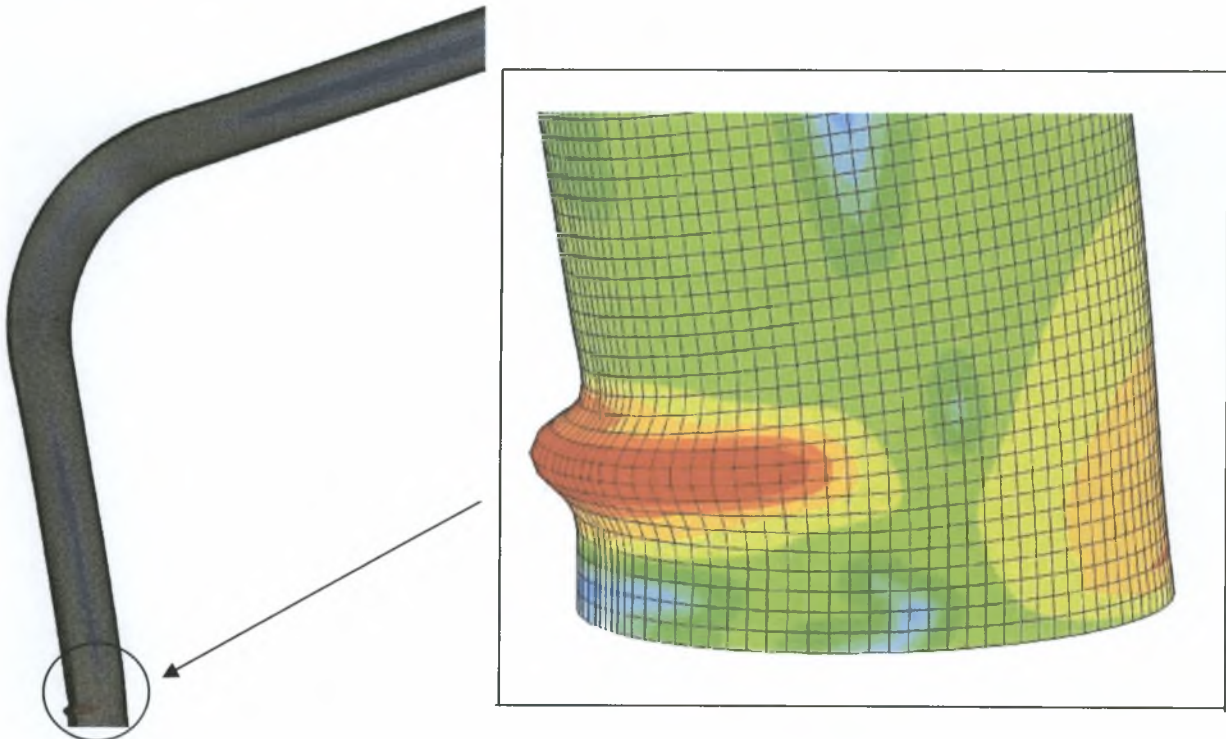
•Αρνητική Κάμψη

0% Εσωτερική Πίεση



Σχήμα 5.19 : Μορφή αστοχίας Elbow I υπό αρνητική κάμψη και 0% εσωτερική πίεση

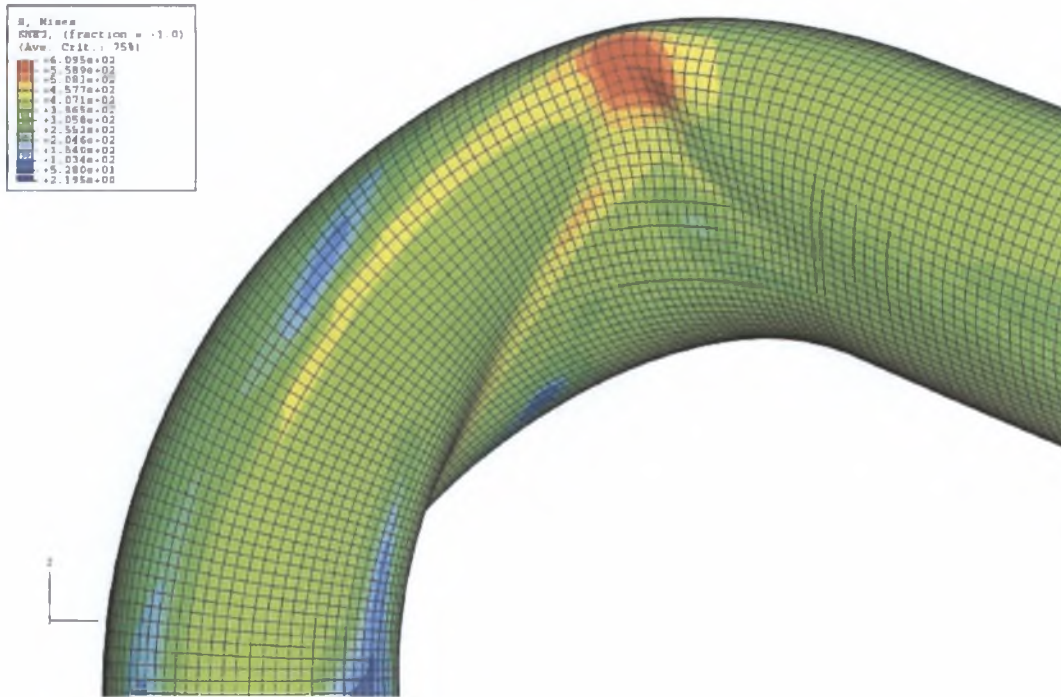
20% Εσωτερική Πίεση



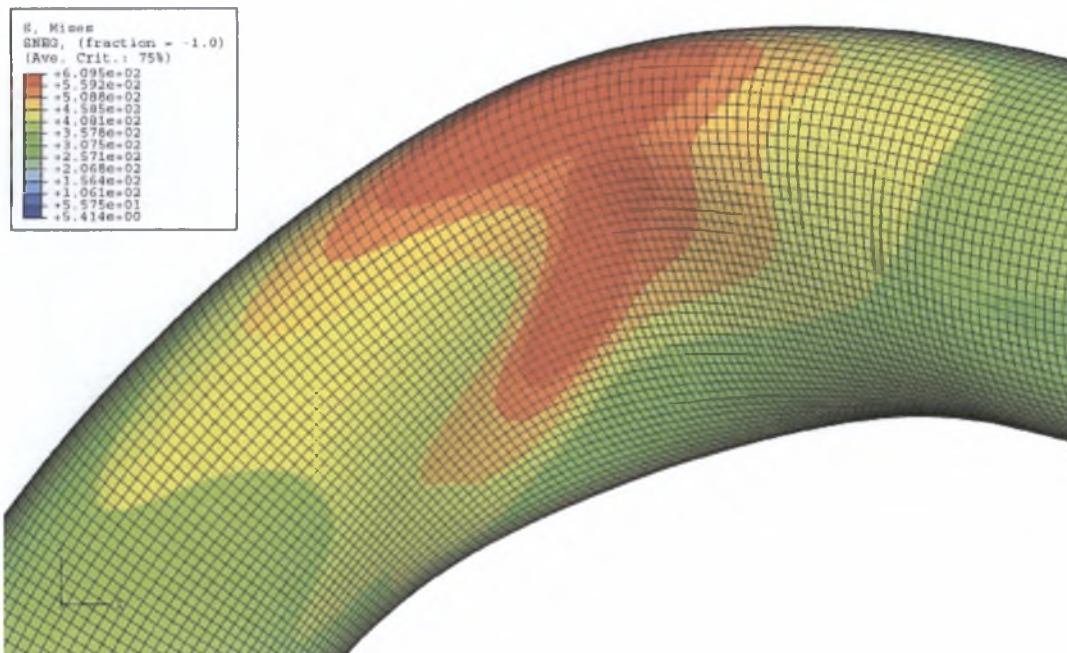
Σχήμα 5.20: Μορφή αστοχίας Elbow II υπό θετική κάμψη και 20% εσωτερική πίεση

• Αντιεπίπεδη Κάμψη

0% Εσωτερική Πίεση

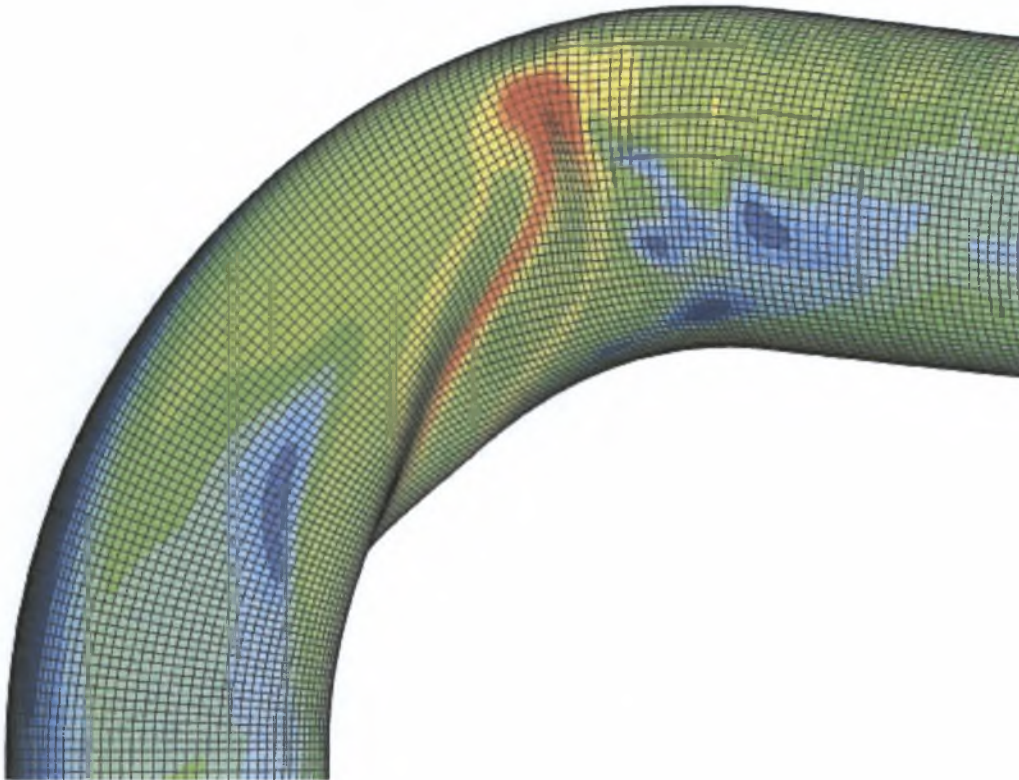


Σχήμα 5.21 : Μορφή αστοχίας λεπτότοιχου σωλήνα Elbow I υπό αντιεπίπεδη κάμψη και 0 atm εσωτερική πίεση

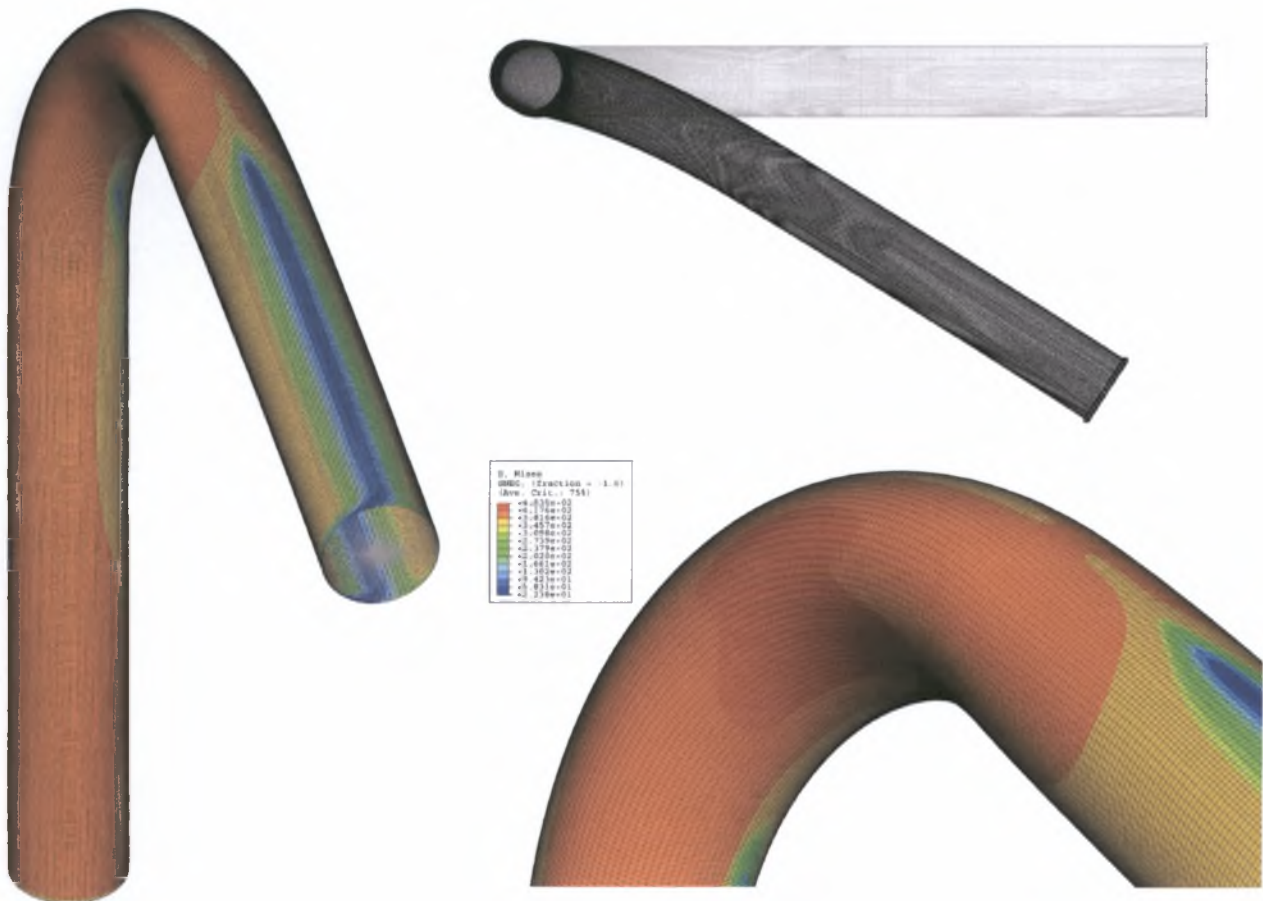


Σχήμα 5.22 : Μορφή αστοχίας σωλήνα μεγάλου πάχους Elbow III υπό αντιεπίπεδη κάμψη και 0 atm εσωτερική πίεση

20% Εσωτερική Πίεση



Σχήμα 5.23: Μορφή αστοχίας Elbow I υπό αντιεπίπεδη κάμψη και 20% εσωτερική πίεση



Σχήμα 5.24: Μορφή αστοχίας Elbow III υπό αντιεπίπεδη κάμψη και 20% εσωτερική πίεση

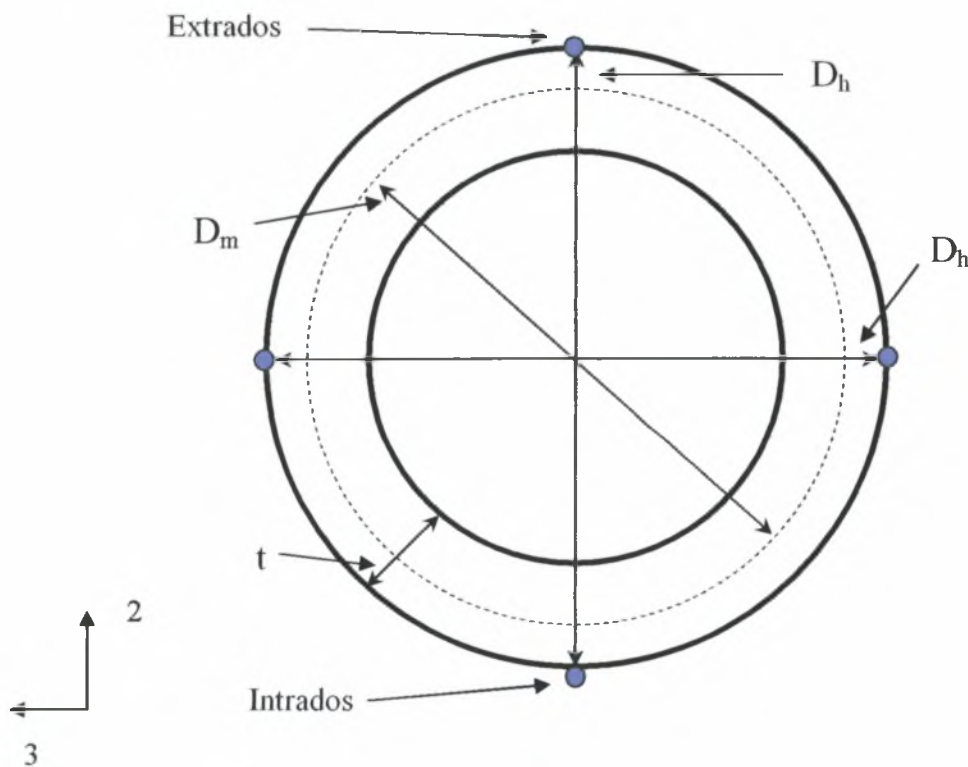
5.5 Παραμόρφωση της Διατομής Του Καμπύλου Σωλήνα

Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζεται η μεταβολή του σχήματος της διατομής (Ovalisation) σε σχέση με τη στροφή στο άκρο του αγωγού στο σημείο F (σχήμα 2.8), η οποία έχει αδιαστατοποιηθεί ως ακολούθως

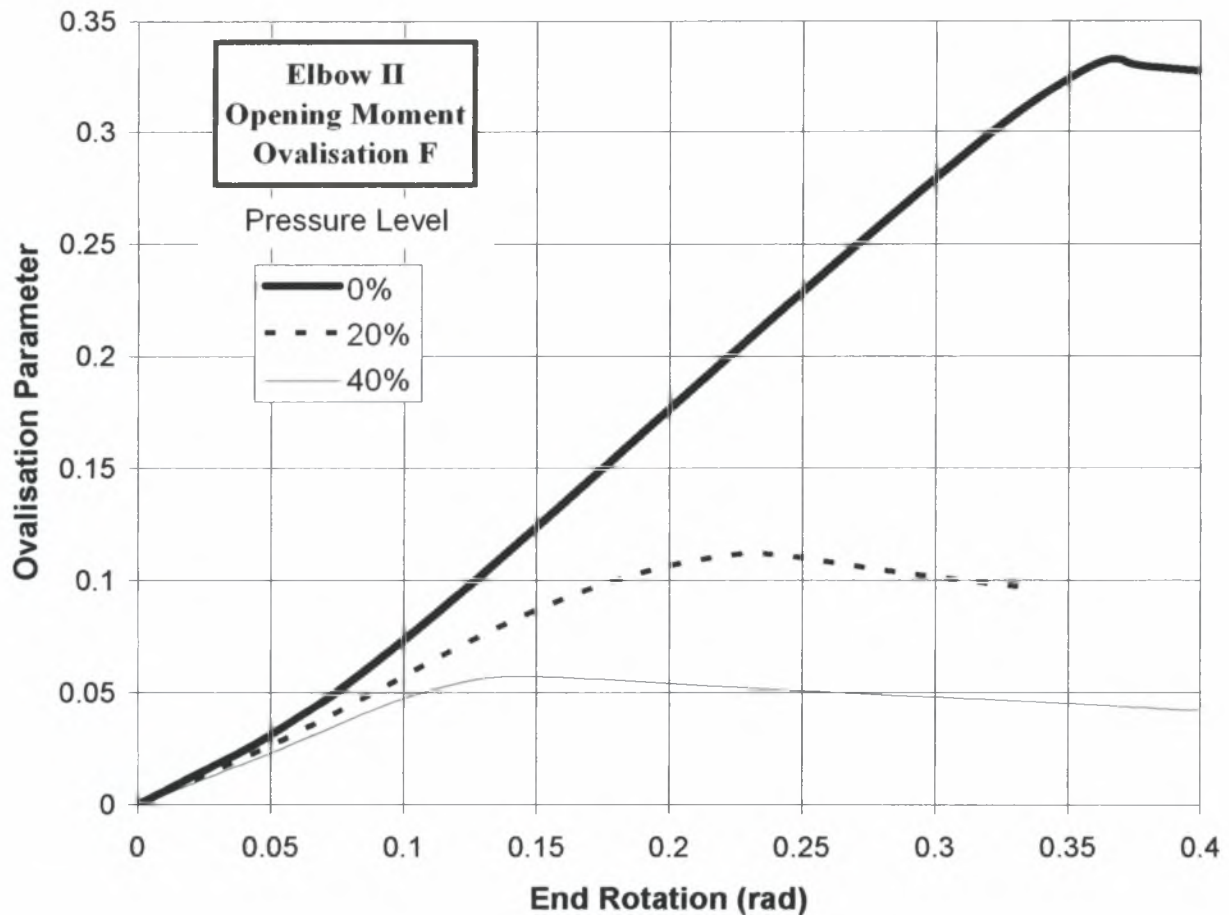
$$OV = \frac{D_h - D_v}{2D_m} \quad (5.2)$$

όπου οι διάμετροι D_v , D_h , D_m φαίνονται στο σχήμα 5.25.

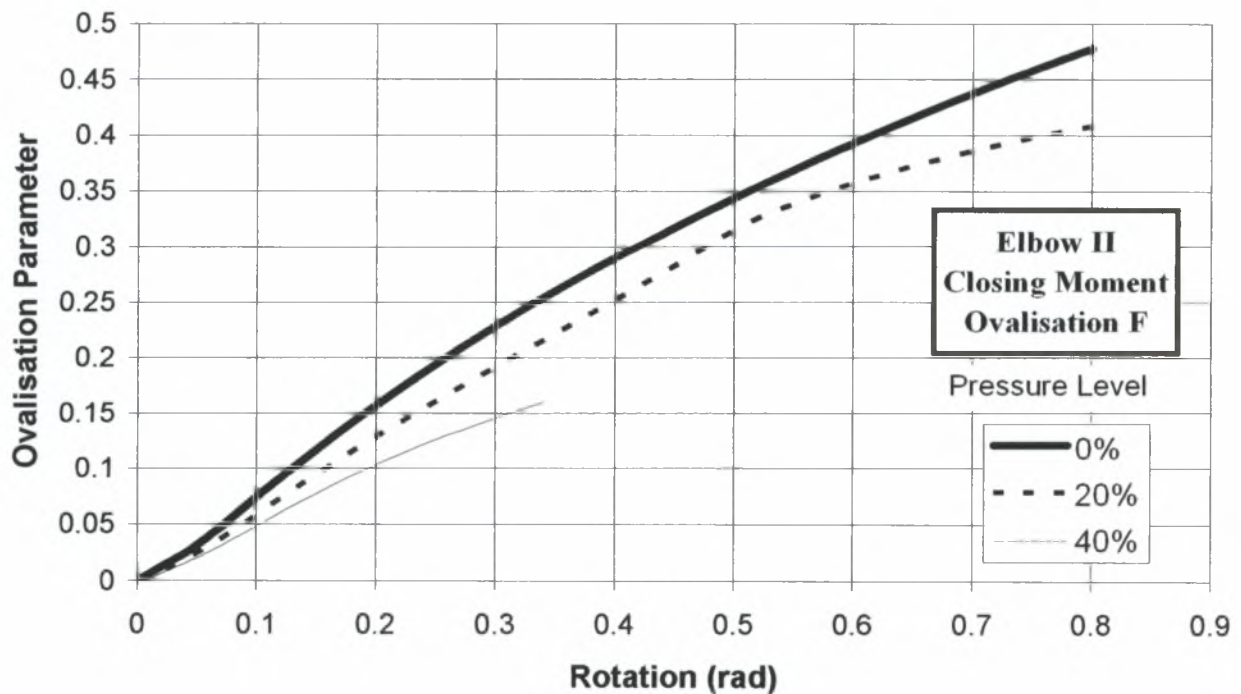
Τα σημεία μέτρησης έχουν διατηρηθεί τα ίδια από το δοκίμιο tube 80. Στο σχήμα 5.25 φαίνεται σχηματικά η τυπική διατομή του σωλήνα και οι διάμετροι D_v , D_h , D_m . Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε μία συγκεκριμένη, εν γένει, συμπεριφορά των δοκιμών. Αν μελετήσουμε τα αποτελέσματα ως την επιρροή της πίεσης για συγκεκριμένη γεωμετρία σωλήνα (σταθερό D/t) σε αυτή μπορούν να βγουν μερικά ενδιαφέροντα γενικά συμπεράσματα. Κατά κύριο λόγο έγινε εμφανής η θετική επίπτωση της πίεσης στην αναστολή της παραμόρφωσης της διατομής. Επίσης στην συνεπίπεδη θετική κάμψη η συνεισφορά της πίεσης είναι αρκετά μικρότερη από ότι στην συνεπίπεδη αρνητική κάμψη ενώ είναι παρόμοια με τα αποτελέσματα για την αντεπίπεδη κάμψη. Ενδεικτικά παρατίθενται τα σχήματα 5.26, 5.27, 5.28 που πιστοποιούν τα ανωτέρω.



Σχήμα 5.25 : Κύριες διαμέτροι που δίνουν τη μεταβολή του σχήματος της διατομής στα σημαντικά σημεία

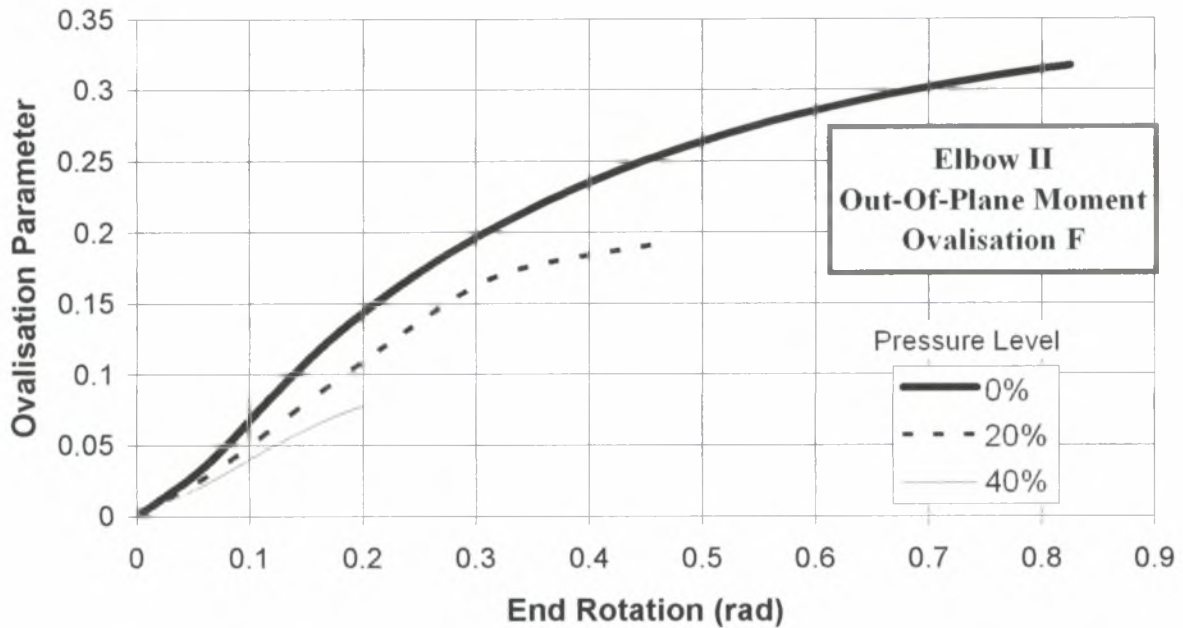


Σχήμα 5.26 : Διάγραμμα OV στο σημείο F του καμπύλου τμήματος – στροφής στο άκρο για αρνητική κάμψη του δοκιμίου Elbow II.



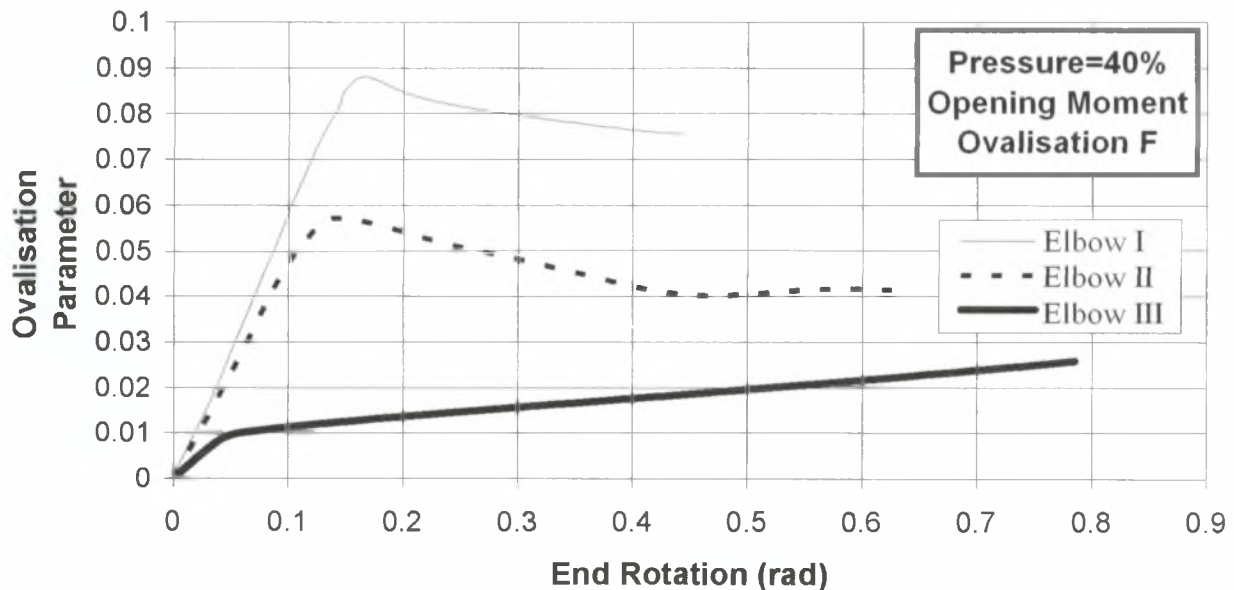
Σχήμα 5.27 : Διάγραμμα OV στο σημείο F του καμπύλου τμήματος – στροφής στο άκρο για θετική κάμψη του δοκιμίου Elbow II.

Στα παρακάτω διαγράμματα οι διάμετροι D_v , D_h , της εξίσωσης 5.2 έχουν στραφεί κατά 45° αντίστροφα από τη φορά του ρολογιού.

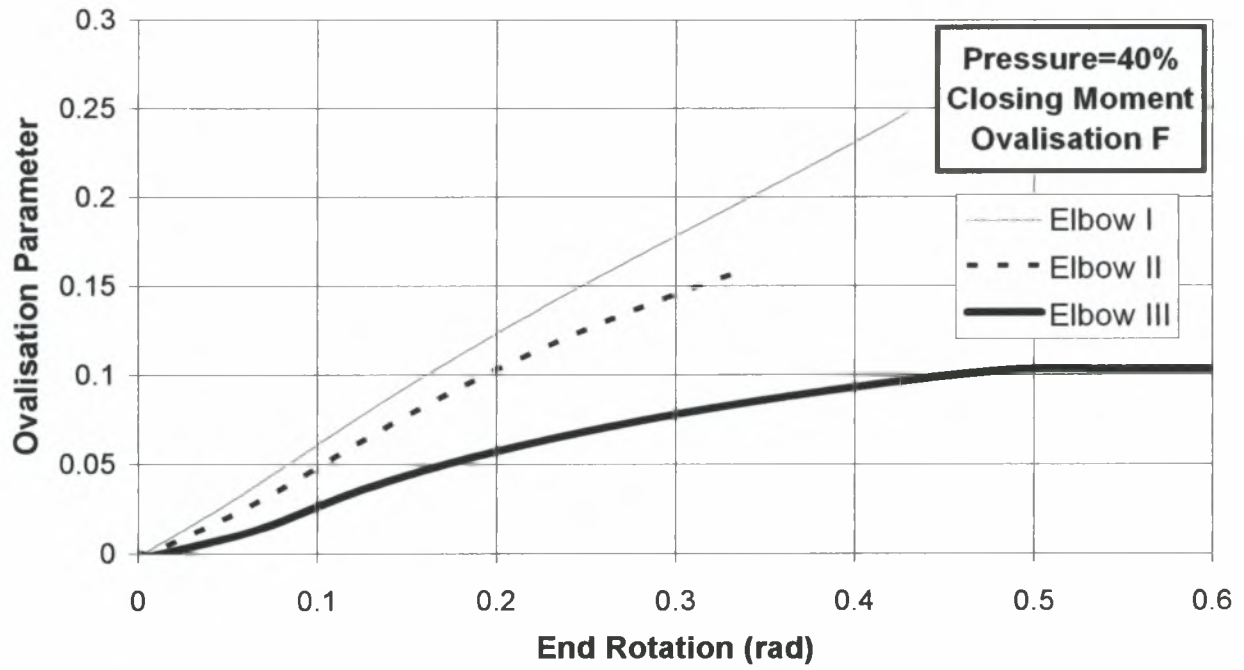


Σχήμα 5.28 : Διάγραμμα OV στο σημείο F του καμπύλου τμήματος – στροφής στο άκρο για αντιεπίπεδη κάμψη του δοκιμίου Elbow II

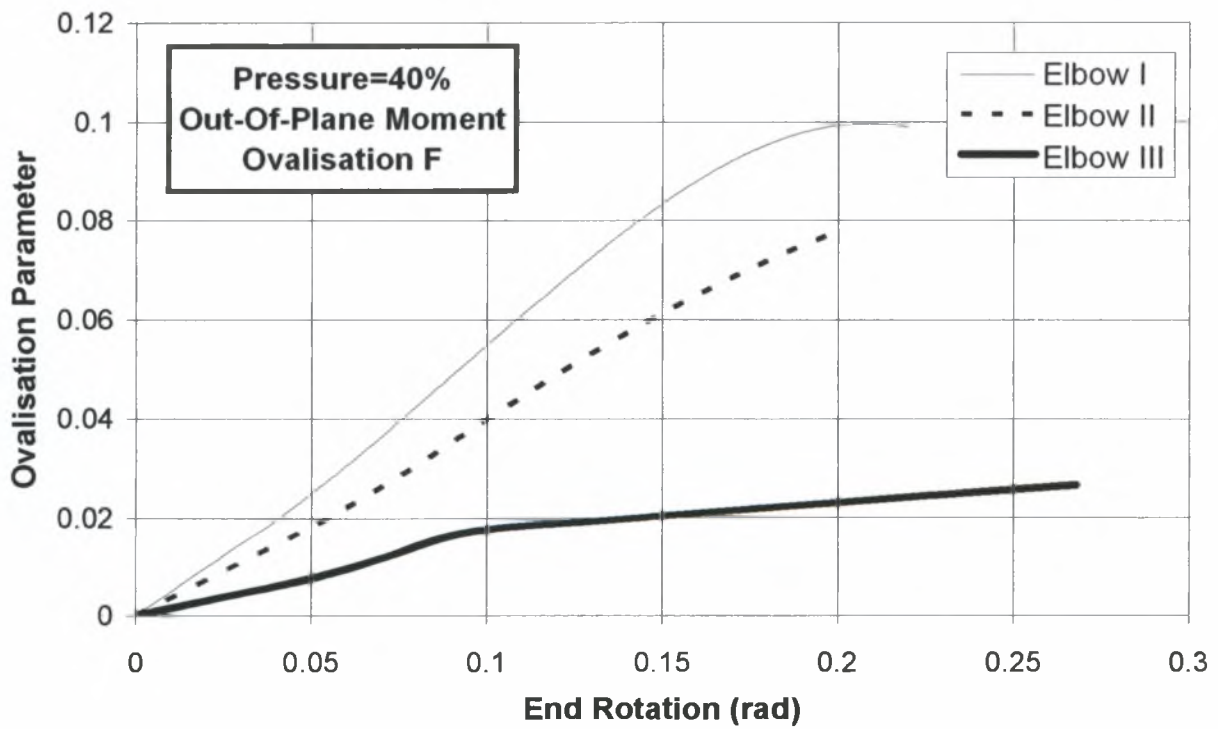
Μια άλλη σημαντική μελέτη είναι η επιρροή του παράγοντα D/t , δηλαδή του πάχους, στη μεταβολή της διατομής υπό σταθερή πίεση. Γενικά παρατηρούμε ότι όσο πιο παχύ είναι το δοκίμιο τόσο λιγότερο παραμορφώνεται. Ενδεικτικά Παρατίθενται τα σχήματα 5.29, 5.30, 5.31.



Σχήμα 5.29 : Διάγραμμα OV στο σημείο F του καμπύλου τμήματος – στροφής στο άκρο για αρνητική κάμψη και εσωτερική πίεση 40%



Σχήμα 5.30: Διάγραμμα OV στο σημείο F του καμπύλου τμήματος – στροφής στο άκρο για θετική κάμψη και εσωτερική πίεση 40%



Σχήμα 5.31: Διάγραμμα OV στο σημείο F του καμπύλου τμήματος – στροφής στο άκρο για αντιεπίπεδη κάμψη και εσωτερική πίεση 40%

Κεφάλαιο 6 - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΑΓΩΓΟ

6.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της προσπάθειας πρόβλεψης της απόκρισης καμπύλων σωλήνων υπό ταυτόχρονη επίδραση καμπτικών φορτίων και εσωτερικής πίεσης, έγινε ανάλυση τάσεων και έλεγχος κύρτωσης σε πραγματικό μεταλλικό αγωγό μεταφοράς νερού του οποίου ένα τμήμα είναι υπέργειο. Η οριζοντιογραφία και η μηκοτομή φαίνονται στα *σχήματα 6.1* και *6.2*. Ο αγωγός βρίσκεται υπό κατασκευή στην περιοχή της Λαμίας.

Στην παρούσα εργασία έγινε μια γενική ανάλυση τάσεων σε όλη την κατασκευή όταν επιδρά σε αυτήν το ίδιο βάρος του αγωγού και του νερού, με τη χρήση στοιχείων σωλήνα ELBOW32 καθώς και τοπική ανάλυση κύρτωσης, με τη χρήση στοιχείων κελύφους, για τα υπέργεια καμπύλα τμήματα του αγωγού όταν αυτά υποβάλλονται σε συνεπίπεδη ή αντιεπίπεδη κάμψη και εσωτερική πίεση.

6.2 Χαρακτηριστικά Μελέτης και Μοντέλου Αγωγού

Ο αγωγός έχει εξωτερική διάμετρο ίση με 813 mm και πάχος ίσο με 12.5 mm. ενώ το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το St 37.2 με τάση διαρροής $\sigma_y = 235$ MPa, μέτρο ελαστικότητας $E=210$ GPa και λόγο Poisson $\nu=0.3$. Ως φορτία του αγωγού ελήφθησαν το ίδιο βάρος του και το βάρος του ύδατος καθώς και η εσωτερική πίεση ίση με 12 atm (1.22 MPa).

Στη γενική ανάλυση τάσεων, μελετήθηκε ο αγωγός στο σύνολο του, χρησιμοποιώντας πενήντα στοιχεία ELBOW32, ενώ το έδαφος προσομοιώθηκε με τη χρήση στοιχείων SPRING1, τα οποία εξομοιώνουν τη σύνδεση ενός κόμβου με το έδαφος με τη βοήθεια ενός γραμμικού ελατηρίου σταθεράς K. Παράλληλα χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες συνοριακές συνθήκες οι οποίες επιβάλλονταν από τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και την ίδια την κατασκευή.

Για διαδικαστικούς και μόνο λόγους η διαδικασία φόρτισης ήταν η ίδια που ακολουθήθηκε και στις προηγούμενες αναλύσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ανάλυση του αγωγού ήταν γραμμική, επομένως η αλληλουχία των φορτίων δεν παίζει ρόλο. Στο πρώτο βήμα εφαρμόστηκε η πίεση, που σε αυτήν την περίπτωση απαιτούσε συνθήκη κλειστού άκρου. Αυτή η συνθήκη λαμβάνεται υπόψη από τα στοιχεία ELBOW και μας απαλλάσσει από την απαίτηση εφαρμογής του kinematic coupling. Στο δεύτερο βήμα εφαρμόστηκαν τα δομικά φορτία, δηλαδή ίδιο βάρος του αγωγού και του νερού, στο υπέργειο τμήμα αυτού.

Στις δύο άκρες του αγωγού, οι οποίες ήταν υπόγειες, δεν επιτράπη η παραμόρφωση της διατομής στο επίπεδο της καθώς και η στρέβλωση εκτός αυτού, ενώ θεωρήθηκε ότι οι διατομές είναι πακτωμένες στο έδαφος. Επίσης, όλο το υπόγειο μέρος του αγωγού θεωρήθηκε ότι περιβάλλεται από κατάλληλα συμπτυκνωμένο εδαφικό υλικό, οι ελαστικές σταθερές του οποίου

ελήφθησαν σε τρεις διαφορετικές τιμές ($K=5000, 20000, 40000 \text{ kN/m}^3$), ώστε να ελεγχθεί η ευαισθησία των αποτελεσμάτων στην συγκεκριμένη παράμετρο.

Το υπέργειο τμήμα του αγωγού στηριζόταν σε τέσσερα βάθρα.(B1, B2, B3, B4 στα σχήματα 6.1, 6.2, 6.3). Οι διατομές που ολισθαίνουν πάνω σε αυτά θεωρήθηκε ότι δεν παραμορφώνονται, ενώ δεσμεύτηκαν η κίνηση στον άξονα που είναι κάθετος στο άνω άκρο των βάθρων και οι δύο στροφές γύρω από τους άξονες που ορίζουν την άνω επιφάνεια αυτών. Τέλος θεωρήθηκε ότι ο αγωγός είναι κατασκευασμένος από ελαστικό υλικό, με ελαστικές σταθερές αυτές που προαναφέρθηκαν.

Στον τοπικό έλεγχο κύρτωσης η μελέτη έγινε σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος ελέγχθηκε η απόκριση των υπέργειων καμπύλων μερών (σημεία (1), (2) στο σχήμα 6.2) όταν αυτά υποβάλλονται σε συνεπίπεδη θετική καμπτική ροπή και εσωτερική πίεση 12 atm, ενώ στο δεύτερο ελέγχθηκε η απόκριση του υπογείου καμπύλου τμήματος (σημείο (3) στο σχήμα 6.2) όταν αυτό υποβάλλεται σε αντεπίπεδη κάμψη και εσωτερική πίεση 12 atm.

Για τη προσομοίωση των καμπύλων τμημάτων και την ανάλυση σε κύρτωση χρησιμοποιήθηκαν 2000 στοιχεία κελύφους τύπου S8R5, ενώ λήφθηκαν υπόψη η μη-γραμμικότητα του υλικού και της γεωμετρίας της κατασκευής, ενώ δεν συμπεριλήφθηκε η επίδραση του ιδίου βάρους του αγωγού και του νερού. Η ανάλυση των μοντέλων έγινε με τη χρήση του αλγορίθμου RIKS που συμπεριλαμβάνεται στο ABAQUS.

6.3 Αποτελέσματα Γενικής Ανάλυσης Τάσεων

Τα πλεονεκτήματα των στοιχείων καμπύλου σωλήνα έχουν αναφερθεί στο 3 κεφάλαιο εκ των ποίων τα βασικότερα είναι ότι αποτελούν μια πολύ καλή πρώτη προσέγγιση για προβλήματα οριακών φορτίων, ιδίως σε ελαστικές αναλύσεις καθώς είναι πολύ πιο φθηνά, υπολογιστικά, από τα στοιχεία κελύφους αλλά και πιο εύκολα στη χρήση. Όμως εξαιτίας της απλότητας τους έχουν ένα σημαντικό μειονεκτήματα : τα στοιχεία καμπύλου σωλήνα δεν παρέχουν τη δυνατότητα μιας καλής απεικόνισης των αποτελεσμάτων όσον αφορά την παραμόρφωση της διατομής, όπως τα στοιχεία κελύφους. Παρ'όλα αυτά μπορούμε να πάρουμε αποτελέσματα για την αξονική τάση S11, την περιμετρική τάση S22 και την διατμητική τάση S12, όπου οι άξονες 1 και 2 αναφέρονται στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων, στα σημεία ολοκλήρωσης της διατομής. Στο *σχήμα 8.3* φαίνονται οι τοπικοί άξονες και στο *σχήμα 8.4* φαίνεται η αρίθμηση των σημείων ολοκλήρωσης κατά μήκος της διατομής και διαμέσων του πάχους του αγωγού. Να σημειωθεί ότι το στοιχείο ELBOW32 χρησιμοποιεί 2 σταθμούς ολοκλήρωσης (integration points) κατά μήκος του αγωγού

Στα *σχήματα 6.6* και *6.7* φαίνονται οι παραμορφώσεις του αγωγού οι οποίες έχουν μεγεθυνθεί κατά δύο τάξεις μεγέθους για να είναι ορατές. Φαίνονται καθαρά οι παραμορφώσεις στα καμπύλα τμήματα εξαιτίας της σημαντικής τιμής της εσωτερικής πίεσης καθώς και το βέλος της κάμψης στο κεντρικό άνοιγμα του υπέργειου τμήματος του αγωγού.

Παρακάτω παρατίθενται οι αντιδράσεις στήριξης στα τέσσερα βάθρα για τις τρεις τιμές της ελαστικής σταθεράς του εδάφους που προέκυψαν από την ανάλυση. Οι άξονες 1 και 3 καθορίζουν το επίπεδο ολίσθησης πάνω στο βάθρο και ο άξονας 2 είναι κάθετος στο επίπεδο ολίσθησης.

Για $K=5000 \text{ kN/m}^3$

Στήριξη στον κόμβο	Κατακόρυφη δύναμη kN	Ροπή αντίδρασης περί τον άξονα 1 kNm	Ροπή αντίδρασης περί τον άξονα 3 kNm
42	-0.98	0.034	46.6
46	31.4	0	44.7
54	31.0	0	-45.9
58	7.2	6.2	-9.7

Για $K=20000 \text{ kN/m}^3$

Στήριξη στον κόμβο	Κατακόρυφη δύναμη kN	Ροπή αντίδρασης περί τον άξονα 1 kNm	Ροπή αντίδρασης περί τον άξονα 3 kNm
42	-3.0	-0.044	52.8
46	31.4	0	44.7
54	31.0	0	-45.9
58	-0.06	7.3	-18.7

Για $K=40000 \text{ kN/m}^3$

Στήριξη στον Κόμβο	Κατακόρυφη δύναμη kN	Ροπή αντίδρασης περί τον άξονα 1 kNm	Ροπή αντίδρασης περί τον άξονα 3 kNm
42	-3.6	-0.08	54.0
46	31.4	0	44.6
54	30.9	0	-45.9
58	-6.3	7.8	-27.1

Οι αρνητικές αντιδράσεις στις στηρίξεις 42 και 58 δείχνουν την τάση του σωλήνα για ανασήκωμα.

Για $K=5000 \text{ kN/m}^3$

Μέγιστη τάση S11 = 29,49 MPa στο στοιχείο 32 στο σημείο 6
Μέγιστη τάση S22 = 58,90 MPa στο στοιχείο 18 στο σημείο 21
Μέγιστη τάση S12 = 02,80 MPa στο στοιχείο 13 στο σημείο 39
Μέγιστη τάση MISES = 52,24 MPa στο στοιχείο 18 στο σημείο 21

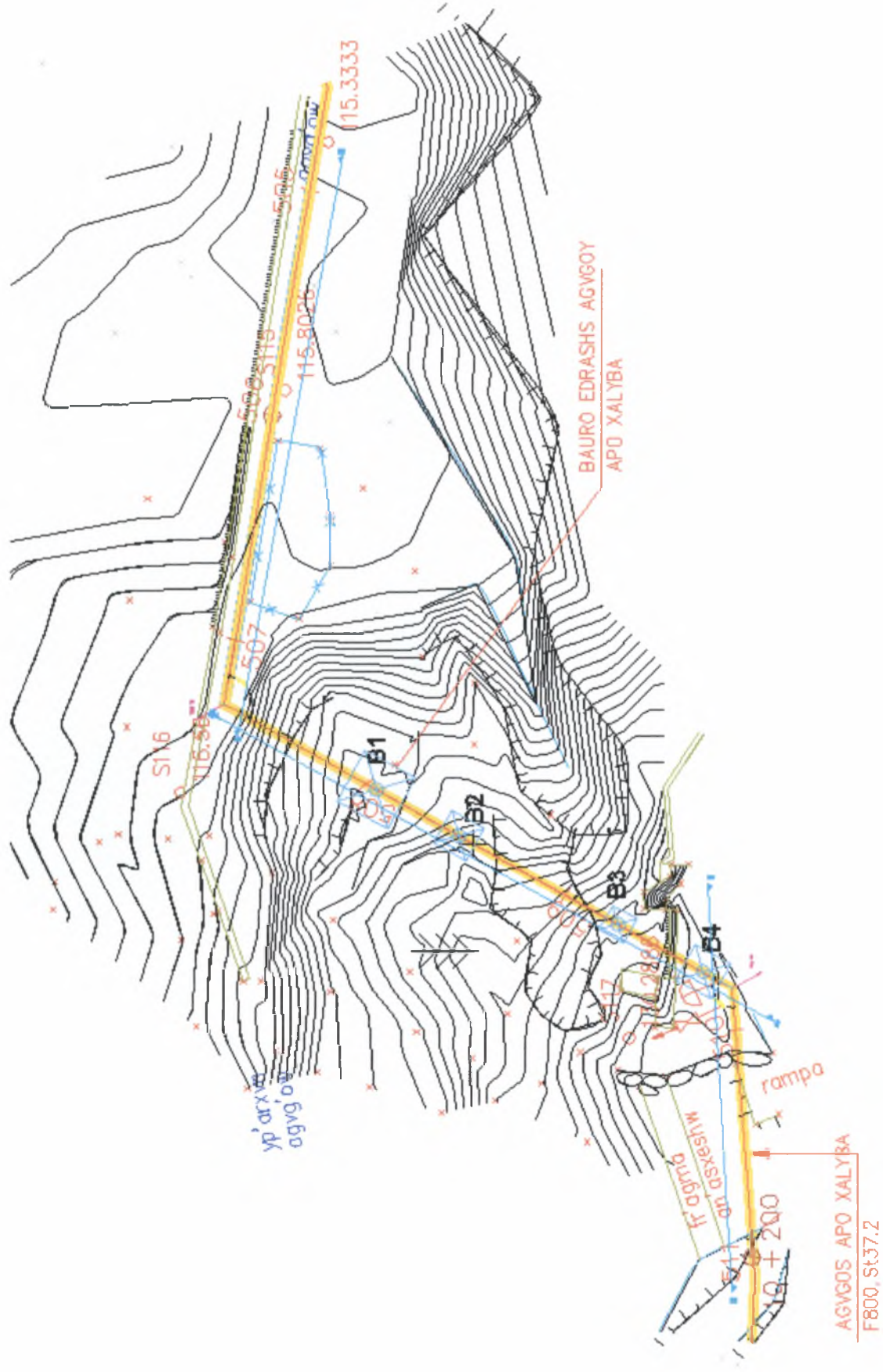
Για $K=20000 \text{ kN/m}^3$

Μέγιστη τάση S11 = 30,21 MPa στο στοιχείο 32 στο σημείο 6
Μέγιστη τάση S22 = 58,82 MPa στο στοιχείο 18 στο σημείο 21
Μέγιστη τάση S12 = 02,84 MPa στο στοιχείο 13 στο σημείο 39
Μέγιστη τάση MISES = 52,17 MPa στο στοιχείο 18 στο σημείο 21

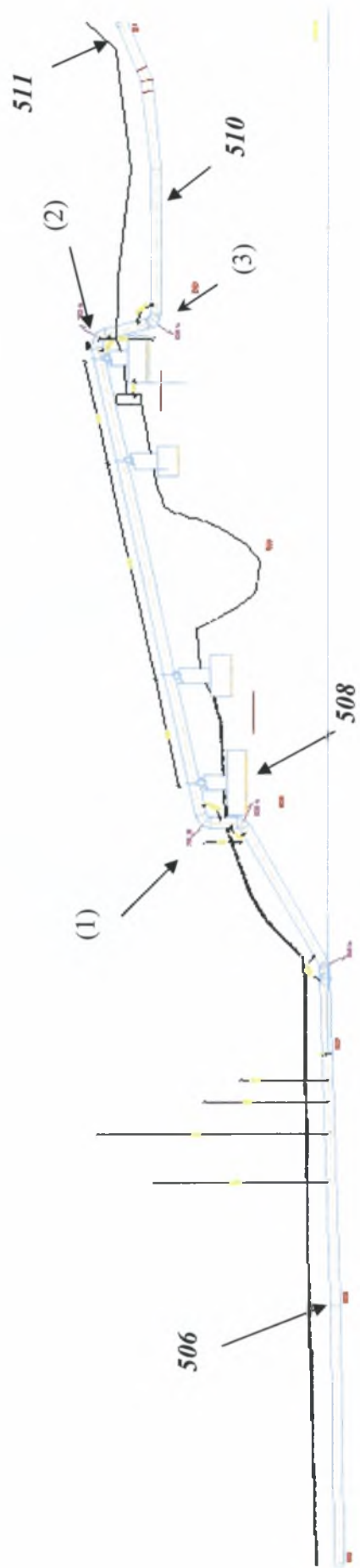
Για $K=40000 \text{ kN/m}^3$

Μέγιστη τάση S11 = 30,37 MPa στο στοιχείο 32 στο σημείο 6
Μέγιστη τάση S22 = 58,78 MPa στο στοιχείο 18 στο σημείο 21
Μέγιστη τάση S12 = 02,91 MPa στο στοιχείο 13 στο σημείο 39
Μέγιστη τάση MISES = 52,14 MPa στο στοιχείο 18 στο σημείο 21

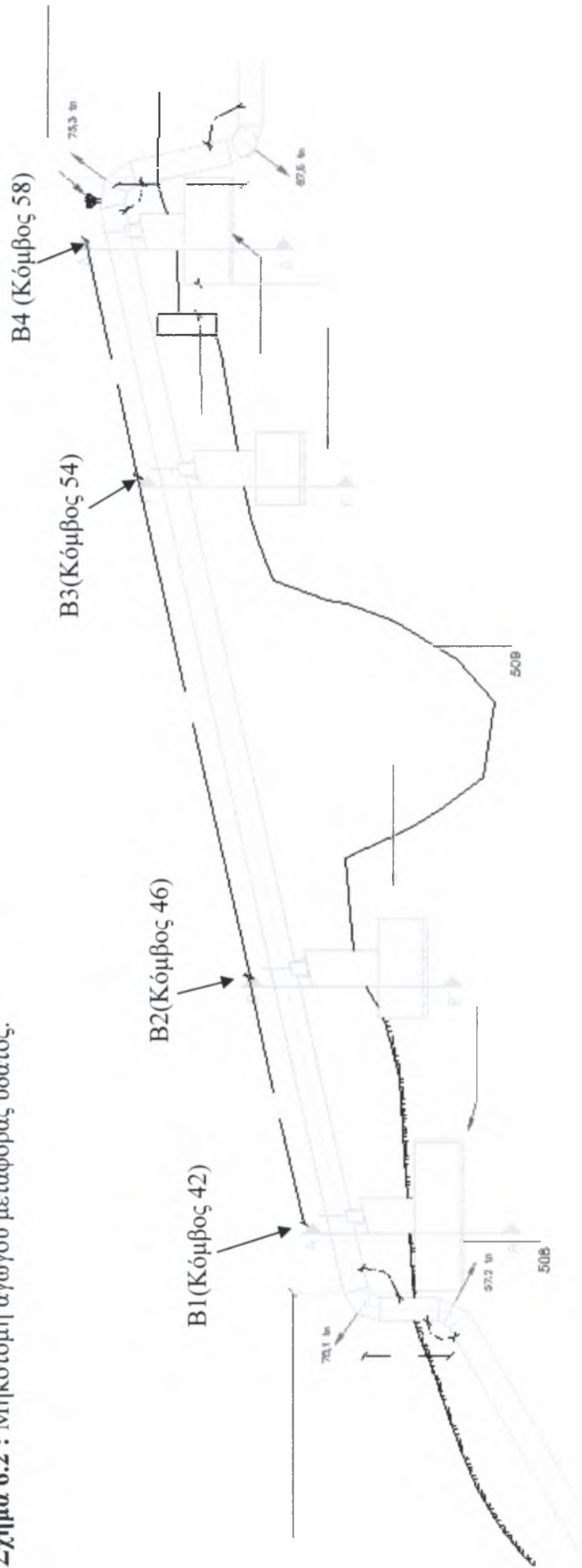
Η τάση von Mises είναι η ισοδύναμη τάση για τους ελέγχους έναντι της επιτρεπόμενης τάσης. Και στις τρεις περιπτώσεις, η μέγιστη τάση κατά von Mises είναι περίπου 52 MPa, σημαντικά μικρότερη της τάσης διαρροής σ_y , καθώς και της επιτρεπόμενης τάσης, η οποία λαμβάνεται ως $0.5 \times \sigma_y = 115 \text{ MPa}$. Επομένως ο αγωγός στο υπό εξέταση τμήμα είναι ασφαλής έναντι υπέρβασης της τάσης διαρροής.



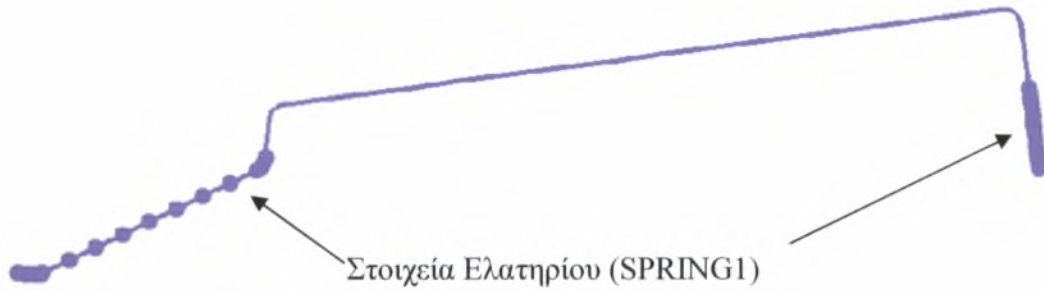
Σχήμα 6.1 : Οριζοντιογραφία αγωγού μεταφοράς ύδατος.



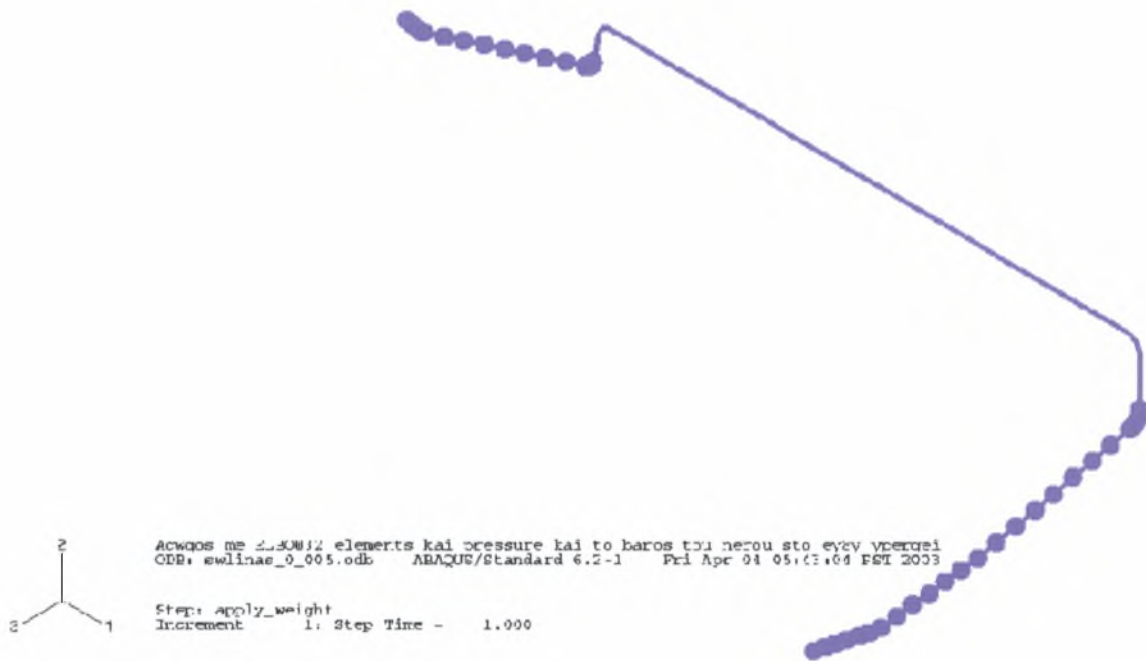
Σχήμα 6.2 : Μηκτομή αγωγού μεταφοράς ύδατος.



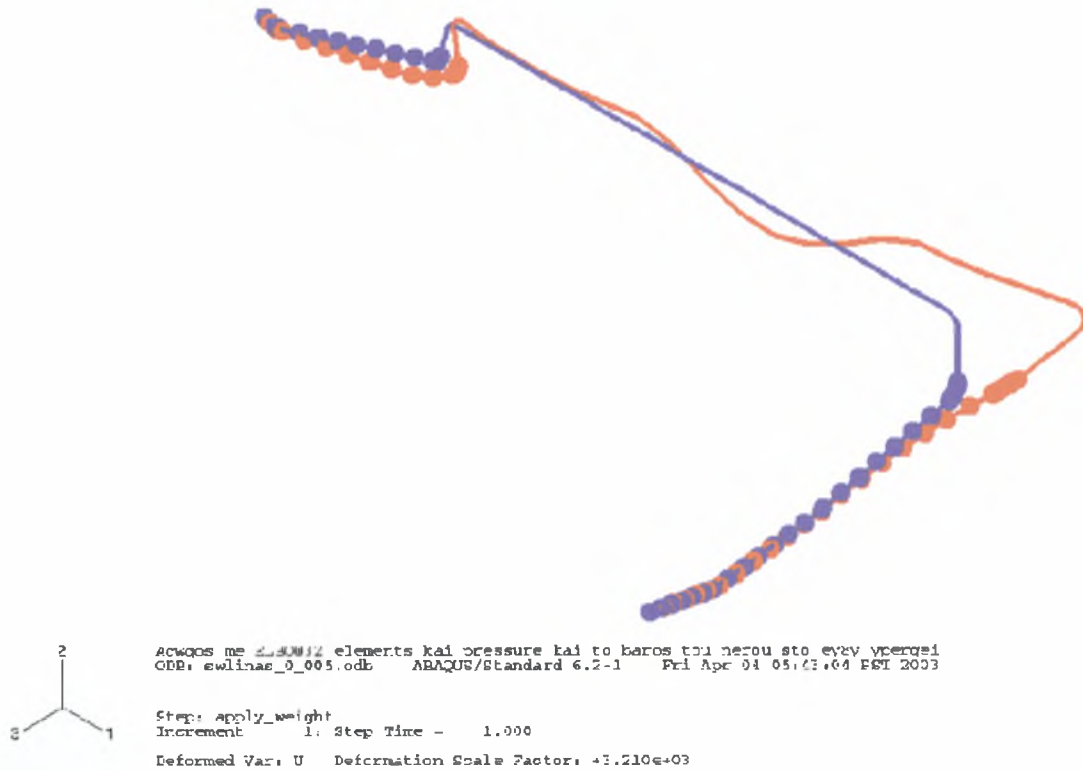
Σχήμα 6.3 : Λεπτομέρεια μηκτομής υπέργειου τμήματος. Με τα κεφαλαία γράμματα Α, Β, Γ, Δ δειχνονται οι στηρίξεις.



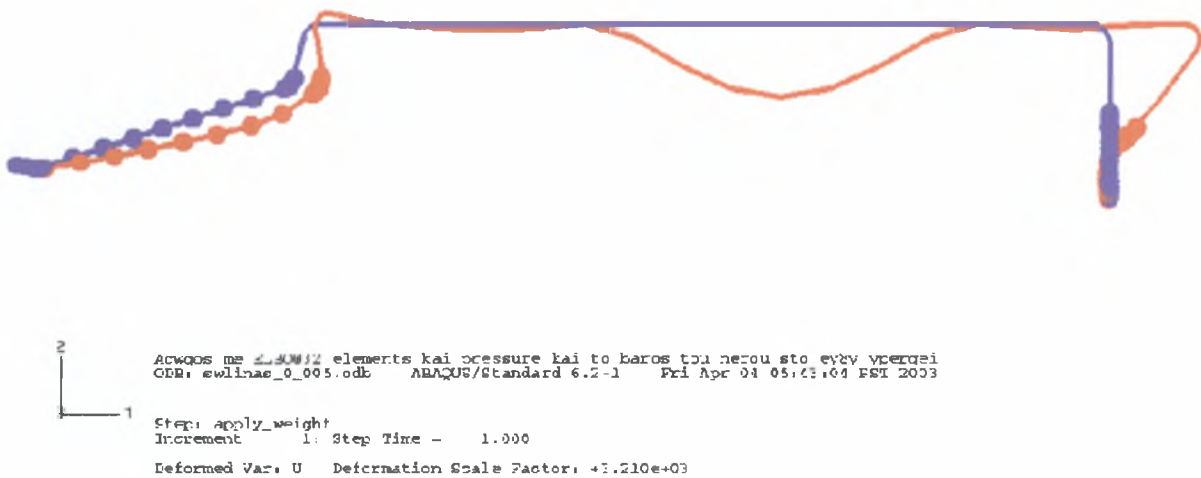
Σχήμα 6.4: Γενική διάταξη τμήματος αγωγού που προσομοιώθηκε με ELBOW32 στοιχεία για γενική ανάλυση τάσεων. Όψη παράλληλη με το επίπεδο του υπέργειου τμήματος.



Σχήμα 6.5: Γενική διάταξη τμήματος αγωγού που προσομοιώθηκε με ELBOW32 στοιχεία για γενική ανάλυση τάσεων. Όψη τρισδιάστατη.



Σχήμα 6.6: Παραμόρφωση αγωγού με ίδιο βάρος και εσωτερική πίεση 12 atm (τριδιάστατη όψη). Οι παραμορφώσεις έχουν μεγεθυνθεί σημαντικά.



Σχήμα 6.7 : Παραμόρφωση αγωγού με ίδιο βάρος και εσωτερική πίεση 12 atm (όψη επιπέδου υπέργειου τμήματος). Οι παραμορφώσεις έχουν μεγεθυνθεί σημαντικά.

6.4 Αποτελέσματα Τοπικής Ανάλυσης Κύρτωσης

Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα στροφής στο άκρο ροπής στο άκρο για το αριστερό υπέργειο καμπύλο τμήμα του οποίου η ακτίνα καμπυλότητας του άξονα είναι $R_L=793.5$ mm και γωνία α (γωνία μεταξύ των ευθύγραμμων τμημάτων) ίση με 102.7° , για το δεξί υπέργειο καμπύλο τμήμα οι αντίστοιχες διαστάσεις είναι $R_R=900$ mm και $\alpha=90^\circ$. Τέλος δίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα για το δεξί υπόγειο καμπύλο τμήμα που έχει διαστάσεις $R_{Ru}=793.5$ και γωνία $\alpha=102.7^\circ$.

Η καμπύλη ροπής - στροφής για το αριστερό και το δεξιά καμπύλο τμήμα του υπέργειου σωλήνα φαίνεται στα *σχήματα 6.8* και *6.9* αντίστοιχα. Η μέγιστη ροπή για εσωτερική πίεση 12 atm είναι της τάξης των 700 kNm για κάμψη στο επίπεδό τους.

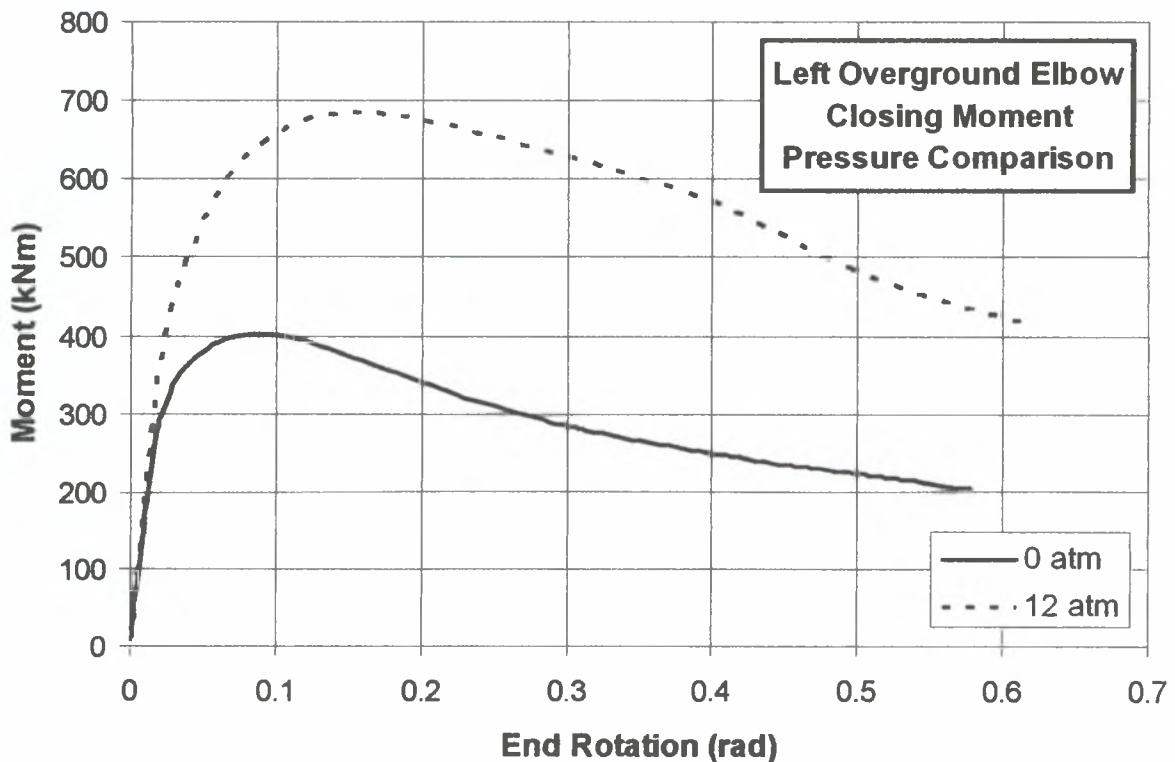
Στο *σχήμα 6.10* φαίνεται η καμπύλη ροπής - γωνίας στροφής για το καμπύλο τμήμα του δεξιά υπόγειου σωλήνα, το οποίο υπόκειται σε κάμψη εκτός επιπέδου (out-of-plane bending). Η μέγιστη ροπή είναι άνω των 1,000 kNm, δηλαδή πολύ μεγαλύτερη των λειτουργικών φορτίων.

Στο *σχήμα 6.11*, παρουσιάζεται το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων για το αριστερά τμήμα του υπέργειου τμήματος. Στα *σχήματα 6.12* και *6.13* φαίνεται η κατανομή της τάσης von Mises και της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης αντίστοιχα, του αριστερού τμήματος, στην πλήρως παραμορφωμένη κατάσταση, πέραν του ορίου αντοχής. Στο *σχήμα 6.14* παρουσιάζεται το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων για το δεξιά τμήμα του υπέργειου τμήματος. Στα *σχήματα 6.15* και *6.16* φαίνεται η κατανομή της τάσης von Mises και της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης αντίστοιχα στην πλήρως παραμορφωμένη κατάσταση, πέραν του ορίου αντοχής. Στο *σχήμα 6.17*, παρουσιάζεται η παραμόρφωση του υπόγειου δεξιά καμπύλου τμήματος υπό κάμψη εκτός επιπέδου, ενώ το *σχήμα 6.18* δείχνει την κατανομή της τάσης von Mises στην πλήρως παραμορφωμένη κατάσταση, πέραν του ορίου αντοχής.

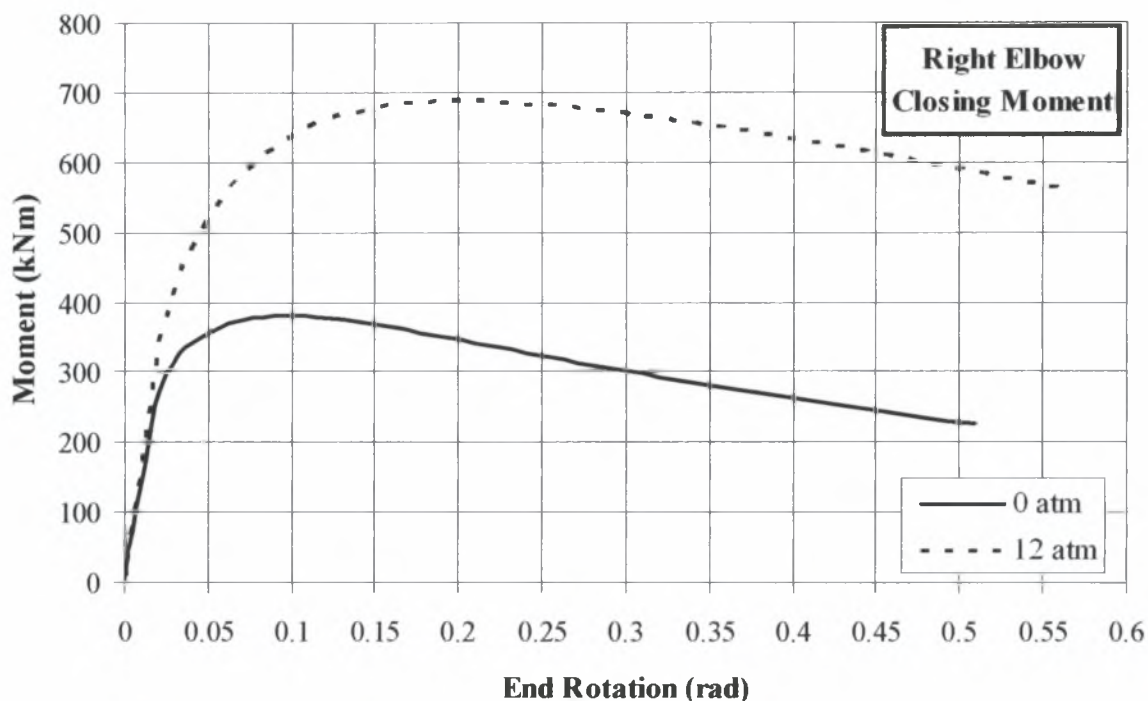
Τα αποτελέσματα της ελαστικής ανάλυσης δείχνουν ότι η μέγιστη ροπή που αναπτύσσεται στον αγωγό λόγω της συνδυασμένης καταπόνησης κάμψης και εσωτερικής πίεσης είναι μικρότερη των 60 kNm. Αυτό σημαίνει πως ο αγωγός είναι ασφαλής έναντι κύρτωσης για την συγκεκριμένη καταπόνηση, καθώς σε κάθε περίπτωση τα οριακά φορτία που προέκυψαν είναι πολύ μεγαλύτερα από τα λειτουργικά.

Παράλληλα θα ήταν σκόπιμο να γίνει μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης κύρτωσης με τα αποτελέσματα του 5^{ου} κεφαλαίου. Αρχικά πρέπει να παρατηρηθεί

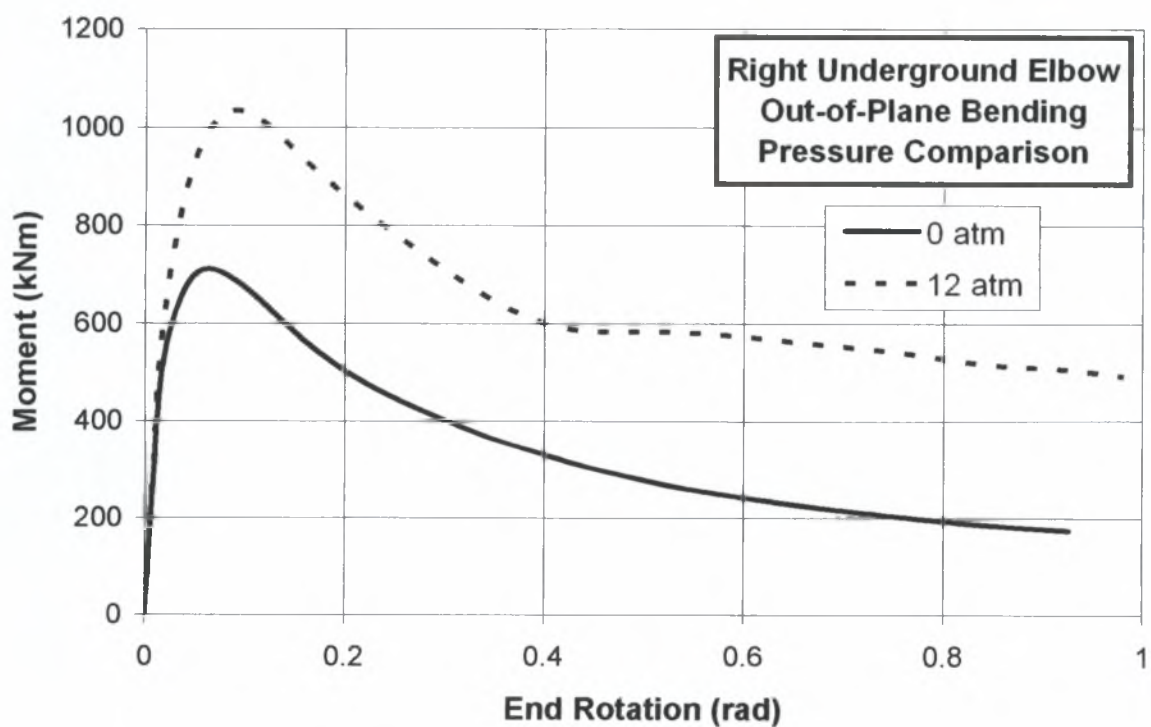
ότι το υλικό του αγωγού της Λαμίας είναι χάλυβας μικρότερης αντοχής από το υλικό των δοκιμών του κεφαλαίου 5. Αυτό σημαίνει ότι τα δοκίμια Elbow μένουν περισσότερο χρόνο στην ελαστική περιοχή και συνεπώς τα αποτελέσματα για το ροπή για την ίδια στροφή αναμένονται να είναι πιο μεγάλα κάτι που εν γένει παρατηρείται και από τα παρακάτω. Από τον *τύπο 2.1* προκύπτει ότι η πίεση πλήρους πλαστικότητας είναι περίπου $P_y = 7.34$ MPa και συνεπώς ο λόγος P/P_y για πίεση 12 atm είναι 0.17. Επίσης η πλαστική ροπή από τον *τύπο 5.1* είναι $M_p = 1882$ kNm και ο λόγος $D/t = 65$. Συνεπώς θα μπορούσε να συγκριθεί ποιοτικά με τα αποτελέσματα του Elbow II για θετική κάμψη και εσωτερική πίεση 20% της P_y . Στην προκειμένη περίπτωση βλέπουμε την σαφέστατη θετική επιρροή της πίεσης από το σχήμα 6.11 ενώ ο μέγιστος λόγος $M/M_p = 0.35$ σε αντίθεση με το 0.6 περίπου του Elbow II για περίπου τα ίδια επίπεδα ανηγμένης πίεσης (M.O. 0.185). Αντίστοιχα συμπεράσματα βγαίνουν και για μηδενική εσωτερική πίεση καθώς για τον αγωγό της Λαμίας ο λόγος M/M_p είναι περίπου ίσος με 0.2 ενώ στο Elbow II ίσος με 0.3. Γενικά διακρίνεται μια συμβατή συμπεριφορά.



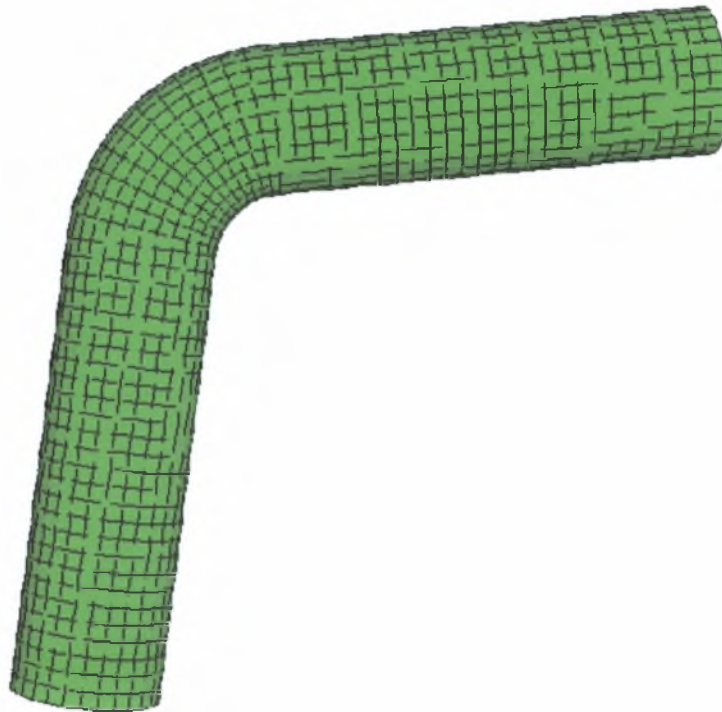
Σχήμα 6.8 : Διάγραμμα Στροφής – Ροπής του αριστερού υπέργειου καμπύλου τμήματος (1) (σχήμα 6.2). Θετική κάμψη και εσωτερική πίεση 0 atm και 12 atm.



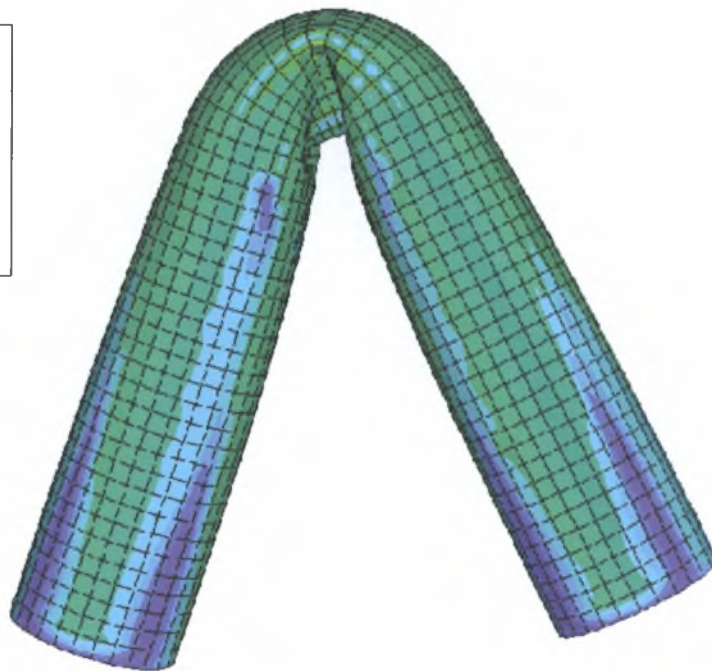
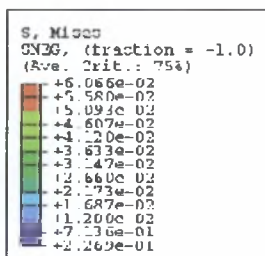
Σχήμα 6.9: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων στροφής – ροπής του δεξιού υπέργειου καμπύλου τμήματος (2) (σχήμα 6.2). Θετική κάμψη και εσωτερική πίεση 0 και 12 atm.



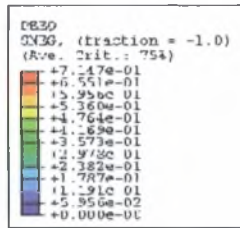
Σχήμα 6.10 : Διάγραμμα Στροφής – Ροπής του δεξιού υπόγειου καμπύλου τμήματος (3) (σχήμα 6.2). Αντιεπίπεδη κάμψη και εσωτερική πίεση 0 atm και 12 atm.



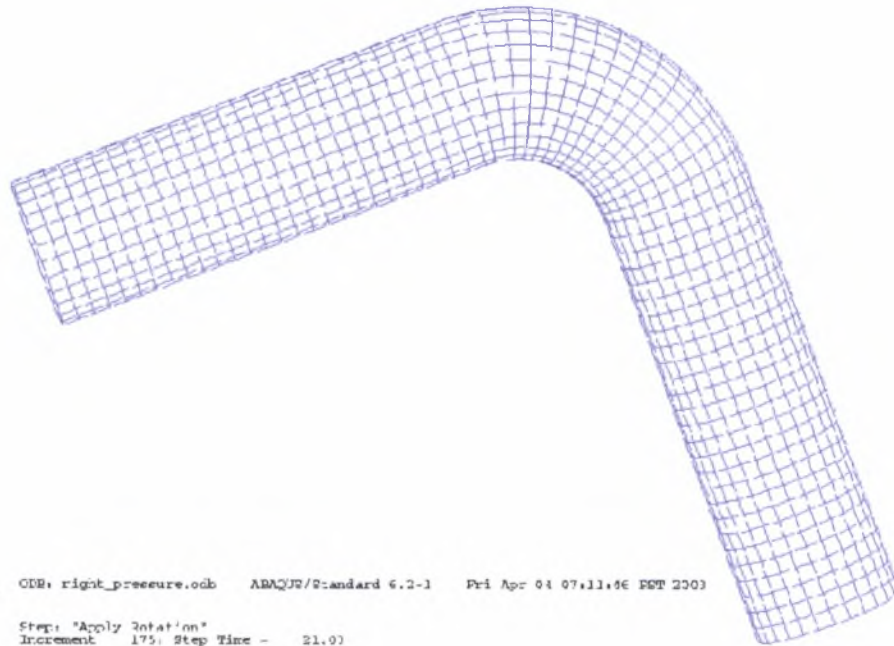
Σχήμα 6.11 : Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους στο αριστερό καμπύλο τμήμα του υπέργειου σωλήνα. Κάμψη στο επίπεδο του καμπύλου τμήματος.



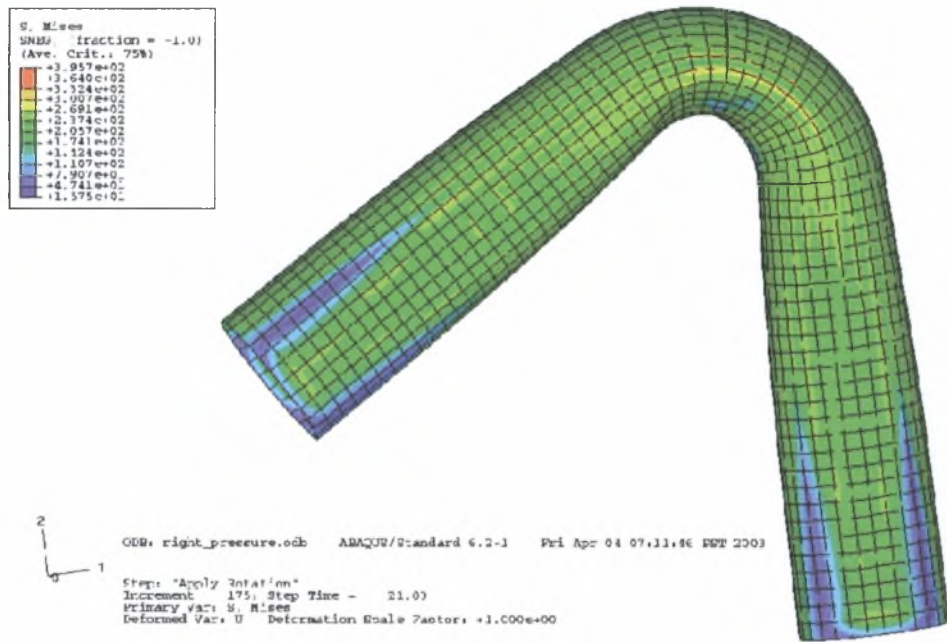
Σχήμα 6.12 : Πλήρως παραμορφωμένη κατάσταση στο αριστερό καμπύλο τμήμα του υπέργειου σωλήνα (πέραν της οριακής αντοχής του). Κάμψη στο επίπεδο του καμπύλου τμήματος και πίεση 12 atm. Κατανομή τάσεων von Mises.



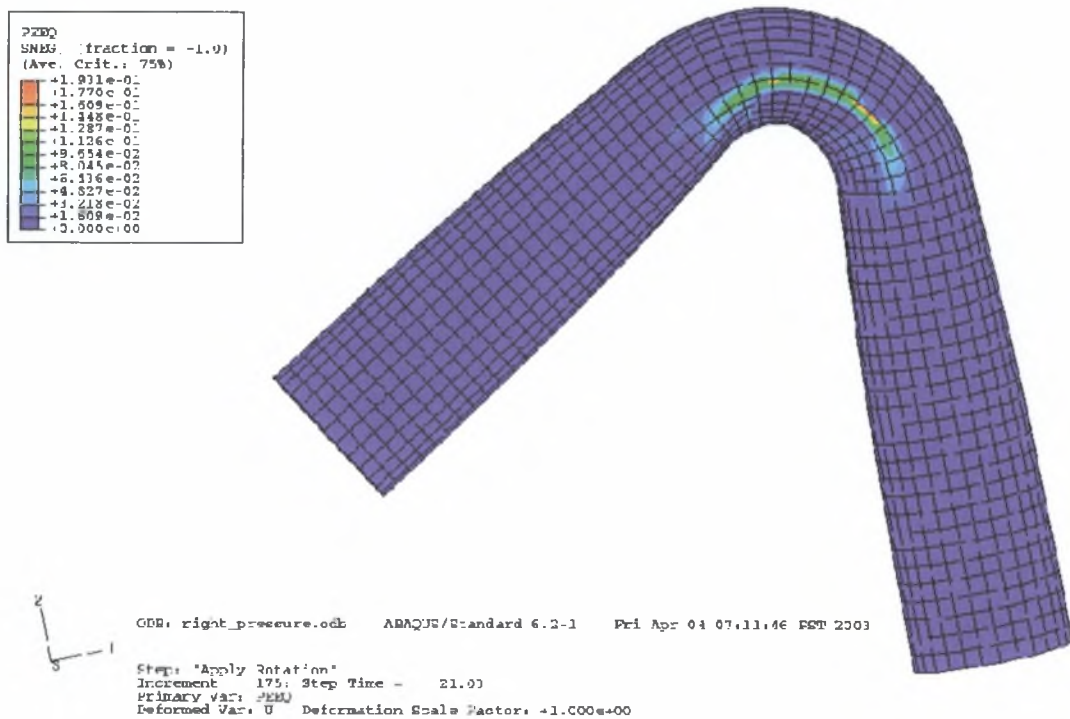
Σχήμα 6.13: Πλήρως παραμορφωμένη κατάσταση στο αριστερό καμπύλο τμήμα του υπέργειου σωλήνα (πέραν της οριακής αντοχής του). Κάμψη στο επίπεδο του καμπύλου τμήματος και πίεση 12 atm. Κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης.



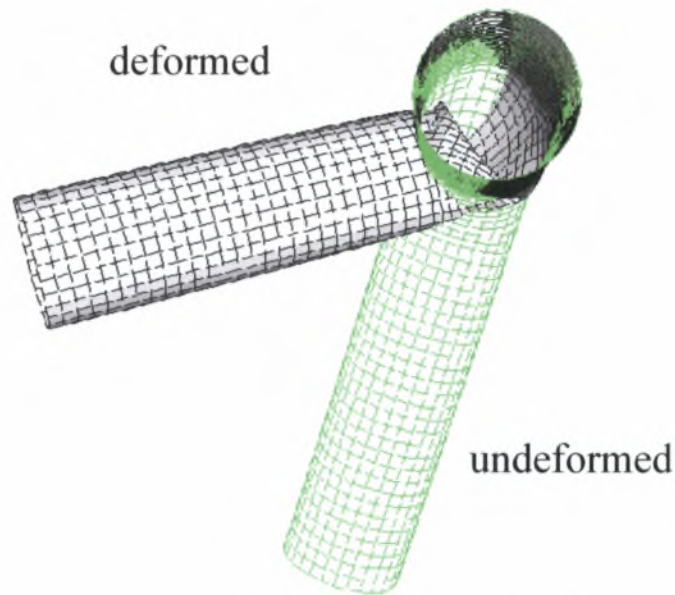
Σχήμα 6.14: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους στο δεξί καμπύλο τμήμα του υπέργειου σωλήνα. Κάμψη στο επίπεδο του καμπύλου τμήματος.



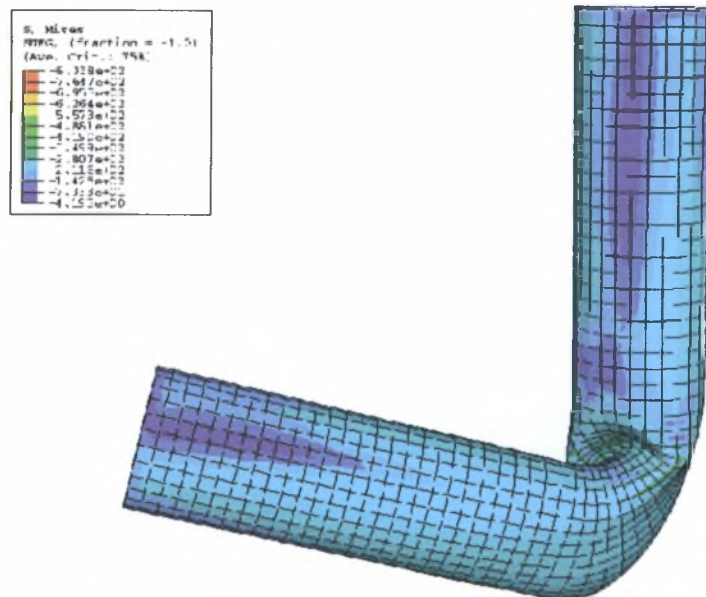
Σχήμα 6.15: Πλήρως παραμορφωμένη κατάσταση στο δεξί καμπύλο τμήμα του υπέργειου σωλήνα (πέραν της οριακής αντοχής του). Κάμψη στο επίπεδο του καμπύλου τμήματος και πίεση 12 atm. Κατανομή τάσεων von Mises.



Σχήμα 6.16: Πλήρως παραμορφωμένη κατάσταση στο δεξί καμπύλο τμήμα του υπέργειου σωλήνα (πέραν της οριακής αντοχής του). Κάμψη στο επίπεδο του καμπύλου τμήματος και πίεση 12 atm. Κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 6.17 : Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους στο δεξί καμπύλο τμήμα του υπόγειου σωλήνα. Κάμψη εκτός του επιπέδου του καμπύλου τμήματος



Σχήμα 6.18: Πλήρως παραμορφωμένη κατάσταση στο δεξί καμπύλο τμήμα του υπόγειου σωλήνα (πέραν της οριακής αντοχής του). Κάμψη εκτός του επιπέδου του καμπύλου τμήματος και πίεση 12 atm. Κατανομή τάσης von Mises.

Κεφάλαιο 7 - Βιβλιογραφία

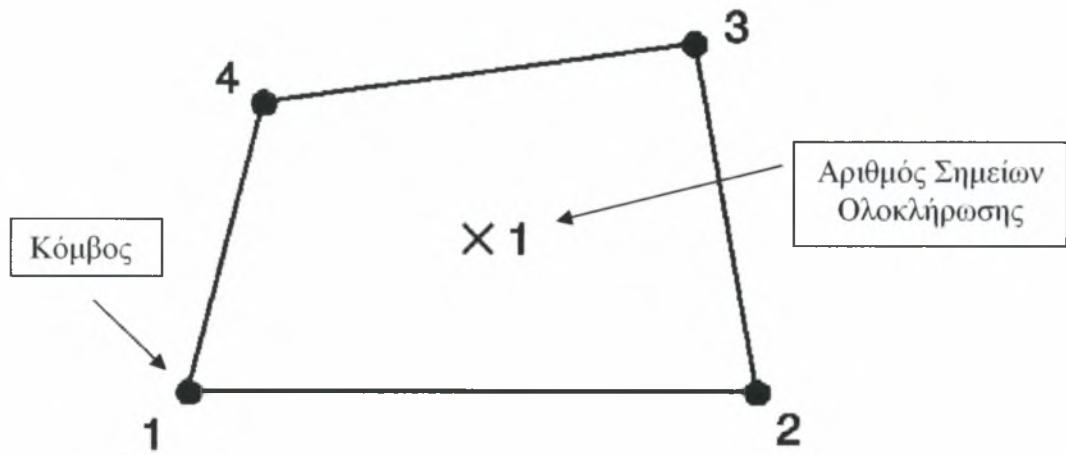
- [1] Von Karman, Th., 1911, “Über die formänderung dünnwandiger Rohre, insbesondere federnder Ausgleichrohre“, Z. Ver. Deutsch. Ingen., 55, pp. 1889-1895.
- [2] Vigness , I., 1943, ”Elastic Properties Of Curved Tubes”, Trans, ASME, 65, pp 105-120
- [3] Pardue, T.E. and Vigness J., 1951. *Properties of Thin-Walled Curved Tubes of Short-Bend Radius*, Transactions of the ASME, Vol. 73, 77-87.
- [4] Gross, N., 1952. *Experiments on Short-radius Pipe-bends*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (B), Vol. 1B, 465-479.
- [5] Gross, N. and Ford, H., 1952. *The Flexibility of Short-radius Pipe-bends*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (B), Vol. 1B, 480-491.
- [6] Rodabaugh, E. C., and George, H. H., 1957. *Effect of internal pressure on the flexibility and stress intensification factors of curved pipe or welding elbows*, Transactions of the ASME Vol. 79, 939-948
- [7] American Society of Mechanical Engineers, 1993, *Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping*, ASME 31.3, 1993 Edition, New York, NY.
- [8] Marcal, P. V., 1967, “Elastic-Plastic behavior of Pipe Bends with In-plane Bending”, *J. Strain Analysis*, Vol. 2, No. 1, pp. 84-90
- [9] Sobel, L. H., 1977. *In-Plane Bending of Elbows*, Computers & Structures, 7, 701-715.
- [10] Ohstubo, H. and Watanabe, O., 1978, “Stress Analysis of Pipe Bends by Ring Elements”, *J. Pressure Vessel Technology*, ASME, Vol. 100, pp. 112-122.
- [11] Bathe, K.-J. and Almeida, C. A., 1980, “A Simple and Effective Pipe Elbow Element”, *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol. 47, pp. 93-100
- [12] Millittelo, C. and Huespe, A. E., 1988, “A displacement-based pipe elbow element”, *Computers and Structures*, Vol. 29, No.2, pp. 339-343.
- [13] Yan, A. M., Jospin, R. J. and Nguyen, D. H., 1999, “An enhanced pipe elbow element – Application in plastic limit analysis of pipe structures”, *International Journal For Numerical Methods in Engineering*, Vol. 46, pp. 409-431.
- [14] Hibbit,H.D.,Karlsson,B.I., and Sorensen, 2001, Theory Manual, ABAQUS, version 6.2.
- [15] Sobel, L. H. and Newman, S. Z., 1980, “Comparison of Experimental and Simplified Analytical Results for the In-Plane Plastic Bending and Buckling of an Elbow”, *J. Pressure Vessel Technology*, ASME, Vol. 102, pp. 400-409.
- [16] Sobel, L. H. and Newman, S. Z., 1986, “Simplified, Detailed and Isochronous Analysis and Test Results for the In-Plane Elastic-Plastic and Creep Behavior of an Elbow”, *J. Pressure Vessel Technology*, ASME, Vol. 108, pp. 297-304.

- [17] Dhalla, A. K., 1987, "Collapse Characteristics of a Thin-Walled Elbow", *J. Pressure Vessel Technology*, ASME, Vol. 109, pp. 394-401.
- [18] Gresnigt, A. M. et al., 1985. PROEFRESULTATEN VAN PROVEN OP GLADDE BOCHTEN EN VERGELIJKING DAARVAN MET DE IN OPL 85-333 GEGEVEN REKENREGELS. Report OPL 85-334, IBBC-TNO, Delft, The Netherlands.
- [19] Suzuki, N. and Nasu, M., 1989, "Non-Linear Analysis of Welded Elbows Subjected to In-Plane bending", *Computers and Structures*, Vol. 32, No.3/4, pp. 871-881.
- [20] Tan, Y., Matzen, V. C. and Yu, L., 2000, "Correlation of Test and FEA Results for the Nonlinear Behavior of Elbows", *Pressure Vessels and Piping Codes and Standards, PVP-Vol. 407*, PVP Conference, pp. 307-314.
- [21] Hilsenkopf, P., Boneh, B. and Sollogoub, P., 1988, "Experimental Study of Behavior and Functional Capability of Ferritic Steel Elbows and Austenitic Stainless Steel Thin-Walled Elbows". *Int. J. Pressure Vessels and Piping*, Vol. 33, pp. 111-128.
- [22] Mourad , H. M. and Younan, M. Y. A., 2000, *The Effect Of Modeling Parameters on the Predicted Limit Loads for Pipe Bends Subjected to Out-of-Plane Moment Loading and Internal Pressure*, Transactions Of the ASME, 122, pp 450-456
- [23] Mourad , H. M. and Younan, M. Y. A., 2002, *Limit-Load Analysis of Pipe Bends Under Out-of-Plane Moment Loading and Internal Pressure*, Transactions Of the ASME 124, pp 32-37
- [24] Gresnigt, A. M. and van Foeken, 1995, "Strength and Deformation Capacity of Bends in Pipelines", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 5, No. 4, pp. 294-307
- [25] Gresnigt, A. M. 1986, "Plastic Design of Buried Steel Pipelines in Settlement Areas", *Heron*, Vol. 31, No. 4, Delft, The Netherlands.
- [26] Shalaby, M. A. and Younan, M. Y. A., 1998, "Limit Loads for Pipe Elbows with Internal Pressure Under In-plane Closing Bending Moments", *J. Pressure Vessel Technology*, ASME, Vol. 120, pp. 35-42.
- [27] Shalaby, M. A. and Younan, M. Y. A., 1999, "Effect of Internal Pressure on Elastic-Plastic Behavior of Pipe Elbows Under In-plane Opening Bending Moments", *J. Pressure Vessel Technology*, ASME, Vol. 121, pp. 400-405
- [28] Chattopadhyay J., Nathani, D. K., Dutta, B. K. and Kushwaha, H. S., 2000, "Closed-Form Collapse Moment Equations of Elbows Under Combined Internal Pressure and In-plane Bending Moment", *J. Pressure Vessel Technology*, ASME, Vol. 122, pp. 431-436.
- [29] Chattopadhyay J., 2002, "The effect of internal pressure on in plane collapse moment of elbows", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 212, pp 133-144

- [30] Γιακουμάτος Ε., 2002, «ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΩΛΗΝΩΤΩΝ ΜΕΛΩΝ ΥΠΟ ΚΑΜΨΗ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- [31] Seide, P. and Weingarten V. I., 1961. "On the buckling of Circular Cylindrical Shells Under Pure Bending.", *J. Applied Mechanics*, ASME, Vol. 28, pp. 112-116
- [32] Aksel'rad (Axelrad), E. L., 1965. "Refinement of buckling-load analysis for tube flexure by way of considering precritical deformation." [in Russian]. *Izvestiya Akademii Nauk USSR, Otdelenie Tekhnichskikh Nauk, mekhanika mashinostroenie*, Vol. 4, pp. 33-139
- [33] Karamanos S. A., 2002, "Bending Instabilities of Elastic Tubes", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 39, No. 8, pp 2059-2085
- [34] Karamanos S. A., Giakoumatos E., Gresnigt, "Nonlinear Response and failure of Steel Elbows Under In-Plane Bending and Pressure", ASME, JPVT
- [35] Donnell, L. H. and Wan, C. C., 1950, "Effects of Imperfections on Buckling of Thin Cylinders and Columns Under Axial Compression", *J. Applied Mechanics*, ASME, Vol. 17, pp. 73-80.
- [36] Gerard, G., 1956, "Compressive and Torsional Buckling of Thin Walled Cylinders in Yield Region", *NACA*, Technical Note 3726.
- [37] Brush, D. O. and Almoroth, B. O., 1975. *Buckling of Bars, Plates and Shells*, McGraw-Hill.

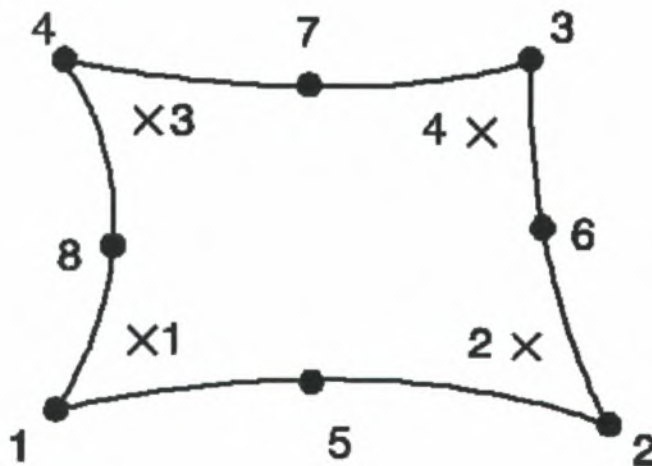
Κεφάλαιο 8 - Παράρτημα

Πεπερασμένα Στοιχεία που Χρησιμοποιήθηκαν στις Αναλύσεις της Παρούσας Εργασίας



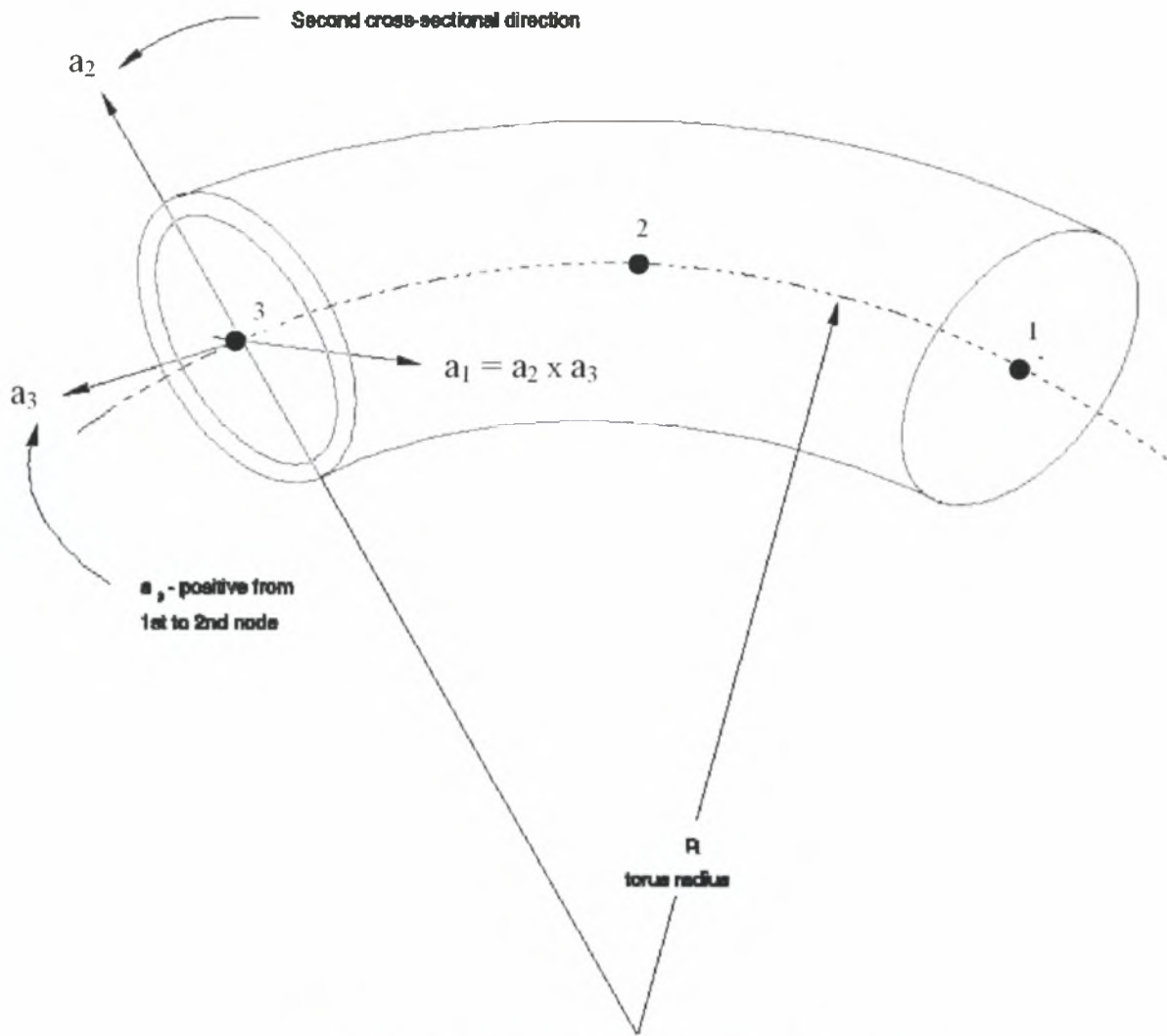
4-node reduced
integration element

Σχήμα 8.1 : Πεπερασμένο στοιχείο S4R.

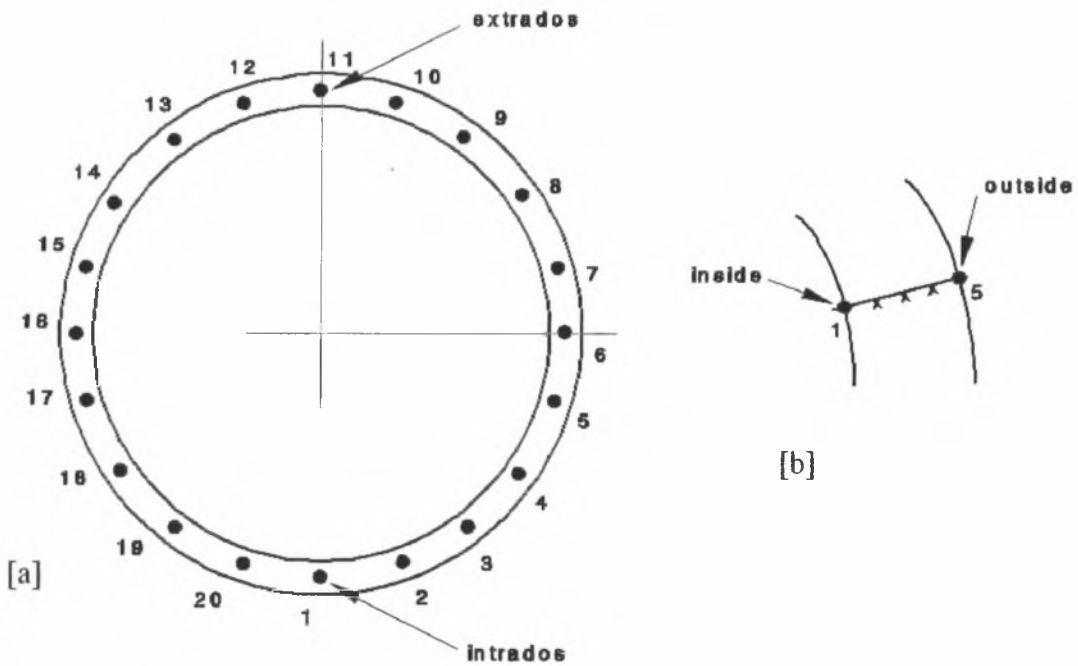


8-node reduced
integration element

Σχήμα 8.2 : Πεπερασμένο στοιχείο S8R5 και S8R.



Σχήμα 8.3 : Αρίθμηση κόμβων στο στοιχείο ELBOW32



Σχήμα 8.4 : Αρίθμηση σημείων ολοκλήρωσης ELBOW32 [a] περιμετρικά και [b] κατά τη διεύθυνση του πάχους.

