



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΓΩΓΩΝ
ΜΟΡΦΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ**

υπό

ΣΤΕΦΑΝΙΑ ΤΣΕΤΣΕΝΗ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2005



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

Αριθ. Εισ.: 4536/1
Ημερ. Εισ.: 15-07-2005
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2005
ΤΣΕ

© 2005 Στεφάνια Τσετσένη

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

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

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Αράβας
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

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

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Σπύρο Καραμάνο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμον στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κ. Νίκο Αράβα και Γρηγόρη Χαιδεμενόπουλο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμον στους γονείς μου, Χρήστο και Ελένη Τσετσένη για την ανιδιοτελή αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια, στους οποίους και αφιερώνω αυτή την εργασία.

Στεφανία Τσετσένη

ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΜΟΡΦΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

ΣΤΕΦΑΝΙΑ ΤΣΕΤΣΕΝΗ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2005

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την αντοχή συγκολλητών συνδέσεων αγωγών μορφής ολίσθησης, υπό αξονικές, θλιπτικές φορτίσεις. Η ανάλυση έγινε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και χρησιμοποιήθηκε το πακέτο λογισμικού ABAQUS.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται κάποια γενικά στοιχεία για τη συγκόλληση μορφής ολίσθησης και την ευαισθησία που παρουσιάζουν οι συνδέσεις αυτής της μορφής σε αξονική φόρτιση, καθώς επίσης και οι βασικές μέθοδοι διαμόρφωσης των αγωγών ούτως ώστε να συνδεθούν με την εν λόγω μορφή συγκόλλησης. Επίσης, γίνεται ανασκόπηση προηγούμενων σχετικών εργασιών και αναφορά του αντικειμένου της παρούσας μελέτης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα του προκαταρκτικού σταδίου της μελέτης, περιγράφεται η διεξαγωγή δύο εργαστηριακών πειραμάτων, καθώς επίσης και η προσομοίωση τους με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη και γίνεται σύγκριση των πειραματικών με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Επίσης εξετάζεται η επιρροή της σύνδεσης και της αντίστοιχης κατεργασίας στην αντοχή των υπόψη κελυφών.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθενται αρχικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συνδέσεων που εξετάζονται κατά την εκπόνηση της παραμετρικής μελέτης, οι παράμετροι που θεωρήθηκαν για τη διεξαγωγή της, οι ιδιότητες του υλικού των κελυφών, τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του πλέγματος, τα βήματα της ανάλυσης και οι συνοριακές συνθήκες που θεωρήθηκαν. Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης και εξάγονται συμπεράσματα για την επιρροή κάθε παραμέτρου στην αντοχή των υπόψη κελυφών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης με αναλυτικές εκφράσεις και η εργασία κλείνει με την έκθεση των εξαγόμενων γενικών συμπερασμάτων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Γενικά.....	1
1.2 Ανασκόπηση προηγούμενων εργασιών.....	3
1.3 Αντικείμενο της μελέτης.....	4

Κεφάλαιο 2 : Περιγραφή πειραμάτων, προσομοίωσής τους και σύγκριση των αποτελεσμάτων

2.1 Εισαγωγή.....	6
2.2 Προκαταρκτικό στάδιο μελέτης.....	6
2.3 Περιγραφή πειραμάτων.....	13
2.3.1 Πείραμα 1.....	13
2.3.2 Πείραμα 2.....	16
2.4 Προσομοίωση πειραμάτων και σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.....	19
2.4.1 Προσομοίωση πειράματος 1.....	19
2.4.2 Προσομοίωση πειράματος 2.....	23
2.5 Επιρροή της σύνδεσης και της αντίστοιχης κατεργασίας στην αντοχή του κελύφους.....	27
2.5.1 Πρώτη ομάδα σωλήνων (με $D/t = 95$).....	27
2.5.2 Δεύτερη ομάδα σωλήνων (με $D/t = 47.7$).....	30

Κεφάλαιο 3 : Παραμετρική μελέτη για την αντοχή του κελύφους

3.1 Εισαγωγή.....	34
3.2 Προσομοίωση.....	34
3.3 Επιρροή του λόγου διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος (D/t).....	40
3.3.1 Σύνδεση αγωγών, με εξωτερική συγκόλληση.....	40
3.3.2 Σύνδεση αγωγών, με εσωτερική συγκόλληση.....	44

3.3.3	Σύνδεση αγωγών, με διπλή συγκόλληση.....	47
3.4	Επιρροή του λόγου εκκεντρότητας προς πάχος τοιχώματος (e/t).....	51
3.4.1	Σύνδεση αγωγών, με εξωτερική συγκόλληση.....	51
3.4.1.1	Πρώτη υποομάδα σωλήνων (με $D/t = 95$).....	51
3.4.1.2	Δεύτερη υποομάδα σωλήνων (με $D/t = 61$).....	54
3.4.1.3	Τρίτη υποομάδα σωλήνων (με $D/t = 47.7$).....	57
3.4.2	Σύνδεση αγωγών, με εσωτερική συγκόλληση.....	60
3.4.3	Σύνδεση αγωγών, με διπλή συγκόλληση.....	63
3.5	Επιρροή του λόγου μήκους τμήματος με μεταβλητή καμπυλότητα προς πάχος τοιχώματος (L_b/t)	67
3.5.1	Σύνδεση αγωγών, με εξωτερική συγκόλληση.....	67
3.5.1.1	Πρώτη υποομάδα σωλήνων (με $D/t = 95$).....	67
3.5.1.2	Δεύτερη υποομάδα σωλήνων (με $D/t = 61$).....	70
3.5.1.3	Τρίτη υποομάδα σωλήνων (με $D/t = 47.7$).....	72
3.5.2	Σύνδεση αγωγών, με εσωτερική συγκόλληση.....	74
3.5.2.1	Πρώτη υποομάδα (για κελύφη με $e/t = 1.31$).....	75
3.5.2.2	Δεύτερη υποομάδα (για κελύφη με $e/t = 1.47$).....	78
3.5.2.3	Τρίτη υποομάδα (για κελύφη με $e/t = 1.62$).....	80
3.6	Επιρροή του τύπου της συγκόλλησης.....	83
3.5.1	Συνδέσεις αγωγών με $D/t = 95$, $e/t = 1.47$, $L_b/t=12$	83
3.5.2	Συνδέσεις αγωγών με $D/t = 47.7$, $e/t = 1.47$, $L_b/t=12$	87
3.7	Επιρροή της εσωτερικής πίεσης.....	91
3.7.1	Σύνδεση αγωγών, με εξωτερική συγκόλληση.....	91
3.7.1.1	Πρώτη υποομάδα (για κελύφη με $D/t = 95$).....	91
3.7.1.2	Δεύτερη υποομάδα (για κελύφη με $D/t = 47.7$).....	94

3.7.2 Σύνδεση αγωγών, με εσωτερική συγκόλληση.....	97
3.7.2.1 Πρώτη υποομάδα (για κελύφη με $D/t = 95$).....	97
3.7.2.2 Δεύτερη υποομάδα (για κελύφη με $D/t = 47.7$).....	100
3.7.3 Σύνδεση αγωγών, με διπλή συγκόλληση.....	104
3.7.3.1 Πρώτη υποομάδα (για κελύφη με $D/t = 95$).....	105
3.7.3.2 Δεύτερη υποομάδα (για κελύφη με $D/t = 47.7$).....	109
3.8 Επιρροή του μήκους L_s	113
<u>Κεφάλαιο 4 : Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων μελέτης με αναλυτικές εκφράσεις</u>	
4.1 Ελαστική ανάλυση τάσεων.....	116
4.2 Ελαστοπλαστική ανάλυση τάσεων.....	117
4.3 Σύγκριση πειραματικών με αριθμητικά και αναλυτικά αποτελέσματα.....	121
Συμπεράσματα.....	124
Βιβλιογραφία.....	126

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

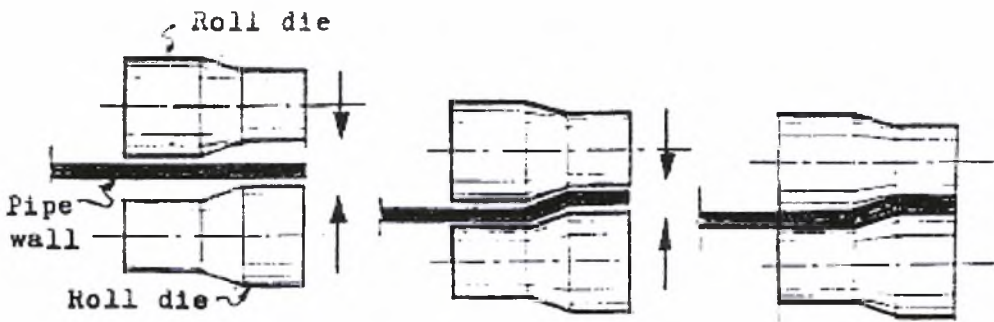
1.1 Γενικά

Χαλύβδινες σωληνώσεις χρησιμοποιούνται για την κατασκευή υπόγειων δικτύων ύδρευσης υψηλών πιέσεων. Οι σωλήνες συχνά υπόκεινται σε μεγάλες μετατοπίσεις οι οποίες προκαλούνται από εδαφικές παραμορφώσεις λόγω σεισμικών δονήσεων ή άλλου τύπου. Ένα σημαντικό ευαίσθητο σημείο είναι η σύνδεση των διαδοχικών μεταλλικών αγωγών. Μία ευρέως διαδεδομένη μέθοδος σύνδεσης των αγωγών είναι η συγκόλληση μορφής ολίσθησης, η οποία επιτυγχάνεται με την κατάλληλη διαμόρφωση του ενός άκρου κάθε αγωγού που του αποδίδει τη μορφή «καμπάνας», την τοποθέτηση των διαδοχικών αγωγών ώστε στο διαμορφωμένο άκρο του ενός να εισέρχεται το αντίστοιχο κυλινδρικό άκρο του γειτονικού του και τέλος την περιφερειακή συγκόλλησή τους (εσωτερική ή/και εξωτερική).

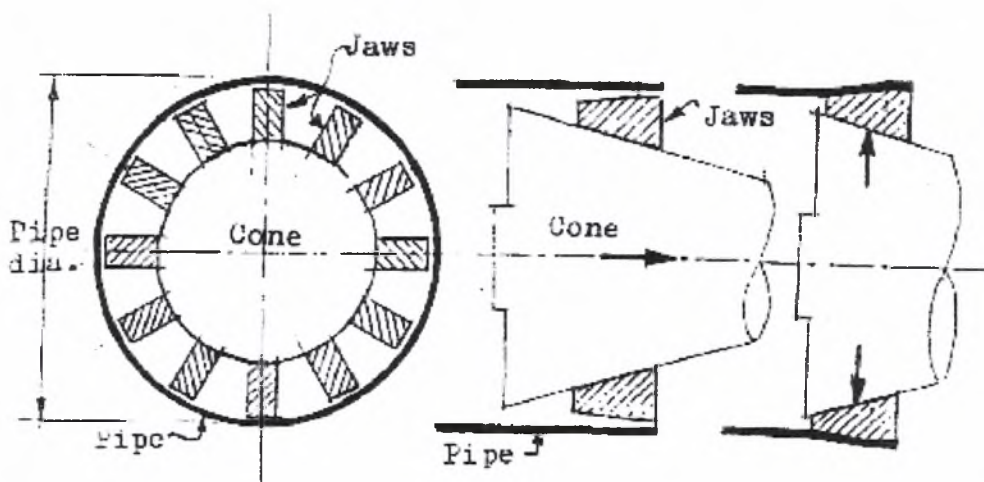
Αυτή η μέθοδος είναι εναλλακτική της ευθείας, μετωπικής συγκόλλησης και τείνει να την αντικαταστήσει εξαιτίας του γεγονότος ότι είναι αξιοσημείωτα ευκολότερη η διαδικασία κατάλληλης τοποθέτησης των αγωγών για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης · κατά συνέπεια, ο χρόνος κατασκευής του δικτύου μειώνεται σημαντικά άρα και το κόστος. Ωστόσο, οι συνδεδεμένοι αγωγοί με συγκολλησεις μορφής ολίσθησης είναι πιο ευαίσθητοι σε αξονικά, θλιπτικά φορτία τα οποία προκαλούνται συνήθως από διαφορικές μετακινήσεις του εδάφους, αλλά και από φορτία πίεσης ή θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μειωμένη αντοχή σε τέτοιου είδους φορτίσεις. Βασική αιτία αυτής της ανεπιθύμητης μείωσης της αντοχής είναι η τοπική εκκεντρότητα και η μεταβολή της καμπυλότητας στην περιοχή της «καμπάνας» του διαμορφωμένου άκρου του αγωγού. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του δικτύου σε περίπτωση ισχυρής καταπόνησης (π.χ. σεισμός).

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι ψυχρής διαμόρφωσης της «καμπάνας» : έλαση και διαστολή. Σύμφωνα με την πρώτη μέθοδο το τοίχωμα του σωλήνα τοποθετείται ανάμεσα σε δύο τύμπανα που έχουν την κατάλληλη μορφολογία για να προσδώσουν στο άκρο του αγωγού το επιθυμητό σχήμα. Καθώς ο σωλήνας περιστρέφεται τα τύμπανα διατρέχουν όλη την περιφέρειά του κάμπτοντας το τοίχωμά του προς τα έξω με τελικό αποτέλεσμα τη διαμόρφωση της «καμπάνας» (Σχήμα 1) .Η δεύτερη μέθοδος απαιτεί τη χρήση ενός υδραυλικού διαστολέα. Σε αυτή την περίπτωση ο

αγωγός τοποθετείται πάνω στις σιαγόνες του διαστολέα, οι οποίες ωθούνται προς τα έξω σταδιακά προκαλώντας τη διαστολή του άκρου του σωλήνα και τελικά τη διαμόρφωση της «καμπάνας» (Σχήμα 2).



ΣΧΗΜΑ 1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΨΥΧΡΗΣ ΕΛΑΣΗΣ



ΣΧΗΜΑ 2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΨΥΧΡΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ

Κατά την πρώτη μέθοδο κατεργασίας τα τύμπανα περιστρεφόμενα γύρω από την περιφέρεια του αγωγού κάμπτουν το τοίχωμά του έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή διάμετρος, γεγονός που μπορεί να απαιτήσει αρκετές πλήρεις περιστροφές του σωλήνα. Επομένως το υλικό υπόκειται σε αρκετούς κύκλους φόρτισης με αποτέλεσμα να μειώνεται η ολκιμότητά του, να κρατύνεται, και να αλλάζουν οι μηχανικές του ιδιότητες με κίνδυνο να υποστεί ολιγοκυκλική κόπωση. Αυτή η

μέθοδος πρακτικά δεν αυτοματοποιείται σε αντίθεση με τη δεύτερη η οποία δε συντελεί σε αλλοίωση των ιδιοτήτων του υλικού. Αυτό συμβαίνει γιατί η σταδιακή διαστολή του τοιχώματος λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα σε ολόκληρη την περιφέρεια του αγωγού με αποτέλεσμα να απαιτείται μόνο ένας κύκλος φόρτισης. Επομένως, αυτή η μέθοδος κατεργασίας δεν καταναλίσκει μεγάλο μέρος της ολκιμότητας του αγωγού, γεγονός που την καθιστά προτιμότερη της πρώτης και χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα. Στην παρούσα μελέτη γίνεται προσομοίωση της κατεργασίας διαμόρφωσης του άκρου του αγωγού σύμφωνα με τη μέθοδο της ψυχρής διαστολής.

1.2 Ανασκόπηση προηγούμενων εργασιών

Όπως σημειώθηκε παραπάνω, η μεταβολή της καμπυλότητας στην περιοχή της «καμπάνας» του διαμορφωμένου άκρου του αγωγού μπορεί να επηρεάσει την αντοχή του αγωγού σε περίπτωση σεισμού, γεγονός που αποδείχθηκε δυστυχώς αρκετές φορές μέχρι σήμερα. Οι ζημιές που καταγράφηκαν μετά το σεισμό του San Fernando το 1971 αποτέλεσαν το κίνητρο για την εκπόνηση μελέτης από τους Tawfik and O'Rourke (1985). Σε αυτή τη μελέτη έγινε διαχωρισμός δύο τύπων αστοχίας και εκτίμηση της αντοχής συνδέσεων μορφής ολίσθησης σε αξονικές, θλιπτικές φορτίσεις. Οι υπολογισμοί έγιναν αναλυτικά και βασίζονται στη θεωρία μεμβρανικού κελύφους, γεγονός που (κατά τους συγγραφείς) περιορίζει τη χρησιμότητα των αποτελεσμάτων σε αγωγούς με λόγο διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος μεγαλύτερο του 100.

Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποίησαν και οι Moncarz et al. (1987) για να προσδιορίσουν τα αίτια των αστοχιών που παρατηρήθηκαν σε δίκτυο ύδρευσης αγωγών συνδεδεμένων με τη μέθοδο ολίσθησης. Οι αστοχίες ήταν πολλαπλές με αποτέλεσμα να ακολουθήσει δικαστική διαμάχη ανάμεσα στον ιδιοκτήτη και τους αρμοδίους για την κατασκευή του δικτύου. Η υπόψη μελέτη αφορούσε στη συγκεκριμένη γεωμετρία των αγωγών του δικτύου αυτού, το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του και τη διερεύνηση των συνθηκών κατεργασίας διαμόρφωσης των αγωγών και συγκόλλησης τους.

Αναλυτικά προσέγγισε το θέμα της εκτίμησης της αντοχής αυτού του είδους των συνδέσεων και ο Brockenbrough (1990), ο οποίος βασιζόμενος σε μια σειρά από παραδοχές έκανε οριακή πλαστική ανάλυση και παράγαγε μια εξίσωση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της αντοχής τέτοιων συνδέσεων. Η εν λόγω

εξίσωση συναρτά την αποδοτικότητα της σύνδεσης υπό αξονική φόρτιση (δηλαδή το λόγο του οριακού φορτίου ως προς το πλαστικό φορτίο της σωληνωτής διατομής) με το λόγο εκκεντρότητας προς πάχος τοιχώματος και χαρακτηρίζεται από τον ίδιο ως αρκετά συντηρητική συγκρινόμενη με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα και αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης σημειώνεται ότι στην ανάλυση του Brockenbrough (1990) δε λαμβάνονται υπόψη τα ευεργετικά αποτελέσματα της κράτυνσης, ούτε η επίδραση της περιμετρικής τάσης.

Με την αντοχή χαλύβδινων σωληνώσεων υπό αξονική, θλιπτική φόρτιση ασχολήθηκε και ο Tutuncu (2001) στα πλαίσια της εκπόνησης της διδακτορικής του διατριβής. Η μελέτη του περιλαμβάνει αριθμητική προσομοίωση συγκολλητών συνδέσεων αγωγών μορφής ολίσθησης, αλλά και συνδέσεις ευθύγραμμων κυλινδρικών αγωγών, καθώς επίσης και τη διεξαγωγή εργαστηριακών πειραμάτων. Η αριθμητική επίλυση έγινε με χρήση του πακέτου λογισμικού ABAQUS και εκτιμήθηκε η επιρροή που ασκεί στην αντοχή των συγκολλητών συνδέσεων μορφής ολίσθησης ο τύπος της συγκόλλησης. Τέλος διεξήχθησαν πειράματα που αφορούσαν την ενίσχυση των συνδέσεων με σύνθετο υλικό (FRC).

Τέλος, το πρόβλημα της αντοχής τέτοιων συνδέσεων απασχόλησε και τους Jones et al. (2004) μετά το σεισμό του 1994 στο Northridge και τις εκτεταμένες καταστροφές τις οποίες προκάλεσε σε σύστημα υδροδότησης των Ηνωμένων Πολιτειών και προσέγγισαν το θέμα αριθμητικά χρησιμοποιώντας το πακέτο λογισμικού ABAQUS. Έκαναν προσομοίωση μίας σύνδεσης συγκεκριμένης γεωμετρίας και υλικού (χωρίς να ληφθεί υπ' όψη η πιθανή επίδραση παραμενουσών τάσεων που οφείλονται στην κατεργασία διαμόρφωσης της «καμπάνας») και έκαναν παραμετρική ανάλυση θεωρώντας ως βασική παράμετρο το λόγο της διαμέτρου προς το πάχος τοιχώματος αγωγού.

1.3 Αντικείμενο της μελέτης

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την αντοχή συγκολλητών συνδέσεων μεταλλικών αγωγών μορφής ολίσθησης, υπό αξονικές, θλιπτικές φορτίσεις. Η ανάλυση έγινε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και χρησιμοποιήθηκε το πακέτο λογισμικού ABAQUS. Η προσομοίωση περιλαμβάνει την κατεργασία διαμόρφωσης του άκρου του ενός εκ των συνδεόμενων αγωγών (με τη μέθοδο της ψυχρής διαστολής), την κατάλληλη τοποθέτηση του αντίστοιχου απαραμόρφωτου

άκρου του γειτονικού αγωγού, τη συγκόλλησή τους και τέλος την επιβολή του θλιπτικού, αξονικού φορτίου μέχρι την αστοχία. Επομένως κατά τη μελέτη λαμβάνονται υπόψη και οι παραμένουσες τάσεις που οφείλονται στην κατεργασία διαμόρφωσης της «καμπάνας» και εκτιμάται η επιρροή τους στην αντοχή των συνδέσεων. Για τη διαπίστωση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου προσομοίωσης, που τελικά υιοθετήθηκε για τη διεξαγωγή της παραμετρικής ανάλυσης, έγινε προσομοίωση εργαστηριακών πειραμάτων και σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά. Επίσης, στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επιρροή της ύπαρξης της διαμόρφωσης, η οποία συνίσταται από την «καμπάνα» και τη συγκόλληση, καθώς επίσης και της κατεργασίας που απαιτείται για να διαμορφωθεί η «καμπάνα» στο άκρο του εκάστοτε αγωγού, στην αντοχή των υπόψη κελυφών. Στα πλαίσια της παραμετρικής μελέτης που εκπονήθηκε, έγινε εκτίμηση της επιρροής στην αντοχή των συνδέσεων όλων των πιθανών παραμέτρων, οι οποίες είναι οι εξής: ο λόγος της διαμέτρου προς το πάχος τοιχώματος, ο λόγος της εκκεντρότητας προς το πάχος τοιχώματος, ο λόγος του μήκους του τμήματος με μεταβλητή καμπυλότητα προς το πάχος του τοιχώματος, ο τύπος της συγκόλλησης (εσωτερική, εξωτερική, διπλή), η παρουσία εσωτερικής πίεσης και η απόσταση της συγκόλλησης από το τμήμα με μεταβλητή καμπυλότητα («καμπάνα»). Τέλος, έγινε σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης με αναλυτικές εκφράσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ, ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

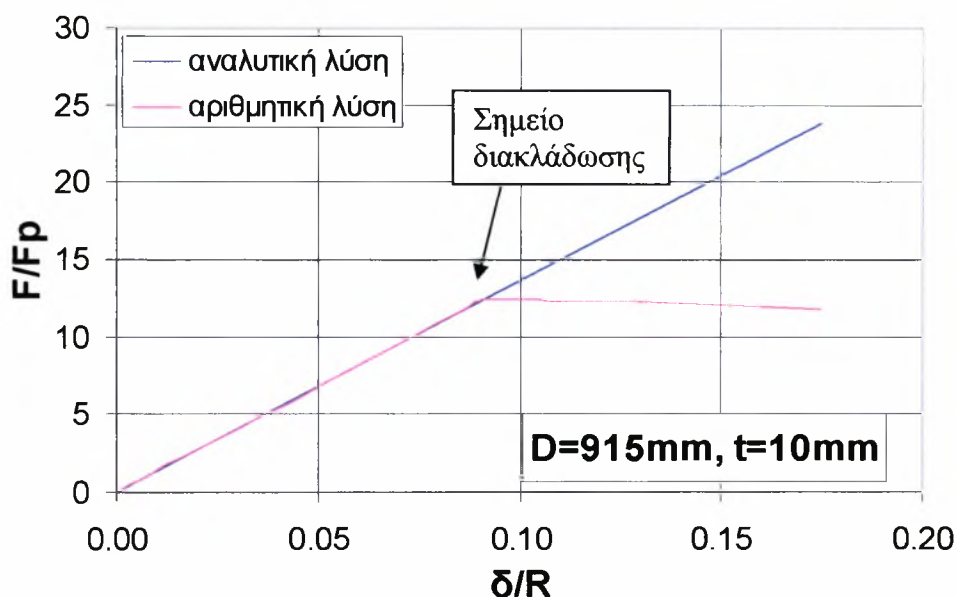
2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται αρχικά κάποια ενδεικτικά στοιχεία των αναλύσεων που έγιναν στο προκαταρκτικό στάδιο της παρούσας μελέτης. Μετά το πέρας αυτού του σταδίου αποφασίστηκε η βασική διαδικασία προσομοίωσης των συνδέσεων αγωγών των οποίων η αντοχή σε αξονικά, θλιπτικά φορτία μελετήθηκε αργότερα, στα πλαίσια της παραμετρικής μελέτης. Στην τρίτη ενότητα περιγράφονται δύο εργαστηριακά πειράματα τα οποία συμπεριλαμβάνονται στη διδακτορική διατριβή που εκπονήθηκε από τον Tutuncu (2001) στο πανεπιστήμιο Cornell. Στη συνέχεια περιγράφεται η προσομοίωση των εργαστηριακών πειραμάτων με τη μέθοδο που ακολουθήθηκε και κατά την διεξαγωγή της παραμετρικής μελέτης και τέλος γίνεται σύγκριση των αριθμητικών με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα. Αυτή η σύγκριση έγινε για τη διαπίστωση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου προσομοίωσης που τελικά υιοθετήθηκε για τη διεξαγωγή της παραμετρικής ανάλυσης.

2.2 Προκαταρκτικό στάδιο μελέτης

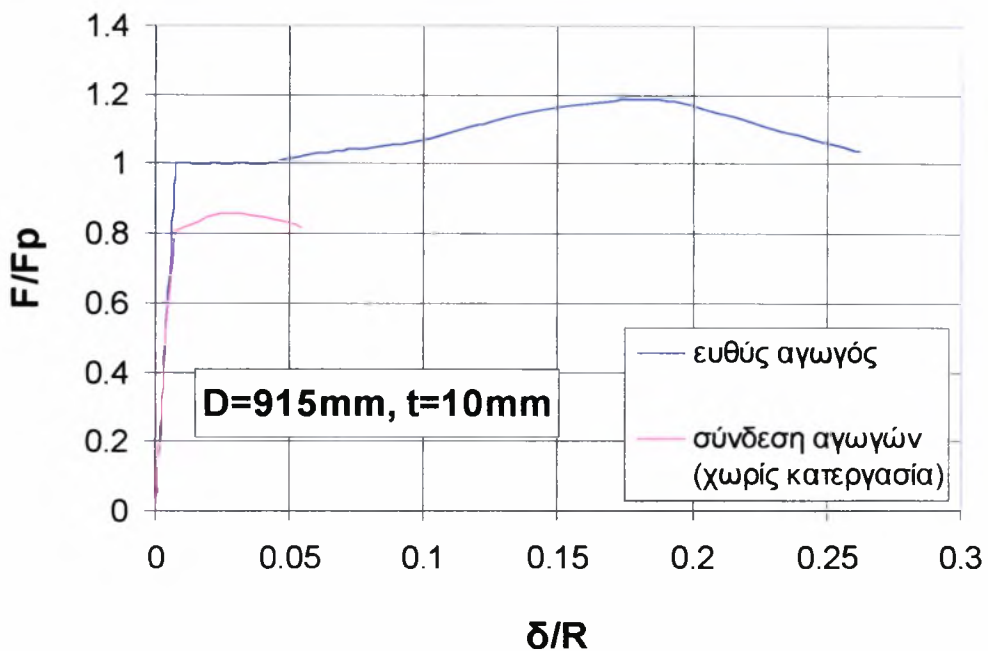
Στο προκαταρκτικό στάδιο εκπόνησης της εργασίας εξετάστηκε η ελαστική συμπεριφορά ενός απλού κυλινδρικού αγωγού χωρίς διαμόρφωση και διαπιστώθηκε απόλυτη ταύτιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα αναλυτικά του τύπου 2.1, ο οποίος δίνει την αξονική μετατόπιση δ λόγω άσκησης αξονικού φορτίου F .

$$\delta = \frac{F \cdot L}{E \cdot A} \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.1 Συγκριτικό διάγραμμα για ευθύ, ελαστικό αγωγό χωρίς τη σύνδεση, με $D=915mm$ και $t=10mm$.

Στη συνέχεια έγινε ελαστοπλαστική ανάλυση για τον αγωγό χωρίς σύνδεση και για την αντίστοιχη σύνδεση αγωγών με εξωτερική συγκόλληση μορφής ολίσθησης (χωρίς να συμπεριληφθεί στην προσομοίωση η αντίστοιχη κατεργασία διαμόρφωσης. Από αυτή την πρώτη προσέγγιση προέκυψαν κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα που σχετικά με την αντοχή του αγωγού λόγω της ύπαρξης της σύνδεσης, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 2.2 Συγκριτικό διάγραμμα για τον ευθύ κυλινδρικό αγωγό (χωρίς σύνδεση) και για την αντίστοιχη σύνδεση αγωγών με εξωτερική συγκόλληση μορφής ολίσθησης (χωρίς να συμπεριληφθεί στην προσομοίωση η κατεργασία διαμόρφωσης της «καμπάνας»).

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

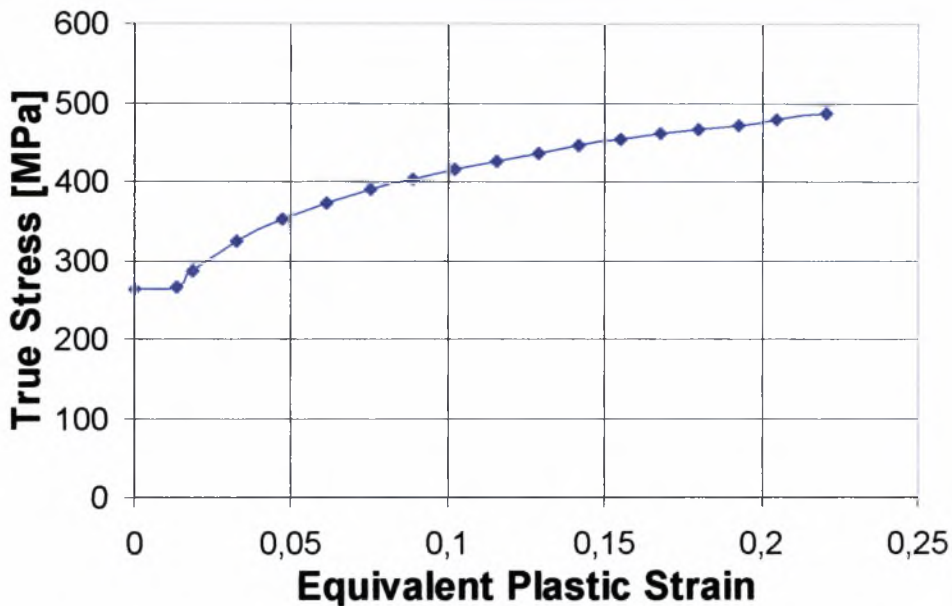
Κατά την μελέτη που έγινε, το μοντέλο που προσομοιάζει εξωτερικά συγκολλητή σύνδεση αγωγών έχει τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά :

- Διάμετρος ίση με 915mm.
- Πάχος τοιχώματος ίσο με 10mm
- Μήκος τμήματος αριστερού αγωγού από το αριστερό άκρο του μέχρι το τμήμα με μεταβλητή καμπυλότητα : 1200mm
- Μήκος τμήματος αριστερού αγωγού από την αρχή του τμήματος με μεταβλητή καμπυλότητα έως τη συγκόλληση : 300mm
- Μήκος εισχώρησης δεξιού αγωγού στον αριστερό : 50mm
- Μήκος τμήματος δεξιού αγωγού από τη συγκόλληση μέχρι το δεξί άκρο του : 1200mm.

Ο ευθύς, κυλινδρικός αγωγός που μελετήθηκε έχει αντίστοιχο μήκος, διάμετρο και πάχος τοιχώματος με τη σύνδεση.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ

Στο υπόψη κέλυφος επιβάλλεται μεγάλη αξονική μετατόπιση, επομένως για την κατάλληλη προσομοίωση της συμπεριφοράς του θεωρήθηκε ελαστοπλαστικό υλικό με δυνατότητα κράτυνσης. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε έχει μέτρο ελαστικότητας $E = 210000 \text{ MPa}$, τάση διαρροής $\sigma_y = 263.3 \text{ MPa}$ και λόγο Poisson $\nu = 0.3$. Η καμπύλη πραγματικής τάσης- λογαριθμικής πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού παρατίθεται στο διάγραμμα του σχήματος 2.3.



Σχήμα 2.3 Καμπύλη πραγματικής τάσης (σ_T) και πλαστικής λογαριθμικής παραμόρφωσης (ε_{ln}^P).

ΠΛΕΓΜΑ

Το πλέγμα συγκροτείται από αξονοσυμμετρικά τετραγωνικά (CAX4R) και τριγωνικά (CAX3) στοιχεία και είναι δομημένο στο τμήμα όπου χρησιμοποιούνται CAX4R και ελεύθερο στο τμήμα όπου χρησιμοποιούνται CAX3. Τα τριγωνικά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της συγκόλλησης, το σχήμα της οποίας στα διδιάστατα μοντέλα είναι τριγωνικό. Πρόκειται για ένα αρκούντως πυκνό πλέγμα, με τρία στοιχεία κατά το πάχος του τοιχώματος του αγωγού.

ΒΗΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η ανάλυση αποτελείται από ένα μόνο βήμα, στο οποίο επιβάλλεται στη σύνδεση αξονική, θλιπτική μετατόπιση κατά τον άξονα 2.

Καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης είναι ενεργοποιημένη η επιλογή NLGEOM (non linear geometry) και η ανάλυση είναι μη γραμμική για τον υπολογισμό της μεταλυσισμικής συμπεριφοράς των μελετώμενων συνδέσεων.

Σημειώνεται ότι η προσομοίωση της συγκόλλησης έγινε με τη χρήση της εντολής Tie του ABAQUS.

ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Όλες οι προσομοιώσεις που έγιναν στα πλαίσια της μελέτης που εκπονήθηκε έγιναν με συνοριακές συνθήκες που αντιστοιχούν σε δέσμευση της μετατόπισης και στα δύο άκρα και ως προς τους δύο άξονες, με εξαίρεση το αριστερό άκρο όπου επιβλήθηκε μετατόπιση κατά τον άξονα 2, η οποία αντιστοιχεί σε αξονική, θλιπτική φόρτιση.

Στα πλαίσια του προκαταρκτικού σταδίου της μελέτης εξετάστηκε επίσης η πιθανότητα επιρροής τροποποιήσεων των συνοριακών συνθηκών στα προκύπτοντα αποτελέσματα. Έγινε ανάλυση τριών μοντέλων πανομοιότυπης γεωμετρίας και με τις εξής Σ.Σ.:

- Μοντέλο 1^ο δεξί άκρο $U1=U2=0$, αριστερό άκρο $U2=25\text{mm}$
- Μοντέλο 2^ο δεξί άκρο $U2=0$, αριστερό άκρο $U1=0$ και $U2=25\text{mm}$
- Μοντέλο 3^ο δεξί άκρο $U1=U2=0$, αριστερό άκρο $U1=0$ και $U2=25\text{mm}$

Ακολουθώς παρατίθεται η μορφή των συνδεδεμένων αγωγών μετά την επιβολή της αξονικής φόρτισης, η οποία είναι ίδια και για τα τρία μοντέλα (σχήμα 2.4).

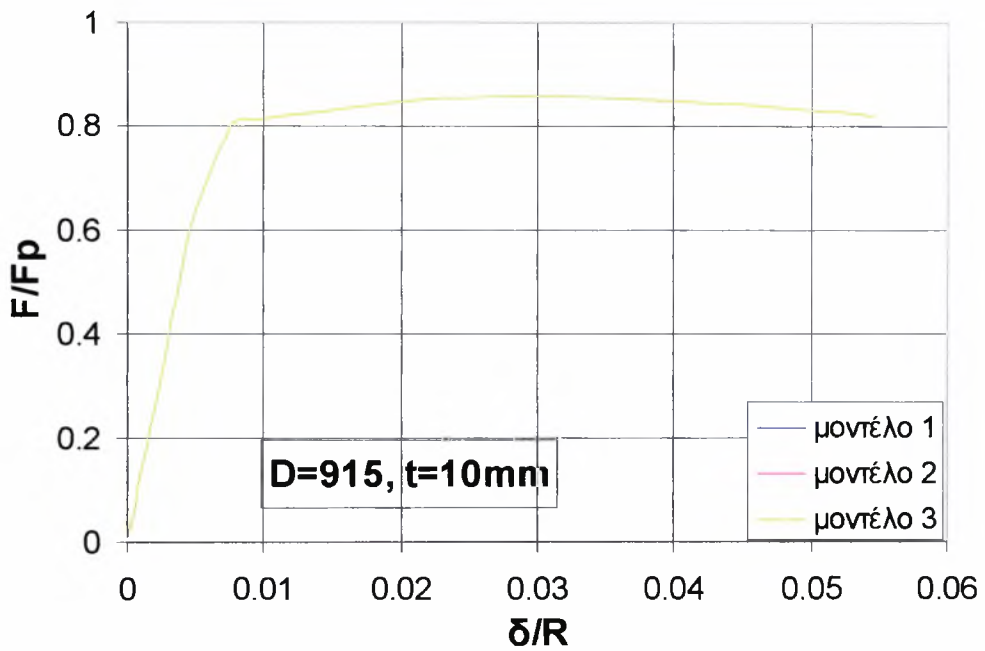


Σχήμα 2.4α μορφή των υπόψη συνδέσεων αγωγών (με $D=915mm$, $t=10mm$) υπό αξονική φόρτιση.



Σχήμα 2.4β λεπτομέρεια σύνδεσης παραμορφωμένων κελυφών με $D=915mm$, $t=10mm$, υπό αξονική φόρτιση.

Όπως ήταν αναμενόμενο υπάρχει πλήρης ταύτιση των αποτελεσμάτων εξαιτίας του γεγονότος ότι οι συνοριακές συνθήκες επιβάλλονται στα άκρα των κελυφών, ενώ η αστοχία συμβαίνει στην περιοχή της σύνδεσης που βρίσκεται μακριά από τα δύο άκρα του εκάστοτε κελύφους, επομένως οι Σ.Σ. δεν επηρεάζουν το φορτίο αστοχίας όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 2.5).



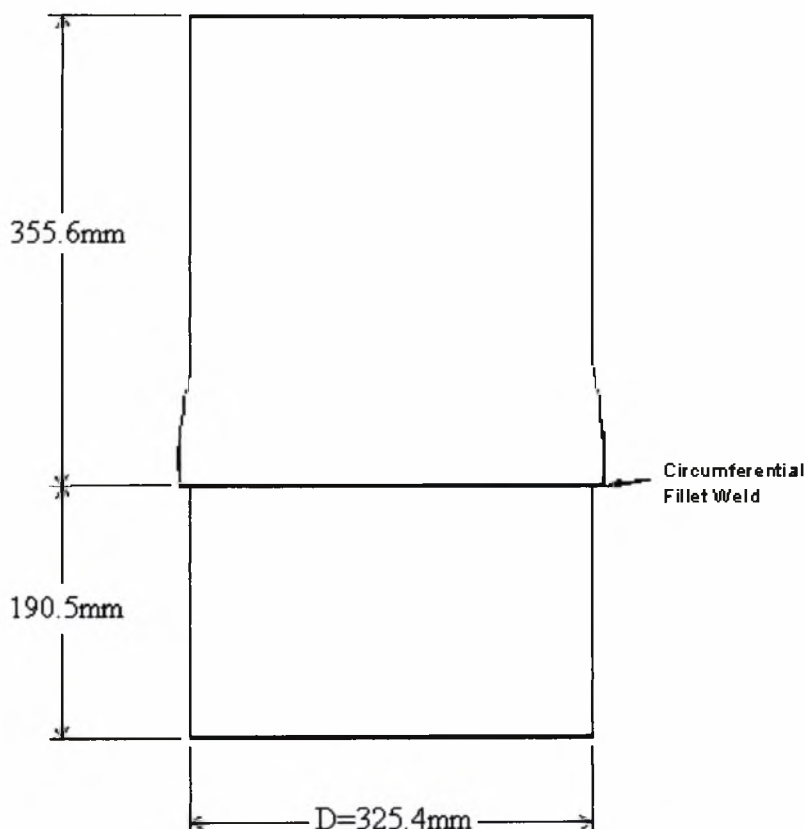
Σχήμα 2.5 Συγκριτικό διάγραμμα για συνδέσεις κελυφών με $D=915mm$, $t=10mm$ και Σ.Σ. :

- Μοντέλο 1^ο δεξί άκρο $U1=U2=0$, αριστερό άκρο $U2=25mm$
- Μοντέλο 2^ο δεξί άκρο $U2=0$, αριστερό άκρο $U1=0$ και $U2=25mm$
- Μοντέλο 3^ο δεξί άκρο $U1=U2=0$, αριστερό άκρο $U1=0$ και $U2=25mm$

2.3 Περιγραφή πειραμάτων

2.3.1 ΠΕΙΡΑΜΑ 1

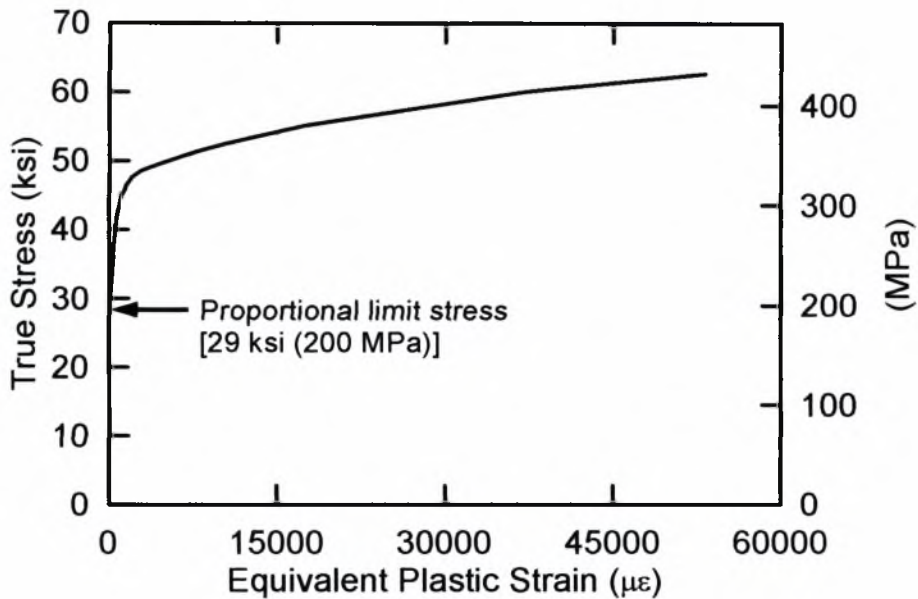
Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε δείγμα σύνδεσης αγωγών με εξωτερική συγκόλληση μορφής ολίσθησης. Το συνολικό μήκος της σύνδεσης είναι 546.1mm (21.5in), το τμήμα μεταβλητής καμπυλότητας («καμπάνα»), το οποίο βρίσκεται στο κέντρο του δείγματος έχει μήκος 85mm (3.35in). Η συγκόλληση απέχει από τη στήριξη του αγωγού με την «καμπάνα» 355.6 mm (14 in) και από τη στήριξη του ευθύ αγωγού 190.5 mm (7.5 in). Η εξωτερική διάμετρος της σύνδεσης είναι ίση με 325.4 mm (12.8in) και το πάχος του τοιχώματος είναι ίσο με 6.17 mm (0.243in).



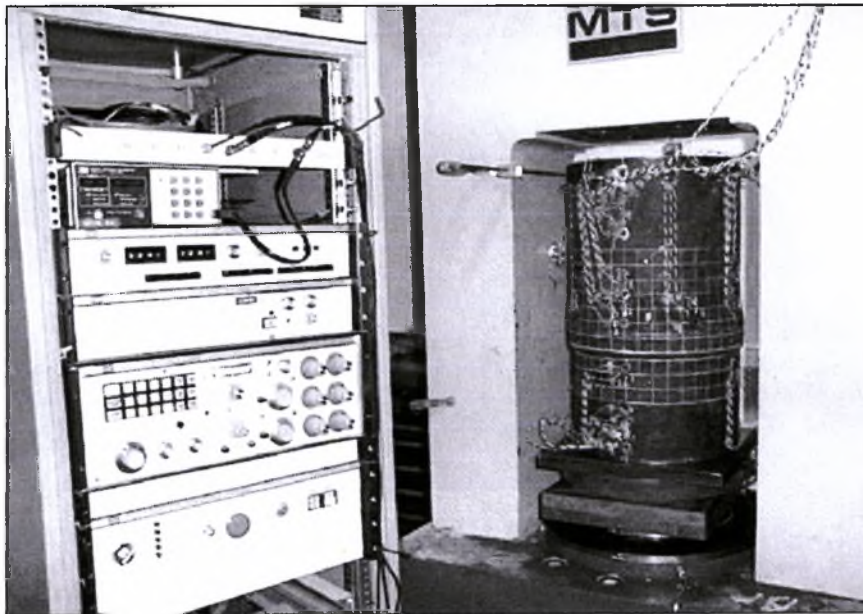
Σχήμα 2.6 Γεωμετρία σύνδεσης αγωγών πρώτου πειράματος (Tutuncu, 2001).

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του δείγματος έχει καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης αυτή που δίνεται στο σχήμα 2.7. Επίσης αναφέρεται ότι οι στηρίξεις που επιβλήθηκαν στο δείγμα το καθιστούν πλήρως περιορισμένο, ενώ οι

τριβές μειώνονται στο ελάχιστο δυνατό με πραγματοποίηση ενδεδειγμένης λίπανσης των επιφανειών που έρχονται σε επαφή με τις στηρίξεις.



Σχήμα 2.7 καμπύλη πραγματικής τάσης-ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού του δείγματος για το πείραμα 1 (Tutuncu, 2001)



Σχήμα 2.8 μορφή δείγματος πρώτου πειράματος (εξωτερικά συγκολλητή σύνδεση αγωγών) πριν την επιβολή της φόρτισης (Tutuncu, 2001)

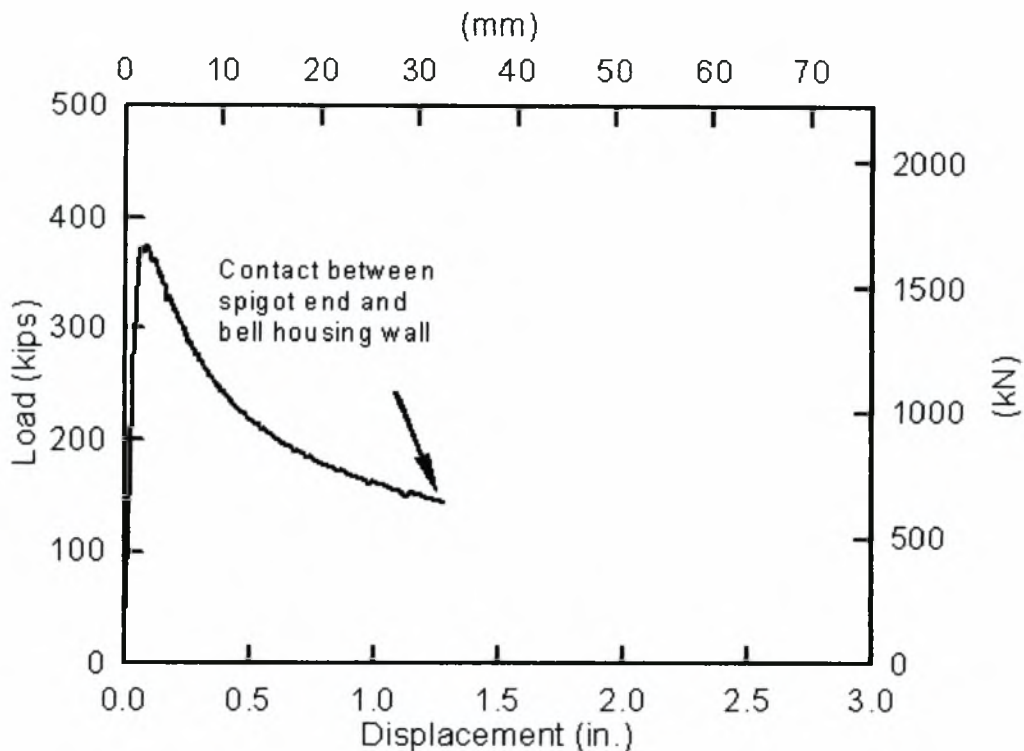
Στο δείγμα ασκήθηκε θλιπτική, αξονική φόρτιση και συγκεκριμένα του επιβλήθηκε μετατόπιση ίση με 31.8mm. Σημειώνεται ότι μετά την επιβολή της

μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι το εσωτερικό τοίχωμα του παραμορφωμένου αγωγού με την καμπάνα ακουμπά στο άκρο του ευθύ αγωγού που έχει εισέλθει σε αυτόν. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις, το φορτίο αστοχίας του δείγματος είναι 1668 kN (375kips) και αντιστοιχεί σε μετατόπιση ίση με 2.2mm (0.088in). Η αστοχία έλαβε χώρα στην περιοχή μεταβλητής καμπυλότητας («καμπάνα»), όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.9, ενώ το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης παρατίθεται στο σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.9 μορφή δείγματος πρώτου πειράματος (εξωτερικά συγκολλητή σύνδεση αγωγών) μετά την επιβολή της φόρτισης (Tutuncu, 2001)

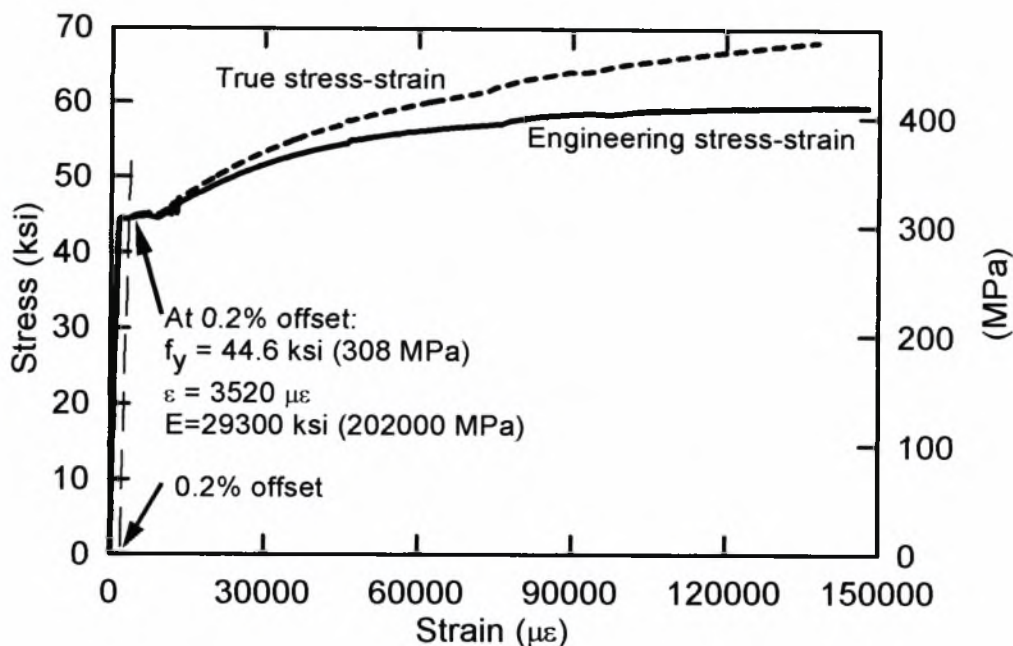
Τα αποτελέσματα του εργαστηριακού πειράματος για την εξωτερικά συγκολλητή σύνδεση, εξωτερικής διαμέτρου 325.4mm, έδειξαν ότι η παραμόρφωση παρουσιάζει αξονική συμμετρία, επομένως για την προσομοίωση του πειράματος, που περιγράφεται σε επόμενη ενότητα, δημιουργήθηκε αξονοσυμμετρικό μοντέλο.



Σχήμα 2.10 διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης για το πρώτο πείραμα
(Tutuncu, 2001)

2.3.2 ΠΕΙΡΑΜΑ 2

Για το δεύτερο πείραμα χρησιμοποιήθηκε δείγμα σύνδεσης αγωγών με εσωτερική συγκόλληση μορφής ολίσθησης. Το συνολικό μήκος της σύνδεσης είναι 635 mm (25in), ενώ το τμήμα μεταβλητής καμπυλότητας («καμπάνα») βρίσκεται στο κέντρο του δείγματος. Επομένως η συγκόλληση ισαπέχει από τη στήριξη του αγωγού με την «καμπάνα» και από τη στήριξη του ευθύ αγωγού. Η εσωτερική διάμετρος της σύνδεσης είναι ίση με 312.4 mm (12.3in) και το πάχος του τοιχώματος είναι ίσο με 6.1 mm (0.24in). Το τμήμα του ευθύ αγωγού που εισέρχεται την «καμπάνα» είναι ίσο με 35.6 mm (1.4in). Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του δείγματος έχει καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης αυτή που δίνεται στο σχήμα 2.11. Επίσης αναφέρεται ότι οι στηρίξεις που επιβλήθηκαν στο δείγμα το καθιστούν πλήρως περιορισμένο, ενώ οι τριβές μειώνονται στο ελάχιστο δυνατό με πραγματοποίηση ενδεδειγμένης λίπανσης των επιφανειών που έρχονται σε επαφή με τις στηρίξεις.



Σχήμα 2.11 καμπύλη τάσης- παραμόρφωσης του υλικού του δείγματος για το πείραμα2(Tutuncu, 2001)

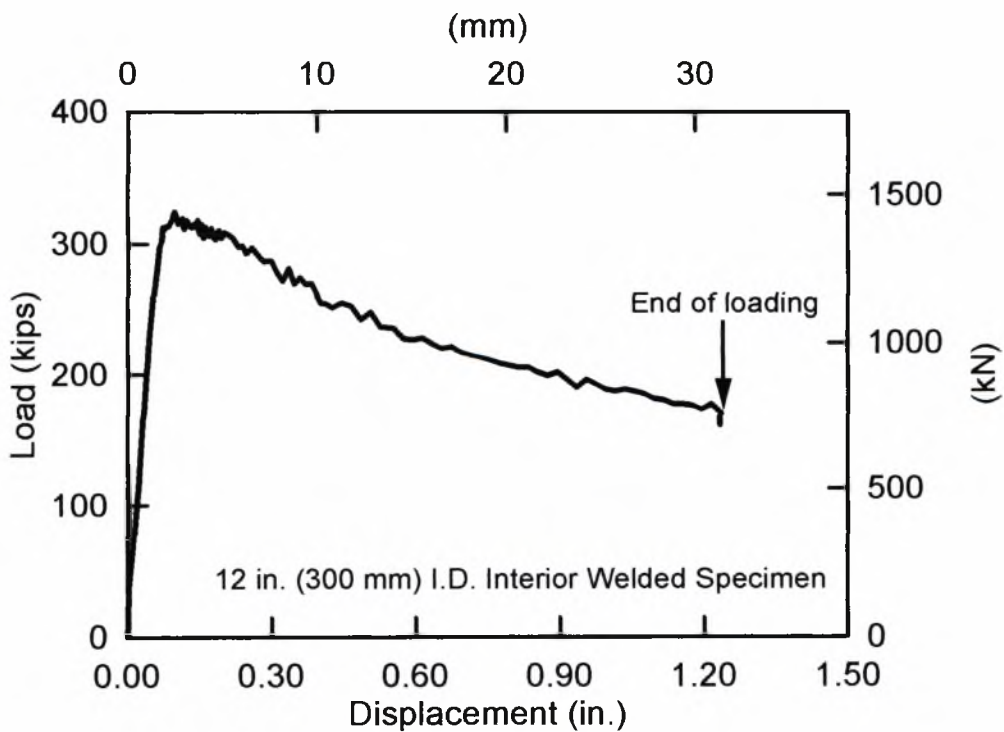
Στο δείγμα ασκήθηκε θλιπτική, αξονική φόρτιση και συγκεκριμένα του επιβλήθηκε μετατόπιση ίση με 30.5mm (1.2 in). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις, το φορτίο αστοχίας του δείγματος είναι 1441 kN και αντιστοιχεί σε μετατόπιση ίση με 2.49mm. Η αστοχία έλαβε χώρα στην περιοχή μεταβλητής καμπυλότητας («καμπάνα»), όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.12, ενώ το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης παρατίθεται στο σχήμα 2.13.

Τα αποτελέσματα του δεύτερου εργαστηριακού πειράματος, για την εσωτερικά συγκολλητή σύνδεση, εξωτερικής διαμέτρου 312.4mm, έδειξαν ότι η παραμόρφωση παρουσιάζει αξονική συμμετρία, επομένως για την προσομοίωση του πειράματος, που περιγράφεται σε επόμενη ενότητα, δημιουργήθηκε αξονοσυμμετρικό μοντέλο της σύνδεσης.

Το γεγονός ότι και στα δύο εργαστηριακά πειράματα (και για την εξωτερικά συγκολλητή σύνδεση μορφής ολίσθησης και για την εσωτερικά συγκολλητή σύνδεση) η παραμόρφωση παρουσιάζει αξονική συμμετρία οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η προσομοίωση συγκολλητών συνδέσεων μορφής ολίσθησης με αξονοσυμμετρικά, διδιάστατα μοντέλα αποτελεί αποτελεσματική μέθοδο εκτίμησης της συμπεριφοράς φορτίου-μετατόπισης των εν λόγω συνδέσεων.



Σχήμα 2.12 μορφή δείγματος δεύτερου πειράματος (εσωτερικά συγκολλητή σύνδεση αγωγών) μετά την επιβολή της φόρτισης (Tutuncu, 2001)



Σχήμα 2.13 διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης για το δεύτερο πείραμα (Tutuncu, 2001)

2.4 Προσομοίωση πειραμάτων και σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων

2.4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ 1

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Για την προσομοίωση του πρώτου πειράματος δημιουργήθηκε ένα μοντέλο ίδιας γεωμετρίας με το δείγμα του εν λόγω πειράματος, δηλαδή σύνδεση με συνολικό μήκος ίσο με 546.1 mm, με τμήμα μεταβλητής καμπυλότητας («καμπάνα»), το οποίο βρίσκεται στο κέντρο του δείγματος και έχει μήκος 85mm, με εξωτερική διάμετρο ίση με 325.4 mm και πάχος του τοιχώματος ίσο με 6.17 mm. Η συγκόλληση απέχει από τη στήριξη του άνω άκρου, δηλαδή του αγωγού με την «καμπάνα», 355.6 mm και από τη στήριξη του κάτω άκρου, δηλαδή του ευθύ αγωγού, 190.5 mm.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της εξωτερικά συγκολλητής σύνδεσης έχει μέτρο ελαστικότητας $E = 210000 \text{ MPa}$, τάση διαρροής $\sigma_y = 340 \text{ MPa}$ και λόγο Poisson $\nu = 0.3$. Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δίνεται στο σχήμα 2.7.

ΠΛΕΓΜΑ

Το πλέγμα συγκροτείται από αξονοσυμμετρικά τετραγωνικά (CAX4R) και τριγωνικά (CAX3) στοιχεία και είναι δομημένο στο τμήμα όπου χρησιμοποιούνται CAX4R και ελεύθερο στο τμήμα όπου χρησιμοποιούνται CAX3. Τα τριγωνικά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της συγκόλλησης, το σχήμα της οποίας στα διδιάστατα μοντέλα είναι τριγωνικό. Πρόκειται για ένα αρκούντως πυκνό πλέγμα, με τρία στοιχεία κατά το πάχος του τοιχώματος του αγωγού.

ΒΗΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

- Στο πρώτο βήμα συγκρατείται το αριστερό άκρο του διαμορφούμενου σωλήνα και επιβάλλεται μετατόπιση ίση με 7.8 mm (ίση με το offset του δείγματος του εργαστηριακού πειράματος) στο δεξί άκρο του (το μήκος του τμήματος της περιφέρειας που συγκρατείται, καθώς επίσης και το μήκος όπου επιβάλλεται η μετατόπιση υπολογίζονται με βάση το καθορισμένο μήκος του τμήματος με μεταβλητή καμπυλότητα το οποίο είναι ίσο με 85 mm).

- Στο δεύτερο βήμα λαμβάνει χώρα η αποφόρτιση του σωλήνα, που δέχτηκε τη μετατόπιση για να διαμορφωθεί.
- Στο τρίτο βήμα οι αγωγοί τοποθετούνται καταλλήλως ούτως ώστε να συγκολληθούν στο επόμενο βήμα της ανάλυσης.
- Στο τέταρτο βήμα συγκολλούνται οι αγωγοί και επιβάλλεται στη σύνδεση κατακόρυφη αξονική, θλιπτική μετατόπιση (κατά τον άξονα 2).

Η προσομοίωση της σύνδεσης των αγωγών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η μεταβίβαση της φόρτισης από τον αριστερό στο δεξί αγωγό, έγινε με την κατάλληλη πρόσθεση επιπλέον τετραγωνικών στοιχείων (CAX4R) στο πλέγμα. Αυτά τα στοιχεία αφαιρούνται στο πρώτο βήμα της ανάλυσης και παραμένουν ανενεργά έως και το τρίτο βήμα.

Καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης είναι ενεργοποιημένη η επιλογή NLGEOM (non linear geometry) και η ανάλυση είναι μη γραμμική εφόσον μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταλυγισμική συμπεριφορά των μελετώμενων συνδέσεων.

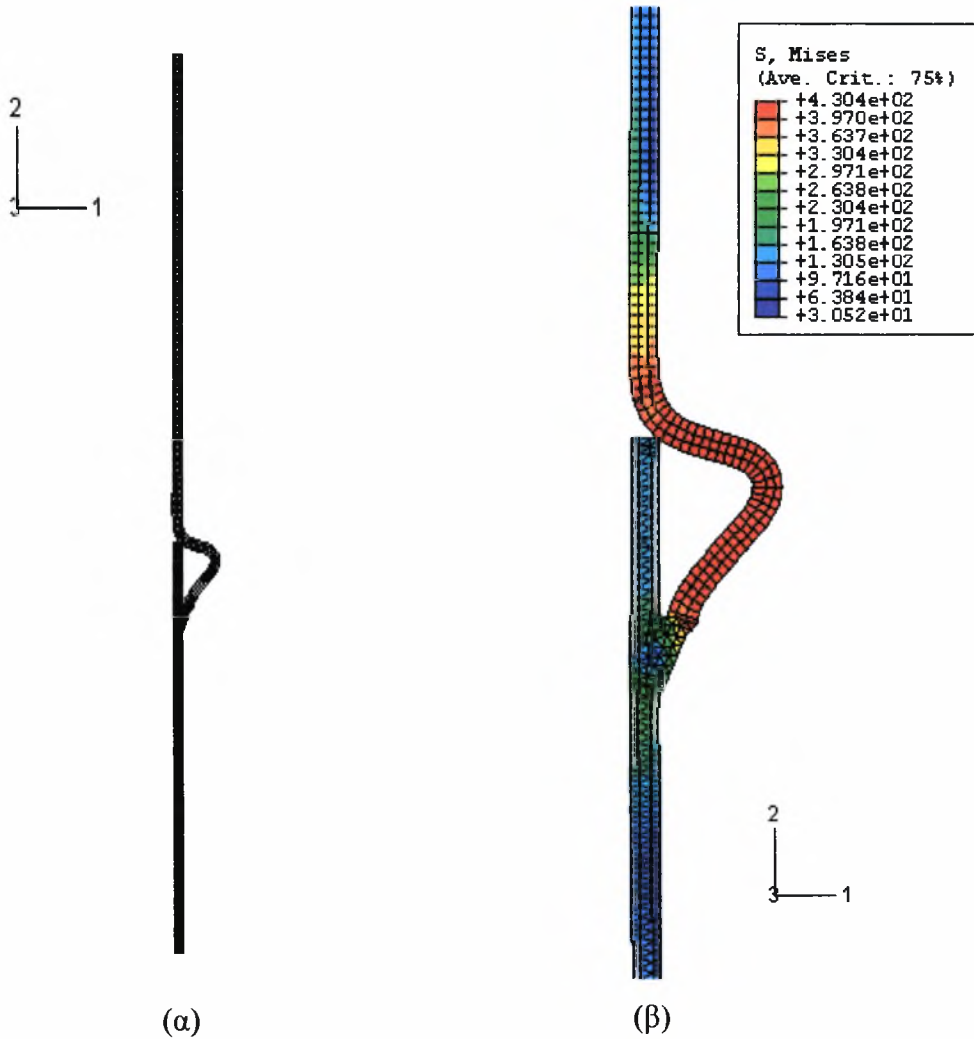
ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι συνοριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν αντιστοιχούν σε δέσμευση της μετατόπισης και στα δύο άκρα και ως προς τους δύο άξονες, με εξαίρεση το άνω άκρο όπου επιβλήθηκε μετατόπιση κατά τον άξονα 2, η οποία αντιστοιχεί σε αξονική, θλιπτική φόρτιση.

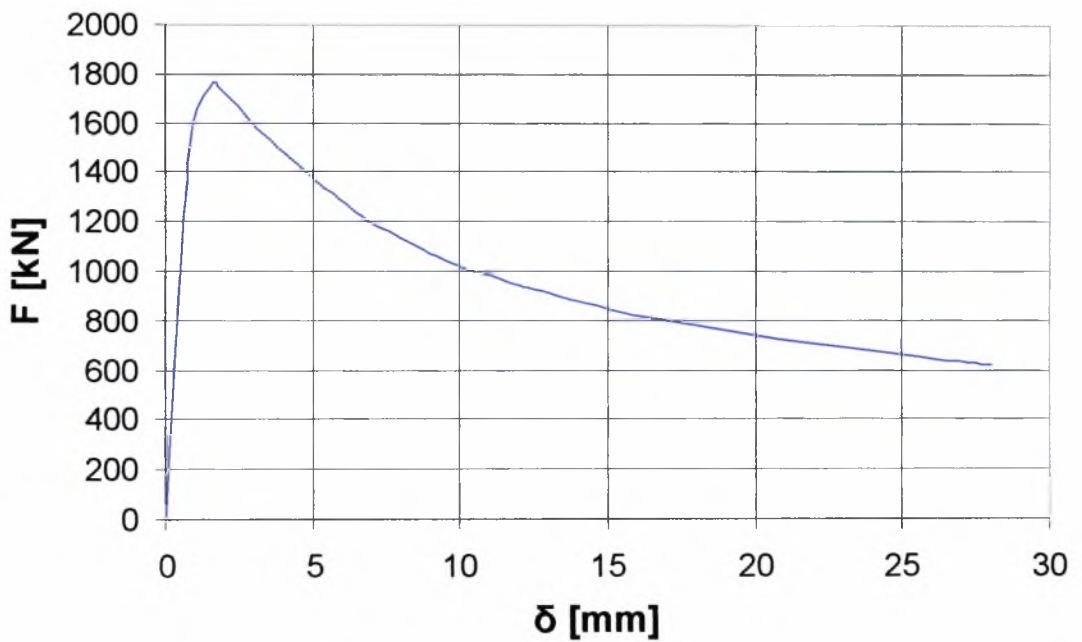
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Από την ανάλυση προέκυψε ότι η αστοχία συμβαίνει στην περιοχή της σύνδεσης και συγκεκριμένα στο τμήμα μεταβλητής καμπυλότητας («καμπάνα»), όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.14. Διαπιστώνεται επομένως ότι η αστοχία λαμβάνει χώρα στην ίδια περιοχή που έχει λάβει και κατά τη διεξαγωγή του αντίστοιχου εργαστηριακού πειράματος (πειράμα1). Επίσης, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης, το φορτίο αστοχίας της σύνδεσης είναι $F_u = 1760$ kN και αντιστοιχεί σε μετατόπιση $\delta = 1.61$ mm. Το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για το υπόψη κέλυφος παρατίθεται στο σχήμα 2.15. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι και κατά τη διεξαγωγή του εργαστηριακού πειράματος είχε παρατηρηθεί ότι, μετά την επιβολή της μετατόπισης, το εσωτερικό τοίχωμα του παραμορφωμένου αγωγού με την καμπάνα

ακουμπά στο άκρο του ευθύ αγωγού που έχει εισέλθει σε αυτόν, γεγονός που παρατηρείται και στο παραμορφωμένο κέλυφος μετά το πέρας της αριθμητικής ανάλυσης (βλ. σχήμα 2.14α).



*Σχήμα 2.14 (α) παραμορφωμένο κέλυφος προσομοίωσης πρώτου πειράματος (εξωτερική συγκόλληση)
(β) λεπτομέρεια περιοχής σύνδεσης*



Σχήμα 2.15 Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για εξωτερικά συγκολλητή σύνδεση με $D=325.4mm$ και $t=6.17$ (προσομοίωση πειράματος1)

Συγκρίνοντας τα αριθμητικά αποτελέσματα για το φορτίο αστοχίας F_u με τα αντίστοιχα πειραματικά, συμπεραίνεται ότι η απόκλιση είναι της τάξης του 5%, δηλαδή πολύ μικρή.

	F_u [kN]	δ_u [mm]
Πειραματικά Αποτελέσματα	1668	2.2
Αριθμητικά Αποτελέσματα	1760	1.61

2.4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ 2

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

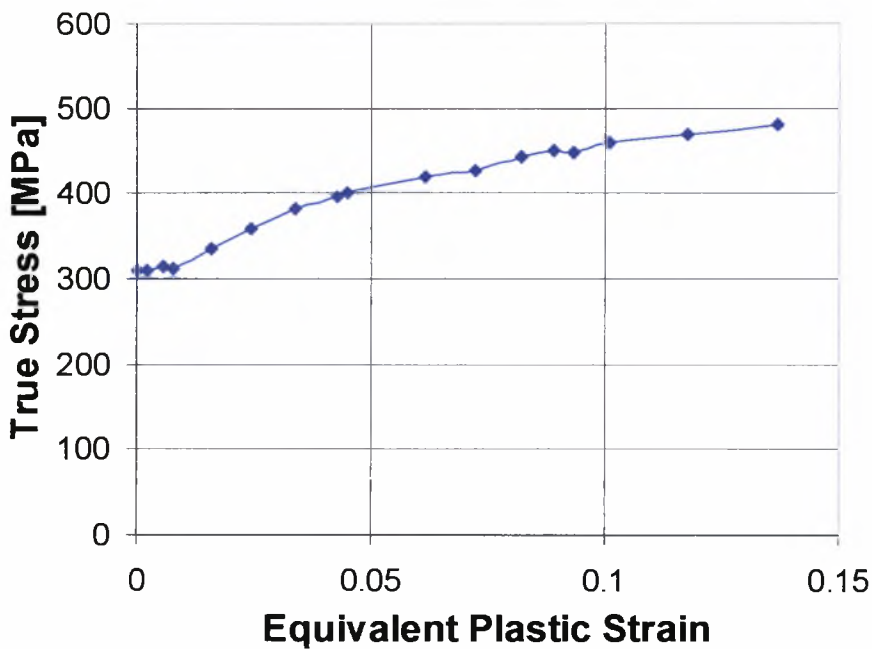
Για την προσομοίωση του δεύτερου πειράματος δημιουργήθηκε ένα μοντέλο ίδιας γεωμετρίας με το δείγμα του εν λόγω πειράματος, δηλαδή εσωτερικά συγκολλητή σύνδεση με συνολικό μήκος ίσο με 635 mm, με τμήμα μεταβλητής καμπυλότητας («καμπάνα»), το οποίο βρίσκεται στο κέντρο του δείγματος, με εσωτερική διάμετρο ίση με 312.4 mm και πάχος του τοιχώματος ίσο με 6.1 mm. Η συγκόλληση ισαπέχει από τη στήριξη του άνω άκρου, δηλαδή του αγωγού με την «καμπάνα» και από τη στήριξη του κάτω άκρου, δηλαδή του ευθύ αγωγού. Το τμήμα του ευθύ αγωγού που εισέρχεται την «καμπάνα» είναι ίσο με 35.6 mm

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της εσωτερικά συγκολλητής σύνδεσης έχει μέτρο ελαστικότητας $E = 202000 \text{ MPa}$, τάση διαρροής $\sigma_y = 308 \text{ MPa}$ και λόγο Poisson $\nu = 0.3$. Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δίνεται στο σχήμα 2.11. Για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του υλικού στο ABAQUS έγινε μετατροπή της τάσης σε πραγματική τάση και της μετατόπισης σε ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση με βάση τους τύπους 2.2 και 2.3. Η καμπύλη που προέκυψε παρατίθεται στο διάγραμμα του σχήματος 2.16.

$$\sigma_T = (1 + \varepsilon) \cdot \sigma \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_m^p = \ln(1 + \varepsilon) - \frac{\sigma_T}{E} \quad (2.3)$$



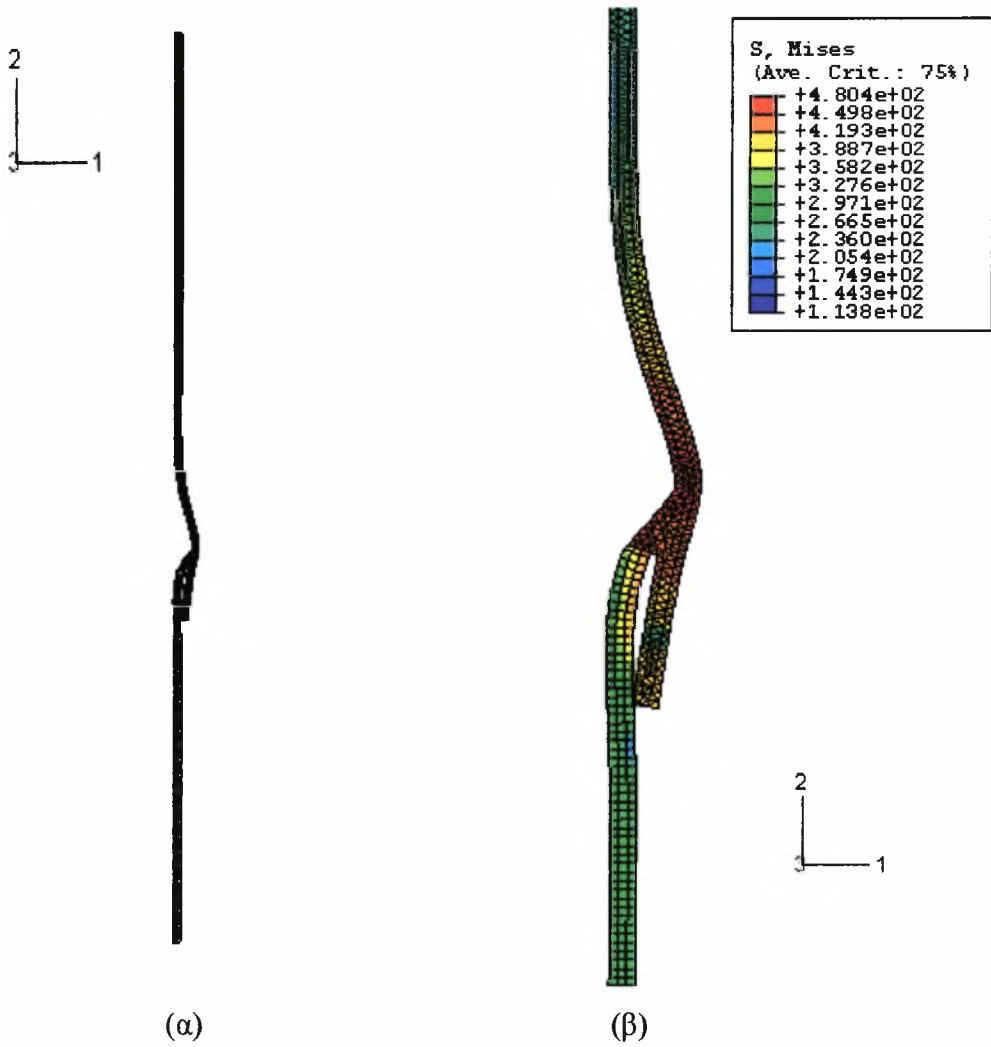
Σχήμα 2.16 καμπύλη πραγματικής τάσης-ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού του δείγματος για την προσομοίωση του πειράματος 2

Το πλέγμα του μοντέλου που δημιουργήθηκε, τα βήματα της ανάλυσης καθώς επίσης και οι συνοριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν είναι όμοια με τα αντίστοιχα της προσομοίωσης του πρώτου πειράματος και έχουν ήδη αναφερθεί στην ενότητα 2.4.1.

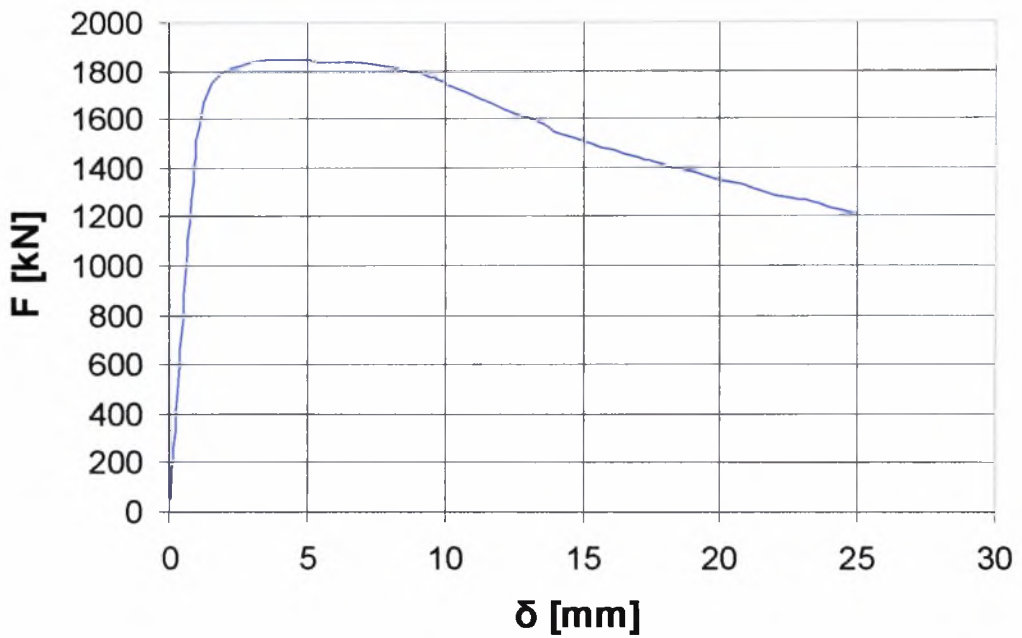
Σημειώνεται ότι κατά την ανάλυση στο τέταρτο βήμα (όπου επιβάλλεται η μετατόπιση) λήφθηκε υπόψη η αλληλεπίδραση επαφής των επιφανειών, με κατάλληλο αλγόριθμο επαφής (contact).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Από την ανάλυση προέκυψε ότι η αστοχία συμβαίνει στην περιοχή της σύνδεσης και συγκεκριμένα στο τμήμα μεταβλητής καμπυλότητας («καμπάνα»), όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.17. Διαπιστώνεται επομένως ότι η αστοχία λαμβάνει χώρα στην ίδια περιοχή που έχει λάβει και κατά τη διεξαγωγή του αντίστοιχου εργαστηριακού πειράματος (πείραμα2). Επίσης, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης, το φορτίο αστοχίας της σύνδεσης είναι $F_u = 1550$ kN και αντιστοιχεί σε μετατόπιση $\delta = 3.5$ mm. Το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για το υπόψη κέλυφος παρατίθεται στο σχήμα 2.18.



Σχήμα 2.17 (α) παραμορφωμένο κέλυφος προσομοίωσης δεύτερου πειράματος
 (εσωτερική συγκόλληση)
 (β) λεπτομέρεια περιοχής σύνδεσης



Σχήμα 2.18 Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για εξωτερικά συγκολλητή σύνδεση με $D=312.4\text{mm}$ και $t=6.1$ (προσομοίωση πειράματος2)

Συγκρίνοντας τα αριθμητικά αποτελέσματα για το φορτίο αστοχίας F_u με τα αντίστοιχα πειραματικά, συμπεραίνεται ότι η απόκλιση είναι της τάξης του 7%, δηλαδή αρκετά μικρή.

	F_u [kN]	δ_u [mm]
Πειραματικά Αποτελέσματα	1441	2.49
Αριθμητικά Αποτελέσματα	1550	3.5

2.5 Επιρροή της σύνδεσης και της αντίστοιχης κατεργασίας

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα συγκριτικής μελέτης που έγινε για συγκολλητές συνδέσεις αγωγών μορφής ολίσθησης και αντίστοιχα κυλινδρικά κελύφη χωρίς διαμόρφωση, η οποία περιλαμβάνει την «καμπάνα» (τμήμα αγωγού με μεταβλητή καμπυλότητα) και τη συγκόλληση. Αυτή η μελέτη έγινε με σκοπό να διαπιστωθεί η επιρροή της ύπαρξης της εν λόγω διαμόρφωσης στην αντοχή αυτών των κελυφών. Επίσης, εξετάστηκε και η επιρροή της κατεργασίας διαμόρφωσης της «καμπάνας» στο άκρο του εκάστοτε αγωγού, η οποία δημιουργεί παραμένουσες τάσεις, στην αντοχή των συνδέσεων.

Σε αυτό το στάδιο της μελέτης εξετάζεται η επιρροή της ύπαρξης της διαμόρφωσης, η οποία συνίσταται από την «καμπάνα» και τη συγκόλληση, καθώς επίσης και της αντίστοιχης κατεργασίας που απαιτείται για να διαμορφωθεί η «καμπάνα» στο άκρο του εκάστοτε αγωγού, στην αντοχή των συγκολλητών συνδέσεων αγωγών μορφής ολίσθησης. Αρχικά έγινε επιλογή δύο χαρακτηριστικών μοντέλων της ανωτέρω ανάλυσης βάσει των οποίων έγινε προσομοίωση δύο ομάδων κελυφών, η κάθε μία από τις οποίες αποτελείται από τρία μοντέλα προσομοίωσης. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κελυφών, το υλικό, το πλέγμα, τα βήματα της ανάλυσης και οι συνοριακές συνθήκες για τις προσομοιώσεις που περιγράφονται σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα 3.2.

2.5.1 ΠΡΩΤΗ ΟΜΑΔΑ ΣΩΛΗΝΩΝ

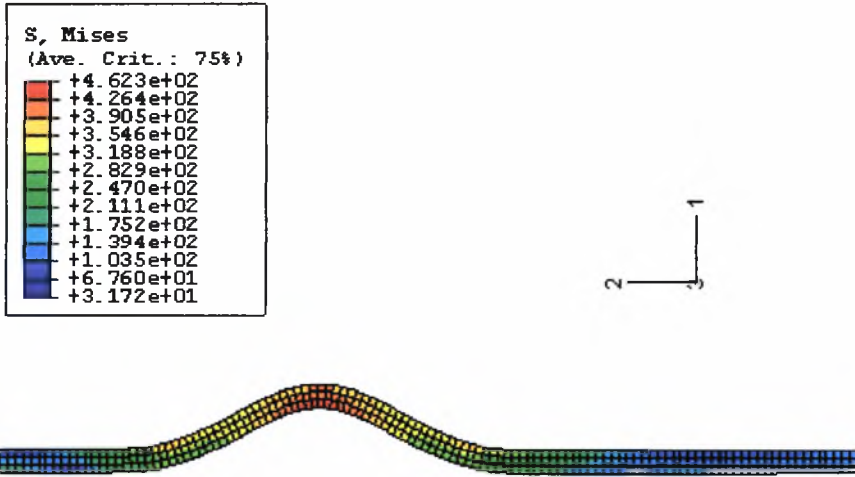
Αυτή η ομάδα προσομοιώθηκε από ένα βασικό μοντέλο, το οποίο αποτελεί προσομοίωση εξωτερικά συγκολλητής σύνδεσης αγωγών με $\frac{D}{t} = 95$, $\frac{e}{t} = 1.31$ και

$\frac{L_b}{t} = 16$ (Μοντέλο Α). Επίσης, έγινε προσομοίωση αντίστοιχου κυλινδρικού

κελύφους χωρίς διαμόρφωση σύνδεσης (Μοντέλο Β). Τέλος έγινε προσομοίωση και συγκολλητής σύνδεσης αγωγών γεωμετρίας όμοιας με το βασικό μοντέλο, με τη διαφορά ότι η ανάλυσή της περιορίστηκε σε ένα μόνο βήμα, εκείνο της επιβολής αξονικής, θλιπτικής μετατόπισης (δηλαδή δε λήφθηκε υπόψη η κατεργασία διαμόρφωσης της «καμπάνας» όπως είχε συμβεί στα τρία πρώτα βήματα της ανάλυσης του βασικού μοντέλου). Στο τελευταίο αυτό μοντέλο (Μοντέλο C) η γεωμετρία της σύνδεσης ήταν χωρίς παραμένουσες τάσεις (stress free).



Σχήμα 4.1a παραμορφωμένο κυλινδρικό κέλυφος χωρίς σύνδεση (straight pipe)



Σχήμα 4.1b λεπτομέρεια περιοχής αστοχίας παραμορφωμένου κυλινδρικού κελύφους χωρίς σύνδεση (straight pipe)

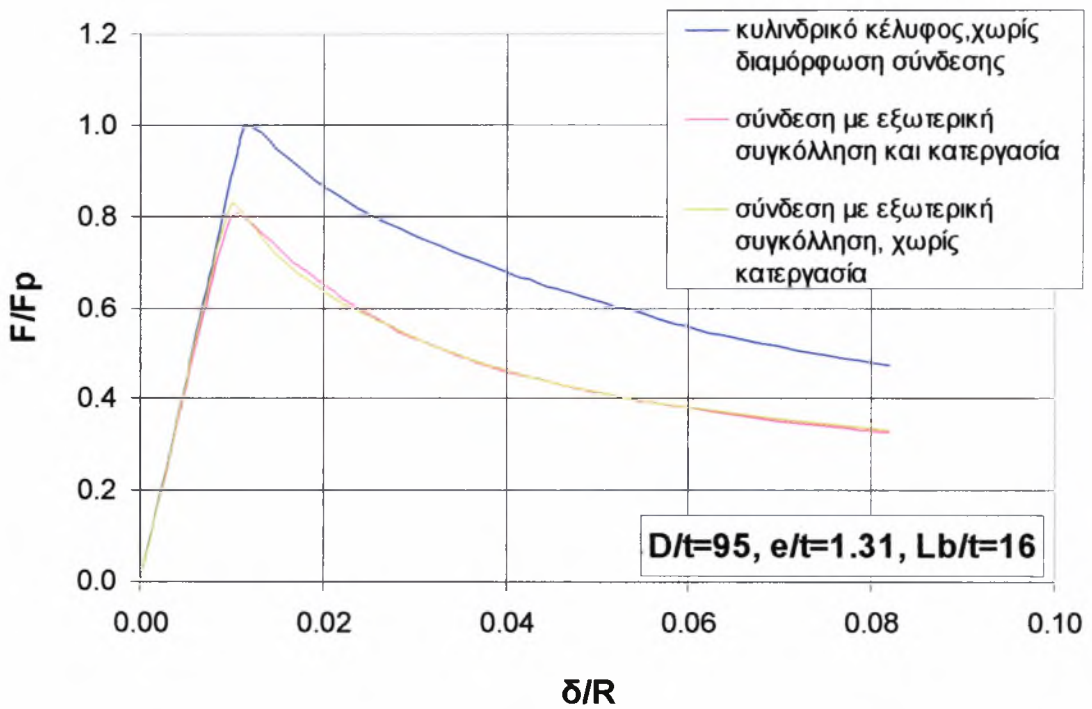


Σχήμα 4.2 λεπτομέρεια περιοχής σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η κατεργασία διαμόρφωσης της «καμπάνας» κατά την ανάλυση.



Σχήμα 4.3 λεπτομέρεια περιοχής σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους, λαμβάνοντας υπόψη την κατεργασία διαμόρφωσης της «καμπάνας» κατά την ανάλυση.

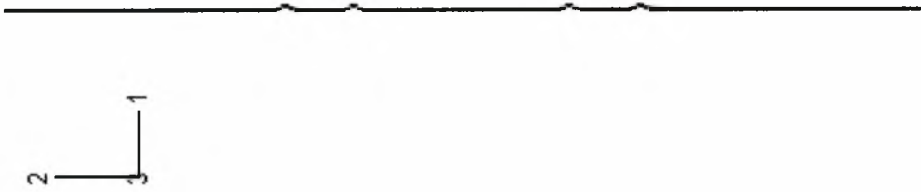
Από το σχήμα 4.1, στο οποίο απεικονίζεται η μορφή του παραμορφωμένου κυλινδρικού κελύφους χωρίς διαμόρφωση καμπάνας-συγκόλλησης, συμπεραίνεται ότι η αστοχία συμβαίνει στα άκρα του αγωγού. Η αριθμητική ανάλυση των μοντέλων προσομοίωσης εξωτερικά συγκολλητών συνδέσεων αγωγών, και για την περίπτωση στην οποία λαμβάνεται υπόψη η κατεργασία διαμόρφωσης της καμπάνας (σχήμα 4.3) και για την περίπτωση όπου δε συμβαίνει αυτό (σχήμα 4.2), έδειξε ότι τα κελύφη αστοχούν στην περιοχή της καμπάνας. Η κατεργασία διαμόρφωσης του άκρου του αγωγού, ούτως ώστε να πάρει τη μορφή καμπάνας, δημιουργεί παραμένουσες τάσεις οι οποίες επηρεάζουν την αντοχή του κελύφους. Από τη συγκριτική μελέτη που έγινε προέκυψαν τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο διάγραμμα του σχήματος 4.4, σύμφωνα με τα οποία η επιρροή της ύπαρξης της διαμόρφωσης σύνδεσης στην αντοχή των κελυφών που εξετάζονται, από το ακόλουθο διάγραμμα συμπεραίνεται ότι προκαλεί μείωση της τάξης του 20%. Όσον αφορά στην εν λόγω κατεργασία προκαλεί μείωση στην αντοχή του κελύφους, στην προκειμένη περίπτωση κατά 3%.



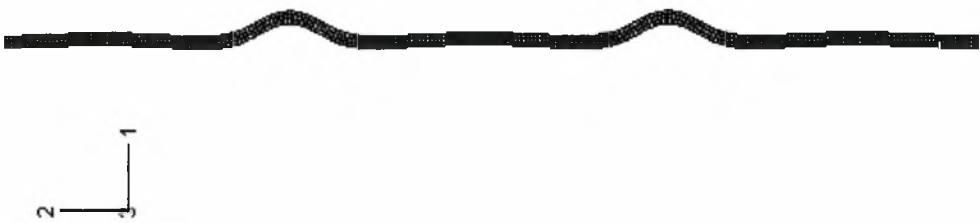
Σχήμα 4.4 Συγκριτικό διάγραμμα αγωγών με λόγο $D/t=95$, $e/t=1.31$ και $L_b/t=16$.

4.2.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΟΜΑΔΑ

Η δεύτερη ομάδα αποτελείται από το δεύτερο βασικό μοντέλο που επελέγη από την παραμετρική ανάλυση, το οποίο αποτελεί προσομοίωση εξωτερικά συγκολλημένης σύνδεσης αγωγών με $\frac{D}{t} = 47.7$, $\frac{e}{t} = 1.31$ και $\frac{L_b}{t} = 16$. Βάσει αυτού έγινε προσομοίωση αντίστοιχου κυλινδρικού κελύφους χωρίς διαμόρφωση καμπάνας-συγκόλλησης. Επίσης έγινε προσομοίωση και συγκολλητής σύνδεσης αγωγών γεωμετρίας όμοιας με το βασικό μοντέλο, με τη διαφορά ότι η ανάλυσή της περιορίστηκε σε ένα μόνο βήμα, εκείνο της επιβολής αξονικής, θλιπτικής μετατόπισης (δηλαδή δε λήφθηκε υπ' όψη η κατεργασία διαμόρφωσης της καμπάνας όπως είχε συμβεί στα τρία πρώτα βήματα της ανάλυσης του βασικού μοντέλου).



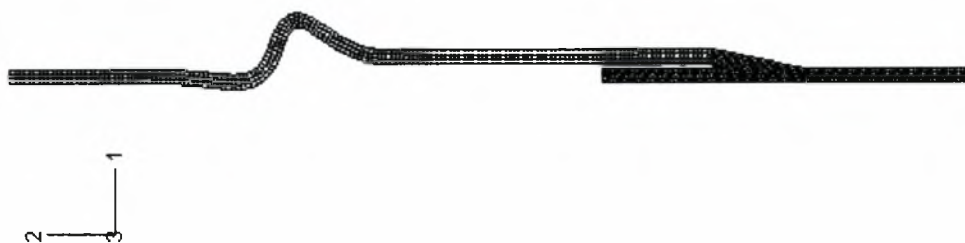
Σχήμα 4.5α παραμορφωμένο κυλινδρικό κέλυφος, χωρίς σύνδεση (straight pipe)



Σχήμα 4.5b λεπτομέρεια περιοχής αστοχίας παραμορφωμένου κυλινδρικού κελύφους χωρίς σύνδεση (straight pipe)



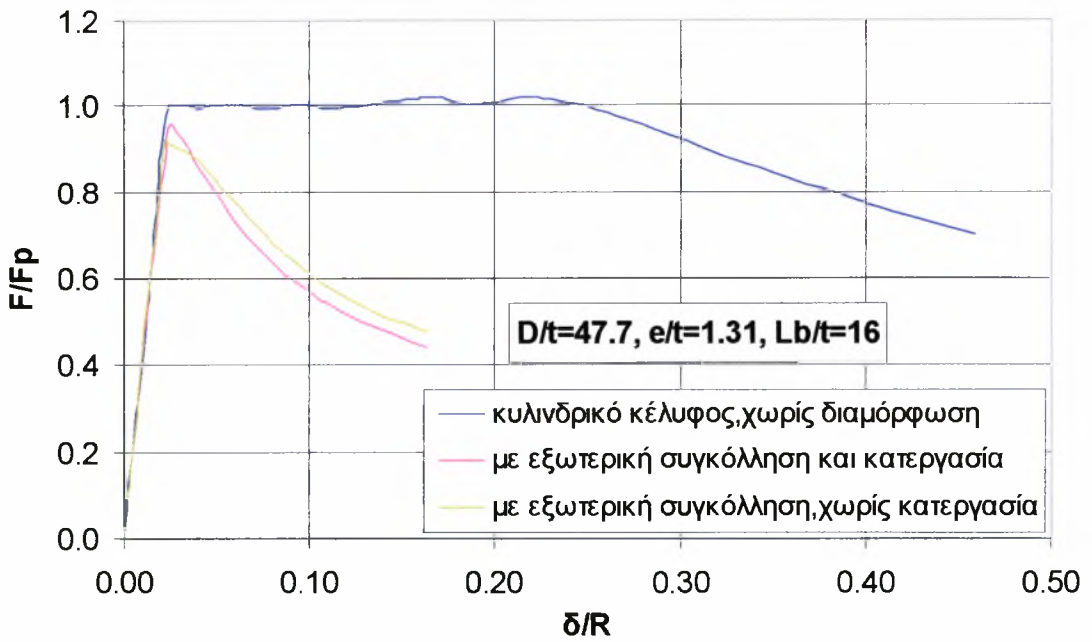
Σχήμα 4.6 λεπτομέρεια περιοχής σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η κατεργασία διαμόρφωσης της «καμπάνας» κατά την ανάλυση.



Σχήμα 4.7 λεπτομέρεια περιοχής σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους, λαμβάνοντας υπόψη την κατεργασία διαμόρφωσης της «καμπάνας» κατά την ανάλυση.

Από το σχήμα 4.5, στο οποίο απεικονίζεται η μορφή του παραμορφωμένου κυλινδρικού κελύφους χωρίς διαμόρφωση καμπάνας-συγκόλλησης, συμπεραίνεται ότι η αστοχία συμβαίνει σε τέσσερα σημεία κατά το μήκος του κελύφους. Η αριθμητική ανάλυση των μοντέλων προσομοίωσης εξωτερικά συγκολλητών συνδέσεων αγωγών, και για την περίπτωση στην οποία λαμβάνεται υπόψη η κατεργασία διαμόρφωσης της καμπάνας (σχήμα 4.7) και για την περίπτωση όπου δε συμβαίνει αυτό (σχήμα 4.6), έδειξε ότι τα κελύφη αστοχούν στην περιοχή της καμπάνας. Η κατεργασία διαμόρφωσης του άκρου του αγωγού, ούτως ώστε να πάρει τη μορφή καμπάνας, δημιουργεί παραμένουσες τάσεις οι οποίες επηρεάζουν την αντοχή του κελύφους. Από τη συγκριτική μελέτη που έγινε προέκυψαν τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο διάγραμμα του σχήματος 4.8, σύμφωνα με τα οποία η εν λόγω κατεργασία προκαλεί αύξηση στην αντοχή του κελύφους, η οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι της τάξης του 3%. Όσον αφορά στην επιρροή της ύπαρξης της διαμόρφωσης καμπάνας-συγκόλλησης στην αντοχή των κελυφών που εξετάζονται, από το ακόλουθο διάγραμμα συμπεραίνεται ότι προκαλεί μείωση της τάξης του 7%.

Σημειώνεται ότι η επιπλέον αντοχή του ευθύ, κυλινδρικού αγωγού είναι πέραν του πλαστικού φορτίου F_p , οφείλεται στην κράτυνση του υλικού και συμβαίνει σε σχετικά μεγάλη τιμή της αξονικής παραμόρφωσης ($\delta/R=0.158$).



Σχήμα 4.8 Συγκριτικό διάγραμμα αγωγών με λόγο $D/t=47.7$, $e/t=1.31$ και $L_b/t=16$.

Σημειώνεται ότι η επιρροή της κατεργασίας διαμόρφωσης της «καμπάνας» στην αντοχή του κελύφους δεν είναι σημαντική για τον υπολογισμό της οριακής αντοχής της σύνδεσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται αρχικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μελετώμενων συγκολλητών συνδέσεων, οι παράμετροι που θεωρήθηκαν για τη διεξαγωγή της παραμετρικής ανάλυσης, οι ιδιότητες του υλικού των κελυφών, τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του πλέγματος, τα βήματα της ανάλυσης και οι συνοριακές συνθήκες που θεωρήθηκαν. Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης και εξάγονται συμπεράσματα για την επιρροή κάθε παραμέτρου στην αντοχή των υπόψη κελυφών.

3.2 Προσομοίωση

Το γεγονός ότι και στα δύο εργαστηριακά πειράματα (και για την εξωτερικά συγκολλητή σύνδεση μορφής ολίσθησης και για την εσωτερικά συγκολλητή σύνδεση) η παραμόρφωση παρουσιάζει αξονική συμμετρία οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η προσομοίωση συγκολλητών συνδέσεων μορφής ολίσθησης με αξονοσυμμετρικά, διδιάστατα μοντέλα αποτελεί αποτελεσματική μέθοδο εκτίμησης της συμπεριφοράς φορτίου-μετατόπισης των εν λόγω συνδέσεων.

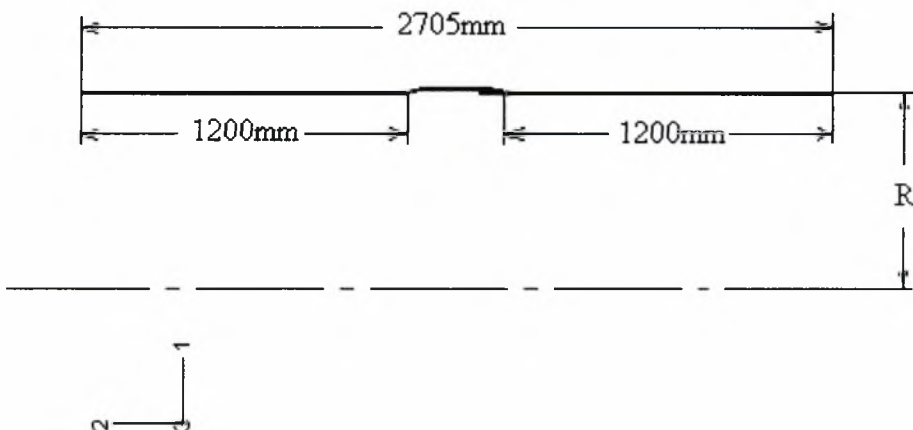
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κελυφών και παράμετροι

Κατά την μελέτη που έγινε, όλα τα μοντέλα προσομοιάζουν συγκολλητές συνδέσεις αγωγών με τα εξής κοινά γεωμετρικά χαρακτηριστικά :

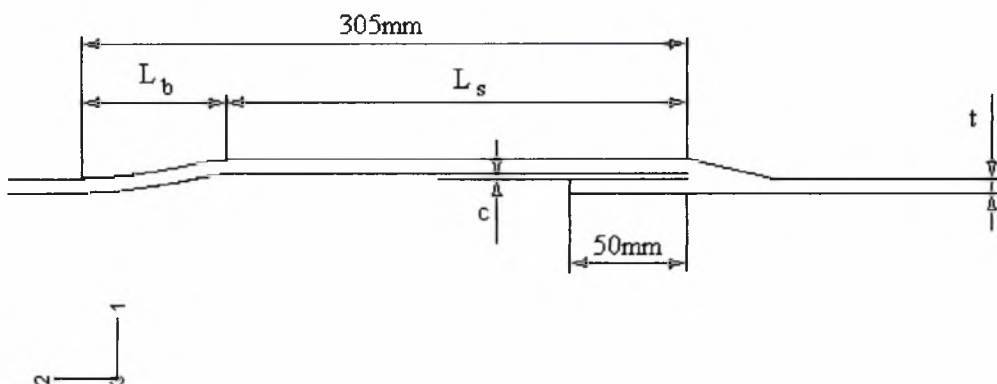
- Μήκος τμήματος αριστερού αγωγού από το αριστερό άκρο του μέχρι το τμήμα με μεταβλητή καμπυλότητα : 1200mm
- Μήκος τμήματος αριστερού αγωγού από την αρχή του τμήματος με μεταβλητή καμπυλότητα έως τη συγκόλληση : 305mm
(Σημειώνεται ότι η πιθανότητα να επηρεάζει την αντοχή του κελύφους η αλλαγή αυτού του μήκους θα εξεταστεί στην ενότητα 3.6)
- Μήκος εισχώρησης δεξιού αγωγού στον αριστερό : 50mm
- Μήκος τμήματος δεξιού αγωγού από τη συγκόλληση μέχρι το δεξί άκρο του : 1200mm.

Οι γεωμετρικές παράμετροι που θεωρήθηκαν είναι οι εξής :

- Ο λόγος διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος (D/t) για τις τιμές : 95, 61, 47.7
- Ο λόγος εκκεντρότητας προς πάχος τοιχώματος $\frac{e}{t} = \frac{c+t}{t}$, που αποτελεί την αδιαστατοποιημένη έκφραση της μεταβλητής c η οποία εκφράζει την απόσταση του εσωτερικού τοιχώματος του αριστερού αγωγού από το εξωτερικό τοίχωμα του δεξιού στην περιοχή της συγκόλλησης και εξετάστηκε η επιρροή της για τις τιμές 2mm, 3mm και 4mm.
- λόγος μήκους του τμήματος με μεταβλητή καμπυλότητα προς πάχος τοιχώματος (L_b/t) για τις τιμές : 5, 8, 12 και 16.
- ο τύπος συγκόλλησης (εσωτερική, εξωτερική, διπλή)
- η εσωτερική πίεση για ποσοστά 30% και 60% της πίεσης πλαστικοποίησης που δίνεται από τον τύπο $P_y = 2\sigma_y \frac{t}{D}$
- η απόσταση του συγκολλημένου άκρου του αριστερού αγωγού από το τμήμα με μεταβλητή καμπυλότητα (καμπάνα) που εκφράζεται με τη μεταβλητή L_s .



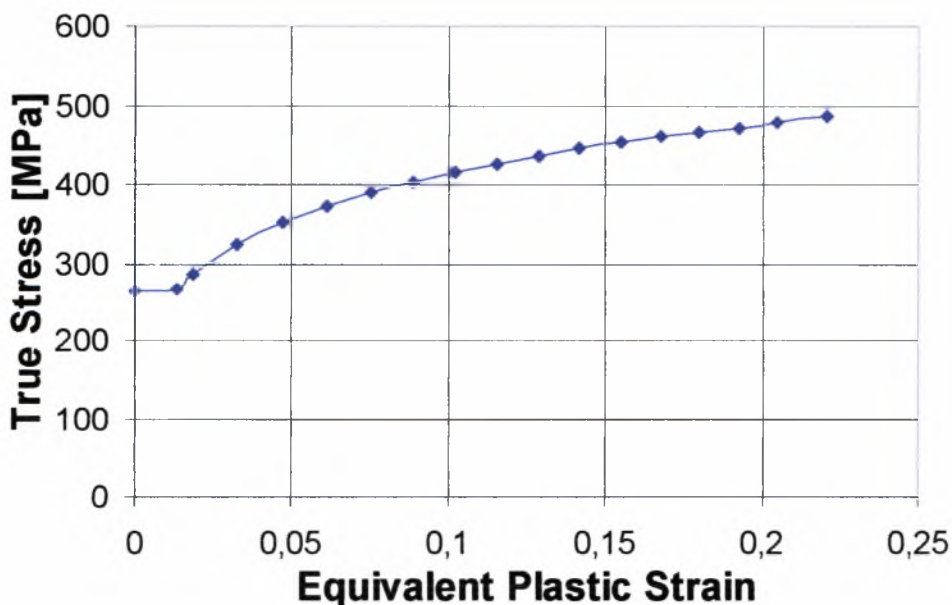
Σχήμα 3.1α Γεωμετρία συγκολλητής σύνδεσης κελυφών



Σχήμα 3.1β Λεπτομέρεια σύνδεσης κελυφών

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ

Στα μελετώμενα κελύφη επιβάλλονται μεγάλες αξονικές μετατοπίσεις, επομένως για την κατάλληλη προσομοίωση της συμπεριφοράς τους θεωρήθηκε ελαστοπλαστικό υλικό με δυνατότητα κράτυνσης. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε έχει μέτρο ελαστικότητας $E = 210000 \text{ MPa}$, τάση διαρροής $\sigma_y = 263.3 \text{ MPa}$ και λόγο Poisson $\nu = 0.3$. Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του υλικού παρατίθεται στο διάγραμμα του σχήματος 3.2.



Σχήμα 3.2 Καμπύλη πραγματικής τάσης (σ_T) και ισοδύναμης πλαστικής λογαριθμικής παραμόρφωσης (ϵ_{ln}^P).

ΠΛΕΓΜΑ

Το πλέγμα συγκροτείται από αξονοσυμμετρικά τετραγωνικά (CAX4R) και τριγωνικά (CAX3) στοιχεία και είναι δομημένο στο τμήμα όπου χρησιμοποιούνται CAX4R και ελεύθερο στο τμήμα όπου χρησιμοποιούνται CAX3. Τα τριγωνικά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της συγκόλλησης, το σχήμα της οποίας στα διδιάστατα μοντέλα είναι τριγωνικό. Πρόκειται για ένα αρκούντως πυκνό πλέγμα, με τρία στοιχεία κατά το πάχος του τοιχώματος του αγωγού.

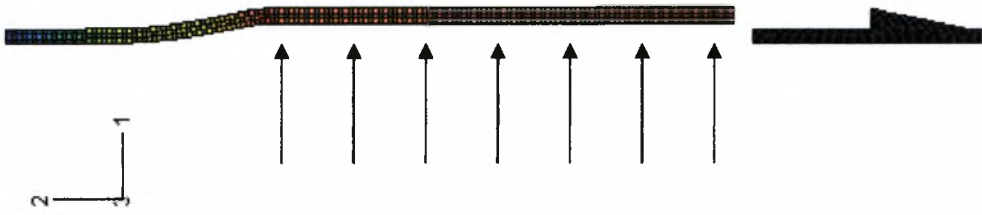
ΒΗΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Σε όλα τα μοντέλα της παραμετρικής ανάλυσης η προσομοίωση περιλαμβάνει δύο βήματα για την κατεργασία της καμπάνας (αφορούν αποκλειστικά στη διαμόρφωση του αριστερού αγωγού της σύνδεσης), ένα τρίτο βήμα για την κατάλληλη τοποθέτηση των αγωγών προς συγκόλληση και ένα τέταρτο για τη συγκόλλησή τους και την επιβολή του θλιπτικού, αξονικού φορτίου.



Σχήμα 3.3 λεπτομέρεια περιοχής των προς σύνδεση άκρων των αγωγών (πριν το πρώτο βήμα της ανάλυσης)

- Στο πρώτο βήμα συγκρατείται το αριστερό άκρο του διαμορφούμενου σωλήνα και επιβάλλεται υπολογισμένη κάθε φορά μετατόπιση στο δεξί άκρο του (το μήκος του τμήματος της περιφέρειας που συγκρατείται, καθώς επίσης και το μήκος όπου επιβάλλεται η μετατόπιση υπολογίζονται με βάση το καθορισμένο σε κάθε μοντέλο επιθυμητό μήκος του τμήματος με μεταβλητή καμπυλότητα).



Σχήμα 3.4 λεπτομέρεια περιοχής των προς σύνδεση άκρων των αγωγών (μετά το πρώτο βήμα της ανάλυσης)

- Στο δεύτερο βήμα λαμβάνει χώρα η αποφόρτιση του σωλήνα, που δέχτηκε τη μετατόπιση για να διαμορφωθεί.



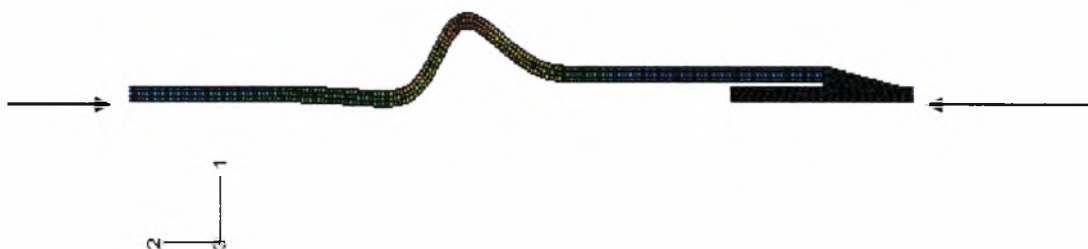
Σχήμα 3.5 λεπτομέρεια περιοχής των προς σύνδεση άκρων των αγωγών (μετά το δεύτερο βήμα της ανάλυσης)

- Στο τρίτο βήμα οι αγωγοί τοποθετούνται καταλλήλως ούτως ώστε να συγκολληθούν στο επόμενο βήμα της ανάλυσης.



Σχήμα 3.6 λεπτομέρεια περιοχής σύνδεσης των αγωγών (μετά το τρίτο βήμα της ανάλυσης)

- Στο τέταρτο βήμα συγκολλούνται οι αγωγοί και επιβάλλεται στη σύνδεση αξονική, θλιπτική μετατόπιση κατά τον άξονα 2.



Σχήμα 3.7 λεπτομέρεια περιοχής σύνδεσης των αγωγών μετά την αξονική θλίψη (μετά το τέταρτο βήμα της ανάλυσης)

Η προσομοίωση της σύνδεσης των αγωγών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η μεταβίβαση της φόρτισης από τον αριστερό στο δεξί αγωγό, έγινε με την κατάλληλη πρόσθεση επιπλέον τετραγωνικών στοιχείων (CAX4R) στο πλέγμα. Αυτά τα στοιχεία αφαιρούνται στο πρώτο βήμα της ανάλυσης και παραμένουν ανενεργά έως και το τρίτο βήμα.

Καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης είναι ενεργοποιημένη η επιλογή NLGEOM (non linear geometry) και η ανάλυση είναι μη γραμμική για τον υπολογισμό της μεταλλογισμικής συμπεριφοράς των μελετώμενων συνδέσεων.

Κατά την ανάλυση που έγινε για επιβολή εσωτερικής πίεσης επιπλέον της αξονικής μετατόπισης, στο τέταρτο βήμα, μετά την πρόσθεση των επιπλέον στοιχείων για τη σύνδεση των αγωγών, επιβάλλεται εσωτερική πίεση και σε πέμπτο βήμα επιβάλλεται και η μετατόπιση.

ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Όλες οι προσομοιώσεις που έγιναν στα πλαίσια της μελέτης που εκπονήθηκε έγιναν με συνοριακές συνθήκες που αντιστοιχούν σε δέσμευση της μετατόπισης και στα δύο άκρα και ως προς τους δύο άξονες, με εξαίρεση το αριστερό άκρο όπου επιβλήθηκε μετατόπιση κατά τον άξονα 2, η οποία αντιστοιχεί σε αξονική, θλιπτική φόρτιση.

3.3 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΠΡΟΣ ΠΑΧΟΣ

ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ (D/t)

Για να προσδιοριστεί η επίδραση της παραμέτρου D/t στην αντοχή συγκολλητών συνδέσεων χαλύβδινων αγωγών μορφής ολίσθησης έγινε προσομοίωση κελυφών, με $\frac{D}{t} = 95$, $\frac{D}{t} = 61$ και $\frac{D}{t} = 47.7$ στο αριστερό άκρο των οποίων επιβάλλεται μετατόπιση 25mm κατά τον άξονα 2. Κατά τη μελέτη της συγκεκριμένης παραμέτρου όλες οι υπόλοιπες θεωρούνται σταθερές. Ο λόγος εκκεντρότητας προς πάχος τοιχώματος είναι $\frac{e}{t} = 1.47$ και ο λόγος του μήκους τμήματος με μεταβλητή καμπυλότητα προς πάχος τοιχώματος είναι $\frac{L_b}{t} = 12$.

Η ανάλυση γίνεται απουσία εσωτερικής πίεσης. Εξετάστηκαν τρεις ομάδες κελυφών μία για τον κάθε τύπο συγκόλλησης (εξωτερική, εσωτερική ή διπλή συγκόλληση).

3.3.1 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ

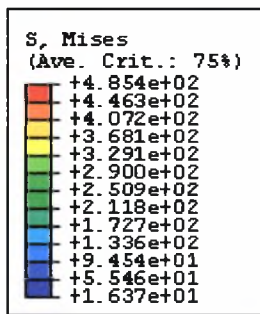
Τα συγκρινόμενα κελύφη είναι τα κάτωθι τρία:

	D(mm)	t(mm)	e(mm)	L_b (mm)	D/t	e/t	L_b/t
I	610	6.4	9.4	76.8	95	1.47	12
II	610	10	13	120	61	1.3	12
III	305	6.4	9.4	76.8	47.7	1.47	12

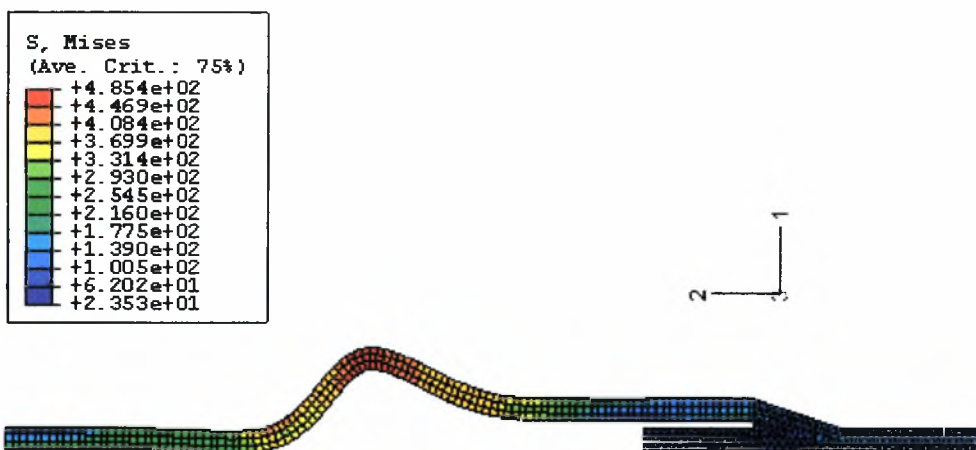
Ο λόγος $\frac{e}{t}$ δεν είναι ακριβώς ο ίδιος και για τα τρία συγκρινόμενα μοντέλα. Εν τούτοις είναι μικρή η επιρροή του όπως θα δειχθεί αργότερα σε άλλο εδάφιο.



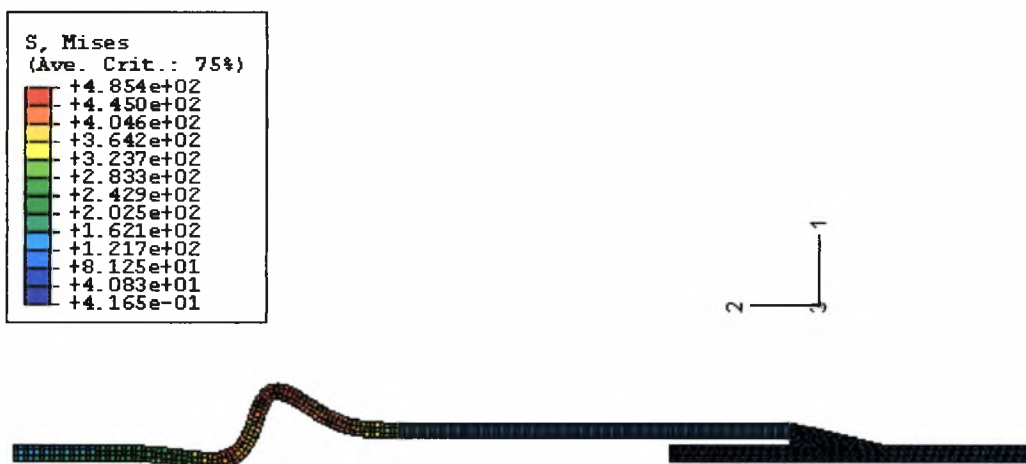
Σχήμα 3.8α παραμορφωμένο κέλυφος με $\frac{D}{t} = 95$



Σχήμα 3.8β περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{D}{t} = 95$



Σχήμα 3.9 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{D}{t} = 61$



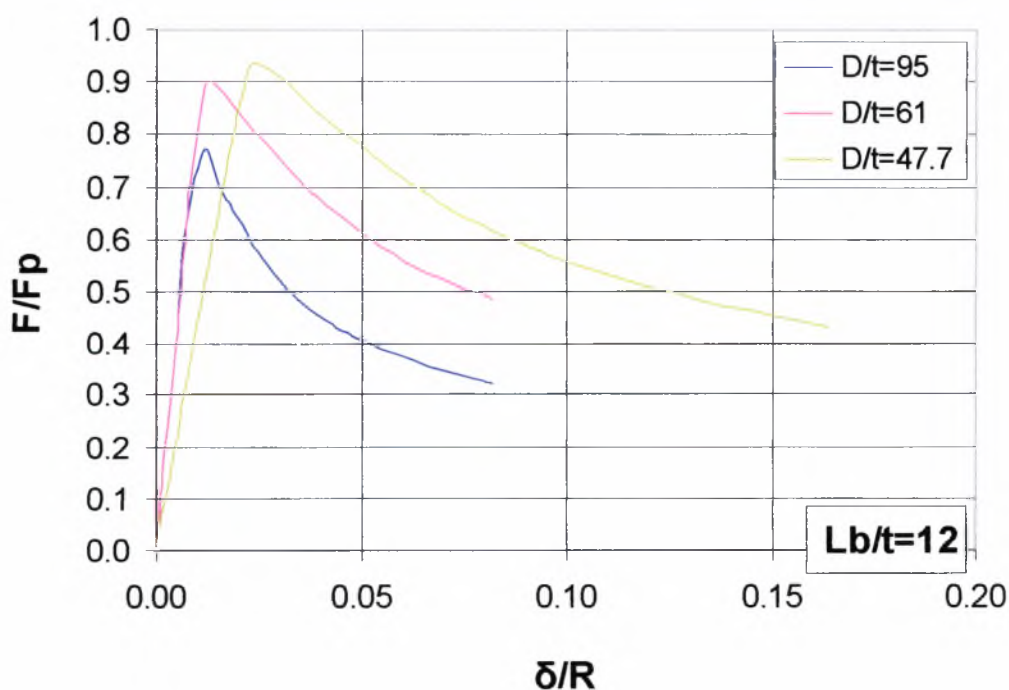
Σχήμα 3.10 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{D}{t} = 47.7$

Από τα σχήματα (3.8, 3.9 και 3.10) προκύπτει το συμπέρασμα ότι και τα τρία εξεταζόμενα κελύφη αστοχούν με την επιβολή αξονικής μετατόπισης στο τμήμα με μεταβλητή καμπυλότητα, δηλαδή στην «καμπάνα». Παρατηρείται ότι η αστοχία λαμβάνει χώρα στην περιοχή της σύνδεσης. Όσον αφορά στην επιρροή του λόγου διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος κελύφους στην αντοχή των συνδέσεων που μελετώνται, από το ακόλουθο συγκριτικό διάγραμμα (σχήμα 3.11) συμπεραίνεται ότι αυξανόμενου του λόγου D/t η αντοχή μειώνεται. Συγκεκριμένα, η μεταβολή της

αντοχής, σε σχέση με το πλαστικό φορτίο της διατομής του κελύφους, που υπολογίζεται για τις δυο ακραίες τιμές σύγκρισης $\frac{D}{t} = 47.7$ και 95 είναι της τάξης του 16%, αφού από την ανάλυση προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές $\frac{F_u}{F_p} = 0.932$ και 0.771. Η μεταβολή που παρατηρείται ανάμεσα στα κελύφη με $\frac{D}{t} = 47.7$ και 61 είναι 3%, ενώ αντίστοιχα για τα κελύφη με $\frac{D}{t} = 61$ και 95 παρατηρείται μεταβολή κατά 13%.

Στο ακόλουθο συγκριτικό διάγραμμα (Σχήμα 3.11), όπως και σε όλα τα διαγράμματα που θα παρατεθούν κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της μελέτης, απεικονίζεται η δύναμη συναρτήσει της μετατόπισης κατά τον άξονα επιβολής του φορτίου. Σημειώνεται ότι τα μεγέθη είναι αδιαστατοποιημένα, αφού η δύναμη έχει αδιαστατοποιηθεί ως προς την δύναμη πλαστικοποίησης που αντιστοιχεί στο κάθε κέλυφος και δίνεται από τον τύπο 3.1, ενώ η μετατόπιση έχει αδιαστατοποιηθεί ως προς την ακτίνα του εκάστοτε κελύφους.

$$F_p = \sigma_y \cdot 2\pi \cdot R_m \cdot t \quad (3.1)$$



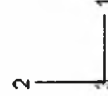
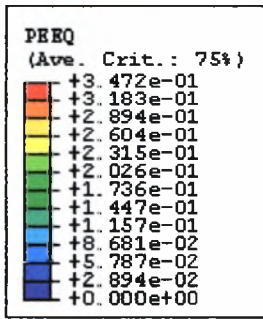
Σχήμα 3.11 Συγκριτικό διάγραμμα εξωτερικά συγκολλητών συνδέσεων κελυφών με $D/t=95, 61, 47.7$

3.3.2 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ

Τα συγκρινόμενα κελύφη έχουν λόγο $\frac{e}{t}=1.47$, $\frac{L_b}{t}=12$ και λόγο $\frac{D}{t}$ ίσο με 95 και 47.7. Όσον αφορά στην πρώτη από τις προς σύγκριση συνδέσεις κελυφών, εσωτερικά συγκολλητών, μετά την επιβολή μετατόπισης κατά τον άξονα 2 η αστοχία παρατηρείται στη περιοχή της σύνδεσης και μάλιστα πολύ κοντά στη συγκόλληση (Σχήμα 3.12β). Εξαιτίας αυτού του γεγονότος και για την πιστότερη δυνατή προσομοίωση της συμπεριφοράς του κελύφους αυτής της γεωμετρίας, κατά την ανάλυση στο τέταρτο βήμα λήφθηκε υπόψη η αλληλεπίδραση επαφής των επιφανειών, η οποία είναι εμφανής στη λεπτομέρεια της περιοχής της σύνδεσης του κελύφους με $\frac{D}{t} = 95$ (Σχήμα 3.12β). Κατά την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης επαφής δεν επιτρέπεται στον εσωτερικό αγωγό να επικαλύψει τον εξωτερικό όπως θα είχε συμβεί χωρίς αυτή τη θεώρηση. Επομένως τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση είναι ακριβέστερα. (Σημειώνεται ότι η πιθανή τριβή αμελήθηκε.)



Σχήμα 3.12α παραμορφωμένο κέλυφος με $\frac{D}{t} = 95$



Σχήμα 3.12β λεπτομέρεια περιοχής σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με

$$\frac{D}{t} = 95$$

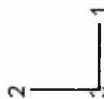
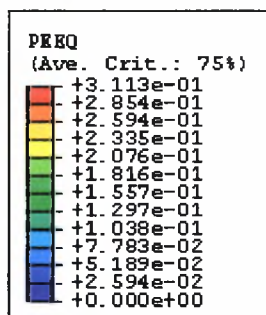
Και κατά την ανάλυση της δεύτερης από τις προς σύγκριση συνδέσεις κελυφών, εσωτερικά συγκολλητών, έγινε επίσης η θεώρηση της αλληλεπίδρασης επαφής των επιφανειών στην περιοχή της συγκόλλησης. Αυτή η θεώρηση είναι καθοριστικής σημασίας αφού όπως φαίνεται και στη λεπτομέρεια της περιοχής σύνδεσης του

παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{D}{t} = 47.7$ (Σχήμα 3.13β) υφίσταται επαφή μεταξύ των

εν λόγω επιφανειών που μάλιστα αυξάνει και την αντοχή του κελύφους το οποίο τελικά λυγίζει σε άλλο σημείο και όχι στην περιοχή της συγκόλλησης.



Σχήμα 3.13α παραμορφωμένο κέλυφος με $\frac{D}{t} = 47.7$



Σχήμα 3.13β λεπτομέρεια περιοχής σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με

$$\frac{D}{t} = 47.7$$

Μελετώντας τη μορφή των δύο παραμορφωμένων κελυφών αυτής της υποενοότητας (σχήματα 3.12, 3.13) προκύπτει το συμπέρασμα ότι και τα δύο εξεταζόμενα κελύφη αστοχούν με την επιβολή θλιπτικής, αξονικής μετατόπισης στην περιοχή της συγκόλλησης. Όσον αφορά στην επιρροή του λόγου διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος κελύφους, από το ακόλουθο συγκριτικό διάγραμμα (σχήμα 3.14)

συμπεραίνεται ότι η αντοχή των εξεταζόμενων κελυφών με $\frac{e}{t} = 1.47$ και $\frac{L_b}{t} = 12$

μειώνεται αυξανόμενου του λόγου $\frac{D}{t}$. Επίσης παρατηρείται σημαντική

μεταλυγισμική αντοχή στην περίπτωση με $\frac{D}{t} = 47.7$ εξαιτίας της οποίας κατά την

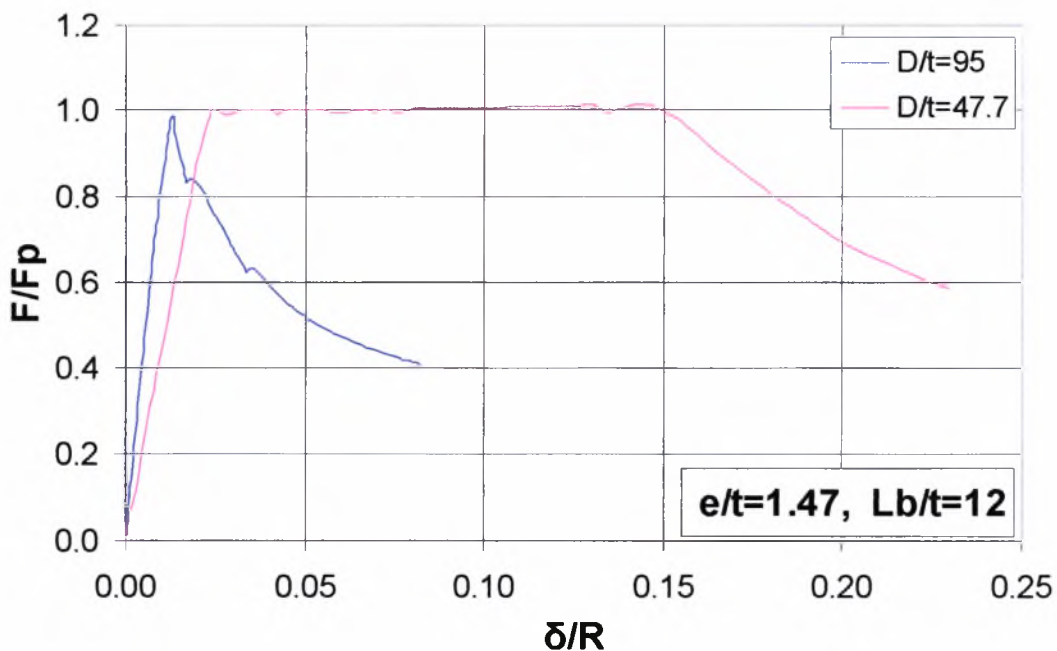
αριθμητική επίλυση επιβλήθηκε αξονική μετατόπιση μεγαλύτερη από εκείνη που

είχε επιβληθεί στην περίπτωση με $\frac{D}{t} = 95$, για να αστοχήσει. Συγκεκριμένα, η

μεταβολή της αντοχής που υπολογίζεται για τις δυο τιμές σύγκρισης $\frac{D}{t} = 47.7$ και 95

είναι 2.3%, αφού από την ανάλυση προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές $\frac{F_u}{F_p} = 1.01$ και

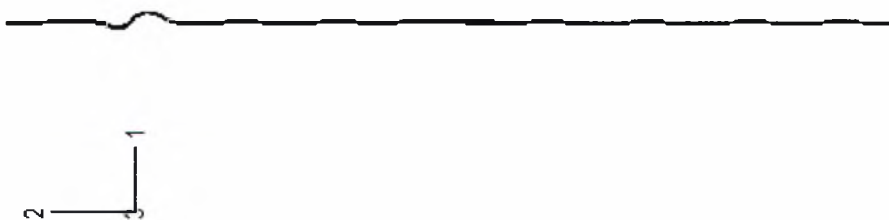
0.987.



Σχήμα 3.14 Συγκριτικό διάγραμμα εσωτερικά συγκολλητών συνδέσεων κελυφών με $D/t=95, 47.7$

3.3.3 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΔΙΠΛΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ

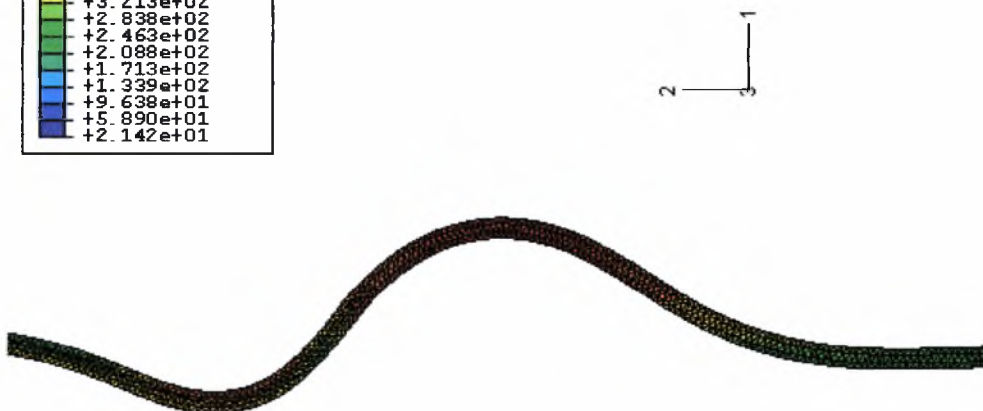
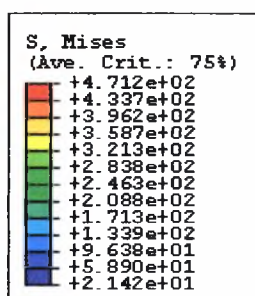
Τα συγκρινόμενα κελύφη έχουν λόγο $\frac{e}{t}=1.47$, $\frac{L_b}{t}=12$ και λόγο $\frac{D}{t}$ ίσο με 95 και 47.7.



Σχήμα 3.15α παραμορφωμένο κέλυφος με $\frac{D}{t} = 95$



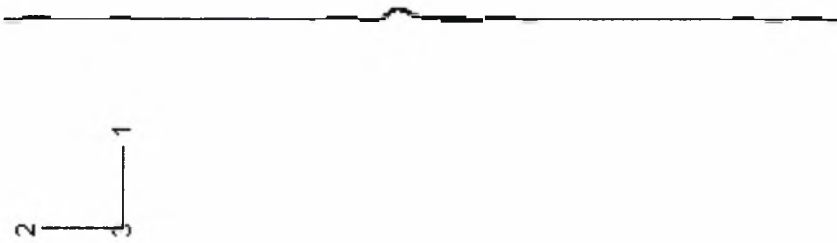
Σχήμα 3.15β περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{D}{t} = 95$



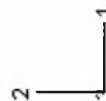
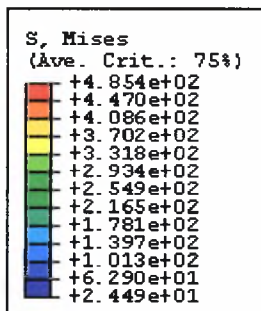
Σχήμα 3.15γ περιοχή αστοχίας παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{D}{t} = 95$

Από τη μορφή του παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{D}{t} = 95$ (Σχήμα 3.15α)

συμπεραίνεται ότι η αστοχία λαμβάνει χώρα σε σημείο αρκετά απομακρυσμένο από τη διαμόρφωση καμπάνας-συγκόλλησης. Επίσης σημειώνεται ότι αυτή η συγκολλημένη σύνδεση αγωγών παρουσιάζει μεταλυγισμική αντοχή, όπως παρατηρείται στο συγκριτικό διάγραμμα που παρατίθεται παρακάτω (Σχήμα 3.17).



Σχήμα 3.16α παραμορφωμένο κέλυφος με $\frac{D}{t} = 47.7$

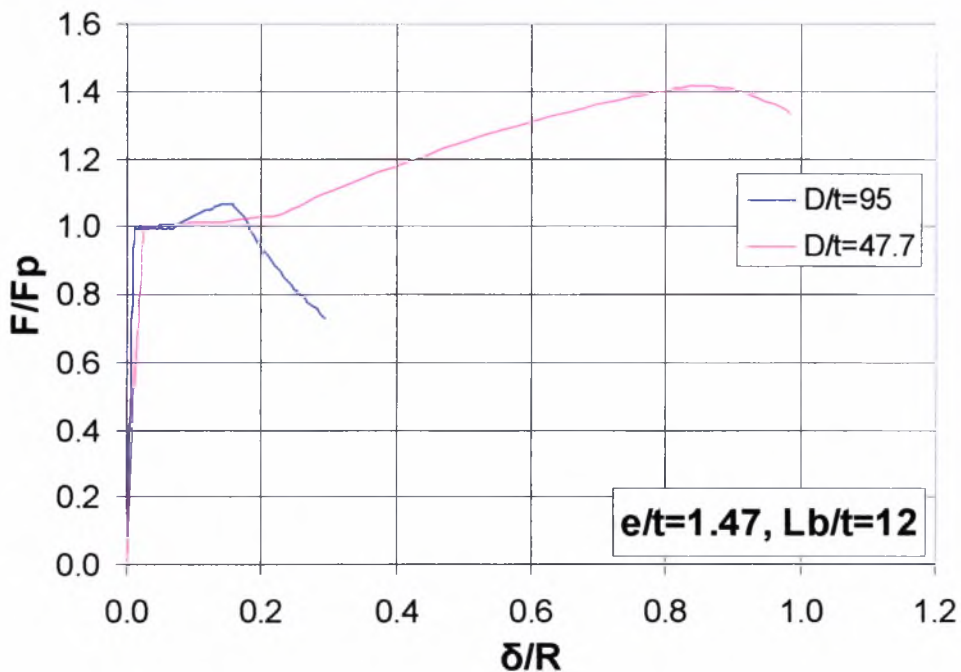


Σχήμα 3.16β περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{D}{t} = 47.7$

Με την ανάλυση της δεύτερης από τις προς σύγκριση διπλά συγκολλημένες συνδέσεις κελυφών, είναι εμφανές στα σχήματα 3.16 το γεγονός ότι η αστοχία συμβαίνει στο τμήμα μεταβλητής καμπυλότητας, δηλαδή στην περιοχή της «καμπάνας». Επίσης διαπιστώνεται με βάση το επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 3.17) ότι το κέλυφος αυτό παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταλυγισμική αντοχή από το προηγούμενο.

Όσον αφορά στην επιρροή του λόγου διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος κελύφους στην αντοχή των συνδέσεων που μελετώνται σε αυτή την υποενότητα, από το ακόλουθο συγκριτικό διάγραμμα (σχήμα 3.17) συμπεραίνεται ότι αυξανόμενου του λόγου D/t η αδιαστατοποιημένη αντοχή μειώνεται. Συγκεκριμένα, η μεταβολή της αντοχής που υπολογίζεται για τις δυο τιμές σύγκρισης $\frac{D}{t} = 47.7$ και 95 είναι 35%, αφού από την ανάλυση προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές $\frac{F_u}{F_p} = 1.42$ και 1.07.

Σημειώνεται ότι η σύνδεση με $D/t=47.7$ αστοχεί για $\delta/R=0.84$, τιμή αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή αστοχίας του κελύφους με $D/t=95$ η οποία είναι μόλις $\delta/R=0.14$.



Σχήμα 3.17 Συγκριτικό διάγραμμα διπλά συγκολλητών συνδέσεων κελυφών με $D/t=95, 47.7$

3.4 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΕΚΚΕΝΤΡΟΤΗΤΑΣ ΠΡΟΣ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ (e/t)

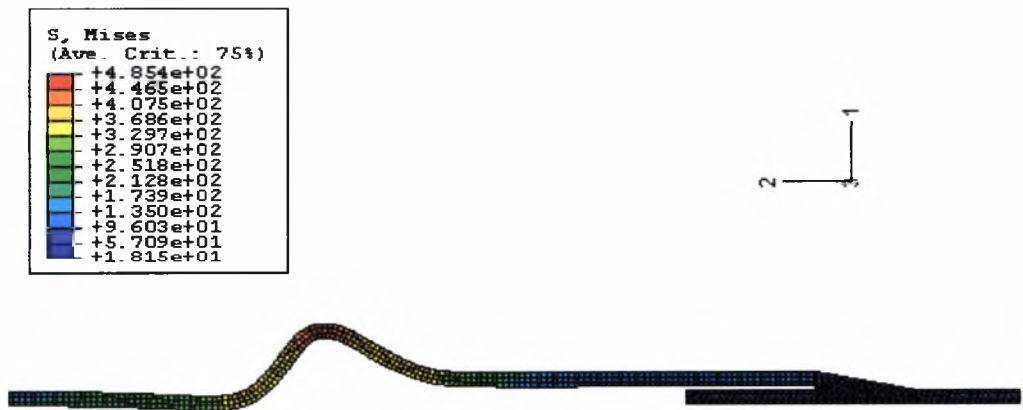
Στόχος σε αυτό το στάδιο της μελέτης ήταν να διαπιστωθεί η επιρροή της παραμέτρου $\frac{e}{t}$ στην αντοχή των μελετώμενων συνδεδεμένων αγωγών για καθέναν από τους τρεις τύπους συγκόλλησης.

3.4.1 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ

Η πρώτη ομάδα αποτελείται από τρεις υποομάδες, για $\frac{D}{t}=95$, 61 και 47.7 αντίστοιχα και η κάθε υποομάδα από τρία μοντέλα προσομοίωσης, γιατί στην εξεταζόμενη παράμετρο $\frac{e}{t}$ δίνονται τρεις τιμές καθώς οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές.

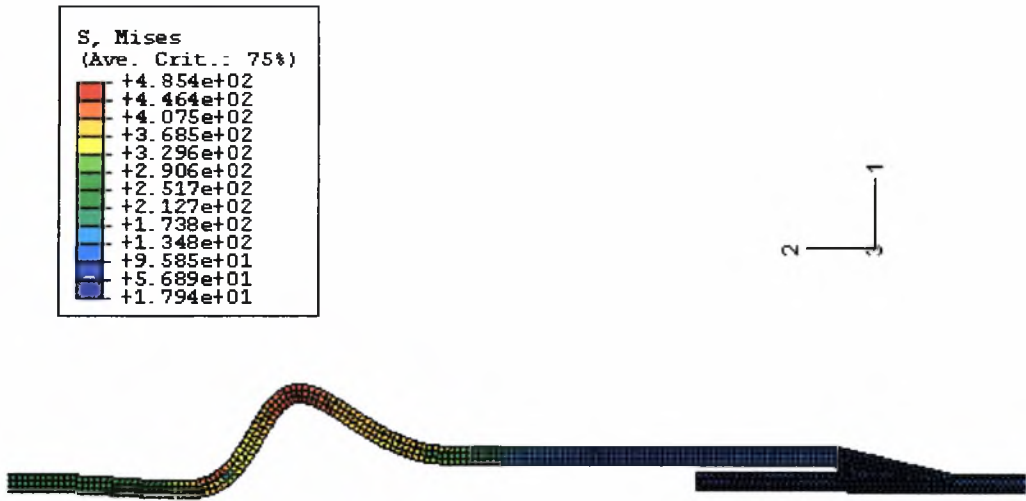
3.4.1.1 ΠΡΩΤΗ ΥΠΟΟΜΑΔΑ (ΓΙΑ ΚΕΛΥΦΗ ΜΕ $\frac{D}{t}=95$)

Τα συγκρινόμενα κελύφη έχουν λόγο $D/t=95$, $L_b/t=16$, ενώ οι τιμές που δίνονται στην παράμετρο e/t είναι 1.31, 1.47 και 1.62.



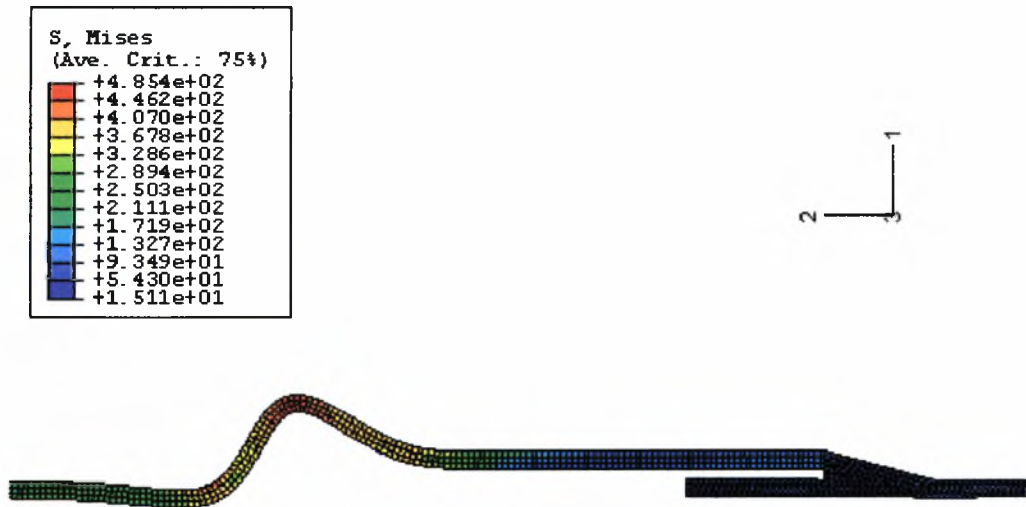
Σχήμα 3.18 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{e}{t}=1.31$, $\frac{D}{t}=95$ και

$$\frac{L_b}{t} = 16 \text{ (συγκόλληση εξωτερική).}$$



Σχήμα 3.19 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{e}{t} = 1.47$, $\frac{D}{t} = 95$ και

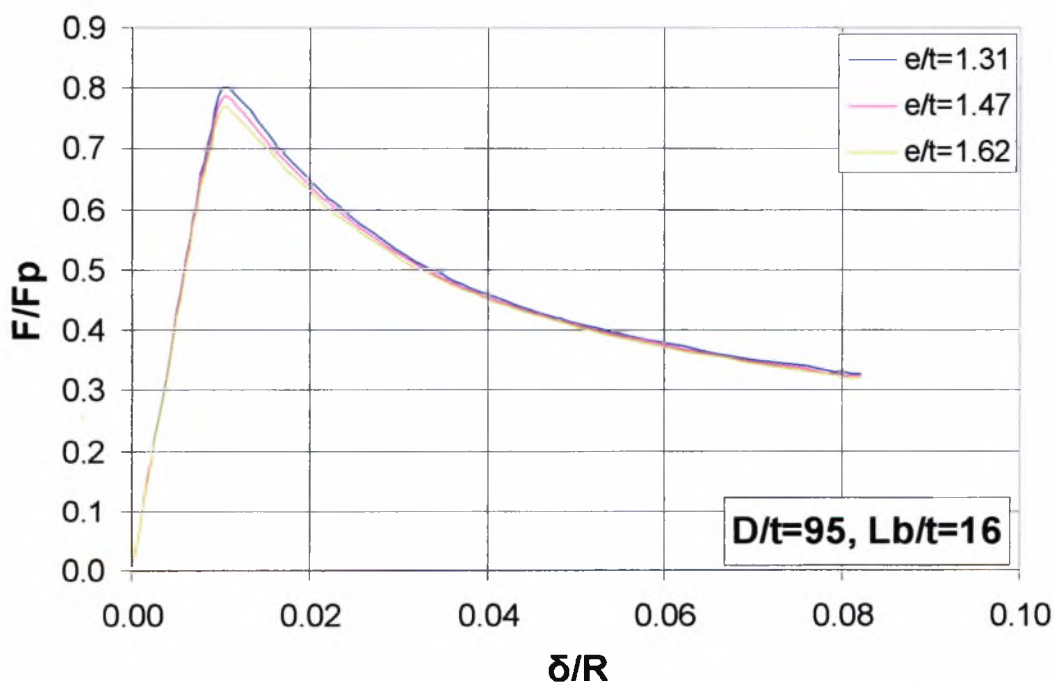
$$\frac{L_b}{t} = 16 \text{ (συγκόλληση εξωτερική).}$$



Σχήμα 3.20 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{e}{t} = 1.62$, $\frac{D}{t} = 95$ και

$$\frac{L_b}{t} = 16 \text{ (συγκόλληση εξωτερική).}$$

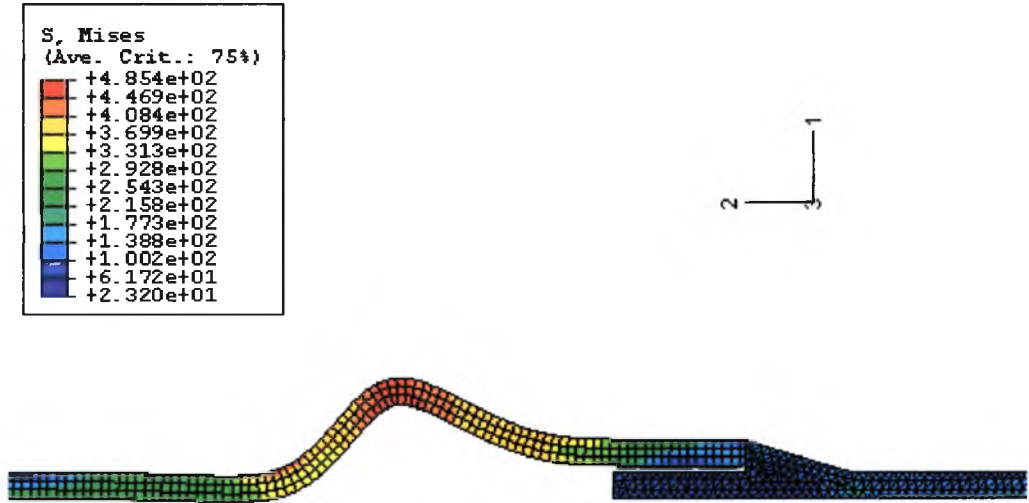
Από τα σχήματα 3.18, 3.19 και 3.20 προκύπτει το συμπέρασμα ότι και τα τρία εξεταζόμενα κελύφη αστοχούν με την επιβολή αξονικής μετατόπισης στο ίδιο σημείο και μάλιστα στο τμήμα με μεταβλητή καμπυλότητα, δηλαδή στην «καμπάνα». Παρατηρείται ότι η αστοχία λαμβάνει χώρα σχετικά κοντά στην περιοχή της συγκόλλησης. Όσον αφορά στην επιρροή στον λόγο της εκκεντρότητας (που οφείλεται στην μεταβολή της καμπυλότητας στην εν λόγω περιοχή όπου και λαμβάνει χώρα η αστοχία) προς το πάχος τοιχώματος κελύφους, από το ακόλουθο συγκριτικό διάγραμμα (σχήμα 3.21) συμπεραίνεται ότι η αντοχή των εξεταζόμενων κελυφών με $D/t = 95$ και $L_b/t = 16$ μειώνεται αυξανόμενου του e/t . Ωστόσο η μεταβολή της αντοχής που παρατηρείται για τις ακραίες τιμές σύγκρισης $\frac{e}{t} = 1.31$ και 1.62 είναι της τάξης του 3.5% και οι αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από την αριθμητική επίλυση είναι $\frac{F_u}{F_p} = 0.802$ και 0.76 . Η μεταβολή είναι δηλαδή πολύ μικρή.



Σχήμα 3.21 Συγκριτικό διάγραμμα εξωτερικά συγκολλητών συνδέσεων κελυφών με λόγο $D/t=95$ και λόγο $L_b/t=16$.

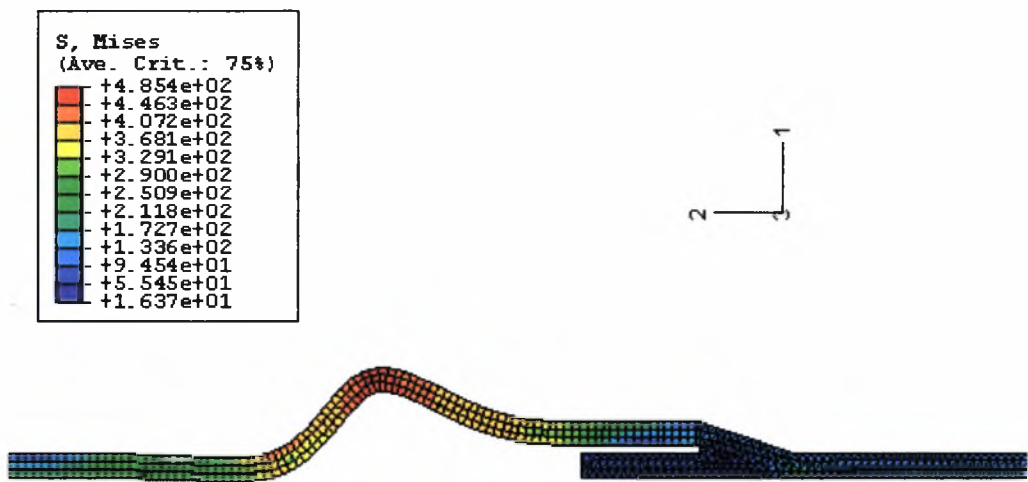
3.4.1.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΥΠΟΟΜΑΔΑ (ΓΙΑ ΚΕΛΥΦΗ ΜΕ $\frac{D}{t} = 61$)

Τα συγκρινόμενα κελύφη έχουν λόγο $D/t=61$, $L_b/t=16$, ενώ οι τιμές που δίνονται στην παράμετρο e/t είναι 1.2, 1.3 και 1.4.



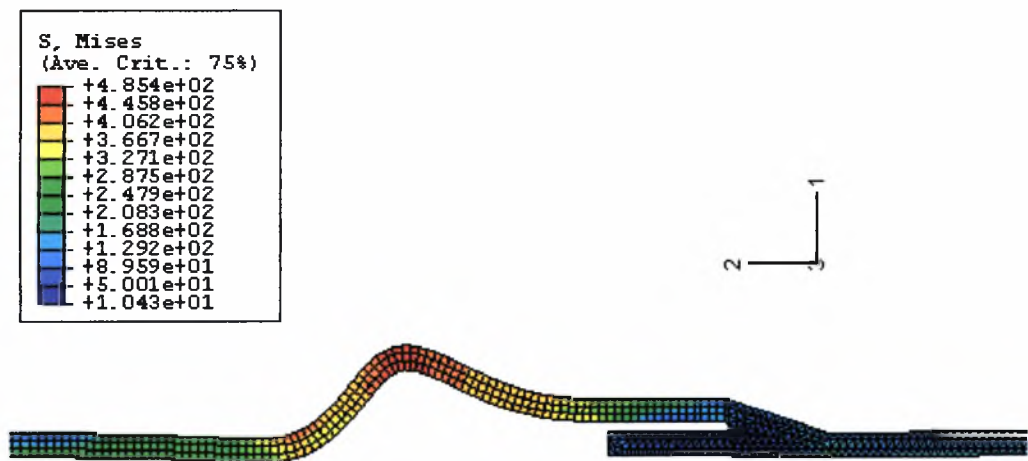
Σχήμα 3.22 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{e}{t} = 1.2$, $\frac{D}{t} = 61$ και

$$\frac{L_b}{t} = 16 \text{ (συνγκόλληση εξωτερική).}$$



Σχήμα 3.23 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{e}{t}=1.3$, $\frac{D}{t}=61$ και

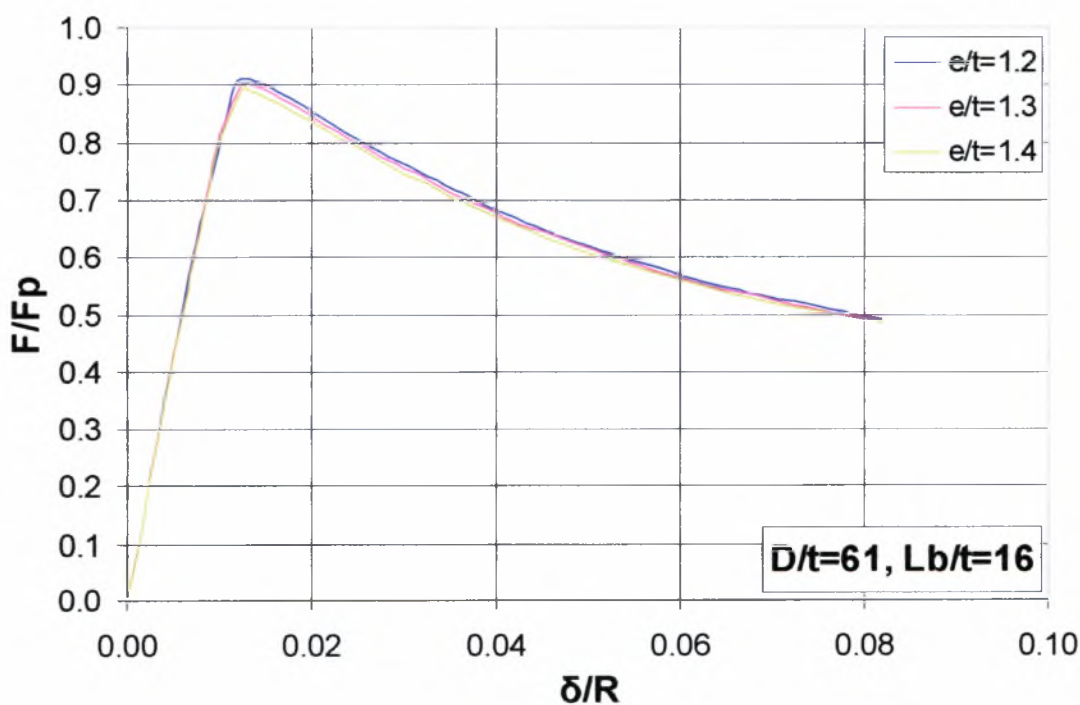
$$\frac{L_b}{t}=16 \text{ (συγκόλληση εξωτερική).}$$



Σχήμα 3.24 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{e}{t}=1.4$, $\frac{D}{t}=61$ και

$$\frac{L_b}{t}=16 \text{ (συγκόλληση εξωτερική).}$$

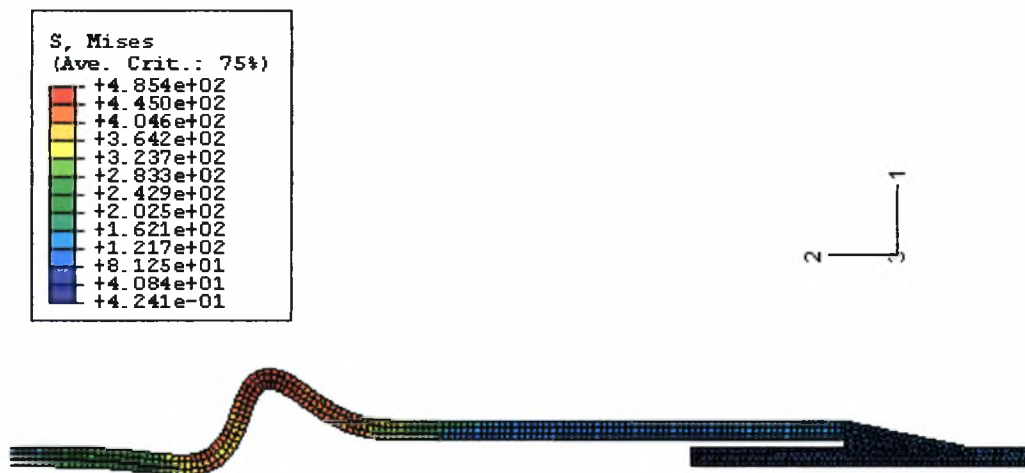
Μελετώντας τη μορφή των παραμορφωμένων κελυφών αυτής της υποομάδας, δηλαδή με $D/t= 61$, (σχήματα 3.22, 3.23 και 3.24) προκύπτει το συμπέρασμα ότι, με την επιβολή αξονικής μετατόπισης, και τα τρία εξεταζόμενα κελύφη αστοχούν στο τμήμα με μεταβλητή καμπυλότητα. Παρατηρείται ότι η αστοχία συμβαίνει ακόμη πιο κοντά στη συγκόλληση, συγκριτικά με εκείνα της πρώτης υποομάδας, το οποία έχουν λόγο $D/t=95$. Όσον αφορά στην επιρροή του λόγου της εκκεντρότητας (που οφείλεται στην μεταβολή της καμπυλότητας στην εν λόγω περιοχή όπου και λαμβάνει χώρα η αστοχία) προς το πάχος τοιχώματος κελύφους, από το συγκριτικό διάγραμμα που παρατίθεται ακολούθως (σχήμα 3.25) συμπεραίνεται ότι η αντοχή των εξεταζόμενων κελυφών με $D/t = 95$ και $L_b/t = 16$ μειώνεται αυξανόμενου του e/t . Ωστόσο η μεταβολή της αντοχής που παρατηρείται για τις ακραίες τιμές σύγκρισης ($\frac{e}{t}=1.2$ και 1.4) είναι 2.3%, δηλαδή σχεδόν αμελητέα.



Σχήμα 3.25 Συγκριτικό διάγραμμα εξωτερικά συγκολλητών συνδέσεων κελυφών με λόγο $D/t=61$ και λόγο $L_b/t=16$.

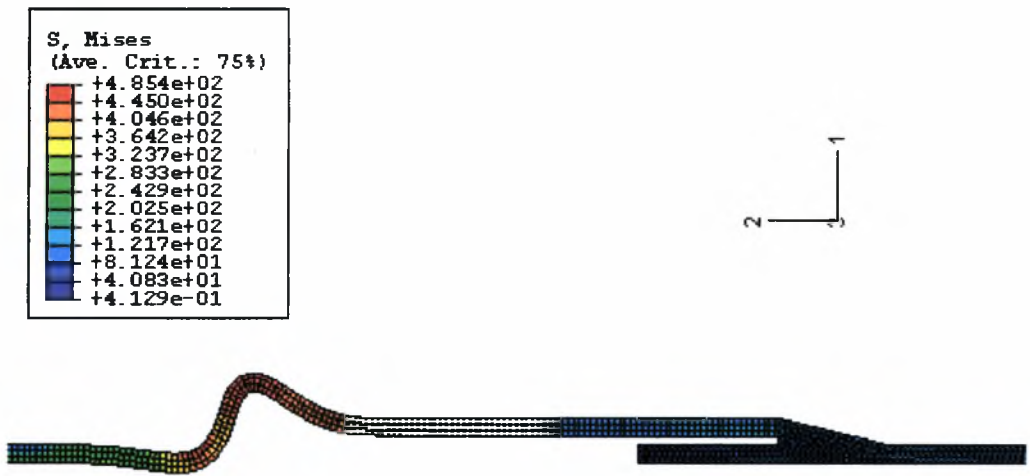
3.4.1.3 ΤΡΙΤΗ ΥΠΟΟΜΑΔΑ (ΓΙΑ ΚΕΛΥΦΗ ΜΕ $\frac{D}{t} = 47.7$)

Τα συγκρινόμενα κελύφη έχουν λόγο $D/t=47.7$, $L_b/t=16$, ενώ οι τιμές που δίνονται στην παράμετρο e/t είναι 1.31, 1.47 και 1.62.



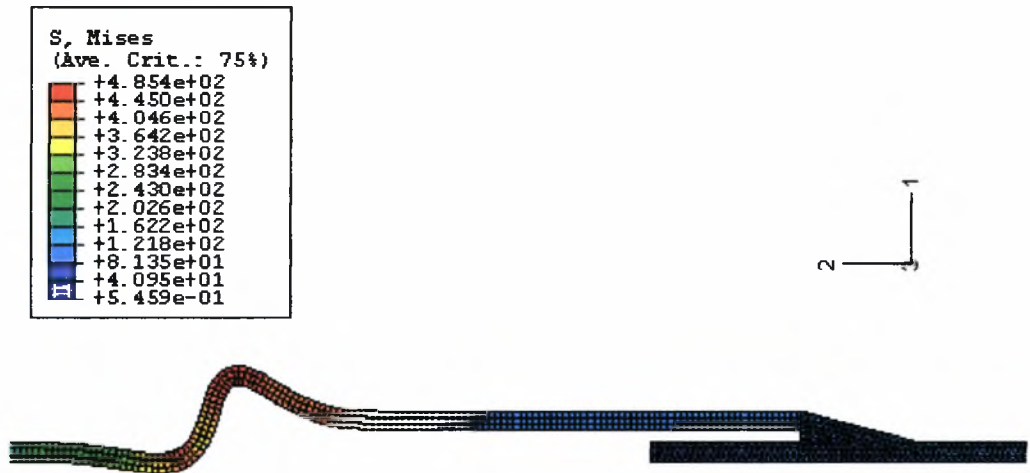
Σχήμα 3.26 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{e}{t} = 1.31$, $\frac{D}{t} = 47.7$ και

$$\frac{L_b}{t} = 16 \text{ (συγκόλληση εξωτερική).}$$



Σχήμα 3.27 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{e}{t}=1.47$, $\frac{D}{t}=47.7$ και

$$\frac{L_b}{t}=16 \text{ (συγκόλληση εξωτερική).}$$



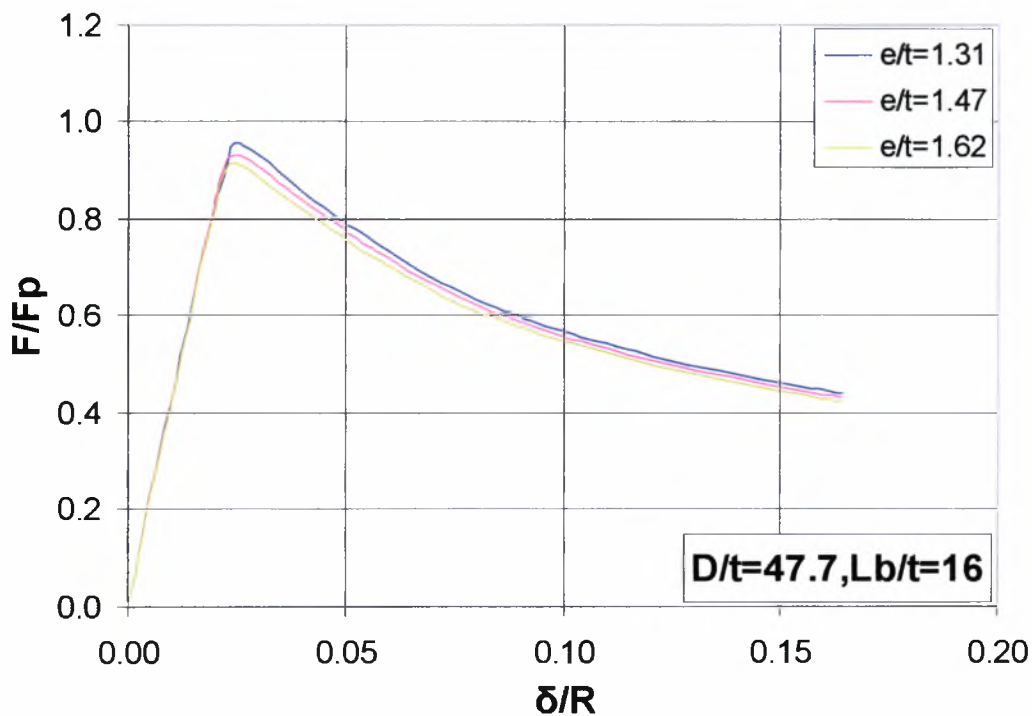
Σχήμα 3.28 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{e}{t}=1.62$, $\frac{D}{t}=47.7$ και

$$\frac{L_b}{t}=16 \text{ (συγκόλληση εξωτερική).}$$

Και τα εξεταζόμενα κελύφη αυτής της υποομάδας, υποβαλλόμενα σε θλιπτική αξονική μετατόπιση, αστοχούν στο τμήμα μεταβλητής καμπυλότητας, δηλαδή στην

περιοχή της «καμπάνας», δηλαδή στην περιοχή της σύνδεσης. Αυτή η διαπίστωση προκύπτει με τη μελέτη των σχημάτων 3.26, 3.27 και 3.28. Όσον αφορά στην επιρροή του λόγου εκκεντρότητας (που οφείλεται στην μεταβολή της καμπυλότητας στην εν λόγω περιοχή όπου και λαμβάνει χώρα η αστοχία) προς πάχος τοιχώματος κελύφους, από το ακόλουθο συγκριτικό διάγραμμα (σχήμα 3.29) εξάγεται το συμπέρασμα ότι η αντοχή των εξεταζόμενων κελυφών με $D/t = 95$ και $L_b/t = 16$ μειώνεται αυξανόμενης της παραμέτρου e/t . Ωστόσο η μεταβολή της αντοχής που παρατηρείται για τις ακραίες τιμές σύγκρισης $\frac{e}{t} = 1.31$ και 1.62 είναι της τάξης του

4.5%, οι δε αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν είναι $\frac{F_u}{F_p} = 0.955$ και 0.911 .

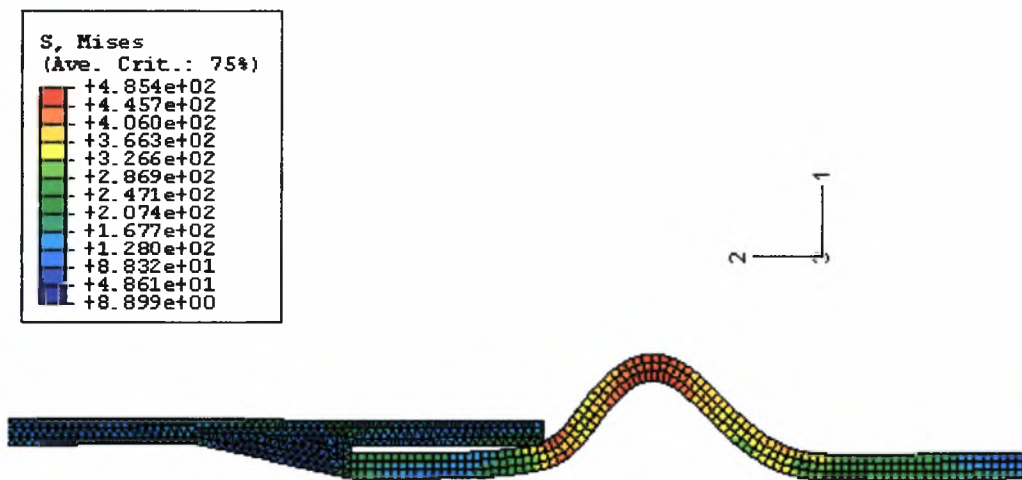


Σχήμα 3.29 Συγκριτικό διάγραμμα εξωτερικά συγκολλητών συνδέσεων αγωγών με λόγο $D/t=47.7$ και λόγο $L_b/t=16$.

3.4.2 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ

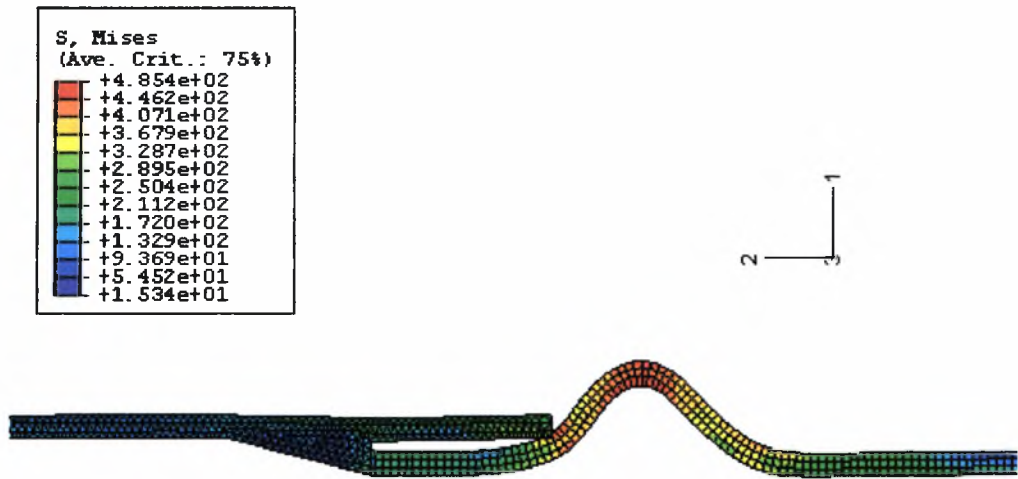
Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης τριών μοντέλων προσομοίωσης κελυφών με $\frac{D}{t} = 95$ και $L_b = 16$. Οι συνδέσεις αγωγών που μελετώνται σε αυτή την ενότητα είναι συγκολλημένες εσωτερικά. Στην εξεταζόμενη παράμετρο $\frac{e}{t}$ δίνονται τρεις τιμές, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές.

Τα συγκρινόμενα κελύφη έχουν λόγο D/t ίσο με 95, λόγο $L_b/t = 16$, ενώ οι τιμές που δίνονται στην παράμετρο e/t είναι 1.31, 1.47 και 1.62.



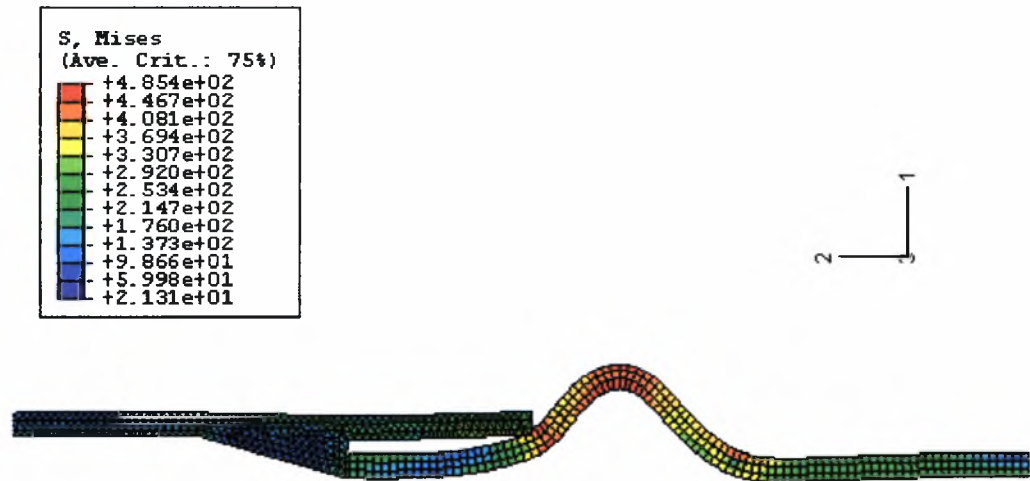
Σχήμα 3.30 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{e}{t} = 1.31$, $\frac{D}{t} = 95$ και

$$\frac{L_b}{t} = 16 \text{ (συγκόλληση εσωτερική).}$$



Σχήμα 3.31 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{e}{t}=1.47$, $\frac{D}{t}=95$ και

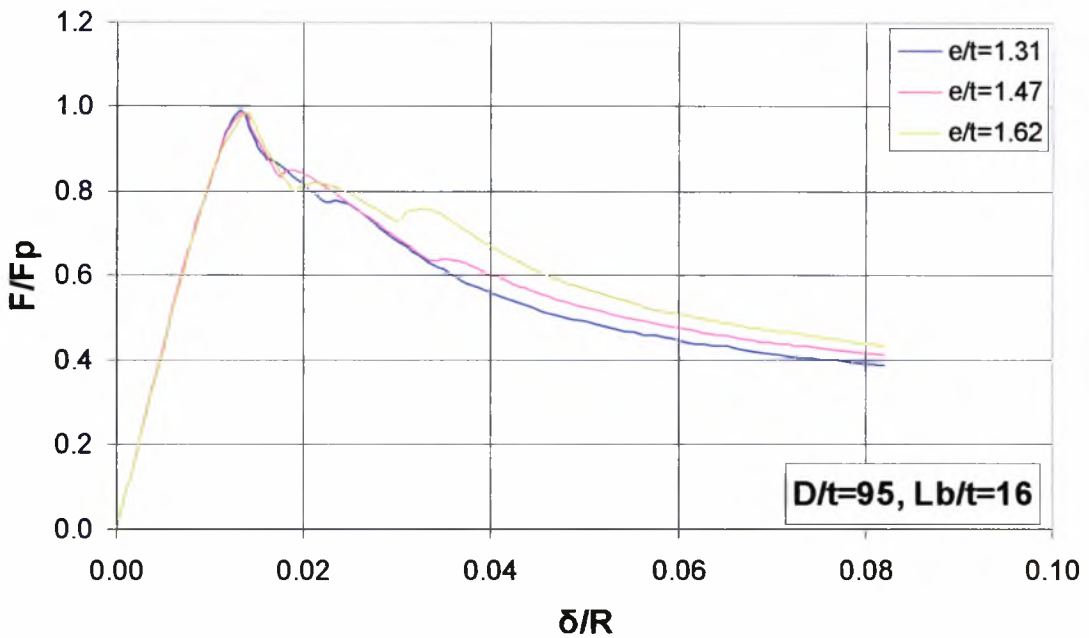
$$\frac{L_b}{t}=16 \text{ (συγκόλληση εσωτερική).}$$



Σχήμα 3.32 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{e}{t}=1.62$, $\frac{D}{t}=95$ και

$$\frac{L_b}{t}=16 \text{ (συγκόλληση εσωτερική).}$$

Μελετώντας τη μορφή των παραμορφωμένων κελυφών αυτής της ομάδας (σχήματα 3.30, 3.31 και 3.32) προκύπτει το συμπέρασμα ότι και τα τρία εξεταζόμενα κελύφη αστοχούν με την επιβολή θλιπτικής, αξονικής μετατόπισης στην περιοχή της σύνδεσης. Όσον αφορά στην επιρροή του λόγου της εκκεντρότητας (που οφείλεται στην μεταβολή της καμπυλότητας στην περιοχή της «καμπάνας») προς το πάχος τοιχώματος κελύφους, από το ακόλουθο συγκριτικό διάγραμμα (σχήμα 3.33) συμπεραίνεται ότι η αντοχή των εξεταζόμενων κελυφών με $D/t = 95$ και $L_b/t = 16$ μειώνεται ελάχιστα αυξανόμενου του e/t . Συγκεκριμένα, η μεταβολή της αντοχής που παρατηρείται για τις ακραίες τιμές σύγκρισης ($\frac{e}{t} = 1.31$ και 1.62) είναι της τάξης του 0.7% (οι αντίστοιχες τιμές $\frac{F_u}{F_p} = 0.991$ και 0.984). Το γεγονός ότι η επιρροή του λόγου $\frac{e}{t}$ είναι πολύ μικρή στην περίπτωση εσωτερικά συγκολλητών συνδέσεων αγωγών επιβεβαιώνεται απ' το ότι η αστοχία σε αυτά τα κελύφη δε συμβαίνει στην περιοχή με μεταβλητή καμπυλότητα (όπου δηλαδή υπάρχει εκκεντρότητα), αλλά στην περιοχή της συγκόλλησης. Επομένως ο λόγος εκκεντρότητας προς πάχος τοιχώματος $\frac{e}{t}$, δεν επηρεάζει σημαντικά την αντοχή τους.



Σχήμα 3.33 Συγκριτικό διάγραμμα εσωτερικά συγκολλητών συνδέσεων αγωγών με λόγο $D/t=95$ και λόγο $L_b/t=16$.

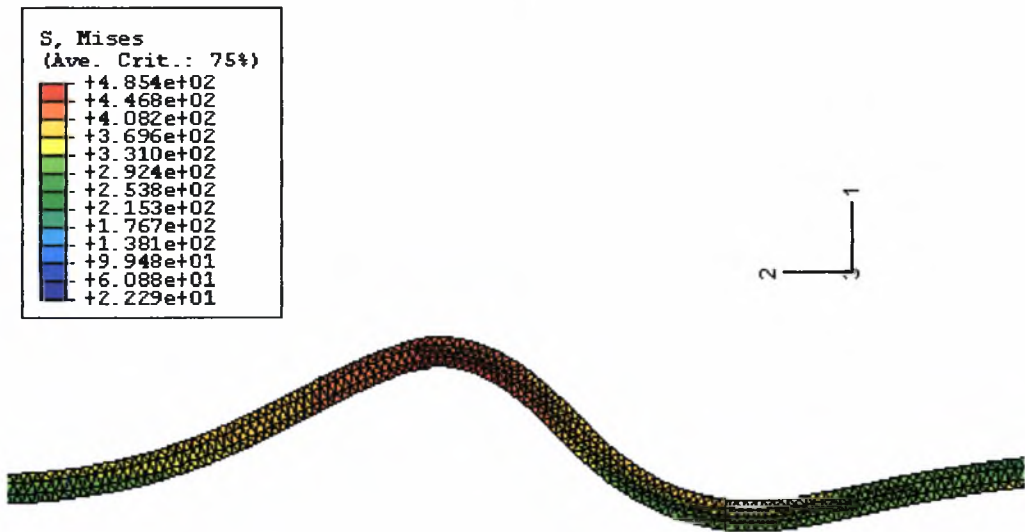
3.4.3 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΔΙΠΛΗ ΣΥΤΚΟΛΛΗΣΗ

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης δύο μοντέλων προσομοίωσης κελυφών με $\frac{D}{t} = 95$ και $L_b = 16$. Οι συνδέσεις αγωγών που μελετώνται σε αυτή την ενότητα είναι συγκολλημένες διπλά (και εσωτερικά και εξωτερικά). Στην εξεταζόμενη παράμετρο $\frac{e}{t}$ δίνονται δύο τιμές, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές.

Τα συγκρινόμενα κελύφη έχουν λόγο D/t ίσο με 95, λόγο $L_b/t=16$, ενώ οι τιμές που δίνονται στην παράμετρο e/t είναι 1.31 και 1.47.



Σχήμα 3.34α παραμορφωμένο κέλυφος με $\frac{e}{t}=1.31$



Σχήμα 3.34β περιοχή αστοχίας παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{e}{t}=1.31$, $\frac{D}{t}=95$ και

$$\frac{L_b}{t} = 16 \text{ (συγκόλληση διπλή).}$$



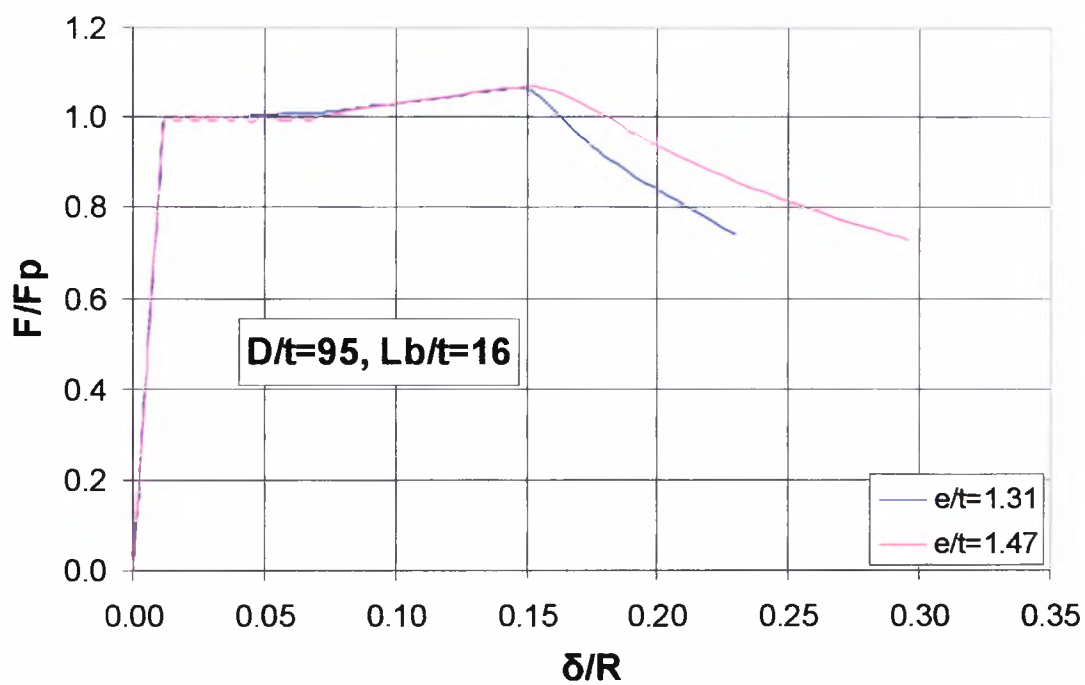
Σχήμα 3.34γ περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{e}{t}=1.31$, $\frac{D}{t}=95$ και

$$\frac{L_b}{t}=16 \text{ (συγκόλληση διπλή).}$$

Η μορφή του δεύτερου παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{e}{t}=1.47$ φαίνεται στα σχήματα 3.15α,β,γ (ενότητα 3.1.3).

Από τη μελέτη και των δύο μορφών των παραμορφωμένων κελυφών αυτής της ομάδας (σχήματα 3.34α, 3.15α) προκύπτει το συμπέρασμα ότι η αστοχία δεν παρατηρείται ούτε στην περιοχή της «καμπάνας» ούτε στην περιοχή της συγκόλλησης. Τα διπλά συγκολλημένα κελύφη παρουσιάζουν ισχυρή κράτυνση, όπως είναι εμφανές στο κατωτέρω διάγραμμα (σχήμα 3.35) και αστοχούν και τα δύο σε περιοχές οι οποίες βρίσκονται μακριά από τη διαμόρφωση καμπάνας και συγκόλλησης. Όσον αφορά στην επιρροή του λόγου e/t στην αντοχή των διπλά συγκολλημένων κελυφών, από τα αποτελέσματα και από το σχετικό διάγραμμα (σχήμα 3.34) συμπεραίνεται ότι είναι αμελητέα. Συγκεκριμένα, για τις τιμές σύγκρισης $\frac{e}{t}=1.31$ και 1.62 προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές $\frac{F_u}{F_p}=1.07$ και 1.07.

Επομένως η εξεταζόμενη παράμετρος e/t δεν επηρεάζει ουσιαστικά την αντοχή των διπλά συγκολλημένων κελυφών.



Σχήμα 3.35 Συγκριτικό διάγραμμα διπλά συγκολλητών συνδέσεων αγωγών με λόγο $D/t=95$ και λόγο $L_b/t=16$.

3.5 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΠΡΟΣ ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ (L_b/t)

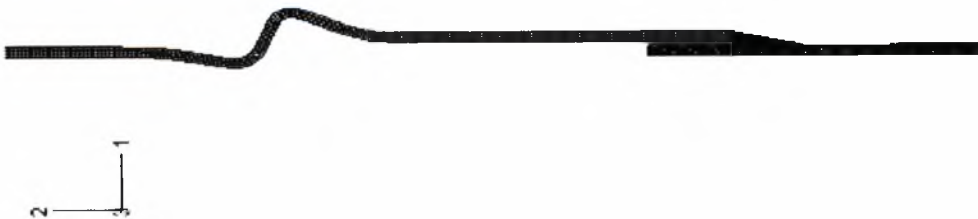
Στόχος σε αυτό το στάδιο της μελέτης ήταν να διαπιστωθεί η επιρροή της παραμέτρου $\frac{L_b}{t}$ στην αντοχή των μελετώμενων συνδεδεμένων αγωγών για δύο τύπους συγκόλλησης (εξωτερική και εσωτερική). Γι' αυτό έγινε προσομοίωση δύο ομάδων κελυφών, μία για κάθε τύπο.

3.5.1 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης των μοντέλων προσομοίωσης των κελυφών της πρώτης ομάδας. Πρόκειται για συνδέσεις αγωγών που είναι συγκολλημένες εξωτερικά. Αυτή η ομάδα αποτελείται από τρεις υποομάδες, για $\frac{D}{t}=95$, 61 και 47.7 και η κάθε υποομάδα από τέσσερα μοντέλα προσομοίωσης, γιατί στην εξεταζόμενη παράμετρο $\frac{L_b}{t}$ δίνονται τέσσερις τιμές καθώς οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές.

3.5.1.1 ΠΡΩΤΗ ΥΠΟΟΜΑΔΑ (ΓΙΑ ΚΕΛΥΦΗ ΜΕ $\frac{D}{t}=95$)

Τα συγκρινόμενα κελύφη έχουν λόγο D/t ίσο με 95, λόγο $e/t=1.47$, ενώ οι τιμές που δίνονται στην παράμετρο L_b/t είναι 5, 8, 12 και 16.



Σχήμα 3.36 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t}=5$, $\frac{e}{t}=1.47$ και

$$\frac{D}{t}=95$$



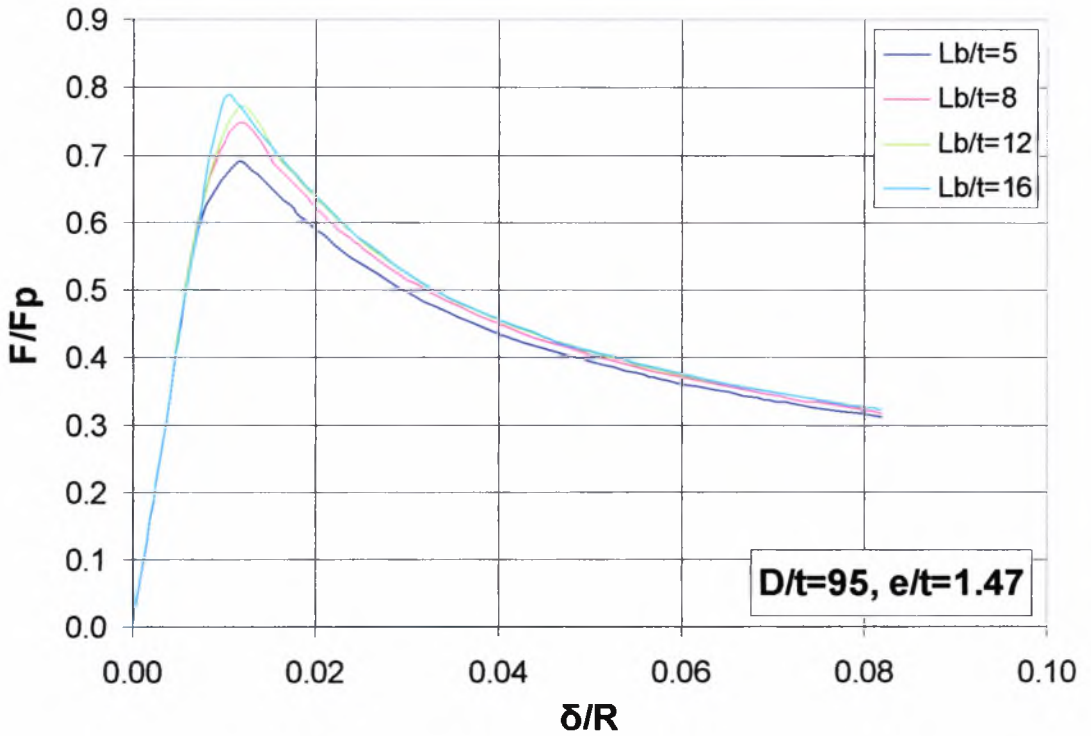
Σχήμα 3.37 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t}=8$, $\frac{e}{t}=1.47$ και

$$\frac{D}{t}=95$$

Η μορφή του τρίτου παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t}=12$ φαίνεται στο σχήμα 3.8α και στο σχήμα 3.8β φαίνεται η λεπτομέρεια της περιοχής της σύνδεσής του. Ενώ η λεπτομέρεια της σύνδεσης του τέταρτου παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t}=16$ φαίνεται στο σχήμα 3.19.

Μελετώντας τη μορφή των παραμορφωμένων κελυφών αυτής της υποομάδας (σχήματα 3.36, 3.37, 3.8β και 3.19) προκύπτει το συμπέρασμα ότι, με την επιβολή αξονικής μετατόπισης, και τα τέσσερα εξεταζόμενα κελύφη αστοχούν στο τμήμα με μεταβλητή καμπυλότητα, δηλαδή στην περιοχή της «καμπάνας», η οποία βρίσκεται στην περιοχή της σύνδεσης. Όσον αφορά στην επιρροή του λόγου του τμήματος με μεταβλητή καμπυλότητα προς το πάχος τοιχώματος κελύφους (L_b/t), από το συγκριτικό διάγραμμα που παρατίθεται ακολούθως (σχήμα 3.38) συμπεραίνεται ότι η αντοχή των εξεταζόμενων κελυφών με $D/t = 95$ και $e/t = 1.47$ αυξάνεται αυξανόμενου του λόγου L_b/t . Συγκεκριμένα, η μεταβολή της αντοχής που παρατηρείται για τις ακραίες τιμές σύγκρισης $\frac{L_b}{t}=5$ και 16 της τάξης του 9.3%, (από την ανάλυση προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές $\frac{F_u}{F_p} = 0.785$ και 0.692). Το γεγονός ότι τα εξωτερικά

συγκολλημένα κελύφη αυτής της υποομάδας αστοχούν στην περιοχή με μεταβλητή καμπυλότητα (περιοχή μήκους L_b) δικαιολογεί την αρκετά σημαντική επιρροή της παραμέτρου $\frac{L_b}{t}$ στην αντοχή τους.



Σχήμα 3.38 Συγκριτικό διάγραμμα εξωτερικά συγκολλητών συνδέσεων αγωγών με λόγο $D/t=95$ και λόγο $e/t=1.47$.

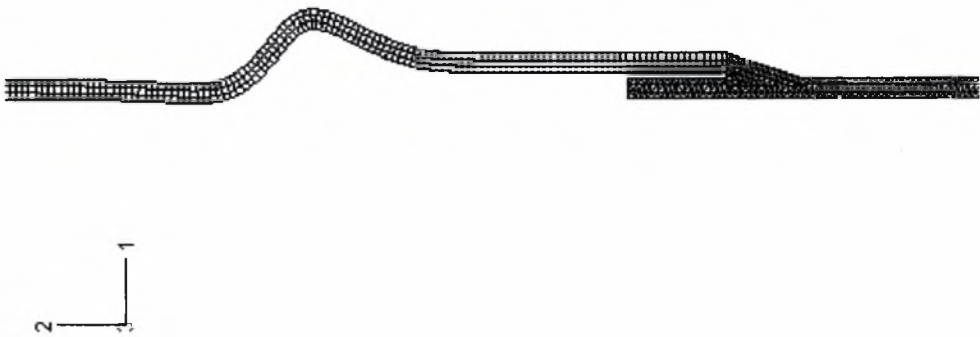
3.5.1.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΥΠΟΟΜΑΔΑ (ΓΙΑ ΚΕΛΥΦΗ ΜΕ $\frac{D}{t} = 61$)

Τα συγκρινόμενα κελύφη έχουν λόγο D/t ίσο με 61, λόγο e/t=1.3, ενώ οι τιμές που δίνονται στην παράμετρο L_b/t είναι 5, 8, 12 και 16.



Σχήμα 3.39 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t} = 5$, $\frac{e}{t} = 1.3$ και

$$\frac{D}{t} = 61$$



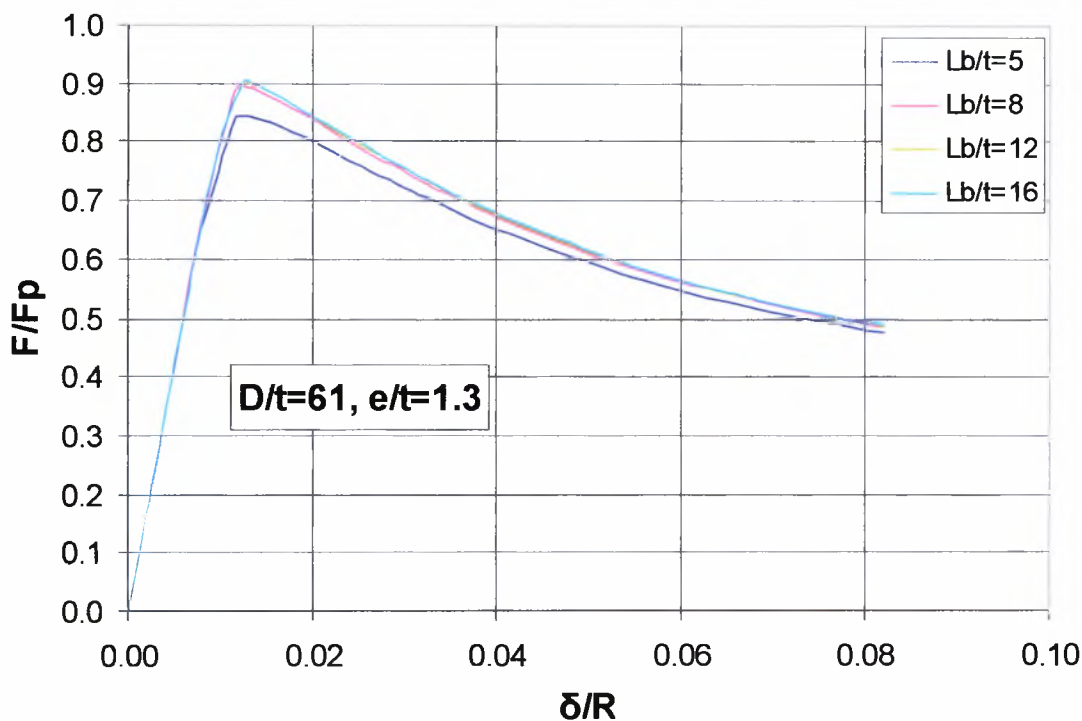
Σχήμα 3.40 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t} = 8$, $\frac{e}{t} = 1.3$ και

$$\frac{D}{t} = 61$$

Η λεπτομέρεια της συγκόλλησής του τρίτου παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t} = 12$ φαίνεται στο σχήμα 3.9^α. Ενώ η λεπτομέρεια της συγκόλλησης του τέταρτου

παραμορφωμένου κελύφους αυτής της υποομάδας, δηλαδή εκείνου με $\frac{L_b}{t}=16$ φαίνεται στο σχήμα 3.23.

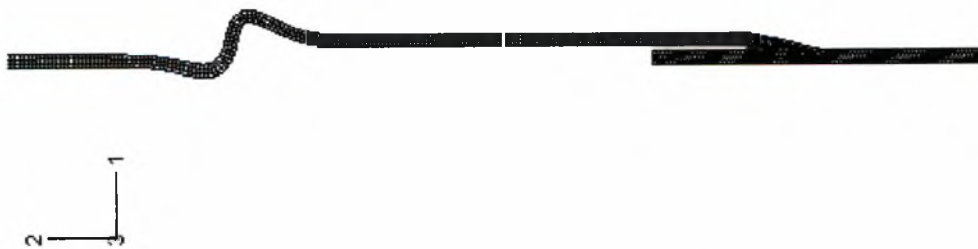
Από τη μελέτη της μορφής των παραμορφωμένων κελυφών αυτής της υποομάδας (σχήματα 3.39, 3.40, 3.9α και 3.23) προκύπτει το συμπέρασμα ότι, με την επιβολή αξονικής μετατόπισης, και τα τέσσερα εξεταζόμενα κελύφη αστοχούν στο τμήμα με μεταβλητή καμπυλότητα, το οποίο βρίσκεται κοντά στη συγκόλληση. Όσον αφορά στην επιρροή της εξεταζόμενης παραμέτρου (L_b/t), από το συγκριτικό διάγραμμα που παρουσιάζεται παρακάτω (σχήμα 3.41) συμπεραίνεται ότι η αντοχή των εξεταζόμενων κελυφών με $D/t = 61$ και $e/t = 1.3$ αυξάνεται αυξανόμενου του λόγου L_b/t . Συγκεκριμένα, η μεταβολή της αντοχής που παρατηρείται για τις ακραίες τιμές σύγκρισης $\frac{L_b}{t}=5$ και 16 της τάξης του 6%, (από την ανάλυση προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές $\frac{F_u}{F_p} = 0.902$ και 0.843). Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι η επιρροή της παραμέτρου L_b/t στην αντοχή των κελυφών αυτής της υποομάδας ($D/t = 61$) είναι πολύ μικρότερη για τις ενδιάμεσες τιμές της, δηλαδή για κελύφη $\frac{L_b}{t}=8, 12$ και 16 η αντοχή είναι πρακτικά ίδια, όπως προκύπτει από το ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 3.41 Συγκριτικό διάγραμμα εξωτερικά συγκολλητών συνδέσεων αγωγών με λόγο $D/t=61$ και λόγο $e/t=1.3$.

3.5.1.3 ΤΡΙΤΗ ΥΠΟΟΜΑΔΑ (ΓΙΑ ΚΕΛΥΦΗ ΜΕ $\frac{D}{t} = 47.7$)

Τα συγκρινόμενα κελύφη έχουν λόγο D/t ίσο με 47.7, λόγο $e/t=1.47$, ενώ οι τιμές που δίνονται στην παράμετρο L_b/t είναι 5, 8, 12 και 16.



Σχήμα 3.42 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t}=5$, $\frac{e}{t}=1.47$ και

$$\frac{D}{t}=47.7$$



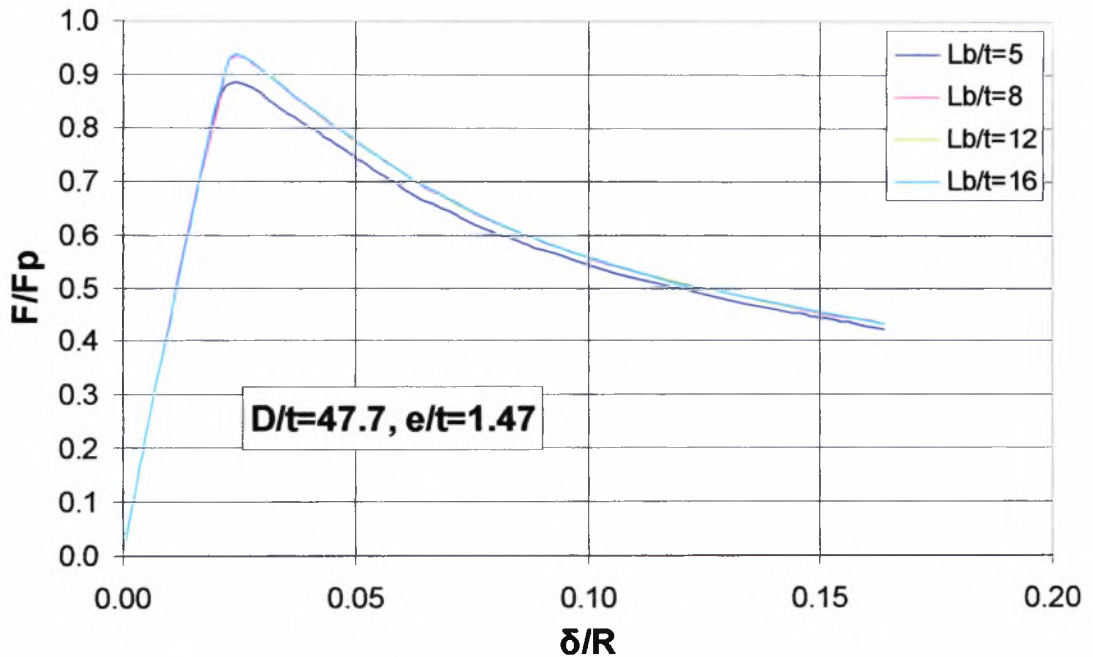
Σχήμα 3.43 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t} = 8$, $\frac{e}{t} = 1.47$ και

$$\frac{D}{t} = 47.7$$

Η λεπτομέρεια της συγκόλλησής του τρίτου παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t} = 12$ φαίνεται στο σχήμα 3.10α. Ενώ η λεπτομέρεια της συγκόλλησης του τέταρτου παραμορφωμένου κελύφους αυτής της υποομάδας, δηλαδή εκείνου με $\frac{L_b}{t} = 16$ φαίνεται στο σχήμα 3.27.

Μελετώντας τη μορφή των παραμορφωμένων κελυφών αυτής της υποομάδας (σχήματα 3.42, 3.43, 3.10α και 3.27) προκύπτει το συμπέρασμα ότι, με την επιβολή αξονικής μετατόπισης, και τα τέσσερα εξεταζόμενα κελύφη αστοχούν στο τμήμα με μεταβλητή καμπυλότητα, το οποίο βρίσκεται κοντά στη συγκόλληση. Όσον αφορά στην επιρροή της εξεταζόμενης παραμέτρου (L_b/t), από το συγκριτικό διάγραμμα που παρουσιάζεται παρακάτω (σχήμα 3.44) συμπεραίνεται ότι η αντοχή των εξεταζόμενων κελυφών με $D/t = 47.7$ και $e/t = 1.47$ αυξάνεται αυξανόμενου του λόγου L_b/t . Συγκεκριμένα, η μεταβολή της αντοχής που παρατηρείται για τις ακραίες τιμές σύγκρισης $\frac{L_b}{t} = 5$ και 16 της τάξης του 5%, (από την ανάλυση προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές $\frac{F_u}{F_p} = 0.933$ και 0.883). Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι η επιρροή της παραμέτρου L_b/t στην αντοχή των κελυφών αυτής της υποομάδας είναι πολύ

μικρότερη για τις ενδιάμεσες τιμές της, δηλαδή για συνδέσεις με $\frac{L_b}{t}=8, 12$ και 16 η αντοχή είναι πρακτικά ίδια, όπως προκύπτει από το ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 3.44 Συγκριτικό διάγραμμα εξωτερικά συγκολλητών συνδέσεων αγωγών με λόγο $D/t=47.7$ και λόγο $e/t=1.47$.

3.5.2 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης των μοντέλων προσομοίωσης των κελυφών της δεύτερης ομάδας. Πρόκειται για συνδέσεις αγωγών που είναι συγκολλημένες εσωτερικά. Αυτή η ομάδα μοντέλων αποτελείται από τρεις υποομάδες, για $\frac{e}{t}=1.31, 1.47$ και 1.62 και η κάθε υποομάδα από τέσσερα μοντέλα προσομοίωσης. Συγκεκριμένα στην εξεταζόμενη παράμετρο δίνονται τέσσερις τιμές ($\frac{L_b}{t}=5, 8, 12, 16$), ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές.

3.5.2.1 ΠΡΩΤΗ ΥΠΟΟΜΑΔΑ (ΓΙΑ ΚΕΛΥΦΗ ΜΕ $\frac{e}{t}=1.31$)

Τα συγκρινόμενα κελύφη έχουν λόγο D/t ίσο με 95, λόγο $e/t=1.31$, ενώ οι τιμές που δίνονται στην παράμετρο L_b/t είναι 5, 8, 12 και 16.



Σχήμα 3.45 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t}=5$, $\frac{e}{t}=1.31$ και

$$\frac{D}{t}=95$$



Σχήμα 3.46 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t}=8$, $\frac{e}{t}=1.31$ και

$$\frac{D}{t}=95$$



Σχήμα 3.47 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t} = 12$, $\frac{e}{t} = 1.31$ και

$$\frac{D}{t} = 95$$

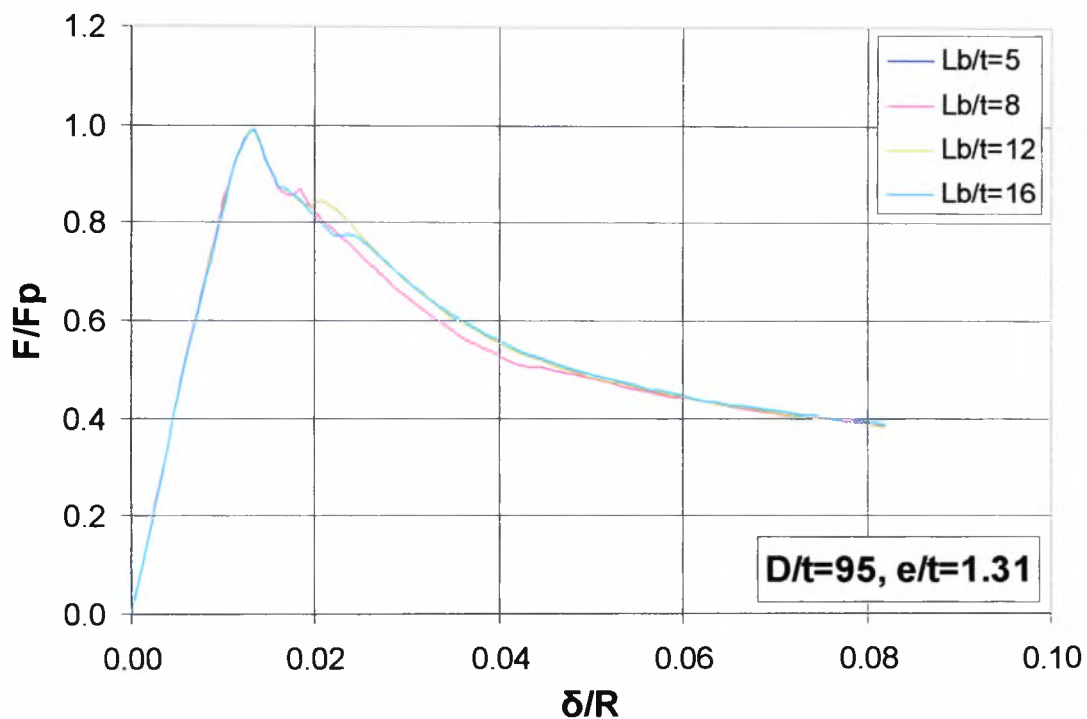
Το τέταρτο από τα μελετώμενα κελύφη αυτής της υποομάδας, συγκεκριμένα εκείνο με $\frac{L_b}{t} = 16$, αστοχεί στην περιοχή της σύνδεσης όπως έχει ήδη δειχθεί στο σχήμα 3.30 όπου φαίνεται η λεπτομέρεια της σύνδεσής του.

Μελετώντας τη μορφή των παραμορφωμένων κελυφών αυτής της υποομάδας (σχήματα 3.45, 3.46, 3.47 και 3.30) προκύπτει το συμπέρασμα ότι και τα τέσσερα εξεταζόμενα κελύφη αστοχούν, με την επιβολή θλιπτικής αξονικής μετατόπισης, στην περιοχή της σύνδεσης. Όσον αφορά στην επιρροή του λόγου του μήκους τμήματος με μεταβλητή καμπυλότητα προς το πάχος τοιχώματος κελύφους (L_b/t), συμπεραίνεται από το ακόλουθο συγκριτικό διάγραμμα (σχήμα 3.48) ότι η αντοχή των εξεταζόμενων κελυφών ($D/t = 95$ και $e/t = 1.31$) δεν επηρεάζεται ουσιαστικά από την παράμετρο L_b/t . Συγκεκριμένα, για όλες τις τιμές σύγκρισης $\frac{L_b}{t} = 5, 8, 12$ και 16 από την

ανάλυση προκύπτει $\frac{F_u}{F_p} = 0.99$. Το γεγονός ότι ο λόγος $\frac{L_b}{t}$ δεν επηρεάζει την αντοχή

των εσωτερικά συγκολλητών συνδέσεων αγωγών (που εξετάζονται σε αυτή την υποομάδα) επιβεβαιώνεται απ' το ότι η αστοχία σε αυτά τα κελύφη δε συμβαίνει στην περιοχή με μεταβλητή καμπυλότητα (μήκους L_b), αλλά στην περιοχή της συγκόλλησης. Επομένως είναι λογικό ο λόγος του μήκους του τμήματος με

μεταβλητή καμπυλότητα προς το πάχος τοιχώματος να μην επηρεάζει την αντοχή τους.



Σχήμα 3.48 Συγκριτικό διάγραμμα εσωτερικά συγκολλητών συνδέσεων αγωγών με λόγο $D/t=95$ και λόγο $e/t=1.31$.

3.5.2.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΥΠΟΟΜΑΔΑ (ΓΙΑ ΚΕΛΥΦΗ ΜΕ $\frac{e}{t}=1.47$)

Τα συγκρινόμενα κελύφη έχουν λόγο D/t ίσο με 95, λόγο $e/t=1.47$, ενώ οι τιμές που δίνονται στην παράμετρο L_b/t είναι 5, 8, 12 και 16.



Σχήμα 3.49 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t}=5$, $\frac{e}{t}=1.47$ και

$$\frac{D}{t}=95$$



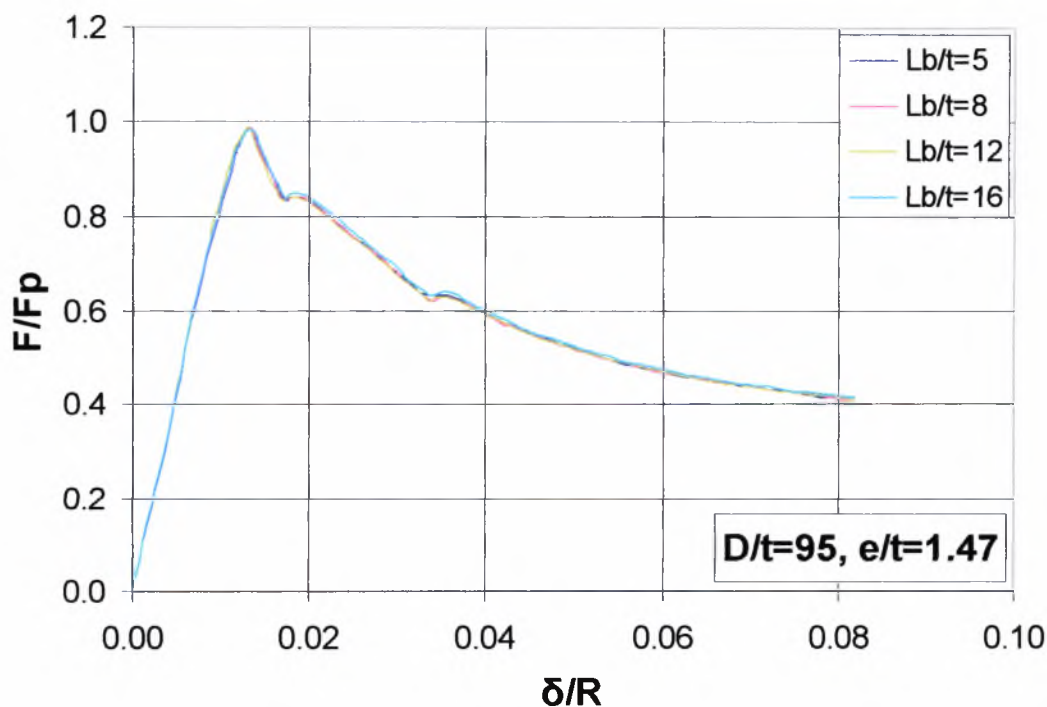
Σχήμα 3.50 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t}=8$, $\frac{e}{t}=1.47$ και

$$\frac{D}{t}=95$$

Το τρίτο από τα μελετώμενα κελύφη αυτής της υποομάδας, συγκεκριμένα εκείνο με $\frac{L_b}{t}=12$, αστοχεί στην περιοχή της σύνδεσης όπως έχει ήδη δειχθεί στο σχήμα

3.12α. Ενώ η λεπτομέρεια της σύνδεσης του τέταρτου παραμορφωμένου κελύφους αυτής της υποομάδας, δηλαδή εκείνου με $\frac{L_b}{t}=16$ φαίνεται στο σχήμα 3.31.

Από τη μελέτη της μορφής των παραμορφωμένων κελυφών αυτής της υποομάδας (σχήματα 3.49, 3.50, 3.12β και 3.31) προκύπτει το συμπέρασμα ότι και τα τέσσερα εξεταζόμενα κελύφη αστοχούν στην περιοχή της συγκόλλησης. Όσον αφορά στην επιρροή του λόγου του τμήματος με μεταβλητή καμπυλότητα προς το πάχος τοιχώματος κελύφους (L_b/t) συμπεραίνεται, από το ακόλουθο συγκριτικό διάγραμμα (σχήμα 3.51), ότι η αντοχή των εξεταζόμενων κελυφών με $D/t = 95$ και $e/t = 1.47$ δεν επηρεάζεται ουσιαστικά από την παράμετρο L_b/t . Συγκεκριμένα, για όλες τις τιμές που εξετάστηκαν $\frac{L_b}{t}=5, 8, 12$ και 16 από την ανάλυση προκύπτει $\frac{F_u}{F_p} = 0.98$. Όπως σημειώθηκε και για κατά την ανάλυση της πρώτης υποομάδας, το γεγονός ότι ο λόγος $\frac{L_b}{t}$ δεν επηρεάζει την αντοχή των εσωτερικά συγκολλητών συνδέσεων αγωγών επιβεβαιώνεται απ' το ότι η αστοχία σε αυτά τα κελύφη δε συμβαίνει στην περιοχή με μεταβλητή καμπυλότητα (μήκους L_b) αλλά στην περιοχή της συγκόλλησης.



Σχήμα 3.51 Συγκριτικό διάγραμμα εσωτερικά συγκολλητών συνδέσεων αγωγών με λόγο $D/t=95$ και λόγο $e/t=1.47$.

3.5.2.3 ΤΡΙΤΗ ΥΠΟΟΜΑΔΑ (ΓΙΑ ΚΕΛΥΦΗ ΜΕ $\frac{e}{t}=1.62$)

Τα συγκρινόμενα κελύφη έχουν λόγο D/t ίσο με 95, λόγο $e/t=1.62$, ενώ οι τιμές που δίνονται στην παράμετρο L_b/t είναι 5, 8, 12 και 16.



Σχήμα 3.52 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t}=5$, $\frac{e}{t}=1.62$ και

$$\frac{D}{t}=95$$



Σχήμα 3.53 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t}=8$, $\frac{e}{t}=1.62$ και

$$\frac{D}{t}=95$$



Σχήμα 3.54 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{L_b}{t} = 12$, $\frac{e}{t} = 1.62$ και

$$\frac{D}{t} = 95$$

Το τέταρτο από τα μελετώμενα κελύφη αυτής της υποομάδας, συγκεκριμένα εκείνο με $\frac{L_b}{t} = 16$, αστοχεί στην περιοχή της συγκόλλησης όπως έχει ήδη δειχθεί στο σχήμα 3.32.

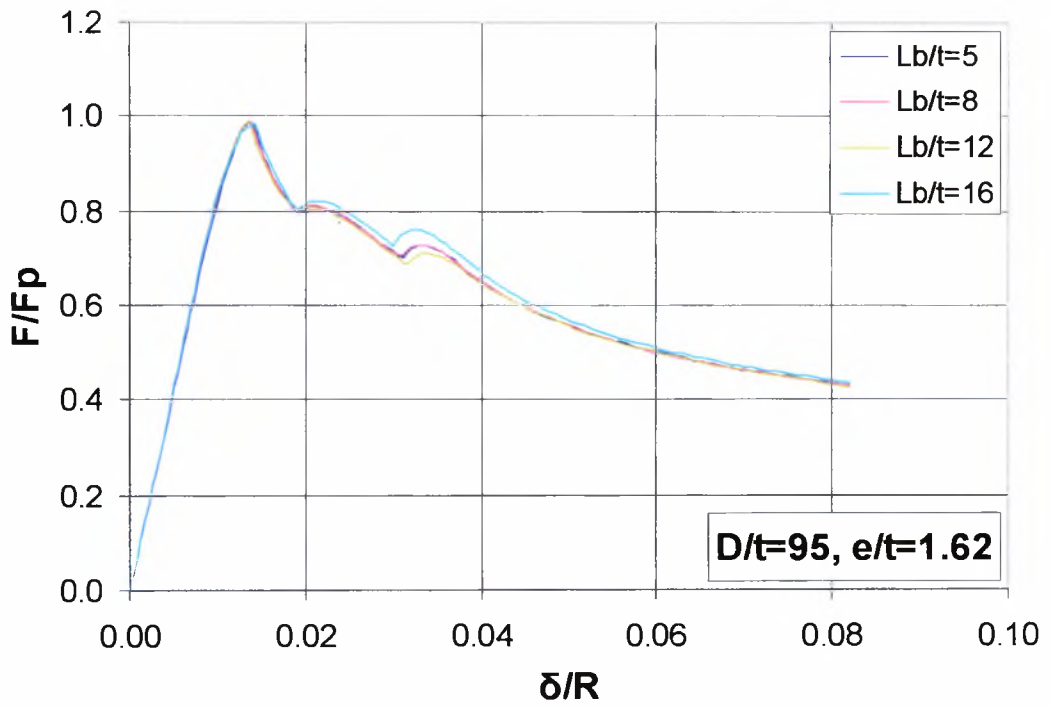
Μελετώντας τη μορφή των παραμορφωμένων κελυφών αυτής της υποομάδας (σχήματα 3.52, 3.53, 3.54 και 3.32) προκύπτει το συμπέρασμα ότι και τα τέσσερα εξεταζόμενα κελύφη αστοχούν στην περιοχή της συγκόλλησης. Όσον αφορά στην επιρροή του λόγου του τμήματος με μεταβλητή καμπυλότητα προς το πάχος τοιχώματος κελύφους (L_b/t) συμπεραίνεται, από το ακόλουθο συγκριτικό διάγραμμα (σχήμα 3.55), ότι η αντοχή των εξεταζόμενων κελυφών με $D/t = 95$ και $e/t = 1.62$ δεν επηρεάζεται ουσιαστικά από την παράμετρο L_b/t , όμοια με προηγουμένως.

Συγκεκριμένα, για όλες τις τιμές σύγκρισης $\frac{L_b}{t} = 5, 8, 12$ και 16 από την ανάλυση

προκύπτει $\frac{F_u}{F_p} = 0.98$. Όπως σημειώθηκε και για κατά την ανάλυση των δύο

προηγούμενων υποομάδων, το γεγονός ότι ο λόγος $\frac{L_b}{t}$ δεν επηρεάζει την αντοχή των

εσωτερικά συγκολλητών συνδέσεων αγωγών επιβεβαιώνεται απ' το ότι η αστοχία σε αυτά τα κελύφη δε συμβαίνει στην περιοχή με μεταβλητή καμπυλότητα (μήκους L_b) αλλά στην περιοχή της συγκόλλησης.



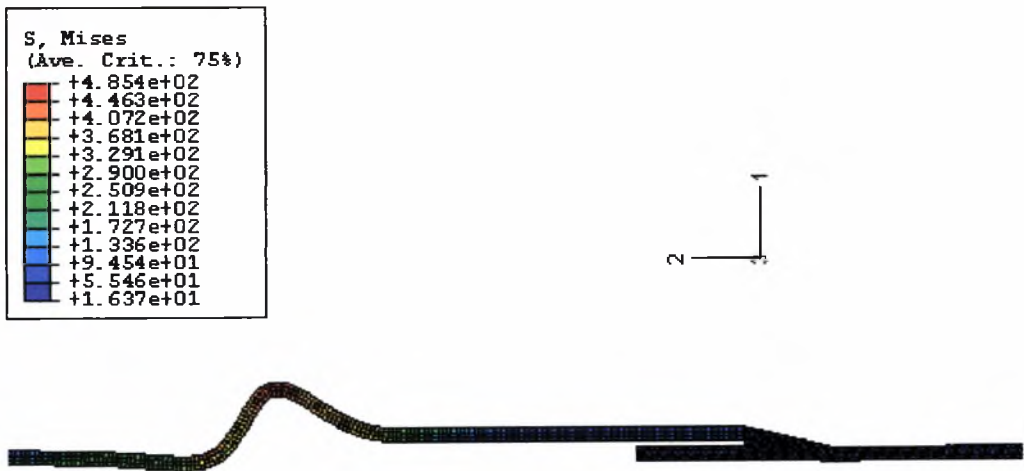
Σχήμα 3.55 Συγκριτικό διάγραμμα εσωτερικά συγκολλητών συνδέσεων αγωγών με λόγο $D/t=95$ και λόγο $e/t=1.62$.

3.6 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Στόχος σε αυτό το στάδιο της μελέτης ήταν να διαπιστωθεί η επιρροή της παραμέτρου του τύπου συγκόλλησης των μελετώμενων συνδέσεων αγωγών στην αντοχή τους σε αξονικά, θλιπτικά φορτία. Γι' αυτό το λόγο έγινε προσομοίωση δύο ομάδων κελυφών, μία για $\frac{D}{t} = 95$ και μία δεύτερη για $\frac{D}{t} = 47.7$. Κάθε ομάδα απαρτίζεται από τρία μοντέλα, ένα για κάθε τύπο συγκόλλησης (εξωτερική, εσωτερική και διπλή). Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές, ενώ δεν ασκείται εσωτερική πίεση στα μελετώμενα κελύφη.

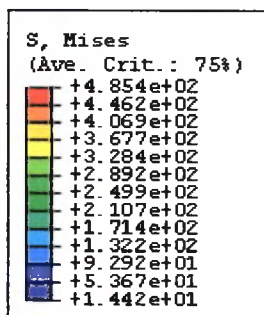
3.6.1 ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕ $\frac{D}{t} = 95$, $\frac{e}{t} = 1.47$, $\frac{L_b}{t} = 12$

Σε αυτή την ενότητα εξετάζονται εξωτερικά, εσωτερικά και διπλά συγκολλητές συνδέσεις αγωγών με $\frac{D}{t} = 95$, $\frac{e}{t} = 1.47$, $\frac{L_b}{t} = 12$.



Σχήμα 3.56 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{D}{t} = 95$, $\frac{e}{t} = 1.47$ και

$$\frac{L_b}{t} = 12 \text{ (συγκόλληση εξωτερική)}$$



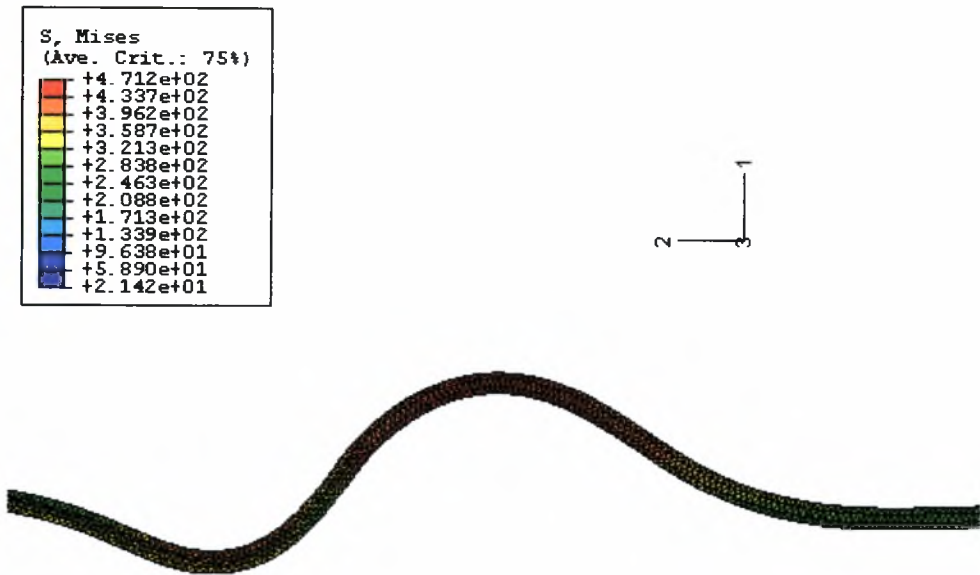
Σχήμα 3.57 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{D}{t} = 95, \frac{e}{t} = 1.47$ και

$$\frac{L_b}{t} = 12 \text{ (συγκόλληση εσωτερική)}$$



Σχήμα 3.58α παραμορφωμένο κέλυφος με $\frac{D}{t} = 95, \frac{e}{t} = 1.47$ και

$$\frac{L_b}{t} = 12 \text{ (συγκόλληση διπλή)}$$



Σχήμα 3.58β περιοχή αστοχίας παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{D}{t}=95, \frac{e}{t}=1.47$ και

$$\frac{L_b}{t}=12 \text{ (συγκόλληση διπλή)}$$

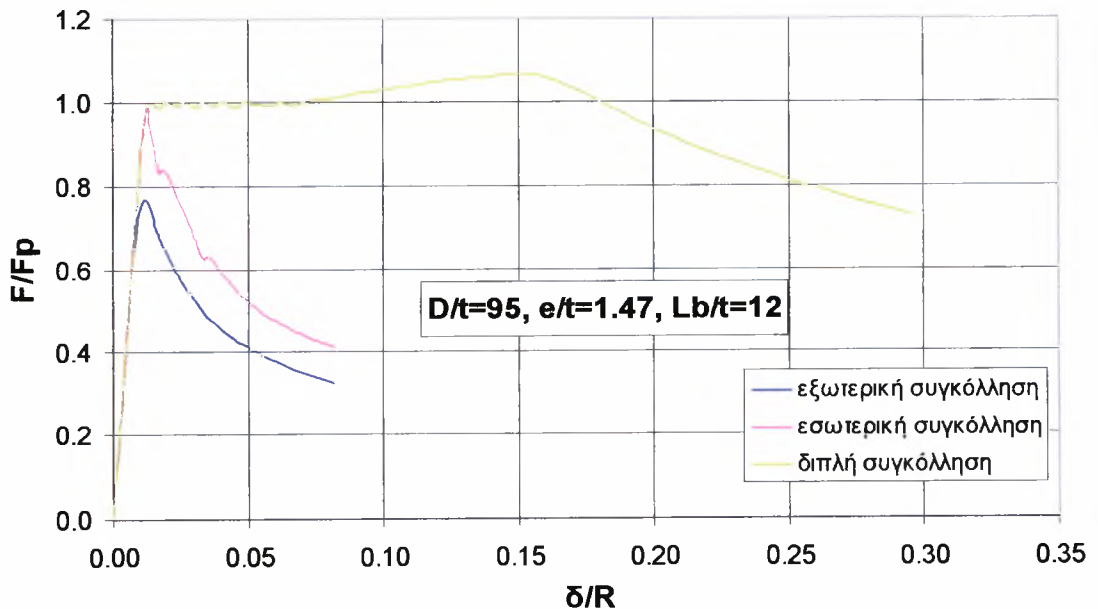
Εξετάζοντας τα τρία σχήματα που παρατίθενται ανωτέρω συμπεραίνεται ότι το κέλυφος με εξωτερική συγκόλληση αστοχεί, με την επιβολή αξονικού θλιπτικού φορτίου, στο τμήμα με μεταβλητή καμπυλότητα («καμπάνα»), το οποίο βρίσκεται κοντά στην περιοχή της συγκόλλησης (σχήμα 3.56). Το αντίστοιχο κέλυφος με εσωτερική συγκόλληση αστοχεί κοντά στην περιοχή της συγκόλλησης, αλλά από την πλευρά του εισερχόμενου τμήματος (σχήμα 3.57), ενώ στο κέλυφος με διπλή συγκόλληση η αστοχία λαμβάνει χώρα μακριά από την περιοχή της σύνδεσης (σχήμα 3.58). Όσον αφορά στην επιρροή της παραμέτρου του τύπου συγκόλλησης στην αντοχή των μελετώμενων συνδέσεων, από το διάγραμμα του σχήματος 3.58 προκύπτει το συμπέρασμα ότι το κέλυφος που παρουσιάζει συγκριτικά τη μεγαλύτερη αντοχή σε αξονικά, θλιπτικά φορτία είναι εκείνο με διπλή συγκόλληση, ενώ η σύνδεση αγωγών με τη μικρότερη, συγκριτικά, αντοχή σε τέτοιου είδους φορτία είναι εκείνη με εξωτερική. Συγκεκριμένα το εσωτερικά συγκολλημένο κέλυφος παρουσιάζει 22% μεγαλύτερη αντοχή από το αντίστοιχο με εξωτερική

συγκόλληση και 8% μικρότερη αντοχή από εκείνο με διπλή. Δηλαδή το κέλυφος με εξωτερική συγκόλληση έχει περίπου 30% μικρότερη αντοχή από το αντίστοιχο με διπλή. Από την αριθμητική επίλυση για την αντοχή αυτών των κελυφών προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα :

Εξωτερική συγκόλληση	$\frac{F_u}{F_p} = 0.771$
Εσωτερική συγκόλληση	$\frac{F_u}{F_p} = 0.987$
Διπλή συγκόλληση	$\frac{F_u}{F_p} = 1.07$

Το εσωτερικά συγκολλημένο κέλυφος παρουσιάζει μικρότερη αντοχή μόνο κατά 8% περίπου από το διπλά συγκολλημένο. Όμως το οριακό φορτίο αστοχίας του είναι σχεδόν 99% του φορτίου πλαστικοποίησης του, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο ενδεδειγμένος τύπος συγκόλλησης συνδέσεων αγωγών μορφής ολίσθησης (γεωμετρίας και υλικού του κελύφους που εξετάζεται) είναι η εσωτερική συγκόλληση.

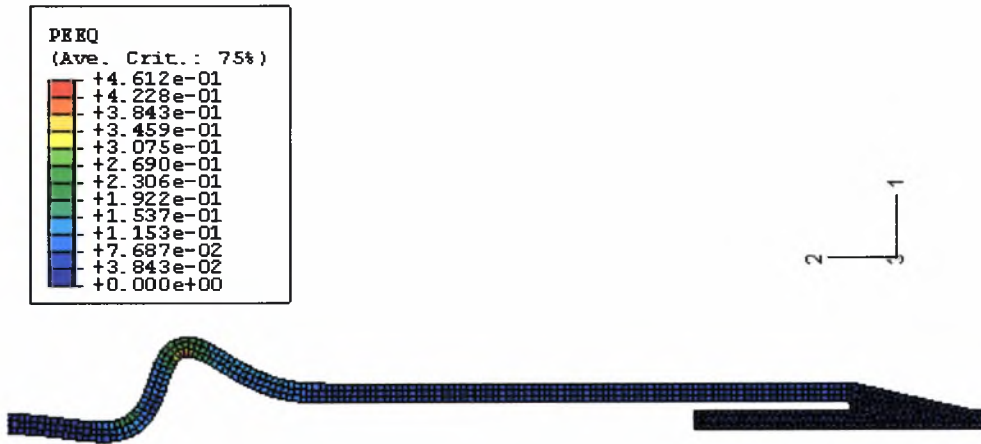
Σημειώνεται ότι η επιπλέον αντοχή της διπλά συγκολλητής σύνδεσης είναι πέραν του πλαστικού φορτίου F_p , οφείλεται στην κράτνωση του υλικού και συμβαίνει σε σχετικά μεγάλη τιμή της αξονικής παραμόρφωσης ($\delta/R=0.154$)



Σχήμα 3.59 Συγκριτικό διάγραμμα συνδέσεων με $D/t=95$, $e/t=1.47$ και $L_b/t=12$

3.6.2 ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕ $\frac{D}{t} = 47.7, \frac{e}{t} = 1.47, \frac{L_b}{t} = 12$

Σε αυτή την ενότητα εξετάζονται εξωτερικά, εσωτερικά και διπλά συγκολλητές συνδέσεις αγωγών με $\frac{D}{t} = 47.7, \frac{e}{t} = 1.47, \frac{L_b}{t} = 12$.



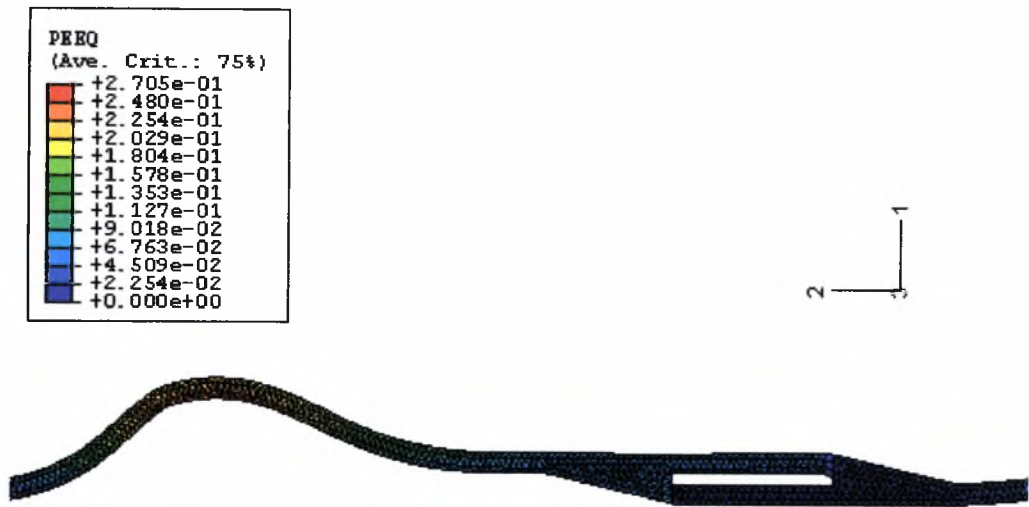
Σχήμα 3.60 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{D}{t} = 47.7, \frac{e}{t} = 1.47$ και

$$\frac{L_b}{t} = 12 \text{ (συγκόλληση εξωτερική)}$$



Σχήμα 3.61 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $\frac{D}{t} = 47.7, \frac{e}{t} = 1.47$ και

$$\frac{L_b}{t} = 12 \text{ (συγκόλληση εσωτερική)}$$



Σχήμα 3.62 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κέλφους με $\frac{D}{t} = 47.7, \frac{e}{t} = 1.47$ και

$$\frac{L_b}{t} = 12 \text{ (συγκόλληση διπλή)}$$

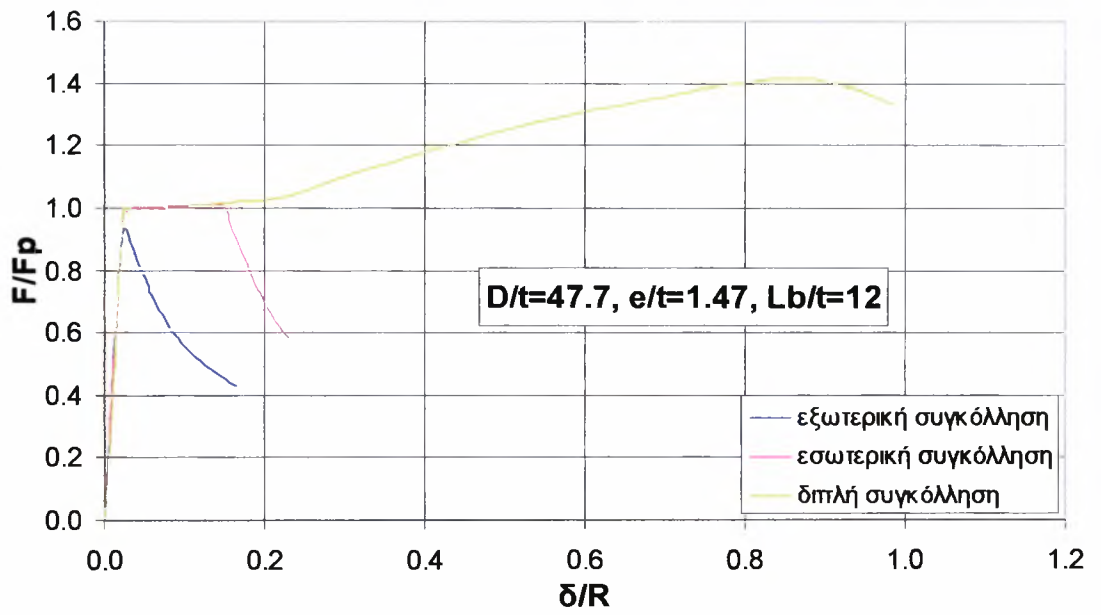
Μελετώντας τα τρία σχήματα που παρατίθενται παραπάνω συμπεραίνεται ότι το κέλυφος με εξωτερική συγκόλληση αστοχεί, με την επιβολή αξονικού θλιπτικού φορτίου, στο τμήμα με μεταβλητή καμπυλότητα, δηλαδή στην περιοχή της «καμπάνας» όπου και υπάρχει εκκεντρότητα (σχήμα 3.60). Το αντίστοιχο κέλυφος με εσωτερική συγκόλληση παρουσιάζει κράτυνση και δεν αστοχεί στην περιοχή της συγκόλλησης αλλά αρκετά μακριά από αυτήν (σχήμα 3.61), ενώ στο κέλυφος με διπλή συγκόλληση η αστοχία λαμβάνει χώρα μακριά από την περιοχή της συγκόλλησης (σχήμα 3.62). Αξίζει να σημειωθεί ότι η διπλά συγκολλημένη σύνδεση που εξετάζεται σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζει ισχυρή μεταλυγισμική συμπεριφορά, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος 3.63. Όσον αφορά στην επιρροή της παραμέτρου του τύπου συγκόλλησης στην αντοχή των μελετώμενων συνδέσεων, από το διάγραμμα του σχήματος 3.63 προκύπτει το συμπέρασμα ότι το κέλυφος που παρουσιάζει συγκριτικά τη μεγαλύτερη αντοχή σε αξονικά, θλιπτικά φορτία είναι εκείνο με διπλή συγκόλληση, ενώ η σύνδεση αγωγών

με τη μικρότερη, συγκριτικά, αντοχή σε τέτοιου είδους φορτία είναι εκείνη με εξωτερική συγκόλληση. Συγκεκριμένα το εσωτερικά συγκολλημένο κέλυφος παρουσιάζει περίπου 8% μεγαλύτερη αντοχή από το αντίστοιχο με εξωτερική συγκόλληση και 41% μικρότερη αντοχή από εκείνο με διπλή. Ενώ το κέλυφος με εξωτερική συγκόλληση έχει περίπου 49% μικρότερη αντοχή από το αντίστοιχο με διπλή. Συμπερασματικά :

Εξωτερική συγκόλληση	$\frac{F_u}{F_p} = 0.933$
Εσωτερική συγκόλληση	$\frac{F_u}{F_p} = 1.01$
Διπλή συγκόλληση	$\frac{F_u}{F_p} = 1.42$

Σημειώνεται ότι η επιπλέον αντοχή της διπλά συγκολλητής σύνδεσης είναι πέραν του πλαστικού φορτίου F_p , οφείλεται στην κράτυνση του υλικού και η αστοχία συμβαίνει σε σχετικά μεγάλη τιμή της αξονικής παραμόρφωσης ($\delta/R=0.847$)

Με βάση το γεγονός ότι το εσωτερικά συγκολλημένο κέλυφος έχει κρίσιμο φορτίο αστοχίας 101% του φορτίου πλαστικοποίησης του, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο ενδεδειγμένος τύπος συγκόλλησης συνδέσεων αγωγών μορφής ολίσθησης (για τη συγκεκριμένη γεωμετρία και υλικό) είναι η εσωτερική συγκόλληση. Αυτό το συμπέρασμα εξάγεται από το γεγονός ότι, όταν είναι κατασκευαστικά εφικτό, η χρήση απλής, εσωτερική συγκόλλησης μειώνει το κόστος και το χρόνο κατασκευής του δικτύου, ικανοποιώντας επαρκώς τις απαιτήσεις αντοχής των μελετώμενων συνδέσεων αγωγών.



Σχήμα 3.63 Συγκριτικό διάγραμμα συνδέσεων με $D/t=47.7, e/t=1.47$ και $L_b/t=12$

3.7 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Στόχος σε αυτό το στάδιο της μελέτης ήταν να διαπιστωθεί η επιρροή της εσωτερικής πίεσης στην αντοχή των μελετώμενων συγκολλητών συνδέσεων αγωγών για καθέναν από τους τρεις τύπους συγκόλλησης. Γι' αυτό έγινε προσομοίωση τριών ομάδων κελυφών, μία για κάθε τύπο.

3.7.1 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ

Η πρώτη ομάδα αποτελείται από δύο υποομάδες, για $\frac{D}{t} = 95$ και $\frac{D}{t} = 47.7$ και

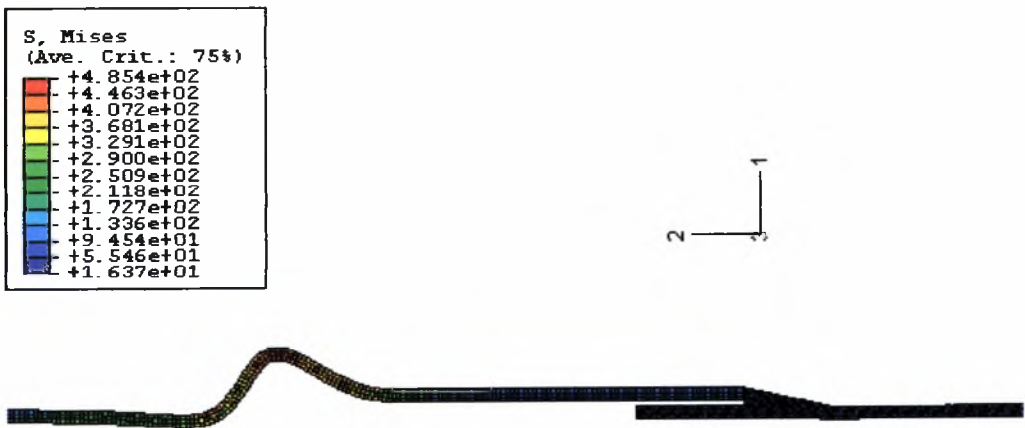
η κάθε υποομάδα από τρία μοντέλα προσομοίωσης, ένα για κέλυφος στο οποίο δεν ασκείται εσωτερική πίεση, ένα για κέλυφος στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 30% της πίεσης πλαστικοποίησης που δίνεται από τον τύπο 3.2 και ένα για κέλυφος με 60% της P_y . Σε όλα τα εξεταζόμενα μοντέλα όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές.

$$P_y = 2\sigma_y \frac{t}{D} \dots\dots\dots(3.2)$$

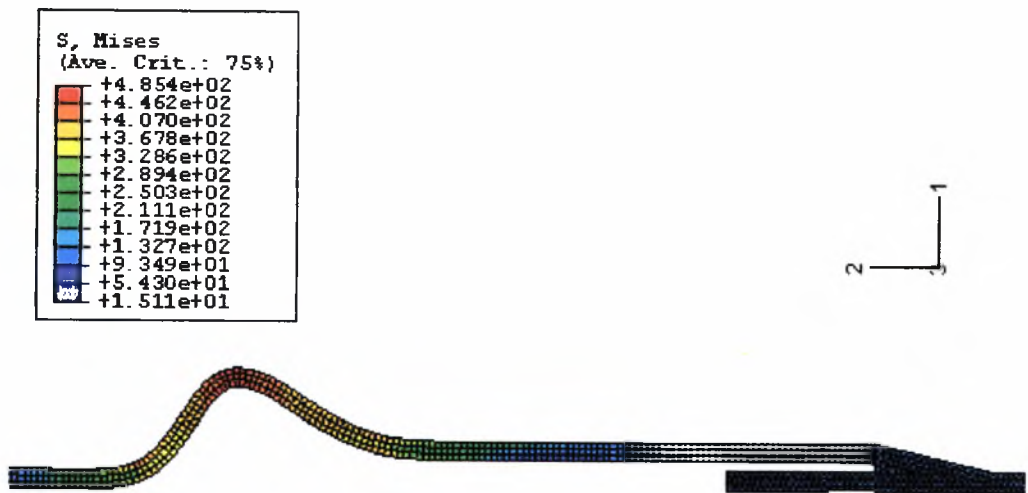
3.7.1.1 ΠΡΩΤΗ ΥΠΟΟΜΑΔΑ

Σε αυτή την υποενοότητα εξετάζονται εξωτερικά συγκολλητές συνδέσεις αγωγών

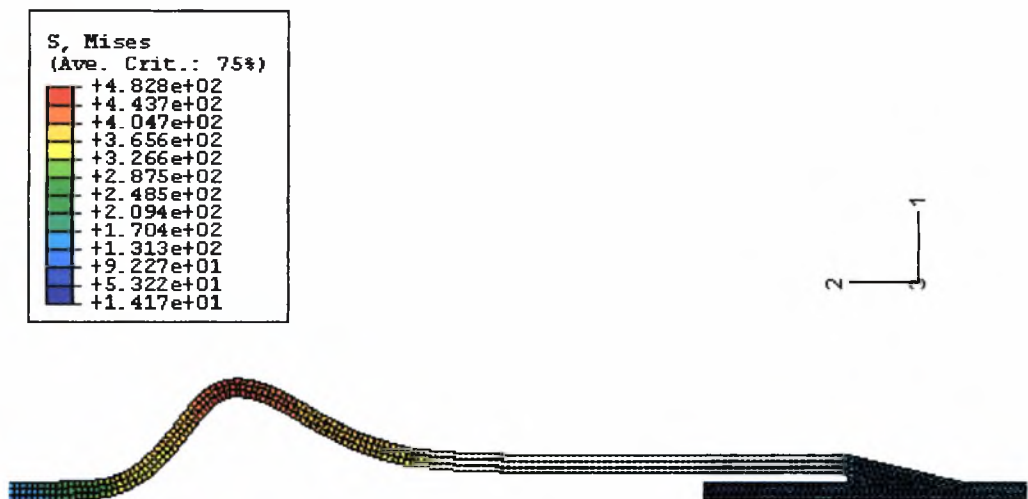
με $\frac{D}{t} = 95, \frac{e}{t} = 1.47, \frac{L_b}{t} = 12.$



Σχήμα 3.64 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους χωρίς εσωτερική πίεση



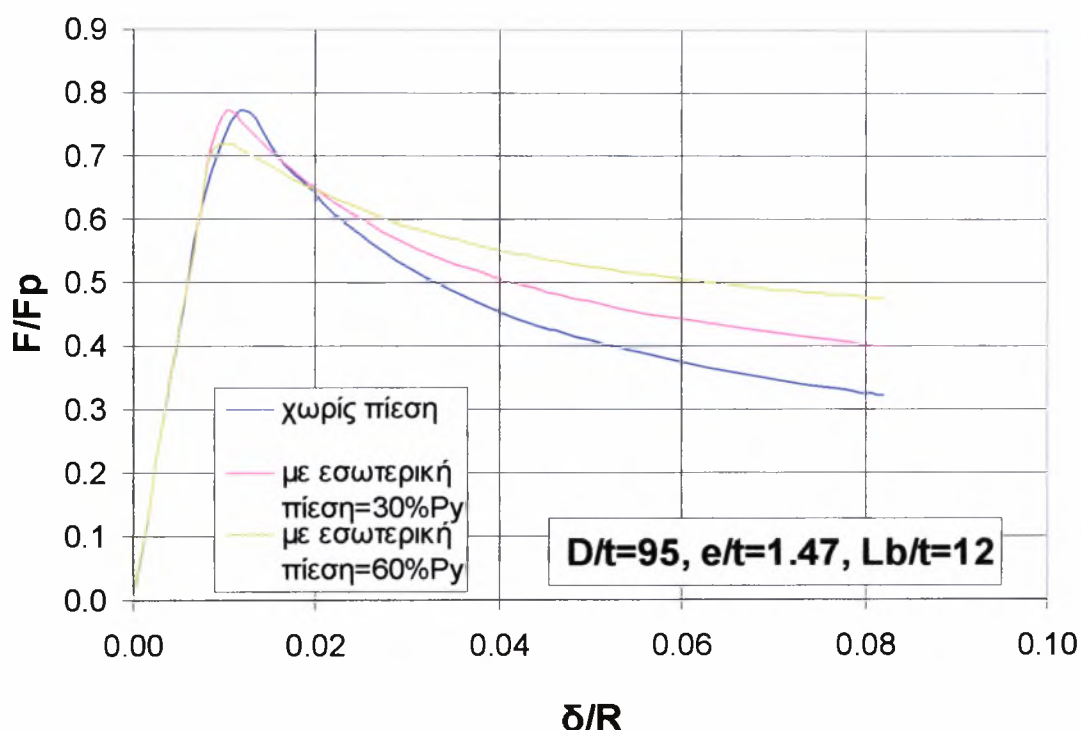
Σχήμα 3.65 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 30% της P_y .



Σχήμα 3.66 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 60% της P_y .

Εξετάζοντας τα τρία σχήματα που παρατέθηκαν ανωτέρω συνάγεται το συμπέρασμα ότι και στην περίπτωση που δεν ασκείται πίεση στο μελετώμενο

κέλυφος και στις περιπτώσεις στις οποίες ασκείται εσωτερική πίεση 30% και 60% της P_y , η αστοχία λαμβάνει χώρα στο τμήμα με μεταβλητή καμπυλότητα, δηλαδή στην «καμπάνα» όπου υπάρχει εκκεντρότητα και βρίσκεται κοντά στην περιοχή της συγκόλλησης. Όσον αφορά στην επιρροή της εσωτερικής πίεσης στην αντοχή του κελύφους, από το διάγραμμα του σχήματος 3.67 συμπεραίνεται ότι άσκηση εσωτερικής πίεσης ίσης με το 30% της πίεσης πλαστικοποίησης συνεπάγεται αμελητέα μεταβολή της αντοχής, της τάξης του 0.2%, ενώ άσκηση εσωτερικής πίεσης ίσης με το 60% της P_y συνεπάγεται μείωση της αντοχής κατά 5.2%.



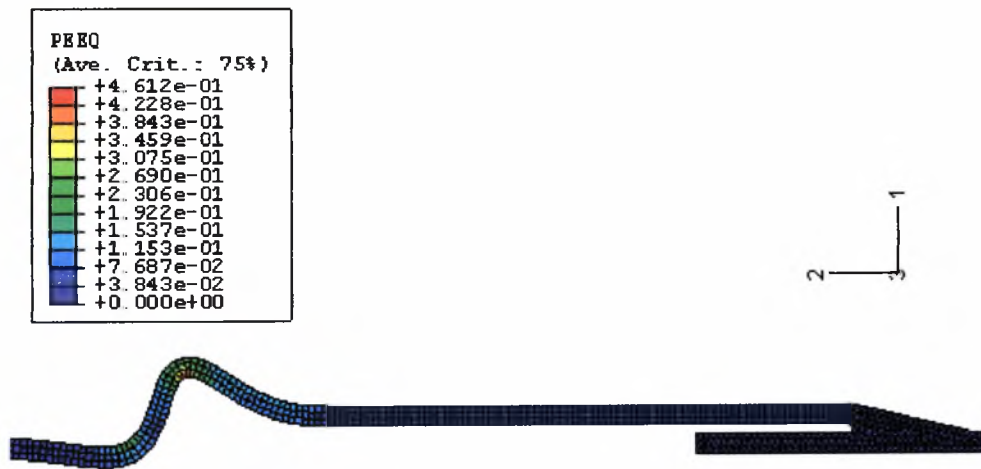
Σχήμα 3.67 Συγκριτικό διάγραμμα εξωτερικά συγκολλητών συνδέσεων με λόγο $D/t=95$, $e/t=1.47$ και $L_b/t=12$.

Σημειώνεται ότι κατά την αριθμητική ανάλυση τα εξεταζόμενα κελύφη θεωρήθηκαν πλήρως περιορισμένα, με συνοριακές συνθήκες (στο τέταρτο βήμα της ανάλυσης όπου επεβλήθη η εσωτερική πίεση) οι οποίες περιόριζαν όλους τους βαθμούς ελευθερίας και στα δύο άκρα τους. Αυτός ο περιορισμός του εκάστοτε κελύφους, σε συνδυασμό με την επιβολή της εσωτερικής πίεσης προκάλεσε διαμήκη

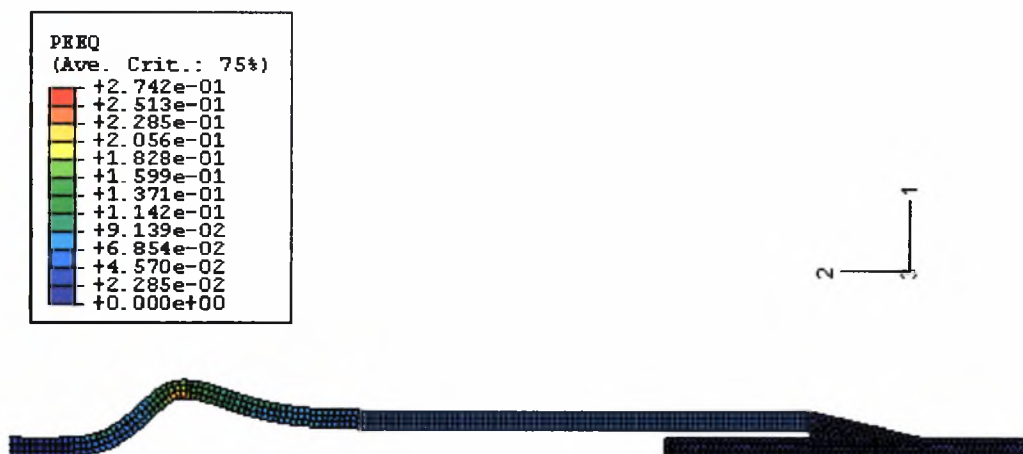
ορθή τάση (σ_x) η οποία αφαιρέθηκε από τα τελικά αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης για τη δύναμη (η οποία τελικώς διαιρέθηκε με την δύναμη πλαστικοποίησης που τον τύπο 3.1 και παρουσιάζεται στο διάγραμμα). Ο λόγος για την τροποποίηση αυτή είναι πως κατά το πέμπτο βήμα όπου επιβάλλεται το αξονικό φορτίο ένα μέρος του καταναλίσκεται στην αναίρεση αυτής της τάσης, η οποία οφείλεται αμιγώς στην επιβολή των συνοριακών συνθηκών. Γι' αυτό το λόγο η καμπύλη του διαγράμματος ξεκινά από την αρχή των αξόνων και δεν εμφανίζονται αρνητικές τιμές στο λόγο $\frac{F}{F_p}$. Αυτή η σημείωση αφορά όλες τις αναλύσεις που έγιναν στα πλαίσια της ενότητας 3.5.

3.7.1.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΥΠΟΟΜΑΔΑ

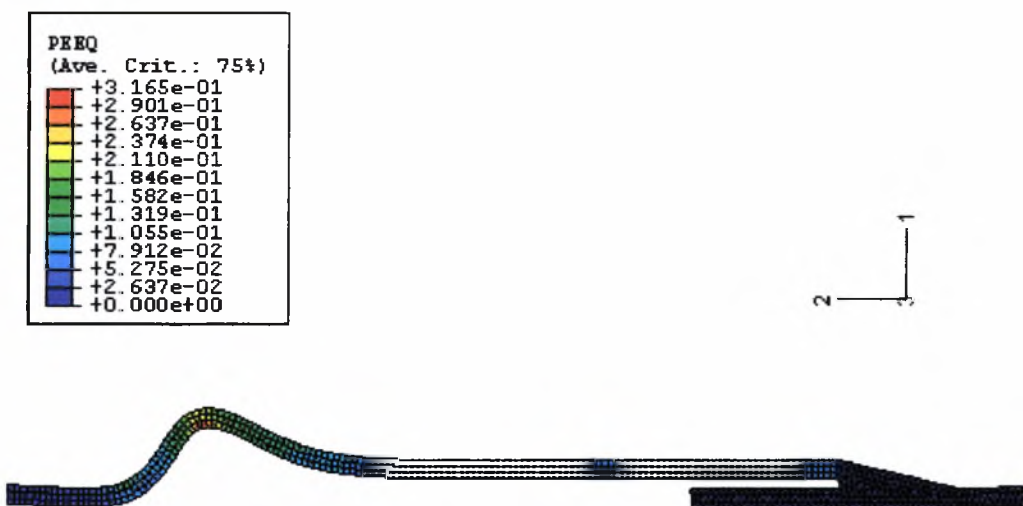
Σε αυτή την υποενότητα εξετάζονται εξωτερικά συγκολλητές συνδέσεις αγωγών με $\frac{D}{t}=47.7, \frac{e}{t}=1.47, \frac{L_b}{t}=12$.



Σχήμα 3.68 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους χωρίς εσωτερική πίεση



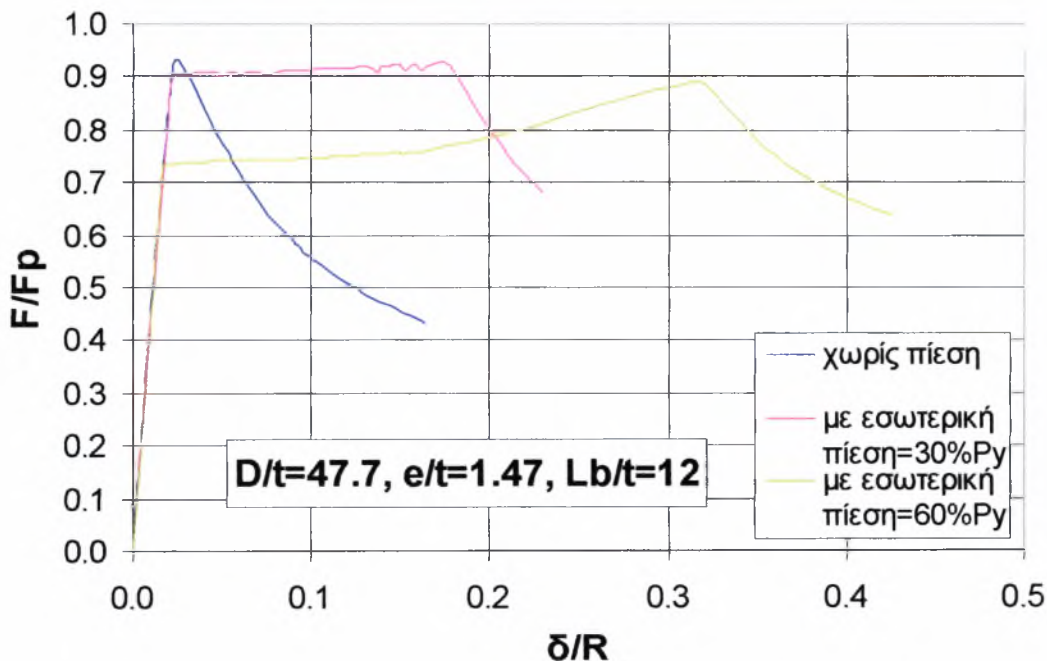
Σχήμα 3.69 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 30% της P_y .



Σχήμα 3.70 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 60% της P_y .

Από το σχήμα 3.68, στο οποίο απεικονίζεται η μορφή του παραμορφωμένου κελύφους χωρίς την άσκηση πίεσης, συμπεραίνεται ότι η αστοχία συμβαίνει στο τμήμα με μεταβλητή καμπυλότητα, δηλαδή στην «καμπάνα» όπου υπάρχει

εκκεντρότητα και βρίσκεται κοντά στην περιοχή της συγκόλλησης. Μελετώντας όμως τα σχήματα 3.68 και 3.69 προκύπτει το συμπέρασμα ότι στις περιπτώσεις στις οποίες ασκείται εσωτερική πίεση 30% και 60% της P_y , η αστοχία λαμβάνει μεν χώρα στο τμήμα με μεταβλητή καμπυλότητα. Όσον αφορά στην επιρροή της άσκησης εσωτερικής πίεσης στην αντοχή του κελύφους, από το διάγραμμα του σχήματος 3.70 συμπεραίνεται ότι άσκηση εσωτερικής πίεσης ίσης με το 30% της πίεσης πλαστικοποίησης συνεπάγεται ελάχιστη μείωση της αντοχής κατά 0.6%, ενώ άσκηση εσωτερικής πίεσης ίσης με το 60% της P_y συνεπάγεται μείωση της αντοχής κατά 4.2%. Επίσης παρατηρείται το φαινόμενο της κράτυνσης στην πρώτη περίπτωση (πίεση ίση με 30% της P_y) και ακόμη πιο ισχυρά στη δεύτερη (πίεση ίση με 60% της P_y).



Σχήμα 3.71 Συγκριτικό διάγραμμα εξωτερικά συγκολλητών συνδέσεων με λόγο $D/t=47.7$, $e/t=1.47$ και $L_b/t=12$.

3.7.2 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ

Και η δεύτερη ομάδα αποτελείται από δύο υποομάδες, για $\frac{D}{t} = 95$ και $\frac{D}{t} = 47.7$

και η κάθε υποομάδα από τρία μοντέλα προσομοίωσης, ένα για κέλυφος στο οποίο δεν ασκείται εσωτερική πίεση, ένα για κέλυφος στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 30% της πίεσης πλαστικοποίησης P_y που δίνεται από τον τύπο 3.2 και ένα για κέλυφος με 60% της P_y . Σε όλα τα εξεταζόμενα μοντέλα όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές. Τέλος σημειώνεται ότι κατά την ανάλυση στο τέταρτο βήμα (όπου επιβάλλεται η εσωτερική πίεση) λήφθηκε υπόψη η αλληλεπίδραση επαφής των επιφανειών, με κατάλληλο αλγόριθμο επαφής (contact), η οποία είναι εμφανής στη λεπτομέρεια της περιοχής της συγκόλλησης των σχημάτων που παρατίθενται στις παρακάτω υποενότητες. Κατά την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης επαφής δεν επιτρέπεται στον εσωτερικό αγωγό να επικαλύψει τον εξωτερικό όπως θα είχε συμβεί χωρίς αυτή τη θεώρηση. Σημειώνεται δε ότι η τριβή μεταξύ των εν επαφή επιφανειών αμελήθηκε.

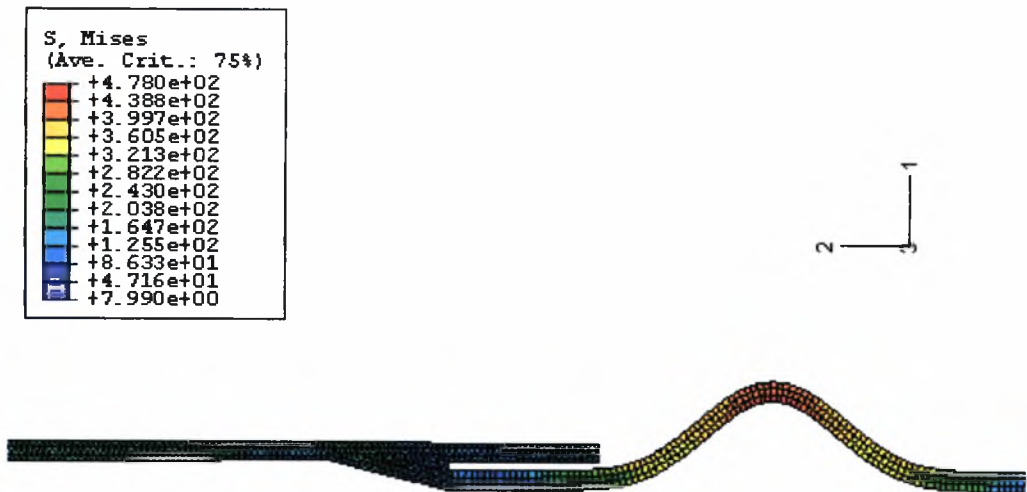
3.7.2.1 ΠΡΩΤΗ ΥΠΟΟΜΑΔΑ

Σε αυτή την υποενότητα εξετάζονται εσωτερικά συγκολλητές συνδέσεις αγωγών

με $\frac{D}{t} = 95$, $\frac{e}{t} = 1.47$, $\frac{L_b}{t} = 12$.



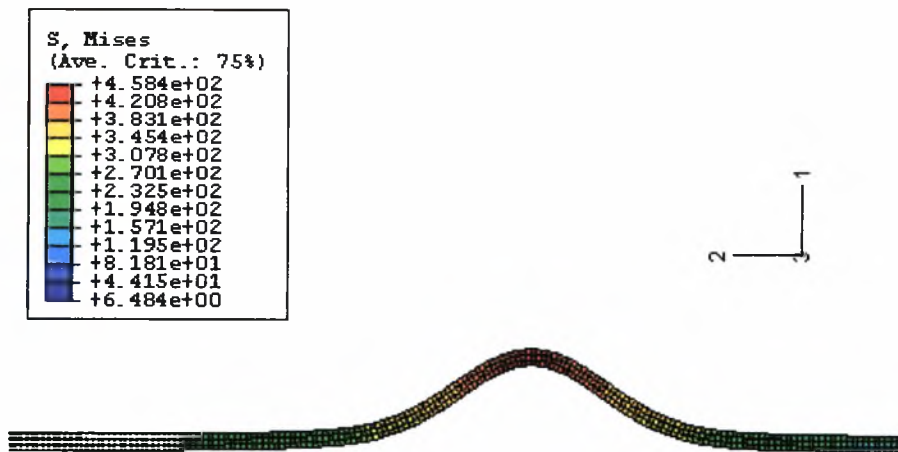
Σχήμα 3.72 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους χωρίς εσωτερική πίεση



Σχήμα 3.73 περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 30% της P_y .

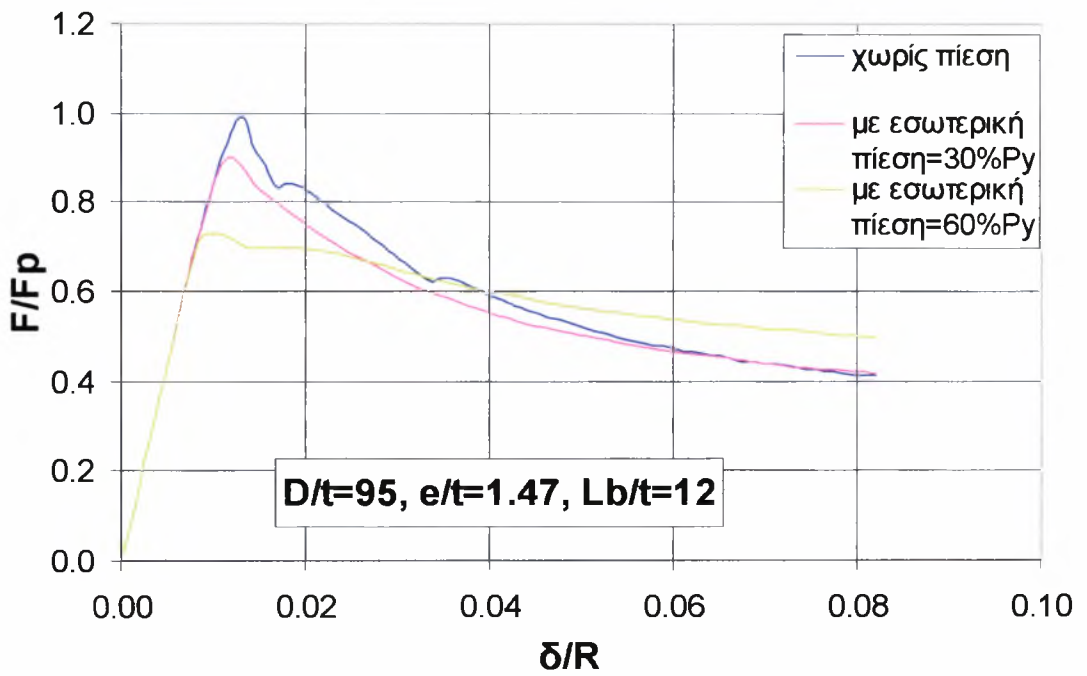


Σχήμα 3.74α παραμορφωμένο κέλυφος στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 60% της P_y .



Σχήμα 3.74β περιοχή αστοχίας παραμορφωμένου κελύφους στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 60% της P_y .

Μελετώντας το σχήμα 3.72, στο οποίο απεικονίζεται η μορφή του παραμορφωμένου κελύφους χωρίς την πίεση, συμπεραίνεται ότι η αστοχία συμβαίνει στην περιοχή πλησίον της συγκόλλησης. Επίσης από το σχήμα 3.73, όπου απεικονίζεται η μορφή του παραμορφωμένου κελύφους με άσκηση πίεσης ίσης με 30% της P_y , προκύπτει το ίδιο συμπέρασμα με τη διαφορά ότι η αστοχία είναι λίγο πιο απομακρυσμένη από τη συγκόλληση από ότι στην προηγούμενη περίπτωση και η μορφή της κύρτωσης είναι πιο ομαλή. Το τρίτο κέλυφος που εξετάστηκε, στο οποίο επιβλήθηκε εσωτερική πίεση ίση με το 60% της P_y , αστοχεί (όπως φαίνεται στο σχήμα 3.74) πολύ μακριά από την περιοχή της συγκόλλησης. Όσον αφορά στην επιρροή της άσκησης εσωτερικής πίεσης στην αντοχή του κελύφους, από το διάγραμμα του σχήματος 3.75 συμπεραίνεται ότι άσκηση εσωτερικής πίεσης ίσης με το 30% της πίεσης πλαστικοποίησης συνεπάγεται μείωση της αντοχής κατά 9%, ενώ άσκηση εσωτερικής πίεσης ίσης με το 60% της P_y συνεπάγεται μείωση της αντοχής κατά 26%.



Σχήμα 3.75 Συγκριτικό διάγραμμα εσωτερικά συγκολλητών συνδέσεων με λόγο $D/t=95$, $e/t=1.47$ και $L_b/t=12$.

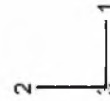
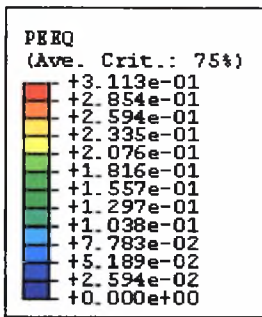
3.7.2.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΥΠΟΟΜΑΔΑ

Σε αυτή την υποενοότητα εξετάζονται εσωτερικά συγκολλητές συνδέσεις αγωγών

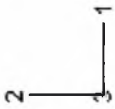
με $\frac{D}{t}=47.7$, $\frac{e}{t}=1.47$, $\frac{L_b}{t}=12$.



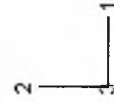
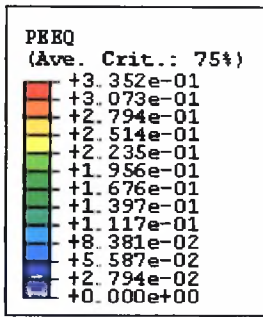
Σχήμα 3.76α παραμορφωμένο κέλυφος χωρίς εσωτερική πίεση.



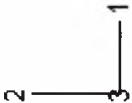
Σχήμα 3.76β περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους χωρίς εσωτερική πίεση.



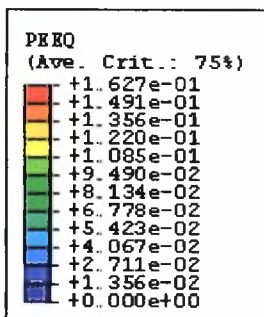
Σχήμα 3.77α παραμορφωμένο κέλυφος στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 30% της P_y .



Σχήμα 3.77β περιοχή αστοχίας παραμορφωμένου κελύφους στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 30% της P_y .



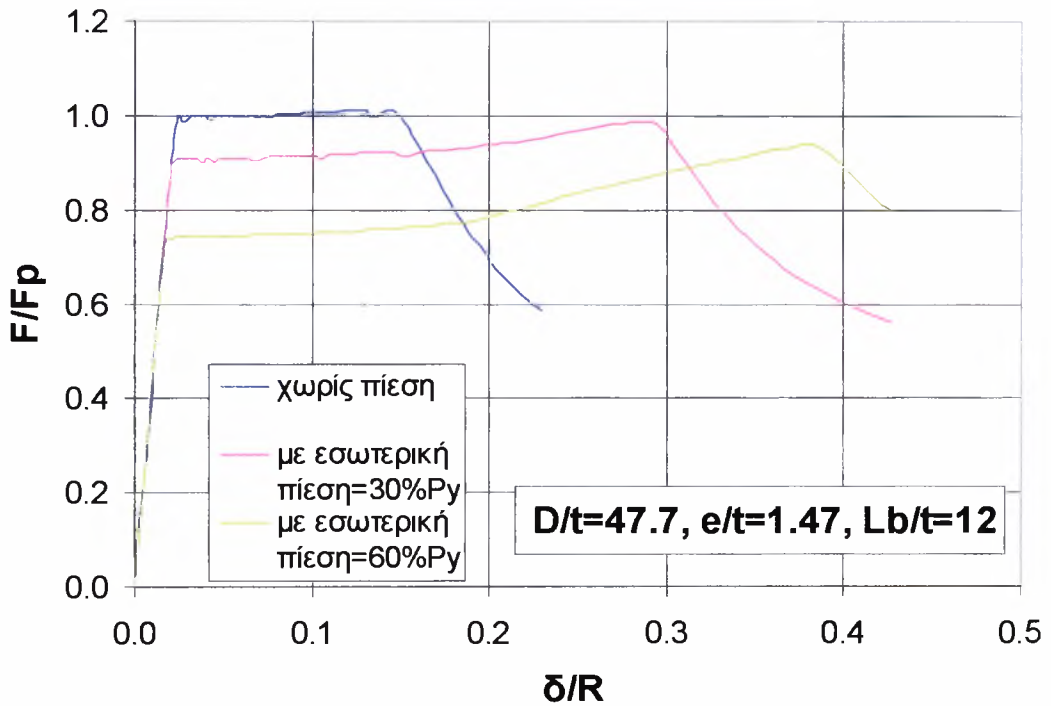
Σχήμα 3.78α παραμορφωμένο κέλυφος στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 60% της P_y .



Σχήμα 3.78β περιοχή αστοχίας παραμορφωμένου κελύφους στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 60% της P_y .

Από το σχήμα 3.76 το οποίο απεικονίζει το παραμορφωμένο κέλυφος, χωρίς άσκηση εσωτερικής πίεσης, συμπεραίνεται ότι η αστοχία συμβαίνει μακριά από την περιοχή της συγκόλλησης, επίσης στο διάγραμμα του σχήματος 3.79 παρατηρείται μία σημαντική μεταλυσισμική συμπεριφορά του κελύφους αυτού. Το δε αντίστοιχο κέλυφος με εσωτερική πίεση 30% της P_y , αστοχεί ακόμη πιο μακριά από τη συγκόλληση (σχήμα 3.77α) και παρουσιάζει πιο έντονα το φαινόμενο της καλής μεταλυσισμικής συμπεριφοράς (διάγραμμα σχήματος 3.79). Στην περίπτωση άσκησης εσωτερικής πίεσης ίσης με 60% της P_y , η αστοχία συμβαίνει σε άκρως απομακρυσμένο από τη συγκόλληση τμήμα του κελύφους, το οποίο κέλυφος κρατύνεται ισχυρότερα από τα δύο προηγούμενα που μελετήθηκαν σε αυτή την υποενότητα. Επίσης στις συνδέσεις αγωγών στις οποίες ασκείται εσωτερική πίεση παρατηρείται παραμόρφωση σε όλο το μήκος τους, συμπέρασμα που προκύπτει από παρατήρηση της μορφής των κελυφών αυτών μετά το τέλος της αριθμητικής ανάλυσής τους. Όσον αφορά στην επιρροή της άσκησης εσωτερικής πίεσης στην αντοχή του κελύφους, από το διάγραμμα του σχήματος 3.79 συμπεραίνεται ότι άσκηση εσωτερικής πίεσης ίσης με το 30% της πίεσης πλαστικοποίησης συνεπάγεται

μείωση της αντοχής κατά 2.1%, ενώ άσκηση εσωτερικής πίεσης ίσης με το 60% της P_y συνεπάγεται μείωση της αντοχής κατά 7%.



Σχήμα 3.79 Συγκριτικό διάγραμμα εσωτερικά συγκολλητών συνδέσεων με λόγο $D/t=47.7$, $e/t=1.47$ και $L_b/t=12$.

3.7.3 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕ ΔΙΠΛΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ

Και η τρίτη ομάδα αποτελείται από δύο υποομάδες, για $\frac{D}{t} = 95$ και $\frac{D}{t} = 47.7$,

ενώ η κάθε υποομάδα από τρία μοντέλα προσομοίωσης, ένα για κέλυφος στο οποίο δεν ασκείται εσωτερική πίεση, ένα για κέλυφος στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 30% της πίεσης P_y που δίνεται από τον τύπο 3.2 και ένα για κέλυφος με 60% της P_y . Σε όλα τα εξεταζόμενα μοντέλα όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές.

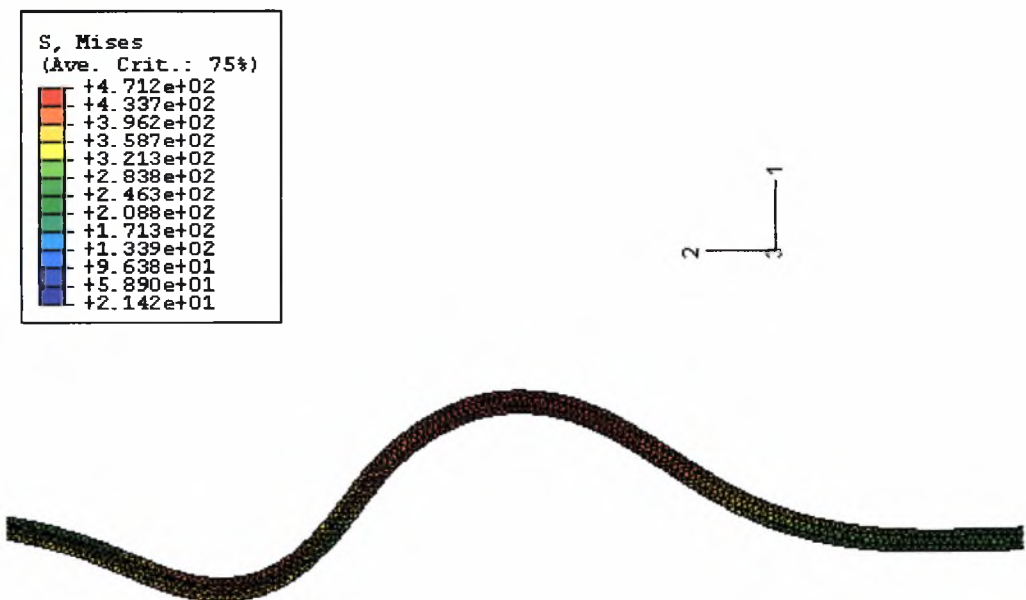
3.7.3.1 ΠΡΩΤΗ ΥΠΟΟΜΑΔΑ

Σε αυτή την υποενοότητα εξετάζονται εσωτερικά συγκολλητές συνδέσεις αγωγών με

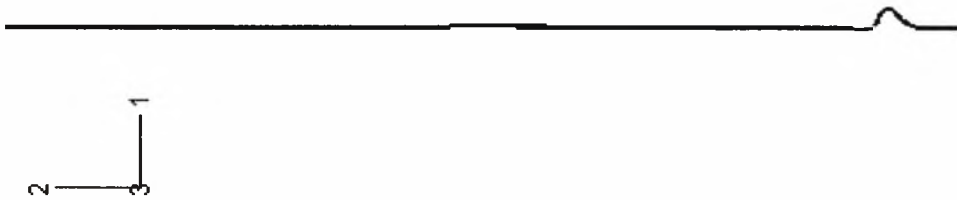
$$\frac{D}{t} = 95, \frac{e}{t} = 1.47, \frac{L_b}{t} = 12.$$



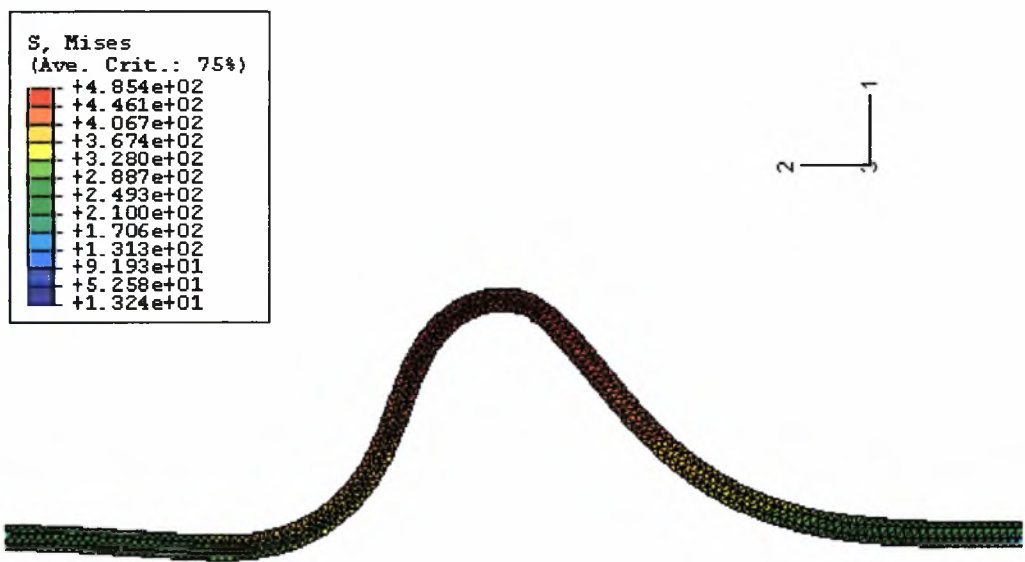
Σχήμα 3.80α παραμορφωμένο κέλυφος χωρίς εσωτερική πίεση.



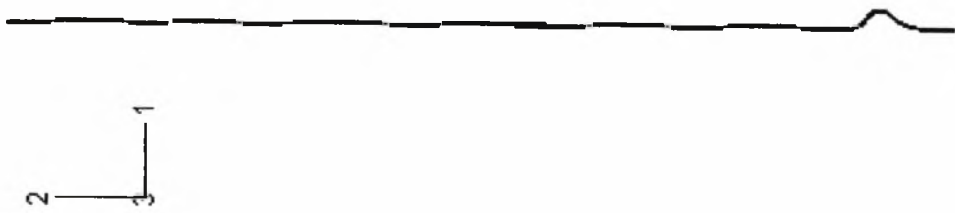
Σχήμα 3.80β περιοχή αστοχίας παραμορφωμένου κελύφους χωρίς εσωτερική πίεση



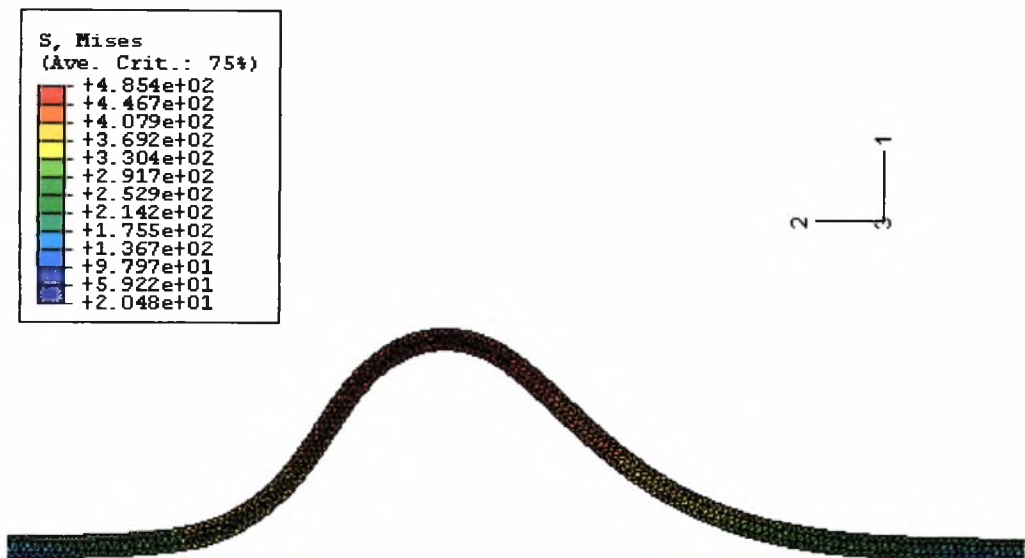
Σχήμα 3.81α παραμορφωμένο κέλυφος στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 30% της P_y .



Σχήμα 3.81β περιοχή αστοχίας παραμορφωμένου κελύφους στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 30% της P_y .



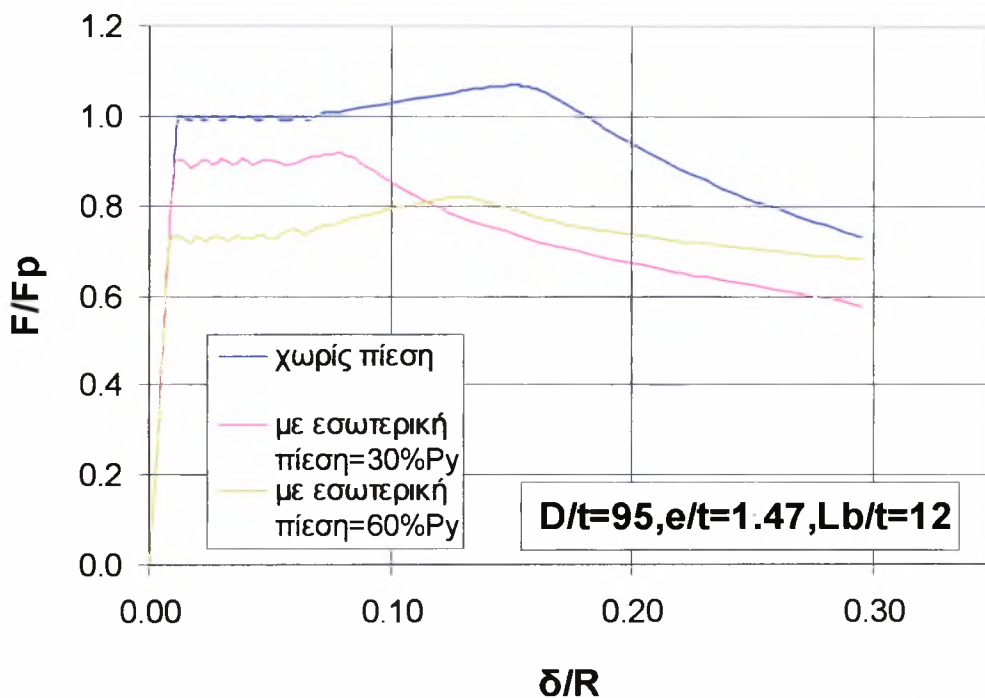
Σχήμα 3.82α παραμορφωμένο κέλυφος στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 60% της P_y .



Σχήμα 3.82β περιοχή αστοχίας παραμορφωμένου κελύφους στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 60% της P_y .

Εξετάζοντας τα σχήματα που παρατέθηκαν ανωτέρω συνάγεται το συμπέρασμα ότι και στην περίπτωση που δεν ασκείται πίεση στο μελετώμενο κέλυφος και στις περιπτώσεις στις οποίες ασκείται εσωτερική πίεση 30% και 60% της P_y , η αστοχία λαμβάνει χώρα μακριά από την περιοχή της συγκόλλησης. Επίσης στο διάγραμμα του σχήματος 3.83 φαίνεται ότι και στις τρεις περιπτώσεις το κέλυφος κρατύνεται. Όσον αφορά στην επιρροή της άσκησης εσωτερικής πίεσης στην αντοχή του κελύφους, από

το διάγραμμα του σχήματος 3.83 συμπεραίνεται ότι άσκηση εσωτερικής πίεσης ίσης με το 30% της πίεσης πλαστικοποίησης συνεπάγεται μείωση της αντοχής κατά 15.2%, ενώ άσκηση εσωτερικής πίεσης ίσης με το 60% της P_y συνεπάγεται μείωση της αντοχής κατά 25%.



Σχήμα 3.83 Συγκριτικό διάγραμμα διπλά συγκολλητών συνδέσεων με λόγο $D/t=95$, $e/t=1.47$ και $L_b/t=12$.

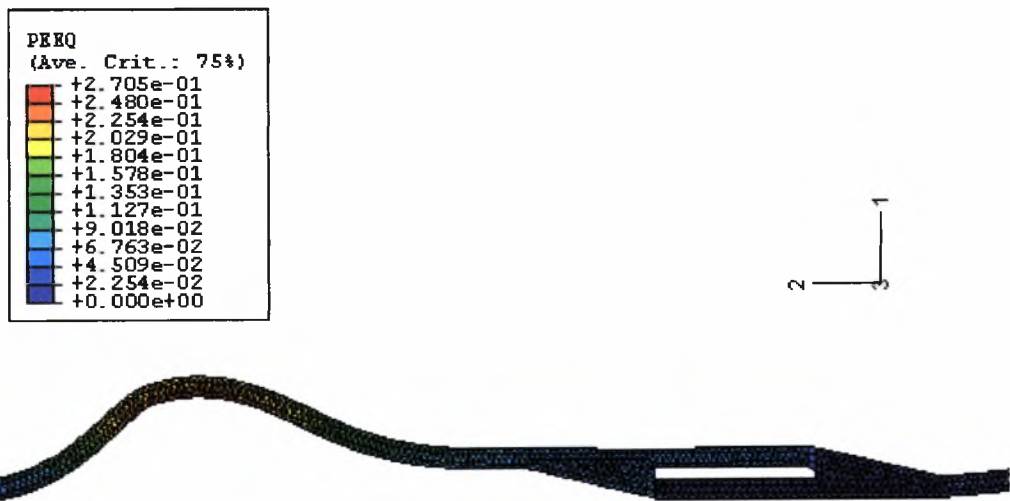
3.7.3.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΥΠΟΟΜΑΔΑ

Σε αυτή την υποενότητα εξετάζονται εσωτερικά συγκολλητές συνδέσεις αγωγών με

$$\frac{D}{t}=47.7, \frac{e}{t}=1.47, \frac{L_b}{t}=12.$$



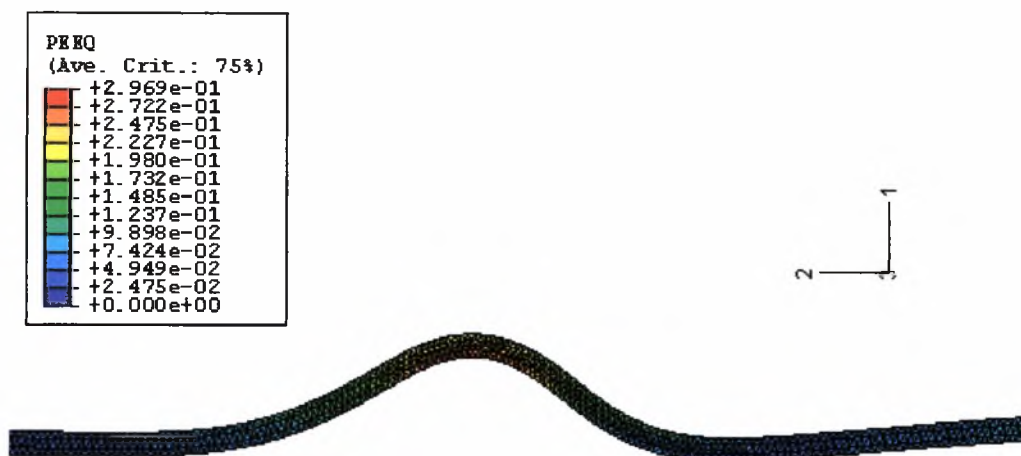
Σχήμα 3.84α παραμορφωμένο κέλυφος χωρίς εσωτερική πίεση.



Σχήμα 3.84β περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους χωρίς εσωτερική πίεση



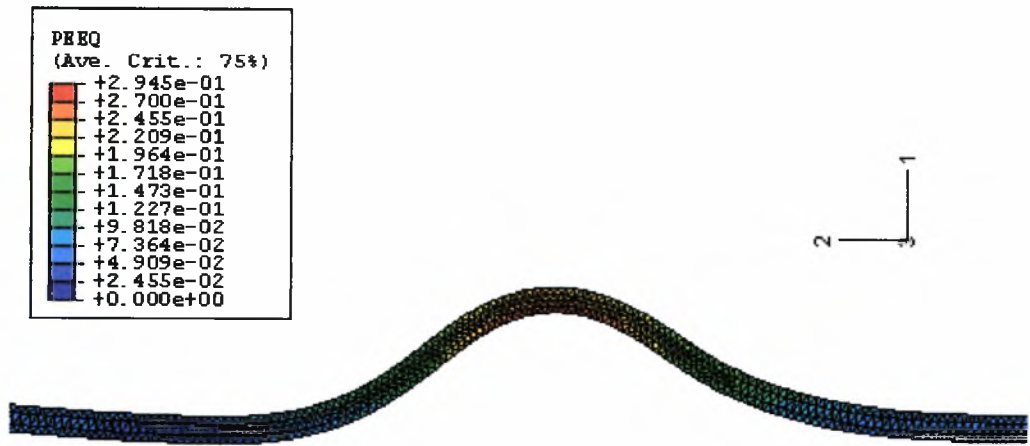
Σχήμα 3.85α παραμορφωμένο κέλυφος στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 30% της P_y .



Σχήμα 3.85β περιοχή σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 30% της P_y .

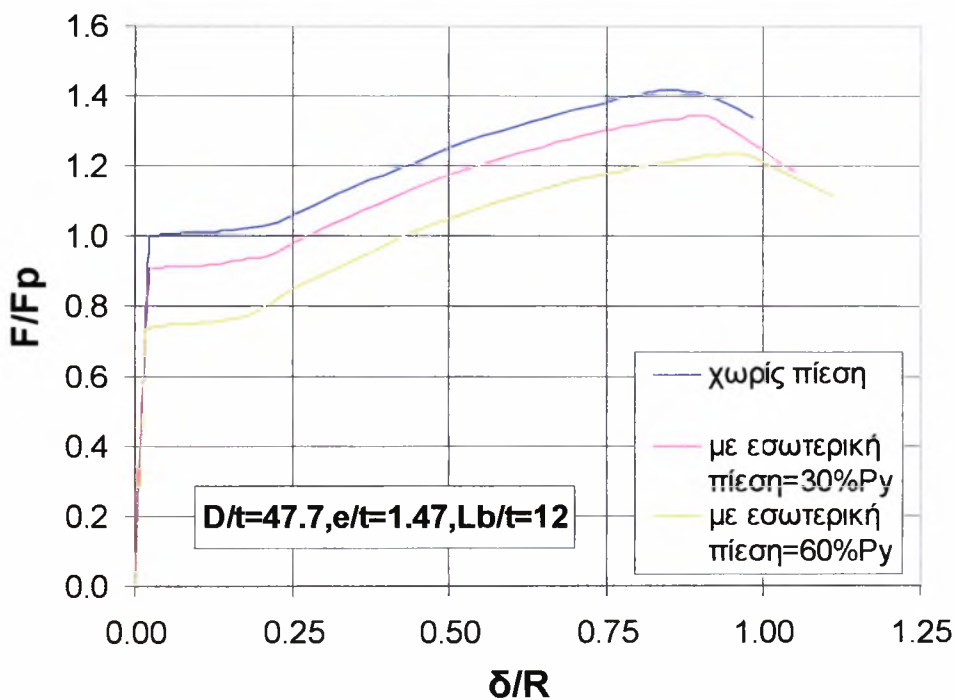


Σχήμα 3.86α παραμορφωμένο κέλυφος στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 60% της P_y .



Σχήμα 3.86β περιοχή αστοχίας παραμορφωμένου κελύφους στο οποίο ασκείται εσωτερική πίεση ίση με το 60% της P_y .

Μελετώντας το σχήμα 3.84, στο οποίο απεικονίζεται η μορφή του παραμορφωμένου κελύφους χωρίς πίεση, συμπεραίνεται ότι η αστοχία συμβαίνει στην περιοχή μεταβλητής καμπυλότητας, δηλαδή στην «καμπάνα» που βρίσκεται κοντά στη συγκόλληση. Στα δύο επόμενα κελύφη που εξετάστηκαν όμως, στα οποία ασκείται εσωτερική πίεση 30% και 60% της P_y αντιστοίχως, η αστοχία λαμβάνει χώρα αρκετά μακριά από την περιοχή της συγκόλλησης (σχήματα 3.85 και 3.86). Όσον αφορά στην επιρροή της άσκησης εσωτερικής πίεσης στην αντοχή του κελύφους, από το διάγραμμα του σχήματος 3.85 συμπεραίνεται ότι εσωτερική πίεση ίση με το 30% της πίεσης πλαστικοποίησης συνεπάγεται μείωση της αντοχής κατά 8%, ενώ άσκηση εσωτερικής πίεσης ίσης με το 60% της P_y συνεπάγεται μείωση της αντοχής κατά 19%.



Σχήμα 3.87 Συγκριτικό διάγραμμα διπλά συγκολλητών συνδέσεων με λόγο $D/t=47.7$, $e/t=1.47$ και $L_b/t=12$.

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάλυση της ενότητας 3.5 είναι ότι η άσκηση εσωτερικής πίεσης σε συγκολλητές συνδέσεις αγωγών μορφής ολίσθησης προκαλεί πτώση της οριακής αντοχής. Η πτώση που διαπιστώθηκε φτάνει και το 26% και δεικνύει ότι η αστοχία προκαλείται κυρίως λόγω πλαστικότητας.

Εν τούτοις, η συμπεριφορά του σωλήνα μετά την αστοχία είναι σαφώς καλύτερη στην περίπτωση που ασκείται πίεση και χαρακτηρίζεται από μία σημαντική «μεταλυγισμική αντοχή».

3.8 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ L_s

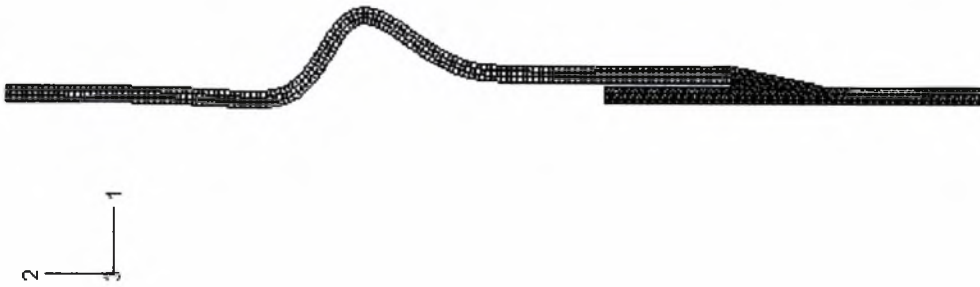
Στόχος σε αυτό το στάδιο της μελέτης ήταν να διαπιστωθεί η επιρροή του μήκους L_s στην αντοχή των μελετώμενων συγκολλητών συνδέσεων αγωγών. Το μήκος L_s εκφράζει την απόσταση του συγκολλημένου άκρου του αριστερού αγωγού της εκάστοτε σύνδεσης κελυφών από το τμήμα με μεταβλητή καμπυλότητα (καμπάνα). Σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης έγινε αρχικά επιλογή ενός χαρακτηριστικού μοντέλου της ανωτέρω ανάλυσης, το οποίο αποτελεί προσομοίωση εξωτερικά συγκολλημένης σύνδεσης αγωγών με $\frac{D}{t} = 95$, $\frac{e}{t} = 1.31$ και $\frac{L_b}{t} = 16$ (Μοντέλο I).

Επελέγη κέλυφος με εξωτερική συγκόλληση γιατί, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης, τα κελύφη με αυτόν τον τύπο συγκόλλησης αστοχούν με την επιβολή αξονικού φορτίου στην περιοχή μεταβλητής καμπυλότητας. Αυτή η περιοχή όμως βρίσκεται κοντά στη συγκόλληση. Επομένως, το ζητούμενο ήταν να εξεταστεί σε αυτή την ενότητα η πιθανότητα επίδρασης στην αντοχή των κελυφών η μείωση της απόστασης L_s της καμπάνας από την ευαίσθητη περιοχή της συγκόλλησης. Για όλα τα μοντέλα προσομοίωσης της ανάλυσης που έχει προηγηθεί ισχύει ότι το μήκος τμήματος του αριστερού αγωγού από την αρχή του τμήματος με μεταβλητή καμπυλότητα έως τη συγκόλληση είναι 305mm, επομένως το κέλυφος που έχει επιλεγεί γι' αυτό το στάδιο της μελέτης έχει μήκος

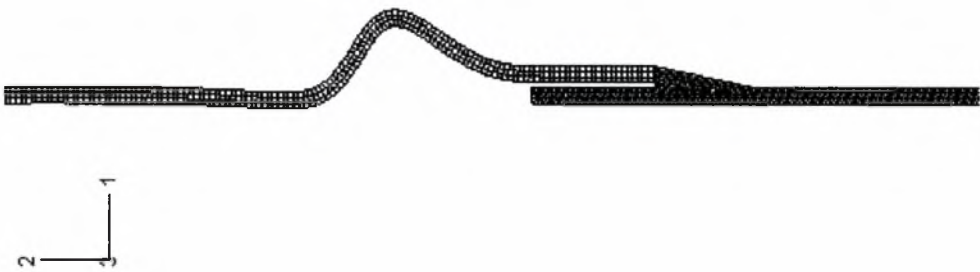
$L_s = 305 - L_b = 305 - 16 \times 6.4 = 202.6\text{mm}$, το οποίο αντιστοιχεί σε $L_s/t = 31.66$ για το Μοντέλο I. Συνεπώς για να εξεταστεί η επιρροή της εξεταζόμενης παραμέτρου στην αντοχή των μελετώμενων συγκολλητών συνδέσεων αγωγών έγινε προσομοίωση δυο επιπλέον κελυφών με $L_s/t = 24.63$ (Μοντέλο II) και $L_s/t = 18.38$ (Μοντέλο III) αντίστοιχα (όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά αυτών είναι ίδια με εκείνα του βασικού κελύφους, δηλαδή πρόκειται για εξωτερικά συγκολλημένες συνδέσεις αγωγών με $\frac{D}{t} = 95$, $\frac{e}{t} = 1.31$ και $\frac{L_b}{t} = 16$).



Σχήμα 3.88 λεπτομέρεια περιοχής σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $L_s/t = 31.66$ (Μοντέλο I)



Σχήμα 3.89 λεπτομέρεια περιοχής σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $L_s/t = 24.63$ (Μοντέλο II)



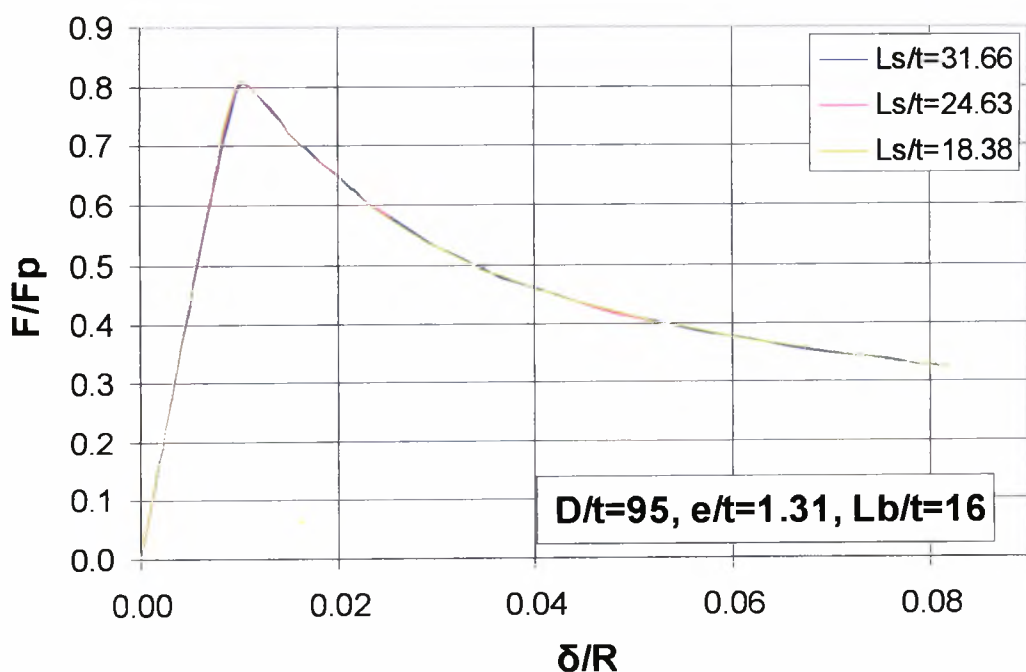
Σχήμα 3.90 λεπτομέρεια περιοχής σύνδεσης παραμορφωμένου κελύφους με $L_s/t = 18.38$ (Μοντέλο III)

Όπως είναι εμφανές από τα σχήματα 3.88, 3.89 και 3.90, αλλά και αναμενόμενο από τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης που έχουν παρατεθεί σε προηγούμενες ενότητες, και τα τρία εξεταζόμενα εξωτερικά συγκολλημένα κελύφη

που μελετώνται σε αυτή την ενότητα αστοχούν στην περιοχή μεταβλητής καμπυλότητας. Μάλιστα, όσο μικρότερο είναι το μήκος L_s τόσο πιο κοντά στη συγκόλληση λαμβάνει χώρα η αστοχία. Επίσης, από το ακόλουθο διάγραμμα (σχήμα 3.91) συμπεραίνεται ότι η μείωση της απόστασης της καμπάνας από τη συγκόλληση, δηλαδή η μείωση του μήκους L_s , δεν επιδρά ουσιαστικά στην αντοχή του κελύφους. Από μια πιο λεπτομερή ανάλυση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής ανάλυσης των τριών κελυφών προκύπτουν τα εξής :

$L_s/t=31.66$	$\frac{F_u}{F_P} = 0.802$
$L_s/t = 24.63$	$\frac{F_u}{F_P} = 0.806$
$L_s/t=18.38$	$\frac{F_u}{F_P} = 0.808$

Παρατηρείται επομένως μηδαμινή αύξηση της αντοχής η οποία στερείται πρακτικής σημασίας.



Σχήμα 3.91 Συγκριτικό διάγραμμα εξωτερικά συγκολλητών συνδέσεων με λόγο $D/t=95$, $e/t=1.31$ και $L_b/t=16$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΚΦΡΑΣΕΙΣ

4.1 Ελαστική ανάλυση τάσεων

Μία πρώτη προσέγγιση του θέματος της εκτίμησης της αντοχής των συγκολλητών συνδέσεων μορφής ολίσθησης μπορεί να γίνει αναλυτικά, με ελαστική ανάλυση. Στα πλαίσια της ελαστικής ανάλυσης, η τάση απειροστής διατομής του τοιχώματος του υπόψη κελύφους δίνεται από τη σχέση 4.1.

$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{M}{I} \cdot \frac{t}{2} \quad (4.1)$$

όπου : αξονικό, θλιπτικό φορτίο F

$$\text{εμβαδόν διατομής } A = t \cdot b = t \quad (4.2)$$

$$\text{ροπή λόγω εκκεντρότητας } M = F \cdot e = F \cdot (c + t) \quad (4.3)$$

$$\text{ροπή αδράνειας διατομή } I = \frac{t^3 \cdot b}{12} = \frac{t^3}{12} \quad (4.4)$$

Από τη σχέση 4.1, με βάση τις σχέσεις 4.2, 4.3, και 4.4 προκύπτει ότι η τάση δίνεται από τη σχέση 5.5.

$$\sigma = \frac{F}{t} \cdot \left(7 + \frac{6 \cdot c}{t} \right) \quad (4.5)$$

Το οριακό φορτίο αστοχίας της σύνδεσης δίνεται από τη σχέση 5.6 και προκύπτει από τη σχέση 4.5 για $\sigma_{\max} = \sigma_y$.

$$F_u = \frac{F_p}{7 + \left(\frac{6 \cdot c}{t} \right)} \quad (4.6)$$

όπου F_p είναι το φορτίο πλαστικοποίησης της σύνδεσης .

Επομένως, με βάση την ελαστική ανάλυση, η αποδοτικότητα της σύνδεσης υπό αξονική φόρτιση (δηλαδή ο λόγος του οριακού φορτίου F_u ως προς το πλαστικό φορτίο της σωληνωτής διατομής F_p) συναρτάται με το λόγο του διάκενου (μεταξύ των συνδεόμενων αγωγών στην περιοχή της σύνδεσης) ως προς το πάχος του τοιχώματος του κελύφους, σύμφωνα με τη σχέση 4.7, η οποία προκύπτει από τη σχέση 4.6.

$$\frac{F_u}{F_p} = \frac{1}{7 + \frac{6 \cdot c}{t}} \quad (4.7)$$

Θεωρώντας ότι ο λόγος c/t είναι μικρότερος της μονάδας, συμπεραίνεται ότι οι τιμές που προκύπτουν με βάση την ελαστική ανάλυση, για την αποδοτικότητα των υπόψη συνδέσεων υπό αξονική φόρτιση, είναι μικρότερη του 0.14, δηλαδή η αντοχή των συνδέσεων είναι της τάξης του $0.14 F_p$ ή μικρότερη.

4.2 Ελαστοπλαστική ανάλυση τάσεων

Αναλυτικά προσεγγίστηκε το θέμα της εκτίμησης της αντοχής των συγκολλητών συνδέσεων μορφής ολίσθησης και με ελαστοπλαστική ανάλυση από τον Brockenbrough (1990). Ο τελευταίος, θεωρώντας ως αμελητέα την επιρροή της περιφερειακής τάσης, έκανε οριακή πλαστική ανάλυση και εξήγαγε την εξίσωση 4.8, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της αντοχής τέτοιων συνδέσεων. Η εν λόγω εξίσωση συναρτά την αποδοτικότητα της σύνδεσης υπό αξονική φόρτιση (δηλαδή το λόγο του οριακού φορτίου F_u ως προς το πλαστικό φορτίο της σωληνωτής διατομής F_p) με το λόγο της εκκεντρότητας προς το πάχος τοιχώματος ($k = \frac{e}{t}$, όπου $e=c+t$). Σημειώνεται ότι στην ανάλυση του Brockenbrough (1990) δε λαμβάνονται υπόψη τα ευεργετικά αποτελέσματα της κράτυνσης, ούτε η επίδραση της περιμετρικής τάσης. Ο ίδιος χαρακτηρίζει την εξίσωση αυτή ως αρκετά συντηρητική συγκρινόμενη με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα και αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων.

$$\frac{F_u}{F_p} = (k^2 + 1)^{1/2} - k \quad (4.8)$$

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται και τα αποτελέσματα σύγκρισης των αριθμητικών αποτελεσμάτων της παραμετρικής μελέτης με τα αντίστοιχα αναλυτικά που προκύπτουν από την εξίσωση του Brockenbrough (4.8). Συγκεκριμένα συγκρίνεται το αδιαστατοποιημένο φορτίο αστοχίας του εκάστοτε κελύφους ($\frac{F_u}{F_p}$, όπου το φορτίο αστοχίας έχει αδιαστατοποιηθεί ως προς το φορτίο πλαστικοποίησης που αντιστοιχεί στο κάθε κέλυφος και δίνεται από τον τύπο 3.1), το οποίο προκύπτει από την αριθμητική ανάλυση μοντέλων που έγινε στα πλαίσια της εκπόνησης της

παραμετρικής μελέτης, με το λόγο του οριακού φορτίου ως προς το πλαστικό φορτίο της σωληνωτής διατομής ο οποίος προκύπτει από την εξίσωση 4.8.

Η σύγκριση έγινε για εξωτερικά συγκολλητές συνδέσεις αγωγών με λόγο διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος ίσο με 95, 61 και 47.7. Τα αποτελέσματα αυτής της σύγκρισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

		Αναλυτικά Αποτελέσματα F_u/F_p	Αριθμητικά Αποτελέσματα F_u/F_p
D/t = 95	k=1.31	0.337	0.802
	k=1.47	0.308	0.785
	k=1.62	0.283	0.767
D/t=61	k=1.31	0.362	0.913
	k=1.47	0.340	0.902
	k=1.62	0.320	0.890
D/t=47.7	k=1.31	0.337	0.955
	k=1.47	0.308	0.933
	k=1.62	0.283	0.911

Πίνακας 4.1 Σύγκριση αριθμητικών φορτίων αστοχίας, με αντίστοιχα αναλυτικά της εξίσωσης Brockenbrough (1990), για τιμές του λόγου k από 1.31 έως 1.62

Από τα αποτελέσματα της σύγκρισης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1, συμπεραίνεται ότι το αριθμητικό φορτίο αστοχίας είναι από δύο έως τρεις φορές περίπου μεγαλύτερο του αντίστοιχου που προκύπτει με βάση της αναλυτική έκφραση του Brockenbrough (1990). Αυτή η διαπίστωση παρατηρήθηκε από τον Brockenbrough (1990), ο οποίος τονίζει ότι η εξίσωσή του δίνει τιμές για την αντοχή των συνδέσεων της τάξης του $0.40 F_y$, ή μικρότερες, ενώ αναφέρει ότι οι αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από εργαστηριακά πειράματα είναι της τάξης του $0.75 F_y$, ή μεγαλύτερες.

Μια πιο σύνθετη ελαστοπλαστική ανάλυση, για τις υπόψη συνδέσεις, έγινε με βάση τη θεωρία του μεμβρανικού κελύφους από τους Tawfik and O'Rourke (1985). Αυτοί κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αποδοτικότητα του κελύφους επηρεάζεται

από τη γεωμετρία της περιοχής της σύνδεσης και την αξονική τάση και σε μικρότερο βαθμό από την περιμετρική τάση. Σε αυτή τη μελέτη έγινε διαχωρισμός δύο τύπων αστοχίας, λόγω πλαστικοποίησης στην περιοχή της συγκόλλησης και λόγω πλαστικοποίησης στο τμήμα μεταβλητής καμπυλότητας («καμπάνα»). Οι εξισώσεις που δίνουν την αποδοτικότητα της σύνδεσης για καθέναν από τους δύο τύπους αστοχίας είναι οι 4.9 και 4.12.

$$\frac{F_I}{F_P} = \frac{1}{2} \cdot \left(p_r - \frac{\zeta}{\tau} \cdot \sqrt{4 - 3 \cdot p_r^2} \right) - \left[\frac{1}{4} \cdot \left(p_r - \frac{\zeta}{\tau} \cdot \sqrt{4 - 3 \cdot p_r^2} \right)^2 + 1 - p_r^2 \right]^{1/2} \quad (4.9)$$

όπου F_P = φορτίο πλαστικοποίησης (σχέση 3.1)

$$p_r = \frac{p \cdot R_o}{\sigma_Y \cdot t} \quad (\text{πίεση}) \quad (4.10)$$

$$\zeta = \frac{e}{R_o} \quad (4.11)$$

$$\tau = \frac{t}{R_o} \quad (R_o = \text{μέση ακτίνα, } t = \text{πάχος τοιχώματος})$$

Για την περίπτωση που δεν ασκείται εσωτερική πίεση η σχέση 4.9 γίνεται

$$\frac{F_I}{F_P} = -k - \sqrt{k^2 + 1} \quad (4.12)$$

$$\frac{F_{II}}{F_P} = \frac{(2\rho + 1)p_r \pm \sqrt{(2\rho + 1)^2 p_r^2 - 4(\rho^2 + \rho + 1)(p_r^2 - \sin^2 \phi)}}{2(\rho^2 + \rho + 1)} \quad (4.13)$$

όπου F_P = φορτίο πλαστικοποίησης (σχέση 3.1)

$$\rho = \frac{\frac{\zeta \cdot \pi^2}{2 \cdot \lambda^2} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot \eta}{\lambda}\right)}{1 + \frac{\zeta^2 \cdot \pi^2}{4 \cdot \lambda^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot \eta}{\lambda}\right)}, \quad \text{όπου } \lambda = \frac{L_b}{R_o}$$

$$\sin^2 \phi = \left[1 + \frac{\zeta^2 \cdot \pi^2}{4 \cdot \lambda^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot \eta}{\lambda}\right) \right]^{-1}, \quad \text{το } \zeta \text{ δίνεται από τη σχέση 4.10}$$

Το φορτίο αστοχίας (δηλαδή η μικρότερη τιμή της F_{II}) δίνεται από τη σχέση 4.12 για τη μεγαλύτερη τιμή του ρ , η οποία στην περίπτωση θλιπτικής, αξονικής φόρτισης προκύπτει για $\eta = 0$.

Για την περίπτωση που δεν ασκείται εσωτερική πίεση η σχέση 4.13 γίνεται

$$\frac{F_{II}}{F_P} = \frac{1}{\sqrt{\rho^2 + \rho + 1}}, \quad \text{όπου } \rho = \frac{\pi^2}{2} \cdot \frac{e}{t} \cdot \frac{R_o}{t} \cdot \left(\frac{t}{L_b}\right)^2 \quad (4.14)$$

Για εξωτερικά συγκολλητές συνδέσεις αγωγών με λόγο διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος ίσο με 95, σύμφωνα με την εν λόγω θεωρία προκύπτει ότι αντιστοιχούν στο δεύτερο τύπο αστοχίας. Η αντοχή τους δίνεται από τον τύπο 4.14. και παίρνει τιμές (F_{II}) $0.33 F_P$ ή μικρότερες.

Στον Πίνακα 4.2 παρατίθενται τα αποτελέσματα σύγκρισης των αριθμητικών αποτελεσμάτων για εξωτερικά συγκολλητές συνδέσεις αγωγών της παραμετρικής μελέτης, οι οποίες έχουν λόγο διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος ίσο με 95, με τα αντίστοιχα της αναλυτικής έκφρασης των Tawfik and O'Rourke (1985).

		Αναλυτικά Αποτελέσματα F_{II} / F_P	Αριθμητικά Αποτελέσματα F_u / F_P
e/t=1.31	$L_b/t=12$	0.207	0.800
	$L_b/t=16$	0.331	0.802
e/t=1.47	$L_b/t=12$	0.187	0.771
	$L_b/t=16$	0.303	0.785
e/t=1.62	$L_b/t=12$	0.171	0.754
	$L_b/t=16$	0.281	0.767

Πίνακας 4.2 Σύγκριση αριθμητικών φορτίων αστοχίας, με αντίστοιχα αναλυτικά της μελέτης των Tawfik and O'Rourke (1985), για τιμές του λόγου k από 1.31 έως 1.62

Από τα αποτελέσματα της σύγκρισης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2, συμπεραίνεται ότι το αριθμητικό φορτίο αστοχίας είναι από δύο έως και τέσσερις φορές περίπου μεγαλύτερο του αντίστοιχου που προκύπτει με βάση την αναλυτική έκφραση των Tawfik and O'Rourke (1985) .

4.3 Σύγκριση πειραματικών με αριθμητικά και αναλυτικά αποτελέσματα

Το θέμα της εκτίμησης της αντοχής των συγκολλητών συνδέσεων μορφής ολίσθησης προσεγγίστηκε αριθμητικά στην παρούσα μελέτη και οι τιμές που προέκυψαν για την αντοχή όλων των συνδέσεων που εξετάστηκαν, στα πλαίσια εκπόνησης της παραμετρικής μελέτης, είναι από $0.73 F_p$ και μεγαλύτερες.

Σε αυτή την ενότητα γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο εργαστηριακών πειραμάτων, που παρουσιάστηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο, με τα αποτελέσματα των αναλυτικών εκφράσεων του Brockenbrough (1990) και των Tawfik and O'Rourke (1985), καθώς επίσης και με τα αριθμητικά αποτελέσματα της παρούσας μελέτης.

ΠΕΙΡΑΜΑ1

Το πρώτο εργαστηριακό πείραμα αφορά σε εξωτερικά συγκολλητή σύνδεση με εξωτερική διάμετρο ίση με $D = 325.4 \text{ mm}$, πάχος τοιχώματος ίσο με $t = 6.17 \text{ mm}$ και τάση διαρροής ίση με $\sigma_Y = 340 \text{ MPa}$. Το φορτίο πλαστικοποίησης, που δίνεται από τον τύπο 3.1, είναι ίσο με $F_p = 2124 \text{ kN}$. Από τη διεξαγωγή του πειράματος προέκυψε ότι η αντοχή της σύνδεσης σε αξονική, θλιπτική φόρτιση είναι $\frac{F_u}{F_p} = 0.78$.

Από την αναλυτική έκφραση του Brockenbrough (1990), για τη συγκεκριμένη σύνδεση για την οποία ισχύει $e/t=1.2$, προκύπτει (με βάση την εξίσωση 4.8) ότι η αντοχή της σύνδεσης σε αξονική, θλιπτική φόρτιση είναι $\frac{F_u}{F_p} = 0.36$, δηλαδή αποκλίνει από το αποτέλεσμα του πειράματος κατά 53.8 %.

Με βάση τη θεωρία των Tawfik and O'Rourke (1985), η συγκεκριμένη σύνδεση αστοχεί λόγω πλαστικοποίησης στο τμήμα μεταβλητής καμπυλότητας (αστοχία δεύτερου τύπου) και η αντοχή της προκύπτει με βάση τον τύπο 4.14 ίση με $\frac{F_u}{F_p} =$

0.435. Παρουσιάζει επομένως απόκλιση από το πειραματικό αποτέλεσμα της τάξης του 44%.

Από την αριθμητική επίλυση της εν λόγω σύνδεσης με βάση τη μέθοδο που ακολουθήθηκε κατά την εκπόνηση της παρούσας μελέτης, η αντοχή της προκύπτει ίση με $\frac{F_u}{F_p} = 0.82$. Η απόκλιση από το αντίστοιχο πειραματικό αποτέλεσμα είναι της τάξης του 4.8 %, σημαντικά μικρότερη από την απόκλιση που παρουσιάζουν οι αναλυτικές εκφράσεις.

ΠΕΙΡΑΜΑ 2

Το δεύτερο εργαστηριακό πείραμα αφορά σε εσωτερικά συγκολλητή σύνδεση με εσωτερική διάμετρο ίση με $D = 312.4$ mm, πάχος τοιχώματος ίσο με $t = 6.1$ mm και τάση διαρροής ίση με $\sigma_y = 308$ MPa. Το φορτίο πλαστικοποίησης, που δίνεται από τον τύπο 3.1, είναι ίσο με $F_p = 3723$ kN. Από τη διεξαγωγή του πειράματος προέκυψε ότι η αντοχή της σύνδεσης σε αξονική, θλιπτική φόρτιση είναι $\frac{F_u}{F_p} = 0.387$.

Από την αναλυτική έκφραση του Brockenbrough (1990), για τη συγκεκριμένη σύνδεση για την οποία ισχύει $e/t=1.97$, προκύπτει (με βάση την εξίσωση 4.8) ότι η αντοχή της σύνδεσης σε αξονική, θλιπτική φόρτιση είναι $\frac{F_u}{F_p} = 0.239$, δηλαδή αποκλίνει από το αποτέλεσμα του πειράματος κατά 38 %.

Με βάση τη θεωρία των Tawfik and O'Rourke (1985), η συγκεκριμένη σύνδεση αστοχεί λόγω πλαστικοποίησης στο τμήμα μεταβλητής καμπυλότητας (αστοχία δεύτερου τύπου) και η αντοχή της προκύπτει με βάση τον τύπο 4.14 ίση με $\frac{F_u}{F_p} =$

0.13. Παρουσιάζει επομένως απόκλιση από το πειραματικό αποτέλεσμα της τάξης του 65 %.

Από την αριθμητική επίλυση της εν λόγω σύνδεσης με βάση τη μέθοδο που ακολουθήθηκε κατά την εκπόνηση της παρούσας μελέτης, η αντοχή της προκύπτει ίση με $\frac{F_u}{F_p} = 0.415$. Η απόκλιση από το αντίστοιχο πειραματικό αποτέλεσμα είναι της τάξης του 6.7 %, σημαντικά μικρότερη από την απόκλιση που παρουσιάζουν οι αναλυτικές εκφράσεις.

Η μεγάλη απόκλιση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών εκφράσεων (και του Brockenbrough (1990), αλλά και των Tawfik and O'Rourke (1985)) από τα πειραματικά αποτελέσματα, οφείλεται στο γεγονός ότι η αναλυτική διαδικασία που ακολούθησαν για την εξαγωγή των εξισώσεων αμελεί την ευεργετική επίδραση της κράτυνσης. Επίσης σημειώνεται ότι στην ανάλυσή του ο Brockenbrough (1990) θεωρεί την περιμετρική τάση αμελητέα, έναν παράγοντα που προφανώς συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση της αντοχής των υπόψη συνδέσεων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συγκολλητές συνδέσεις μεταλλικών αγωγών μορφής ολίσθησης χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή υπόγειων δικτύων ύδρευσης υψηλών πιέσεων και παρουσιάζουν ευαισθησία σε αξονικές φορτίσεις. Στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας μελέτης, αρχικά, έγινε προσομοίωση εργαστηριακών πειραμάτων και από τη σύγκριση των αριθμητικών με τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψε απόκλιση από 5% μέχρι 7%. Στη συνέχεια εκτιμήθηκε η επιρροή της ύπαρξης της σύνδεσης στην αντοχή των εν λόγω κελυφών και προέκυψε το συμπέρασμα ότι τη μειώνει σημαντικά, μέχρι και 20% (για τα κελύφη που μελετήθηκαν). Αντίθετα, η επιρροή της κατεργασίας διαμόρφωσης της «καμπάνας» στο άκρο του εκάστοτε αγωγού, δεν είναι σημαντική για τον υπολογισμό της οριακής αντοχής.

Όσον αφορά στο λόγο της διαμέτρου προς το πάχος τοιχώματος (D/t) συγκολλητών συνδέσεων, αποτελεί σημαντική παράμετρο, αφού μπορεί να προκαλέσει μεταβολή της αντοχής των υπόψη κελυφών μέχρι και 35%. Η μείωση αυτού του λόγου προκαλεί αύξηση της αντοχής. Αντίθετα ο λόγος της εκκεντρότητας προς το πάχος τοιχώματος (e/t) δεν επηρεάζει σημαντικά την αντοχή τους. Επίσης, συμπεραίνεται ότι ο λόγος του μήκους τμήματος μεταβλητής καμπυλότητας προς το πάχος τοιχώματος των υπόψη συνδέσεων (L_b / t) επηρεάζει μόνο τις εξωτερικά συγκολλητές συνδέσεις, οι οποίες αστοχούν στο τμήμα μεταβλητής καμπυλότητας και όχι τις εσωτερικά συγκολλητές που αστοχούν στην περιοχή της συγκόλλησης. Αυξανόμενη αυτής της παραμέτρου παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής εξωτερικά συγκολλητών συνδέσεων μέχρι και 9.3%.

Σημαντική επιρροή στην αντοχή των εν λόγω συνδέσεων έχει ο τύπος της συγκόλλησης (εξωτερική, εσωτερική, διπλή). Συγκριτικά, μεγαλύτερη αντοχή παρουσιάζουν οι διπλά συγκολλητές συνδέσεις, μικρότερη οι εσωτερικά και ακόμη μικρότερη οι εξωτερικά συγκολλητές. Η μεταβολή της αντοχής μεταξύ διπλά και εξωτερικά συγκολλητών συνδέσεων φτάνει το 49%. Επίσης, κελύφη με διπλή συγκόλληση παρουσιάζουν αντοχή πέραν του πλαστικού φορτίου, εξαιτίας της κράτυνσης του υλικού και αστοχούν σε σχετικά μεγάλες τιμές της αξονικής παραμόρφωσης. Σημαντική είναι και η επιρροή της εσωτερικής πίεσης στην αντοχή συγκολλητών συνδέσεων αγωγών μορφής ολίσθησης, η οποία προκαλεί πτώση της οριακής αντοχής. Η πτώση που διαπιστώθηκε φτάνει έως και 26% για εσωτερική πίεση ίση με το 60% της πίεσης πλαστικοποίησης και δεικνύει ότι η αστοχία

προκαλείται κυρίως λόγω πλαστικότητας. Εν τούτοις, η συμπεριφορά του σωλήνα μετά την αστοχία είναι σαφώς καλύτερη στην περίπτωση που ασκείται πίεση και χαρακτηρίζεται από μία σημαντική «μεταλυγισμική αντοχή». Αντιθέτως, η μηδαμινή επιρροή του λόγου της απόστασης της συγκόλλησης από το τμήμα μεταβλητής καμπυλότητας προς το πάχος τοιχώματος κελύφους (L_s / t) στην αντοχή της σύνδεσης στερείται πρακτικής σημασίας.

Τέλος, από τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης και των αποτελεσμάτων αναλυτικών εκφράσεων, με αντίστοιχα πειραματικά, συμπεραίνεται ότι η απόκλιση των πρώτων από τα πειραματικά αποτελέσματα κυμαίνεται από 5% έως και 7%, ενώ η απόκλιση των δεύτερων είναι πολύ μεγαλύτερη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] R. L. Brockenbrough (1990), “Strength of Bell-and-Spigot Joints”, Journal of Structural Engineering, Vol.115, No. 7, July, 1990. ASCE.
- [2] M. S. Tawfic, T. D. O’Rourke, (1985),“Load Carrying Capacity of Welded Slip Joints”, Journal of Pressure Vessel Technology, February 16, 1984.
- [3] A. Eberhardt (1990), “Diameter Steel Water Conduit Failure and Assesment of AWWA Practice”, Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 4, No. 1, February, 1990, ASCE, Paper No. 24330.
- [4] S. L. Jones, T. D. O’Rourke, and J. A. Maison (2004), “Design of welded slip joints in pipelines for compressive loading”, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C. ,Canada, August , 2004, Paper No. 1625.
- [5] Tutuncu (2001), I. Compressive Load And Buckling Response Of Steel Pipelines During Earthquakes. Ph.D. Dissertation, Cornell Univercity, Ithaca, NY, 2001
- [6] Moncarz, P. D. Shyne, J. C. and Derbalian, G. K. (1987), “Failures of 108-inch steel pipe water main”, J. Performance of Constr. Facilities, ASCE, 1(3), 168-187.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074511

