

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

*ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ  
ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ ΣΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΥΔΑΤΟΣ ΥΠΟ  
ΙΣΧΥΡΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ*

**Δημήτριος Φάππας**



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού.

2018



© 2018 Δημήτριος Φάππας

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

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

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

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Μιχάλης Αγόρας  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Άννα Ζερβάκη  
Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό (Ε.ΔΙ.Π),  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Σπύρο Καραμάνο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας μελέτης. Από την αρχή της γνωριμίας μου με τον κ. Καραμάνο, στα προπτυχιακά μαθήματα, μου καλλιέργησε το ενδιαφέρον για περαιτέρω εμβάθυνση στον τομέα της Μηχανικής των Κατασκευών και των Πεπερασμένων Στοιχείων με αποτέλεσμα την εποικοδομητική συνεργασία μας μέχρι και σήμερα όπου ολοκληρώνεται ο προπτυχιακός κύκλος των σπουδών μου.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στους υποψήφιους διδάκτορες του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, Γιαννούλα Χατζοπούλου, Γρηγόρη Σαρβάνη και Κωνσταντίνο Αντωνίου για την υποστήριξη τους καθ' όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας ώστε να ολοκληρωθεί επιτυχώς το κομμάτι των προσομοιώσεων αλλά και των εργαστηριακών δοκιμών που παρουσιάζονται στη παρούσα εργασία.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Άννα Ζερβάκη και κ. Μιχάλη Αγόρα για την συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή αξιολόγησης, της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και για τις συμβουλές και υποδείξεις τους..

Εν όψει της αποφοίτησης μου από το τμήμα, οφείλω ευχαριστίες στο σύνολο των καθηγητών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν τα τελευταία πέντε χρόνια αλλά και για την συμβολή τους στην ορθή διαμόρφωση του τρόπου σκέψης που αρμόζει να έχει ο νέος μηχανικός.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές μου για τις πολύτιμες συμβουλές που ανταλλάξαμε καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησης μου στο τμήμα.

# **ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ ΣΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΥΔΑΤΟΣ ΥΠΟ ΙΣΧΥΡΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ**

Δημήτριος Φάππας

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2018

Επιβλέπων Καθηγητής: Σπύρος Καραμάνος

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς χαλύβδινων αγωγών μεταφοράς ύδατος με συγκολλητές συνδέσεις επικάλυψης, που εγκαθίστανται σε περιοχές όπου αναμένονται σημαντικές εδαφικές μετατοπίσεις όπως, υποχώρηση, ρευστοποίηση του εδάφους και αστάθεια πρανών. Τα φαινόμενα αυτά, συχνά, θέτουν σε κίνδυνο τη δομική ακεραιότητα των χερσαίων αγωγών.

Αρχικά, περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται ώστε να εκτιμηθεί πειραματικά η μηχανική συμπεριφορά των αγωγών που φέρουν συνδέσεις επικάλυψης. Η πειραματική μελέτη εστιάζει σε αγωγούς με λόγο διαμέτρου-προς-πάχος τοιχώματος ( $D/t$ ) ίσο με 191 και 103, κατασκευασμένοι από διαφορετικού τύπου χάλυβα. Παρουσιάζονται τα αριθμητικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν με σκοπό την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών. Η σύγκριση μεταξύ των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων βασίζεται στο κρίσιμο φορτίο αστοχίας, τις μετατοπίσεις συγκεκριμένων σημείων και σε τοπικές παραμορφώσεις. Τέλος, μελετάται η ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων, στην περιοχή της σύνδεσης με επικάλυψη, μεταξύ δυο τμημάτων ενός αγωγού, από την διαδικασία της συγκόλλησης.

Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει με την επικύρωση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων, είναι η ασφαλής χρήση των αγωγών με συγκολλητές επικάλυψης σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα και άλλες σημαντικές εδαφικές μετατοπίσεις.

## Πίνακας περιεχομένων

1.	Εισαγωγή .....	1
1.1.	Περιγραφή του φυσικού προβλήματος.....	1
1.2.	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	4
1.3.	Στόχος της παρούσας εργασίας .....	5
2.	Χαρακτηριστικά αγωγών ύδατος με συγκολλήσεις επικάλυψης.....	6
2.1.	Κατασκευαστική διαδικασία σωλήνων μεγάλης διαμέτρου.....	6
2.2.	Σχεδιασμός συνδέσεων επικάλυψης σε αγωγούς ύδατος.....	7
3.	Πειραματική διερεύνηση .....	9
3.1.	Περιγραφή δοκιμών.....	9
3.2.	Πειραματική διάταξη .....	13
3.3.	Πειραματικά αποτελέσματα .....	18
3.3.1.	Αποτελέσματα για δοκίμια με λόγο $D/t = 191$ .....	19
3.3.2.	Αποτελέσματα για δοκίμια με λόγο $D/t = 103$ .....	31
4.	Μοντελοποίηση με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	40
4.1.	Περιγραφή αριθμητικών μοντέλων .....	40
4.2.	Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.....	47
4.2.1.	Δοκίμια με λόγο $D/t= 191$ .....	48
4.2.2.	Δοκίμια με λόγο $D/t= 103$ .....	56
4.2.3.	Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	62
4.3.	Εκτίμηση παραμενουσών τάσεων από τη διαδικασία συγκόλλησης .....	63
5.	Συμπεράσματα.....	66
	Βιβλιογραφία .....	67

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1. 1: Εγκατάσταση χερσαίου αγωγού. ....	1
Εικόνα 1. 2: Αστοχία αγωγού λόγω καθίζησης. ....	2
Εικόνα 1. 3: Περίπτωση αστοχίας χερσαίου αγωγού. ....	2
Εικόνα 1. 4: Συγκόλληση επικάλυψης σε αγωγό. ....	3
Εικόνα 1. 5: Συγκόλληση πλήρους διείσδυσης σε αγωγό. ....	3
Εικόνα 2. 1: Απεικόνιση κατεργασίας ελικοειδούς ραφής. ....	6
Εικόνα 2. 2: Διαμόρφωση σύνδεσης, μονή εξωτερική συγκόλληση (αριστερά), μονή εσωτερική συγκόλληση (δεξιά), διπλή συγκόλληση (κάτω). ....	7
Εικόνα 2. 3: Υδραυλικός διευρυντής (hydraulic expander),(Mason 2006). ....	8
Εικόνα 3. 1: α) Γεωμετρία σύνδεσης για διπλή συγκόλληση, β) : Γεωμετρία σύνδεσης για μονή εσωτερική συγκόλληση, γ) Γεωμετρία σύνδεσης για μονή εξωτερική συγκόλληση. ..	10
Εικόνα 3. 2: Καμπύλη υλικού ASTM A1011 SS GR36. ....	11
Εικόνα 3. 3: Καμπύλη υλικού ASTM A1018 SS GR40. ....	11
Εικόνα 3. 4: Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης. ....	13
Εικόνα 3. 5: Φωτογραφία πειραματικής διάταξης. ....	13
Εικόνα 3. 6: Εγκατάσταση δοκιμίου. ....	14
Εικόνα 3. 7: Μεταλλικές στηρίξεις (staps). ....	15
Εικόνα 3. 8: α) Μεταλλική πλάκα στο άκρο, β) Γρύλος επιβολής εξωτερικού φορτίου. ....	15
Εικόνα 3. 9: Υποδοχή εισαγωγής ύδατος υπό πίεση. ....	16
Εικόνα 3. 10: Αντλία λαδιού υψηλής πίεσης. ....	16
Εικόνα 3. 11: Μετρητικά συστήματα μετατοπίσεων (wires). ....	16
Εικόνα 3. 12: Τυπική Διάταξη μετρητικών παραμορφώσεων (strain gauges). ....	17
Εικόνα 3. 13: α) Μορφή δοκιμίου στην απαραμόρφωτη κατάσταση, β) Μορφή δοκιμίου στην παραμορφωμένη κατάσταση. ....	17
Εικόνα 3. 14: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης τέταρτου δοκιμίου, (D/t=191, χωρίς συγκολλητή σύνδεση). ....	20
Εικόνα 3. 15: Μορφή αστοχία τέταρτου δοκιμίου (D/t=191, χωρίς συγκολλητή σύνδεση). ..	20
Εικόνα 3. 16: Τοπικές παραμορφώσεις στην περιοχή εφελκυσμού του τέταρτου δοκιμίου (D/t=191, χωρίς συγκολλητή σύνδεση). ....	21
Εικόνα 3. 17: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης πρώτου δοκιμίου, (D/t=191, διπλή συγκόλληση). ....	22
Εικόνα 3. 18: Μορφή αστοχίας πρώτου δοκιμίου (D/t=191, διπλή συγκόλληση). ....	22
Εικόνα 3. 19: Διάταξη strain gauges από το πρώτο δοκίμιο, (D/t=191, διπλή συγκόλληση). ..	23
Εικόνα 3. 20: Διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων πρώτου δοκιμίου (D/t=191, διπλή συγκόλληση). ....	24
Εικόνα 3. 21: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης δεύτερου δοκιμίου, (D/t=191, μονή εξωτερική συγκόλληση). ....	25



Εικόνα 3. 22: Μορφή αστοχίας δεύτερου δοκιμίου ( $D/t=191$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).	26
Εικόνα 3. 23: Διάταξη strain gauges από το δεύτερο δοκίμιο, ( $D/t=191$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).	26
Εικόνα 3. 24: Διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων δεύτερου δοκιμίου ( $D/t=191$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).	27
Εικόνα 3. 25: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης τρίτου δοκιμίου, ( $D/t=191$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).	28
Εικόνα 3. 26: Μορφή αστοχίας τρίτου δοκιμίου ( $D/t=191$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).	29
Εικόνα 3. 27: Διάταξη strain gauges από το τρίτο δοκίμιο, ( $D/t=191$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).	29
Εικόνα 3. 28: Διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων τρίτου δοκιμίου ( $D/t=191$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).	30
Εικόνα 3. 29: Μορφή αστοχίας εβδόμου δοκιμίου ( $D/t=103$ , διπλή συγκόλληση).	31
Εικόνα 3. 30: Διάταξη strain gauges από το έβδομο δοκίμιο, ( $D/t=103$ , διπλή συγκόλληση).	32
Εικόνα 3. 31: Διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων εβδόμου δοκιμίου ( $D/t=103$ , διπλή συγκόλληση).	33
Εικόνα 3. 32: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης πέμπτου δοκιμίου, ( $D/t=103$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).	34
Εικόνα 3. 33: Μορφή αστοχίας πέμπτου δοκιμίου ( $D/t=103$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).	34
Εικόνα 3. 34: Διάταξη strain gauges από το πέμπτο δοκίμιο, ( $D/t=103$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).	35
Εικόνα 3. 35: Διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων πέμπτου δοκιμίου ( $D/t=103$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).	36
Εικόνα 3. 36: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης έκτου δοκιμίου, ( $D/t=103$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).	37
Εικόνα 3. 37: Μορφή αστοχίας έκτου δοκιμίου ( $D/t=103$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).	37
Εικόνα 3. 38 : Διάταξη strain gauges από το έκτο δοκίμιο, ( $D/t=103$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).	38
Εικόνα 3. 39: Διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων έκτου δοκιμίου ( $D/t=103$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).	39
Εικόνα 4. 1: Γεωμετρία διπλής συγκόλλησης στην περιοχή της σύνδεσης.	41
Εικόνα 4. 2: Υπολογιστικό πλέγμα αριθμητικού μοντέλου.	41
Εικόνα 4. 3: Προσομοίωση κατεργασίας διαμόρφωσης.	42
Εικόνα 4. 4: Τελική μορφή σύνδεσης σε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.	43
Εικόνα 4. 5: Προσομοίωση διάταξης κάμψης τεσσάρων σημείων.	44
Εικόνα 4. 6: Μοντελοποίηση μεταλλικών στηρίξεων (straps).	45
Εικόνα 4. 7: Γεωμετρία αρχικής ατέλειας (wrinkles).	46
Εικόνα 4. 8: Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ( $D/t = 191$ , χωρίς συγκολλητή σύνδεση).	48
Εικόνα 4. 9: Μορφή αστοχίας ( $D/t = 191$ , χωρίς συγκολλητή σύνδεση).	48
Εικόνα 4. 10: Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ( $D/t = 191$ , διπλή συγκόλληση).	49

Εικόνα 4. 11: Μορφές αστοχίας α) Χωρίς αρχική ατέλεια, β) Με αρχική ατέλεια ( $D/t = 191$ , διπλή συγκόλληση). .....	50
Εικόνα 4. 12: Μορφή αστοχίας ( $D/t = 191$ , διπλή συγκόλληση). .....	50
Εικόνα 4. 13: Διαγράμματα φορτίου - παραμορφώσεων ( $D/t = 191$ , διπλή συγκόλληση)....	51
Εικόνα 4. 14: Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ( $D/t = 191$ , μονή εξωτερική συγκόλληση)...	52
Εικόνα 4. 15: Μορφή αστοχίας ( $D/t = 191$ , μονή εξωτερική συγκόλληση). .....	52
Εικόνα 4. 16: Διαγράμματα φορτίου - παραμορφώσεων ( $D/t = 191$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).....	53
Εικόνα 4. 17: Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ( $D/t = 191$ , μονή εσωτερική συγκόλληση). 54	
Εικόνα 4. 18: Μορφή αστοχίας ( $D/t = 191$ , μονή εσωτερική συγκόλληση). .....	54
Εικόνα 4. 19: Διαγράμματα φορτίου - παραμορφώσεων ( $D/t = 191$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).....	55
Εικόνα 4. 20: Καμπύλη φορτίου - μετατόπισης ( $D/t = 103$ , διπλή συγκόλληση). .....	56
Εικόνα 4. 21: Μορφή αστοχίας ( $D/t = 103$ , διπλή συγκόλληση). .....	56
Εικόνα 4. 22: Διαγράμματα φορτίου - παραμορφώσεων ( $D/t = 103$ , διπλή συγκόλληση)....	57
Εικόνα 4. 23: Καμπύλη φορτίου - μετατόπισης ( $D/t = 103$ , μονή εσωτερική συγκόλληση συγκόλληση).....	58
Εικόνα 4. 24: Μορφή αστοχίας ( $D/t = 103$ , μονή εσωτερική συγκόλληση). .....	58
Εικόνα 4. 25: Διαγράμματα φορτίου - παραμορφώσεων ( $D/t = 103$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).....	59
Εικόνα 4. 26: Καμπύλη φορτίου - μετατόπισης ( $D/t = 103$ , μονή εξωτερική συγκόλληση συγκόλληση).....	60
Εικόνα 4. 27: Μορφή αστοχίας ( $D/t = 103$ , μονή εξωτερική συγκόλληση). .....	60
Εικόνα 4. 28: Διαγράμματα φορτίου - παραμορφώσεων ( $D/t = 103$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).....	61
Εικόνα 4. 29: Αξονοσυμμετρικό μοντέλο επίλυσης θερμομηχανικού προβλήματος.....	63
Εικόνα 4. 30: Κατανομή παραμενουσών τάσεων (αξονική διεύθυνση).....	65

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Μηχανικές ιδιότητες υλικών.....	12
Πίνακας 2: Σύνοψη πειραματικών δοκιμών. ....	12
Πίνακας 3: Μηχανικές ιδιότητες μετάλλου συγκόλλησης.....	41
Πίνακας 4: Συγκριτικά αποτελέσματα. ....	62
Πίνακας 5: Συνθήκες συγκόλλησης.....	64
Πίνακας 6: Θερμικές Ιδιότητες.....	64

# 1. Εισαγωγή

## 1.1. Περιγραφή του φυσικού προβλήματος

Η κατασκευή, εγκατάσταση και λειτουργία αγωγών αποτελούν κύρια έργα ενεργειακών υποδομών καθώς τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται ευρέως για την μεταφορά φυσικού αερίου και πετρελαίου, τόσο στην ξηρά όσο και δια μέσο θαλάσσης. Όμως εκτός από τους υδρογονάνθρακες, ένα άλλο αγαθό που μεταφέρεται μέσω δικτύων αγωγών είναι το νερό. Οι αγωγοί μεταφοράς ύδατος έχουν εφαρμογή κυρίως στη ξηρά και συχνά διέρχονται από περιοχές με σημαντικές εδαφικές μετατοπίσεις και ειδικότερα με έντονη σεισμική δραστηριότητα. Σε αυτές τις περιοχές οι αγωγοί, είναι πιθανό να βρεθούν σε καταστάσεις έντονης φόρτισης λόγω φαινομένων κατολισθήσεων, καθιζήσεων και ρευστοποίησης του εδάφους. Αυτή ή συμπεριφορά του εδάφους οδηγεί τους χερσαίους αγωγούς σε καμπτικές ενταντικές καταστάσεις, προκαλώντας σημαντικές παραμορφώσεις, οι οποίες είναι ικανές να προκαλέσουν ρηγμάτωση ή τοπικό λυγισμό του τοιχώματος και κατά συνέπεια την απώλεια του περιεχομένου που μεταφέρεται. Στην Εικόνα 1.1 απεικονίζεται ο τρόπος εγκατάστασης των χερσαίων αγωγών.



*Εικόνα 1. 1: Εγκατάσταση χερσαίου αγωγού.*

Είναι προφανές πως οι καταπονήσεις που δέχονται οι αγωγοί, καθ' όλη την περίοδο της λειτουργίας του, δε μπορούν να προβλεφθούν εκ των προτέρων. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η λεπτομερής και προσεκτική ανάλυση των εν λόγω συνδέσεων για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς τους, ώστε να διασφαλίζεται η δομική τους ακεραιότητα σε περιπτώσεις ισχυρών εξωτερικών φορτίσεων.

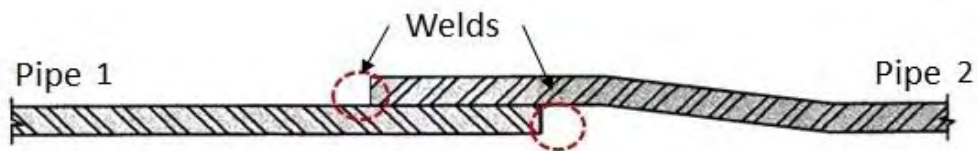


*Εικόνα 1. 2: Αστοχία αγωγού λόγω καθίζησης.*

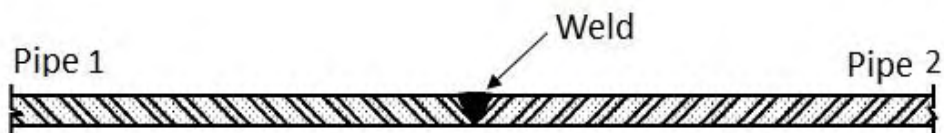


*Εικόνα 1. 3: Περίπτωση αστοχίας χερσαίου αγωγού.*

Στην Εικόνα 1.2 και Εικόνα 1.3 παρουσιάζονται περιπτώσεις αστοχίας αγωγών λόγω μεταβολής της κατάστασης του εδάφους. Εκτός από τους σωλήνες που συνδέονται μεταξύ τους με μονές ή διπλές περιμετρικές συγκολλήσεις πλήρους διείδυσης (Butt Welded Joint), το ίδιο φυσικό πρόβλημα αντιμετωπίζουν και οι αγωγοί που φέρουν συγκολλητές συνδέσεις επικάλυψης (Welded Lap Joint) και εγκαθίστανται σε σεισμογενής περιοχές. Μάλιστα, λόγω της υφής των εν λόγω συγκολλήσεων, οι συγκολλήσεις επικάλυψης φαίνεται να είναι πιο επικίνδυνες για αστοχία. Αντίστοιχες σχηματικές απεικονίσεις τον ανωτέρω περιπτώσεων παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.4 και Εικόνα 1.5 , ενώ στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας μελέτης εξετάζεται αναλυτικά η μηχανική συμπεριφορά σωλήνων που συνδέονται μεταξύ τους μέσω συγκολλητών συνδέσεων επικάλυψης.



*Εικόνα 1. 4: Συγκόλληση επικάλυψης σε αγωγό.*



*Εικόνα 1. 5: Συγκόλληση πλήρους διείδυσης σε αγωγό.*

## 1.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Συχνά στη βιβλιογραφία συναντούμε τις συνδέσεις σωλήνων με συγκολλήσεις επικάλυψης (Welded Lap Joints) και με τον όρο “Bell and Spigot Joints” λόγω της γεωμετρίας σε μορφή “καμπάνας” του σχηματίζεται στο άκρο του ενός εκ των δύο σωλήνων που επρόκειτο να συγκολληθούν. Σε αντιπαραβολή με την Εικόνα 1.4, ο πρώτος σωλήνας (Pipe 1) αναφέρεται ως “Spigot” ενώ ο δεύτερος (Pipe 2) ως “Bell”. Πρώτες εκτιμήσεις για την αντοχή τέτοιου είδους συνδέσεων, έγιναν υπό αξονικές φορτίσεις (Moncarz et al., 1987, Eberhardt, 1990). Σύμφωνα από πειραματικές δοκιμές, διαπιστώθηκε πως λόγω της γεωμετρίας σε μορφή καμπάνας (Bell geometry), η κατανομή των τάσεων σε αυτή την περιοχή παρουσιάζει εκκεντρότητα η οποία κάνει τον σωλήνα επιρρεπή σε αστοχία λόγω λυγισμού (Jones, et al., 2004, Tutuncu and O'Rourke, 2006, Mason, 2006, Mason, et al., 2010).

Αργότερα το συγκεκριμένο φαινόμενο παρατηρήθηκε και μέσω αξονοσυμμετρικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων (Tsetseni & Karamanos, 2007). Πειράματα σε πραγματικής κλίμακας σωλήνες διαμέτρου 77.625 ιντσών, αναφέρθηκαν από τον Smith (2006), όπου μελετήθηκε η αντοχή σε αξονική συμπίεση και τα πειραματικά αποτελέσματα δίνονται συγκριτικά με τις τιμές που ορίζονται από την προδιαγραφή ASME Boiler & Pressure Vessel Code VIII. Η συμπεριφορά συγκολλητών συνδέσεων επικάλυψης σε εφελκυσμό εξετάσθηκε με χρήση αναλυτικών μοντέλων από τους Eidinger (1999), Brockenbrough (1990), Moncarz, et al. (1987), ενώ πειραματικά και σε μικρής διαμέτρου δοκίμια σωλήνων από τον Mason et al. (2011).

Σύμφωνα με τις παραπάνω αναφορές, η ερευνητική δραστηριότητα όσον αφορά, τις συγκολλήσεις επικάλυψης που χρησιμοποιούνται για συνδέσεις χερσαίων αγωγών, επικεντρώνεται στην μηχανική συμπεριφορά υπό πίεση και αξονικές φορτίσεις. Η πρώτη και μοναδική εκτίμηση της συμπεριφοράς των συνδέσεων αυτών σε κάμψη αναφέρθηκε από τον Karamanos et al. (2015 & 2017), με την χρήση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, όπου τα αποτελέσματα δίνονται σε όρους ροπής - καμπυλότητας ενώ υπολογίζονται και τοπικές παραμορφώσεις σε κρίσιμα σημεία που είναι πιθανό να προκληθεί η αστοχία. Η παρούσα εργασία περιγράφει έρευνα που αποτελεί μια συνέχεια των δύο αυτών εργασιών, με πειραματικές και αριθμητικές μεθόδους.

### 1.3. Στόχος της παρούσας εργασίας

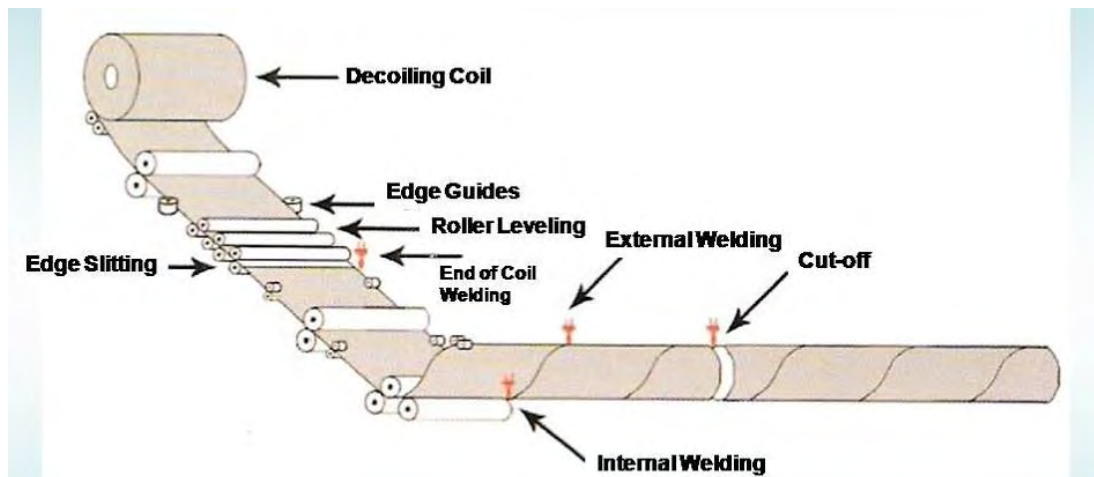
Η παρούσα εργασία πραγματεύεται με την πειραματική και αριθμητική μελέτη της συμπεριφοράς των συγκολλητών συνδέσεων επικάλυψης σε χαλύβδινους σωλήνες, όταν υπόκεινται σε σεισμικές συνθήκες. Αρχικός σκοπός αυτής της εργασίας είναι η λεπτομερής περιγραφή των πειραματικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στην πόλη Adelanto της Καλιφόρνιας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής από την εταιρία Northwest Pipe Company, κατά την περίοδο Αύγουστος-Σεπτέμβριος 2017 και αφορούν σωλήνες με λόγο διαμέτρου-προς-πάχος (D/t) ίσο με 191 και 103, υπό εσωτερική πίεση σε επίπεδο 40% της πίεσης διαρροής του σωλήνα. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η αριθμητική μοντελοποίηση των πειραμάτων με την βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου ABAQUS. Πρόκειται για μη γραμμικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται ώστε να προσομοιωθεί με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια η ελαστοπλαστική συμπεριφορά των σωλήνων που εξετάζονται. Η σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα γίνεται ως προς τα φορτία, τις μετατοπίσεις, τοπικές παραμορφώσεις αλλά και την μορφή αστοχίας.

Αναλυτικότερα, η εργασία διαμορφώνεται ως εξής. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια σύντομη αναφορά στη μέθοδο κατασκευής και στα χαρακτηριστικά των συνδέσεων που χρησιμοποιούνται στους χαλύβδινους αγωγούς ύδατος, των οποίων την μηχανική συμπεριφορά εξετάζεται στα επόμενα κεφάλαια. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται, η πειραματική διάταξη στην οποία υποβλήθηκαν τα δοκίμια σε κάμψη τεσσάρων σημείων αλλά και τα αποτελέσματα από τις πειραματικές μετρήσεις. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία ανάπτυξης των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, ενώ συγκρίνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα με τα πειραματικά. Τέλος, γίνεται μια προσπάθεια για την εκτίμηση των παραμενουσών τάσεων που προκύπτουν από την διαδικασία της συγκόλλησης επικάλυψης, όπου με την χρήση αξονοσυμμετρικού μοντέλου επιλύεται το θερμομηχανικό πρόβλημα των συγκολλήσεων. Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας συνοψίζονται ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα για την μηχανική συμπεριφορά αγωγών ύδατος υπό ισχυρές φορτίσεις.

## 2. Χαρακτηριστικά αγωγών ύδατος με συγκολλήσεις επικάλυψης

### 2.1. Κατασκευαστική διαδικασία σωλήνων μεγάλης διαμέτρου

Μια πολύ διαδεδομένη μέθοδος κατασκευής σωλήνων είναι η κατεργασία με ελικοειδή ραφή, η οποία συνήθως εφαρμόζεται για μεγάλης διαμέτρου σωλήνες μεταξύ 20 και 100 ιντσών (508 - 2.540 mm). Πολλές φορές τέτοιου τύπου σωλήνες χρησιμοποιούνται για την μεταφορά ύδατος. Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται σχηματικά η κατεργασία της ελικοειδούς ραφής.



Εικόνα 2. 1: Απεικόνιση κατεργασίας ελικοειδούς ραφής.

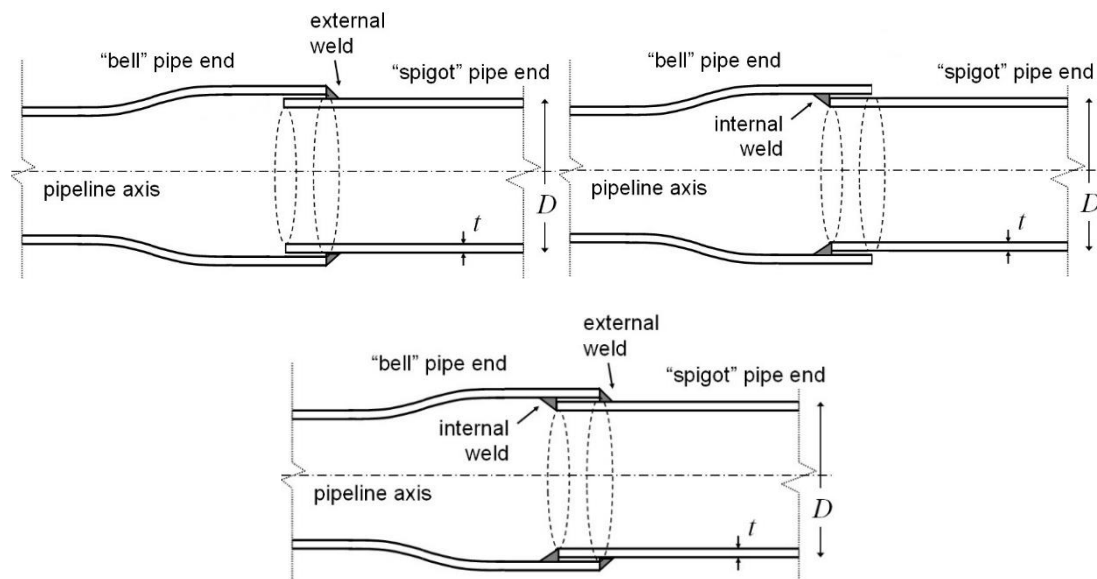
Ο χάλυβας, που είναι και η πρώτη ύλη για την κατεργασία, βρίσκεται σε μορφή ρολού ελάσματος με τις επιθυμητές διαστάσεις όσον αφορά το πάχος και το πλάτος του. Στο αρχικό στάδιο το ρολό εκτυλίσσεται σε φύλλο ελάσματος και γίνεται επίπεδο σε μια σειρά από έλαστρα, ενώ διαμορφώνονται κατάλληλα οι ακμές που θα συγκολληθούν στο τέλος της κατεργασίας. Έπειτα το έλασμα διέρχεται υπό γωνία ανάμεσα από τρία έλαστρα, τα οποία το κάμπτουν προσδίδοντας την τελική γεωμετρία και την επιθυμητή διάμετρο στον σωλήνα. Στο επόμενο στάδιο ακολουθεί η ραφή της συγκόλλησης, όπου γίνεται διαδοχικά πρώτα η εσωτερική και ύστερα η εξωτερική συγκόλληση, εν συνεχεία κόβεται στο επιθυμητό μήκος ενώ πραγματοποιείται σειρά μη καταστρεπτικών δοκιμών για την εύρεση τυχόν σφαλμάτων στις περιοχές των συγκολλήσεων. Στο τελικό στάδιο ο σωλήνας εισέρχεται εκ νέου σε σειρά ελαστρων ώστε να βελτιωθεί η τελική γεωμετρία του και να ελεγχθεί η ποιότητα των συγκολλήσεων με υδραυλικές δοκιμές.



## 2.2. Σχεδιασμός συνδέσεων επικάλυψης σε αγωγούς ύδατος

Σε πολλές περιπτώσεις όπου αγωγοί χρησιμοποιούνται για την μεταφορά ύδατος, οι συνδέσεις μεταξύ των επιμέρους σωλήνων, στο εργοτάξιο, γίνονται με περιφερειακές συγκολλήσεις επικάλυψης (Lap joint) αντί για συγκολλήσεις πλήρους διείσδυσης. Μερικά από τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι συνδέσεις επικάλυψης είναι ο ευκολότερος τρόπος εγκατάστασης του αγωγού και συνεπάγεται το μικρότερο κόστος κατασκευής.

Αναλυτικότερα, πριν γίνει η σύνδεση μεταξύ των σωλήνων, λαμβάνει χώρα μια κατεργασία διαμόρφωσης στο ένα εκ των δυο άκρων κάθε σωλήνα. Αυτού του είδους η κατεργασία έχει σκοπό την διεύρυνση του άκρου ενός σωλήνα (expansion) προκειμένου να εισχωρήσει το ακατέργαστο άκρο ενός δευτέρου σωλήνα που πρόκειται να συγκολληθούν μεταξύ τους. Λόγω της κατεργασίας αυτής προκύπτει στο ένα άκρο των σωλήνων μια διαμόρφωση σε σχήμα καμπάνας και γι' αυτό η κατεργασμένη πλευρά ονομάζεται, σύμφωνα με την βιβλιογραφία "Bell". Αντιστοίχως, η ακατέργαστη πλευρά ονομάζεται "Spigot" ενώ συνολικά για την σύνδεση συναντάται η ονομασία "Bell and Spigot Joint" ή "Welded Lap Joints". Η σύνδεση επιτυγχάνεται με μονή εσωτερική συγκόλληση, μονή εξωτερική συγκόλληση ή με διπλή-περιφερειακή συγκόλληση που αποτελεί συνδυασμό των παραπάνω δυο περιπτώσεων. Οι διατάξεις των συγκολλητών συνδέσεων για κάθε μια περίπτωση που προαναφέρθηκε, απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 2.2 .



Εικόνα 2. 2: Διαμόρφωση σύνδεσης, μονή εξωτερική συγκόλληση (αριστερά), μονή εσωτερική συγκόλληση (δεξιά), διπλή συγκόλληση (κάτω).

Αξίζει να σημειωθεί πως η κατεργασία διεύρυνσης (expansion) πραγματοποιείται εν ψυχρώ και με την βοήθεια ενός υδραυλικού διευρυντή (hydraulic expander), που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.3 . Ο διευρυντής εισέρχεται στο άκρο του σωλήνα και στη συνέχεια οι επιφάνειες του (mandrels) αρχίζουν να κινούνται στην ακτινική διεύθυνση μέχρι να σχηματιστεί η επιθυμητή μορφή της «καμπάνας». Ως εκ τούτου το άκρο του σωλήνα υφίσταται πλαστική παραμόρφωση με αποτέλεσμα την ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων οι οποίες ενδέχεται να επηρεάζουν την μηχανική συμπεριφορά της σύνδεσης. Σε επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται πως η επιρροή των παραμενουσών τάσεων από την κατεργασία μπορούν να ληφθούν υπόψη σε αριθμητικά μοντέλα. Όσον αφορά τον σχεδιασμό των συνδέσεων επικάλυψης που χρησιμοποιούνται σε χαλύβδινους αγωγούς ύδατος, γίνεται σύμφωνα με τον Αμερικανικό κανονισμό AWWA C200 , (American Water Works Association), βάση του οποίου ορίζονται οι διαστασιακές απαιτήσεις πέραν της κατεργασίας διαμόρφωσης (expansion) αλλά και ολόκληρης της σύνδεσης “Bell and Spigot” ανάλογα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού (διάμετρος, πάχος τοιχώματος).



Εικόνα 2. 3: Υδραυλικός διευρυντής (hydraulic expander),(Mason 2006).

### 3. Πειραματική διερεύνηση

#### 3.1. Περιγραφή δοκιμών

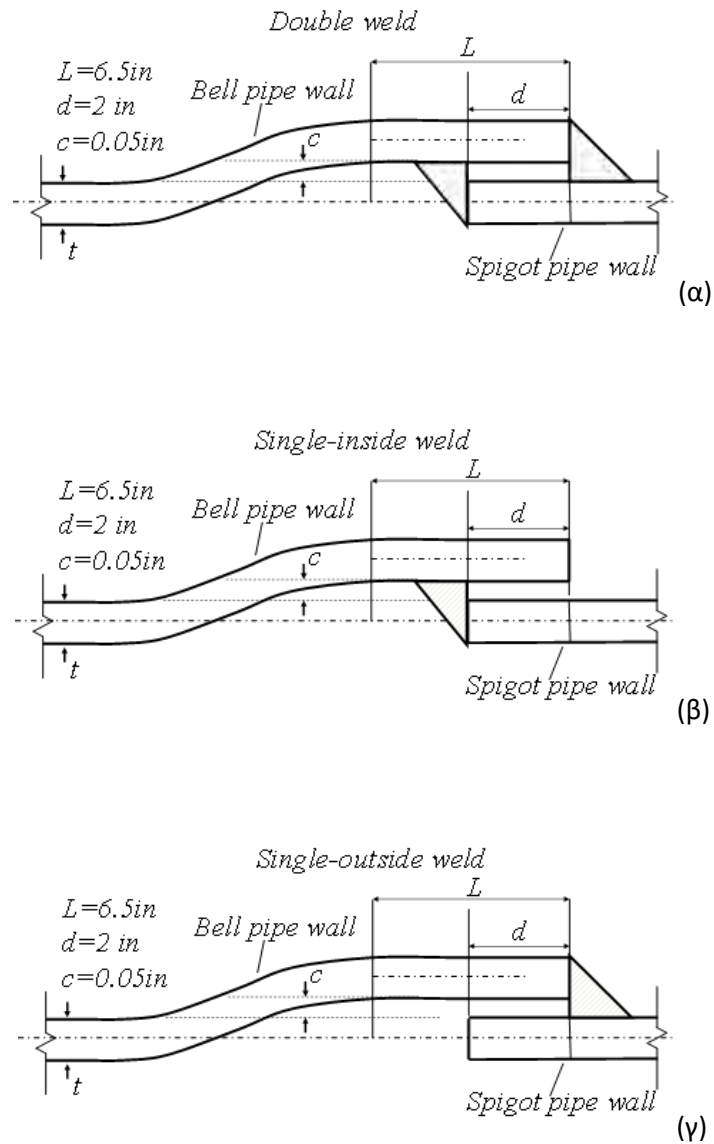
Στο παρόν κεφάλαιο της παρούσας μελέτης εξετάζεται η πειραματική διαδικασία με την οποία εκτιμάται η μηχανική συμπεριφορά αγωγών, που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά ύδατος και συνδέονται μεταξύ τους με συγκολλήσεις επικάλυψης. Τόσο η κατασκευή και προετοιμασία των δοκιμών, όσο και η εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών πραγματοποιήθηκε στην Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής από την εταιρία, Northwest Pipe Company.

Η πειραματική διερεύνηση αφορά επτά δοκίμια σωλήνων, μεγάλης κλίμακας, που είναι κατασκευασμένα με την μέθοδο ελικοειδούς ραφής, σε διαφορετικά πάχη τοιχώματος και με όλους τους πιθανούς τρόπους συγκόλλησης στην περιοχή της σύνδεσης, όπως αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.2. Συγκεκριμένα εξετάζονται σωλήνες εξωτερικής διαμέτρου 654.05 mm (25.75 in) με πάχη 3.429 mm (0.135 in) και 6.35 mm (0.25 in) και με τις τρεις περιπτώσεις συγκόλλησης, μονή εσωτερική, μονή εξωτερική και διπλή συγκόλληση στην περιοχή της σύνδεσης. Επίσης, για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων γίνεται επιπλέον πειραματική δοκιμή σε δοκίμιο πάχους 3.429 mm που δεν περιλαμβάνει συγκολλητή σύνδεση. Όλα τα δοκίμια έχουν συνολικό μήκος 15.85 m (624 in) με την σύνδεση επικάλυψης να βρίσκεται στο μέσον του μήκους τους, ενώ κατά την εκτέλεση της πειραματικής δοκιμής εφαρμόζεται στα δοκίμια εσωτερική πίεση της τάξεως του 40% της πίεσης διαρροής τους, ώστε να προσομοιωθούν πλήρως οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας των αγωγών. Η πίεση διαρροής για αγωγούς κυκλικής διατομής δίνεται από τη σχέση:

$$P_y = \frac{2\sigma_y t}{D}$$

Όπου,  $\sigma_y$  το όριο διαρροής του υλικού,  $D$  η εξωτερική διάμετρο και  $t$  το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα.

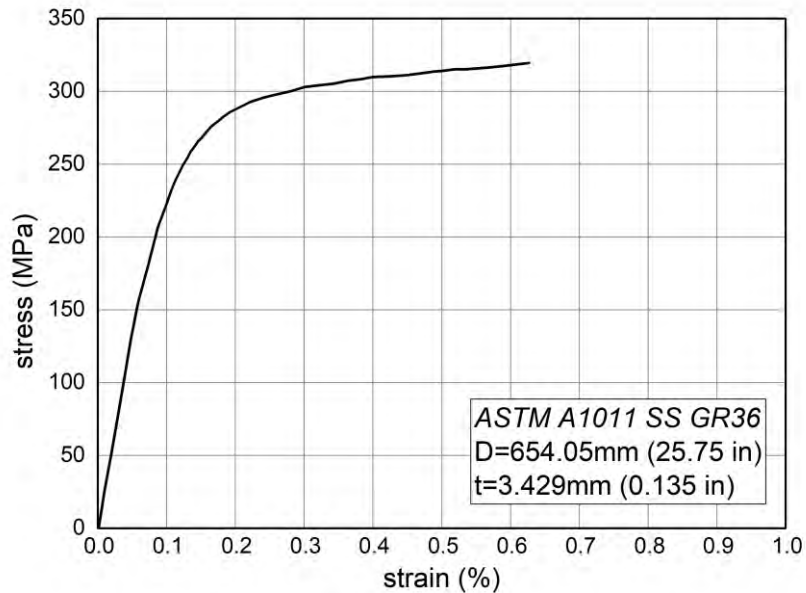
Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών στην περιοχή της σύνδεσης ακολουθούν τον κανονισμό AWWA C200 και ποσοτικοποιούνται όπως δείχνει η Εικόνα 3.1, για κάθε μια από τις περιπτώσεις συγκόλλησης που εφαρμόζεται για την σύνδεση των δύο τμημάτων (Bell & Spigot) των σωλήνων που αποτελούν το υπό εξέταση δοκίμιο.



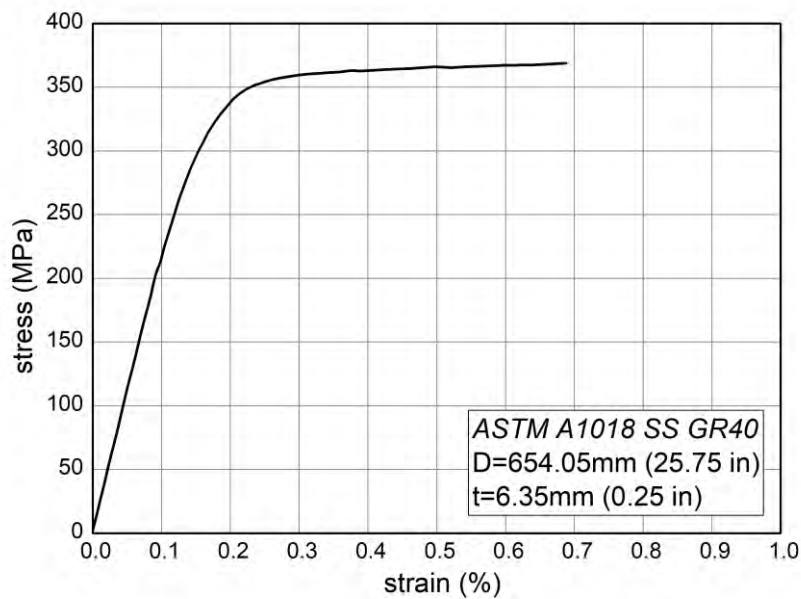
Εικόνα 3. 1: α) Γεωμετρία σύνδεσης για διπλή συγκόλληση, β) : Γεωμετρία σύνδεσης για μονή εσωτερική συγκόλληση, γ) Γεωμετρία σύνδεσης για μονή εξωτερική συγκόλληση.

Με βάση την Εικόνα 3.1 προκύπτει πως οι διαστάσεις στην περιοχή της σύνδεσης παραμένουν ίδιες ανεξαρτήτως του τρόπου συγκόλλησης των δύο τμημάτων και του πάχους τοιχώματος των δοκιμίων. Αναλυτικά, το μήκος επικάλυψης μεταξύ των τμημάτων “Bell” και “Spigot” είναι 50.8 mm (2 in), το διάκενο που προκύπτει μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας το “Spigot” και της εσωτερικής επιφάνειας του “Bell” είναι 1.27 mm (0.05 in), ενώ το επίπεδο τμήμα (Bell flat) στην περιοχή του “Bell” είναι 165.1 mm (6.5 in).

Όσον αφορά το υλικό των δοκιμίων, εξετάζονται δυο περιπτώσεις, οι σωλήνες με πάχος τοιχώματος 3.429 mm (0.135 in) και λόγο διάμετρο-προς-πάχος (D/t) ίσο με 191 είναι κατασκευασμένοι από δομικό χάλυβα τύπου ASTM A1011 SS GR36, ενώ οι σωλήνες με πάχος 6.35 mm (0.25 in) και λόγω διάμετρο-προς-πάχος (D/t) ίσο με 109 από χάλυβα τύπου ASTM A1018 SS GR40.



Εικόνα 3. 2: Καμπύλη υλικού ASTM A1011 SS GR36.



Εικόνα 3. 3: Καμπύλη υλικού ASTM A1018 SS GR40.

Στην Εικόνα 3.2 και Εικόνα 3.3 δίνονται οι καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων για τους δύο τύπους χαλύβων που χρησιμοποιούνται στις πειραματικές δοκιμές. Οι καμπύλες των δύο υλικών προέκυψαν ύστερα από δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού σε δοκίμια που προέρχονται από αντίστοιχους σωλήνες και στην διαμήκη διεύθυνση τους. Ως εκ τούτου λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των παραμενουσών τάσεων στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, λόγω της κατεργασίας κατασκευής των σωλήνων με ελικοειδή ραφή. Οι μηχανικές ιδιότητες που προκύπτουν από τις δοκιμές εφελκυσμού συνοψίζονται στον Πίνακα 1.

Τύπος χάλυβα	Όριο διαρροής (MPa)	Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Παραμόρφωση στο σημείο μέγιστης αντοχής (%)
ASTM A1011 SS GR36	266.5	438.5	20
ASTM A1018 SS GR40	293	505.4	17

Πίνακας 1: Μηχανικές ιδιότητες υλικών.

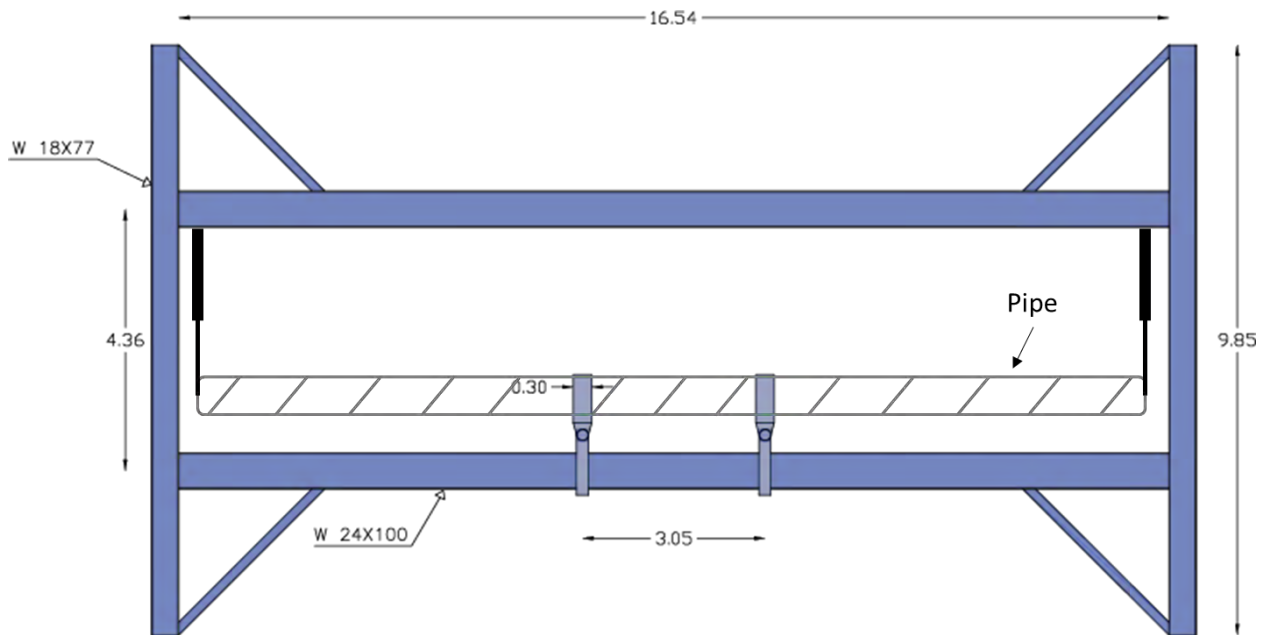
Συνοψίζοντας τις πειραματικές δοκιμές στον Πίνακα 2, εξετάζονται επτά δοκίμια εξωτερικής διαμέτρου 654.05 mm (25.75 in). Εκ των οποίων τέσσερα με πάχος τοιχώματος 3.429 mm (πειράματα 1 έως 4), συμπεριλαμβανομένου ενός δοκιμίου που δεν περιλαμβάνει συγκολλητή σύνδεση (πείραμα 4) και τρία με πάχος 6.35 mm (πειράματα 5 έως 7), συνδυάζοντας όλους τους πιθανούς τύπους συγκόλλησης στην περιοχή της σύνδεσης. Η εσωτερική πίεση που εφαρμόζεται ανέρχεται στο 40 % της πίεσης διαρροής του σωλήνα και αποτελεί συνάρτηση των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων του υλικού.

Πείραμα	Πάχος Τοιχώματος mm (inch)	D/t	Εσωτερική Πίεση MPa (bar)	Τύπος Σύνδεσης
1	3.429 (0.135)	191	1.172 (11.72)	Διπλή συγκόλληση
2	3.429 (0.135)	191	1.172 (11.72)	Μονή εξωτερική συγκόλληση
3	3.429 (0.135)	191	1.172 (11.72)	Μονή εσωτερική συγκόλληση
4	3.429 (0.135)	191	1.172 (11.72)	Χωρίς σύνδεση
5	6.35 (0.250)	103	2.241 (22.41)	Μονή εσωτερική συγκόλληση
6	6.35 (0.250)	103	2.241 (22.41)	Μονή εξωτερική συγκόλληση
7	6.35 (0.250)	103	2.241 (22.41)	Διπλή συγκόλληση

Πίνακας 2: Σύνοψη πειραματικών δοκιμών.

### 3.2. Πειραματική διάταξη

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την διενέργεια των πειραματικών δοκιμών, η οποία σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από την εταιρεία Northwest Pipe Company, που συντόνισε το πειραματικό έργο. Στην Εικόνα 3.4 και Εικόνα 3.5, αντίστοιχα παρουσιάζονται μια σχηματική απεικόνιση και μια φωτογραφία της πειραματικής διάταξης. Οι μονάδες των διαστάσεων, που δίνονται στην κάτοψη, είναι σε μέτρα (m).



Εικόνα 3. 4: Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης.



Εικόνα 3. 5: Φωτογραφία πειραματικής διάταξης.



Η διάταξη εδράζεται επάνω σε επίπεδο τσιμεντένιο έδαφος στον εξωτερικό χώρο του εργοστασίου και αποτελείται από τέσσερις δοκούς που σχηματίζουν ένα ορθογωνικό πλαίσιο διαστάσεων 16.5 m × 4.36 m (651 in × 172 in). Όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δοκών, ακολουθείται τυποποίηση βάση τις οποίες οι δοκοί στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση είναι τύπου W 24 × 100 και W 18 × 77 αντίστοιχα. Η αλληλεπίδραση της πειραματικής διάταξης και του δοκιμίου προέρχεται από δυο μεταλλικές στηρίξεις (straps), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.6. Πριν από κάθε δοκιμή ο σωλήνας που επρόκειτο να εξετασθεί, τοποθετείται εντός του ορθογωνικού πλαισίου και στερεώνεται, σε αυτό, με την βοήθεια των δυο “straps”.



Εικόνα 3. 6: Εγκατάσταση δοκιμίου.

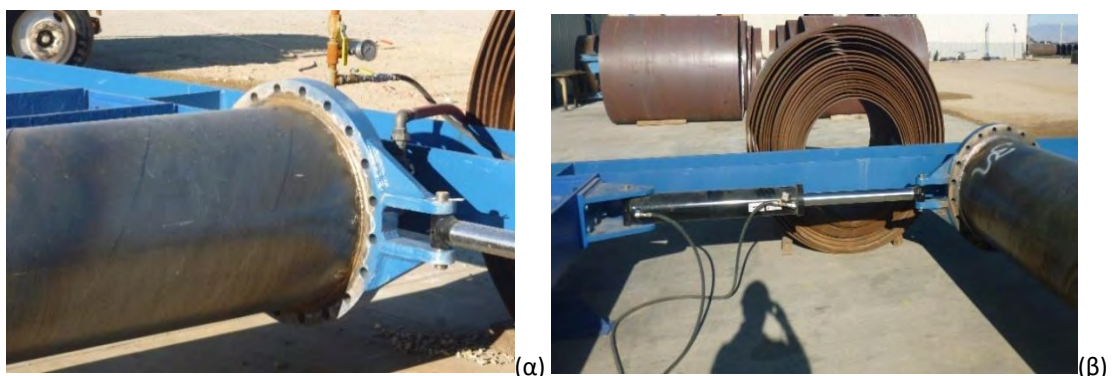
Οι μεταλλικές στηρίξεις (straps) έχουν απόσταση μεταξύ τους, σταθερή και ίση με 3.048 m (120 in), ενώ η συγκολλητή σύνδεση επικάλυψης μεταξύ των σωλήνων βρίσκεται στο μέσον της απόστασης τους. Το πλάτος των στηρίξεων είναι 304.8 mm (12 in) και το σχήμα τους ημικυκλικό καθώς ο σχεδιασμός τους βασίζεται στην εξωτερική διάμετρο του δοκιμίου, ώστε να βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους (Εικόνα 3.7 αριστερά). Αντίστοιχα με το δοκίμιο, τα “straps” συνδέονται και με το υπόλοιπο πλαίσιο μέσω αρθρώσεων (Εικόνα 3.7 δεξιά). Οι αρθρώσεις χρησιμοποιούνται ώστε να επιτρέπεται η περιστροφή του δοκιμίου στα σημεία όπου υπάρχει αλληλεπίδραση με την πειραματική διάταξη.





Εικόνα 3. 7: Μεταλλικές στηρίξεις (staps).

Στα ελεύθερα άκρα των δοκιμών συγκολλούνται μεταλλικές κυκλικές πλάκες - καπάκια (Εικόνα 3.8 α), καθώς κατά την πειραματική δοκιμή προβλέπεται η επιβολή εσωτερικής πίεσης σε όλα τα δοκίμια που εξετάζονται. Το νερό εισέρχεται υπό πίεση στους σωλήνες μέσω ειδικά διαμορφωμένης υποδοχής που βρίσκεται στην μια εκ των δυο μεταλλικών πλακών και φαίνεται στην Εικόνα 3.9. Ένας δεύτερος λόγος που κρίνεται αναγκαία η εφαρμογή περιορισμών στα ελεύθερα άκρα των σωλήνων είναι η εφαρμογή των εξωτερικών φορτίων που απαιτούνται για να πραγματοποιηθεί η πειραματική δοκιμή. Αναλυτικότερα, στα άκρα των κυκλικών πλακών αρθρώνονται υδραυλικοί γρύλοι (Εικόνα 3.8 β), μέσω των οποίων η δύναμη που προφέρεται, από την υψηλής πίεσης αντλία λαδιού (Εικόνα 3.10), μεταφέρεται στα άκρα του δοκιμίου. Το δεύτερο άκρο των γρύλων αρθρώνεται στο πλαίσιο της διάταξης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8 β, ενώ η μέγιστη διαδρομή που μπορούν να καλύψουν ορίζεται στα 914.4 mm (36 in).



Εικόνα 3. 8: α) Μεταλλική πλάκα στο άκρο, β) Γρύλος επιβολής εξωτερικού φορτίου.

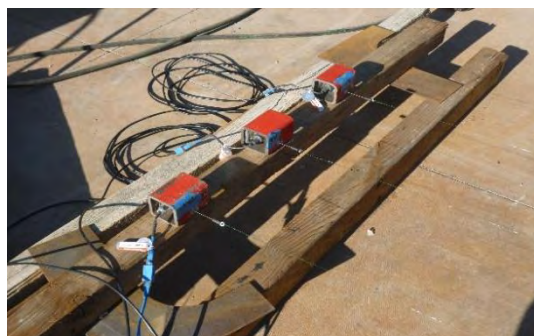


Εικόνα 3. 9: Υποδοχή εισαγωγής ύδατος υπό πίεση.

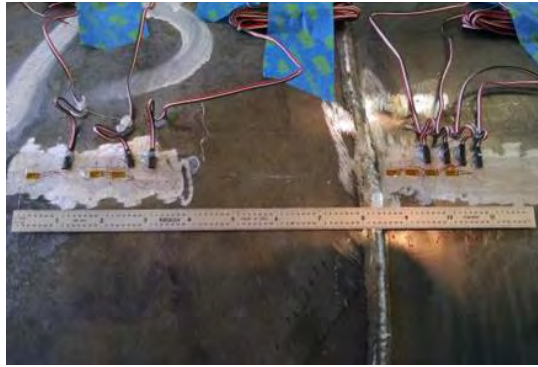


Εικόνα 3. 10: Αντλία λαδιού υψηλής πίεσης.

Το σύνολο της πειραματικής διάταξης ολοκληρώνεται με τα μετρητικά όργανα φορτίων, μετατοπίσεων και παραμορφώσεων. Το εξωτερικό φορτίο που επιβάλλεται από του γρύλους στα δοκίμια καταγράφεται ψηφιακά, ενώ για τις μετατοπίσεις χρησιμοποιούνται ειδικά σύρματα (wires), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.11. Οι μετρήσεις μετατοπίσεων γίνονται στο μέσον του σωλήνα (midspan), καθώς και σε δυο ακόμη σημεία εκατέρωθεν του μέσου με απόσταση 0.61 m (24 in) από αυτό. Επιπλέον, λαμβάνονται μετρήσεις παραμορφώσεων τοπικά στα κρίσιμα σημεία γύρω από την περιοχή της συγκολλητής σύνδεσης τόσο στο θλιπτικό όσο και στο εφελκυστικό τμήμα. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιούνται αισθητήρες παραμόρφωσης (strain gauges) των οποίων μια τυπική διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.12. Στην επόμενη ενότητα όπου παρουσιάζονται αναλυτικά τα πειραματικά αποτελέσματα, επισημαίνονται οι ακριβής θέσης όπου καταγράφονται οι παραμορφώσεις.



Εικόνα 3. 11: Μετρητικά συστήματα μετατοπίσεων (wires).



Εικόνα 3. 12: Τυπική Διάταξη μετρητικών παραμορφώσεων (strain gauges).

Σύμφωνα με την πειραματική διάταξη που περιγράφεται παραπάνω οι σωλήνες που εξετάζονται, υποβάλλονται σε φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων (Four Point Bending). Η συγκεκριμένη εντατική κατάσταση είναι ικανή να προσομοιώσει την συμπεριφορά αγωγών όταν στις περιοχές που εγκαθίστανται παρατηρείται έντονη σεισμική δραστηριότητα, που συνεπάγεται με καθιζήσεις, κατολισθήσεις, ρευστοποίηση αλλά και μεγάλες μετακινήσεις του εδάφους. Στην Εικόνα 3.13 παρουσιάζεται η μορφή του πρώτου δοκιμίου ( $D/t = 191$ ), με διπλή συγκόλληση στην περιοχή της σύνδεσης, στην αρχική και στην παραμορφωμένη κατάσταση στο τέλος της πειραματικής δοκιμής.



(α)



(β)

Εικόνα 3. 13: α) Μορφή δοκιμίου στην απαραμόρφωτη κατάσταση, β) Μορφή δοκιμίου στην παραμορφωμένη κατάσταση.



### 3.3. Πειραματικά αποτελέσματα

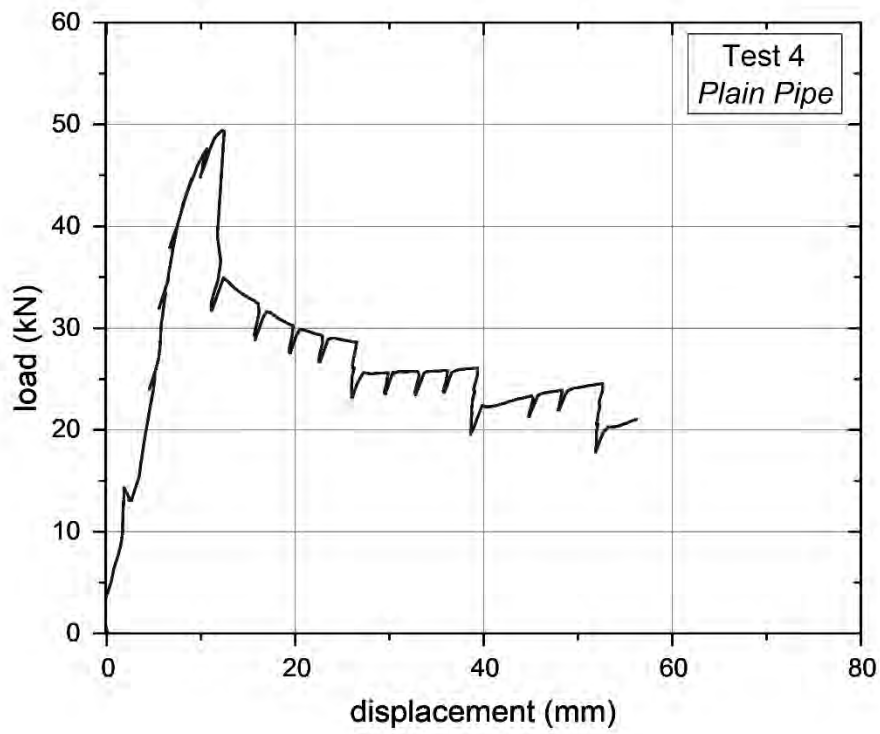
Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται για κάθε μια από τις επτά πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν και προέρχονται από μετρήσεις φορτίων, μετατοπίσεων και παραμορφώσεων. Όλες οι μετρήσεις ελήφθησαν κατά την διάρκεια των δοκιμών με την βοήθεια του εξοπλισμού που περιγράφεται στην ενότητα 3.2 και ποσοτικοποιούνται στις επόμενες παραγράφους. Τα αποτελέσματα δίνονται μέσω διαγραμμάτων φορτίου – μετατόπισης, φορτίου – παραμόρφωσης για όλες τις δοκιμές. Το φορτίο καταγράφεται από το ψηφιακό σύστημα ελέγχου των δυο γρύλων μέσω των οποίων ασκείται στους σωλήνες η εξωτερική φόρτιση. Οι μετατοπίσεις και παραμορφώσεις λαμβάνονται αντίστοιχα, από τα μετρητικά σύρματα (wires) και τους αισθητήρες παραμόρφωσης (strain gauges). Τα διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης αφορούν τις μετατοπίσεις που καταγράφονται από σημείο που βρίσκεται στο μέσον του μήκους των δοκιμών (midspan). Τα strain gauges (SG) που είναι τοποθετημένα επάνω στα δοκίμια καταγράφουν παραμορφώσεις στην αξονική διεύθυνση, κατά μήκος των σωλήνων και είναι αριθμημένα ώστε να γίνονται γνωστές οι θέσεις καταμέτρησης. Τα διαγράμματα παραμορφώσεων δίνονται σε αντιπαραβολή με σχήματα που απεικονίζουν την ακριβή περιοχή, των δοκιμών, όπου είναι εγκατεστημένα τα μετρητικά strain gauges. Επιπλέον, αναφέρεται πως στην γειτονία της σύνδεσης και συγκεκριμένα κοντά στο πόδα των συγκολλήσεων, οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις ξεπερνούν τις καταγραφόμενες τιμές, λόγω του φυσικού περιορισμού, που διέπεται από τα μετρητικά συστήματα παραμορφώσεων (strain gauges). Τέλος, δίνεται έμφαση στο μέγιστο φορτίο λυγισμού όπου πρακτικά τα δοκίμια αστοχούν λόγω της κάμψης στην οποία υποβάλλονται. Παράλληλα, καταγράφεται η περιοχή στο δοκίμιου όπου εκδηλώνεται η αστοχία (buckling), ενώ εκτιμάται και η γωνία κλίσης που υφίστανται τα δοκίμια, στο τέλος της δοκιμής, με την βοήθεια των καταγεγραμμένων μετατοπίσεων στα τρία σημεία του σωλήνα.

Στην υποενότητα 3.3.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τα δοκίμια με λόγο διάμετρο-προς-πάχος ( $D/t$ ) ίσο με 193 και πρόκειται για την πρώτη ομάδα δοκιμών όπου το πάχος τοιχώματος των σωλήνων είναι 3.429 mm (0.135 in). Στην ίδια ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τους σωλήνες με διπλή συγκόλληση (δοκίμιο 1), με μονή εξωτερική συγκόλληση (δοκίμιο 2), με μονή εσωτερική συγκόλληση (δοκίμιο 3) στην περιοχή της σύνδεσης αλλά και τα αποτελέσματα από το δοκίμιο που δεν περιλαμβάνει συγκολλητή σύνδεση επικάλυψης (δοκίμιο 4). Στην υποενότητα 3.3.2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα από την δεύτερη ομάδα δοκιμών που περιλαμβάνει τους σωλήνες με λόγο διάμετρο-προς-πάχος ( $D/t$ ) ίσο με 102 και πάχος τοιχώματος 6.25 mm (0.25 in), οι οποίοι περιλαμβάνουν όλους τους πιθανούς τρόπους εφαρμογής της συγκόλλησης στην περιοχή της σύνδεσης, μονή εσωτερική (δοκίμιο 5), μονή εξωτερική (δοκίμιο 6) και διπλή συγκόλληση (δοκίμιο 7).

### 3.3.1. Αποτελέσματα για δοκίμια με λόγο $D/t = 191$

Όπως αναφέρεται και στις προηγούμενες ενότητες στην περίπτωση των δοκιμίων που εξετάζονται με εξωτερική διάμετρο 654.05 mm, πάχος τοιχώματος 3.429 mm και λόγο διάμετρο-προς-πάχος ( $D/t$ ) ίσο με 191, συγκαταλέγεται κι ένα δοκίμιο που δεν περιλαμβάνει συγκολλητή σύνδεση (δοκίμιο 4 – plain pipe). Ο συγκεκριμένος σωλήνας συνολικού μήκους 15.85 m δοκιμάζεται για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων με τις υπόλοιπες περιπτώσεις όπου οι σωλήνες με αντίστοιχα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, φέρουν συγκολλητή σύνδεση με επικάλυψη. Η πειραματική δοκιμή διεξήχθη στην ίδια πειραματική διάταξη, φορτίζοντας τον σωλήνα με εσωτερική πίεση της τάξεως του 40% της πίεσης διαρροής του. Με τον τρόπο αυτό, οι συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιήθηκε η δοκιμή, παραμένουν ίδιες με αυτές που εφαρμόστηκαν και στα υπόλοιπα δοκίμια.

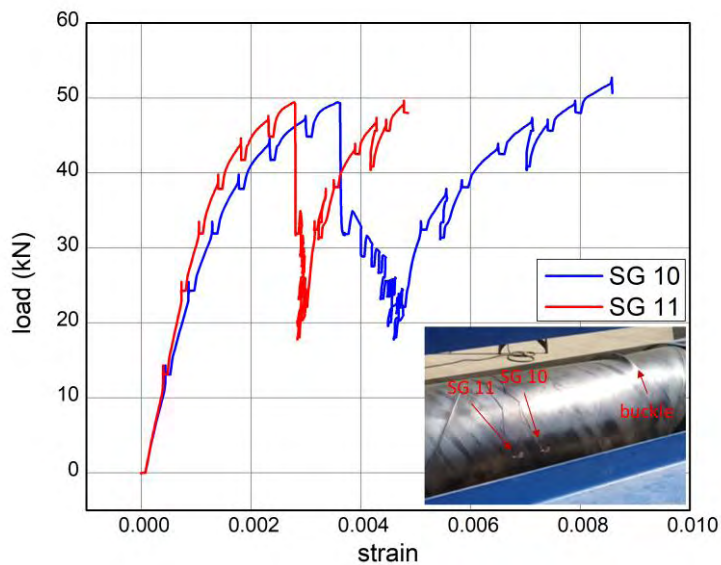
Αρχικά, δίνονται τα αποτελέσματα από το τέταρτο πείραμα τα οποία θα αποτελέσουν μέτρο σύγκρισης για τα πειράματα 1 έως 3, των όποιων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια. Στην Εικόνα 3.14 δίνεται η καμπύλη φορτίου - μετατόπισης για το τέταρτο δοκίμιο που δεν περιλαμβάνει συγκολλητή σύνδεση. Το μέγιστο φορτίο λυγισμού που προκύπτει ανέρχεται στα 49 kN και η αστοχία παρατηρείται στα 700 mm αριστερά από το μέσον του σωλήνα (midspan), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.15. Η περιοχή στην οποία εκδηλώνεται η αστοχία σχετίζεται άμεσα με τις γεωμετρικές ατέλειες που προκύπτουν τοπικά στο τοίχωμα του σωλήνα από την κατεργασία κατασκευής του, που στην προκειμένη περίπτωση πρόκειται για την κατεργασία ελικοειδούς ραφής. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί πως τα δυο μετρητικά strain gauges στο μέσον του μήκους του σωλήνα και στην περιοχή που εφελκύεται κατά την φόρτιση, δεν κατέγραψαν αξονική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 1 %, σύμφωνα με την Εικόνα 3.16. Στο τέλος της δοκιμής η γωνία κλίσης του δοκιμίου εκτιμάται στις 44.4 μοίρες καθώς δεν παρατηρείται καμία ρηγμάτωση στο τοίχωμα του σωλήνα και καμία απώλεια υδάτων από το εσωτερικό του.



Εικόνα 3. 14: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης τέταρτου δοκιμίου, ( $D/t=191$ , χωρίς συγκολλητή σύνδεση).

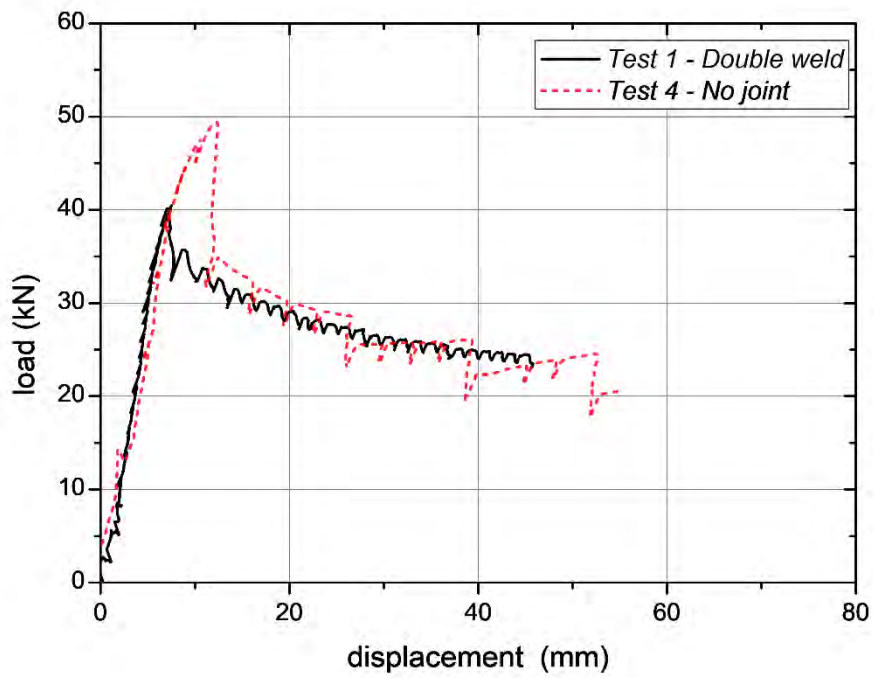


Εικόνα 3. 15: Μορφή αστοχία τέταρτου δοκιμίου ( $D/t=191$ , χωρίς συγκολλητή σύνδεση).



Εικόνα 3. 16: Τοπικές παραμορφώσεις στην περιοχή εφελκυσμού του τέταρτου δοκιμίου ( $D/t=191$ , χωρίς συγκολλητή σύνδεση).

Εν συνεχεία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές 1 έως 3 όπου τα δοκίμια περιλαμβάνουν συγκολλητή σύνδεση με επικάλυψη στο μέσον του συνολικού μήκους τους. Στην Εικόνα 3.17 και Εικόνα 3.18 παρουσιάζεται η καμπύλη φορτίου - μετατόπισης και η μορφή αστοχίας για το πρώτο δοκίμιο με διπλή συγκόλληση στην περιοχή της σύνδεσης μεταξύ του “bell” και του “spigot”. Η καμπύλη φορτίου - μετατόπισης δίνεται σε αντιπαραβολή με την αντίστοιχη καμπύλη από την δοκιμή 4 και προκύπτει πως η ύπαρξη συγκολλητής σύνδεσης είναι ικανή να προκαλέσει σημαντική μείωση στο μέγιστο φορτίο λυγισμού των σωλήνων. Συγκεκριμένα το μέγιστο φορτίο που παρατηρείται για την δοκιμή 1 είναι 40 kN ενώ η γωνία κλίσης 38.5 μοίρες. Η αστοχία λόγω του κάμψης εκδηλώνεται στην πλευρά του “spigot” και κοντά στην περιοχή της εξωτερικής συγκόλλησης (Εικόνα 3.18)



Εικόνα 3. 17: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης πρώτου δοκιμίου, ( $D/t=191$ , διπλή συγκόλληση).

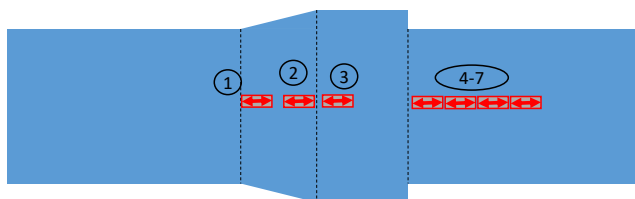


Εικόνα 3. 18: Μορφή αστοχίας πρώτου δοκιμίου ( $D/t=191$ , διπλή συγκόλληση).

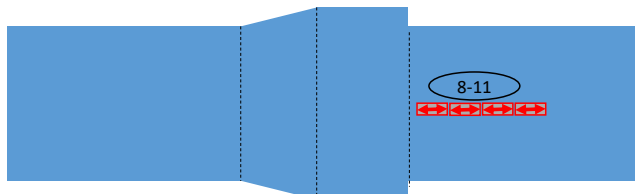


Στην Εικόνα 3.19 απεικονίζεται η διάταξη των μετρητικών strain gauges όπως τοποθετήθηκαν στο πρώτο δοκίμιο με διπλή συγκόλληση, τόσο στην περιοχή της θλίψης, όσο και στην περιοχή του εφελκυσμού. Σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα, τα strain gauges 1 έως 3 είναι τοποθετημένα στην πλευρά του “bell” και στην περιοχή της θλίψης, οι αποστάσεις τους από το άκρο της διαμόρφωσης του “bell” είναι αντίστοιχα, 190 mm (SG 1), 160 mm (SG 2), 140 mm (SG 3). Επίσης, στην περιοχή της θλίψης αλλά στην πλευρά του “sprigot” βρίσκονται τα strain gauges 4 έως 7, οι αποστάσεις μεταξύ τους είναι 12.7 mm ενώ το πρώτο εξ αυτών βρίσκεται σε απόσταση 9.5 mm από τον πόδα της εξωτερική συγκόλλησης. Στην περιοχή του εφελκυσμού και στην πλευρά του “sprigot” βρίσκονται τα gauges 8 έως 11, η διάταξη των οποίων είναι αντίστοιχη με αυτή των 4 έως 7. Στην Εικόνα 3.20 παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων για το πρώτο δοκίμιο.

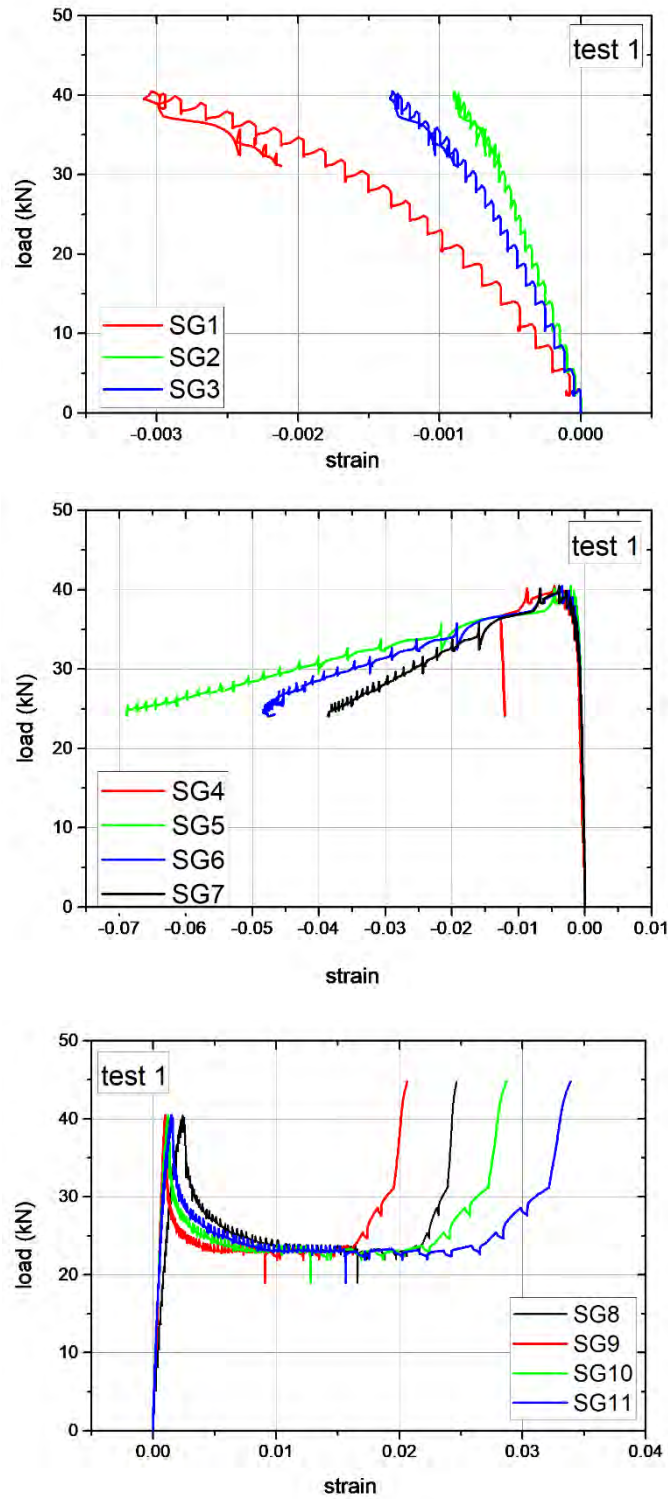
Top View (Compression Side):



Top View (Tension Side):

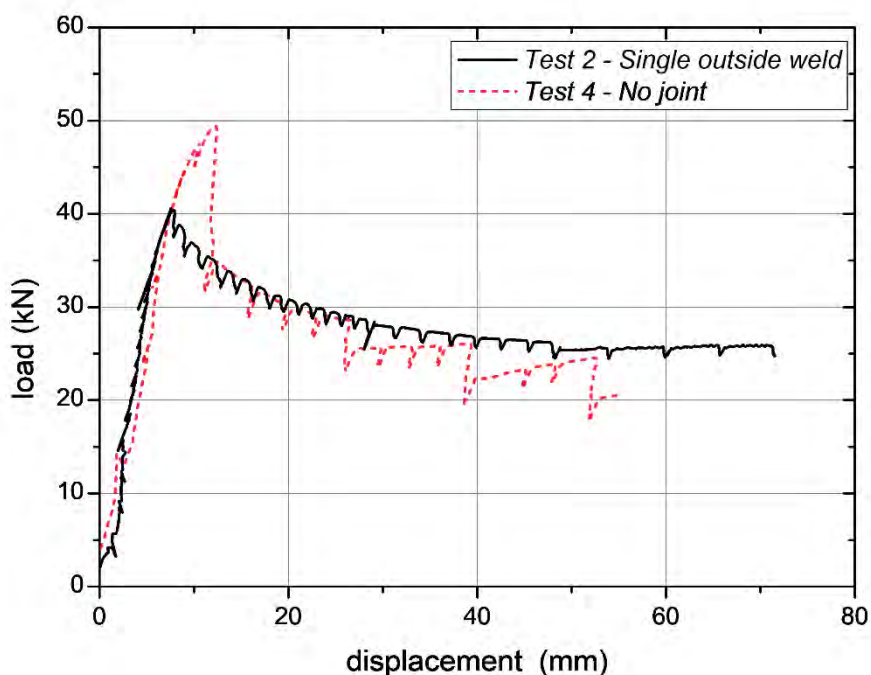


Εικόνα 3. 19: Διάταξη strain gauges από το πρώτο δοκίμιο, ( $D/t=191$ , διπλή συγκόλληση).



Εικόνα 3. 20: Διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων πρώτου δοκιμίου ( $D/t=191$ , διπλή συγκόλληση).

Για το δοκίμιο 2 με την μονή εξωτερική συγκόλληση δίνεται η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης στην Εικόνα 3.21, το μέγιστο φορτίο είναι 41 kN και γωνία κλίσης του δοκιμίου στο τέλος της δοκιμής προκύπτει 44 μοίρες. Σύμφωνα με την Εικόνα 3.22 η αστοχία συμβαίνει και πάλι στην πλευρά του “spigot” και κοντά στην περιοχή της συγκόλλησης. Ακολούθως, στην Εικόνα 3.23 φαίνεται η διάταξη των strain gauges που τοποθετήθηκαν στον δεύτερο δοκίμιο, στην θλιπτική περιοχή η διάταξη παραμένει ίδια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο δοκίμιο 1 και περιγράφεται ανωτέρω. Στην περιοχή εφέλκυσμού τα gauges 8 και 9 είναι τοποθετημένα στην πλευρά του “bell”, η απόσταση μεταξύ τους είναι 12.7 mm ενώ το gauge 9 απέχει από το τέλος της διαμόρφωσης του “bell”, 9.5 mm. Αντίστοιχα στην πλευρά του “spigot” τα gauges 10 και 11 απέχουν μεταξύ τους 12.7 mm με το gauge 10 να βρίσκεται σε απόσταση 9.5 mm από τον πόδα της συγκόλλησης. Στην Εικόνα 3.24 παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου – παραμόρφωσης για το δεύτερο δοκίμιο.

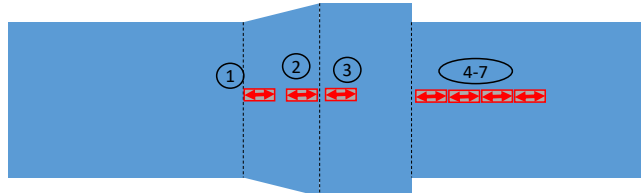


Εικόνα 3. 21: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης δεύτερου δοκιμίου, ( $D/t=191$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).

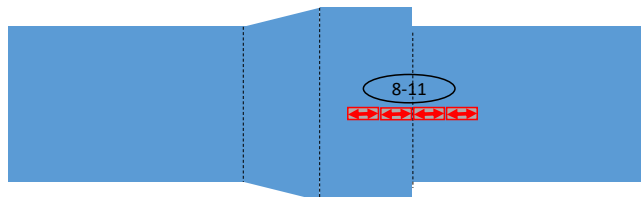


Εικόνα 3. 22: Μορφή αστοχίας δεύτερου δοκίμιου ( $D/t=191$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).

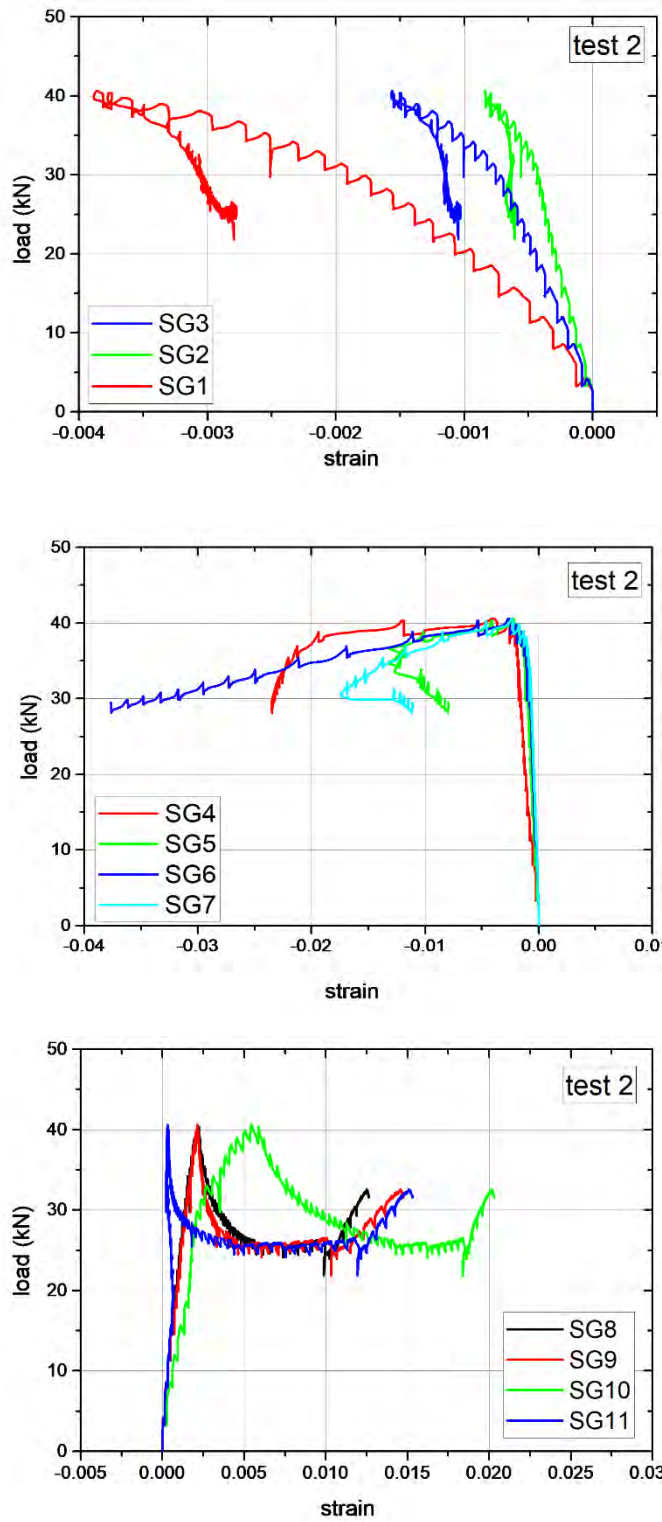
Top View (Compression Side):



Top View (Tension Side):

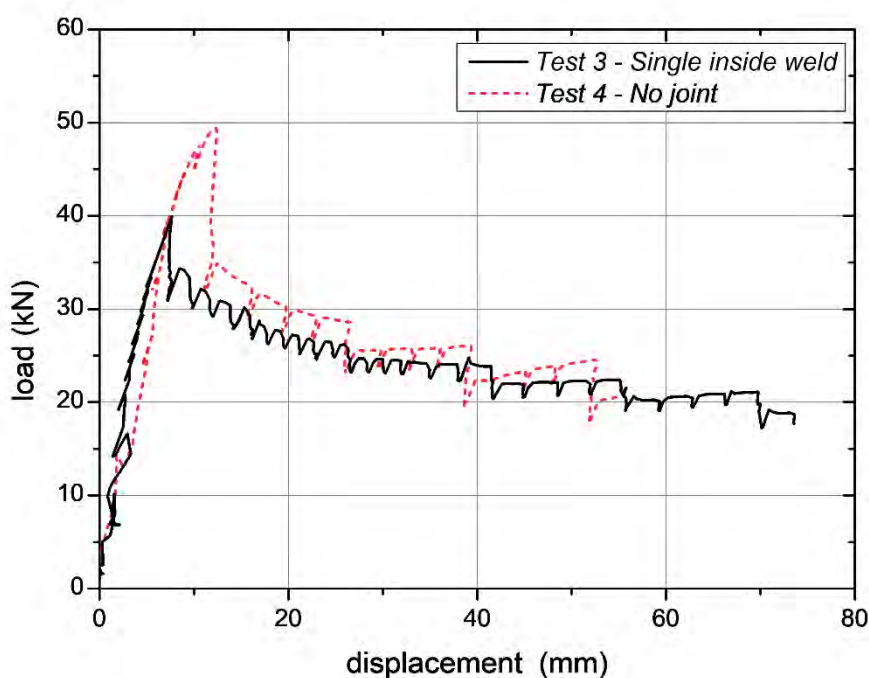


Εικόνα 3. 23: Διάταξη strain gauges από το δεύτερο δοκίμιο, ( $D/t=191$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).

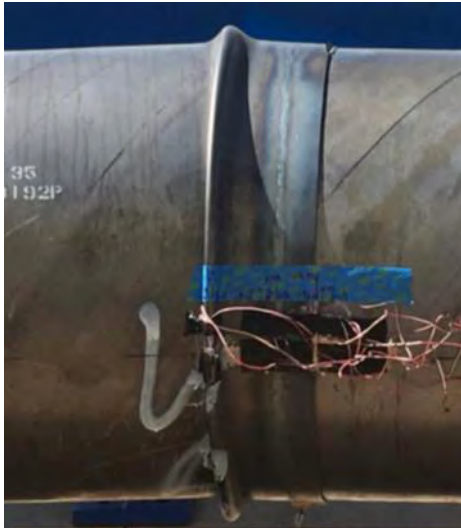


Εικόνα 3. 24: Διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων δεύτερου δοκιμίου ( $D/t=191$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).

Η τελευταία περίπτωση που εξετάζεται όσον αφορά τους σωλήνες με λόγο διάμετρο προς πάχος ( $D/t$ ) ίσο με 191, αφορά το τρίτο δοκίμιο που περιλαμβάνει μονή εσωτερική συγκόλληση στην περιοχή της σύνδεσης με επικάλυψη. Στην Εικόνα 3.25 δίνεται η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, βάση της οποίας το μέγιστο φορτίο προκύπτει 40 kN, με την τελική κλίση του σωλήνα λόγω της κάμψης εκτιμάται στις 44.2 μοίρες. Η αστοχία λόγω της φόρτισης εκδηλώνεται στην πλευρά του “bell” όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.26, ενώ στην Εικόνα 3.27 και Εικόνα 3.28 παρουσιάζεται η διάταξη των strain gauges και τα αντίστοιχα διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων. Στη θλιπτική περιοχή, βρίσκονται τα strain gauges 1 έως 6 με αποστάσεις 190 mm, 160 mm 140, 85.4 mm, 72.7 mm και 60 mm, αντίστοιχα, από το άκρο της διαμόρφωσης του “bell”. Στην πλευρά του spigot τα gauges 7 και 8 απέχουν μεταξύ του 12.7 mm με το gauge 7 να είναι σε απόσταση 9.5 mm από το άκρο του “bell”. Στην εφελκυστική περιοχή τα gauges 9 και 10 από την πλευρά του “bell” απέχουν μεταξύ τους 12.7 mm με το gauge 10 να βρίσκεται σε απόσταση 60 mm από το άκρο, όσο για τα gauges 11 και 12 που βρίσκονται στην πλευρά του “spigot”, απέχουν 12.7 mm μεταξύ τους καθώς στο gauge 11 απέχει από το άκρο 9.5 mm.

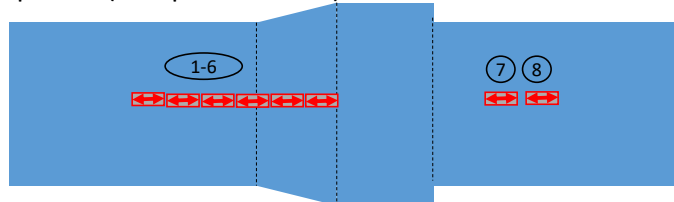


Εικόνα 3. 25: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης τρίτου δοκιμίου, ( $D/t=191$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).

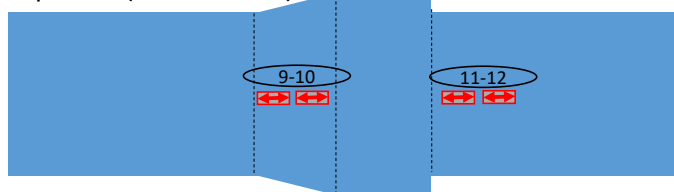


Εικόνα 3. 26: Μορφή αστοχίας τρίτου δοκιμίου ( $D/t=191$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).

Top View (Compression Side):

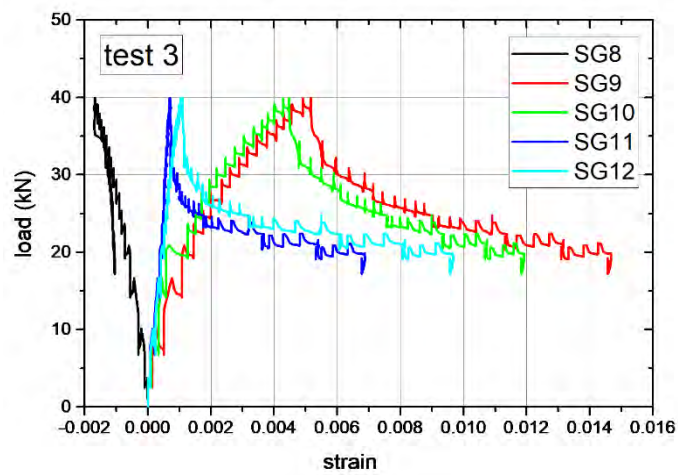
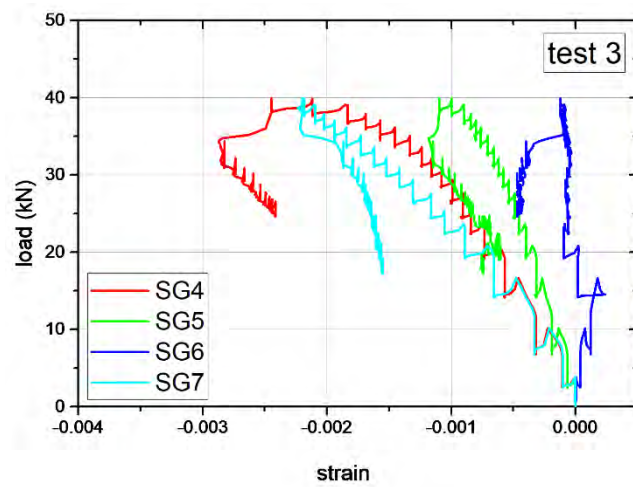
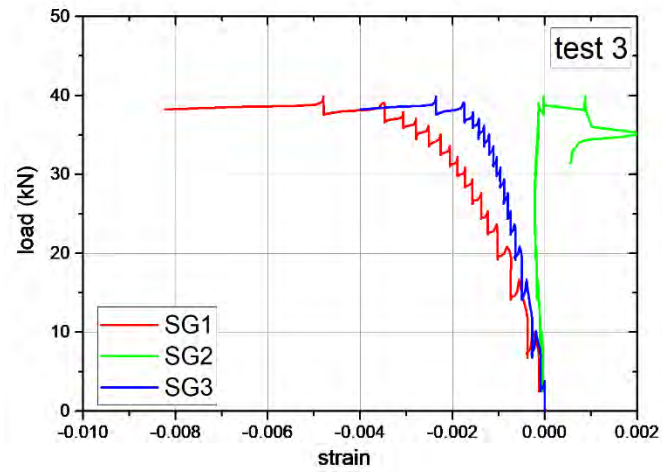


Top View (Tension Side):



Εικόνα 3. 27: Διάταξη strain gauges από το τρίτο δοκίμιο, ( $D/t=191$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).





Εικόνα 3. 28: Διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων τρίτου δοκιμίου ( $D/t=191$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).



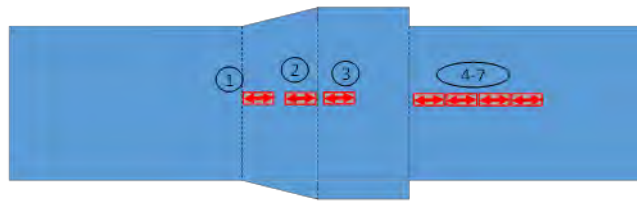
### 3.3.2. Αποτελέσματα για δοκίμια με λόγο $D/t = 103$

Η δεύτερη ομάδα πειραμάτων που εξετάζεται αφορά τους σωλήνες με πάχος τοιχώματος 6.25 mm (0.25 in) και περιλαμβάνουν όλους τους πιθανούς τρόπους συγκόλλησης στην περιοχή της σύνδεσης. Σύμφωνα με τον Πίνακα 2, το δοκίμιο 7 που περιλαμβάνει διπλή συγκόλληση εξετάστηκε τελευταίο, όμως λόγω σφάλματος στο σύστημα καταγραφής των μετατοπίσεων, κατά την πειραματική εκτέλεση δεν καθίσταται δυνατή η ποσοτικοποίηση της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης για το συγκεκριμένο δοκίμιο. Το μέγιστο φορτίο αντοχής λόγω λυγισμού που καταγράφηκε ήταν 105 kN. Η αστοχία συνέβη στην πλευρά του “bell” όπως δείχνει η Εικόνα 3.29. Στην Εικόνα 3.30 και 3.31 ακολουθούν η διάταξη των strain gauges που εφαρμόστηκε και τα διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων. Σημειώνεται πως η διάταξη των strain gauges είναι όμοια με αυτή την που χρησιμοποιήθηκε και για το δοκίμιο 1 ( $D/t=191$ , διπλή συγκόλληση) και περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα.



Εικόνα 3. 29: Μορφή αστοχίας εβδόμου δοκιμίου ( $D/t=103$ , διπλή συγκόλληση).

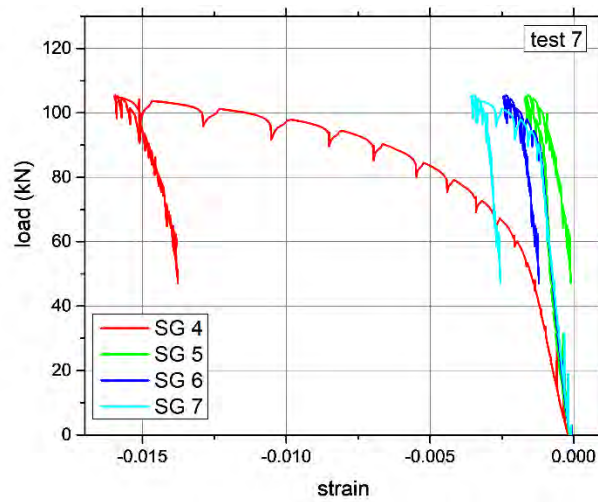
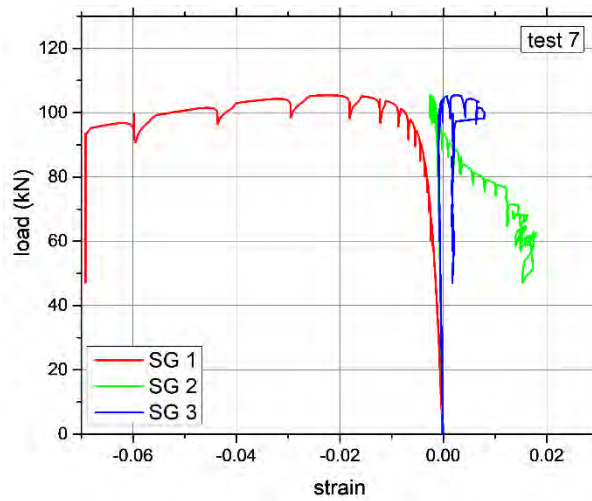
Top View (Compression Side):

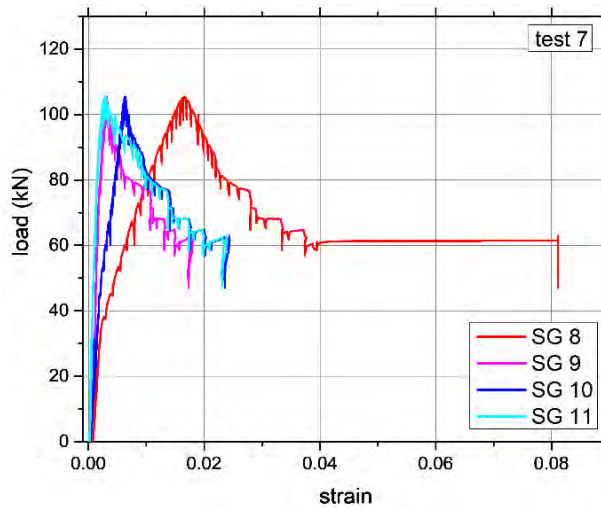


Top View (Tension Side):



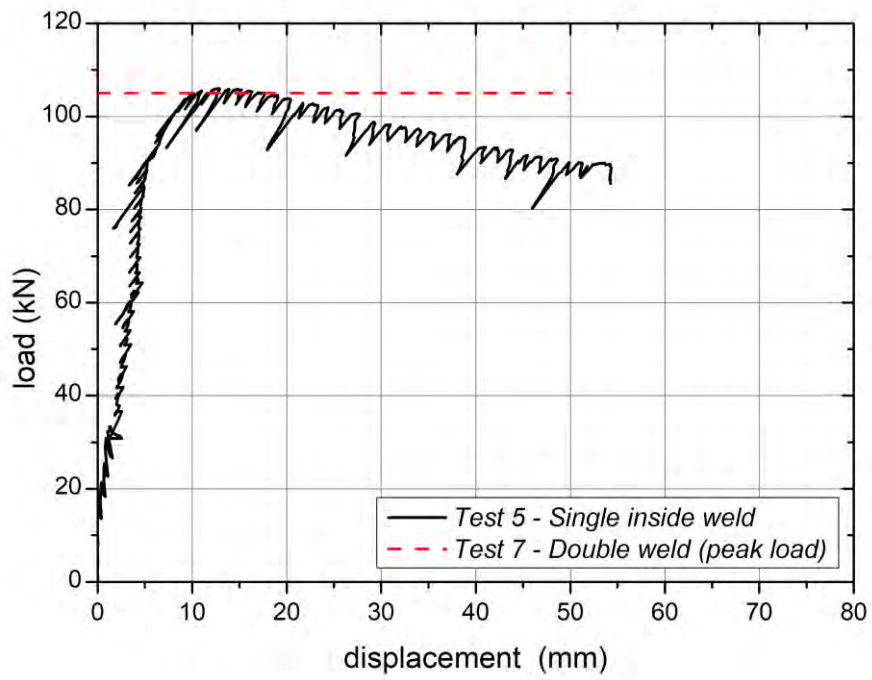
Εικόνα 3. 30: Διάταξη strain gauges από το έβδομο δοκίμιο, ( $D/t=103$ , διπλή συγκόλληση).





Εικόνα 3. 31: Διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων εβδομού δοκιμίου ( $D/t=103$ , διπλή συγκόλληση).

Στην Εικόνα 3.32 δίνεται η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το πέμπτο κατά σειρά δοκίμιο με την μονή εσωτερική συγκόλληση, το μέγιστο φορτίο ανέρχεται στα 107 kN και η γωνία κλίσης του δοκιμίου μετά την δοκιμή υπολογίζεται στις 43.3 μοίρες. Η μορφή λυγισμού του σωλήνα, που συνέβη στην πλευρά του “bell”, φαίνεται στην Εικόνα 3.33. Στην Εικόνα 3.34 και Εικόνα 3.35 ακολουθούν η διάταξη των strain gauges και τα διαγράμματα φορτίου - παραμόρφωσης. Σε αυτή τη περίπτωση, η διάταξη των strain gauges ταυτίζεται με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την δοκιμή 3 ( $D/t=191$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).

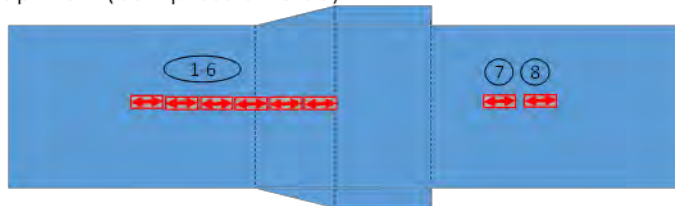


Εικόνα 3. 32: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης πέμπτου δοκιμίου, ( $D/t=103$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).

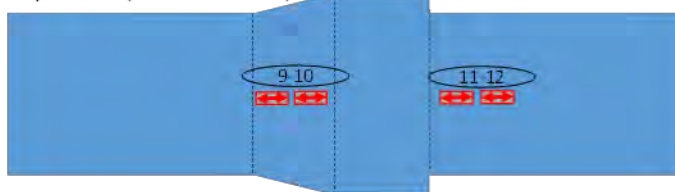


Εικόνα 3. 33: Μορφή αστοχίας πέμπτου δοκιμίου ( $D/t=103$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).

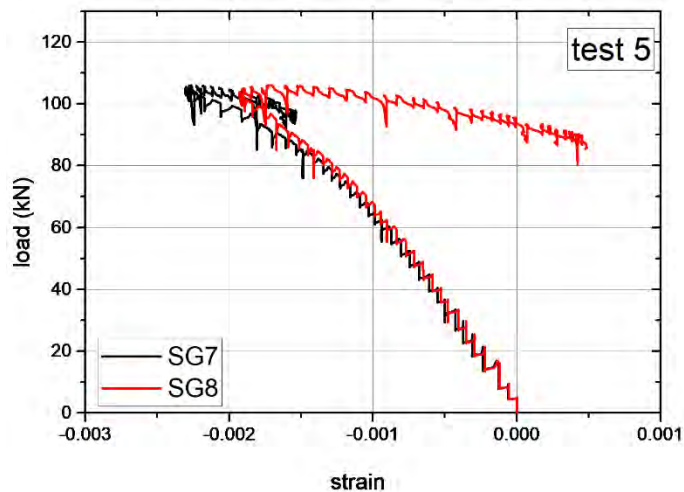
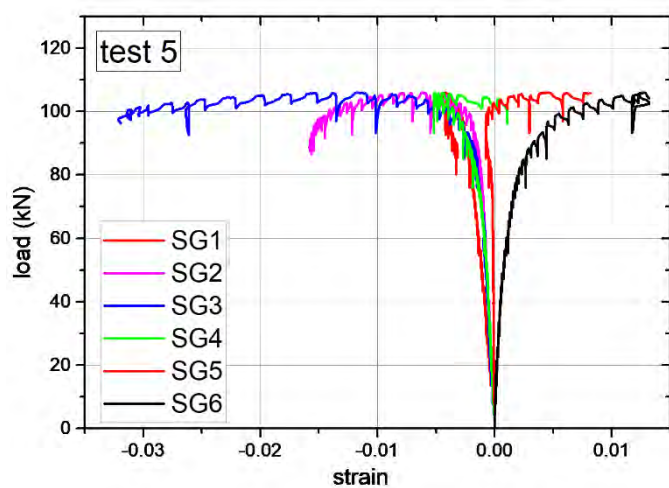
Top View (Compression Side):

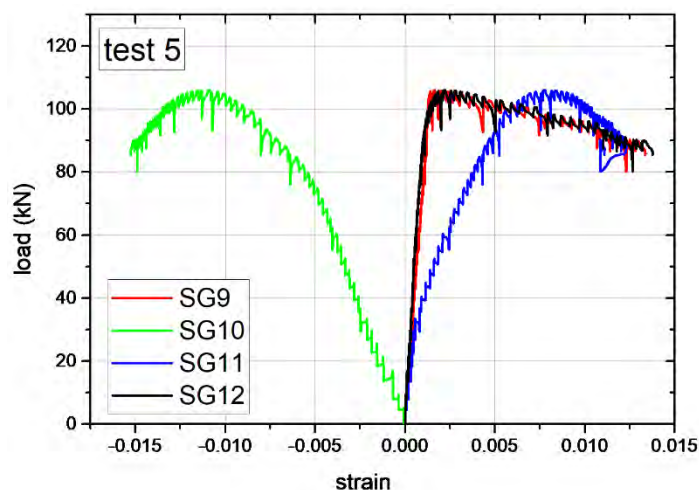


Top View (Tension Side):



Εικόνα 3. 34: Διάταξη strain gauges από το πέμπτο δοκίμιο, ( $D/t=103$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).

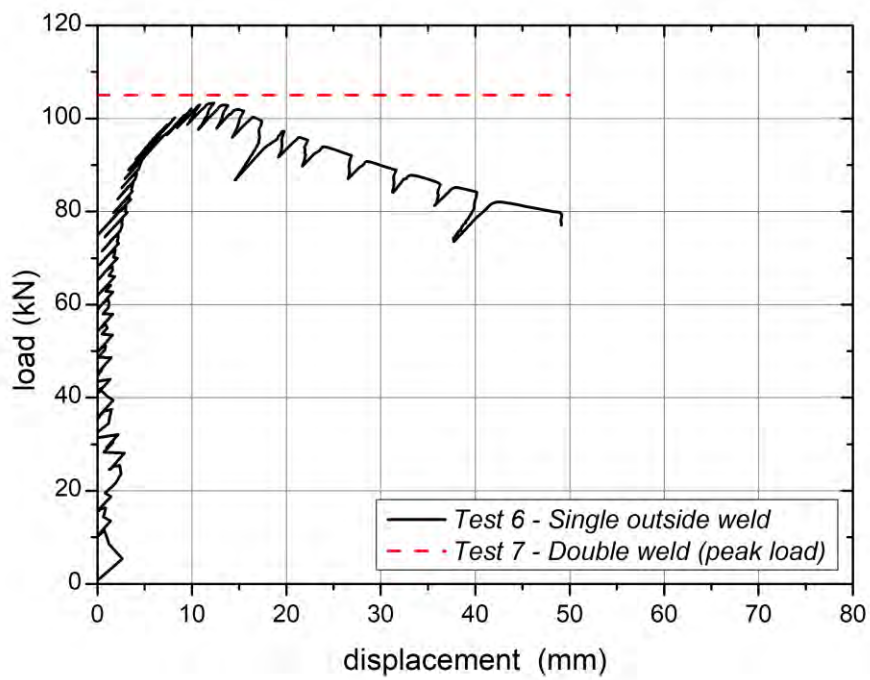




Εικόνα 3. 35: Διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων πέμπτου δοκιμίου ( $D/t=103$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).

Η τελευταία περίπτωση που εξετάζεται πειραματικά, αφορά σωλήνα με λόγο  $D/t = 103$  στον οποίο εφαρμόζεται μονή εξωτερική συγκόλληση στην περιοχή της σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων “bell” και “spigot”. Συγκεκριμένα το δοκίμιο 6 παρουσιάζει μέγιστο φορτίο 104 kN σύμφωνα με την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης (Εικόνα 3.36) και η αστοχία από λυγισμό εκδηλώνεται στην περιοχή του “spigot”, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.37. Επίσης, δεν καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της γωνίας κλίσης του δοκιμίου μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής. Επιπλέον, στην προκειμένη περίπτωση, χρησιμοποιείται τροποποιημένη διάταξη των strain gauges (Εικόνα 3.38). Αναλυτικά, στην θλιπτική περιοχή τα gauges 1 έως 3 απέχουν αντίστοιχα από το άκρο της διαμόρφωσης του “bell”, 190 mm, 160 mm και 140 mm, ακολουθούν τα gauges 4 και 5 έχοντας μεταξύ τους απόσταση 12.7 mm με το gauge 5 να απέχει από το άκρο 9.5 mm. Παρόμοια στο “spigot” τα gauges 6 έως 8 ισαπέχουν μεταξύ τους με απόσταση 12.7 mm, καθώς το gauge 6 απέχει 9.5 mm από τον πόδα της συγκόλλησης. Στην εφελκυστική περιοχή, το gauge 10 απέχει από άκρο του “bell” 9.5 mm με το gauge 9 να ακολουθεί σε απόσταση 12.7 mm από αυτό, αντίστοιχα στο “spigot” το gauge 11 απέχει από τον πόδα της συγκόλλησης 9.5 mm και το gauge 12 ακολουθεί με απόσταση 12.7 mm από αυτό. Τέλος, στην Εικόνα 3.39 δίνονται τα διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων για το έκτο δοκίμιο με μονή εξωτερική συγκόλληση.



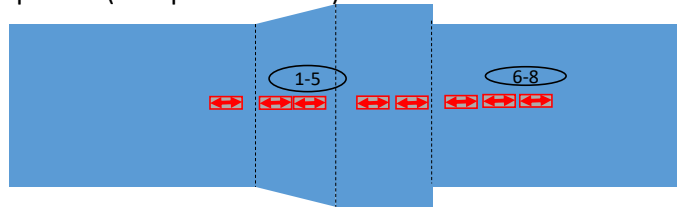


Εικόνα 3. 36: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης έκτου δοκιμίου, ( $D/t=103$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).

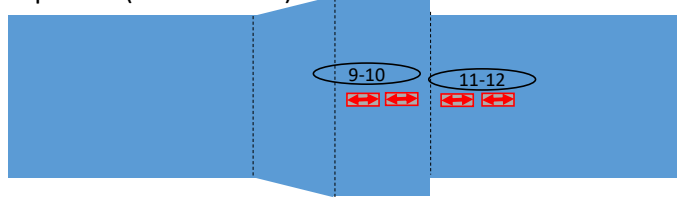


Εικόνα 3. 37: Μορφή αστοχίας έκτου δοκιμίου ( $D/t=103$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).

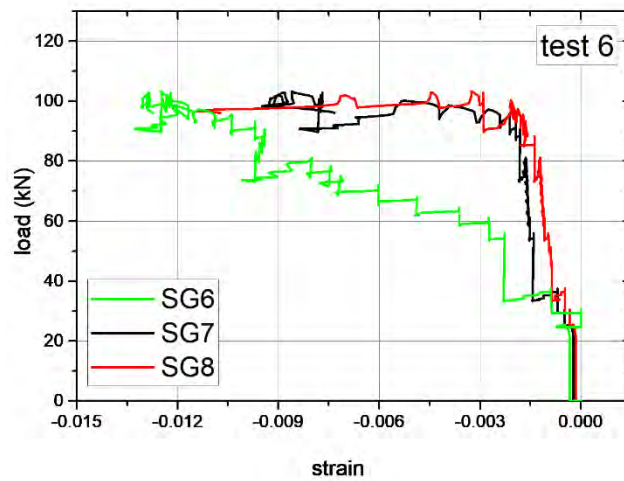
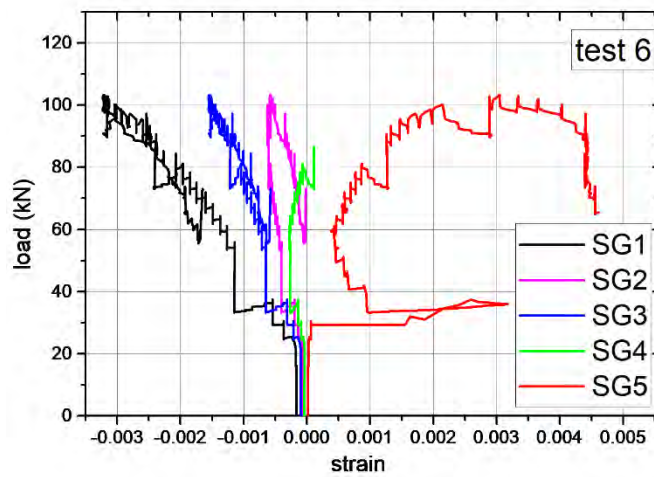
Top View (Compression Side):



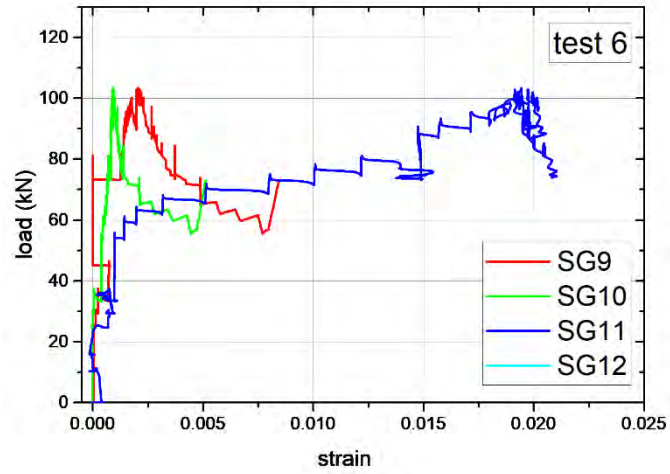
Top View (Tension Side):



Εικόνα 3. 38 : Διάταξη strain gauges από το έκτο δοκίμιο, ( $D/t=103$ , μόνη εξωτερική συγκόλληση).





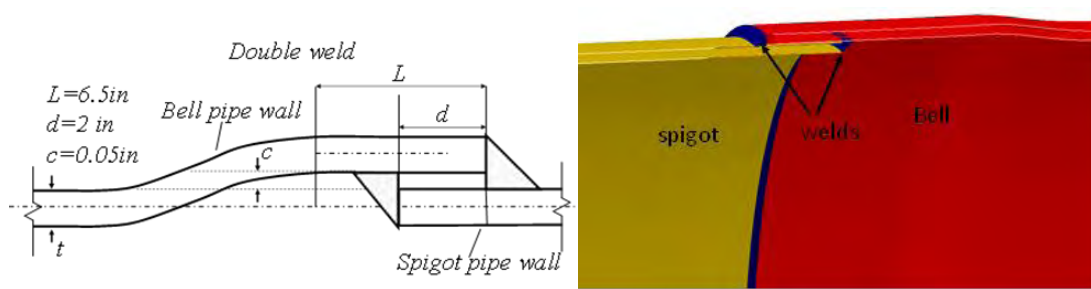


Εικόνα 3. 39: Διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων έκτου δοκιμίου ( $D/t=103$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).

## 4. Μοντελοποίηση με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

### 4.1. Περιγραφή αριθμητικών μοντέλων

Για την αριθμητική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των συγκολλητών συνδέσεων επικάλυψης που χρησιμοποιούνται σε αγωγού ύδατος, αναπτύχθηκαν τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα ABAQUS. Πρόκειται για μη γραμμικές αναλύσεις λόγω προσομοίωσης της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς των σωλήνων αλλά και των μεγάλων παραμορφώσεων που αναπτύσσονται τοπικά στην περιοχή της αστοχίας (buckling). Η μοντελοποίηση των συγκολλήσεων στην σύνδεση μεταξύ των τμημάτων “bell” και “spigot” πραγματοποιείται με δακτύλιο τριγωνικού προφίλ 45 μοιρών και τρισδιάστατα οκτακομβικά στοιχεία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Για τον σωλήνα χρησιμοποιούνται τετρακομβικά στοιχεία κελύφους (τύπου S4R), μειωμένης ολοκλήρωσης και με πέντε σημεία ολοκλήρωσης κατά την διεύθυνση του πάχους. Έχει αποδειχθεί πως αυτού του τύπου τα στοιχεία περιγράφουν καλύτερα την παραμόρφωση λόγω λυγισμού λεπτότοιχων κατασκευών αλλά και την μεταλυγισμική συμπεριφορά τους (Vasilikis et al., 2014, Karamanos et al., 2015). Η γεωμετρία στην περιοχή της σύνδεσης διαμορφώνεται σύμφωνα με τον κανονισμό AWWA C200, βάση του οποίου κατασκευάστηκαν τα δοκίμια που εξετάστηκαν σε πειραματικό επίπεδο, αναλυτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά απεικονίζονται στην Εικόνα 3.1. Οι ιδιότητες των υλικών που εισήχθησαν στα αριθμητικά μοντέλα προκύπτουν από τις καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης που παρουσιάστηκαν στην Εικόνα 3.2 και Εικόνα 3.3 και Πίνακας 1, αντίστοιχα για τους σωλήνες με λόγο διάμετρο προς πάχος ίσο με 191 και 103. Με βάση το έγγραφο προσδιορισμού της διαδικασίας της συγκόλλησης (Welding Procedure Specification, WPS), χρησιμοποιείται ηλεκτρόδιο τύπου E71T-1, με μηχανικές ιδιότητες για το μέταλλο συγκόλλησης, που συνοψίζονται στον Πίνακα 3. Όσον αφορά την ανελαστική συμπεριφορά των υλικών, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ισοτροπικής κράτυνσης που προσφέρεται από το πρόγραμμα ABAQUS.

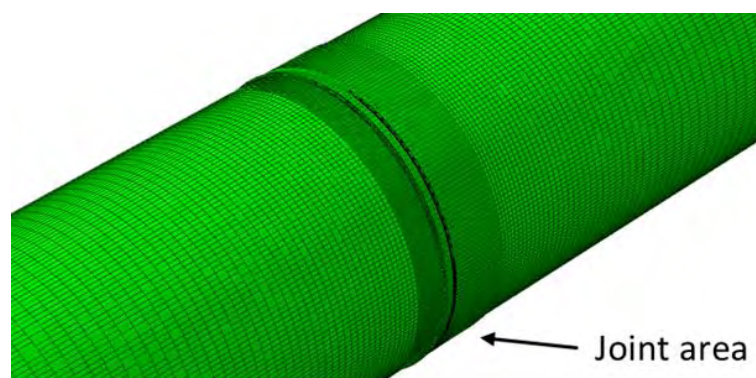


Εικόνα 4. 1: Γεωμετρία διπλής συγκόλλησης στην περιοχή της σύνδεσης.

Όριο διαρροής (MPa)	530
Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	580
Παραμόρφωση, %	26

Πίνακας 3: Μηχανικές ιδιότητες μετάλλου συγκόλλησης.

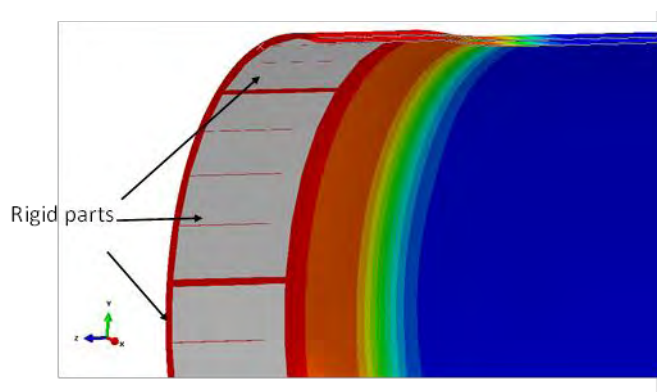
Το υπολογιστικό πλέγμα (mesh) που χρησιμοποιείται και παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.2, επιλέγεται ιδιαίτερα πυκνό στην γειτονία των συγκολλητών συνδέσεων ώστε να είναι ικανό να περιγράψει φαινόμενα μεγάλων γεωμετρικών μεταβολών και παραμορφώσεων, που εμφανίζονται στο πρόβλημα του τοπικού λυγισμού που εξετάζεται.



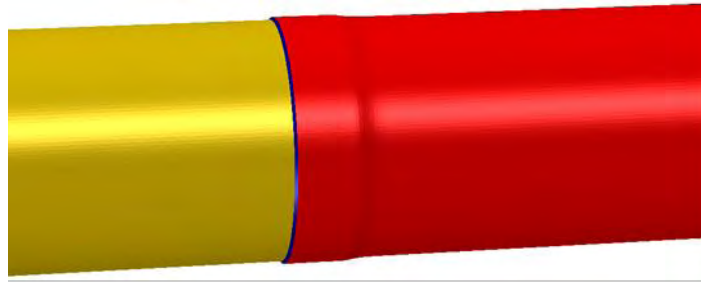
Εικόνα 4. 2: Υπολογιστικό πλέγμα αριθμητικού μοντέλου.

Στις αναλύσεις λαμβάνεται υπόψη η επιρροή των παραμενουσών τάσεων που αναπτύσσονται στους σωλήνες λόγω της ψυχρής διαμόρφωσης του ενός άκρου σε μορφή καμπάνας (bell) όπως περιγράφεται στην Ενότητα 2.2. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3, το πρώτο στάδιο της προσομοίωσης περιλαμβάνει την κατεργασία διαμόρφωσης του “bell” (expansion), ο υδραυλικός διευρυντής (expander) μοντελοποιείται με άκαμπτα μέλη (rigid parts) τα οποία καθώς κινούνται στην ακτινική διεύθυνση, με κατάλληλες κινηματικές συνθήκες, προκαλούν διεύρυνση στο ένα άκρο του σωλήνα, καθώς το δεύτερο άκρο θεωρείται πακτωμένο. Οι συνθήκες στην διεπιφάνεια μεταξύ των άκαμπτων μελών και του κελύφους του σωλήνα, κατά την προσομοίωση της κατεργασίας, ορίζονται με τις εντολές “hard contact” για την ακτινική διεύθυνση και “frictionless” για την περιμετρική.

Λόγω της πλαστικοποίησης που υφίσταται το άκρο στο πρώτο στάδιο, είναι σαφές πως στο επόμενο βήμα ακολουθεί η αποφόρτιση του, στο τέλος της οποίας η γεωμετρία της περιοχής του “bell”, είναι αυτή που προβλέπεται από τον κανονισμό AWWA C200 (Εικόνα 3.1 και Εικόνα 4.1). Εν συνεχεία, με κατάλληλους κινηματικούς περιορισμούς τα δύο τμήματα, bell και spigot, συνδέονται με τις συγκολλήσεις με αποτέλεσμα την τελική μορφή της σύνδεσης που φαίνεται στην Εικόνα 4.4. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των συγκολλήσεων και των σωλήνων επιτυγχάνεται με τις εντολές, “rough contact” και “no separation” όσον αφορά την πλευρά του “bell” και “tie” από την πλευρά του “spigot”.

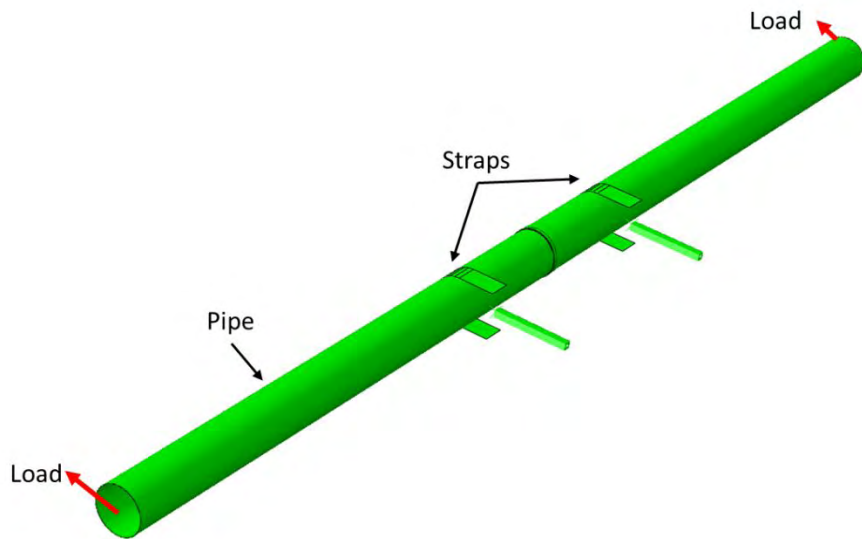


Εικόνα 4. 3: Προσομοίωση κατεργασίας διαμόρφωσης.

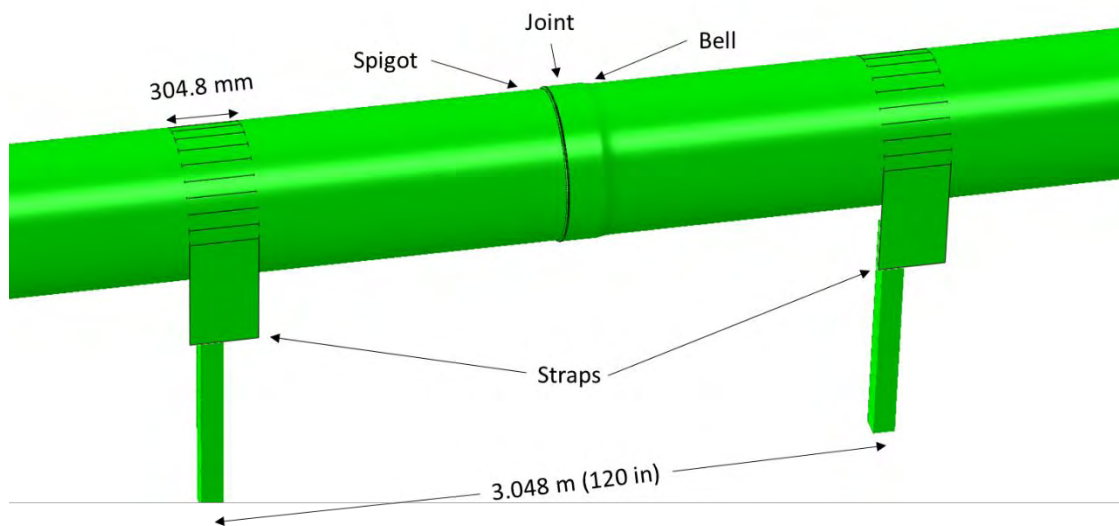


Εικόνα 4. 4: Τελική μορφή σύνδεσης σε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

Τα επόμενα στάδια της προσομοίωσης αποτελούν την εξωτερική φόρτιση με την επιβολή της εσωτερικής πίεσης να προηγείται της φόρτισης του δοκιμίου σε κάμψη. Αρχικά, αναπτύσσεται πίεση στην εσωτερική επιφάνεια του τοιχώματος του σωλήνα, της τάξεως του 40 % της πίεσης διαρροής του, η οποία διατηρείται σταθερή στο μετέπειτα στάδιο της εξωτερικής φόρτισης. Δεδομένου ότι το δοκίμιο έχει κλειστά άκρα, εισάγονται δυο «εικονικοί» κόμβοι αναφοράς (ένας σε κάθε ελεύθερο άκρο), οι οποίοι δεσμεύονται ως προς όλους τους βαθμούς ελευθερίας, με την εντολή “kinematic coupling”, από τους κόμβους που βρίσκονται στην περιφερειακή διεύθυνση των ακραίων διατομών του δοκιμίου. Στους κόμβους αναφοράς εφαρμόζεται συγκεντρωμένη δύναμη, το μέτρο της οποίας υπολογίζεται από το γινόμενο της εσωτερικής πίεσης με το εμβαδό της διατομής του σωλήνα, προσομοιώνοντας με αυτό το τρόπο την επίδραση της πίεσης στις ακραίες διατομές του σωλήνα. Επιπλέον, οι δύο αυτοί επιπλέον κόμβοι εξυπηρετούν και στην εφαρμογή του εξωτερικού φορτίου που από τους υδραυλικούς γρύλους κατά την διάρκεια της πειραματικής δοκιμής. Για την ακρίβεια, στην αριθμητική ανάλυση επιλέχθηκε ο αλγόριθμος “static - general” ή αλλιώς ανάλυση «βήμα-προς-βήμα», κατά την οποία μέσω κατάλληλων συνοριακών συνθηκών επιβάλλεται οριζόντια μετατόπιση στους δυο κόμβους αναφοράς. Λόγω των κινηματικών περιορισμών που επικρατούν στα ελεύθερα άκρα, η επιβαλλόμενη μετατόπιση μεταφέρεται στους κόμβους των ακραίων διατομών του δοκιμίου. Αντίθετα, η δύναμη που επιβάλλεται από τους γρύλους, υπολογίζεται ως η δύναμη αντίδρασης που αναπτύσσεται στους συνοριακούς κόμβους και κατ’ επέκταση στους δυο κόμβους αναφοράς. Στην Εικόνα 4.5 α, παρουσιάζεται το πλήρες μοντέλο που σχεδιάστηκε με σκοπό την προσομοίωση της κάμψης τεσσάρων σημείων (4 - point bending).



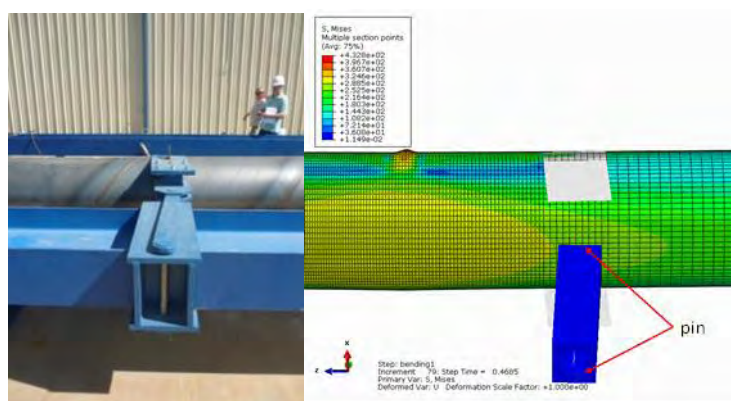
(α)



(β)

Εικόνα 4. 5: Προσομοίωση διάταξης κάμψης τεσσάρων σημείων.

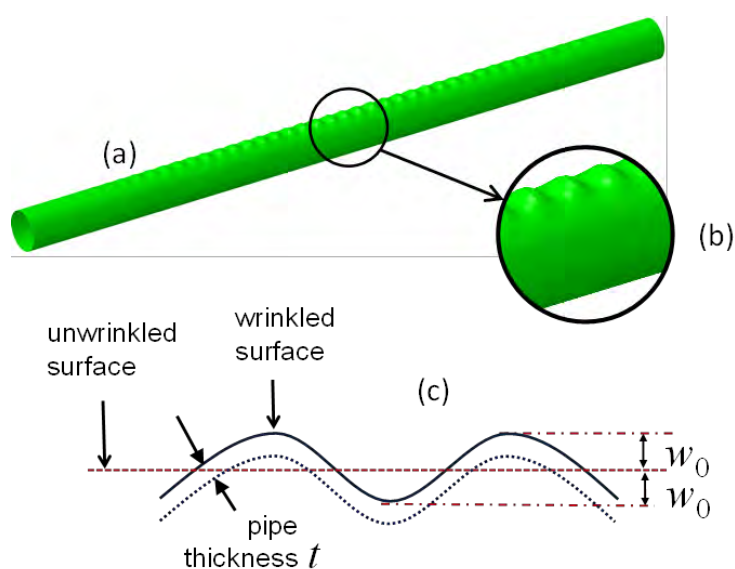
Τα μεταλλικά ελάσματα στήριξης (straps) της πειραματικής διάταξης, λαμβάνονται ως άκαμπτα μέλη (rigid parts) που βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ 3.048 m (120 in) και έχουν πλάτος 304.8 mm (12in). Η επαφή τους με την εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα πραγματοποιείται ορίζοντας έναν συντελεστή τριβής στην διεπιφάνεια τους, ίσο με 0.2, αποτρέποντας τον σωλήνα να μετατοπιστεί παράλληλα στην αξονική του διεύθυνση. Σε κάθε περίπτωση η σύνδεση επικάλυψης βρίσκεται στο μέσον την απόστασης των δυο “straps” (Εικόνα 4.5 β). Σύμφωνα με την ενότητα 3.2, επισημαίνεται πως τα μεταλλικά “straps” είναι αρθρωμένα στο πλαίσιο που απαρτίζει την πειραματική διάταξη (Εικόνα 3.7). Για να μοντελοποιηθεί ο συγκεκριμένος κινηματικός περιορισμός γίνεται χρήση στοιχείων δοκού (beam elements), εφαρμόζοντας συνθήκες άρθρωσης και στα δυο άκρα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.6. Επιπλέον, το ένα εκ των δύο άκρων των δοκών αλληλεπιδρά με το αντίστοιχο “strap” μέσω την εντολής “kinematic coupling” που εφαρμόζεται.



Εικόνα 4. 6: Μοντελοποίηση μεταλλικών στηριξεων (straps).

Η παραπάνω περιγραφή αφορά την γενική περίπτωση όπου υπάρχει διπλή συγκόλληση στην περιοχή της σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων “bell” και “spigot” του σωλήνα. Στην προσπάθεια να προσομοιωθούν οι περιπτώσεις των δοκιμών με μονή εσωτερική και μονή εξωτερική συγκόλληση, αναπτύχθηκαν αντίστοιχα μοντέλα στα οποία λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη της μίας εκ των δυο συγκολλήσεων, ανάλογα με το δοκίμιο που εξετάζεται αριθμητικά κάθε φορά. Με βάση τα παραπάνω, προσομοιώθηκαν και οι επτα δοκιμές κάμψης που επιβλήθηκαν σε σωλήνες με λόγο διάμετρο προς πάχος τοιχώματος ( $D/t$ ) ίσο με 191 και 103 που περιγράφονται στην ενότητα 3.1 και συνοψίζονται στον Πίνακα 2.

Τέλος, σημειώνεται πως στην περίπτωση του δοκιμίου 4 «plain pipe», η συμμετρία που επικρατεί στο αριθμητικό μοντέλο δεν επιτρέπει την πλήρη περιγραφή του φαινομένου του λυγισμού και της μεταλυγισμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου. Για το λόγω αυτό κρίθηκε αναγκαία η προσθήκη αρχικής γεωμετρικής ατέλειας στην επιφάνεια του σωλήνα, ώστε να αντιμετωπιστούν τυχόν προβλήματα αριθμητικής σύγκλησης του αλγόριθμου. Ύστερα από ιδιομορφική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο εξεταζόμενο δοκίμιο, με την βοήθεια του προγράμματος ABAQUS, η ατέλεια που εισάγεται ως αρχική συνθήκη στο μοντέλο, πρόκειται για κυματοειδής πτυχώσεις τοιχώματος (wrinkles), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.7. Η σχηματιζόμενη κυμάτωση στην επιφάνεια του σωλήνα αποτελείται από την πρώτη ιδιομορφή λυγισμού κανονικοποιημένη ως προς το πάχος τοιχώματος του. Στο αντίστοιχο αριθμητικό μοντέλο, η ατέλεια εφαρμόζεται τοπικά σε μια περιοχή του σωλήνα. Το πλάτος των πτυχώσεων ( $w_0$ ) επιλέγεται ίσο με το 30% του πάχους τοιχώματος ( $t$ ) και το μήκος της επιφάνειας εφαρμογής της ατέλειας, ίσο με το 50% της εξωτερικής διαμέτρου του σωλήνα. Ύστερα από δοκιμές, προέκυψε πως ο παραπάνω συνδυασμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της αρχικής ατέλειας, είναι κατάλληλος ώστε να επιτευχθεί μια ικανοποιητική προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων, τόσο στο μέγιστο φορτίο όσο και στην μορφή αστοχίας.



Εικόνα 4. 7: Γεωμετρία αρχικής ατέλειας (wrinkles).

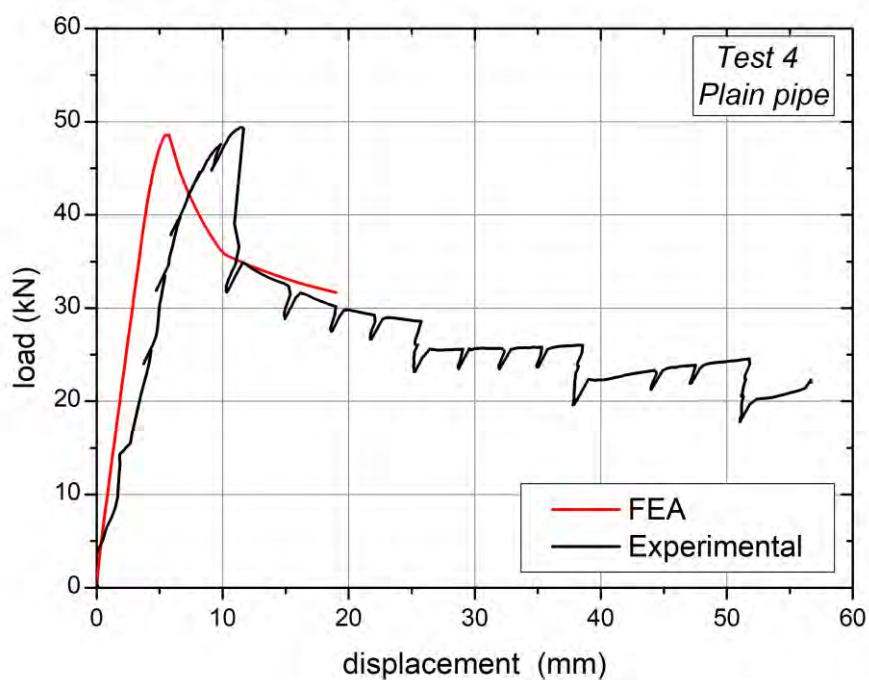


## 4.2. Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων

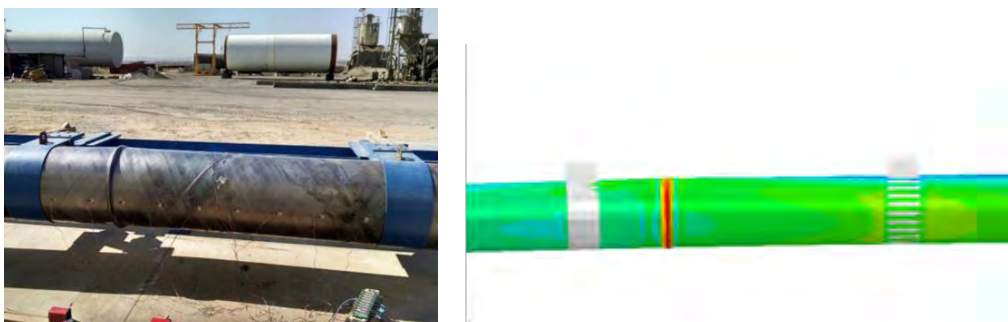
Τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες αφορούν τις δυο περιπτώσεις σωλήνων που εξετάστηκαν πειραματικά, με λόγους  $D/t = 191$  και  $D/t = 103$  καθώς και με όλους τους διαθέσιμους τρόπους σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων “bell” και “spigot”, διπλή συγκόλληση, μονή εσωτερική συγκόλληση και μονή εξωτερική συγκόλληση. Το φορτίο λαμβάνεται ως η δύναμη αντίδρασης που αναπτύσσεται στους κόμβους των ακραίων διατομών των σωλήνων, ενώ η μετατόπιση υπολογίζεται σε κόμβο που βρίσκεται στο μέσον του μήκους του μοντελοποιημένου δοκιμίου (midspan). Με βάση τα παραπάνω, υπολογίζεται ο δρόμος ισορροπίας που προκύπτει από τα αριθμητικά μοντέλα και παρουσιάζεται σε αντιπαραβολή με τις καμπύλες φορτίου – μετατόπισης που καταγράφηκαν κατά την πειραματική διαδικασία. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων συνεχίζεται σε επίπεδο τοπικών παραμορφώσεων καθώς παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων. Οι καταμετρήσεις των τοπικών παραμορφώσεων γίνεται στα σημεία ολοκλήρωσης (integration points) των στοιχείων που βρίσκονται στην περιοχή των συγκολλητών συνδέσεων και η ακριβής θέση τους ορίζεται σύμφωνα με τις διατάξεις των strain gauges που χρησιμοποιήθηκαν στις αντίστοιχες πειραματικές δοκιμές. Καθώς το τελευταίο κριτήριο σύγκρισης είναι η περιοχή αστοχίας των δοκιμίων, επισημαίνεται πως το σημείο λυγισμού (buckling), εξαρτάται άμεσα από τις γεωμετρικές ατέλειες που επικρατούν στην εξωτερική επιφάνεια του τοιχώματος των σωλήνων. Στις περιπτώσεις των δοκιμίων που εξετάζονται, η ύπαρξη διαμόρφωσης του άκρο του σωλήνα, σε μορφή καμπάνας (bell), αποτελεί αρχική γεωμετρική ατέλεια καθώς και σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα όταν το δοκίμιο φορτίζεται σε κάμψη, στην θλιπτική περιοχή και κοντά στη διαμόρφωση του “bell”, συχνά, αναπτύσσονται μεγάλες παραμορφώσεις ικανές ώστε να προκαλέσουν την αστοχία του σωλήνα στην περιοχή της σύνδεσης.

#### 4.2.1. Δοκίμια με λόγο $D/t = 191$

Για την περίπτωση του πειράματος όπου ο σωλήνας δεν περιλαμβάνει συγκολλητή σύνδεση (δοκίμιο 4), η σύγκριση των αποτελεσμάτων εστιάζεται στις καμπύλες φορτίου – μετατόπισης (Εικόνα 4.8) και στην μορφή αστοχίας (Εικόνα 4.9). Υπενθυμίζεται πως στο αντίστοιχο αριθμητικό μοντέλο συμπεριλαμβάνεται τοπική γεωμετρική ατέλεια της τάξεως του 30% του πάχους τοιχώματος του σωλήνα, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 4.1.

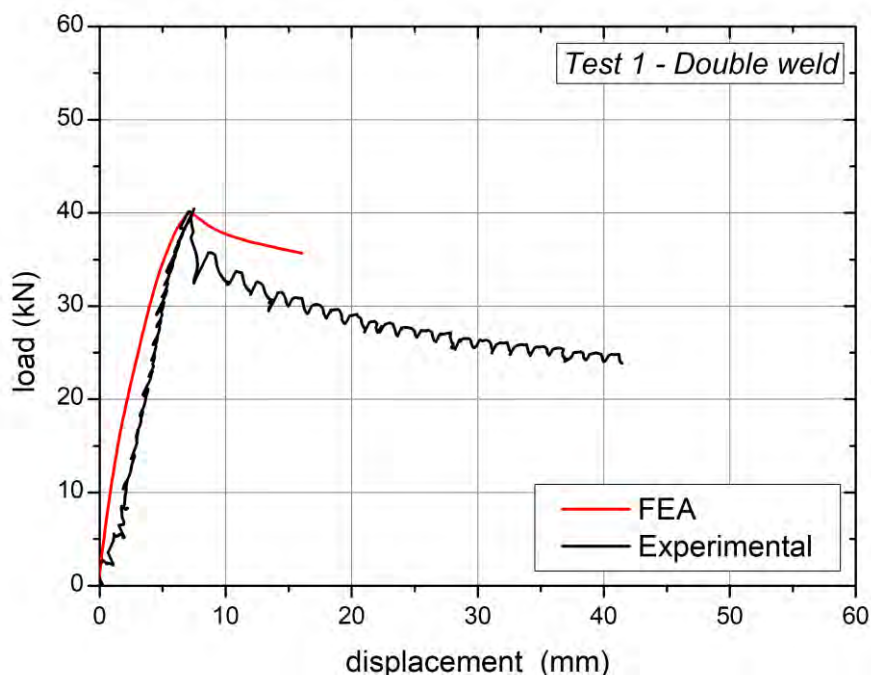


Εικόνα 4. 8: Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ( $D/t = 191$ , χωρίς συγκολλητή σύνδεση).



Εικόνα 4. 9: Μορφή αστοχίας ( $D/t = 191$ , χωρίς συγκολλητή σύνδεση).

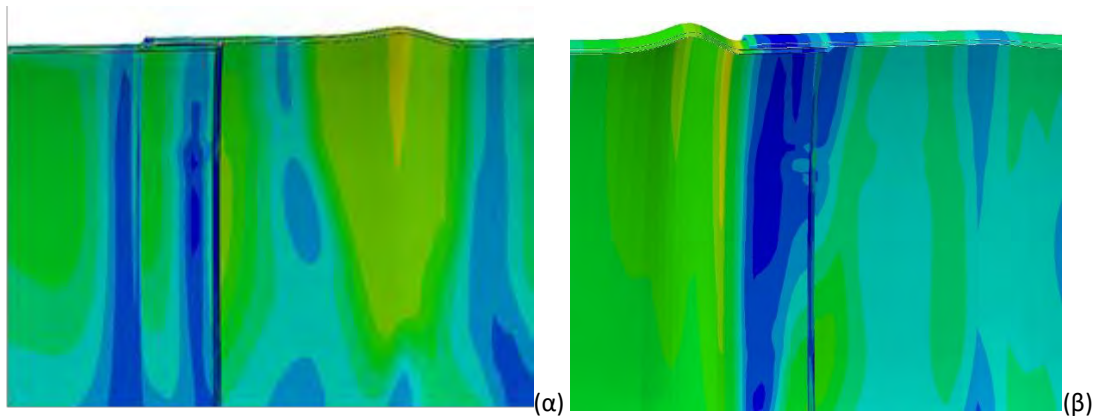
Στην συνέχεια δίνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα από τα δοκίμια που περιλαμβάνουν συγκολλήσεις στην περιοχή της σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων “bell” και “spigot”. Στην Εικόνα 4.10 παρουσιάζεται η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το δοκίμιο 1 με την διπλή συγκόλληση, σε αντιστοιχία με τον δρόμο ισορροπίας, όπως προκύπτει από το αριθμητικό μοντέλο.



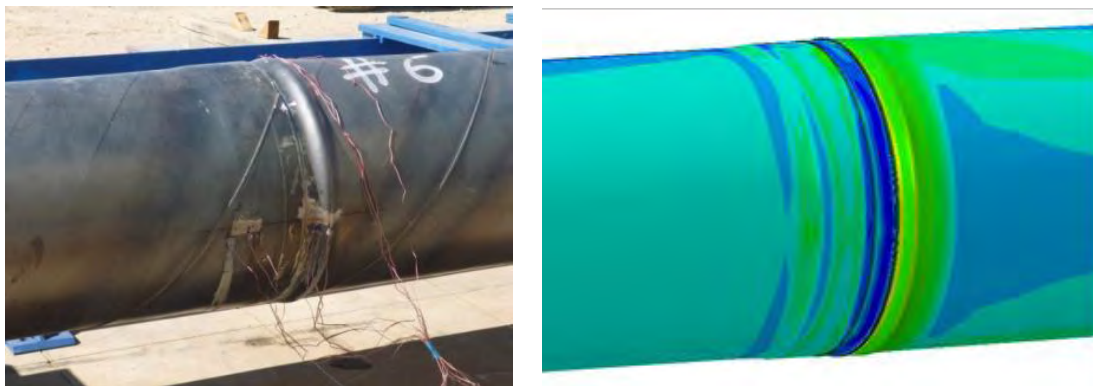
Εικόνα 4. 10: Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ( $D/t = 191$ , διπλή συγκόλληση).

Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως τα πρώτα αποτελέσματα από την προσομοίωση του δοκιμίου 1 ( $D/t = 191$ , διπλή συγκόλληση), έδειξαν πως η αστοχία πραγματοποιείται στην πλευρά του “bell” (Εικόνα 4.11 α), επιβεβαιώνοντας τον παραπάνω ισχυρισμό όσον αφορά την επιρροή των γεωμετρικών ατελειών στην αστοχία καμπτόμενων σωλήνων. Για να επιτευχθεί η μορφή αστοχίας που προέκυψε από την πειραματική δοκιμή, τοποθετήθηκε αρχική γεωμετρική ατέλεια στην επιφάνεια του “spigot” της τάξεως του 33% του πάχους τοιχώματος. Η ατέλεια εφαρμόζεται τοπικά σε μια περιοχή μήκους 50.8 mm, που απέχει μόλις 5 mm από τον πόδα της εξωτερικής συγκόλλησης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.11 β, η γεωμετρία της ατέλειας που χρησιμοποιήθηκε, κρίθηκε ικανή ώστε η αστοχία του δοκιμίου να μεταφερθεί στην πλευρά του “spigot”.

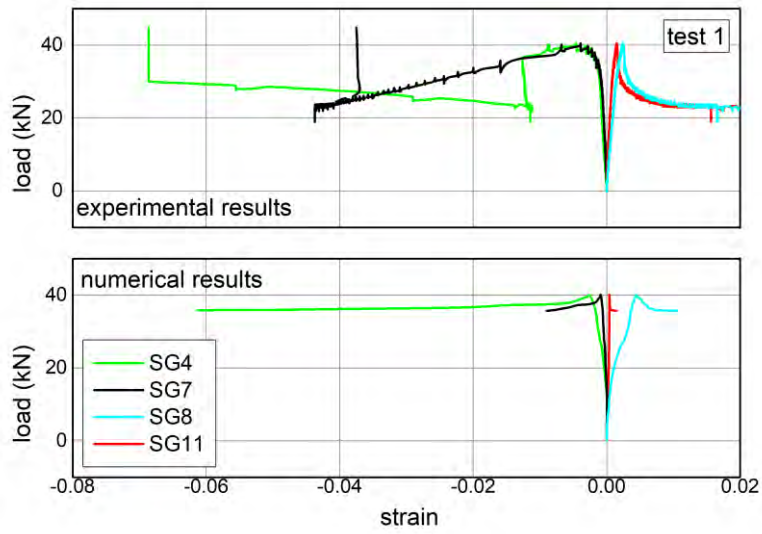
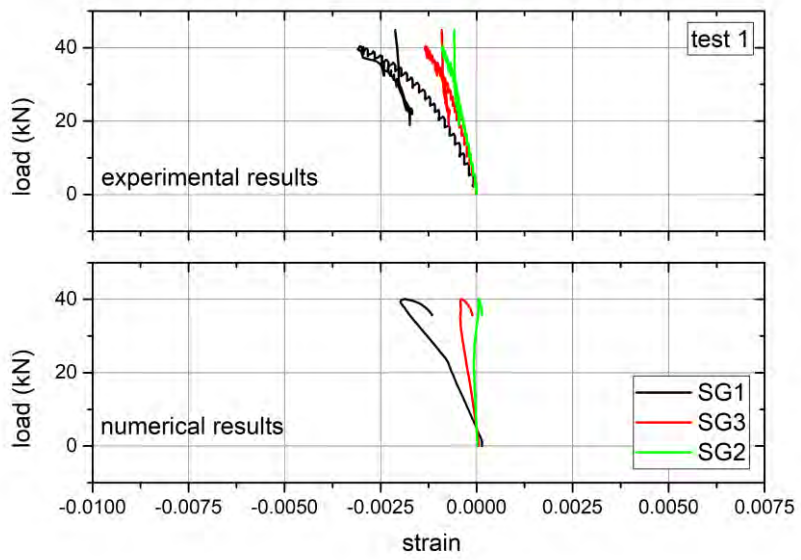
Η αριθμητική καμπύλη στο διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης (Εικόνα 4.10), προκύπτει με βάση το μοντέλο στο οποίο εισήχθη η γεωμετρική ατέλεια, ωστόσο παρατηρείται καλή προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων, τόσο στο μέγιστο φορτίο όσο και στην αρχική κλίση της καμπύλης. Η τελική μορφή αστοχίας σύμφωνα με το αριθμητικό μοντέλο παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.12, ενώ στην Εικόνα 4.13 δίνονται τα διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων.



Εικόνα 4. 11: Μορφές αστοχίας α) Χωρίς αρχική ατέλεια, β) Με αρχική ατέλεια ( $D/t = 191$ , διπλή συγκόλληση).

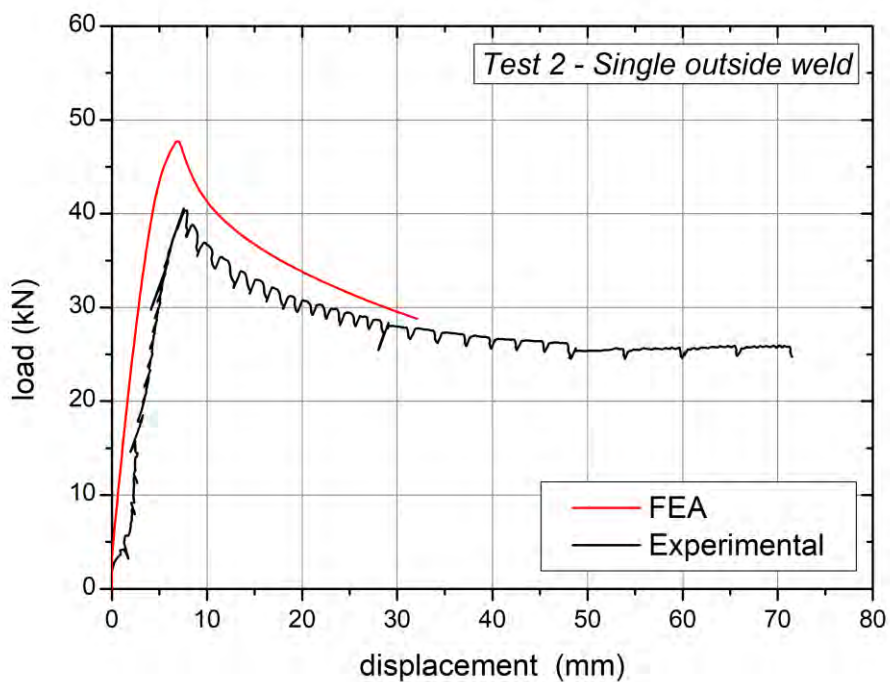


Εικόνα 4. 12: Μορφή αστοχίας ( $D/t = 191$ , διπλή συγκόλληση).



Εικόνα 4. 13: Διαγράμματα φορτίου - παραμορφώσεων ( $D/t = 191$ , διπλή συγκόλληση).

Στην Εικόνα 4.14, ακολουθεί η σύγκριση των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης για την περίπτωση του σωλήνα με λόγο  $D/t = 191$  και μονή εξωτερική συγκόλληση. Σε αυτή τη περίπτωση και πάλι στο αριθμητικό μοντέλο εισάγεται αρχική γεωμετρική ατέλεια στην επιφάνεια του “spigot” ώστε να προκύψει η μορφή αστοχίας της Εικόνα 4.15 (αστοχία στην πλευρά του “spigot”). Η ατέλεια εφαρμόζεται τοπικά σε μια περιοχή μήκους 25.4 mm και ακριβώς δίπλα από τον πόδα της συγκόλλησης, ενώ το μέγεθος της ανέρχεται στο 33% του πάχους τοιχώματος του σωλήνα. Τα συγκριτικά διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων δίνονται στην Εικόνα 4.16.

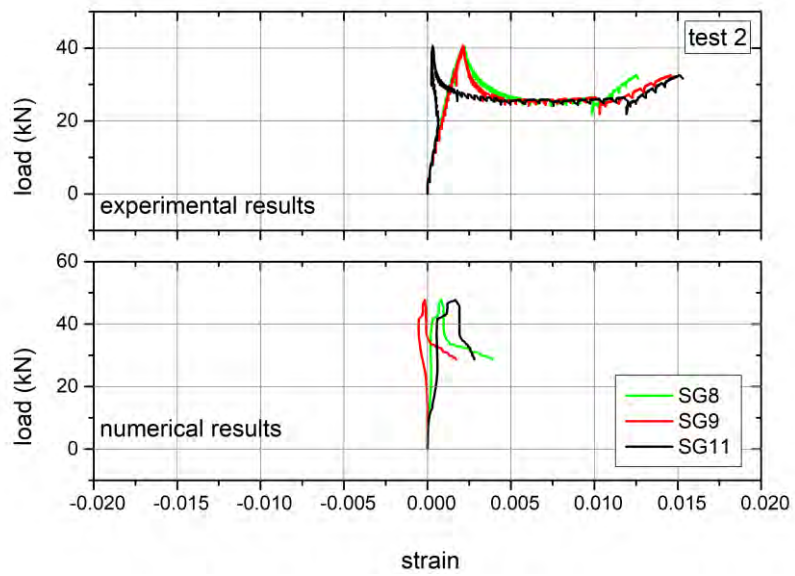
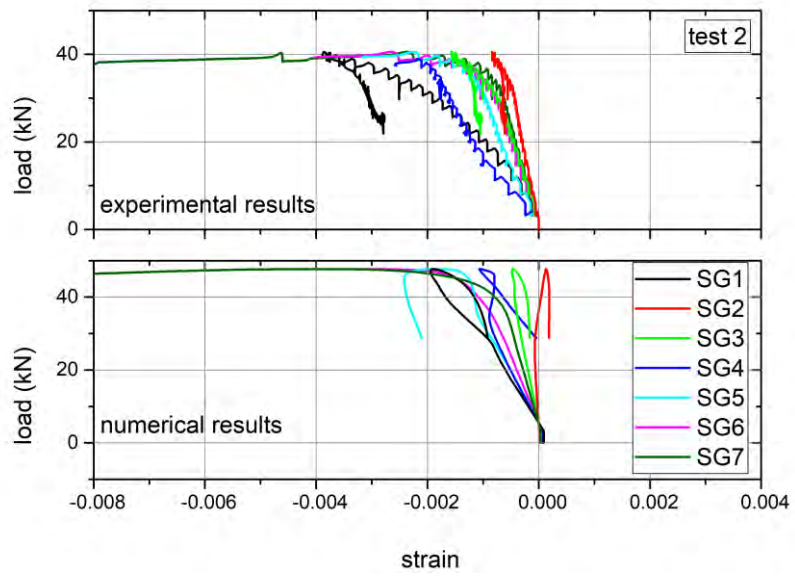


Εικόνα 4. 14: Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ( $D/t = 191$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).



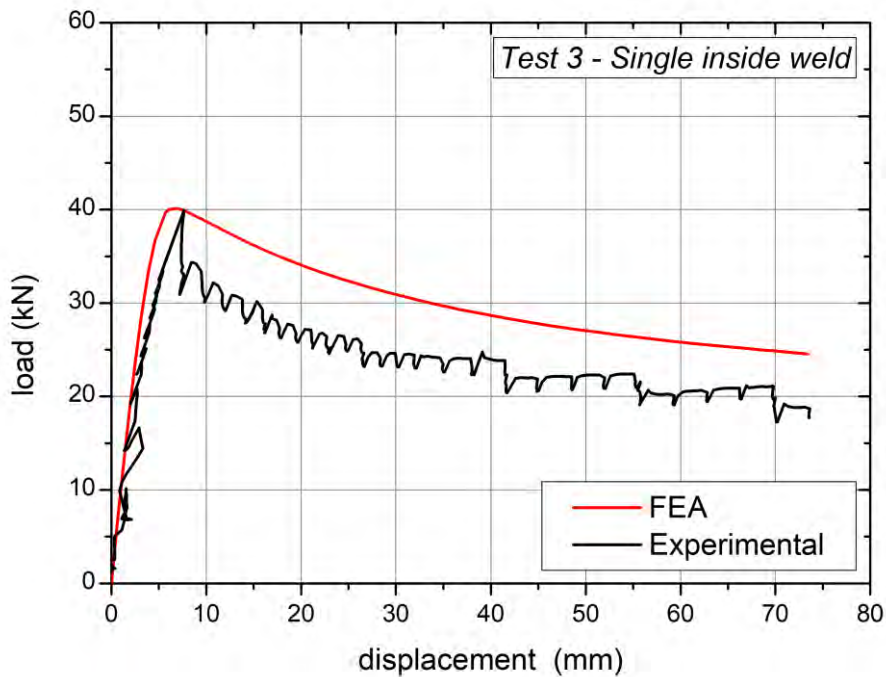
Εικόνα 4. 15: Μορφή αστοχίας ( $D/t = 191$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).



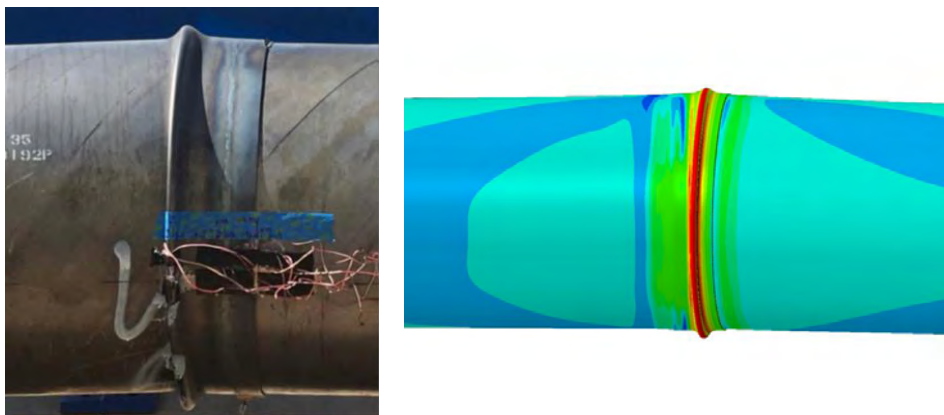


Εικόνα 4. 16: Διαγράμματα φορτίου - παραμορφώσεων ( $D/t = 191$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).

Η τελευταία περίπτωση που εξετάστηκε αριθμητικά για σωλήνες με λόγο  $D/t = 191$ , αφορά το δοκίμιο 3, με μονή εσωτερική συγκόλληση. Στην Εικόνα 4.17 δίνονται οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης, ενώ στην Εικόνα 4.18, παρατηρείται πως στο αριθμητικό μοντέλο η αστοχία εκδηλώθηκε στη πλευρά του “bell”, όπως και κατά την πειραματική δοκιμή. Στην Εικόνα 4.19, ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων.

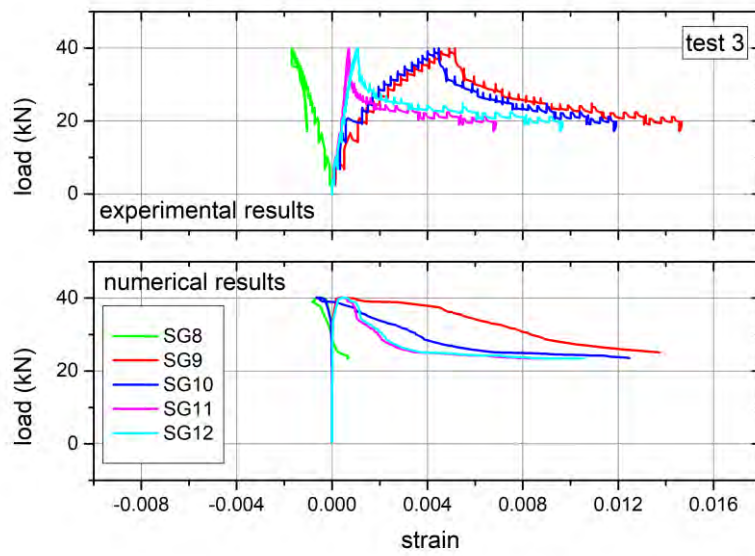
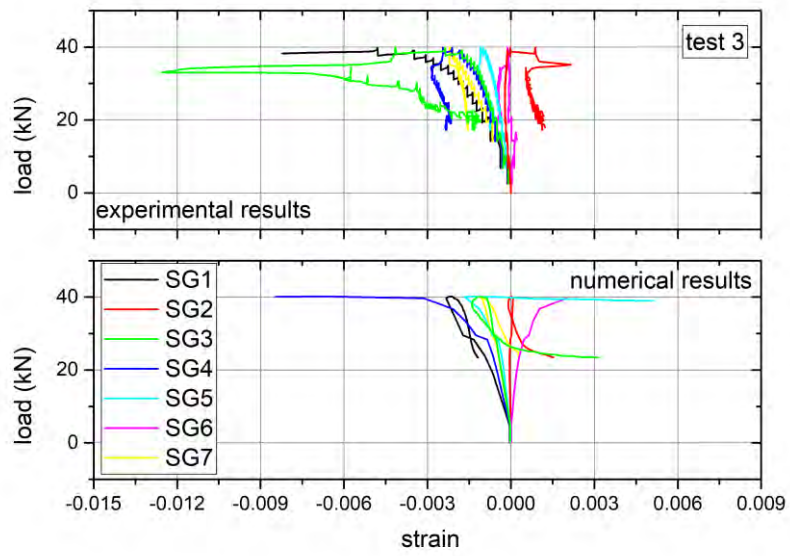


Εικόνα 4. 17: Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης ( $D/t = 191$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).



Εικόνα 4. 18: Μορφή αστοχίας ( $D/t = 191$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).

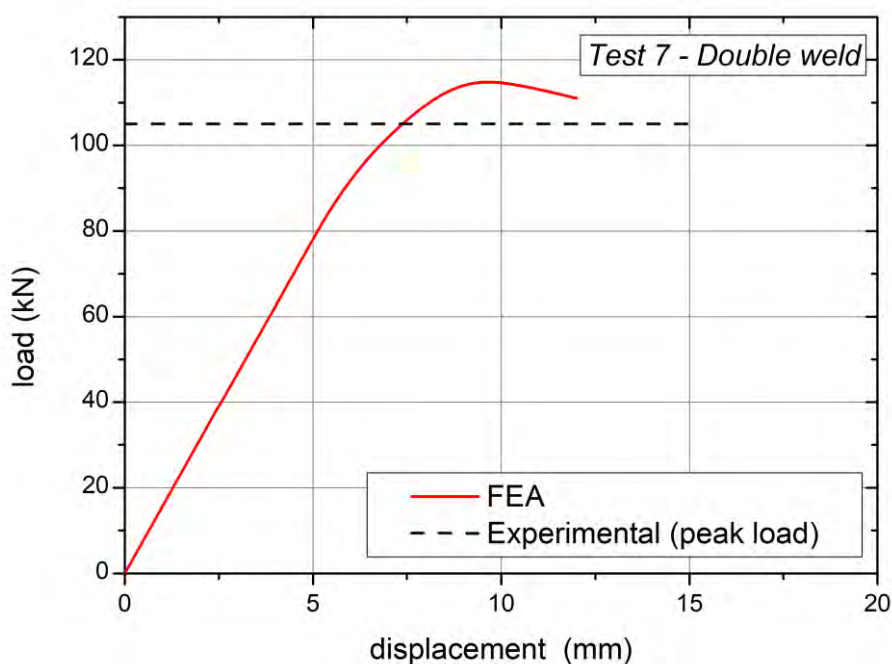




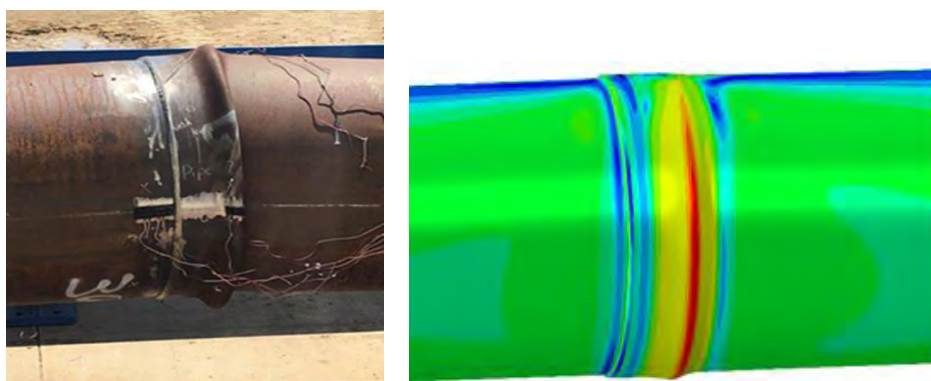
Εικόνα 4. 19: Διαγράμματα φορτίου - παραμορφώσεων ( $D/t = 191$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).

#### 4.2.2. Δοκίμια με λόγο $D/t = 103$

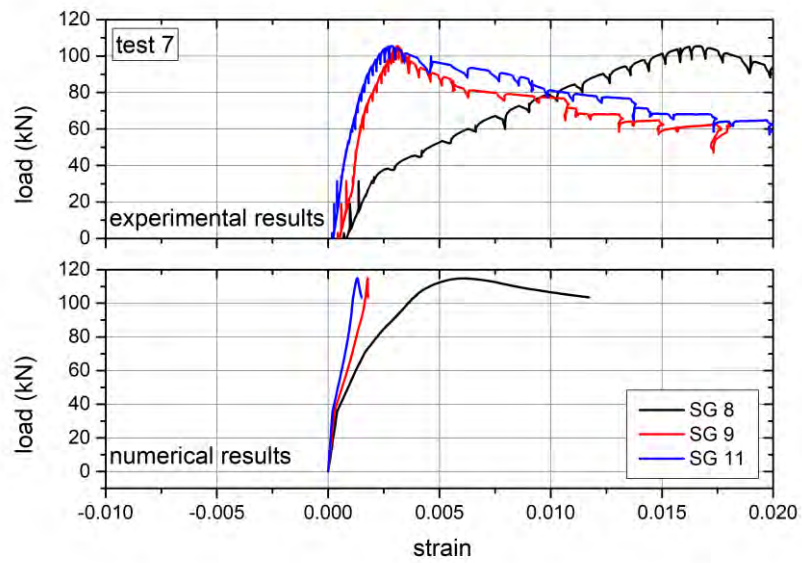
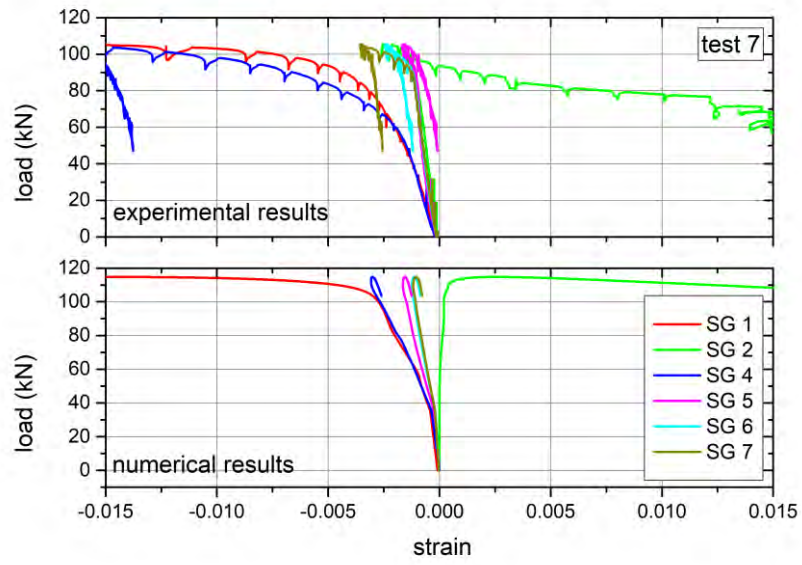
Αντίστοιχα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκαν με σκοπό την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφορά των δοκιμίων με λόγο  $D/t = 103$ , στις ίδιες συνθήκες φόρτισης. Στην Εικόνα 4.20, καταγράφεται ο δρόμος ισορροπίας για το δοκίμιο 7 με την διπλή συγκόλληση στην περιοχή της σύνδεσης επικάλυψης μεταξύ των τμημάτων “bell” και “spigot”. Στην Εικόνα 4.21 παρουσιάζεται η μορφή αστοχίας, που και στις δυο περιπτώσεις συμβαίνει στην πλευρά του “bell”, ενώ στην Εικόνα 4.22 δίνονται τα διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων.



Εικόνα 4. 20: Καμπύλη φορτίου - μετατόπισης ( $D/t = 103$ , διπλή συγκόλληση).

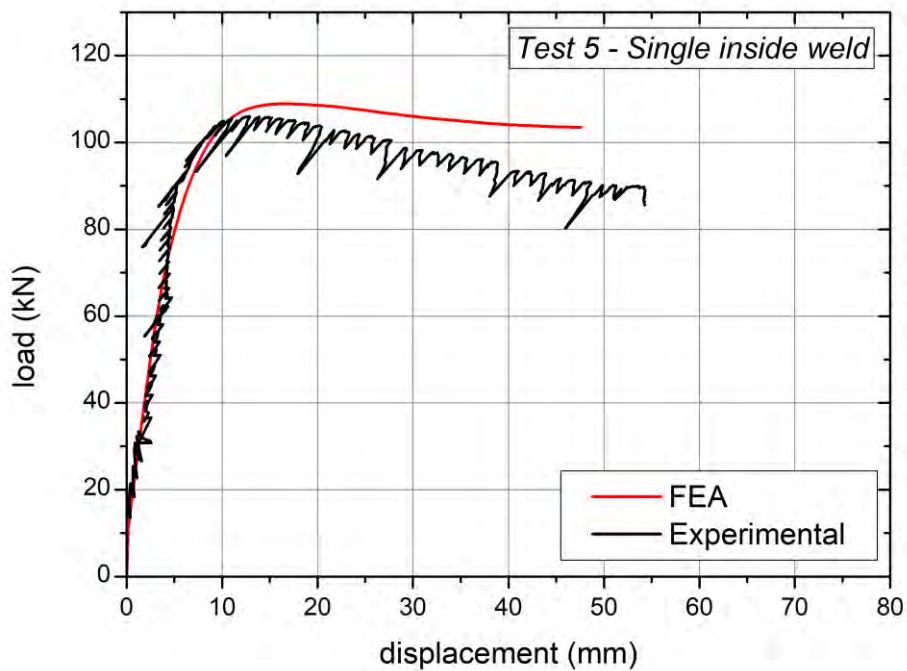


Εικόνα 4. 21: Μορφή αστοχίας ( $D/t = 103$ , διπλή συγκόλληση).

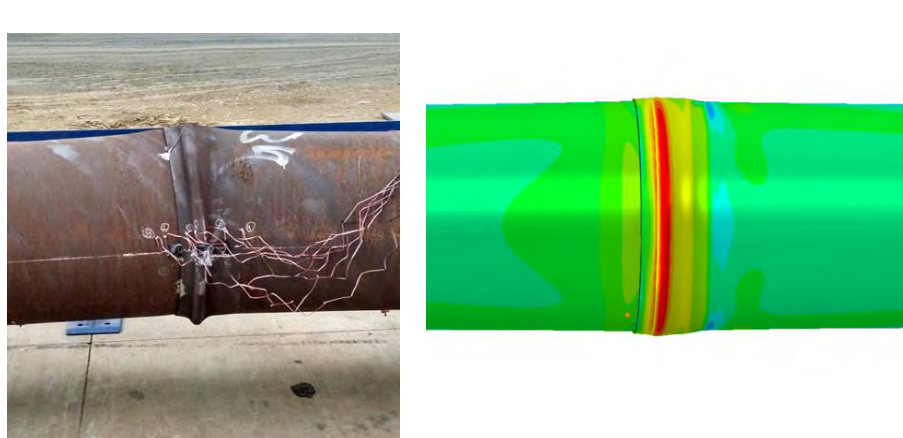


Εικόνα 4. 22: Διαγράμματα φορτίου - παραμορφώσεων ( $D/t = 103$ , διπλή συγκόλληση).

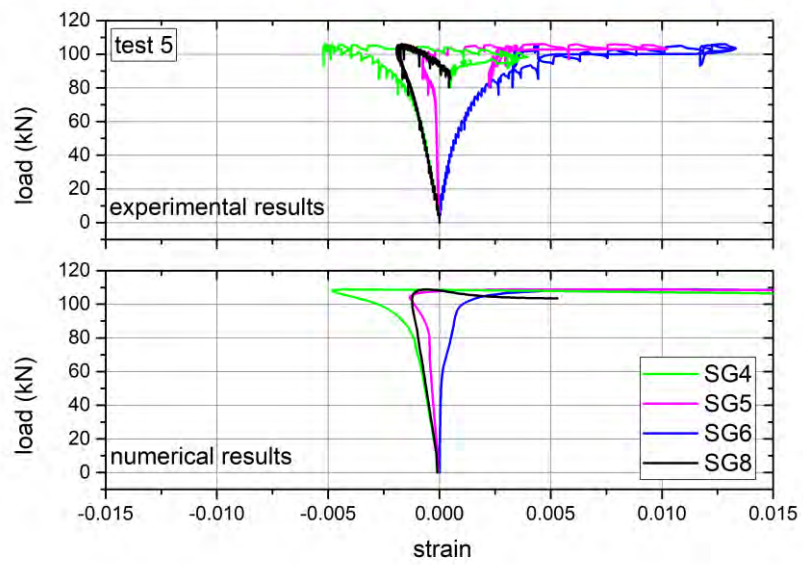
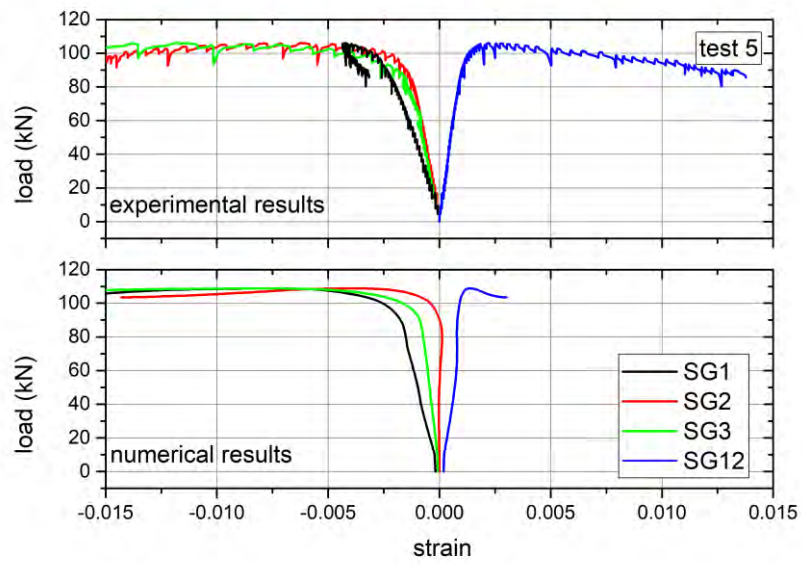
Ακολουθως, στην Εικόνα 4.23 παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για την δοκιμή 5 όπου το δοκίμιο περιλαμβάνει μόνο εσωτερική συγκόλληση στην περιοχή της σύνδεσης. Στην Εικόνα 4.24, φαίνεται η μορφή αστοχίας η οποία τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά, εκδηλώθηκε στην πλευρά του “bell”, καθώς στην Εικόνα 4.25 δίνονται τα διαγράμματα φορτίου – παραμόρφωσης.



Εικόνα 4. 23: Καμπύλη φορτίου - μετατόπισης ( $D/t = 103$ ,μονή εσωτερική συγκόλληση συγκόλληση).



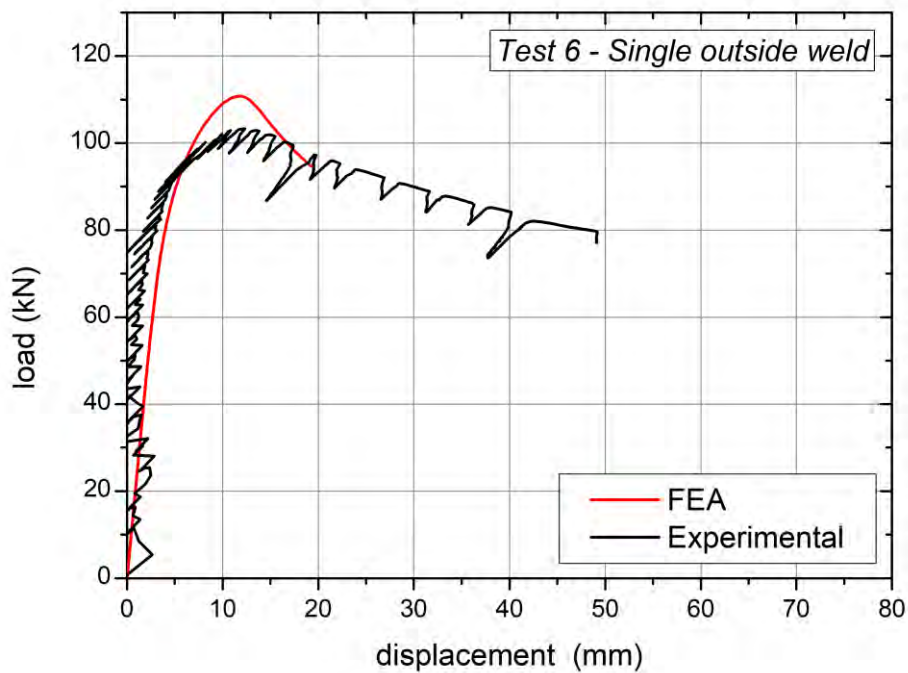
Εικόνα 4. 24: Μορφή αστοχίας ( $D/t = 103$ ,μονή εσωτερική συγκόλληση).



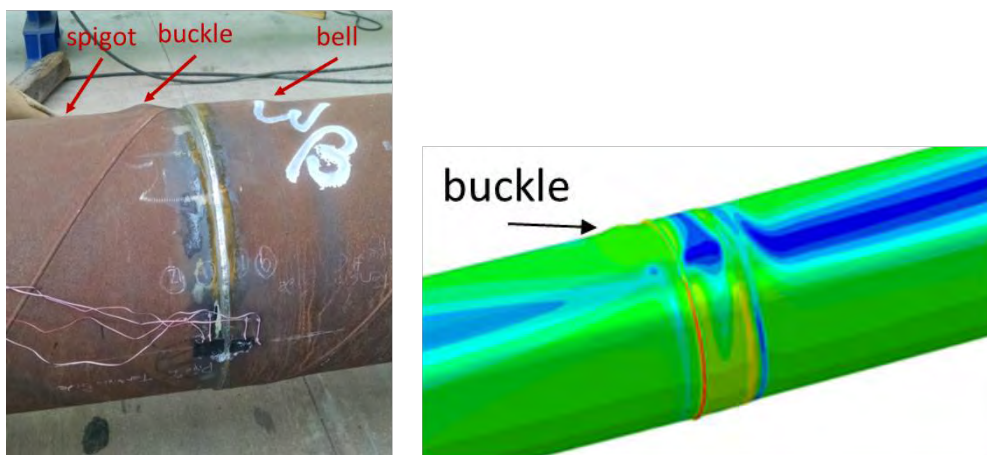
Εικόνα 4. 25: Διαγράμματα φορτίου - παραμορφώσεων ( $D/t = 103$ , μονή εσωτερική συγκόλληση).



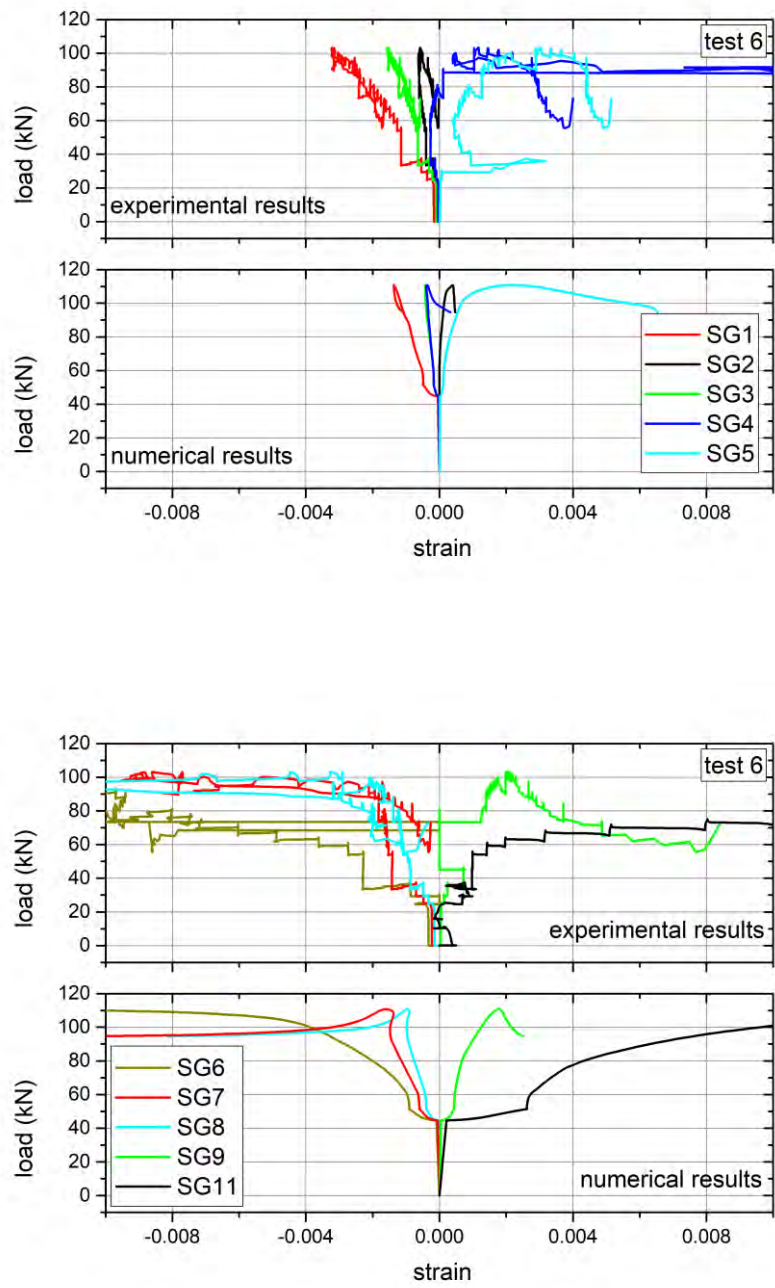
Η τελευταία περίπτωση που εξετάστηκε αριθμητικά, αφορά το δοκίμιο 6 με την μονή εξωτερική συγκόλληση. Οι αντίστοιχες καμπύλες φορτίου – μετατόπισης φαίνονται στην Εικόνα 4.26, ενώ η μορφή αστοχίας και τα διαγράμματα φορτίου – παραμορφώσεων παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.27 και Εικόνα 4.28. Το γεγονός ότι η αστοχία πραγματοποιήθηκε στην πλευρά του “spigot”, συνεπάγεται με την προσθήκη αρχικής γεωμετρικής ατέλειας τύπου κυματοειδών πτυχώσεων (wrinkles), όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.1. Η ατέλεια είναι της τάξεων του 5% του πάχους τοιχώματος του εξεταζόμενου σωλήνα και εφαρμόζεται στο τμήμα του “spigot”.



Εικόνα 4. 26: Καμπύλη φορτίου - μετατόπισης ( $D/t = 103$ ,μονή εξωτερική συγκόλληση συγκόλληση).



Εικόνα 4. 27: Μορφή αστοχίας ( $D/t = 103$ ,μονή εξωτερική συγκόλληση).



Εικόνα 4. 28: Διαγράμματα φορτίου - παραμορφώσεων ( $D/t = 103$ , μονή εξωτερική συγκόλληση).

### 4.2.3. Σύνοψη αποτελεσμάτων

Συνοψίζοντας τα συγκριτικά αποτελέσματα στον Πίνακα 4 ως προς το μέγιστο φορτίο λυγισμού και την περιοχή της αστοχίας, είναι σαφές πως η ύπαρξη γεωμετρικών ατελειών στους αγωγούς, επηρεάζει άμεσα τη μηχανική τους συμπεριφορά. Αντίστοιχα, η μοντελοποίηση των αρχικών ατελειών αποτελεί ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα που τίθεται προς διερεύνηση.

Πείραμα	Τύπος σύνδεσης	Περιοχή αστοχίας	Μέγιστο φορτίο (kN) - Πειραματικά	Μέγιστο φορτίο (kN) – Αριθμητικά
1	Διπλή συγκόλληση	Spigot (*)	40	40
2	Μονή εξωτερική συγκόλληση	Spigot (*)	41	47.7
3	Μονή εσωτερική συγκόλληση	bell	40	41.3
4	Χωρίς σύνδεση	700 mm από το κέντρο (*)	49	48.5
5	Μονή εσωτερική συγκόλληση	bell	107	108.8
6	Μονή εξωτερική συγκόλληση	Spigot (*)	104	110.7
7	Διπλή συγκόλληση	bell	105	114.7

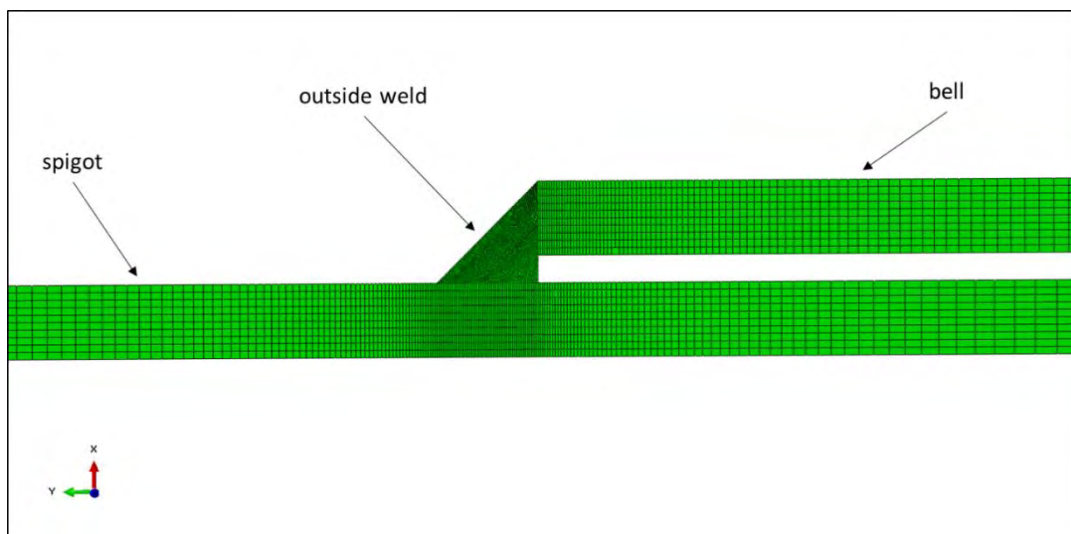
(\*) Στα αριθμητικά μοντέλα συμπεριλαμβάνεται αρχική γεωμετρική ατέλεια.

Πίνακας 4: Συγκριτικά αποτελέσματα.



### 4.3. Εκτίμηση παραμενουσών τάσεων από τη διαδικασία συγκόλλησης

Όπως έχει αναφερθεί και στην προηγούμενη ενότητα, η μηχανική συμπεριφορά των συγκολλητών συνδέσεων καθορίζεται άμεσα από την παρουσία γεωμετρικών ατελειών στο τοίχωμα τους. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την συμπεριφορά τους, είναι οι παραμενουσες τάσεις, που αναπτύσσονται από τις κατεργασίες κατασκευής και τις συγκολλήσεις που εφαρμόζονται στους αγωγούς. Καθώς τα ζητήματα προσομοίωσης των αρχικών ατελειών και παραμενουσών τάσεων μέσω αριθμητικών μοντέλων, επιζητούν εκτενή διερεύνηση, το τελευταίο θέμα με το οποίο πραγματεύεται η παρούσα εργασία είναι μια πρώτη εκτίμηση των παραμενουσών τάσεων, που αναπτύσσονται σε αγωγούς που φέρουν συγκολλητές συνδέσεις επικάλυψης. Για τον λόγο αυτό, αναπτύχθηκε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να επιλυθεί το θερμομηχανικό πρόβλημα των συγκολλήσεων. Το αριθμητικό μοντέλο βασίζεται στο πρόγραμμα ABAQUS και τον αλγόριθμο DFLUX, με σκοπό την προσομοίωση των μεταβατικών συνθηκών μεταφοράς θερμότητας, που επικρατούν κατά την διάρκεια την συγκόλλησης. Ωστόσο για λόγους αποφυγής του υψηλού υπολογιστικού κόστους στις αναλύσεις, χρησιμοποιείται αξονοσυμμετρικό μοντέλο δυο διαστάσεων με τετρακομβικά στοιχεία τύπου “solid, coupled temperature-displacement”, που είναι ικανά να περιγράψουν προβλήματα μετάδοσης θερμότητας. Το μοντέλο που σχεδιάστηκε (Εικόνα 4.29), εστιάζεται στην επίλυση του προβλήματος για δοκίμιο 2 με λόγο  $D/t = 191$  και μονή εξωτερική συγκόλληση (Πίνακας 1), ενώ οι συνθήκες συγκόλλησης ελήφθησαν από το αντίστοιχο έγγραφο προσδιορισμού της διαδικασίας συγκόλλησης (WPS) και συνοψίζονται στον Πίνακα 5.



Εικόνα 4. 29: Αξονοσυμμετρικό μοντέλο επίλυσης θερμομηχανικού προβλήματος.

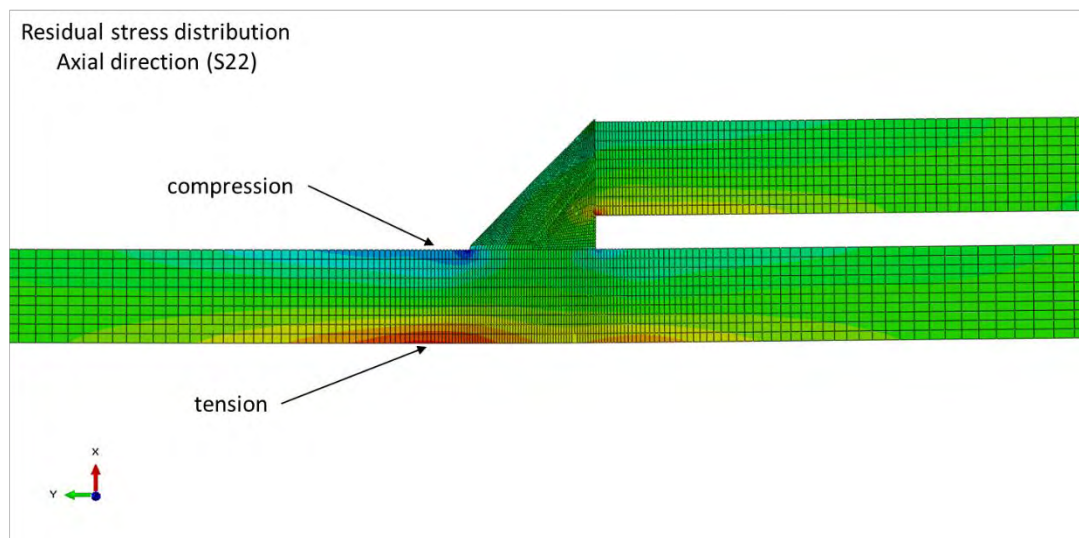
Τάση ρεύματος	Ένταση ρεύματος	Ρυθμός εισαγωγής θερμότητας	Ταχύτητα συγκόλλησης	Αριθμός πάσων
26 Volts	190 Amperes	1458.6 J/mm (37050 J/in)	203.2 mm/min (8 in/min)	2

Πίνακας 5: Συνθήκες συγκόλλησης.

Η μέθοδος συγκόλλησης που εφαρμόστηκε στις συνδέσεις επικάλυψης μεταξύ των τμημάτων “bell” και “spigot” είναι FCAW (Flux-cored arc welding) με ηλεκτρόδιο τύπου E71T-1 και μηχανικές ιδιότητες όπως αναγράφονται στον Πίνακα 3 (Ενότητα 4.1). Επιπλέον, στο μοντέλο εισάγονται οι θερμικές ιδιότητες (Πίνακα 6) για τον χάλυβα καθώς λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα απώλειας θερμότητας μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας που επικρατούν τόσο κατά την διάρκεια της συγκόλλησης, όσο και κατά την περίοδο ψύξης μετά την εφαρμογή κάθε πάσου. Το όριο διαρροής του υλικού στους 1200°C λαμβάνεται στα 15 MPa. Στην παρούσα μελέτη, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων περιορίζεται σε ποιοτικό επίπεδο, λόγω της έλλειψης κάποιων παραμέτρων από την διαδικασία της συγκόλλησης που εφαρμόστηκε στα δοκίμια. Στην Εικόνα 4.30, ακολουθεί η κατανομή των παραμενουσών τάσεων στην διεύθυνση κατά το μήκος του σωλήνα που προκύπτει μετά την ανάλυση.

Temperature (°C)	Specific heat (J/kg °C)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Elastic module (GPa)	Conductivity (W/m°C)	Thermal expansion (1/°C)
20	423	7.81	210	54.42	1.10 x10 <sup>-5</sup>
100	473	7.79	207	54.01	1.15 x10 <sup>-5</sup>
200	536	7.77	204	52.75	1.22 x10 <sup>-5</sup>
400	662	7.72	187.5	47.71	1.35 x10 <sup>-5</sup>
800	914	7.61	118.6	27.55	1.48 x10 <sup>-5</sup>
1200	1160	7.50	39.5	40.00	1.34 x10 <sup>-5</sup>

Πίνακας 6: Θερμικές Ιδιότητες.



Εικόνα 4. 30: Κατανομή παραμενουσών τάσεων (αξονική διεύθυνση).

Με βάση την παραπάνω κατανομή των παραμενουσών τάσεων, που διαμορφώνεται μετά το στάδιο ψύξης από την εφαρμογή του δεύτερου πάσου, προκύπτει πως στην πλευρά του “spigot” και στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα, αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις. Παράλληλα, στην εξωτερική επιφάνεια και κοντά στην περιοχή της συγκόλλησης οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι θλιπτικές. Σύμφωνα με την πειραματική δοκιμή για την περίπτωση που εξετάζεται ( $D/t = 191$ , μονή εξωτερική συγκόλληση), η αστοχία λόγω λυγισμού εκδηλώθηκε στην πλευρά του “spigot” και στην γειτονία της συγκόλλησης. Σε αντιστοιχία με το μοντέλο της Εικόνα 4.30 η αστοχία συνέβη σε περιοχή όπου επικρατούν θλιπτικές παραμένουσες τάσεις εξ αιτίας της συγκόλλησης. Δεδομένου ότι οι θλιπτικές παραμένουσες τάσεις μειώνουν την αντοχή των κατασκευών σε λυγισμό, τίθεται προς διερεύνηση το ζήτημα αν οι τάσεις αυτές επηρεάζουν την μηχανική συμπεριφορά των αγωγών όταν υποβάλλονται σε καμπτικές φορτίσεις. Συγκεκριμένα, ως μετέπειτα στάδιο ενασχόλησης με την προσομοίωση της διαδικασίας της συγκόλλησης, προτείνεται η συμπερίληψη των παραμενουσών τάσεων σε τρισδιάστατα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των συνδέσεων επικάλυψης. Ο σκοπός της διερεύνησης εστιάζει σε τι βαθμό οι παραμένουσες τάσεις, που προκύπτουν από τις συγκολλήσεις, καθορίζουν την περιοχή λυγισμού, σε αντιστοιχία με τις αρχικές γεωμετρικές ατέλειες των αγωγών, όταν υπόκεινται σε κάμψη.

## 5. Συμπεράσματα

Από την πειραματική και αριθμητική μελέτη που διεξήχθη και παρουσιάζεται στα προηγούμενα κεφάλαια προκύπτουν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα για την μηχανική συμπεριφορά των χερσαίων αγωγών ύδατος που φέρουν συγκολλητές συνδέσεις επικάλυψης και φορτίζονται σε κάμψη υπό εσωτερική πίεση.

Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια με τις εν λόγω συνδέσεις και με λόγο διάμετρο-προς-πάχος ( $D/t$ ) ίσο με 191 και 103, συμπεραίνεται πως οι αγωγοί με συνδέσεις επικάλυψης έχουν την ικανότητα να υποστούν μεγάλες παραμορφώσεις χωρίς να τίθεται κίνδυνος απώλειας του περιεχομένου τους. Σε μερικά δοκίμια οι μετρήσεις τοπικών παραμορφώσεων, έδειξαν πως οι αξονικές παραμορφώσεις, στο εφελκυστικό τμήμα, υπερέβησαν το 2 % χωρίς να σημειωθεί καμία απώλεια ύδατος από το εσωτερικό τους και καμία ρηγμάτωση του τοιχώματος. Εστιάζονται στις δοκιμές των σωλήνων με λόγο διάμετρο-προς-πάχος ( $D/t$ ) ίσο με 191, όπου εξετάζεται και η περίπτωση του «επίπεδου» σωλήνα, καθίσταται σαφές πως η ύπαρξη συγκολλητής σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων “bell” και “spigot”, συνοδεύεται με μείωση της αντοχής των αγωγών σε λυγισμό. Ωστόσο, βάση των διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης, και τα τέσσερα δοκίμια παρουσιάζουν παρόμοια δυσκαμψία αλλά και μεταλυγισμική συμπεριφορά. Επιπλέον, το γεγονός πως η αστοχία εκδηλώνεται άλλοτε στην περιοχή του “bell” και άλλοτε στο “spigot” υποδηλώνει πως το φαινόμενο του λυγισμού εξαρτάται άμεσα από τις ατέλειες του υλικού, τις γεωμετρικές ατέλειες του αγωγού αλλά και τις επιδράσεις που, ενδεχομένως, έχει η εφαρμογή της συγκόλλησης επικάλυψης στον αγωγό, σε επίπεδο παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, βρίσκονται σε συμφωνία με τα αντίστοιχα πειραματικά, τόσο σε όρους φορτίου – μετατόπισης όσο και σε επίπεδο τοπικών παραμορφώσεων. Επίσης, μέσω των αριθμητικών μοντέλων, επιβεβαιώνεται πως τέτοιοι αγωγοί μπορούν να δεχθούν μεγάλες παραμορφώσεις και μετά την εκδήλωση τοπικού λυγισμού στο τοίχωμα τους, καθώς κάμπτονται. Ολοκληρώνοντας την πειραματική και αριθμητική διερεύνηση της συμπεριφοράς αγωγών ύδατος με συνδέσεις επικάλυψης, καθίσταται ασφαλής η εγκατάστασή τους σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα, όπου αναμένονται σημαντικές εδαφικές μετατοπίσεις. Τέλος, τα ζητήματα που παραμένουν ανοιχτά προς περαιτέρω διερεύνηση είναι η μοντελοποίηση των γεωμετρικών ατελειών των αγωγών και η επιρροή των παραμενουσών τάσεων, λόγω των συγκολλητών συνδέσεων, στην μηχανική συμπεριφορά των αγωγών ύδατος και συγκεκριμένα στην περιοχή όπου αναμένεται να συμβεί η αστοχία (buckling) λόγω κάμψης.

## Βιβλιογραφία

- [1] Chatzopoulou, G., Fappas, D., Karamanos, S. A., Keil, B. D., Mielke R. D., (2018), "Numerical simulation of steel Lap welded pipe joint behavior in seismic conditions.", *ASCE Pipelines Conference*, Toronto, Canada.
- [2] Keil, B. D., Gobler, F., Mielke, R. D., Lucier, G., Sarvanis, G. C., and Karamanos, S. A. (2018), "Experimental Results of Steel Lap Welded Pipe Joints in Seismic Conditions", *ASCE Pipelines Conference*, Paper No. 386906, Toronto, Ontario, Canada.
- [3] American Water Works Association (2004), *Steel Pipe – A Guide for Design and Installation*, AWWA Manual M11, Denver, CO, USA.
- [4] American Water Works Association (2012), *Steel Water Pipe-6 In. and Larger*, AWWA C200, Denver, CO, USA.
- [5] Karamanos, S. A., Koritsa, E., Keil, B. and Card, R. J. (2015), "Analysis and behavior of steel pipe welded lap joints in geohazard areas", *ASCE Pipelines Conference*, Paper No. 413, Baltimore, Maryland, USA.
- [6] Karamanos, S. A., Koritsa, E., Keil, B. Card, R. J. and Pappa, P. (2017), "Mechanical Response of Steel Pipe Welded Lap Joints in Seismic Areas", *ASCE Pipelines Conference*, Paper No. 227, Phoenix, Arizona, USA.
- [7] Karamanos, S. A., Sarvanis, G. C., Keil, B. D. and Card, R. J. (2017), "Analysis and Design of Buried Steel Water Pipelines in Seismic Areas", *ASCE Journal of Pipeline Systems Engineering & Practice*, Vol. 8, No. 4, Article Number: 04017018.
- [8] Moncarz, P. D., Shyne, J. C. and Derbalian, G. K., (1987) "Failures of 108-inch steel pipe water main", *J. Perf. Constructed Facilities*, ASCE, Vol. 1, No. 3, pp. 168-187.
- [9] Eberhardt, A. (1990), "108-in Diameter Steel Water Conduit Failure and Assessment of AWWA Practice", *J. Perf. Constructed Facilities*, ASCE, Vol. 4, No. 1, pp. 30-50.

- [10] Jones, S. L., O'Rourke T. D. and Mason, J. A. (2004), "Design of Welded Slip Joints in Pipelines for Compressive Loading", *Proceedings, 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August, Paper No. 1625
- [11] Tutuncu, I. and O'Rourke, T. D. (2006), "Compression Behavior of Non-slender Cylindrical Steel Members with Large-Scale Geometric Imperfections", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 8.
- [12] Mason, J. A, O'Rourke, T. D., Jones, S., Tutuncu, I., (2010) "Compression Performance of Steel Pipeline with Welded Slip Joints", *Journal of Pipeline Systems-Engineering and Practice*, Vol. 1, No. 1, p. , ASCE.
- [13] Mason, J. A, O'Rourke, T. D, Jung, J. K. (2010), "Direct Tension Performance of Steel Pipelines with Welded Slip Joints", *J. Pipeline Systems-Engineering & Practice*, Volume 1, Issue 4, pp. 133-140.
- [14] Tsetseni, S. and Karamanos, S. A. (2007), "Axial Compression Capacity of Welded-Slip Pipeline Joints", *J. Transportation Engrg*, ASCE, Vol. 133, No. 5, pp. 335-340.
- [15] Smith, G. (2006), "Steel Water Pipe Joint Testing.", *Proceedings of ASCE Pipelines 2006 Conference*, Chicago, IL.
- [16] Eiding, J. M. (1991), "Girth Joints in Steel Pipelines Subject to Wrinkling and Ovaling", TCLEE Monograph No. 16. *Proceedings, 5th US Conference on Lifeline Earthquake Engineering*, Seattle, WA, Aug. pp. 100-109
- [17] Brockenbrough, R. L. (1990), "Strength of Bell-and-Spigot Joints", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 7, pp.1983-1991.
- [18] Paulo Roberto de Freitas Teixeira, Douglas Bezerra de Araújo, Luiz Antônio Bragança da Cunha (2014), "Study of the gaussian distribution heat source model applied to numerical thermal simulations of TIG welding processes", *Science & Engineering Journal*, 23 (1): 115 – 122, jan. – jun. 2014.