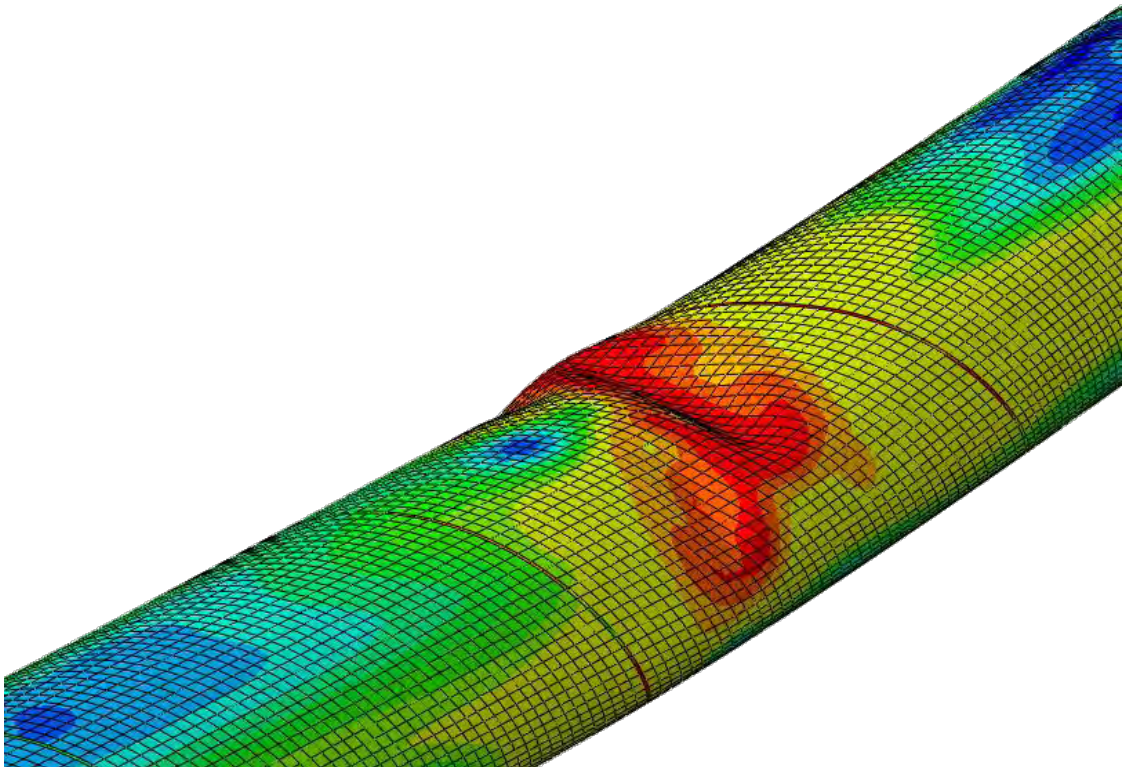


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

***ΟΡΙΑ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ
ΣΩΛΗΝΩΝ***

υπό
ΙΩΑΝΝΗ Ε. ΠΛΑΤΑΚΗ



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

2018

© 2018 Ιωάννης Πλατάκης

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 Καραμάνος
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

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

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

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή κ. Σπύρο Καραμάνο, για την πολύτιμη βοήθεια του, το ενδιαφέρον του, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αλλά και τον χρόνο που αφιέρωσε κατά την διεκπεραίωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Νικόλαο Πελεκάση και Επίκουρο Καθηγητή κ. Μιχάλη Αγόρα για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον άνθρωπο, με τον οποίο μοιράστηκα τα χρόνια της φοιτητικής μου ζωής Στέλλα, για την αμέριστη αγάπη της και την ιδιαίτερα σημαντική ψυχολογική στήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Μανώλη και Αλεξάνδρα, καθώς και τα αδέρφια μου Κώστα και Ειρήνη για την αγάπη τους και τη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Αφιερώνω την εργασία αυτή στους γονείς μου, Μανώλη και Αλεξάνδρα, ως ελάχιστη ένδειξη ευγνωμοσύνης για τα ανεξάντλητα αποθέματα της αγάπης και της δύναμής που μου επέδειξαν όλα αυτά τα χρόνια.

ΟΡΙΑ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΓΩΓΩΝ

Ιωάννης Ε. Πλατάκης

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2018

Επιβλέπων: Σπύρος Α. Καραμάνος, Καθηγητής

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει μία αναλυτική μεθοδολογία πρόβλεψης του λυγισμού σωληνωτών μεταλλικών μελών που υποβάλλονται σε καθαρή κάμψη. Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στην εύρεση της κρίσιμης καμπυλότητας για την οποία ο σωλήνας παρουσιάζει τοπικό λυγισμό και αστοχεί.

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την αναλυτική μεθοδολογία συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα των Van Es, S. H. J. et al. [1] από 13 πειράματα σε ελικοειδώς συγκολλημένους σωλήνες διαμέτρου 42 ιντσών με λόγο D/t μεταξύ 65 και 120. Κάποιοι σωλήνες έχουν περιφερειακές συγκολλήσεις και συγκολλήσεις σύνδεσης ελάσματος οι οποίες μειώνουν την ικανότητα κάμψης του σωλήνα. Επίσης στην πειραματική μελέτη παρατηρήθηκαν αρχικές ατέλειες που προκαλούνται κυρίως από την διαδικασία της ψυχρής έλασης κατά την κατασκευή των σωλήνων. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι οι σωλήνες με μικρότερους λόγους D/t αστοχούν σταδιακά, ενώ οι πιο λεπτότοιχοι σωλήνες παρουσιάζουν λυγισμό απότομα.

Κατά την αναλυτική μεθοδολογία για την πρόβλεψη της κρίσιμης παραμόρφωσης εκτός από τις ιδιότητες του υλικού του κάθε δείγματος λαμβάνονται υπόψιν και οι επιδράσεις των αρχικών ατελειών καθώς και η θετική επίδραση της εργοσκλήρυνσης. Επιπλέον για την περιγραφή της συμπεριφοράς του σωλήνα κατά τη διάρκεια της κάμψης λαμβάνεται υπόψιν η οβαλοποίηση που υφίσταται η διατομή και οι παραμένουσες τάσεις.

Ακόμη γίνεται σύγκριση και με τα αποτελέσματα της υπολογιστικής μελέτης των Vasilikis, D. et al. [2] που συνοδεύει την πειραματική έρευνα. Αυτό που παρατηρείται κατά τη σύγκριση με τα πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα είναι ότι, ενώ η αναλυτική μεθοδολογία ανταπεξέρχεται πολύ καλά στην πρόβλεψη του λυγισμού για σωλήνες με μικρούς λόγους D/t (παχύς σωλήνες), για πιο λεπτότοιχους σωλήνες προβλέπει την αστοχία νωρίτερα.

Για τη βελτίωση της αναλυτικής μεθοδολογίας αναπτύχθηκαν νέες τροποποιημένες σχέσεις για την πρόβλεψη της κρίσιμης παραμόρφωσης ενώ έγινε προσπάθεια και για απλοποίηση της διαδικασίας. Η προσπάθεια αυτή κατέληξε σε μία νέα απλούστερη σχέση η οποία όμως προβλέπει καλύτερα την κρίσιμη καμπυλότητα για τους λεπτότοιχους σωλήνες ενώ παράλληλα διατηρεί μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας για αυτούς τους σωλήνες απ' ό,τι για τους πιο παχύς, λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης του λυγισμού που παρατηρήθηκε να συμβαίνει στην περίπτωση των πρώτων.

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	1
1.1	Γενικά	1
1.2	Σύντομη περιγραφή της μεθόδου κατασκευής σωλήνων με σπειροειδή συγκόλληση.....	4
2.	Περιγραφή του προβλήματος	6
2.1	Υπάρχουσα πειραματική μελέτη	6
2.1.1	Η πειραματική διάταξη και τα δείγματα της έρευνας στην οποία βασίστηκε η συγκριτική μελέτη.....	9
2.1.2	Τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών μετρήσεων της πειραματικής έρευνας στην οποία βασίστηκε η συγκριτική μελέτη	16
2.1.3	Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τεσσάρων σημείων της έρευνας στην οποία βασίστηκε η συγκριτική μελέτη	29
2.2	Υπολογιστικές μελέτες	43
2.2.1	Αριθμητική έρευνα στην οποία βασίστηκε η συγκριτική μελέτη της παρούσας εργασίας..	45
3.	Αναλυτική μεθοδολογία	53
3.1	Σχέση ροπής κάμψης - καμπυλότητας	53
3.1.1	Διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας χωρίς επιπλέον επιδράσεις	54
3.1.2	Επίδραση οβαλοποίησης της διατομής στη σχέση ροπής κάμψης - καμπυλότητας	55
3.1.3	Η επίδραση των επιφανειακών καμπτικών ροπών “plate moments” στην σχέση ροπής κάμψης – καμπυλότητας	57
3.1.4	Η επίδραση των παραμενουσών τάσεων στη σχέση ροπής κάμψης - καμπυλότητας	59
3.2	Κρίσιμο σημείο για τοπικό λυγισμό	60
3.2.1	Γεωμετρικές επιδράσεις και επιδράσεις εργοσκήρυξης στο κρίσιμο σημείο τοπικού λυγισμού.....	62
3.2.2	Τροποποιημένη σχέση πρόβλεψης της κρίσιμης παραμόρφωσης	63
4.	Αποτελέσματα	66
4.1	Σύγκριση αναλυτικών μεθοδολογιών.....	66
4.2	Διαγράμματα ροπής κάμψης – καμπυλότητας.....	69
5.	Συμπεράσματα	73
	Βιβλιογραφία	74

Κατάλογος Πινάκων

<i>Πίνακας 2.1</i>	<i>Επισκόπηση του προγράμματος δοκιμών. Μέσες διαστάσεις ως προς το μήκος δείγματος.....</i>	<i>10</i>
<i>Πίνακας 2.2</i>	<i>Επισκόπηση του ορίου διαρροής σ_y σε MPa, όπως αυτό μετρήθηκε από τα δείγματα που εξήχθησαν</i>	<i>16</i>
<i>Πίνακας 2.3</i>	<i>Επισκόπηση των αρχικών μεγεθών ατέλειας στην θέση τοπικού λυγισμού.....</i>	<i>26</i>
<i>Πίνακας 2.4</i>	<i>Επισκόπηση του μεγέθους των αρχικών ατελειών</i>	<i>28</i>
<i>Πίνακας 2.5</i>	<i>Συγκεντρωτικός πίνακας πειραμάτων. Σύγκριση μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.....</i>	<i>51</i>

Κατάλογος Εικόνων

<i>Εικόνα 1.1 Σχηματική επισκόπηση της διαδικασίας κατασκευής HSAW [6].</i>	1
<i>Εικόνα 1.2 Παράδειγμα συνδυασμένου συστήματος τοίχων υπό κατασκευή [7].</i>	3
<i>Εικόνα 1.3 Παραμόρφωση που προκαλείται σε σωλήνα που αστόχησε λόγω τοπικού λυγισμού.</i>	4
<i>Εικόνα 1.4 Σχηματική αναπαράσταση ενός ελικοειδώς συγκολλημένου σωλήνα με σπειροειδή συγκόλληση, συγκόλληση σύνδεσης σπειρών (CCW) και περιφερειακή συγκόλληση (GW).</i>	5
<i>Εικόνα 2.1 Σχηματική επισκόπηση και φωτογραφία της διάταξης της δοκιμής θλίψης με το δείγμα, τους μετρητές τάσης και την υποστήριξη.</i>	11
<i>Εικόνα 2.2 Σχηματική επισκόπηση και φωτογραφία των μετρήσεων λέιζερ των γεωμετρικών ατελειών.</i>	11
<i>Εικόνα 2.3 Επισκόπηση της εγκατάστασης δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων, (α) Σκίτσο της πειραματικής διάταξης, (β) Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης μετά τον σχηματισμό μιας τοπικού λυγισμού, (γ) Στηρίγματα για την μέτρηση της οβαλοποίησης και της καμπυλότητας, δ) Τοπικός λυγισμός στο δείγμα T11</i>	13
<i>Εικόνα 2.4 (α) Μετρήσεις καμπυλότητας των σωλήνων, (β) Μετρήσεις οβαλοποίησης των σωλήνων.</i>	14
<i>Εικόνα 2.5 Επισκόπηση της σάρωσης με λέιζερ κατά τη διάρκεια της δοκιμής, (α) Σχηματική επισκόπηση της σάρωσης με λέιζερ κατά τη διάρκεια του πειράματος, (β) Αναρτημένες σιδηροτροχιές με εξωτερικό τρόλεϊ λέιζερ, (γ) Εσωτερικό τρόλεϊ λέιζερ.</i>	15
<i>Εικόνα 2.6 Σύγκριση δοκιμών εφελκυσμού από τα εξαγμένα δείγματα με τα δείγματα πλήρους πάχους για δύο δοκίμια, (α) T4 – διαμήκης κατεύθυνση, (β) T4 – περιφερειακή κατεύθυνση, (γ) T6 Left – διαμήκης κατεύθυνση, (δ) T6 Left – περιφερειακή κατεύθυνση.</i>	17
<i>Εικόνα 2.7 Σκίτσο του δείγματος T10 που διαθέτει συγκόλληση περιμετρική που συνδέει δύο τμήματα δείγματος σημαντικής διαφορετικής αντοχής.</i>	18

<i>Εικόνα 2.8</i> Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης και εφελκυσμού δειγμάτων που ελήφθησαν από το δοκίμιο T1 στην περιφερειακή κατεύθυνση στο εσωτερικό του τοιχώματος του σωλήνα.....	19
<i>Εικόνα 2.9</i> Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού σε δείγματα που εξήχθησαν από τον ίδιο σωλήνα με τον ίδιο προσανατολισμό. Τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού απεικονίζονται στον τομέα της θλίψης για να διευκολυνθεί η σύγκριση με τις αντίστοιχες δοκιμές θλίψης, (a)T1 – διαμήκης κατεύθυνση, (b)T1 – περιφερειακή κατεύθυνση, (c)T2 – διαμήκης κατεύθυνση, (d)T2 – περιφερειακή κατεύθυνση, (e)T11 – διαμήκης κατεύθυνση, (f)T11 – περιφερειακή κατεύθυνση.....	20
<i>Εικόνα 2.10</i> Διαστήματα εμπιστοσύνης 95% των πάχους των τοιχωμάτων σε κάθε δείγμα, υπολογιζόμενα υπό την προϋπόθεση κανονικής κατανομής	21
<i>Εικόνα 2.11</i> Μέτρηση του πάχους στο αρχικό πλάτος του ελάσματος, ομαλοποιημένο με το μέσο πάχος του αντίστοιχου τμήματος του δείγματος. Μέσος όρος για όλα τα δείγματα. 95% διάστημα εμπιστοσύνης υπολογισμένο με την υπόθεση της κανονικής κατανομής.	21
<i>Εικόνα 2.12</i> Μέσες παράμετροι οβαλοποίησης κάθε δείγματος. 95% διάστημα εμπιστοσύνης υπολογιζόμενο με την υπόθεση της κανονικής κατανομής.	22
<i>Εικόνα 2.13</i> Αρχικές γεωμετρικές ατέλειες του δοκιμίου T2 σε προσανατολισμό 0 °. Η αιχμηρές ακίδες σημαίνουν την παρουσία μιας ελικοειδούς συγκόλλησης.....	24
<i>Εικόνα 2.14</i> Φωτογραφία του δείγματος T1 με σημάδια κυλίνδρων. Τα ορατά σημάδια επισημαίνονται με βέλη.	25
<i>Εικόνα 2.15</i> Αρχική γεωμετρία ατελειών του δείγματος T1 σε προσανατολισμό εγκάρσιας διατομής 0 ° με επικάλυψη σήματος κυλίνδρου. Τα σήματα των κυλίνδρων συμπίπτουν με τα "κύματα" του γεωμετρικού σχεδίου ατέλειας.....	25
<i>Εικόνα 2.16</i> Παραδείγματα μετρήσεων του μεγέθους των ατελειών στη θέση λυγισμού, (α) Μέτρηση της ατέλειας για τον σωλήνα T1, για πλήρες προφίλ σωλήνα τοιχώματος βλέπε εικόνα 2.15, (β) Μέτρηση της ατέλειας του σωλήνα T2. για πλήρη προφίλ σωλήνων τοίχου βλέπε εικόνα 2.13.....	25

<i>Εικόνα 2.17 Σύγκριση των γεωμετρικών ατελειών στην περιοχή της περιφερειακής συγκόλλησης για τρεις σωλήνες με πάχος τοιχώματος 9mm.</i>	<i>26</i>
<i>Εικόνα 2.18 Σύγκριση των γεωμετρικών ατελειών στην περιοχή μίας περιφερειακής συγκόλλησης για τον σωλήνα T7 με πάχος τοιχώματος 16mm και τον σωλήνα T10 με πάχος τοιχώματος 13mm.</i>	<i>27</i>
<i>Εικόνα 2.19 Σύγκριση των γεωμετρικών ατελειών κοντά σε μια συγκόλληση σύνδεσης ελάσματος για σωλήνες με πάχος τοιχώματος 16 mm. Σημειώστε ότι η σάρωση του σωλήνα T7 σε αυτό το σχήμα και στο σχήμα 2.18 γίνεται σε διαφορετικούς προσανατολισμούς της διατομής (βλέπε σχήμα 2.2).</i>	<i>28</i>
<i>Εικόνα 2.20 Σύγκριση των γεωμετρικών ατελειών κοντά σε μία συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων (CCW) για σωλήνα T10 με πάχος τοιχώματος 13mm και σωλήνα T12 με πάχος τοιχώματος 9mm.</i>	<i>28</i>
<i>Εικόνα 2.21 Παραδείγματα μέτρησης του μεγέθους ατέλειας στο σημείο λυγισμού κοντά σε περιφερειακή συγκόλληση ή σε συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων. (α) Μέτρηση ατέλειας για τον σωλήνα T3 (για το προφίλ του τοιχώματος του σωλήνα βλέπε επίσης εικόνα 2.17), (β) Μέτρηση ατέλειας για τον σωλήνα T6 (για το προφίλ του τοιχώματος του σωλήνα βλέπε επίσης εικόνα 2.19)</i>	<i>29</i>
<i>Εικόνα 2.22 Τοπικός λυγισμός του σωλήνα T3 ($D/t = 118$) κοντά στην περιφερειακή συγκόλληση, (α) Φωτογραφία λυγισμού, (b) 3D σάρωση του λυγισμού</i>	<i>30</i>
<i>Εικόνα 2.23 Τοπικός λυγισμός του σωλήνα T7 ($D/t = 65,4$). Ο λυγισμός ξεκίνησε αρχικά μακριά από την ελικοειδή συγκόλληση, αλλά υπό περαιτέρω παραμόρφωση, ο λυγισμός εκτείνεται πέρα από αυτήν. (α) Φωτογραφία λυγισμού, (b) 3D σάρωση λυγισμού.</i>	<i>30</i>
<i>Εικόνα 2.24 Τοπικός λυγισμός του σωλήνα T12 ($D/t = 117$) στο στάδιο τελικής παραμόρφωσης του δείγματος, (α) Φωτογραφία λυγισμού, (b) 3D σάρωση λυγισμού.</i>	<i>31</i>
<i>Εικόνα 2.25 Παραδείγματα διαγραμμάτων ροπής κάμψης - καμπυλότητας για δύο τυπικά δείγματα. Ο τοπικός λυγισμός λαμβάνει χώρα εντός της τοπικής μέτρησης που σημειώνεται με "(buckling)", (α) Δείγμα T9 ($D / t = 65,4$), (b) Δείγμα T4 ($D / t = 116$).</i>	<i>31</i>

<i>Εικόνα 2.26 Διαγράμματα ροπής κάμψης – καμπυλότητας όλων των δειγμάτων με σπειροειδή συγκόλληση. (α) Σωλήνες με $t=16mm$ και $\sigma_y \approx 530MPa$, (b) Σωλήνες με $t=16mm$ και $\sigma_y \approx 610MPa$, (c) Σωλήνες με $t=13mm$ και $\sigma_y \approx 340MPa$, (d) σωλήνες με $t=9,0mm$ και $\sigma_y=390-450MPa$, (e) Σωλήνες με $t=9,0mm$ και $\sigma_y=410-450MPa$, (f) σωλήνες με $t=9,0mm$ και $\sigma_y \approx 340MPa$.</i>	32
<i>Εικόνα 2.27 Περιορισμός της οβαλοποίησης με υποστηρίγματα.</i>	34
<i>Εικόνα 2.28 Μετρήσεις οβαλοποίησης για το δείγμα T6, (α) Μετρήσεις οβαλοποίησης με βραχίονες (b) Σύγκριση μετρήσεων μεταξύ μετρήσεων μέσω των βραχιόνων και μέσω εσωτερικού τρόλεϊ λείζερ.</i>	34
<i>Εικόνα 2.29 Μετρήσεις οβαλοποίησης του δείγματος T13, , (α) Μετρήσεις οβαλοποίησης με βραχίονες (b) Σύγκριση μετρήσεων μεταξύ μετρήσεων μέσω των βραχιόνων και μέσω εσωτερικού τρόλεϊ λείζερ.</i>	34
<i>Εικόνα 2.30 Μέγιστη ροπή κάμψης δειγμάτων. Ως M_y ορίζεται η πρώτη ροπή διαρροής του σωλήνα πριν την οβαλοποίησή του.</i>	36
<i>Εικόνα 2.31 Κρίσιμες παραμορφώσεις με βάση τις μέσες καμπύλες στη μέγιστη ροπή.</i>	37
<i>Εικόνα 2.32 Σύγκριση της τοπικής καμπυλότητας στη θέση του λυγισμού και της συνολικής καμπυλότητας στη μέγιστη ροπή.</i>	37
<i>Εικόνα 2.33 Σύγκριση της ολκιμότητας του δείγματος, οριζόμενη ως ο λόγος μεταξύ της μέσης καμπυλότητας κατά την απόρριψη φορτίου και της μέγιστης ροπής κάμψης, (α) Ολκιμότητα σε σχέση με την παράμετρο ευκαμψίας $D/(t\varepsilon^2)$, (b) Ολκιμότητα σε σχέση με την παράμετρος ευκαμψίας D/t.</i>	38
<i>Εικόνα 2.34 Θέση λυγισμού για τα δείγματα T4 και T1. Η παρακολούθηση της πλευράς που συμπιέζεται κατά τη διάρκεια του πειράματος T1 έγινε μόνο για μέρος του σωλήνα. Ο τοπικός λυγισμός προέκυψε εκτός αυτών μετρήσεων. (α) Πείραμα T4, (b) πείραμα T1.</i>	39
<i>Εικόνα 2.35 Επιδράσεις των περιφερειακών συγκολλήσεων και των συγκολλήσεων σύνδεσης ελασμάτων στη σχέση ροπής κάμψης – καμπυλότητας, (α) Δείγμα T10, (β) Δείγμα T12.</i>	41

<i>Εικόνα 2.36 (α) Αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων προσομοίωσης ελικοειδούς ψυχρής έλασης. (β) Η διαμήκης κίνηση του ελάσματος μέσω των κυλίνδρων έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό του ελικοειδούς σωλήνα.</i>	<i>46</i>
<i>Εικόνα 2.37 Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αριθμητικού μοντέλου για σχηματισμό σπειροειδών συγκολλήσεων.</i>	<i>47</i>
<i>Εικόνα 2.38 (α) Ορθογωνικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του σωλήνα με αρχικούς κυματισμούς (σχήμα της πρώτης ιδιομορφής ατελειών, μεγιστοποιημένο για σκοπούς απεικόνισης). (β) λεπτομέρεια του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων.</i>	<i>48</i>
<i>Εικόνα 2.39 Αρχικός κυματισμός στην πλευρά συμπίεσης.</i>	<i>48</i>
<i>Εικόνα 2.40 Αριθμητικό μοντέλο κάμψης τεσσάρων σημείων στο ABAQUS.</i>	<i>48</i>
<i>Εικόνα 2.41 Διαχωρισμός του σωλήνα που περιέχει περιφερειακή συγκόλληση.</i>	<i>49</i>
<i>Εικόνα 2.42 Διαχωρισμός σωλήνα που περιέχει συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων και (b) αντίστοιχο σπειροειδές πλέγμα.</i>	<i>49</i>
<i>Εικόνα 2.43 Διαχωρισμός και πλεγματοποίηση σωλήνα που περιέχει περιφερειακή συγκόλληση και συγκόλληση σύνδεσης σπειρών.</i>	<i>50</i>
<i>Εικόνα 2.44 Διαγράμματα ροπής κάμψης – καμπυλότητας για τα δείγματα σωλήνων. σύγκριση μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.</i>	<i>52</i>
<i>Εικόνα 2.45 Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από ορθογώνια και σπειροειδή πλέγματα.</i>	<i>52</i>
<i>Εικόνα 3.1 Παράδειγμα σύνθετου τοιχίου υδατοφράγματος.</i>	<i>53</i>
<i>Εικόνα 3.2 Κατανομή τάσεων λόγω κάμψης για την ελαστοπλαστική περιοχή του διαγράμματος ροπής κάμψης - καμπυλότητας.</i>	<i>55</i>
<i>Εικόνα 3.3 Διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας χωρίς επιπλέον επιδράσεις, όπως υπολογίστηκε από την αναλυτική μεθοδολογία για τα δεδομένα του δείγματος T4.</i>	<i>55</i>
<i>Εικόνα 3.4 Δυνάμεις οβαλοποίησης df λόγω γραμμική ελαστικής κάμψης.</i>	<i>56</i>
<i>Εικόνα 3.5 Αντικατάσταση δυνάμεων οβαλοποίησης df από ομοιόμορφο φορτίο q.</i>	<i>56</i>
<i>Εικόνα 3.6 Επιφανειακές καμπτικές ροπές και επιφανειακές αξονικές τάσεις με τη βέλτιστη κατανομή τάσεων στο τοίχωμα του σωλήνα.</i>	<i>58</i>

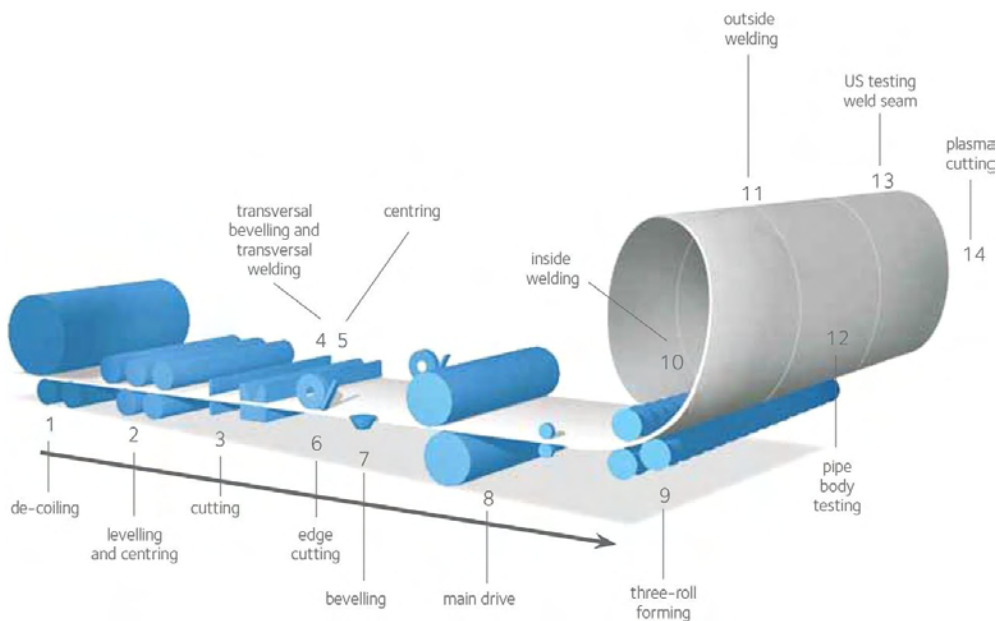
<i>Εικόνα 3.7 Επιφανειακές αξονικές δυνάμεις οι οποίες προκαλούν καμπτικές ροπές στον σωλήνα και επιφανειακές αξονικές ως αποτέλεσμα της αξονικής δύναμης στον σωλήνα. ..</i>	<i>58</i>
<i>Εικόνα 3.8 Επίδραση ovalisation και plate moments στο διάγραμμα ροπής κάμψης καμπυλότητας, όπως υπολογίστηκε από την αναλυτική μεθοδολογία για τα δεδομένα του δείγματος T4.</i>	<i>59</i>
<i>Εικόνα 3.9 Διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας με την επίδραση της οβαλοποίησης, των plate moments και των παραμενουσών τάσεων, όπως υπολογίστηκε από την αναλυτική μεθοδολογία για τα δεδομένα του δείγματος T4.</i>	<i>60</i>
<i>Εικόνα 3.10 Ορισμός της οβαλοποίησης και της κρίσιμης τοπικής ακτίνας r_{cr}.</i>	<i>61</i>
<i>Εικόνα 3.11 Διάγραμμα κρίσιμης παραμόρφωσης – λόγου κρίσιμης ακτίνας προς πάχος για την αρχική και τις προτεινομενες τροποποιημένες σχέσεις.</i>	<i>65</i>
<i>Εικόνα 4.1 Συγκριτικό γράφημα κρίσιμης καμπυλότητας για τα πειραματικά (TEST), υπολογιστικά (FEM) και αναλυτικά (ANALYTIC) αποτελέσματα μέσω της σχέσης κρίσιμης παραμόρφωσης (3.23).</i>	<i>66</i>
<i>Εικόνα 4.2 Συγκριτικό γράφημα μέγιστων ροπών κάμψης για τα πειραματικά (TEST), υπολογιστικά (FEM) και αναλυτικά (ANALYTIC) αποτελέσματα μέσω της σχέσης κρίσιμης παραμόρφωσης (3.23).</i>	<i>67</i>
<i>Εικόνα 4.3 Συγκριτικό γράφημα κρίσιμης καμπυλότητας για τα πειραματικά (TEST), υπολογιστικά (FEM) και αναλυτικά (ANALYTIC) αποτελέσματα μέσω της αρχικής σχέσης κρίσιμης παραμόρφωσης (3.23) και των τροποποιημένων σχέσεων (MODIFIED 1 – MODIFIED 4) που λήφθηκαν από τις σχέσεις (3.31) – (3.34)..</i>	<i>68</i>
<i>Εικόνα 4.4 Συγκριτικό γράφημα κρίσιμης ροπής κάμψης για τα πειραματικά (TEST), υπολογιστικά (FEM) και αναλυτικά (ANALYTIC) αποτελέσματα μέσω της αρχικής σχέσης κρίσιμης παραμόρφωσης (3.23) και των τροποποιημένων σχέσεων (MODIFIED 1 – MODIFIED 4) που λήφθηκαν από τις σχέσεις (3.31) – (3.34)..</i>	<i>68</i>
<i>Εικόνα 4.5 Διαγράμματα ροπής κάμψης – καμπυλότητας σύμφωνα με την αναλυτική μεθοδολογία για τα δείγματα T2, T3, T6, T7, T10 και T11. Κρίσιμη καμπυλότητα για τοπικό λυγισμό (local buckling) σύμφωνα με τη σχέση (3.34).</i>	<i>70</i>

<i>Εικόνα 4.6 Συγκριτικό διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας υπολογιστικών, πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για το δείγμα T1. Κρίσιμη καμπυλότητα για τοπικό λυγισμό (Local Buckling), σχέση (3.34).</i>	71
<i>Εικόνα 4.7 Συγκριτικό διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας υπολογιστικών, πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για το δείγμα T5. Κρίσιμη καμπυλότητα για τοπικό λυγισμό (Local Buckling), σχέση (3.34).</i>	72
<i>Εικόνα 4.8 Συγκριτικό διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας υπολογιστικών, πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για το δείγμα T13. Κρίσιμη καμπυλότητα για τοπικό λυγισμό (Local Buckling), σχέση (3.34).</i>	72

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Μία οικονομική και αποτελεσματική μέθοδος για την κατασκευή χαλύβδινων σωλήνων μεγάλης διαμέτρου σχετικά λεπτών τοιχωμάτων προσφέρεται από τη μέθοδο κατασκευής με ελικοειδή συγκόλληση (HSAW). Αυτή η διαδικασία συνίσταται από ελικοειδή συγκόλληση μιας χαλύβδινης πλάκας μέσω της διαδικασίας της ψυχρής έλασης, όπως φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 1.1. Οι διάμετροι κοινών σωλήνων ελικοειδούς συγκόλλησης κυμαίνονται από περίπου 500 έως 3000mm, με πάχος τοιχώματος μεταξύ 9 και 25mm. Η διαδικασία παραγωγής είναι συνεχής. Ένα χαλύβδινο έλασμα που εξαντλείται συνδέεται με ένα νέο έλασμα μέσω μιας συγκόλλησης στο άκρο χωρίς διακοπή της διαδικασίας ελικοειδούς συγκόλλησης. Αυτή η συγκόλληση, που λειτουργεί κάθετα μεταξύ δύο σπειροειδών συγκολλήσεων, υποδηλώνεται σε αυτή τη μελέτη ως συγκόλληση σύνδεσης σπειρών (CCW). Εκτός από αυτές τις συγκολλήσεις συνδέσεων σπειρών, οι περιφερειακές συγκολλήσεις (GW) παρουσιάζονται επίσης σε σωλήνες που χρησιμοποιούνται στην πράξη. Αυτές οι συγκολλήσεις μπορεί να εκτελούνται στο ελεγχόμενο περιβάλλον της μονάδας παραγωγής, αλλά για τη σύνδεση των σωλήνων με άλλα τμήματα μπορεί να γίνονται και επιτόπου στις εγκαταστάσεις για τις οποίες προορίζονται.



Εικόνα 1.1 Σχηματική επισκόπηση της διαδικασίας κατασκευής HSAW [6].

Οι ελικοειδώς συγκολλημένοι σωλήνες μεγάλης διαμέτρου χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χερσαίες μεταφοράς υδρογονανθράκων και ύδατος. Η διάμετρος των σωλήνων για μεταφορά υδρογονανθράκων μπορεί να κυμαίνεται από 700mm έως περίπου 1500mm, με αναλογίες D/t μεταξύ 40 και 100. Εκτός από τους σωλήνες υδρογονανθράκων, χαλύβδινοι σωλήνες μεγάλης διαμέτρου που χρησιμοποιούνται για υδροφράγματα καθώς και για μεταφορά νερού, πολύ συχνά κατασκευάζονται από σπειροειδείς σωλήνες με την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Η διάμετρος των χαλύβδινων σωλήνων μεγάλης διαμέτρου για τη μεταφορά ύδατος κυμαίνεται τυπικά από 900 έως 2000mm, με αρκετά υψηλές αναλογίες διαμέτρου προς πάχος, οι οποίες μπορεί να φτάσουν σε λόγους D/t μέχρι και 240. Οι ελικοειδώς συγκολλημένοι σωλήνες χρησιμοποιούνται επίσης σε δομικές εφαρμογές, για παράδειγμα για σωληνοειδείς κολώνες, πύργους, ιστούς και άλλες μεγάλες σωληνοειδείς κατασκευές. Μια σημαντική δομική εφαρμογή είναι η χρήση χαλύβδινων σωλήνων μεγάλης διαμέτρου σε συνδυασμένους τοίχους ως πρωταρχικά δομικά στοιχεία που αντιστέκονται στα οριζόντια φορτία από το έδαφος και την πίεση του νερού. Αυτά τα συνδυασμένα τοιχώματα, συχνά αποκαλούνται «combiwalls» και αποτελούνται από μια σειρά σωλήνων μεγάλης διαμέτρου που συνδέονται με μεταλλικά φύλλα (εικόνα 1.2). Για τη σύνδεσή τους, συγκολλούνται στον σωλήνα, τυποποιημένα φύλλα συρραφής με πτυχωσεις. Οι χαλύβδινοι σωλήνες που χρησιμοποιούνται στα combiwalls κατασκευάζονται γενικά με την διαδικασία ελικοειδούς συγκόλλησης, με διάμετρο μέχρι 3000mm, πάχος μέχρι 25mm, ειδική ελάχιστη δύναμη απόκλισης μεταξύ 350MPa και 480MPa και μήκος μέχρι 50m, ενώ οι τυπικές τιμές της αντίστοιχης αναλογίας διαμέτρου προς πάχος κυμαίνονται από 65 έως 120. Ένα πλεονέκτημα της χρήσης της διεργασίας παραγωγής συνεχούς ελικοειδούς συγκόλλησης για σωλήνες σε αυτή την εφαρμογή είναι η ικανότητα παραγωγής σωλήνων σημαντικού μήκους, ελαχιστοποιώντας έτσι τον αριθμό περιφερειακών συγκολλήσεων (GW).



Εικόνα 1.2 Παράδειγμα συνδυσμένου συστήματος τοίχων υπό κατασκευή [7].

Η παρούσα εργασία οφείλεται κυρίως στην ανάγκη προσδιορισμού της δομικής ικανότητας των σελικοειδώς συγκολλημένων σωλήνων μεγάλης διαμέτρου, που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμένες εφαρμογές [8], [9]. Σε αυτές τις εφαρμογές, η κύρια κατάσταση φόρτισης είναι η κάμψη του σωλήνα και ο αντίστοιχος κυρίαρχος τρόπος αστοχίας είναι ο τοπικός λυγισμός του τοιχώματος του σωλήνα. Η γραμμική και η μη γραμμική συμπεριφορά κάμψης των ελικοειδώς συγκολλημένων σωλήνων είναι επίσης σημαντική για τον ασφαλή σχεδιασμό σωλήνων μεγάλης διαμέτρου, που υποβάλλονται σε σοβαρές παραμορφώσεις που προκαλούνται από το έδαφος σε περιοχές που κρύβουν γεωλογικούς κινδύνους. Στις περιοχές αυτές, ο σωλήνας υποβάλλεται σε σημαντική φόρτιση κάμψης, λόγω μετακίνησης που προκαλείται από την πλευρική εξάπλωση της υγροποίησης και την καθίζηση του εδάφους, καθώς και από κατολισθήσεις, οι οποίες μπορεί και να απειλήσουν τη δομική του ακεραιότητα.

Η διαμήκης παραμόρφωση κάμψεως ενός σωληνοειδούς μέλους προκαλεί την παραμόρφωση της διατομής του από κυκλική σε ελλειψοειδούς σχήματος διατομή. Αυτό το φαινόμενο αποκαλείται οβαλοποίηση, ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της κάμψεως του σωλήνα, γνωστό επίσης και ως «Brazier effect» [10]. Η οβαλοποίηση μειώνει το μέτρο δυσκαμψίας του σωλήνα, αυξάνει την τοπική ακτίνα της διατομής του σωλήνα στη μέγιστη θέση συμπίεσης και προκαλεί μία κατάσταση διαξονικής τάσης εξαιτίας της κάμψης του δακτυλίου που οδηγεί νωρίτερα τον σωλήνα σε διαρροή. Με την αύξηση της παραμόρφωσης λόγω κάμψεως, παρατηρείται δομική αστάθεια του συμπιεσμένου τοιχώματος του σωλήνα. Αυτή η αστάθεια παρουσιάζεται τοπικά με τη διαμόρφωση πτθώσεων (εικόνα 1.3), που αποκαλείται τοπικός

λυγισμός. Ο σχηματισμός του τοπικού λυγισμού συνδέεται με μία πτώση της ροπής κάμψης στο διάγραμμα ροπής κάμψης - καμπυλότητας, το οποίο σημαίνει δομική αστοχία του σωλήνα. Με βάση προηγούμενες παρατηρήσεις, οι λεπτότοιχοι σωλήνες με τιμές λόγου $D/t \geq 100$ που υποβάλλονται σε κάμψη αναπτύσσουν τοπικό λυγισμό πιο απότομα, οδηγώντας σε ξαφνική πτώση της ροπής. Από την άλλη πλευρά, σε σωλήνες υπό κάμψη με τιμές D/t ίσες με περίπου 60 ή 70, η ανάπτυξη του τοπικού λυγισμού είναι πιο σταδιακή.



Εικόνα 1.3 Παραμόρφωση που προκαλείται σε σωλήνα που αστόχησε λόγω τοπικού λυγισμού.

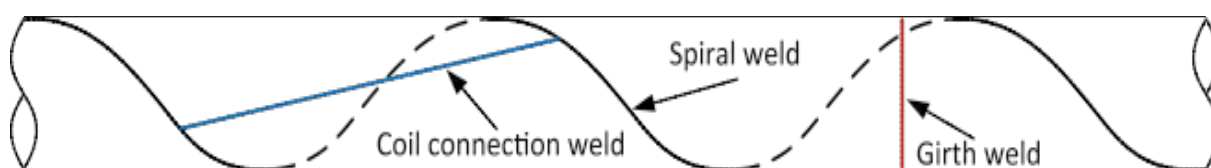
1.2 Σύντομη περιγραφή της μεθόδου κατασκευής σωλήνων με σπειροειδή συγκόλληση

Η τεχνική κατασκευής σωλήνων ελικοειδούς συγκόλλησης είναι μια οικονομική λύση για την παραγωγή σωλήνων μεγάλης διαμέτρου με σχετικά υψηλή αντοχή, με σχετικά μικρό πάχος τοιχώματος. Συνήθως οι διάμετροι κυμαίνονται από περίπου 500mm έως 3000mm με το πάχος τοιχώματος να κυμαίνεται από περίπου 9mm έως 25mm. Το μήκος των παραγόμενων σωλήνων μπορεί να κυμαίνεται από 8m έως περίπου 50m, αφού λόγω της συνεχούς παραγωγικής διαδικασίας, μπορούν να κατασκευαστούν σωλήνες μεγάλου μήκους, με τους βασικούς περιορισμούς για το μήκος να είναι ο διαθέσιμος χώρος στο εργοστάσιο και η μεταφορική ικανότητα.

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής, το έλασμα «ξετυλίγεται», ισιώνεται και λοξοτομείται στις άκρες. Στη συνέχεια, η σπείρα σχηματίζεται μέσω ψυχρής έλασης της πλάκας, συνήθως μέσω ενός συστήματος κάμψης τριών ράουλων. Ο σωλήνας συγκολλάται

συνεχώς από δύο πλευρές (εσωτερικά και εξωτερικά), με αποτέλεσμα μια συγκόλληση σχήματος X. Ο ποιοτικός έλεγχος πραγματοποιείται συνεχώς υπό τη μορφή υπερηχητικού ελέγχου της ραφής συγκόλλησης και παρακολούθησης της διαμέτρου του προϊόντος και των παραμέτρων της διαδικασίας συγκόλλησης.

Σε σύγκριση με τις μεθόδους κατασκευής σωλήνων ευθείας ραφής, η τεχνική κατασκευής με σπειροειδή συγκόλληση έχει ως αποτέλεσμα ορισμένα ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά του παραγόμενου σωλήνα. Πρώτον, η κατεύθυνση κυλίσεως του υλικού του μητρικού ελάσματος δεν αντιστοιχεί στην κύρια κατεύθυνση φόρτισης του τελικού προϊόντος, δεδομένου ότι το αρχικό υλικό έλασμα μεταποιείται σε ένα προϊόν σωλήνα υπό ορισμένη γωνία, ανάλογα με το πλάτος του ελάσματος και την επιθυμητή διάμετρο του σωλήνα. Κατά δεύτερον, η διεργασία της ψυχρής έλασης μέσω της οποίας δημιουργείται ο σπειροειδής σωλήνας έχει ως αποτέλεσμα τη σύνθετη δημιουργία παραμενοσών τάσεων. Τέλος, το τελικό προϊόν διαθέτει συγκολλήσεις σε διάφορους προσανατολισμούς (εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.4 Σχηματική αναπαράσταση ενός ελικοειδώς συγκολλημένου σωλήνα με σπειροειδή συγκόλληση, συγκόλληση σύνδεσης σπειρών (CCW) και περιφερειακή συγκόλληση (GW).

Το πιο προφανές είναι η σπειροειδής συγκόλληση, η οποία ενώνει το ελικοειδώς σχηματισμένο έλασμα. Ένας δεύτερος τύπος συγκόλλησης προκύπτει όταν δύο άκρα σπειρών συνδέονται με μια συγκόλληση κατά τη συνεχή διαδικασία κατασκευής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια συγκόλληση που είναι κάθετη ανάμεσα σε δύο σπειροειδείς συγκολλήσεις και ονομάζεται συγκόλληση σύνδεσης σπειρώματος (CCW). Οι συγκολλήσεις σύνδεσης ελασμάτων δεν χρησιμοποιούνται γενικά σε εφαρμογές αγωγών, αλλά μπορούν να υπάρχουν σε σωλήνες που χρησιμοποιούνται σε δομικές εφαρμογές. Στην περίπτωση σύνδεσης δύο σωλήνων, γίνεται μία περιφερειακή συγκόλληση (GW). Αυτή η συγκόλληση, όπως έχει ήδη αναφερθεί μπορεί να εκτελεστεί στο εργοστάσιο παραγωγής, αλλά και στο εργοτάξιο.

2. Περιγραφή του προβλήματος

2.1 Υπάρχουσα πειραματική μελέτη

Η συμπεριφορά των μεταλλικών σωλήνων που υποβάλλονται σε καθαρή κάμψης έχει εξεταστεί πειραματικά πολλές φορές τις τελευταίες δεκαετίες. Μία από τις αρχικές πειραματικές έρευνες διεξήχθη από τους Moore και Clark [11] σε δοκίμια που εξήχθησαν από κυλινδρική ράβδο αλουμινίου με αναλογίες D/t που κυμαίνονται από 2 έως 150. Τα υπό κλίμακα πειράματά τους περιλαμβάνουν δοκιμές κάμψης, θλίψης και στρέψης. Δείγματα με αναλογίες $D/t \geq 15$ βρέθηκαν να είναι επιρρεπή σε αστάθεια, είτε λόγω προοδευτικού σχηματισμού του φαινομένου της οβαλοποίησης, είτε λόγω σχηματισμού του τοπικού λυγισμού. Επίσης, βρέθηκε από τους Wilhoit και Merwin [12] ότι η επίδραση της αξονικής τάσης είχε θετική επιρροή στο φαινόμενο του τοπικού λυγισμού, σε παρόμοια πειράματα κάμψης. Ένας μεγάλος αριθμός δοκιμών κάμψης μικρής κλίμακας έχει εκτελεστεί και από τους Johns et al. [13]. Η χρήση πειραμάτων μικρής κλίμακας επέτρεψε την εφαρμογή συνδυασμένου φορτίου εξωτερικής πίεσης και κάμψης. Μελετώντας τον μεγάλο αριθμό πειραμάτων υπό κλίμακα και τον περιορισμένο αριθμό πειραμάτων πλήρους κλίμακας τεσσάρων σημείων, η κατανόηση του μηχανισμού δημιουργίας τοπικού λυγισμού αυξήθηκε περαιτέρω. Επιπλέον δοκιμές κάμψης σε δοκίμια μικρής κλίμακας πραγματοποιήθηκαν από τους Tugcu και Schroeder [14], των οποίων η έρευνα περιλαμβάνει κυρίως δοκιμές σε σωλήνες με κλάδους πέραν από μερικές δοκιμές σε απλούς σωλήνες, και Reddy [15], οι οποίοι πειραματίστηκαν με σωλήνες από χάλυβα και αλουμίνιο αναλογιών D/t έως 80. Η τελευταία έρευνα περιλαμβάνει επίσης τη μέτρηση των διαμήκων προφίλ του σωλήνα κατά την έναρξη του τοπικού λυγισμού. Επιπρόσθετα, δοκιμές σε λεπτότοιχους σωλήνες ($D/t = 81-102$) ενδιάμεσης κλίμακας εκτελέστηκαν από τους Van Douwen et al. [16], καθώς και μικρότερης κλίμακας από τους Kyriakides και Shaw [17] και Kyriakides και Ju [18]. Σε αυτές τις δύο δημοσιεύσεις, αναφέρθηκαν περισσότερες από είκοσι δοκιμές σε δείγματα χάλυβα και αλουμινίου υπό μονοτονική ή κυκλική κάμψη.

Από τις πρώτες δοκιμές μεγάλης κλίμακας εκτελέστηκαν από τους Jirsa et al. [19]. Η συγκεκριμένη έρευνα περιλαμβάνει έξι δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε σωλήνες έως 20 ιντσών, δύο εκ των οποίων έχουν εξωτερικό περίβλημα από τσιμέντο. Τα διαγράμματα ροπής κάμψης – καμπυλότητας που προκύπτουν από τις δοκιμές αυτές προσομοιάστηκαν με

μια αναλυτική μέθοδο που είχε δημοσιευθεί νωρίτερα από τον Ades [20], η οποία επιτρέπει μια διατομεακή ανάλυση της συμπεριφοράς κάμψης των δειγμάτων, συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης της οβλοποίησης, αλλά δεν μπορεί να προβλέψει τη δημιουργία του τοπικού λυγισμού. Περαιτέρω δοκιμές σε μεγάλη κλίμακα πραγματοποιήθηκαν από τον Sherman [21]. Αυτό το πρόγραμμα δοκιμών περιλαμβάνει σωλήνες με αναλογίες D/t μεταξύ 18 και 102 σε διάφορες συνθήκες φόρτισης, που οδηγούν σε συνδυασμό ροπής κάμψης και δύναμης διατμήσεως στις κρίσιμες διατομές των δειγμάτων. Τελευταία, πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από 50 δοκιμές κάμψης σε απλούς σωλήνες και σωλήνες με περιμετρικές συγκολλήσεις (GW) στο Πανεπιστήμιο της Αλμπέρτα, οι οποίες παρουσιάζονται από τους Dorey et al. [22], Delcol et al. [23], Dorey et al. [24], Mohareb et al. [25] και Yoosef-Godsi et al. [26]. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα με αναλογίες D/t μεταξύ 48 και 92. Τα αποτελέσματα δίνουν ότι η ύπαρξη περιφερειακών συγκολλήσεων (GW) έχει αρνητική επίδραση στην δημιουργία της κρίσιμης διατομής.

Μια από τις πρώτες έρευνες σχετικά με την επίδραση της τεχνικής κατασκευής των σωλήνων στη συμπεριφορά τους σε κάμψη πραγματοποιήθηκε από τον Bouwkamp [27], ο οποίος πραγματοποίησε δοκιμές κάμψης σε σωλήνες συγκολλημένους κατά μήκος και χωρίς ραφή. Σε μια άλλη δημοσίευση του ίδιου συγγραφέα [28], έχουν αναφερθεί πειραματικές έρευνες σχετικά με την συμπεριφορά σωλήνων (48 in.) σε τοπικό λυγισμό. Η εργασία των Van Foecken και Gresnigt [29], [30] έχει μελετήσει περαιτέρω την επίδραση της μεθόδου κατασκευής ενός σωλήνα στον τοπικό λυγισμό, συγκρίνοντας την συμπεριφορά κατάρρευσης και κάμψης για σωλήνες κατασκευασμένους με την UOE μέθοδο και σωλήνες χωρίς ραφή.

Η πειραματική έρευνα σχετικά με τη συμπεριφορά κάμψης ελικοειδώς συγκολλημένων σωλήνων είναι σχετικά σπάνια. Η εργασία των Zimmerman et al. [31] περιλαμβάνει πειράματα κάμψης σε τέσσερις ελικοειδείς σωλήνες με λόγους D/t μεταξύ 48 και 82. Δύο από αυτά τα πειράματα περιλάμβαναν εσωτερική πίεση η οποία προκάλεσε περιφερειακές τάσεις της τάξεως του 80% του καθορισμένου ελάχιστου ορίου διαρροής. Δεν έχει διεξαχθεί άμεση πειραματική σύγκριση με άλλες κατασκευαστικές τεχνικές, αλλά γίνεται σύγκριση με πειραματικά δεδομένα από τη βιβλιογραφία. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η συγκόλληση ελικοειδούς ραφής μπορεί να μην είναι αρνητική για το όριο διαρροής του σωλήνα και ότι ο ελικοειδώς συγκολλημένος σωλήνας συμπεριφέρεται όσο καλά και οι σωλήνες με ευθεία ραφή σε ότι αφορά στον τοπικό λυγισμό. Περαιτέρω πειραματικές δοκιμές σε ελικοειδώς συγκολλημένους σωλήνες πραγματοποιήθηκαν από τον Salzgitter Mannesmann,

και αναφέρονται από τους Zimmermann et al. [32]. Σε αυτή την έρευνα, πειράματα κάμψης τεσσάρων σημείων πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερις ελικοειδείς σωλήνες. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών κάμψης, δύο από τα δείγματα υποβλήθηκαν σε πίεση μέχρι ένα επίπεδο που οδηγούσε σε τάση στην περιφερειακή διεύθυνση της τάξεως του 66% του καθορισμένου ελάχιστου ορίου διαρροής. Σε σύγκριση με τα κοινά πρότυπα σχεδιασμού, η απόδοση των δειγμάτων θεωρείται ικανοποιητική. Όμως ούτε η έρευνα [31] ούτε η έρευνα [32] περιλαμβάνει την επιρροή της περιφερειακής συγκόλλησης (GW) και της (CCW) στην συμπεριφορά του τοπικού λυγισμού. Οκτώ δοκιμές κάμψης σε ελικοειδώς συγκολλημένους σωλήνες έχουν εκτελεστεί από τους Reinke et al. [33] ως μέρος του ίδιου ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος το οποίο αποτελεί μέρος της έρευνας στις οποίες τα αποτελέσματα βασίστηκε η παρούσα εργασία [1]. Η έρευνα των Reinke et al. καταλήγει στο συμπέρασμα ότι τα πειράματα δείχνουν πως οι ελικοειδώς συγκολλημένοι σωλήνες είχαν καλή απόδοση και ότι η αρνητική επίδραση της ελικοειδούς συγκόλλησης στη συμπεριφορά των δοκιμίων σε κάμψη είναι αμελητέα.

Τα δεδομένα σύγκρισης της εργασίας αυτής όπως αναφέρθηκε και παραπάνω βασίστηκαν στα πειραματικά αποτελέσματα της έρευνας των Van Es. et al [2]. Η έρευνα αυτή αποτελεί μέρος ενός μεγάλου ερευνητικού έργου με το ακρωνύμιο COMBITUBE, το οποίο χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή στο πλαίσιο του προγράμματος RFCS 74[4]. Η έρευνα αυτή εξετάζει τη συμπεριφορά σε κάμψη χαλύβδινων σωλήνων μεγάλης διαμέτρου, εστιάζοντας στον προσδιορισμό της μέγιστης ικανότητάς τους σε κάμψη και της αντίστοιχης καμπυλότητας λυγισμού, λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις της διαδικασίας κατασκευής ελικοειδούς συγκόλλησης. Επιπλέον, συμπεριλαμβάνονται τυπικά χαρακτηριστικά των σωλήνων που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές, όπως η περιφερειακή συγκόλληση (GW) ή η συγκόλληση σύνδεσης σπειρών (CCW). Η αναφερόμενη εργασία περιλαμβάνει διεξοδική πειραματική έρευνα σε σωλήνες διαμέτρου 42 ιντσών με εκτεταμένες μετρήσεις της αρχικής γεωμετρίας των σωλήνων.

2.1.1 Η πειραματική διάταξη και τα δείγματα της έρευνας στην οποία βασίστηκε η συγκριτική μελέτη

2.1.1.1 Παρουσίαση της πειραματικής διαδικασίας και των δοκιμών

Για να διερευνηθεί η συμπεριφορά σε τοπικό λυγισμό των ελικοειδώς συγκολλημένων σωλήνων, εκτελέστηκαν μεγάλης κλίμακας πειράματα. Η εργασία συμπεριλαμβάνει έρευνα της αρχικής γεωμετρίας των σωλήνων, εκτεταμένη δοκιμή των υλικών και τεστ κάμψης τεσσάρων σημείων.

Το πρόγραμμα αποτελείται από δεκατρείς ελικοειδώς συγκολλημένους σωλήνες χάλυβα διαμέτρου 42 ιντσών. Όλα τα δείγματα έχουν καθορισμένη εξωτερική διάμετρο 1067mm, με αναλογίες D/t κυμαινόμενες από 65 έως 120, μήκος 16.500mm και ποιότητες χάλυβα που κυμαίνονται από X52 έως X70. Η έρευνα δεν περιορίζεται σε απλούς σωλήνες μόνο με σπειροειδή συγκόλληση, αλλά περιλαμβάνει επίσης και πρόσθετες συγκολλήσεις στα δείγματα, όπως περιφερειακές συγκολλήσεις (GW) και συγκολλήσεις σύνδεσης σπειρών (CCW). Εάν υπάρχουν τέτοιες συγκολλήσεις σε ένα δείγμα, το δείγμα διαιρείται με τη συγκόλληση αυτή σε δύο ή περισσότερα τμήματα, με κάθε τμήμα να έχει τις δικές του υλικές και γεωμετρικές ιδιότητες. Αυτά τα τμήματα αναφέρονται ως «δείγματα» και προσδιορίζονται με την προσθήκη των δεικτών «left», «middle» και «right» στους αναγνωριστικούς δείκτες. Μια επισκόπηση των δοκιμών που υπεβλήθησαν στο πείραμα φαίνεται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Επισκόπηση του προγράμματος δοκιμών. Μέσες διαστάσεις ως προς το μήκος δείγματος.

Δοκίμιο	D [mm]	t [mm]	D/t	Τύπος	Υλικό
T1	1066	16,4	65,1	Plain	X70
T2	1067	9,0	118,0	Plain	X60
T3	1069	9,0	118,0	GW	X60
T4	1065	9,2	116,0	Plain	X60
T5	1070	9,0	118,0	Plain	X60
T6	1066	16,3	65,3	CCW	X70
T7	1068	16,3	65,4	GW & GGW	X70
T8	1068	9,1	117,0	Plain	X60
T9	1069	16,3	65,4	Plain	X70
T10	1070	13,1	81,6	GW & CCW	X52/X60
T11	1068	12,9	83,0	Plain	X52/X60
T12	1069	9,1	117,0	GW & CCW	X60
T13	1070	9,2	117,0	GW	X60

Λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία της διάταξης του πειράματος κάμψης τεσσάρων σημείων, όλες οι έρευνες επικεντρώνονται στα 4000mm εκατέρωθεν του κέντρου του δοκιμίου, που είναι το τμήμα με σταθερή ροπή κάμψης κατά την διάρκεια του πειράματος.

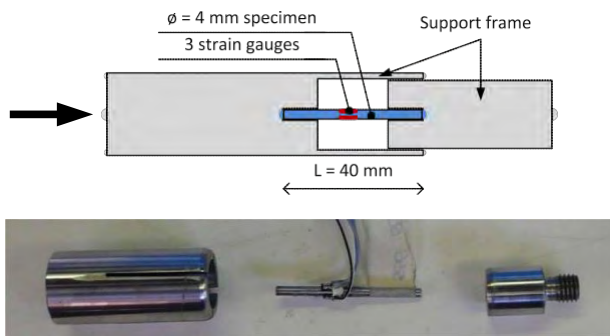
Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού του υλικού, του μετρημένου πάχους τοιχώματος, των αρχικών ατελειών και της οπτικής παρατήρησης, ορισμένα δείγματα φαίνονται πολύ παρόμοια (π.χ., όλα τα δείγματα έχουν πάχος τοιχώματος περίπου 9mm). Επιπλέον αυτά τα δείγματα έχουν παραχθεί από τον ίδιο κατασκευαστή, πιθανώς ακόμη και από την ίδια παρτίδα παραγωγής.

2.1.1.2 Παρουσίαση των δοκιμών του υλικού και των μετρήσεων της αρχικής γεωμετρίας

Η σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων των δοκιμών απαιτεί πληροφορίες σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών. Επιπρόσθετα, αυτό μπορεί να δώσει μια εικόνα των επιπτώσεων της ψυχρής έλασης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής και να επιτρέψει την αξιόπιστη μοντελοποίηση των πειραμάτων. Για κάθε δείγμα, εκτελέστηκαν δοκιμές εφελκυσμού στη διαμήκη κατεύθυνση του άξονα του σωλήνα και στην περιφερειακή κατεύθυνση σε δοκίμια από το εσωτερικό και το εξωτερικό του τοιχώματος του σωλήνα. Αυτά τα δοκίμια έχουν εξαχθεί από τους σωλήνες με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην χρειάζονται ίσιωμα μετά. Επιπλέον, από διάφορους σωλήνες, έχουν εξαχθεί δοκίμια πλήρους πάχους,

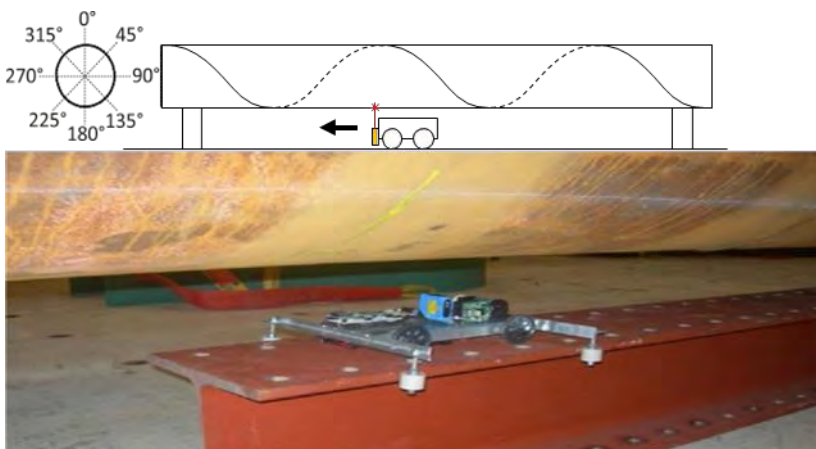
προσανατολισμένα στη διαμήκη ή στην περιφερειακή κατεύθυνση. Πρόσθετα δοκίμια πλήρους πάχους έχουν ληφθεί στις αξονικές και κάθετες κατευθύνσεις σε σχέση με το αρχικό έλασμα. Έχει διεξαχθεί, επίσης, έλεγχος εφελκυσμού μικρών δοκιμών που εξήχθησαν από περιοχές με σπειροειδείς συγκολλήσεις.

Έχουν γίνει δοκιμές του υλικού σε θλίψη σε διάφορους σωλήνες για να εξεταστεί κατά πόσο η συμπεριφορά του υλικού σε εφελκυσμού και θλίψη είναι παρόμοια. Για να εκτελεστούν δοκιμές θλίψης, εξάγονται μικροί κύλινδροι από το τοίχωμα του σωλήνα και θλίβονται ενώ ταυτόχρονα στηρίζονται, σε κάθε πλευρά, ενάντια στην στρέψη τους. Μια επισκόπηση της διάταξης της δοκιμής θλίψης παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1. Το επίκεντρο των δοκιμών θλίψης είναι να προσδιοριστεί σε ποια έκταση η ψυχρή έλαση της πλάκας κατά την κατασκευή του σωλήνα οδηγεί σε ασυμμετρία στην συμπεριφορά εφελκυσμού / θλίψης του υλικού.



Εικόνα 2.1 Σχηματική επισκόπηση και φωτογραφία της διάταξης της δοκιμής θλίψης με το δείγμα, τους μετρητές τάσης και την υποστήριξη.

Η αρχική γεωμετρία όλων των δοκιμών καταγράφεται λεπτομερώς. Το εξωτερικό προφίλ του σωλήνα έχει σαρωθεί χρησιμοποιώντας ένα λέιζερ τρόλεϊ που οδηγείται με ράγες κάτω από το δείγμα. Μια επισκόπηση της εν λόγω διάταξης παρουσιάζεται στην εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2 Σχηματική επισκόπηση και φωτογραφία των μετρήσεων λέιζερ των γεωμετρικών ατελειών.

Ο σωλήνας τοποθετείται σε δύο κυλίνδρους επιτρέποντας στον χειριστή να τον περιστρέψει γύρω από τον διαμήκη άξονά του. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται σαρώσεις της επιφάνειας του σωλήνα σε διάφορους προσανατολισμούς. Τα πρώτα δοκίμια έχουν σαρωθεί σε οκτώ προσανατολισμούς (κάθε 45 °), για τα επόμενα δείγματα το διάστημα έχει μειωθεί σε 22,5 °. Οι αρχικές μετρήσεις διορθώθηκαν για να ληφθεί υπόψη η κοιλιά του σωλήνα που δημιουργείται εξαιτίας του βάρους του, η μη ομοιότητα των υποστηριγμάτων και οποιεσδήποτε άλλες ατέλειες στις ράγες οδήγησης του τρόλεϊ. Η τελευταία διόρθωση πραγματοποιήθηκε με σάρωση μίας τέλει επιφάνειας ρευστού με το τρόλεϊ, οι μετρήσεις της οποίας χρησιμοποιήθηκαν ως μέτρο αναφοράς.

Επιπλέον, η διάμετρος του σωλήνα και το πάχος τοιχώματος έχουν μετρηθεί σε διάφορες θέσεις. Πιο συγκεκριμένα, το πάχος μετρήθηκε χρησιμοποιώντας συσκευή υπερήχων μέτρησης πάχους σε οκτώ θέσεις γύρω από την περιφέρεια και σε ενδιάμεσες διατομές κατά μήκος του δείγματος. Επιπλέον, η ομοιομορφία του πάχους της αρχικής περιτυλιγμένης πλάκας διερευνήθηκε με μια σειρά μετρήσεων πάχους τοιχώματος κατά μήκος μίας γραμμής κάθετης προς τις σπειροειδείς συγκολλήσεις. Η διάμετρος του σωλήνα μετρήθηκε χρησιμοποιώντας ένα βραχίονα που είναι τοποθετημένος με αισθητήρες απόστασης, λέιζερ. Περιστρέφοντας τον σωλήνα γύρω από τον άξονά του, όπως με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη σάρωση του προφίλ του, λήφθηκαν μετρήσεις διαμέτρου σε τέσσερις διαφορετικές κατευθύνσεις σε πέντε θέσεις κατά μήκος του δοκιμίου.

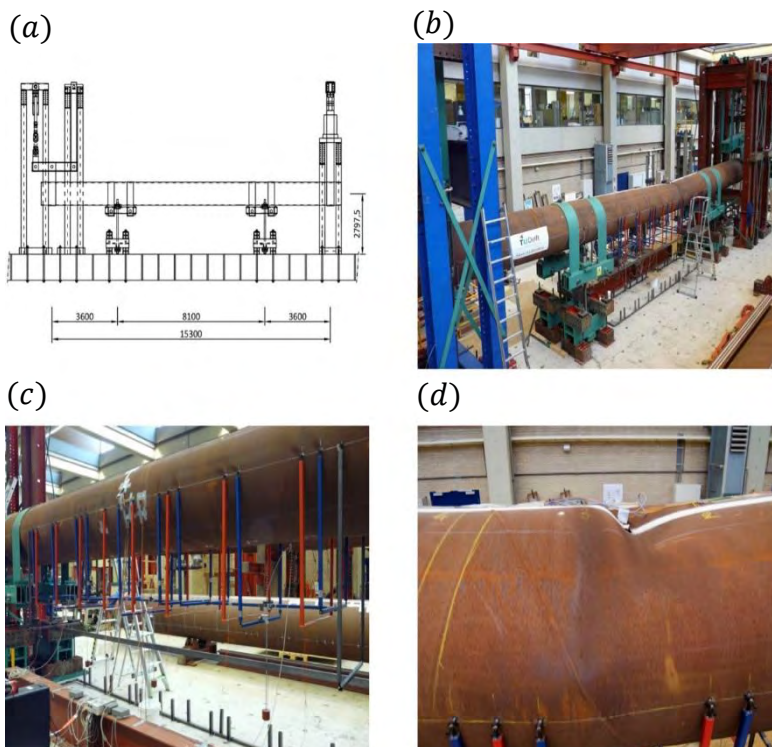
2.1.1.3 Διάταξη πειράματος κάμψης τεσσάρων σημείων

Για να προσδιοριστεί η μέγιστη ικανότητα κάμψης των σωλήνων, τα δείγματα υποβάλλονται σε κάμψη τεσσάρων σημείων μέχρις ότου εμφανιστεί ο τοπικός λυγισμός. Λαμβάνοντας υπόψη τη μεγάλη διάμετρο των σωλήνων, οι δυνάμεις που συμμετέχουν στη δοκιμή είναι σημαντικής κλίμακας. Η διάταξη του πειράματος έχει σχεδιαστεί για να παρέχει μέγιστο 3500kN σε κάθε άκρο του δείγματος με διαδρομή 350mm. Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις απαιτήσεις και την περιορισμένη διαθεσιμότητα υδραυλικών μηχανισμών μεγάλης δυναμικότητας, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί μηχανισμοί σε κάθε πλευρά της δοκιμαστικής εγκατάστασης. Παρά την ανομοιότητα αυτή, η φόρτιση στο δείγμα είναι συμμετρική. Μια επισκόπηση της πειραματικής διάταξης παρουσιάζεται την εικόνα 2.3.

Για να ελαχιστοποιηθούν οι επιδράσεις λόγω έναρξης της φόρτισης στη συμπεριφορά του δοκιμίου σε τοπικό λυγισμό, τα φορτία εφαρμόζονται μέσω λεπτών, εύκαμπτων ιμάντων.

Επιπλέον, στη μεσαία στήριξη, το φορτίο κατανέμεται σε δύο ιμάντες σε κάθε στήριγμα, για περαιτέρω μείωση των επιδράσεων αυτών στο τοπικό λυγισμό.

Όλες οι δοκιμές κάμψης πραγματοποιούνται σε ένα σχήμα ελεγχόμενης μετατόπισης. Οι μετατοπίσεις αυξάνονται σε μικρά βήματα, μετά από τα οποία πραγματοποιείται μια σειρά μετρήσεων λέιζερ. Μετά το σχηματισμό του τοπικού λυγισμού, η φόρτιση συνεχίζεται μέχρι να φτάσει στο τέλος της διαδρομής του υδραυλικού μηχανισμού ή μέχρις ότου ένα στάδιο όπου περαιτέρω σχηματισμός του τοπικού λυγισμού θα προκαλέσει βλάβη στον εξοπλισμό μέτρησης. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, το δείγμα είναι προσανατολισμένο έτσι ώστε το εσωτερικό του να συμπίπτει με ένα από τα προφίλ της σκαναρισμένης γεωμετρίας. Με βάση τις αρχικές μετρήσεις γεωμετρίας που παρουσιάζονται παρακάτω, επιλέχθηκε ο δυσμενέστερος προσανατολισμός του σωλήνα για τη δοκιμή.

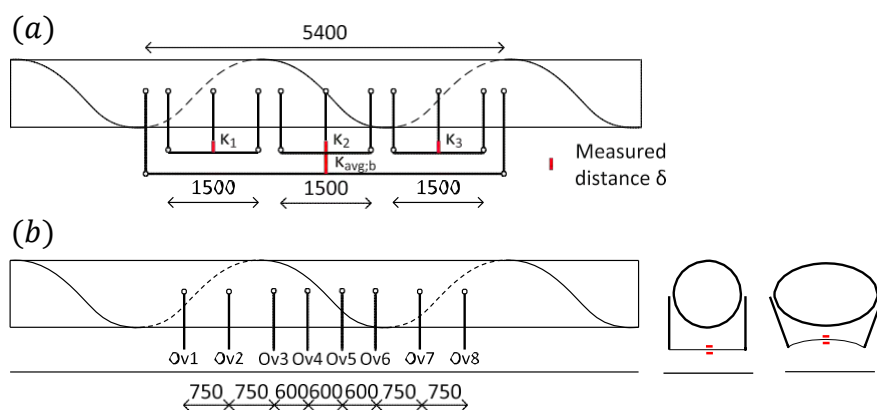


Εικόνα 2.3 Επισκόπηση της εγκατάστασης δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων, (a) Σκίτσο της πειραματικής διάταξης, (b) Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης μετά τον σχηματισμό μιας τοπικού λυγισμού, (c) Στηρίγματα για την μέτρηση της οβαλοποίησης και της καμπυλότητας, d) Τοπικός λυγισμός στο δείγμα T11

➤ Συνεχείς μετρήσεις

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, εκτελείται μια ευρεία σειρά συνεχών μετρήσεων. Φυσικά, παρακολουθούνται οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις και οι μετατοπίσεις και στα τέσσερα

σημεία εφαρμογής φορτίου. Επιπλέον, μετρούνται οι παραμορφώσεις στο εσωτερικό και εξωτερικό του λυγισμένου δείγματος, το φαινόμενο της οβαλοποίησης σε οκτώ θέσεις και οι ακτίνες καμπυλότητας. Η καμπυλότητα μετράται με χρήση αισθητήρων (εικόνες 2.3(c) και 2.4(a)). Για κάθε μέτρηση της καμπυλότητας, συνδέονται τρεις βραχίονες στον ουδέτερο άξονα του δείγματος, από τους οποίους οι δύο εξωτερικοί είναι συζευγμένοι. Η απόσταση δ μεταξύ του μεσαίου βραχίονα και της ράβδου που συνδέει τους δύο εξωτερικούς βραχίονες χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της καμπυλότητας κάμψης χρησιμοποιώντας μία απλή παρεμβολή: $\kappa = 8\delta/L^2$, όπου L είναι η απόσταση μεταξύ των δύο εξωτερικών βραχιόνων.

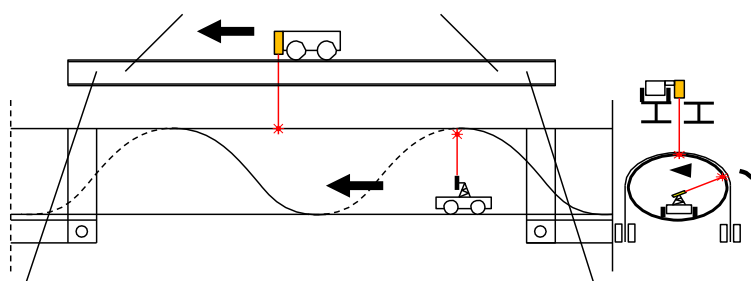


Εικόνα 2.4 (a) Μετρήσεις καμπυλότητας των σωλήνων, (b) Μετρήσεις οβαλοποίησης των σωλήνων.

Χρησιμοποιούνται τρεις βραχίονες (K_1 , K_2 και K_3) για τη μέτρηση της καμπυλότητας σε μήκος 1500mm, που είναι περίπου 1,4 φορές η διάμετρο του δείγματος. Μια επιπλέον μέτρηση μεγαλύτερης καμπυλότητας ($K_{avg,b}$) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέσης καμπυλότητας σε πολύ μεγαλύτερο μήκος εντός, πάντα, του τμήματος σταθερής ροπής κάμψης του καμπτόμενου σωλήνα. Εκτός από αυτές τις μετρήσεις, η μέση καμπυλότητα υπολογίζεται επίσης από τις μετρούμενες μετατοπίσεις στα τέσσερα σημεία εφαρμογής του φορτίου του σωλήνα ($K_{avg,U}$). Η περιστροφή των μεσαίων στηριγμάτων υπολογίζεται από αυτές τις μετατοπίσεις και μια ανάλυση ελαστοπλαστικής κάμψης των δύο εξωτερικών "βραχιόνων φόρτισης" του δοκιμίου. Η καμπυλότητα μπορεί στη συνέχεια να προσδιοριστεί εύκολα από αυτές τις περιστροφές, υποθέτοντας μια σταθερή καμπυλότητα πάνω από το μεσαίο τμήμα του σωλήνα. Η οριζόντια συνιστώσα της οβαλοποίησης των σωλήνων μετριέται με προσάρτηση βραχιόνων με εύκαμπτες οριζόντιες λωρίδες στην ουδέτερη γραμμή του δοκιμίου των οποίων μετριέται η παραμόρφωση σχήμα 2.4(b).

➤ Διακριτές μετρήσεις της γεωμετρίας του σωλήνα

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, ένα τρόλεϊ, που βρίσκεται σε σιδηροτροχιές αναρτημένες πάνω από το δείγμα, παρακολουθεί την ανάπτυξη γεωμετρικών ατελειών με σάρωση με λέιζερ. Το τρόλεϊ είναι σε θέση να παρέχει πολύ ακριβείς μετρήσεις, αλλά αυτές οι μετρήσεις πρέπει να διορθωθούν για να ληφθεί η καμπυλότητα του δείγματος, καθώς οι ράγες δεν καμπυλώθηκαν με το δείγμα. Ένα πρόσθετο τρόλεϊ στο εσωτερικό του δείγματος, εκτελεί σαρώσεις γραμμών παρόμοιες με του εξωτερικού τρόλεϊ. Καθώς αυτό το τρόλεϊ κινείται μέσα στον λυγισμένο σωλήνα, δεν είναι απαραίτητη καμία διόρθωση για την καμπυλότητα. Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η μικρότερη ακρίβεια της μέτρησης, που προκαλείται από την ανομοιογενή επιφάνεια οδήγησης του φορείου και την λάθος ανάκλαση του λέιζερ λόγω πιθανής ακαθαρσίας στο εσωτερικό του τοιχώματος του σωλήνα.



Εικόνα 2.5 Επισκόπηση της σάρωσης με λέιζερ κατά τη διάρκεια της δοκιμής, (α) Σχηματική επισκόπηση της σάρωσης με λέιζερ κατά τη διάρκεια του πειράματος, (β) Αναρτημένες σιδηροτροχιές με εξωτερικό τρόλεϊ λέιζερ, (γ) Εσωτερικό τρόλεϊ λέιζερ.

Εκτός από τις διαμήκεις σαρώσεις, το εσωτερικό τρόλεϊ είναι επίσης ικανό να πραγματοποιεί περιμετρικές σαρώσεις του σωλήνα που παρέχουν πληροφορίες για το πραγματικό σχήμα της διατομής. Με τη χρήση περιφερειακών σαρώσεων σε πολύ κοντινές αποστάσεις, θα μπορούσαν επίσης να ληφθούν και τρισδιάστατες εικόνες του τμήματος με λυγισμό. Καθώς αυτές οι εσωτερικές και εξωτερικές σαρώσεις απαιτούν το δείγμα να είναι

ακίνητο, εκτελούνται μεταξύ των βημάτων του φορτίου. Ένα σκίτσο των δύο τρόλεϊ και μία φωτογραφία του εσωτερικού και εξωτερικού τρόλεϊ παρουσιάζεται στην εικόνα 2.5.

2.1.2 Τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών μετρήσεων της πειραματικής έρευνας στην οποία βασίστηκε η συγκριτική μελέτη

2.1.2.1 Συμπεριφορά υλικού σε εφελκυσμό και θλίψη

Μια επισκόπηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών εφελκυσμού στα δείγματα παρουσιάζεται στον πίνακα 2.2 σε όρους εφελκυστικής τάσης ορίου διαρροής σ_y που αντιστοιχεί σε 0,2% μόνιμη πλαστική παραμόρφωση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, κατά μέσο όρο, το όριο διαρροής στην διαμήκη διεύθυνση είναι κατά 6,7% υψηλότερο από αυτό της περιφερειακής κατεύθυνσης. Επιπλέον, το όριο διαρροής στο εσωτερικό του τοιχώματος του σωλήνα είναι περίπου 3,7% χαμηλότερο από ότι στο εξωτερικό του τοιχώματος του σωλήνα. Αυτές οι τιμές διαφέρουν μεταξύ των σωληνωτών δειγμάτων, αλλά παρουσιάζουν ομοιότητες μεταξύ των σωληνών που θεωρείται ότι προέρχονται από την ίδια παρτίδα παραγωγής.

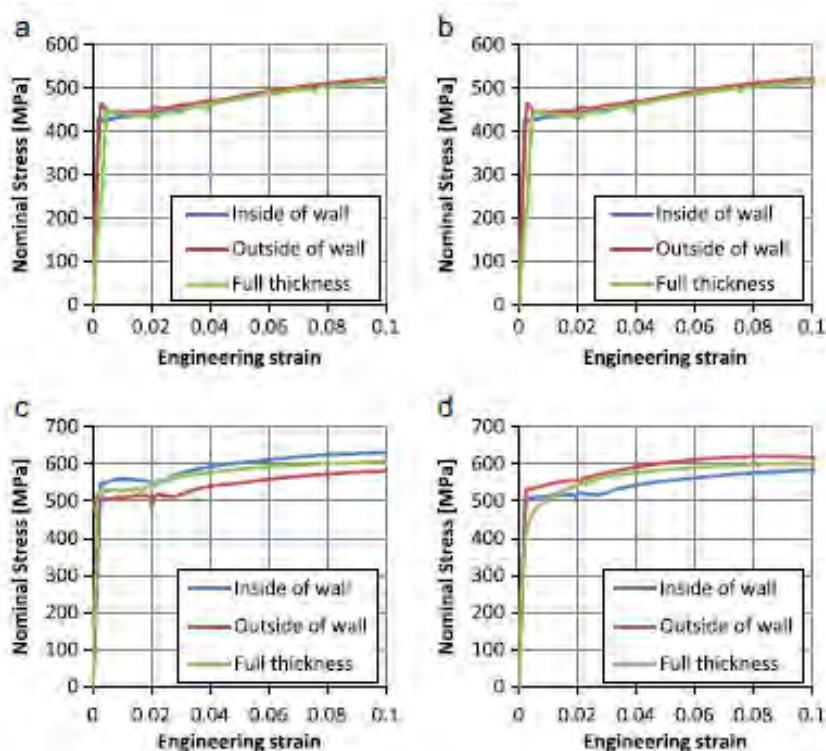
Πίνακας 2.2 Επισκόπηση του ορίου διαρροής σ_y σε MPa, όπως αυτό μετρήθηκε από τα δείγματα που εξήχθησαν

Όνομασία δοκιμίου	Τύπος δείγματος	Εσωτερικά του τοιχώματος		Εξωτερικά του τοιχώματος	
		Αξονική	Περιφερειακή	Αξονική	Περιφερειακή
T1	Plain	510	508	555	584
T2	Plain	401	379	412	374
T3 Left	GW	381	326	403	392
T3 Right		431	374	436	393
T4	Plain	427	389	455	408
T5	Plain	419	411	379	400
T6 Left	CCW	550	508	505	534
T6 Right		520	519	573	576
T7 Left	GW/CCW	605	497	622	585
T7 Middle		614	452	594	573
T7 Right		623	529	592	550
T8	Plain	448	421	457	413
T9	Plain	609	510	617	555
T10 Left	GW/CCW	527	476	559	538
T10 Middle		521	450	489	486
T10 Right		329	304	336	340
T11	Plain	343	326	357	334
T12 Left		453	416	441	421
T12 Middle		499	472	516	467
T12 Right		436	414	462	423
T13 Left	GW	440	403	446	412
T13 Right		461	423	464	434

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.1.1.3, έχουν εκτελεστεί δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια που εξήχθησαν κατά τη διαμήκη και περιφερειακή κατεύθυνση, καθώς και στο

εσωτερικό και το εξωτερικό του τοιχώματος του σωλήνα. Δεδομένου ότι η κύρια φόρτιση κατά τη διάρκεια των δειγμάτων είναι σε διαμήκη κατεύθυνση, το όριο διαρροής ενός δείγματος ή τμήματος δείγματος ορίζεται ως το μέσο όριο διαρροής των δοκιμίων που έχουν εξαχθεί κατά τη διαμήκη κατεύθυνση.

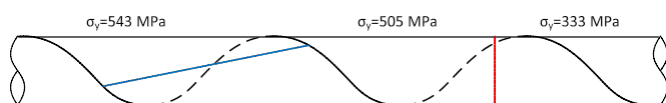
Η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα δοκίμια που εξήχθησαν από την εσωτερική ή εξωτερική πλευρά του αγωγού και τα δοκίμια πλήρους πάχους είναι καλή. Μερικά παραδείγματα αυτής της σύγκρισης παρουσιάζονται στην εικόνα 2.6. Σε περίπτωση διαφορετικών αποτελεσμάτων για τα δείγματα που λαμβάνονται από το εσωτερικό και το εξωτερικό του τοιχώματος του σωλήνα, τα αποτελέσματα από τα αντίστοιχα δείγματα πλήρους πάχους συνήθως βρίσκονται στο ενδιάμεσο. Δεδομένου ότι τα δείγματα πλήρους πάχους που έχουν εξαχθεί κατά την περιφερειακή διεύθυνση πρέπει να ισιωθούν για τη δοκιμή, σε πολλές περιπτώσεις εξαφανίζεται η απότομη αλλαγή στο όριο διαρροής, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.6c και 2.6d.



Εικόνα 2.6 Σύγκριση δοκιμών εφελκυσμού από τα εξαγμένα δείγματα με τα δείγματα πλήρους πάχους για δύο δοκίμια, (α) T4 – διαμήκης κατεύθυνση, (β) T4 – περιφερειακή κατεύθυνση, (γ) T6 Left – διαμήκης κατεύθυνση, (δ) T6 Left – περιφερειακή κατεύθυνση.

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχετικά μικρή διαφορά των ιδιοτήτων των υλικών μεταξύ της περιφερειακής κατεύθυνσης και της διαμήκουσ κατεύθυνσης (βλέπε πίνακα 2.2), δεν είναι έκπληξη το γεγονός ότι οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των δοκιμών πλήρους πάχους κατά μήκος του αρχικού ελάσματος και κάθετα σ' αυτό καθώς και των αποτελεσμάτων κατά τις κύριες κατευθύνσεις του σωλήνα είναι πολύ μικρές. Η επίδραση του ισιώματος των δειγμάτων πλήρους πάχους σε κατευθύνσεις διαφορετικές από αυτές της αξονικής δημιουργεί κάποια επιπλέον φαινομενική ανισοτροπία.

Όλα τα δείγματα που περιέχουν περιφερειακή συγκόλληση (GW) ή συγκόλληση σύνδεσης ελάσματος (CCW) αποτελούνται από δύο ή περισσότερα τμήματα δείγματος. Η συμπεριφορά των δύο αυτών μερών δεν είναι ίση, οδηγώντας σε μια ισχυρή και αδύναμη πλευρά της συγκόλλησης. Ωστόσο, οι διαφορές είναι σχετικά μικρές. Εξάιρεση είναι το δείγμα T10, το οποίο αποτελείται από δύο μέρη, ένα με όριο διαρροής πάνω από 500 N/m^2 , και ένα ασθενέστερο με όριο διαρροής 333 N/m^2 (βλέπε εικόνα 2.7). Αυτή η μεγάλη διαφορά δεν αναμενόταν εκ των προτέρων.



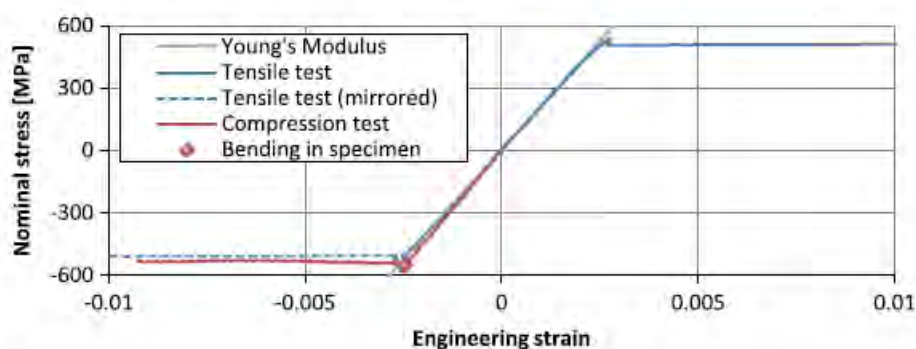
Εικόνα 2.7 Σκίτσο του δείγματος T10 που διαθέτει συγκόλληση περιμετρική που συνδέει δύο τμήματα δείγματος σημαντικής διαφορετικής αντοχής.

Η αντοχή του συγκολλημένου υλικού μετρήθηκε επίσης με πειραματικές δοκιμές. Μια πλήρης παρουσίαση όλων των αποτελεσμάτων των δοκιμών εφελκυσμού σε υλικό ελικοειδούς συγκόλλησης μπορεί να βρεθεί στο [4]. Η μέση υπερτέρηση της συγκόλλησης έχει βρεθεί ότι είναι 20% για το όριο διαρροής και 19% για όριο θραύσης. Η ολκιμότητα του συγκολλημένου υλικού έχει βρεθεί ότι είναι ικανοποιητική με τελικές τιμές παραμόρφωσης που κυμαίνονται από 17% έως 29%.

Από κάθε σύνολο δειγμάτων με παρόμοιο πάχος τοιχώματος, επιλέχθηκε ένα δοκίμιο για δοκιμές θλίψης. Η τάση στα δείγματα είναι παρόμοια με αυτή των δοκιμών εφελκυσμού που λαμβάνεται από την εφαρμοζόμενη δύναμη. Η αναφερόμενη παραμόρφωση είναι ο μέσος όρος από τους τρεις εφαρμοζόμενους μετρητές παραμόρφωσης (βλέπε σχήμα 2.1). Παρόλο που τα δοκίμια θλίψης στηρίζονται κατά του λυγισμού, η αστάθεια είναι αναπόφευκτη όταν η επιβαλλόμενη τάση πλησιάσει ή φθάσει το όριο διαρροής του υλικού, λόγω της εξαιρετικής μείωσης του μέτρου δυσκαμψίας των δειγμάτων σε αυτή την κατάσταση. Δεδομένου ότι τα

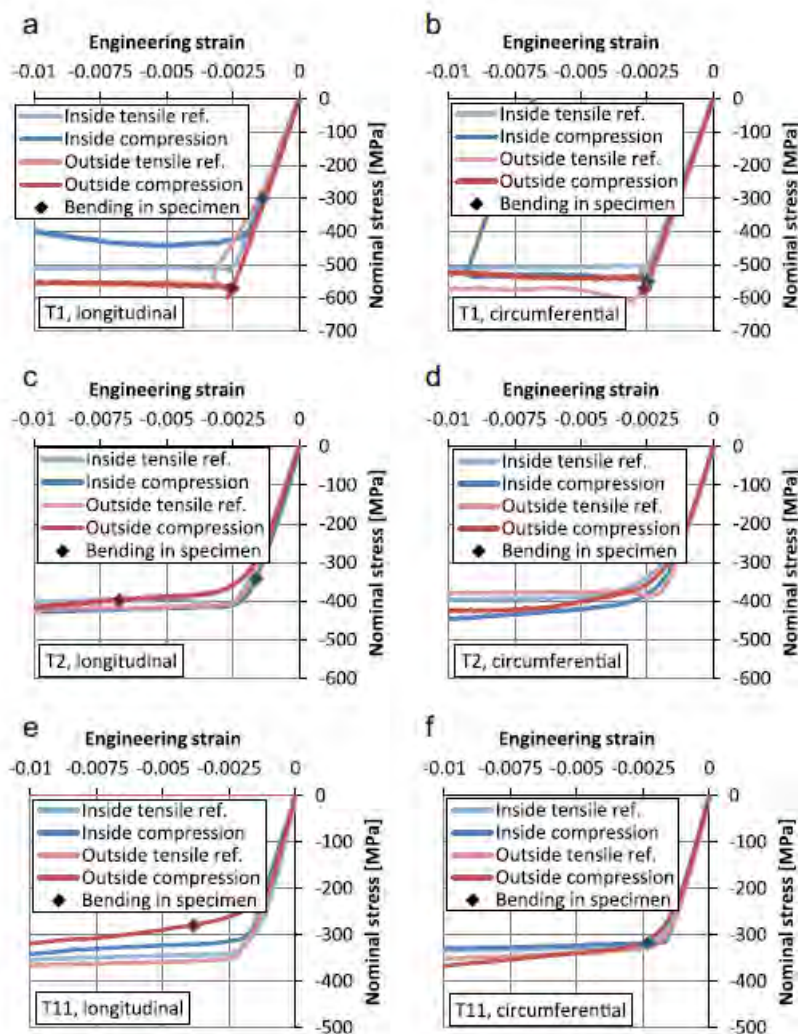
δείγματα δεν ήταν δυνατόν να παρατηρηθούν κατά τη διάρκεια της δοκιμής, δεν ήταν δυνατό να προσδιοριστεί η ακριβής στιγμή του λυγισμού των δειγμάτων. Ωστόσο, η κάμψη στο δείγμα ανιχνεύεται από τους τρεις μετρητές τάσης. Όταν ένας μετρητής τάσης αρχίζει να αποκλίνει σημαντικά από τους άλλους δύο, το δείγμα παρουσιάζει κάμψη. Αυτό το σημείο σημειώνεται στα γραφήματα. Μετά από αυτό το δείκτη, το δοκίμιο μπορεί να ήταν ασταθές σε κάποιο βαθμό.

Ένα παράδειγμα των πλήρων αποτελεσμάτων μιας δοκιμής θλίψης και της αντίστοιχης δοκιμής εφελκυσμού παρουσιάζονται στην εικόνα 2.8. Το σχήμα δείχνει τα αποτελέσματα μιας δοκιμής θλίψης και εφελκυσμού στο δείγμα T1 στην περιφερειακή κατεύθυνση στο εσωτερικό του τοιχώματος του σωλήνα. Για να συγκριθούν τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού και θλίψης, τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού απεικονίζονται τόσο στην περιοχή εφελκυσμού όσο και στην περιοχή θλίψης (διακεκομμένη γραμμή). Είναι σαφές ότι η σύγκριση μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων είναι εξαιρετική σε αυτή την περίπτωση.



Εικόνα 2.8 Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης και εφελκυσμού δειγμάτων που ελήφθησαν από το δοκίμιο T1 στην περιφερειακή κατεύθυνση στο εσωτερικό του τοιχώματος του σωλήνα.

Περαιτέρω δοκιμές θλίψης συνοψίζονται στην εικόνα 2.9. Για να καταστεί δυνατή η σύγκριση μεταξύ δοκιμών θλίψης και δοκιμών εφελκυσμού σε δείγματα που λαμβάνονται από τον ίδιο σωλήνα με τον ίδιο προσανατολισμό (διαμήκης ή περιφερειακή) και θέση στο τοίχωμα του σωλήνα (εσωτερικά ή εξωτερικά) τα αποτελέσματα των δοκιμών απεικονίζονται στην περιοχή θλίψης. Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές θλίψης είναι αρκετά παρόμοια με τα αντίστοιχα του εφελκυσμού. Ορισμένα δείγματα παρουσιάζουν πρόωρο λυγισμό, όπως το T1_{long,inside}. Ενώ, μερικά δείγματα παρουσιάζουν ένα φαινόμενο Bauschinger λόγω της παραμόρφωσης του υλικού του ελάσματος κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Αυτή η συμπεριφορά είναι πιο αξιοσημείωτη στο εξωτερικό του τοιχώματος του σωλήνα.

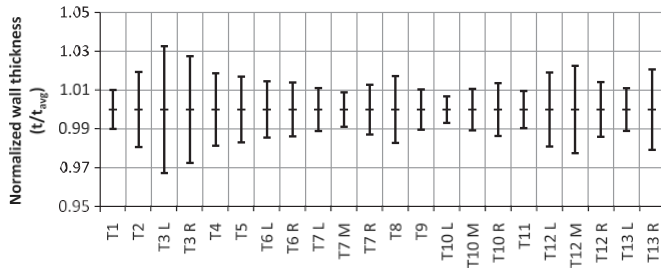


Εικόνα 2.9 Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού σε δείγματα που εξήχθησαν από τον ίδιο σωλήνα με τον ίδιο προσανατολισμό. Τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού απεικονίζονται στον τομέα της θλίψης για να διευκολυνθεί η σύγκριση με τις αντίστοιχες δοκιμές θλίψης, (a)T1 – διαμήκης κατεύθυνση, (b)T1 – περιφερειακή κατεύθυνση, (c)T2 – διαμήκης κατεύθυνση, (d)T2 – περιφερειακή κατεύθυνση, (e)T11 – διαμήκης κατεύθυνση, (f)T11 – περιφερειακή κατεύθυνση.

2.1.2.2 Μετρήσεις πάχους τοιχώματος και διαμέτρου

Το μέσο πάχος τοιχώματος κάθε δείγματος, όπως αυτό μετρήθηκε, παρατίθεται στον πίνακα 2.1. Χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή του δείγματος και τη διακύμανση ως την καλύτερη εκτίμηση για την πραγματική κατανομή τους πάχους του τοιχώματος του σωλήνα, παρουσιάζεται στην εικόνα 2.10, διάστημα εμπιστοσύνης 95% για το πάχος τοιχώματος του κάθε μέρους του δοκιμίου. Η εικόνα 2.10 δείχνει ότι η εξάπλωση του πάχους τοιχώματος είναι

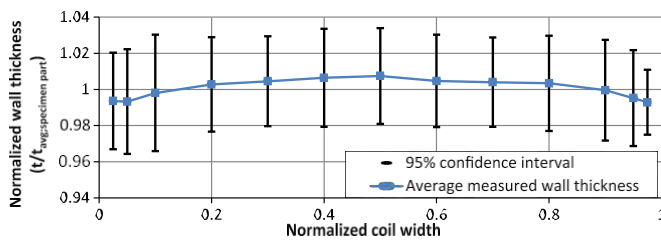
μικρή σε όλα τα τμήματα των δοκιμίων, πράγμα που αναμένεται επειδή κάθε κομμάτι του δοκιμίου κατασκευάζεται από ένα μόνο συνεχές χαλύβδινο έλασμα.



Εικόνα 2.10 Διαστήματα εμπιστοσύνης 95% των πάχους των τοιχωμάτων σε κάθε δείγμα, υπολογιζόμενα υπό την προϋπόθεση κανονικής κατανομής

Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του δείγματος T10 (βλέπε εικόνα 2.9) είναι ότι το μέρος T10_{right} έχει μέσο πάχος τοιχώματος 12,8mm, ενώ τα άλλα μέρη του δοκιμίου έχουν μέσο πάχος τοιχώματος 13,3mm. Επομένως, το δεξί μέρος είναι πολύ ασθενέστερο, λαμβάνοντας υπόψη και τις διαφορές στις ιδιότητες των υλικών.

Τα μέσα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων στο αρχικό πλάτος του ελάσματος του δοκιμίου παρουσιάζονται στην εικόνα 2.11/2.11. Με παρόμοιο τρόπο όπως στην εικόνα 2.10, ο μέσος όρος και η διακύμανση του δείγματος χρησιμοποιούνται ως καλύτερη εκτίμηση για τις πραγματικές ιδιότητες της κατανομής του πάχους. Από το σχήμα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι υπάρχει μικρή αλλά αμελητέα πτώση του πάχους τοιχώματος προς τις πλευρές του ελάσματος. Οι σταθερές μετρήσεις προς τα άκρα του ελάσματος εμφανίζουν επίσης αμελητέες μεταβολές πάχους.

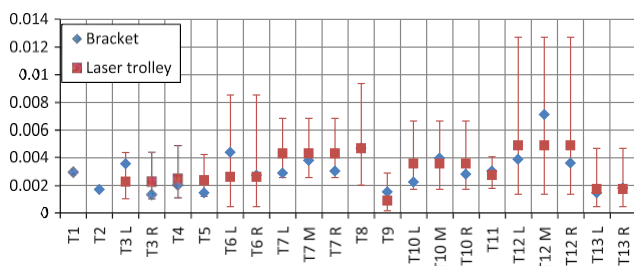


Εικόνα 2.11 Μέτρηση του πάχους στο αρχικό πλάτος του ελάσματος, ομαλοποιημένο με το μέσο πάχος του αντίστοιχου τμήματος του δείγματος. Μέσος όρος για όλα τα δείγματα. 95% διάστημα εμπιστοσύνης υπολογισμένο με την υπόθεση της κανονικής κατανομής.

Η μέση μετρημένη διάμετρος κάθε τμήματος δοκιμίου παρατίθεται στον πίνακα 2.1. Εκτός από τη μέση διάμετρο, η αρχική οβαλοποίηση του σωλήνα αναγνωρίζεται ως σχετική παράμετρος. Η παράμετρος οβαλοποίησης f ορίζεται ως $f = (D_{\max} - D_{\min}) / D_{ave}$. Πριν από το πείραμα, η διάμετρος των δοκιμίων μετρήθηκε σε τέσσερις προσανατολισμούς και πέντε

διατομές. Δεδομένης της αρχικής διαδικασίας μέτρησης, η ελάχιστη και η μέγιστη διάμετρος μιας δεδομένης διατομής δεν μετριοούνται πάντα, με αποτέλεσμα μια κατώτερη εκτίμηση για την παράμετρο f . Εναλλακτικά, η αρχική οβαλοποίηση των σωλήνων μπορεί να ληφθεί από την εσωτερική σάρωση λέιζερ που έγινε στην αρχή της δοκιμής, αν και με μικρότερη ακρίβεια λόγω των αιτίων που συζητήθηκαν νωρίτερα.

Στην εικόνα 2.12 παρουσιάζεται η μέση οβαλοποίηση και ένα διάστημα εμπιστοσύνης 95% από το κάθε δείγμα. Στις μετρήσεις από το λέιζερ, δεν μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ των τμημάτων των δοκιμίων. Επομένως, στα ξεχωριστά μέρη των δοκιμίων παρουσιάζεται ο μέσος όρος ολόκληρου του δοκιμίου κάθε φορά. Επιπλέον, δεν υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις λέιζερ για τους T1 και T2. Λαμβάνοντας υπόψη την περιορισμένη ποσότητα δεδομένων από τις μετρήσεις του βραχίονα, το διάστημα εμπιστοσύνης βασίζεται αποκλειστικά στις μετρήσεις του λέιζερ. Το διάστημα συσχέτισης υπολογίζεται με την παραδοχή ότι η μέση και η τυπική απόκλιση που υπολογίζονται από το δείγμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αληθείς παράμετροι.



Εικόνα 2.12 Μέσες παράμετροι οβαλοποίησης κάθε δείγματος. 95% διάστημα εμπιστοσύνης υπολογιζόμενο με την υπόθεση της κανονικής κατανομής.

Από την εικόνα 2.12 μπορεί να διαπιστωθεί ότι η αρχική οβαλοποίηση όλων των δοκιμίων είναι πολύ μικρή. Για παράδειγμα, κατά το σχεδιασμό σύμφωνα με τα πρότυπα DNV offshore για τους σωλήνες, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια ελάχιστη τιμή 0,005 για την παράμετρο f [34]. Οι μέσες τιμές των μετρήσεων είναι όλες, εκτός από μία εξαίρεση, χαμηλότερες από αυτή την ελάχιστη τιμή.

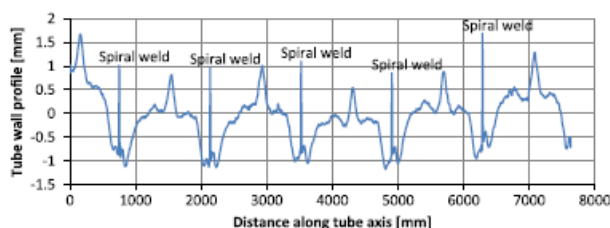
2.1.2.3 Μετρήσεις αρχικών ατελειών

Στην ανάλυση των σωλήνων με λεπτά τοιχώματα, δηλαδή με μεγάλες τιμές του λόγου D/t , οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες θεωρούνται κυρίαρχος παράγοντας για τον προσδιορισμό της αντίστασης έναντι του τοπικού λυγισμού [35]. Αν και οι σωλήνες που

εξετάζονται στην παρούσα εργασία έχουν σημαντικά χαμηλότερες τιμές της αναλογίας D/t από τους σωλήνες που εξετάζονται στην ανάλυση λυγισμού του κελύφους, οι αρχικές ατέλειες αναμένεται να έχουν μια επιρροή στη θέση του λυγισμού και στην μέγιστη ικανότητα ροπής κάμψης. Επομένως, ο προσανατολισμός του σωλήνα κατά τη διάρκεια της δοκιμής κάμψης βασίστηκε στις αρχικές ατέλειες. Για τους “απλούς” σωλήνες, δηλαδή τους σωλήνες χωρίς περιμετρική συγκόλληση ή συγκολλήσεις σύνδεσης ελασμάτων, η διαμήκης σάρωση με τη μεγαλύτερη παρατηρούμενη ατέλεια έχει τοποθετηθεί σε μέγιστη θλίψη, με εξαίρεση τις τυχαίες ζημιές, όπως χτυπήματα. Για σωλήνες με συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων ή περιφερειακή συγκόλληση, η εμφάνιση ατελειών σε αυτές τις συγκολλήσεις υπαγορεύει τον προσανατολισμό του σωλήνα κατά τη διάρκεια της δοκιμής κάμψης. Για την αριθμητική ανάλυση των δοκιμών κάμψης, η μετρούμενη αρχική γεωμετρία θα χρησιμοποιηθεί για την παροχή μιας ρεαλιστικής κλίμακας πλεγμάτων ατελειών στα αριθμητικά μοντέλα, όπως περιγράφεται στην ενότητα με τα υπολογιστικά αποτελέσματα 2.2.1.

➤ “Απλοί” ελικοειδείς σωλήνες

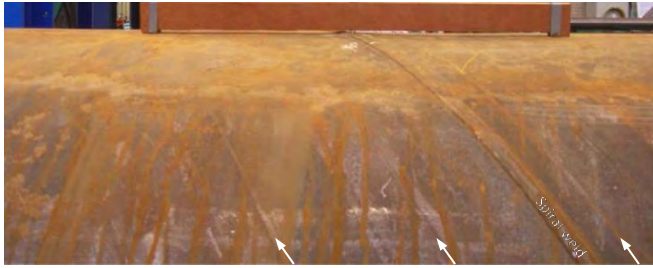
Οι επιφανειακές σαρώσεις των ελικοειδώς συγκολλημένων σωλήνων έχουν αρκετά χαρακτηριστικά γνωρίσματα που παρατηρούνται σε όλα τα ελικοειδώς συγκολλημένα δοκίμια. Σε ένα τμήμα μεταξύ δύο σπειροειδών συγκολλήσεων, η επιφάνεια του τοιχώματος του σωλήνα δεν είναι ίσια, αλλά έχει μια σειρά από τοπικούς “λόφους” και “κοιλιάδες”. Ένα παράδειγμα αρχικής σάρωσης λείζερ απεικονίζεται στην εικόνα 2.13 για το δείγμα T2. Το γράφημα αντιπροσωπεύει μια σάρωση με λείζερ της εξωτερικής επιφάνειας του σωλήνα. Όλη η περιοχή πάνω από το γράφημα αντιπροσωπεύει χώρο έξω από τον σωλήνα, η περιοχή κάτω από το γράφημα αντιπροσωπεύει το τοίχωμα του σωλήνα ή το χώρο στο εσωτερικό του σωλήνα. Λαμβάνοντας υπόψιν την μεταβολή του πάχους (βλέπε εικόνα 2.11), η σαρωμένη επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει την αρχική διαμόρφωση ατελειών της μέσης επιφάνειας του κελύφους. Στη θέση της ελικοειδούς συγκόλλησης, η σάρωση περιλαμβάνει το σφαιρίδιο συγκόλλησης, που σημαίνει ότι σε αυτές τις θέσεις, η σαρωμένη επιφάνεια δεν αντιπροσωπεύει τη μέση επιφάνεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τις αιχμηρές κορυφές στη θέση των σπειροειδών συγκολλήσεων.



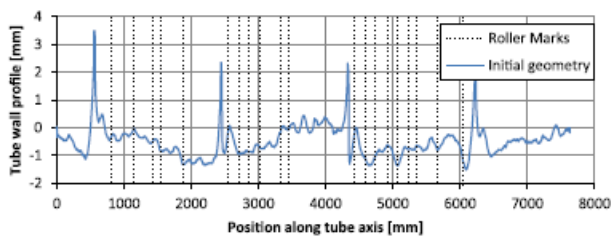
Εικόνα 2.13 Αρχικές γεωμετρικές ατέλειες του δοκιμίου T2 σε προσανατολισμό 0° . Η αιχμηρές ακίδες σημαίνουν την παρουσία μιας ελικοειδούς συγκόλλησης.

Φαίνεται ότι ανάμεσα στις σπειροειδείς συγκολλήσεις υπάρχει ένα οιονεί – επαναλαμβανόμενο πρότυπο τοιχώματος σωλήνα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι κυματιστές ατέλειες μπορεί να είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας κατασκευής. Όπως περιγράφεται στην ενότητα 2.1.2, οι ελικοειδώς συγκολλημένοι σωλήνες σχηματίζονται εν ψυχρώ μέσω ενός συστήματος τριών ράουλων που κάμπτεται το χαλύβδινο έλασμα. Εάν αυτοί οι κύλινδροι δεν είναι συνεχείς αλλά διακριτοί, μπορεί να προκύψει μια σειρά διακεκριμένων ατελειών, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13. Μετά το σχηματισμό του υλικού, ο σωλήνας στηρίζεται σε αρκετούς μικρότερους, αλλά σίγουρα διακριτούς κυλίνδρους. Αυτοί οι κύλινδροι μπορεί επίσης να έχουν επίπτωση επί του παρατηρούμενου αρχικού προφίλ ατελειών.

Με την πιο προσεκτική εξέταση φαίνεται ότι μερικοί από τους σωλήνες παρουσιάζουν ορατά τα σημάδια ράουλων στο εξωτερικό του τοιχώματός τους, που εκτείνονται παράλληλα στις σπειροειδείς συγκολλήσεις (βλέπε εικόνα 2.14). Όταν τα σημάδια αυτά αντιπαρατεθούν με τις μέτρησεις των αρχικών ατελειών, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι ατέλειες προκαλούνται πράγματι από αυτούς τους κυλίνδρους (βλ. εικόνα 2.15). Με την πάροδο του χρόνου αυτά τα σημάδια κυλίνδρων δεν είναι πλέον ορατά από γυμνό μάτι εξαιτίας της φθοράς της επιφάνειας του σωλήνα, αν και παραμένουν οι αντίστοιχες γεωμετρικές ατέλειες. Ως αποτέλεσμα, δεν φαίνονται σε όλα τα δοκίμια. Επιπλέον, όταν τα σημάδια είναι ορατά, τα περισσότερα από αυτά είναι πολύ ασαφή. Είναι επομένως πιθανό ότι, αν και δεν ταιριάζουν όλες οι αιχμές ατέλειας με ένα σημάδι ράουλων, αυτά τα ράουλα έχουν μια σημαντική επίδραση στις παρατηρούμενες οιονεί – επαναλαμβανόμενες ατέλειες. Σε αυτή τη μελέτη, υποτίθεται ότι όλες οι παρατηρούμενες οιονεί – επαναλαμβανόμενες γεωμετρικές ατέλειες προκαλούνται από τη διαδικασία της ψυχρής έλασης.

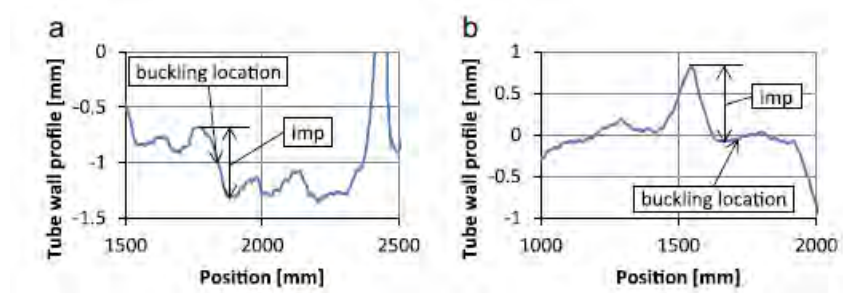


Εικόνα 2.14 Φωτογραφία του δείγματος T1 με σημάδια κυλίνδρων. Τα ορατά σημάδια επισημαίνονται με βέλη.



Εικόνα 2.15 Αρχική γεωμετρία ατελειών του δείγματος T1 σε προσανατολισμό εγκάρσιας διατομής 0° με επικάλυψη σήματος κυλίνδρων. Τα σήματα των κυλίνδρων συμπίπτουν με τα "κύματα" του γεωμετρικού σχεδίου ατέλειας.

Μια συλλογή του αρχικού βάθους ατέλειας στην περιοχή τοπικού λυγισμού κάθε "απλού" σωλήνα παρουσιάζεται στον πίνακα 2.3. Δύο παραδείγματα της διαδικασίας για τον προσδιορισμό αυτού του μεγέθους ατέλειας παρουσιάζονται στην εικόνα 2.16. Κατά μέσο όρο, η αρχική ατέλεια έχει ένα βάθος ίσο με το 6,6% του πάχους τοιχώματος του σωλήνα. Μια πλήρης μελέτη για τους κυρίαρχους γεωμετρικούς τρόπους δημιουργίας ατελειών και τα πλάτη τους, χρησιμοποιώντας ανάλυση σειράς Fourier, τεκμηριώνεται στην δημοσίευση [36].



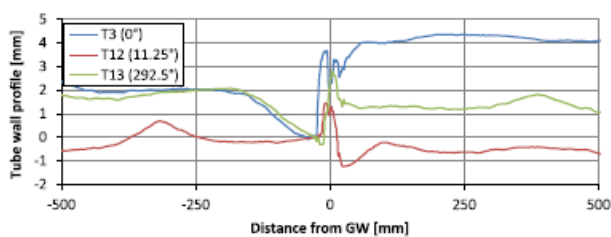
Εικόνα 2.16 Παραδείγματα μετρήσεων του μεγέθους των ατελειών στη θέση λυγισμού, (α) Μέτρηση της ατέλειας για τον σωλήνα T1, για πλήρες προφίλ σωλήνα τοιχώματος βλέπε εικόνα 2.15, (β) Μέτρηση της ατέλειας του σωλήνα T2, για πλήρη προφίλ σωλήνων τοίχου βλέπε εικόνα 2.13.

Πίνακας 2.3 Επισκόπηση των αρχικών μεγεθών ατέλειας στην θέση τοπικού λυγισμού

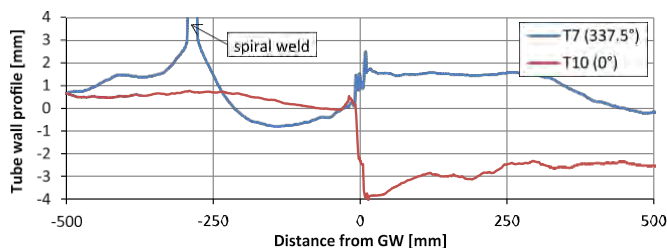
Όνομασία δείγματος	D [mm]	t [mm]	D/t	Ατέλεια/t [%]
T1	1066	16,4	65,1	3,6
T2	1067	9,0	118	9,0
T4	1065	9,2	116	6,0
T5	1070	9,0	118	7,2
T8	1068	9,1	117	11,6
T9	1069	16,3	65,4	9,2
T11	1068	12,9	83	6,2

➤ Σωλήνες με συγκολλήσεις σύνδεσης ελασμάτων και περιφερειακές συγκολλήσεις

Η παρουσία περιφερειακών συγκολλήσεων ή συγκολλήσεων σύνδεσης ελάσματος μπορεί να προκαλέσουν πρόσθετες ατέλειες που αν υπερβούν ορισμένες τιμές, μπορεί να οδηγήσουν σε τοπικό λυγισμό. Στις εφαρμογές σωλήνων μεταφοράς, οι σωλήνες που συνδέονται με περιφερειακές συγκολλήσεις συνήθως ευθυγραμμίζονται με εσωτερικούς σφιγκτήρες και συγκολλούνται πλήρως αυτόματα, αλλά σε πολλές δομικές εφαρμογές, η χρήση προηγμένου εξοπλισμού σύσφιγξης για την αποφυγή οποιασδήποτε κακής ευθυγράμμισης δεν είναι τόσο συνηθισμένη. Συνεπώς, αναμένεται να προκύψουν αστοχίες ευθυγράμμισης στην περιφερειακή συγκόλληση. Αντιθέτως, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων πραγματοποιείται πάντα σε ελεγχόμενο περιβάλλον σε κατάλληλο μηχάνημα, έτσι ώστε να υπάρχει πολύ λιγότερη πιθανότητα απόκλισης. Παρόλα αυτά, και για τις δύο συγκολλήσεις, είναι δυνατός ο σχηματισμός πρόσθετων γεωμετρικών ατελειών λόγω της συστολής των συγκολλήσεων.



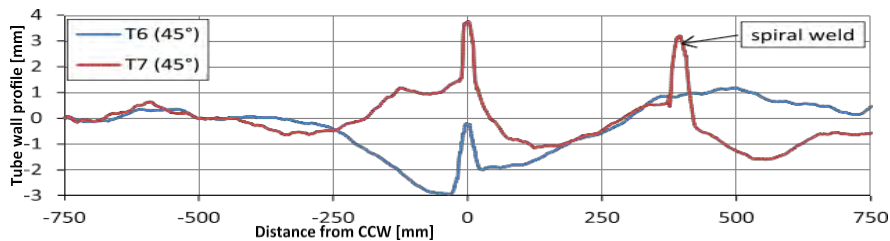
Εικόνα 2.17 Σύγκριση των γεωμετρικών ατελειών στην περιοχή της περιφερειακής συγκόλλησης για τρεις σωλήνες με πάχος τοιχώματος 9mm.



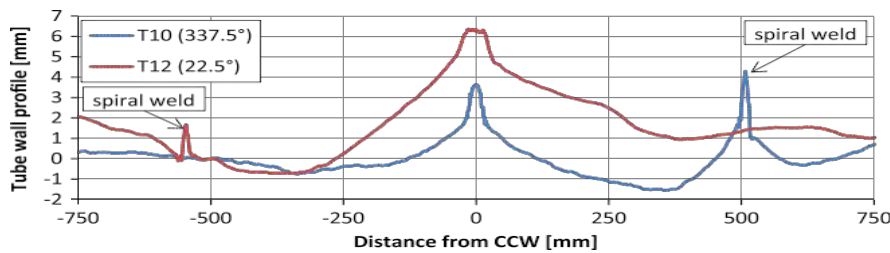
Εικόνα 2.18 Σύγκριση των γεωμετρικών ατελειών στην περιοχή μίας περιφερειακής συγκόλλησης για τον σωλήνα T7 με πάχος τοιχώματος 16mm και τον σωλήνα T10 με πάχος τοιχώματος 13mm.

Μία σύγκριση των αρχικών ατελειών στην περιοχή των περιφερειακών συγκολλήσεων παρουσιάζεται στις εικόνες 2.17 και 2.18. Όπως με τα προφίλ των “απλών” σωλήνων, οι γραμμές μπορεί να υποθεθεί ότι αντιπροσωπεύουν τη μεσαία επιφάνεια του κέλυφος, με εξαίρεση τα καλύμματα συγκόλλησης. Η σύγκριση δείχνει ότι οι αποκλίσεις της ευθυγράμμισης μπορεί να είναι μέχρι και 3mm, που είναι το 33% του πάχους της ελάσματος για αυτό το συγκεκριμένο δείγμα. Είναι επίσης ορατό ότι κοντά στη συγκόλληση σχηματίζεται μια εσωτερική γεωμετρική ατέλεια, πιθανώς λόγω συστολής της συγκόλλησης. Οι εικόνες 2.19 και 2.20 δείχνουν τις αρχικές ατέλειες κοντά στις συγκολλήσεις σύνδεσης σπειρών. Προφανώς, οι συγκολλήσεις σύνδεσης ελάσματος (CCW) έχουν την τάση να διογκώνονται προς τα έξω από τον σωλήνα. Οι ατέλειες αυτών των συγκολλήσεων φαίνεται να είναι μεγαλύτερες από τις γεωμετρικές ατέλειες που προκαλούνται από την ελικοειδή συγκόλληση. Για παράδειγμα, η εικόνα 2.19 περιλαμβάνει σάρωση μιας σπειροειδούς συγκόλλησης στη γραμμή που παρουσιάζει το δείγμα T7 και η εικόνα 2.20 περιλαμβάνει σάρωση μιας σπειροειδούς συγκόλλησης στη γραμμή που αντιπροσωπεύει το δείγμα T10.

Η συγκόλληση σύνδεσης σπειρώματος στο δοκίμιο T6 δεν διογκώνεται προς τα έξω, αλλά παρουσιάζει ένα προφίλ που κάμπτεται προς τα μέσα (βλέπε εικόνα 2.19). Λαμβάνοντας υπόψη ότι η κορυφή του σφαιριδίου συγκόλλησης συμπίπτει ακριβώς με το περιβάλλον υλικό του ελάσματος, είναι πιθανό αυτή η συγκόλληση να έχει ωθηθεί προς τα μέσα κατά την κατασκευή, τη μεταφορά ή την αποθήκευση. Επιπλέον, αυτό το δείγμα δείχνει επίσης μια μικρή απόκλιση της ευθυγράμμισης στη συγκόλληση σύνδεσης ελάσματος (CCW). Από κάθε δείγμα, οι σαρώσεις με λέιζερ είναι διαθέσιμες σε διάφορους προσανατολισμούς της διατομής (βλέπε εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.19 Σύγκριση των γεωμετρικών ατελειών κοντά σε μια συγκόλληση σύνδεσης ελάσματος για σωλήνες με πάχος τοιχώματος 16 mm. Σημειώστε ότι η σάρωση του σωλήνα T7 σε αυτό το σχήμα και στο σχήμα 2.18 γίνεται σε διαφορετικούς προσανατολισμούς της διατομής (βλέπε σχήμα 2.2).



Εικόνα 2.20 Σύγκριση των γεωμετρικών ατελειών κοντά σε μία συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων (CCW) για σωλήνα T10 με πάχος τοιχώματος 13mm και σωλήνα T12 με πάχος τοιχώματος 9mm.

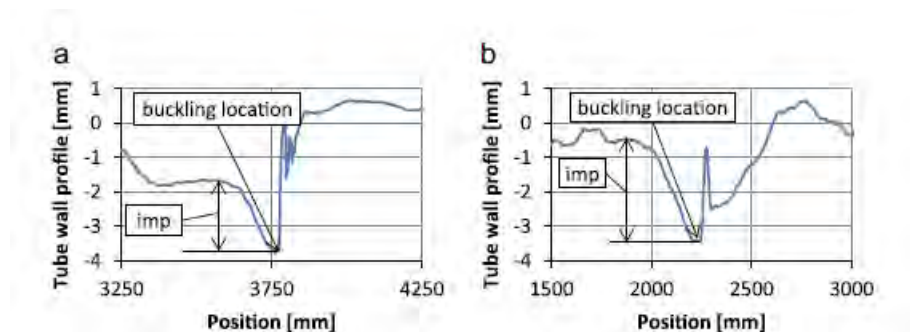
Οι εικόνες 2.17 – 2.20 δείχνουν ένα συνδυασμό αρχικών ατελειών σε μορφές λόφων και κοιλάδων και αποκλίσεις ευθυγράμμισης σε αυτές τις περιφερειακές συγκολλήσεις και συγκολλήσεις σύνδεσης ελασμάτων. Η συνολική γεωμετρική ατέλεια μπορεί να περιγραφεί ως επί το πλείστον με μία μέτρηση, όπως και για τα τμήματα του “απλού” σωλήνα. Για λόγους αποτελεσματικής αριθμητικής μοντελοποίησης, όλες οι ατέλειες των σωλήνων που περιέχουν περιφερειακή συγκόλληση ή συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων τεκμηριώνονται όπως στην εργασία [1].

Πίνακας 2.4 Επισκόπηση του μεγέθους των αρχικών ατελειών

Όνομασία Δείγματος	D [mm]	t [mm]	D/t	Ατέλεια/t [%]
T3	1069	9,0	118	20,0
T6	1066	16,3	65,3	18,6
T7	1068	16,3	65,4	11,0
T10	1070	13,1	81,6	27,4
T12	1069	9,1	117	12,7
T13	1070	9,2	117	25,5

Μια συλλογή των μετρήσεων του βάθους αυτών των ατελειών στη θέση του τοπικού λυγισμού παρουσιάζεται στον πίνακα 2.4. Δύο παραδείγματα της διαδικασίας που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό αυτού του μεγέθους ατέλειας παρουσιάζονται στην εικόνα 2.21. Κατά μέσο όρο, παρατηρείται ατέλεια της τάξεως του 19,2% του τοιχώματος του σωλήνα, το οποίο είναι σχεδόν τριπλάσιο από το μέσο όρο της ατέλειας που παρατηρείται σε “απλούς” σωλήνες. Σε δύο δείγματα (T7 και T12), ο τοπικός λυγισμός πραγματοποιήθηκε

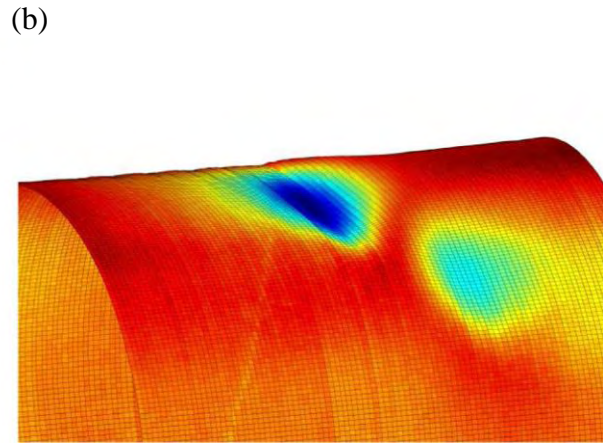
μακριά από την περιφερειακή συγκόλληση ή την συγκόλληση σύνδεσης ελάσματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ατέλεια που τεκμηριώνεται στον πίνακα 2.4 είναι ατέλεια σε ένα “απλό” τμήμα του σωλήνα. Όπως αναμένεται, αυτές οι δύο αρχικές ατέλειες είναι χαμηλότερες από τις αρχικές ατέλειες που διαπιστώνονται στις περιφερειακές συγκολλήσεις ή και στις συγκολλήσεις σύνδεσης των ελασμάτων των άλλων σωλήνων.



Εικόνα 2.21 Παραδείγματα μέτρησης του μεγέθους ατέλειας στο σημείο λυγισμού κοντά σε περιφερειακή συγκόλληση ή σε συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων. (α) Μέτρηση ατέλειας για τον σωλήνα T3 (για το προφίλ του τοιχώματος του σωλήνα βλέπε επίσης εικόνα 2.17), (β) Μέτρηση ατέλειας για τον σωλήνα T6 (για το προφίλ του τοιχώματος του σωλήνα βλέπε επίσης εικόνα 2.19)

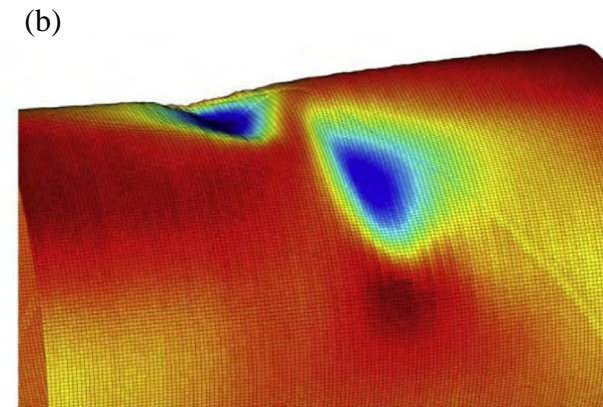
2.1.3 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τεσσάρων σημείων της έρευνα στην οποία βασίστηκε η συγκριτική μελέτη

Ως αποτέλεσμα των ασκούμενων φορτίων κάμψης, όλα τα δείγματα έχουν αποτύχει με τη μορφή τοπικού λυγισμού. Τα δείγματα με $(D / t) = 120$ απέτυχαν ξαφνικά και βίαια. Αντίθετα, η μετάβαση μεταξύ ενός σταθερού και ασταθούς τοιχώματος του σωλήνα ήταν πολύ πιο σταδιακή για τα δείγματα με παχύ τοίχωμα. Ειδικά τα δείγματα με παχύ τοίχωμα με μεγάλες αρχικές ατέλειες, όπως το δείγμα T6 (βλέπε σχήμα 2.19), είχαν πολύ ομαλή μετάβαση μεταξύ του σταδίου πριν του λυγισμού και του σταδίου μετά το λυγισμό. Ορισμένες από τις αιφνίδιες αποτυχίες των δειγμάτων με λεπτά τοιχώματα είχαν ως αποτέλεσμα την αποτυχία κάποιου από τους πιο ευαίσθητους εξοπλισμούς της μέτρησης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μεταλυγισμική συμπεριφορά του σωλήνα έχει αφαιρεθεί από τα αντίστοιχα διαγράμματα ροπής κάμψης – κάμπυλότητας.

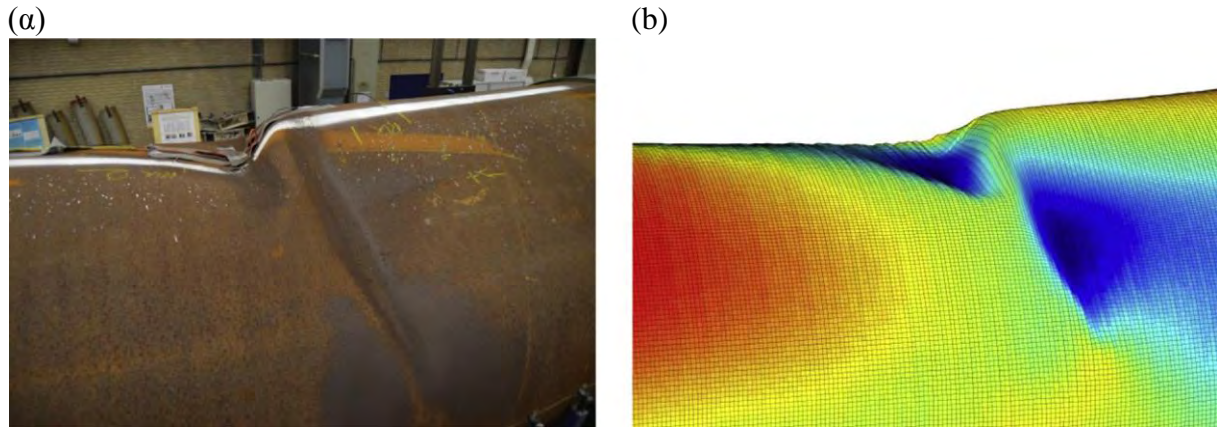


Εικόνα 2.22 Τοπικός λυγισμός του σωλήνα T3 ($D/t = 118$) κοντά στην περιφερειακή συγκόλληση, (α) Φωτογραφία λυγισμού, (b) 3D σάρωση του λυγισμού

Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο σχηματισμός του τοπικού λυγισμού αποτελείται από ένα κύριο λυγισμό με δύο γειτονικούς δευτερεύοντες λυγισμούς οι οποίοι σχηματίζονται μετά από μικρή περαιτέρω παραμόρφωση του δείγματος. Μερικά παραδείγματα τοπικών μορφών λυγισμού παρουσιάζονται στις εικόνες 2.3d και 2.22 – 2.24. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της εσωτερικής ακτινικής σάρωσης λέιζερ (βλέπε εικόνα 2.5), τα σχήματα των τοπικών λυγισμών απεικονίζονται σαφέστερα με 3D εικόνες. Οι εικόνες δείχνουν ότι για τα πιο λεπτότοιχα δείγματα, το σχήμα του τοπικού λυγισμού είναι πολύ πιο οξύ (σύγκριση εικόνων 2.23 και 2.24).



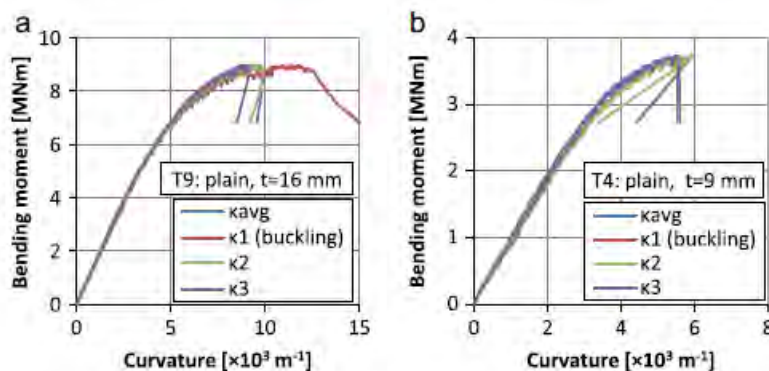
Εικόνα 2.23 Τοπικός λυγισμός του σωλήνα T7 ($D/t = 65,4$). Ο λυγισμός ξεκίνησε αρχικά μακριά από την ελικοειδή συγκόλληση, αλλά υπό περαιτέρω παραμόρφωση, ο λυγισμός εκτείνεται πέρα από αυτήν. (α) Φωτογραφία λυγισμού, (b) 3D σάρωση λυγισμού.



Εικόνα 2.24 Τοπικός λυγισμός του σωλήνα T12 ($D/t = 117$) στο στάδιο τελικής παραμόρφωσης του δείγματος, (a) Φωτογραφία λυγισμού, (b) 3D σάρωση λυγισμού.

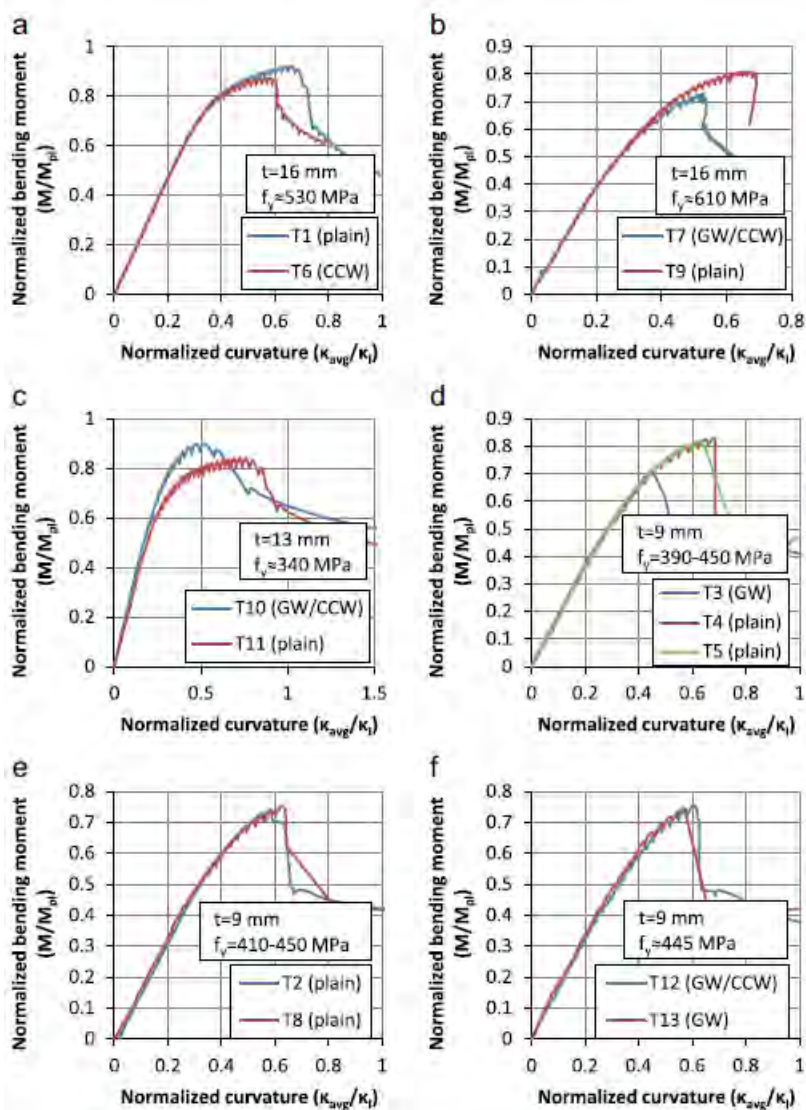
2.1.3.1 Διαγράμματα ροπής κάμψης – καμπυλότητας

Δύο τυπικά αποτελέσματα “απλών” σωλήνων φαίνονται στην εικόνα 2.25. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν τη ροπή κάμψης σε σχέση με τις μετρήσεις τοπικής καμπυλότητας και τη μέση μέτρηση καμπυλότητας (βλέπε εικόνα 2.4). Από το γράφημα είναι σαφές ότι τα παχύτερα δείγματα ($1067 \times 15.9 \text{ mm}^2$) έχουν πολύ πιο έντονη ικανότητα παραμόρφωσης από τα λεπτότερα δείγματα ($1067 \times 9.0 \text{ mm}^2$). Επιπλέον, αυτή η πλαστική παραμόρφωση δεν κατανέμεται ομοιόμορφα επί του τμήματος του σωλήνα με σταθερή ροπή. Σαφώς, η καμπυλότητα που μετρείται με το βραχίονα κ_1 είναι υψηλότερη από το μέσο όρο και τις καμπυλότητες που λαμβάνονται από άλλες τοπικές μετρήσεις στο σχήμα 2.25α, πολύ πριν επιτευχθεί η μέγιστη ροπή κάμψης ή σχηματιστεί τοπικός λυγισμός. Στην περίπτωση λεπτότερων δειγμάτων, οι διαφορές μεταξύ των μετρήσεων καμπυλότητας είναι μικρότερες, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν.



Εικόνα 2.25 Παραδείγματα διαγραμμάτων ροπής κάμψης - καμπυλότητας για δύο τυπικά δείγματα. Ο τοπικός λυγισμός λαμβάνει χώρα εντός της τοπικής μέτρησης που σημειώνεται με "(buckling)", (a) Δείγμα T9 ($D/t = 65,4$), (b) Δείγμα T4 ($D/t = 116$).

Η συμπεριφορά όλων των σωλήνων που υποβάλλονται σε κάμψη συλλέγεται σε γραφήματα που παρουσιάζουν τα διαγράμματα ροπής κάμψης – καμπυλότητας των δειγμάτων παρόμοιου πάχους τοιχώματος και ιδιοτήτων υλικών (βλέπε εικόνα 2.26). Στην περίπτωση δειγμάτων με πάχος τοιχώματος 9mm, τα δείγματα είναι συγκεντρωμένα με δείγματα παρόμοιας συμπεριφοράς. Οι οριζόντιοι άξονες αδιαστατοποιούνται με την παράμετρο καμπυλότητας κ_1 η οποία ορίζεται ως $\kappa_1 = t/D^2$. Οι κάθετοι άξονες αδιαστατοποιούνται με τη πλαστική ροπή κάμψης. Και στις δύο περιπτώσεις, για την αδιαστατοποίηση χρησιμοποιούνται οι ιδιότητες του δείγματος στη θέση του τοπικού λυγισμού.



Εικόνα 2.26 Διαγράμματα ροπής κάμψης – καμπυλότητας όλων των δειγμάτων με σπειροειδή συγκόλληση. (α) Σωλήνες με $t=16$ mm και $\sigma_y \approx 530$ MPa, (b) Σωλήνες με $t=16$ mm και $\sigma_y \approx 610$ MPa, (c) Σωλήνες με $t=13$ mm και $\sigma_y \approx 340$ MPa, (d) σωλήνες με $t=9,0$ mm και $\sigma_y = 390-450$ MPa, (e) Σωλήνες με $t=9,0$ mm και $\sigma_y = 410-450$ MPa, (f) σωλήνες με $t=9,0$ mm και $\sigma_y \approx 340$ MPa.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όλα τα δείγματα που περιέχουν είτε περιφερειακή συγκόλληση είτε συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων έχουν χαμηλότερες επιδόσεις από τα “απλά” αντίστοιχά τους, τόσο όσον αφορά τη μέγιστη καμπτική ροπή όσο και τη μέγιστη καμπυλότητα. Μόνο οι εικόνες 2.26(e) και 2.26(f) δείχνουν ότι τα “απλά” δείγματα μπορεί να έχουν δομική συμπεριφορά παρόμοια με τα δείγματα που περιέχουν μια πρόσθετη συγκόλληση. Εν πάση περιπτώσει, οι πρόσθετες συγκολλήσεις φαίνεται να επιδρούν αρνητικά στη δομική αντοχή και την ικανότητα παραμόρφωσης.

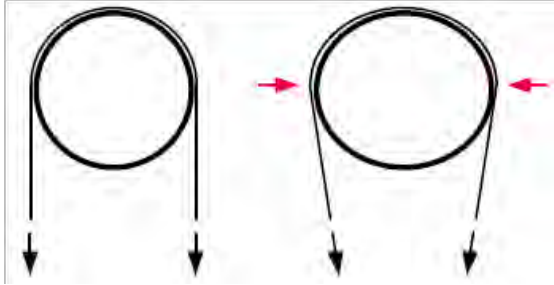
Μια εξαίρεση από την παραπάνω γενική παρατήρηση είναι το δείγμα T10. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.1.2.1, το ένα μέρος αυτού του δείγματος είναι σημαντικά ασθενέστερο από τα άλλα δύο. Δεδομένου ότι ο τοπικός λυγισμός πραγματοποιήθηκε στο αδύναμο μέρος πολύ κοντά στην περιφερειακή συγκόλληση, όπου συνδέθηκε με ένα ισχυρότερο τμήμα, αναμένεται το τμήμα αυτό να επιδράσει υποστηρικτικά. Αυτή η υποστήριξη έχει ως αποτέλεσμα την υψηλότερη αντίσταση έναντι του σχηματισμού τοπικού λυγισμού, λόγω του παχύτερου τοιχώματος και της υψηλότερης τάσης διαρροής του παρακείμενου τμήματος, αλλά και της μεγαλύτερης αντίστασης στο φαινόμενο της οβαλοποίησης. Μια διατομή με λιγότερη οβαλοποίηση είναι λιγότερο επιρρεπής στο τοπικό λυγισμό, λόγω της μικρότερης τοπικής ακτίνας της διατομής του σωλήνα.

Επιπλέον, η μέση καμπυλότητα του δείγματος επηρεάζεται έντονα από τα παχύτερα τμήματα του δείγματος μακριά από τον τοπικό λυγισμό. Αυτά τα δύο αποτελέσματα οδηγούν σε σχετικά χαμηλή κρίσιμη μέση καμπυλότητα σε συνδυασμό με μια υψηλή μέγιστη ροπή κάμψης στο σχήμα 2.26(c).

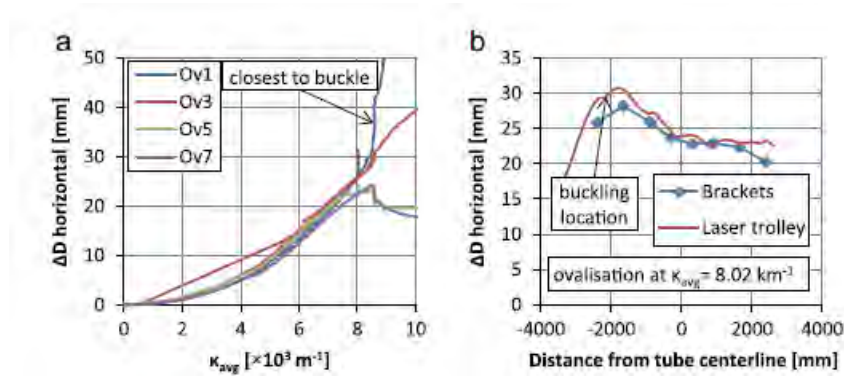
2.1.3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων οβαλοποίησης

Οι μετρήσεις οβαλοποίησης που εκτελούνται κατά τη διάρκεια των δοκιμών παρέχουν επίσης χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά των υπό εξέταση δειγμάτων. Τυπικά αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων παρουσιάζονται στις εικόνες 2.28 και 2.29. Και στις δύο εικόνες, η γενική εξέλιξη της οριζόντιας οβαλοποίησης του δείγματος σε σχέση με την καμπυλότητα παρουσιάζεται στα αριστερά. Σε όλες τις δοκιμές, ο σχηματισμός του τοπικού λυγισμού οδήγησε σε ξαφνική αύξηση της οριζόντιας οβαλοποίησης κοντά στη θέση του τελευταίου. Επιπλέον, η οριζόντια οβαλοποίηση μειώθηκε ελαφρώς μετά το σχηματισμό του τοπικού λυγισμού, σε αντιστοίχιση με τη μείωση της καμπυλότητας σε αυτές τις περιοχές λόγω της μειωμένης ροπής κάμψης. Είναι ενδιαφέρον, επίσης, πριν από την διακλάδωση των

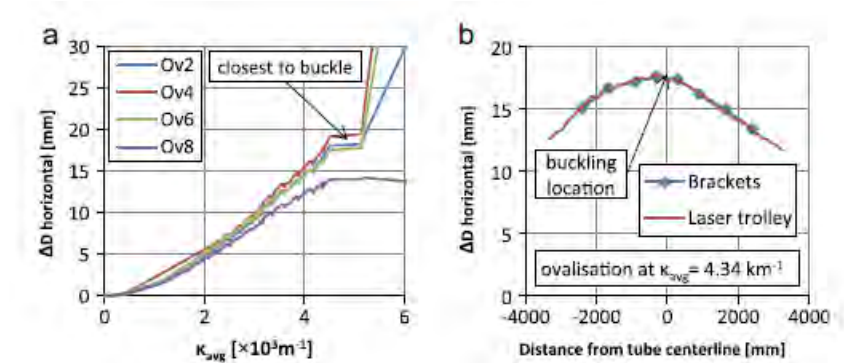
μετρήσεων του διαγράμματος, η οβαλοποίηση του σωλήνα γύρω από τη θέση του τοπικού λυγισμού είναι υψηλότερη από ότι σε άλλα μέρη του σωλήνα. Αυτό το χαρακτηριστικό δεν είναι μόνο ορατό στις εικόνες 2.28 και 2.29 αλλά σε όλες σχεδόν τις δοκιμές.



Εικόνα 2.27 Περιορισμός της οβαλοποίησης με υποστηρίγματα.



Εικόνα 2.28 Μετρήσεις οβαλοποίησης για το δείγμα T6, (α) Μετρήσεις οβαλοποίησης με βραχίονες (β) Σύγκριση μετρήσεων μεταξύ μετρήσεων μέσω των βραχιόνων και μέσω εσωτερικού τρόλει λείζερ.



Εικόνα 2.29 Μετρήσεις οβαλοποίησης του δείγματος T13, (α) Μετρήσεις οβαλοποίησης με βραχίονες (β) Σύγκριση μετρήσεων μεταξύ μετρήσεων μέσω των βραχιόνων και μέσω εσωτερικού τρόλει λείζερ.

Τα γραφήματα στις εικόνες 2.28(b) και 2.29(b) παρουσιάζουν το προφίλ της οβαλοποίησης κατά μήκος των δειγμάτων σε καμπυλότητες κοντά στην τιμή της κρίσιμης καμπυλότητας. Τα γραφήματα παρέχουν μια σύγκριση μεταξύ της μετρούμενης οβαλοποίησης με εξωτερικούς βραχίονες (βλέπε σχήμα 2.4(b)) και των μετρήσεων που πραγματοποιούνται

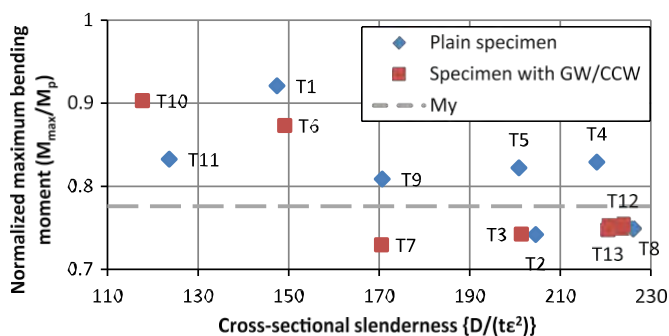
από τις εσωτερικές σαρώσεις λέιζερ (βλέπε σχήμα 2.5). Τα στοιχεία δείχνουν ότι υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ αυτών των δύο μεθόδων μέτρησης. Τα προφίλ και των δύο σωλήνων δείχνουν ότι η οβαλοποίηση του δείγματος ελαττώνεται ελαφρώς προς τις μεσαίες υποστηρίξεις. Αυτό το φαινόμενο προκαλείται από τον ελαφρύ περιορισμό της οβαλοποίησης από τους ιμάντες εφαρμογής φορτίου στα μεσαία υποστηρίγματα. Οι αρχικά παράλληλοι χαλύβδινοι ιμάντες παραμορφώνονται από τον σωλήνα εξαιτίας της οβαλοποίησης, οδηγώντας τελικά σε περιορισμό της οβαλοποίησης (βλέπε εικόνα 2.27). Επιπλέον, οι δύο εξωτερικοί “βραχίονες φόρτισης” των δειγμάτων καμπυλώνονται λιγότερο και επομένως στηρίζουν τη μεσαία περιοχή του δείγματος.

Οι εικόνες 2.28(b) και 2.29(b) δείχνουν ότι η οβαλοποίηση είναι σαφώς υψηλότερη στη θέση όπου θα εμφανιστεί τοπικός λυγισμός κατά τη διάρκεια της δοκιμής κάμψης. Αυτή η τοπικά υψηλότερη οβαλοποίηση μπορεί να προκάλεσε τον τοπικό λυγισμό σε αυτές τις θέσεις, αφού η οβαλοποίηση αυξάνει την τοπική ακτίνα της διατομής του κελύφους στην περιοχή συμπίεσης του σωλήνα. Το γεγονός ότι η τοπική ακτίνα του κελύφους επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση στον τοπικό λυγισμό είναι γνωστό [35]. Από την άλλη πλευρά, μια τοπικά μεγαλύτερη καμπυλότητα κάμψης μπορεί να οφείλεται σε διαφορές στο όριο διαρροής και το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα πάνω κατά μήκος του δείγματος, με συνέπεια τη μεγαλύτερη οβαλοποίηση και τον τοπικό λυγισμό. Σε κάθε περίπτωση, η οβαλοποίηση του σωλήνα φαίνεται να είναι ένας καλός παράγοντας πρόβλεψης της θέσης του λυγισμού.

2.1.3.3 *Μέγιστη ροπή κάμψεως και ικανότητα παραμόρφωσης*

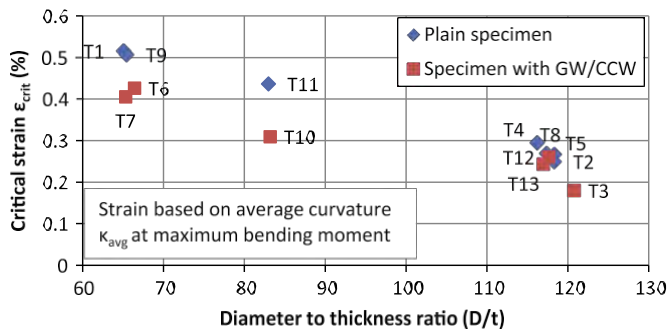
Στην πειραματική εργασία που μελετάται, η αστάθεια στο διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας προσδιορίζεται στο σημείο όπου λαμβάνει χώρα η μέγιστη ροπή κάμψης. Επομένως, οι κρίσιμες τιμές της καμπυλότητας, της παραμόρφωσης και της ροπής κάμψης λαμβάνονται σε αυτό το σημείο. Σε μια κατάσταση ελεγχόμενου φορτίου, η αστάθεια εμφανίζεται προφανώς σε αυτό το μέγιστο της αναφερόμενης ροπής κάμψης. Σε περιπτώσεις ελεγχόμενης παραμόρφωσης, όπως οι πραγματοποιηθείσες δοκιμές, είναι δυνατό να διατηρηθεί μια σταθερή κατάσταση με ελαφρώς υψηλότερες καμπυλότητες και χαμηλότερες ροπές κάμψης. Στην πράξη, η εμφάνιση μιας μέγιστης ροπής κάμψης συνδέεται κυρίως με την ταχεία συγκέντρωση της καμπυλότητας και του τοπικού λυγισμού, με αποτέλεσμα τη δομική αστοχία.

Μια επισκόπηση των μέγιστων ροπών κάμψεως απεικονίζεται στην εικόνα 2.30. Όπως προτείνεται στα πρότυπα δομικού σχεδιασμού και στις αναλύσεις [37], [38], η ευκαμψία της διατομής των σωλήνων κανονικοποιείται τόσο από τη γεωμετρική παράμετρο (D/t) όσο και από το όριο διαρροής του υλικού. Σε αυτή την περίπτωση, η ευκαμψία κανονικοποιείται με την παράμετρο $D/(t\varepsilon^2)$ με $\varepsilon^2 = 235/\sigma_y$, όπως προτείνεται στο [38]. Η μέγιστη ροπή κάμψης των δειγμάτων που περιέχουν μία περιφερειακή συγκόλληση ή συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων είναι, γενικά, ίσες ή χαμηλότερες από τις αντίστοιχες των “απλών” δειγμάτων, με εξαίρεση το δείγμα T10 λόγω της ισχυρής ασυνέχειας των ιδιοτήτων διατομής.



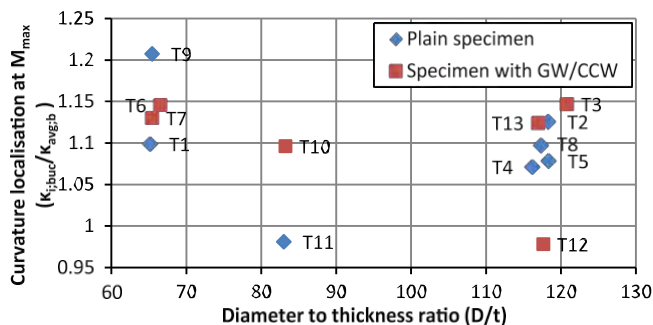
Εικόνα 2.30 Μέγιστη ροπή κάμψης δειγμάτων. Ως M_y ορίζεται η πρώτη ροπή διαρροής του σωλήνα πριν την οβαλοποίησή του.

Μια επισκόπηση των παραμορφώσεων που προκύπτουν στη μέγιστη ροπή απεικονίζεται στην εικόνα 2.31. Για να αποφευχθούν τα τοπικά φαινόμενα κάμψης τοιχώματος, η καταγεγραμμένη παραμόρφωση υπολογίζεται από τις μετρημένες καμπυλότητες και την ονομαστική διάμετρο αντί των μετρητών παραμόρφωσης, $\varepsilon = \kappa \cdot D/2$. Το διάγραμμα της εικόνας 2.31 βασίστηκε στη συνήθη πρακτική για τους σωλήνες μεταφοράς, να συσχετίζεται η κρίσιμη παραμόρφωση με το λόγο D/t ως παράμετρος ευκαμψίας της διατομής [34]. Στο γράφημα, το επιζήμιο αποτέλεσμα της παρουσίας περιφερειακών συγκολλήσεων και των συγκολλήσεων σύνδεσης ελασμάτων είναι ορατές, όπως και στην περίπτωση της εικόνας 2.30. Από τις εικόνες 2.30 και 2.31 προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα δείγματα που διαθέτουν περιφερειακή συγκόλληση ή συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων έχουν χαμηλότερη μέγιστη ροπή κάμψης και ικανότητα παραμόρφωσης.



Εικόνα 2.31 Κρίσιμες παραμορφώσεις με βάση τις μέσες καμπύλες στη μέγιστη ροπή.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.25, ακόμη και πριν τη μέγιστη ροπή κάμψης, προκύπτουν διαφορές μεταξύ των τοπικά μετρημένων καμπυλοτήτων και των μέσων μετρήσεων καμπυλότητας. Η αναλογία μεταξύ της τοπικής καμπυλότητας στη θέση του λυγισμού και της συνολικής καμπυλότητας, που προσδιορίζονται στη μέγιστη ροπή κάμψης, παρουσιάζεται στην εικόνα 2.32. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η τοπική καμπυλότητα είναι σημαντικά υψηλότερη από τη μέση καμπυλότητα σε σχεδόν όλες τις περιπτώσεις. Εξαιρέσεις είναι τα δείγματα T11 και T12, όπου η καμπυλότητα εντοπίζεται μακριά από τη θέση λυγισμού. Αν αντί της τοπικής καμπυλότητας στη θέση λυγισμού χρησιμοποιείται η μέγιστη τοπική καμπυλότητα για να προσδιοριστεί ο λόγος, τα δεδομένα είναι σύμφωνα με τα άλλα αποτελέσματα. Σε αυτή την περίπτωση, ο λόγος καμπυλοτήτων ($\kappa_{local} / \kappa_{global}$) για τα δείγματα T11 και T12 είναι ίσος με 1,09 και 1,10 αντίστοιχα.

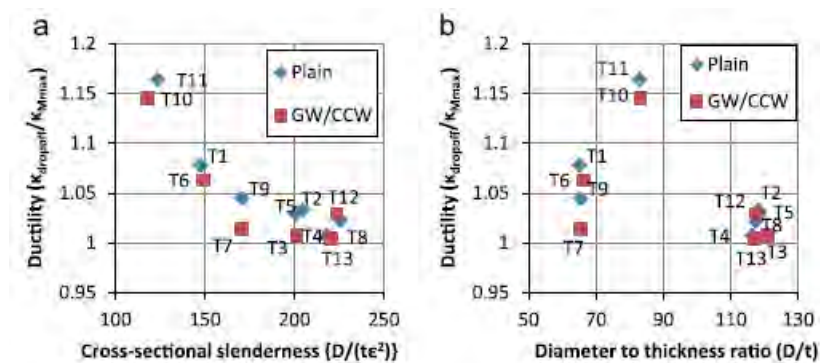


Εικόνα 2.32 Σύγκριση της τοπικής καμπυλότητας στη θέση του λυγισμού και της συνολικής καμπυλότητας στη μέγιστη ροπή.

Χρησιμοποιώντας τη μέγιστη τοπική καμπυλότητα για τα δείγματα T11 και T12, ο λόγος εντοπισμού καμπυλότητας ($\kappa_{local} / \kappa_{global}$) στη μέγιστη ροπή κάμψης, κατά μέσο όρο για όλα τα δείγματα, είναι 1,12. Στη μέγιστη ροπή κάμψης, η καμπυλότητα που μετρείται τοπικά είναι κατά μέσο όρο κατά 12% υψηλότερο από τη μέση συνολική καμπυλότητα, παρόλο που η εφαρμοζόμενη ροπή κάμψης είναι σταθερή στο τμήμα των δειγμάτων μεταξύ των μεσαίων

στηριγμάτων. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η ποσότητα της τοπικής καμπυλότητας δεν συσχετίζεται σχεδόν καθόλου με την ευκαμψία του σωλήνα και ότι η τοπική καμπυλότητα φαίνεται να είναι ελαφρώς υψηλότερη για τα δείγματα που περιέχουν περιφερειακή συγκόλληση ή συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων.

Σε όλες τις προηγούμενες αναλύσεις, η ροπή στην οποία συμβαίνει τοπικός λυγισμός για κάθε δείγμα έχει οριστεί ως η ροπή που επιτυγχάνεται η μέγιστη αντίσταση κάμψης. Εναλλακτικά, ο λυγισμός μπορεί να οριστεί στην καμπυλότητα όπου η αντοχή στη ροπή κάμψης πέφτει ξαφνικά. Αναμένεται ότι ίσως για τα δείγματα με υψηλή αναλογία D/t αυτοί οι δύο ορισμοί παρέχουν το ίδιο αποτέλεσμα, ενώ για τα δείγματα με χαμηλή αναλογία D/t μπορεί να υπάρχει κάποια διαφορά. Στην εικόνα 2.33 παρουσιάζεται η αναλογία των καμπυλοτήτων στη μέγιστη ροπή κάμψης και στην απότομη μείωση του φορτίου, η οποία αναγνωρίζεται ως μέτρο της συνολικής ολκιμότητας του δείγματος. Σε αυτές τις αναλύσεις, χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες καμπυλότητες.



Εικόνα 2.33 Σύγκριση της ολκιμότητας του δείγματος, οριζόμενη ως ο λόγος μεταξύ της μέσης καμπυλότητας κατά την απόρριψη φορτίου και της μέγιστης ροπής κάμψης. (α) Ολκιμότητα σε σχέση με την παράμετρο ευκαμψίας $D/(te^2)$, (b) Ολκιμότητα σε σχέση με την παράμετρο ευκαμψίας D/t .

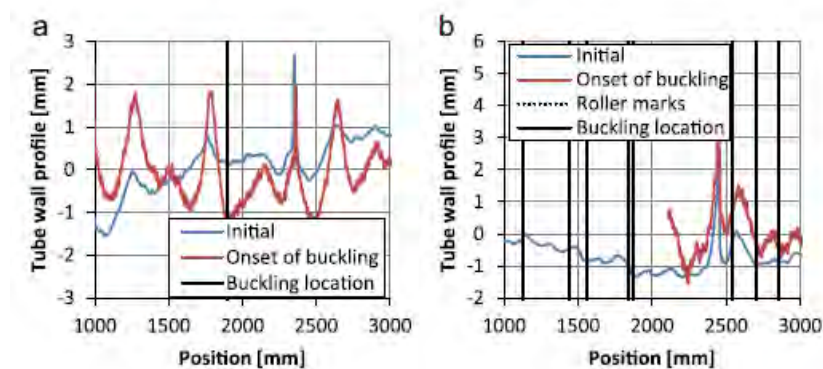
Χρησιμοποιώντας την γεωμετρική ευκαμψία των δειγμάτων D/t , δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ ολκιμότητας και ευκαμψίας (εικόνα 2.26(b)). Ωστόσο, αν χρησιμοποιηθεί η παράμετρος ευκαμψίας της διατομής $D/(te^2)$, φαίνεται ότι το λιγότερο λεπτό δείγμα έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη ολκιμότητα (εικόνα 2.26(a)). Πρέπει να σημειωθεί ότι πέρα από μια ορισμένη τιμή, η περαιτέρω αύξηση της ευκαμψίας δεν φαίνεται να οδηγεί σε μείωση της ολκιμότητας. Και τα δύο γραφήματα στην εικόνα 2.33 δείχνουν ότι και σε όρους ολκιμότητας, η παρουσία μιας περιφερειακής συγκόλλησης ή συγκόλλησης σύνδεσης ελασμάτων φαίνεται να επιδρά αρνητικά στην ικανότητα κάμψης του δείγματος. Ωστόσο, εάν αντί της συνολικής

καμπυλότητας χρησιμοποιείται η τοπικά μετρούμενη καμπυλότητα για να προσδιοριστεί αυτή η παράμετρος ολκιμότητας, αυτές οι διαφορές εξαφανίζονται.

2.1.3.4 Θέση τοπικού λυγισμού

Για κάθε δείγμα είναι γνωστό το αρχικό γεωμετρικό προφίλ του σωλήνα. Επομένως, η θέση του λυγισμού μπορεί να συνδεθεί με την αρχική γεωμετρία για να εξεταστεί εάν οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες προξενούν τον τοπικό λυγισμό.

Η ανάπτυξη λυγισμού μπορεί να αναγνωριστεί στις μετρήσεις της γεωμετρίας της πλευράς του δείγματος που συμπιέζεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής (βλέπε σχήμα 2.5). Στην εικόνα 2.34 παρουσιάζεται η γεωμετρία της πλευράς που συμπιέζεται πριν από τη δοκιμή και κατά την έναρξη του λυγισμού για δύο δείγματα. Και στις δύο περιπτώσεις ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται σε μια γεωμετρική ατέλεια. Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στην εικόνα 2.34(b) είναι ιδιαίτερος ενδιαφέροντα: ο σχηματισμός λυγισμού πραγματοποιήθηκε σε μια αρχική γεωμετρική ατέλεια, η οποία προκλήθηκε από τη διαδικασία ψυχρής έλασης, καθώς ταιριάζει με ένα σημάδι του από το ράουλο. Όπως αναλύεται στην ενότητα 2.1.2.3, όλες οι επαναλαμβανόμενες γεωμετρικές ατέλειες θεωρείται ότι προκαλούνται από τη διαδικασία ψυχρής έλασης. Δεδομένου ότι αυτές οι ατέλειες προφανώς οδηγούν στο σχηματισμό μίας αδυναμίας του σωλήνα, η διαδικασία παραγωγής που ψυχρής έλασης μπορεί να έχει άμεση επίδραση στο σχηματισμού του τοπικού λυγισμού στον σωλήνα.



Εικόνα 2.34 Θέση λυγισμού για τα δείγματα T4 και T1. Η παρακολούθηση της πλευράς που συμπιέζεται κατά τη διάρκεια του πειράματος T1 έγινε μόνο για μέρος του σωλήνα. Ο τοπικός λυγισμός προέκυψε εκτός αυτών μετρήσεων. (a) Πείραμα T4, (b) πείραμα T1.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλα τα δείγματα εκτός από ένα, ο τοπικός λυγισμός έχει συμβεί μακριά από την ελικοειδή συγκόλληση, αν και σε πολλές περιπτώσεις, σημαντικές ατέλειες είναι ορατές σε αυτή την περιοχή. Προφανώς η επίδραση άλλων παραγόντων έχει ως

αποτέλεσμα τον σχηματισμό του τοπικού λυγισμού μακριά από τη συγκόλληση αυτή. Ίσως ένας τέτοιος παράγοντας είναι η πιθανή ενισχυτική επίδραση της υπερκάλυψης του υλικού της συγκόλλησης σ' αυτές τις περιοχές.

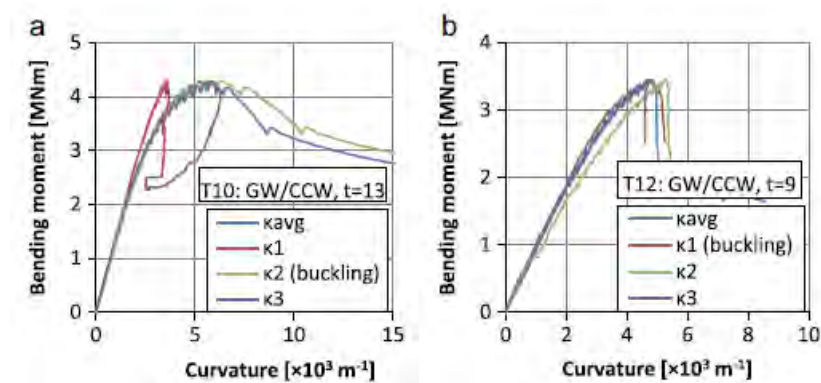
Στην περίπτωση των δειγμάτων που περιέχουν περιφερειακή συγκόλληση ή συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων, οι γεωμετρικές ατέλειες κοντά στην συγκόλληση είναι γενικά μεγαλύτερες από τις ατέλειες των δειγμάτων “απλού” σωλήνα (πίνακες 2.3 και 2.4). Λαμβάνοντας υπόψη ότι σε “απλούς” σωλήνες οι γεωμετρικές ατέλειες προκαλούν ένα “αδύναμο κρίκο”, αναμένεται ότι σε περίπτωση συγκολλήσεων με μεγαλύτερες γεωμετρικές ατέλειες, ο τοπικός λυγισμός θα συμβεί στην περιοχή της συγκόλλησης. Σε τέσσερα από τα έξι δείγματα με αυτές τις συγκολλήσεις, πραγματοποιήθηκε τοπικός λυγισμός κοντά στην συγκόλληση. Στις άλλες περιπτώσεις, ο τοπικός λυγισμός συνέβη μακριά από αυτές τις συγκολλήσεις. Οι πιθανές αιτίες για αυτό το θέμα παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

2.1.3.5 Επίπτωση της παρουσίας περιφερειακών συγκολλήσεων και συγκολλήσεων σύνδεσης ελασμάτων.

Η παρουσία των περιφερειακών συγκολλήσεων και των συγκολλητικών σύνδεσης ελασμάτων μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στη συμπεριφορά του σωλήνα σε κάμψη. Κατ' αρχάς, αυτές οι συγκολλήσεις δρουν ως όριο μεταξύ δύο τμημάτων του δείγματος που μπορεί να έχουν διαφορετικές ιδιότητες διατομής. Επιπλέον, η συγκόλληση μπορεί να συνδέεται με σοβαρές γεωμετρικές ατέλειες. Τέλος, η ίδια η συγκόλληση έχει επιρροές λόγω της εισαγωγής θερμότητας και του προστιθέμενου υλικού.

Ακόμη και στην περίπτωση μιας σύνδεσης μεταξύ δύο σωλήνων που είναι ιδανικά ίδιοι, σε διάμετρο, πάχος τοιχώματος και ιδιαίτερα στη συμπεριφορά του υλικού θα διαφέρουν σε κάποιο βαθμό. Αυτό συνεπάγεται ισχυρή και αδύναμη πλευρά της συγκόλλησης. Στην ανάλυση αυτή χρησιμοποιούνται ως κριτήρια αντοχής της κάθε πλευράς το πάχος τοιχώματος και η τάση διαρροής. Στα πειράματα, και οι τέσσερις τοπικοί λυγισμοί που σχηματίστηκαν κοντά σε μια περιφερειακή συγκόλληση ή συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων, εμφανίστηκαν στην ασθενέστερη πλευρά. Στο δείγμα T12, όπου ο τοπικός λυγισμός εμφανίστηκε μακριά από την συγκόλληση, αυτό συνέβη στην ασθενέστερη πλευρά. Στο άλλο δείγμα, όπου ο τοπικός λυγισμός πραγματοποιήθηκε μακριά από τη συγκόλληση (T7), δεν εμφανίστηκε στο ασθενέστερο τμήμα. Ωστόσο, οι διαφορές στην αντοχή περιορίζονται σε περίπου 1% μεταξύ των τριών τμημάτων αυτού του δείγματος, πράγμα που σημαίνει ότι για αυτό το δείγμα, δεν

υπάρχει “αδύναμος κρίκος” όσον αφορά τις ιδιότητες της διατομής. Μια δεύτερη συνέπεια της διαφοράς στην αντίσταση σε κάμψης μεταξύ των δύο πλευρών της συγκόλλησης είναι ότι η καμπυλότητα συγκεντρώνεται στην ασθενέστερη πλευρά της συγκόλλησης. Πρόκειται για μια δυσμενή κατάσταση, καθώς αυτό το ασθενέστερο τμήμα έχει χαμηλότερη αντίσταση έναντι του τοπικού λυγισμού. Στα πειράματα, η συγκέντρωση της καμπυλότητας είναι σαφώς ορατή στα αποτελέσματα του δείγματος T10 (βλέπε εικόνα 2.35(a)).



Εικόνα 2.35 Επιδράσεις των περιφερειακών συγκολλήσεων και των συγκολλήσεων σύνδεσης ελασμάτων στη σχέση ροπής κάμψης – καμπυλότητας, (α) Δείγμα T10, (β) Δείγμα T12.

Οι γεωμετρικές ατέλειες που δημιουργούνται από τις περιφερειακές συγκολλήσεις και τις συγκολλήσεις σύνδεσης ελασμάτων μπορεί να είναι απόκλιση ευθυγράμμισης ή γεωμετρικές ατέλειες σχήματος όπως «λόφοι» και «κοιλιάδες» που παρατηρούνται σε τμήματα “απλού” σωλήνα. Όπως φαίνεται στην ενότητα 2.1.1.2, αυτές οι αρχικές ατέλειες κοντά στις συγκολλήσεις είναι σημαντικές και δεδομένου ότι σε πολλές περιπτώσεις ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται σ’ αυτά τα σημεία, μπορεί να έχουν αρνητική επίδραση στην αντίσταση σε λυγισμό. Αυτές οι ατέλειες μπορεί τοπικά να οδηγήσουν σε ελαφρώς υψηλότερη καμπυλότητα του σωλήνα. Οι πειραματικές παρατηρήσεις δείχνουν ότι πολύ τοπικά, ο σωλήνας υφίσταται περιστροφή γύρω από το σημείο μία τύπου “άρθρωση” που σχηματίζεται από την ατέλεια. Αυτό το φαινόμενο είναι ορατό στην εικόνα 2.35(b), όπου η καμπυλότητα μετά από την περιφερειακή συγκόλληση (k_2) είναι σημαντικά υψηλότερη από τις υπόλοιπες μετρήσεις της καμπυλότητας σχεδόν κατά όλη τη διάρκεια σχεδόν της δοκιμής.

Η ίδια η συγκόλληση έχει δύο επιπτώσεις. Πρώτον, οι συγκολλήσεις διαμορφώνουν ένα παχύτερο υλικό με μεγαλύτερο όριο διαρροής, κι έτσι η συγκόλληση έχει ένα ενισχυτικό αποτέλεσμα που μπορεί να αυξήσει την τοπική αντίσταση στο λυγισμό. Δεδομένου ότι σε αυτές τις συγκολλήσεις προέκυψαν πολλοί τοπικοί λυγισμοί και πολλά δείγματα δείχνουν ότι σε

τέτοιες συγκολλήσεις παρουσιάζουν χαμηλότερη αντίσταση στο τοπικό λυγισμό, αυτή η επίδραση θεωρείται μικρότερης σημασίας σε σύγκριση με άλλες επιδράσεις όπως οι προαναφερθέντες επιδράσεις λόγω διαφορών στις ιδιότητες διατομής και γεωμετρικών ατέλειών. Δεύτερον, όλες οι συγκολλήσεις έχουν ως αποτέλεσμα παραμένουσες τάσεις. Αυτές οι παραμένουσες τάσεις μπορεί να έχουν επίδραση στον τοπικό λυγισμό.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.1.3.4, δύο από τα έξι δείγματα, συμπεριλαμβανομένων αυτών με περιφερειακή συγκόλληση ή συγκόλλησης σύνδεσης ελασμάτων, αστόχησαν λόγω τοπικού λυγισμού μακριά από τη συγκόλληση. Στο δείγμα T7, η μη επιτυχημένη ευθυγράμμιση και οι άλλες γεωμετρικές ατέλειες που μετρούνται στην περιφερειακή συγκόλληση δεν είναι τόσο σοβαρές. Επιπλέον, λόγω της στιβαρότητάς του, το δείγμα T7 είναι λιγότερο ευαίσθητο στις γεωμετρικές ατέλειες, γεγονός που επιτρέπει άλλους παράγοντες να είναι καθοριστικοί στο σχηματισμό του τοπικού λυγισμού. Στο δείγμα T12, ο τοπικός λυγισμός πραγματοποιήθηκε επίσης μακριά από τις συγκολλήσεις. Οι γεωμετρικές ατέλειες στην περιφερειακή συγκόλληση ήταν πράγματι σχετικά μικρές, αλλά η αρχική γεωμετρική ατέλεια στη συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων ήταν αρκετά μεγάλη. Το δείγμα αποτελείται από τρία μέρη, όπου το μεσαίο τμήμα είχε μεγαλύτερο όριο διαρροής κατά 13% και πάχος κατά 2%, αυξάνοντας σημαντικά τη δύναμή του. Ως αποτέλεσμα, αυτό το ισχυρότερο τμήμα θα μπορούσε να έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει τα συνδεδεμένα ασθενέστερα μέρη κοντά στη συγκόλληση σύνδεσής τους. Αυτή η υποστήριξη μπορεί να εμπόδιζε το σχηματισμό του λυγισμού, καθώς και τη μείωση της οβαλοποίησης της διατομής. Πιο μακριά από τις συγκολλήσεις (GW και CCW), τα “απλά”, ασθενέστερα τμήματα του δείγματος προφανώς ήταν πιο ευάλωτα στο τοπικό λυγισμό. Πρέπει να σημειωθεί ότι η προαναφερθείσα “επίδραση στήριξης” θα μπορούσε επίσης να αναμένεται να αποτρέψει το τοπικό λυγισμό στην περιφερειακή συγκόλληση στο δείγμα T10, όπου υπάρχει ακόμα μεγαλύτερη διαφορά στην αντοχή μεταξύ των γειτονικών τμημάτων. Σε αυτή την περίπτωση όμως, ο τοπικός λυγισμός που πραγματοποιήθηκε στην περιφερειακή συγκόλληση, πολύ πιθανόν να προκλήθηκε από την πολύ μεγάλη αρχική γεωμετρική ατέλεια σε αυτή τη θέση (βλέπε πίνακα 2.4).

Συνολικά, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η κρίσιμη καμπυλότητα (ικανότητα παραμόρφωσης) των δειγμάτων που περιέχουν περιφερειακή συγκόλληση ή συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων είναι γενικά χαμηλότερη (βλέπε εικόνα 2.31). Η μέγιστη ροπή κάμψεως είναι ίση ή μικρότερη από τα παρόμοια “απλά” δείγματα (βλέπε εικόνα 2.30). Η καμπυλότητα

φαίνεται να συγκεντρώνεται τοπικά περισσότερο από ότι για τα “απλά” δείγματα (βλέπε εικόνα 2.32), ειδικά για τα δείγματα όπου ο λυγισμός συνέβη στη συγκόλληση (T3, T6, T10, T13).

Λόγω αυτής της διαφοράς στην συγκέντρωση της καμπυλότητας, η σύγκριση των κρίσιμων παραμορφώσεων με βάση την τοπική καμπυλότητα αντί για το μέσο όρο (όπως στην εικόνα 2.31) έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη διαφορά μεταξύ “απλών” δειγμάτων και δειγμάτων που περιέχουν περιφερειακή συγκόλληση ή συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων. Ωστόσο, ακόμα και όταν χρησιμοποιούνται οι τοπικές καμπυλότητες, οι σωλήνες που περιέχουν μια περιφερειακή συγκόλληση ή συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων είναι στο κατώτερο μέρος του διαγράμματος όσον αφορά τη μέγιστη ροπή κάμψης και την ικανότητα παραμόρφωσης.

Τέλος, η διαφορά ανάμεσα στην επίτευξη της μέγιστης ροπής κάμψης και πτώσης του φορτίου λόγω του τοπικού λυγισμού (ολκιμότητα) είναι χαμηλότερη σε δείγματα που περιέχουν μια τέτοια συγκόλληση (βλέπε εικόνα 2.33).

2.2 Υπολογιστικές μελέτες

Η πρώτη αναλυτική προσπάθεια να μοντελοποιηθεί η μηχανική συμπεριφορά των ευθύγραμμων σωλήνων κάτω από την κάμψη έχει αναφερθεί από τον Brazier [10]. Σε αυτή την πρώιμη δημοσίευση, το φαινόμενο της οβαλοποίησης λόγω κάμψης ενός σωλήνα έχει αντιμετωπιστεί και ποσοτικοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη την θεωρία των δακτυλίων με λεπτό τοίχωμα και τη συμπεριφορά του ελαστικού υλικού της διατομής του σωλήνα. Ο Brazier υπολόγισε αναλυτικά τη μέγιστη ροπή κάμψης του διαγράμματος ροπής κάμψης – καμπυλότητας λόγω της οβαλοποίησης της διατομής, η οποία αναφέρεται ως “ovalisation moment” ή “natural limit moment”. Παρατήρησε επίσης ότι αυτή η λύση για την οβαλοποίηση μπορεί να μην φθάσει το “natural limit moment”. Ο σωλήνας παρουσιάζει λυγισμό πριν επιτευχθεί το οριακό σημείο οβαλοποίησης. Ο Axelrad [39] ήταν ο πρώτος που υπέθεσε ότι ο λυγισμός συμβαίνει όταν η μέγιστη θλιπτική τάση φτάσει στην ομοιόμορφη κρίσιμη τιμή θλίψης για έναν κυκλικό σωλήνα με ακτίνα ίση με την τοπική ακτίνα του οβαλοποιημένου κελύφους στο κρίσιμο σημείο. Αυτή η υπόθεση έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορα αναλυτικά έργα που σχετίζονται με την κάμψη των ελαστικών σωλήνων [40] - [42], ενώ μια αριθμητική επαλήθευση αυτής της υπόθεσης παρέχεται σε μια σειρά εργασιών των Karamanos [43] και Houliara και Karamanos [44], χρησιμοποιώντας μια μεθοδολογία για την ανάλυση ελαστικών επιμηκών κυλίνδρων.

Τα παραπάνω έργα βασίστηκαν στην υπόθεση της συμπεριφοράς των ελαστικών υλικών. Παρ'όλα αυτά, η απόκριση σε κάμψη των χαλύβδινων σωλήνων με λόγο διαμέτρου προς πάχος περίπου μέχρι 120 χαρακτηρίζεται από ανελαστική συμπεριφορά. Ο Ades [45] ήταν ο πρώτος που αναφέρει μια ανάλυση οβαλοποίησης σωλήνων που κάμπτονται στην ανελαστική περιοχή. Με τη διεξαγωγή της ανάλυσης του φαινομένου της οβαλοποίησης στην ελαστοπλαστική περιοχή για χαλύβδινους σωλήνες, λαμβάνετε ότι οι τιμές για την οριακή ροπή και την αντίστοιχη καμπυλότητα είναι σημαντικά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες για την ελαστική περιοχή. Σημαντική δουλειά για την ανάλυση της οβαλοποίησης σχετικά μεγάλου πάχους κυλινδρικών σωλήνων, που έχουν ως κύριο λόγο την ανάλυση των υπεράκτιων σωλήνων, έχουν αναφερθεί από τους Kyriakides και Shaw [46] και Corona και Kyriakides [47], χρησιμοποιώντας ημιαναλυτικά διατομεακά μοντέλα. Σε αυτά τα ημιαναλυτικά αποτελέσματα, έχουν επίσης διερευνηθεί οι επιδράσεις της εξωτερικής πίεσης. Οι Karamanos και Tasoulas [48] επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα αυτά με μία αριθμητική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο έχει αναγνωριστεί ότι μια τέτοια ανάλυση της οβαλοποίησης της διατομής μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτική της πραγματικής συμπεριφοράς σε κάμψη ενός χαλύβδινου σωλήνα με λόγο διαμέτρου προς πάχος υψηλότερο από περίπου 45. Σε μια τέτοια περίπτωση, οι πτυχώσεις στο τοίχωμα δημιουργούνται πριν την οριακή τιμή οβαλοποίησης και ο σωλήνας αστοχεί από τον τοπικό λυγισμό αρκετά ξαφνικά, όπως φαίνεται στην εργασία των Ju και Kyriakides [49]. Για να περιγραφεί αυτή η δομική συμπεριφορά, απαιτείται μια τρισδιάστατη ανάλυση. Σε μια προσπάθεια να περιγράψει η αστάθεια με τη μορφή των πτυχώσεων, ο Gellin [50] επέκτεινε την ανάλυση που πρότεινε ο Ades [45] και ανέπτυξε μια πιο ακριβή λύση στο πρόβλημα χρησιμοποιώντας μία βελτιωμένη κινηματική θεωρία και την J_2 θεωρία πλαστικής παραμόρφωσης. Η διαδικασία ανάλυσης του Gellin επεκτάθηκε περαιτέρω από τον Fabian [51] υιοθετώντας βαθμιαία πλαστικότητα, ένα πληρέστερο σετ κινηματικής των κελυφών και μία ασυμπτωτική λύση.

Ju και Kyriakides [49] ανέπτυξαν μια σειρά μοντέλων για τον υπολογισμό της ανελαστικής απόκρισης των σωλήνων που υποβάλλονται σε κάμψη. Τα μοντέλα αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί για να εντοπίσουν την εμφάνιση αστάθειας και να ακολουθήσουν την εξέλιξή της μέχρι την αστοχία. Το βασικό μοντέλο βασίζεται στον σχηματισμό αξονικής ομοιόμορφης οβαλοποίησης των Kyriakides και Shaw [46] και Corona και Kyriakides [47] το οποίο αποκρίνεται καλά στα αποτελέσματα των Kyriakides και Ju [18]. Πιο πρόσφατα, μια αριθμητική έρευνα των σωληνωτών μελών υπό φορτίο κάμψης έχει αναφερθεί από τους

Karamanos και Tasoulas [52], [53], χρησιμοποιώντας μια μη γραμμική μέθοδο με πεπερασμένα στοιχεία.

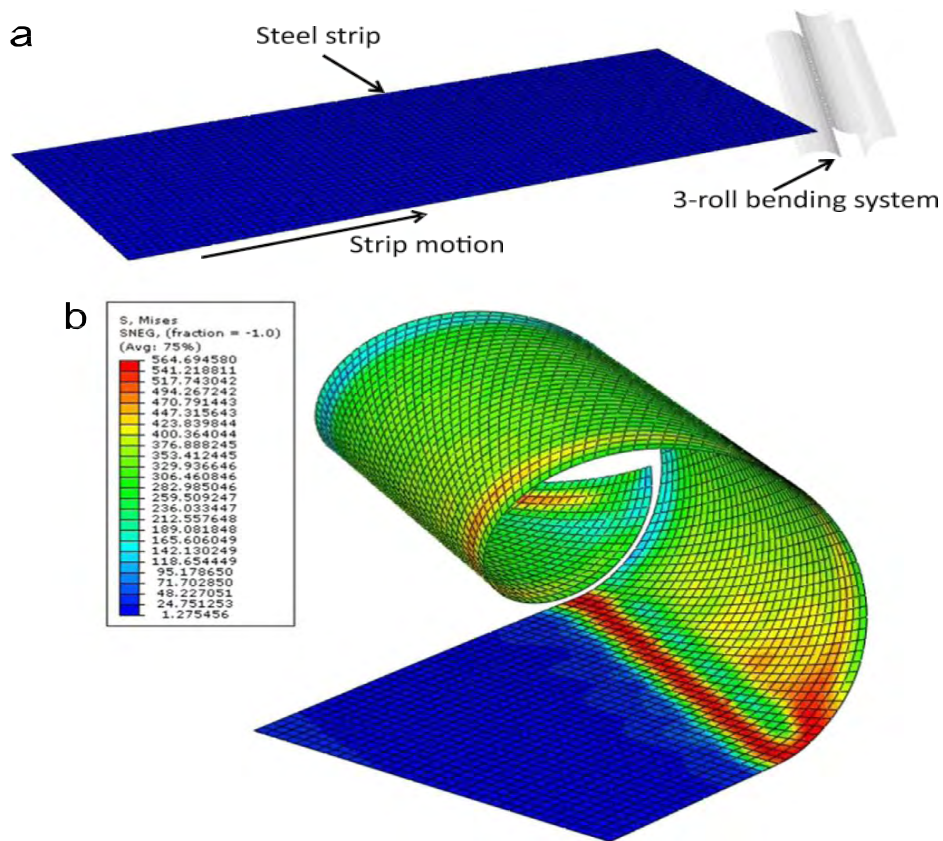
2.2.1 Αριθμητική έρευνα στην οποία βασίστηκε η συγκριτική μελέτη της παρούσας εργασίας

Στην παρούσα εργασία εκτός από την σύγκριση των αποτελεσμάτων της αναλυτικής μεθοδολογίας, που παρουσιάζεται στην ενότητα 3, με τα πειραματικά αποτελέσματα [2] γίνεται σύγκριση και με τα αποτελέσματα της υπολογιστικής μελέτης των Vasilikis et al. [3] που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του ίδιο ερευνητικού έργου, με αυτό των πειραματικών αποτελεσμάτων, “COMBITUBE” [4], το οποίο χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Σ’ αυτήν την μελέτη πραγματοποιήθηκε αριθμητική προσομοίωση της κάμψης ελικοειδώς συγκολλημένων χαλύβδινων σωλήνων. Η εργασία αυτή βασίστηκε σε μη γραμμικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, ικανά να περιγράψουν τη μη γραμμικότητα της γεωμετρίας και του υλικού με ακρίβεια.

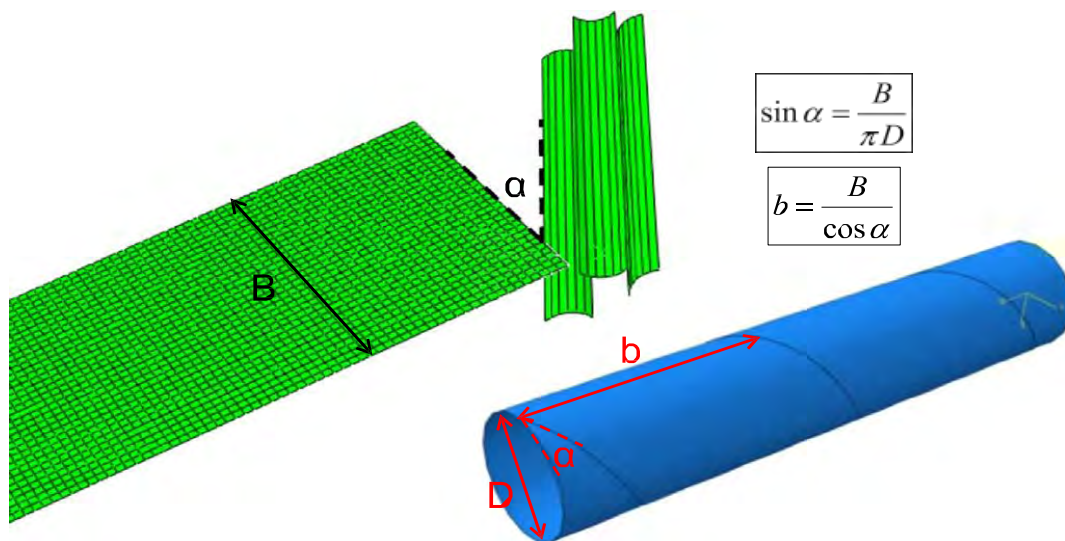
Αρχικά προσομοιώθηκε η διαδικασία ψυχρής έλασης με ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε να καθοριστούν οι τάσεις που προκαλούνται από την διαδικασία κατασκευής του συγκεκριμένου είδους σωλήνων. Έπειτα αναπτύχθηκαν υπολογιστικά μοντέλα για την προσομοίωση της κάμψης των ελικοειδώς συγκολλημένων σωλήνων. Επίσης πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη για τον καθορισμό της επίδρασης των αρχικών ατελειών, της αντοχής του υλικού, της εργοσκλήρυνσης και της ανισοτροπίας. Επιπλέον, εξετάστηκε η επίδραση των περιφερειακών συγκολλήσεων και των συγκολλήσεων σύνδεσης ελασμάτων στον λυγισμό. Τα μεγέθη των αρχικών ατελειών κυματισμού που θεωρήθηκαν για αυτή την υπολογιστική ανάλυση, λήφθηκαν από τις πειραματικές μετρήσεις που της εργασίας [1] που περιγράφηκε στην ενότητα 2.1.1. Τέλος, λήφθηκε υπόψιν και η επίδραση των παραμενουσών τάσεων, όπως αυτές υπολογίστηκαν από την προσομοίωση της διαμόρφωσης των σωλήνων με ψυχρή έλαση.

Το αριθμητικό μοντέλο αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS / Standard [54]. Στην εικόνα 2.36(α), απεικονίζονται τα κύρια μέρη του μοντέλου, δηλαδή η χαλύβδινη πλάκα και το σύστημα κάμψης τριών κυλίνδρων.



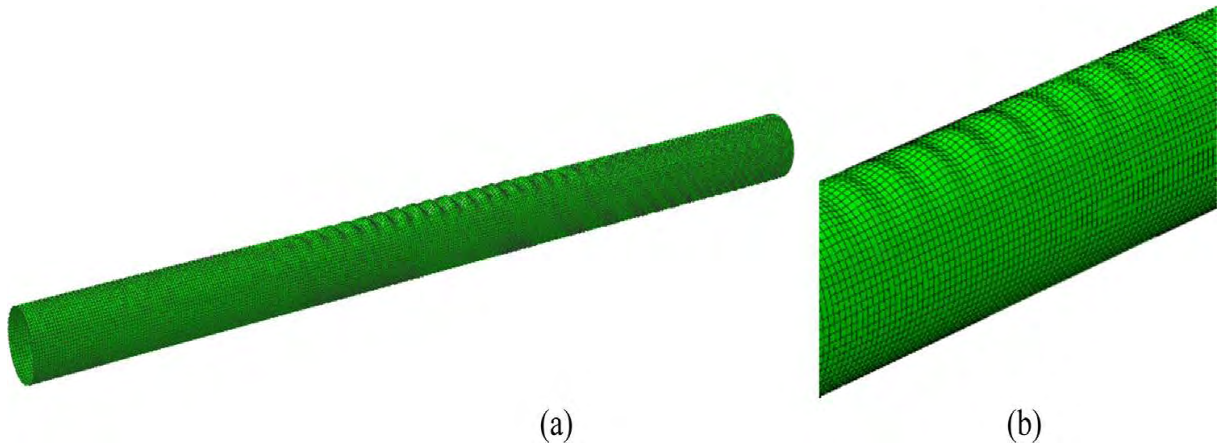
Εικόνα 2.36 (α) Αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων προσομοίωσης ελικοειδούς ψυχρής έλασης. (β) Η διαμήκης κίνηση του ελάσματος μέσω των κυλίνδρων έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό του ελικοειδούς σωλήνα.

Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αριθμητικού μοντέλου απεικονίζονται στην εικόνα 2.37. Χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλο κινηματικό περιορισμό, οι δύο άκρες του ελάσματος συνδέονται, μέσω της διαδικασίας συγκόλλησης. Μετά από αυτό το στάδιο, η σπειροειδής διαμόρφωση συνεχίζει, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.36(β).

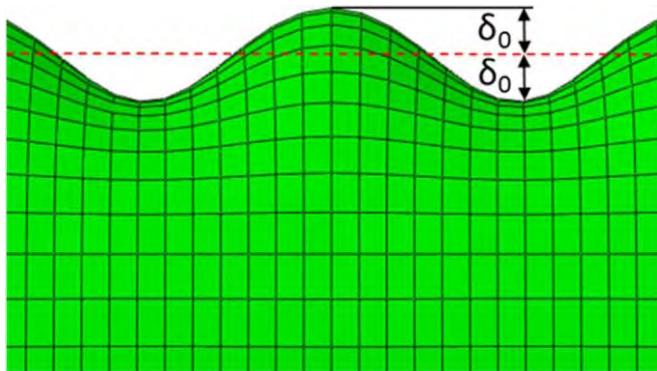


Εικόνα 2.37 Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αριθμητικού μοντέλου για σχηματισμό σπειροειδών συγκολλήσεων.

Για την προσομοίωση των σωλήνων που δεν περιέχουν συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων, χρησιμοποιείται ένα ορθογώνιο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, όπως φαίνεται στις εικόνες 2.38 και 2.39. Χρησιμοποιείται ένα σχετικά πυκνό πλέγμα στοιχείων του κελύφους, με μέγεθος κάθε στοιχείου ίσο με 50mm, δηλαδή λιγότερο από το 5% της διαμέτρου του σωλήνα, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.38. Ο σωλήνας θεωρείται αρχικά ατελής, με μία κυματοειδή γεωμετρική ατέλεια, με τη μορφή της πρώτης ιδιομορφής λυγισμού, που λαμβάνεται μέσω μιας τυπικής ανάλυσης ιδιοτιμών του υπό εξέταση σωλήνα που υποβάλλεται σε καθαρή κάμψη, η οποία εκτελείται στο ABAQUS. Πρόκειται για ένα σχηματισμό κυματισμού μικρού μήκους στην πλευρά συμπίεσης του λυγισμένου σωλήνα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.39. Το μέγιστο βάθος του κυματισμού υποδηλώνεται ως w_0 με $w_0 = 2\delta_0$ και δ_0 είναι το πλάτος της ατέλειας, δηλαδή η μέγιστη απόκλιση της επιφάνειας του κελύφους από τον τέλειο κύλινδρο. Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις [1] της αρχικής γεωμετρίας του σωλήνα, το πλάτος ατέλειας είναι ένα ποσοστό του πάχους σωλήνα, με τυπικές τιμές δ_0/t που κυμαίνονται μεταξύ 2% και 15%.

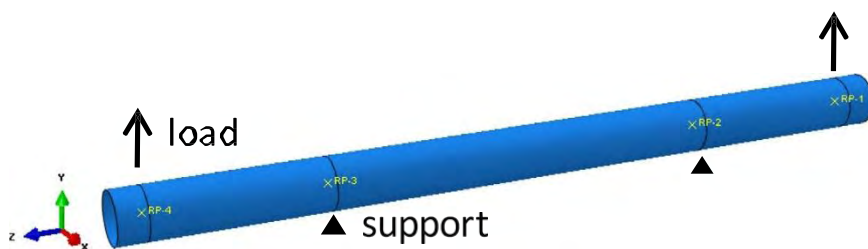


Εικόνα 2.38 (α) Ορθογωνικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του σωλήνα με αρχικούς κυματισμούς (σχήμα της πρώτης ιδιομορφής ατελειών, μεγιστοποιημένο για σκοπούς απεικόνισης). (β) λεπτομέρεια του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων.



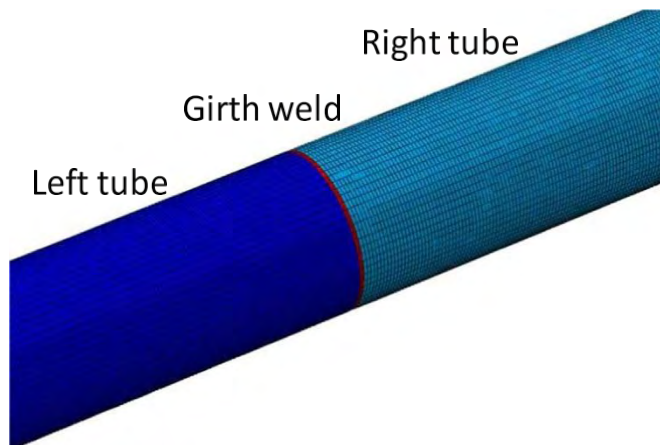
Εικόνα 2.39 Αρχικός κυματισμός στην πλευρά συμπίεσης.

Η γενική γεωμετρία του σωλήνα και οι συνθήκες στήριξης και φόρτισης φαίνονται στην εικόνα 2.40. Η φόρτιση κάμψης εφαρμόζεται μέσω των δύο κάθετων ανυψωτικών δυνάμεων στα εξωτερικά σημεία αναφοράς, οδηγώντας σε ένα σχέδιο φόρτωσης τεσσάρων σημείων.



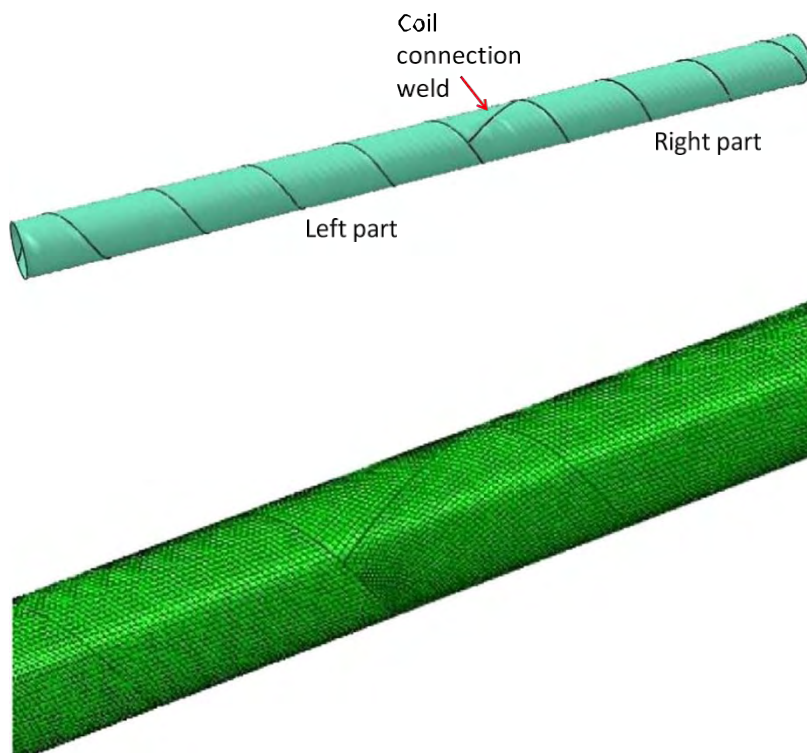
Εικόνα 2.40 Αριθμητικό μοντέλο κάμψης τεσσάρων σημείων στο ABAQUS.

Για τη περίπτωση ενός σωλήνα με συγκόλληση κατά την περιφέρεια, λαμβάνονται υπόψη διαφορετικές ιδιότητες υλικών για τα δύο μέρη του σωλήνα εκατέρωθεν της περιφερειακής συγκόλλησης, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.41.



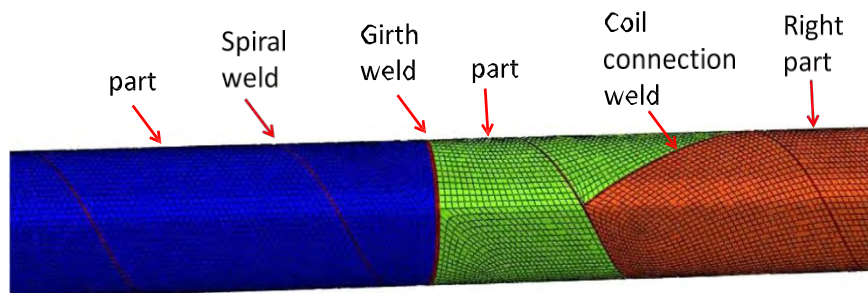
Εικόνα 2.41 Διαχωρισμός του σωλήνα που περιέχει περιφερειακή συγκόλληση

Οι τέσσερις σπειροειδείς σωλήνες με συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων (T6, T7, T10 και T12) μοντελοποιούνται με ένα "ελικοειδές πλέγμα" που φαίνεται στην εικόνα 2.42, το οποίο χρησιμοποιεί ένα κατάλληλο σπειροειδή διαχωρισμό του σωλήνα, για να επιτρέψει την προσομοίωση της συγκόλλησης σύνδεσης ελασμάτων. Συγκεκριμένα, για τις περιπτώσεις που περιέχουν και περιφερειακή συγκόλληση και συγκολλησεις σύνδεσης ελασμάτων, ο σωλήνας χωρίζεται σε τρία μέρη με χωριστές γεωμετρικές και υλικές ιδιότητες, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.43.



Εικόνα 2.42 Διαχωρισμός σωλήνα που περιέχει συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων και (b) αντίστοιχο σπειροειδές πλέγμα.

Οι πραγματικές ιδιότητες του υλικού για κάθε σωλήνα εξετάστηκαν στα αριθμητικά μοντέλα, όπως προκύπτουν από τις δοκιμές εφελκυσμού [1]. Για κάθε σωλήνα, έχει ληφθεί υπόψη μια μέση καμπύλη τάσης-καταπόνησης σε κάθε αριθμητικό μοντέλο. Σε περιπτώσεις περιφερειακής συγκόλλησης και σωλήνων οι οποίοι έχουν και συγκόλληση σύνδεσης ελασμάτων, έχουν δοθεί διαφορετικές ιδιότητες στο υλικό ανά κάθε τμήμα του σωλήνα, όπως υποδεικνύεται από τις αντίστοιχες δοκιμές υλικών.



Εικόνα 2.43 Διαχωρισμός και πλεγματοποίηση σωλήνα που περιέχει περιφερειακή συγκόλληση και συγκόλληση σύνδεσης σπειρών.

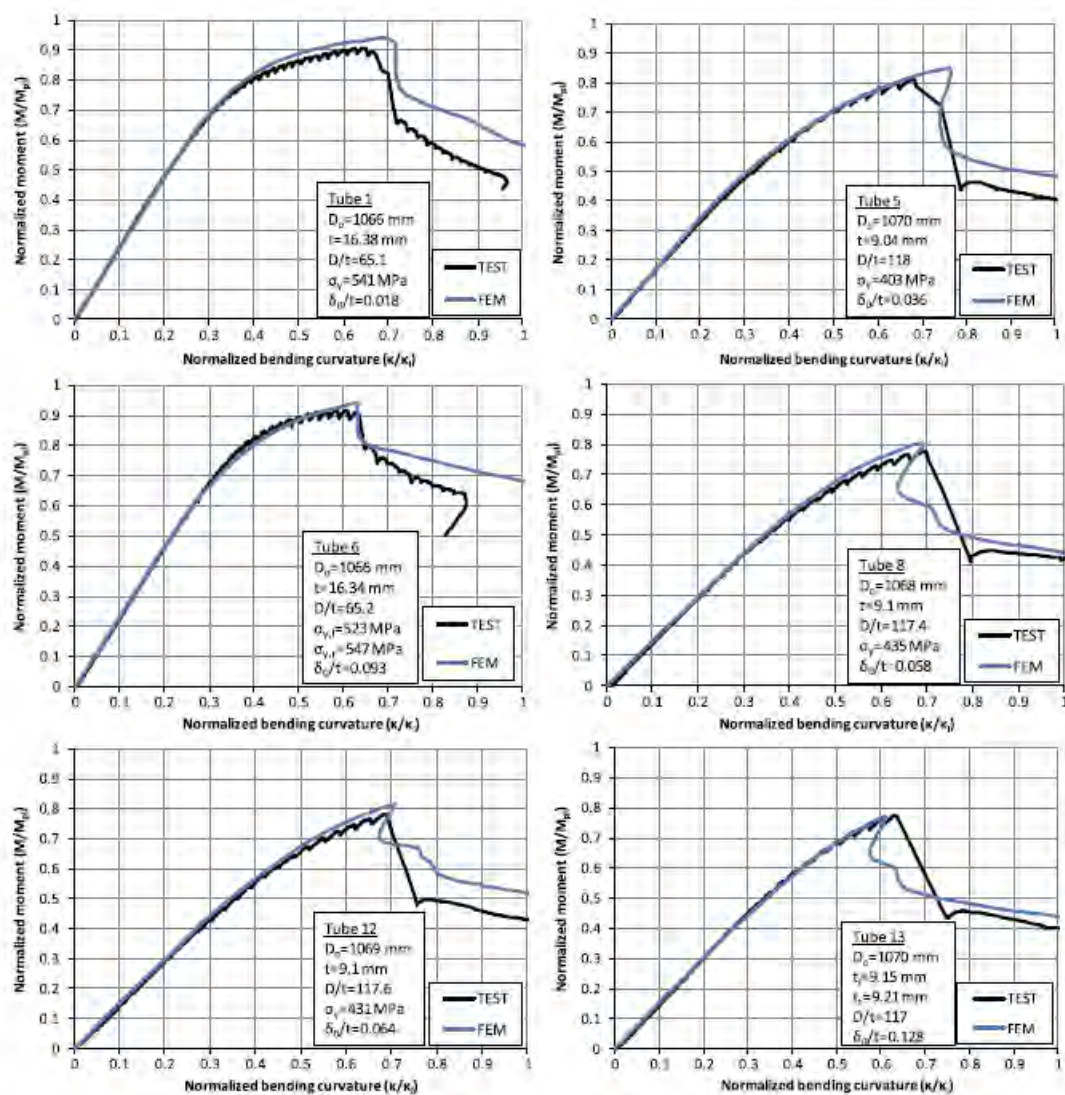
2.2.1.1 Προσομοίωση πειραμάτων

Τα διαγράμματα ροπής κάμψης – καμπυλότητας ($M - \kappa$) για μερικές αντιπροσωπευτικές δοκιμές απεικονίζονται στην εικόνα 2.44. Η σύγκριση μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για όλες τις δοκιμές παρουσιάζεται στις τελευταίες τέσσερις στήλες του πίνακα 2.5. Η καμπυλότητα λόγω κάμψης που αναφέρεται στα αριθμητικά αποτελέσματα υπολογίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος των δύο περιστροφών στις στηρίξεις προς την αρχική απόσταση μεταξύ των δύο στηριγμάτων, η οποία είναι ίση με 8100mm και αντιστοιχεί στις μέσες μετρήσεις καμπυλότητας των πειραμάτων. Οι τιμές της ροπής M είναι αδιαστατοποιημένες με την πλαστική ροπή κάμψης M_p , η οποία υπολογίζεται προσεγγιστικά $M_p = (D_m/2)t\sigma_y$, όπου D_m είναι η μέση διάμετρος του σωλήνα ($D_m = D - t$) ενώ η καμπυλότητα λόγω κάμψης (κ) αδιαστατοποιείται από την ποσότητα $\kappa_l = t/D_m$. Τα αποτελέσματα από την εικόνα 2.44 και τον πίνακα 2.5 δείχνουν μία πολύ καλή σύγκριση μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων και των πειραματικών δεδομένων και υποδεικνύουν ότι τα υπό εξέταση μοντέλα είναι ικανά να προβλέπουν με ακρίβεια την συμπεριφορά των ελικοειδώς συγκολλημένων σωλήνων σε κάμψη από την άποψη της μέγιστης ικανότητας σε κάμψη καθώς και την μέγιστη ικανότητα σε παραμόρφωση. Η τελευταία εκφράζεται με την "κρίσιμη καμπυλότητα" κ_{cr} , η οποία ορίζεται ως η καμπυλότητα που αντιστοιχεί στη μέγιστη

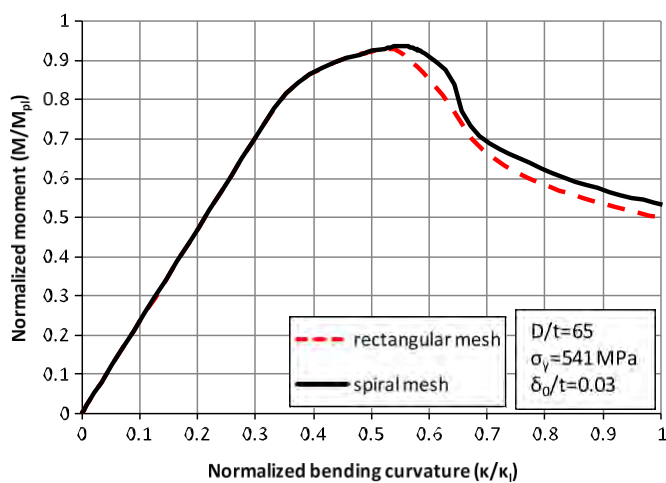
ροπή κάμψης M_{max} . Τέλος, στην εικόνα 2.45 παρουσιάζεται μια σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων που λήφθηκαν χρησιμοποιώντας το ορθογώνιο πλέγμα (εικόνα 2.38) και το σπειροειδές πλέγμα (εικόνα 2.42). Η σύγκριση δείχνει ότι οι δύο τύποι πλέγματος παρέχουν παρόμοια αποτελέσματα.

Πίνακας 2.5 Συγκεντρωτικός πίνακας πειραμάτων. Σύγκριση μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων

Test	Type	Γεωμετρικά δεδομένα			Τάση διαρροής	Αρχικός κυματισμός	Ροπή κάμψης M_{max}/M_P		Καμπυλότητα κ_{cr}/κ_I	
		D	t	D/t	σ_y	δ_0/t	TEST	FEM	TEST	FEM
T1	Plain	1066	16.40	65.1	541	0.018	0.907	0.940	0.646	0.694
T2	Plain	1067	9.02	118	392	0.045	0.769	0.842	0.559	0.669
T4	Plain	1065	9.16	116	420	0.03	0.871	0.845	0.761	0.713
T5	Plain	1070	9.04	118	403	0.036	0.814	0.852	0.681	0.762
T8	Plain	1068	9.10	117	435	0.058	0.781	0.807	0.697	0.691
T9	Plain	1069	16.30	65.4	571	0.046	0.869	0.935	0.696	0.819
T11	Plain	1068	12.90	83	341	0.031	0.865	0.945	0.726	0.728
T3	GW	1069	9.03	118	395	0.100	0.769	0.771	0.432	0.510
T13	GW	1070	9.18	116	436	0.128	0.776	0.772	0.633	0.612
T6	CCW	1066	16.30	65.3	535	0.093	0.918	0.941	0.586	0.631
T7	GW+CCW	1068	16.30	65.4	570	0.055	0.807	0.903	0.533	0.705
T10	GW+CCW	1070	13.10	81.6	446	0.137	0.907	0.916	0.480	0.498
T12	GW+CCW	1069	9.13	117	452	0.063	0.783	0.815	0.690	0.706



Εικόνα 2.44 Διαγράμματα ροπής κάμψης – καμπλότητας για τα δείγματα σωλήνων. σύγκριση μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.



Εικόνα 2.45 Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από ορθογώνια και σπειροειδή πλέγματα.

3. Αναλυτική μεθοδολογία

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται η αναλυτική μεθοδολογία που ανέπτυξαν οι Gresnigt et al. [1], κατά τη διάρκεια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος [3], για την πρόβλεψη του τοπικού λυγισμού σε μεγάλης διαμέτρου σωλήνες, ελικοειδούς συγκόλλησης που υποβάλλονται σε καθαρή κάμψη. Το πρόγραμμα αυτό επικεντρώθηκε σε σωλήνες που χρησιμοποιούνται ως υδατοφράγματα σε σύνθετες κατασκευές “Combiwalls”, όπως αυτή της εικόνας 3.1.



Εικόνα 3.1 Παράδειγμα σύνθετου τοιχίου υδατοφράγματος

Έπειτα, προτείνεται μία τροποποιημένη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, βασισμένη στα πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα [1], [2] που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 2.1.2 και 2.2.1.

3.1 Σχέση ροπής κάμψης - καμπυλότητας

Αρχικά, παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής του διαγράμματος ροπής κάμψης – καμπυλότητας για την ελαστική και την ελαστοπλαστική περιοχή παραμόρφωσης. Επίσης, εξηγείται η διαδικασία με την οποία μπορούν να ληφθούν υπόψιν οι επιδράσεις της οβαλοποίησης της διατομής του σωλήνα, που παρουσιάζεται κατά την κάμψη του, των

επιφανειακών καμπτικών ροπών που προκαλεί η οβαλοποίηση, αλλά και των παραμενουσών τάσεων.

3.1.1 Διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας χωρίς επιπλέον επιδράσεις

Στο πρώτο σκέλος της ανάλυσης δεν λαμβάνονται υπόψιν παράμετροι όπως η οβαλοποίηση, οι επιφανειακές καμπτικές ροπές ή οι παραμένουσες τάσεις.

Αρχικά, θεωρείται το ελαστικό μέρος του διαγράμματος ροπής κάμψης – καμπυλότητας. Η σχέση για την ελαστική περιοχή μπορεί εύκολα να εξαχθεί από την αντοχή των υλικών:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{I} r \Leftrightarrow M = \frac{\varepsilon_{max}}{r} EI = \kappa \cdot EI, \quad EI = E\pi r^3 t \text{ και } \kappa = \frac{\varepsilon_{max}}{r} \quad (3.1)$$

Με την εισαγωγή του όρου της ροπής κάμψης διαρροής στην παραπάνω σχέση προκύπτει η σχέση (3.2):

$$M = M_y \frac{\kappa r}{\varepsilon_y}, \quad \kappa \leq \kappa_e \quad (3.2)$$

$$M_y = \sigma_y \pi r^2 t \text{ και } \kappa_e = \frac{\varepsilon_y}{r} \quad (3.3)$$

όπου M είναι η ροπή κάμψης, κ η καμπυλότητα, M_y η ροπή κάμψης στο όριο διαρροής, σ_y η τάση διαρροής και ε_y η παραμόρφωση στο όριο διαρροής ($\varepsilon_y = 0.002$). Η ακτίνα που χρησιμοποιείται στις παραπάνω σχέσεις είναι η μέση ακτίνα και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$r = \frac{D - t}{2} \quad (3.4)$$

όπου D η εξωτερική διάμετρος και t το πάχος του τοιχώματος.

Για την ελαστοπλαστική περιοχή η σχέση ροπής κάμψης – καμπυλότητας διαμορφώνεται, σύμφωνα με τον Gresnigt (1986) [5], ως εξής:

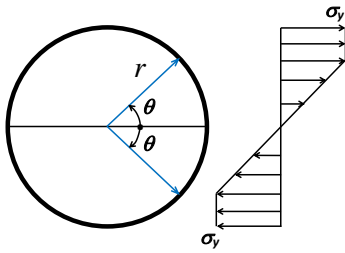
$$M = 0,5 M_p \left(\frac{\theta}{\sin \theta} + \cos \theta \right), \quad \kappa > \kappa_e \quad (3.5)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\varepsilon_y}{\kappa r} \right)$$

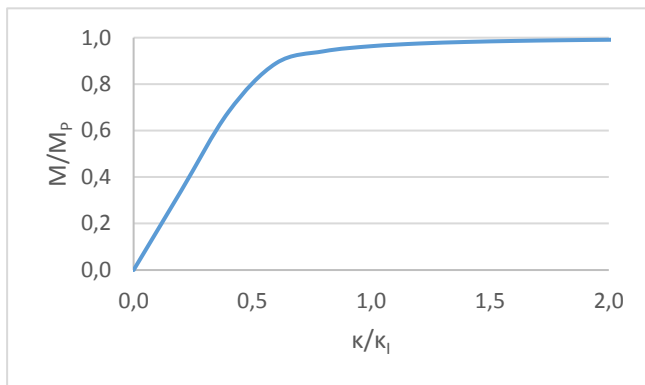
όπου M_p η πλαστική ροπή κάμψης, δηλαδή η ροπή κάμψης για την οποία σε ολόκληρη τη διατομή οι τάσεις έχουν φτάσει το όριο διαρροής:

$$M_p = 4 \sigma_y r^2 t, \quad \kappa = \frac{\varepsilon_y}{r \sin \theta} \quad (3.6)$$

Στην εικόνα 3.2 φαίνεται η κατανομή των τάσεων σε μία διατομή η οποία βρίσκεται στο ελαστοπλαστικό μέρος του διαγράμματος, ενώ στην εικόνα 3.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας όπως διαμορφώθηκε με βάση τις παραπάνω εξισώσεις.



Εικόνα 3.2 Κατανομή τάσεων λόγω κάμψης για την ελαστοπλαστική περιοχή του διαγράμματος ροπής κάμψης - καμπυλότητας



Εικόνα 3.3 Διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας χωρίς επιπλέον επιδράσεις, όπως υπολογίστηκε από την αναλυτική μεθοδολογία για τα δεδομένα του δείγματος T4.

Στο παραπάνω διάγραμμα έχει γίνει αδιαστατοποίηση της καμπυλότητας με την παρακάτω ποσότητα:

$$\kappa_1 = \frac{t}{(D - t)^2} \quad (3.7)$$

3.1.2 Επίδραση οβαλοποίησης της διατομής στη σχέση ροπής κάμψης - καμπυλότητας

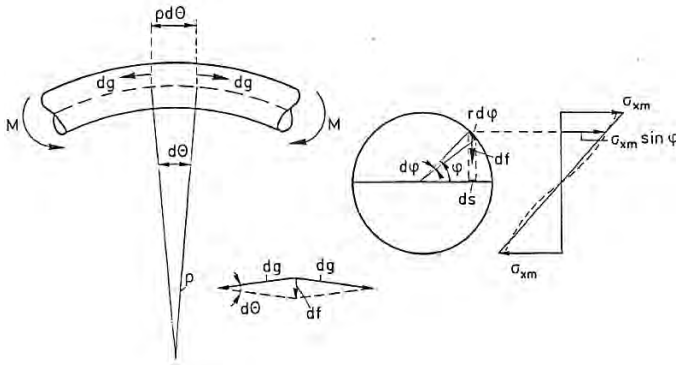
Το φαινόμενο της οβαλοποίησης της διατομής μειώνει την ικανότητα του σωλήνα σε κάμψη. Αυτή η μείωση μπορεί να εκφραστεί με τον συντελεστή h:

$$h = 1 - \frac{2 \alpha}{3 r} \quad (3.8)$$

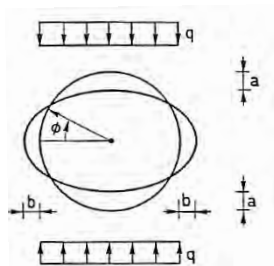
Στο ελαστικό μέρος του διαγράμματος ροπής κάμψης – καμπυλότητας οι δυνάμεις οβαλοποίησης αυξάνονται λόγω αύξησης της καμπυλότητας και των αξονικών τάσεων κάμψης. Η οβαλοποίηση στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος δίνεται από την ακόλουθη έκφραση σύμφωνα με την ανάλυση του Gresnigt (1986) [5]:

$$\alpha = \frac{r^5}{\rho^2 t^2} = \kappa^2 \frac{r^5}{t^2} \quad (3.9)$$

Η παραπάνω σχέση έχει διαμορφωθεί σύμφωνα με το μοντέλο στην εικόνα 3.4 και 3.5.



Εικόνα 3.4 Δυνάμεις οβαλοποίησης df λόγω γραμμική ελαστικής κάμψης



Εικόνα 3.5 Αντικατάσταση δυνάμεων οβαλοποίησης df από ομοιόμορφο φορτίο q

Στην ελαστοπλαστική περιοχή, όμως, η αύξηση των δυνάμεων οβαλοποίησης λόγω των καμπτικών τάσεων στην αξονική διεύθυνση είναι μικρότερη και γι' αυτό οι δυνάμεις οβαλοποίησης αυξάνονται πιο αργά. Έτσι η σχέση που δίνει την οβαλοποίηση στην ελαστοπλαστική περιοχή διαμορφώνεται ως εξής:

$$\alpha_p = \kappa^{1.5} \kappa_e^{0.5} \frac{r^5}{t^2}, \quad \text{και} \quad (3.10)$$

$$h = 1 - \frac{2 \alpha_p}{3 r} \quad (3.11)$$

Η καμπτικές ροπές δίνονται τελικά πολλαπλασιάζοντάς τους τύπους χωρίς επιδράσεις που αναπτύχθηκαν παραπάνω (3.2) και (3.5) για την εύρεση της ροπής κάμψης στην ελαστική

και την ελαστοπλαστική περιοχή αντίστοιχα, με τον κατάλληλο συντελεστή h από τις εξισώσεις (3.8) και (3.11) ανάλογα και πάλι με την περιοχή στην οποία βρίσκεται. Οπότε τελικά η σχέση ροπής κάμψης – καμπυλότητας γίνεται:

$$M_{oval} = M h \quad (3.12)$$

3.1.3 Η επίδραση των επιφανειακών καμπτικών ροπών “plate moments” στην σχέση ροπής κάμψης – καμπυλότητας

Η οβαλοποίηση προκαλεί επιφανειακές καμπτικές ροπές (plate moments) οι οποίες μειώνουν την μέγιστη ροπή κάμψης που μπορεί να δεχθεί ο σωλήνας. Η επίδραση αυτή εκφράζεται με τον πολλαπλασιασμό του συντελεστή g , ο οποίος εκφράζει την επίδραση αυτών των επιφανειακών καμπτικών ροπών (plate moments) και των επιφανειακών αξονικών δυνάμεων, στην υπάρχουσα σχέση της ροπής κάμψης:

$$M_{oval+plate\ moments} = M g h = M_{oval} g, \quad (3.13)$$

όπου ο συντελεστής g δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$g = \frac{c_1}{6} + \frac{c_2}{3} \quad (3.14)$$

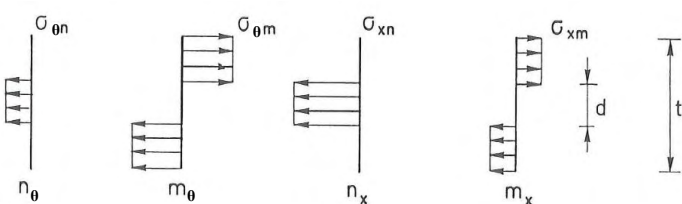
$$c_1 = \sqrt{4 - 3 \left(\frac{n_\theta}{n_p} \right)^2 - 2\sqrt{3} \frac{m_\theta}{m_p}} \quad \text{και} \quad c_2 = \sqrt{4 - 3 \left(\frac{n_\theta}{n_p} \right)^2} \quad (3.15)$$

$$n_\theta = 0.2 \frac{M \kappa}{r} \quad \text{και} \quad m_\theta = 0.071 M \kappa \quad (3.16)$$

$$n_p = t \sigma_y \quad \text{και} \quad m_p = 0.25 t^2 \sigma_y \quad (3.17)$$

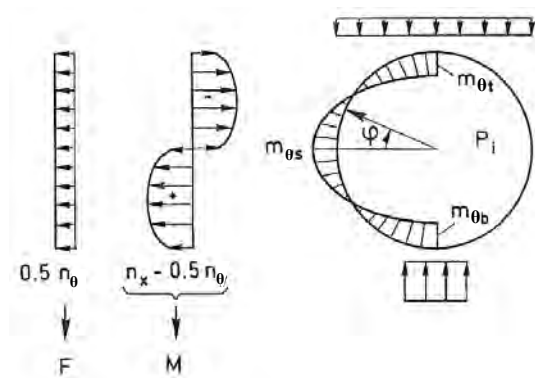
όπου, n_θ και m_θ είναι οι επιφανειακές αξονικές δυνάμεις και οι επιφανειακές ροπές κάμψης αντίστοιχα στην περιφερειακή διεύθυνση του σωλήνα, ενώ n_p και m_p είναι τα αντίστοιχα μεγέθη στο όριο που ολόκληρη η διατομή έχει παραμορφωθεί πλαστικά. Οι παράμετροι n_p και m_p (p =plastic) είναι σταθερές για κάθε σωλήνα, και εξαρτώνται από τις ιδιότητες του ενώ οι μεταβλητές n_θ και m_θ εξαρτώνται από τον τύπο του φορτίου, και για καθαρή κάμψη δίνονται προσεγγιστικά από την σχέση (3.16).

Οι τάσεις λόγω των επιφανειακών καμπτικών ροπών και των επιφανειακών αξονικών δυνάμεων φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



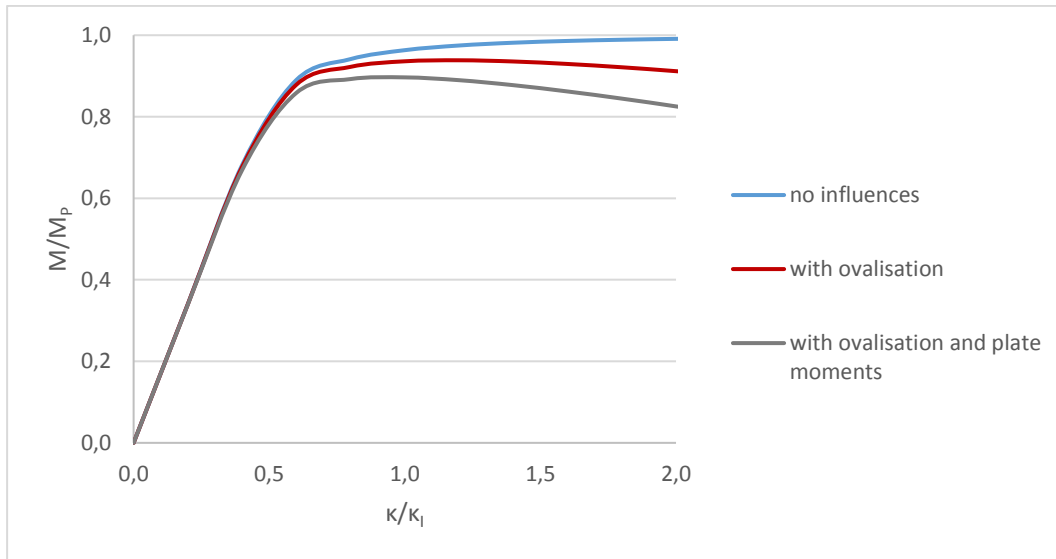
Εικόνα 3.6 Επιφανειακές καμπτικές ροπές και επιφανειακές αξονικές τάσεις με τη βέλτιστη κατανομή τάσεων στο τοίχωμα του σωλήνα.

Η παραπάνω κατανομή τάσεων είναι η βέλτιστη σύμφωνα με την θεωρία της πλαστικότητας για μέγιστη αντίσταση στο επιβαλλόμενο καμπτικό φορτίο. Οι επιφανειακές καμπτικές ροπές στην περιφερειακή διεύθυνση m_θ , επίσης δίνουν επιφανειακές καμπτικές ροπές στην διαμήκη διεύθυνση m_x . Δίνεται ότι ο λόγος Poisson θεωρείται $\nu=0,3$. Οι επιφανειακές καμπτικές δυνάμεις στην περιφερειακή διεύθυνση είναι ($n_\theta = \sigma_{\theta n} \cdot t$) αντίστοιχα στην διαμήκη διεύθυνση η επιφανειακή αξονική δύναμη είναι ($n_x = \sigma_{xn} \cdot t$). Οι επιφανειακές αξονικές δυνάμεις n_x δίνουν την καμπτική ροπή στον σωλήνα. Αν οι καμπτικές επιφανειακές ροπές και οι επιφανειακές αξονικές δυνάμεις στην περιφερειακή διεύθυνση είναι γνωστές δηλαδή το m_θ και το n_θ , τότε οι τάσεις σ_{xn} και οι επιφανειακές αξονικές δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση n_x μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας το κριτήριο Von – Mises yield (εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7 Επιφανειακές αξονικές δυνάμεις οι οποίες προκαλούν καμπτικές ροπές στον σωλήνα και επιφανειακές αξονικές ως αποτέλεσμα της αξονικής δύναμης στον σωλήνα.

Η επίδραση της οβαλοποίησης και των επιφανειακών καμπτικών ροπών (plate moments) στο διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας παρουσιάζεται στην εικόνα 3.8.



Εικόνα 3.8 Επίδραση ovalisation και plate moments στο διάγραμμα ροπής κάμψης καμπυλότητας, όπως υπολογίστηκε από την αναλυτική μεθοδολογία για τα δεδομένα του δείγματος T4.

3.1.4 Η επίδραση των παραμενουσών τάσεων στη σχέση ροπής κάμψης - καμπυλότητας

Οι παραμένουσες τάσεις στα τοιχώματα του σωλήνα εξαρτώνται από τη διεργασία έλασης που έχει γίνει στη φάση της διαμόρφωσης και γενικότερα από τη διαδικασία κατασκευής τους. Οι παραμένουσες τάσεις επηρεάζουν τον σωλήνα σχεδόν από την αρχή της κάμψης. Συγκεκριμένα όταν η ροπή κάμψης φτάσει στο 50% της ροπής κάμψης διαρροής, αρχίζει να γίνεται εμφανής η επίδρασή τους. Η επίδραση των επιφανειακών τάσεων μπορεί να ληφθεί υπόψιν χρησιμοποιώντας μια τροποποιημένη έκφραση για την καμπυλότητα:

$$\kappa_{res} = \alpha_{res} \kappa \quad (3.18)$$

όπου

$$\alpha_{res} = \begin{cases} 1, & \text{για } M \leq 0,5M_y \\ 1 - \left(\frac{M}{M_p} - \frac{0,5M_y}{M_p} \right)^2, & \text{για } M > 0,5M_y \end{cases} \quad (3.19)$$

και

$$\theta_{res} = \sin^{-1} \left(\frac{\varepsilon_y}{\kappa_{res} r} \right) \quad (3.20)$$

Ο συντελεστής α_{res} στην σχέση (3.19) μειώνει την καμπυλότητα ($0 < \alpha_{res} \leq 1$), για ροπές μεγαλύτερες του $M_y/2$. Εφαρμόζοντας τη σχέση (3.18) για την καμπυλότητα στις

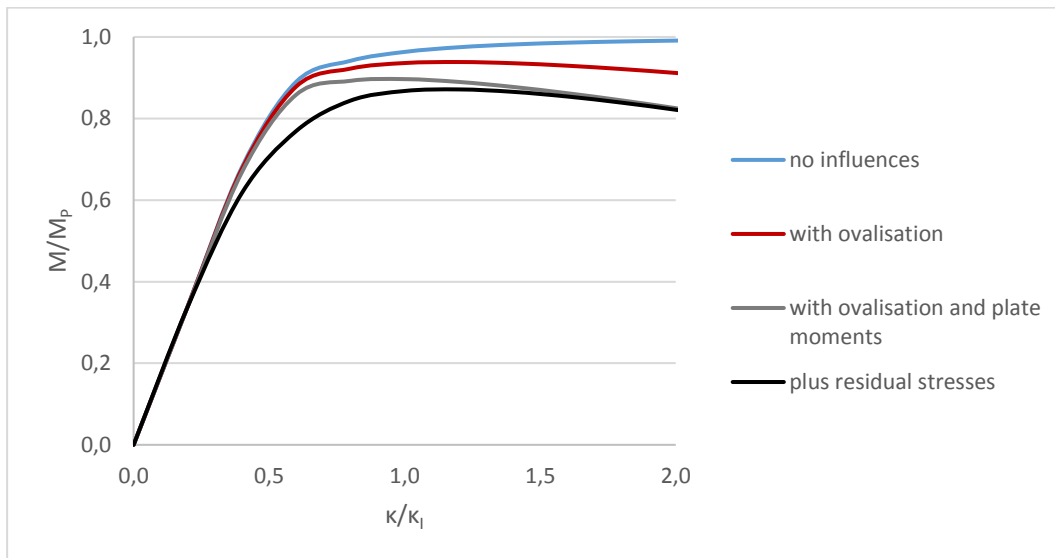
σχέσεις των καμπτικών ροπών (3.1) και (3.5) προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις ροπής κάμψης – καμπυλότητας στην ελαστική και στην ελαστοπλαστική περιοχή αντίστοιχα:

$$M_{+res} = M_y \frac{\kappa_{res} r}{\varepsilon_y} g h, \quad \kappa_{res} \leq \kappa_y \quad (3.21)$$

$$M_{+res} = 0,5 M_p \left(\frac{\theta_{res}}{\sin \theta_{res}} + \cos \theta_{res} \right) g h, \quad \kappa_{res} > \kappa_y \quad (3.22)$$

Οι συντελεστές g και h πολλαπλασιάζονται στις παραπάνω σχέσεις, ούτως ώστε να ληφθούν υπόψιν και οι επιδράσεις της οβαλοποίησης και των επιφανειακών καμπτικών ροπών (plate moments).

Η επίδραση της οβαλοποίησης, των επιφανειακών καμπτικών ροπών (plate moments) και των παραμενουσών τάσεων (residual stresses) στο διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας παρουσιάζονται στην εικόνα (3.10).



Εικόνα 3.9 Διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας με την επίδραση της οβαλοποίησης, των plate moments και των παραμενουσών τάσεων, όπως υπολογίστηκε από την αναλυτική μεθοδολογία για τα δεδομένα του δείγματος T4.

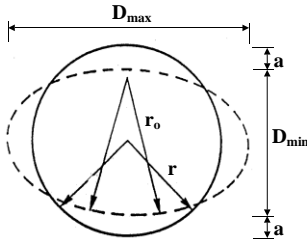
3.2 Κρίσιμο σημείο για τοπικό λυγισμό

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η αναλυτική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τους Gresnigt et al. [1] για την πρόβλεψη του τοπικού λυγισμού. Η μεθοδολογία αυτή όπως έχει ήδη αναφερθεί βασίζεται στην κρίσιμη παραμόρφωση και όχι στην κρίσιμη τάση για την πρόβλεψη του λυγισμού.

Για την εύρεση της κρίσιμης παραμόρφωσης στην οποία ξεκινάει ο τοπικός λυγισμός χρησιμοποιείται αρχικά η παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon_{cr} = \begin{cases} 0.25 \frac{t}{r_{cr}} - 0.0025, & \text{για } \frac{r_{cr}}{t} \leq 60 \\ 0.1 \frac{t}{r_{cr}}, & \text{για } \frac{r_{cr}}{t} > 60 \end{cases} \quad (3.23)$$

όπου r_{cr} είναι η κρίσιμη τοπική ακτίνα στην συμπιεσμένη περιοχή της διατομής όπως φαίνεται στην εικόνα 3.10.



Εικόνα 3.10 Ορισμός της οβαλοποίησης και της κρίσιμης τοπικής ακτίνας r_{cr} .

Για τον υπολογισμό, όμως, της κρίσιμης τοπικής ακτίνας και επομένως της κρίσιμης παραμόρφωσης απαιτείται επαναληπτική διαδικασία. Η κρίσιμη ακτίνα εξαρτάται από τη οβαλοποίηση, η οποία όμως εξαρτάται με τη σειρά της από την κρίσιμη καμπυλότητα, που για να υπολογιστεί πρέπει να είναι γνωστή η κρίσιμη παραμόρφωση. Παρακάτω δίνονται οι σχέσεις που εκφράζουν την κρίσιμη τοπική ακτίνα r_{cr} , την κρίσιμη οβαλοποίηση a_{cr} και την κρίσιμη καμπυλότητα κ_{cr} :

$$r_{cr} = \frac{r}{1 - \frac{3a_{cr}}{r}} \quad (3.24)$$

$$a_{cr} = \begin{cases} \kappa_{cr}^2 \frac{r_{cr}^5}{t^2}, & \text{για την ελαστική περιοχή } (\kappa_{cr} < \kappa_y) \\ \kappa_{cr}^{1.5} \kappa_y^{0.5} \frac{r_{cr}^5}{t^2}, & \text{για την ελαστοπλαστική περιοχή } (\kappa_{cr} \geq \kappa_y) \end{cases} \quad (3.25)$$

$$\kappa_{cr} = \frac{\varepsilon_{cr}}{r} \quad (3.26)$$

Η επαναληπτική διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

1. Υπολογισμός της κρίσιμης παραμόρφωσης ε_{cr} από τη σχέση (3.23) για την αρχική ακτίνα ($r_{cr} = r$) και για τους δύο κλάδους της σχέσης.
2. Υπολογισμός της κρίσιμης καμπυλότητας κ_{cr} από την σχέση (3.26) και για τους δύο κλάδους με βάση τις κρίσιμες παραμορφώσεις που βρέθηκαν στο 1^ο βήμα.
3. Υπολογισμός της κρίσιμης οβαλοποίησης a_{cr} από την σχέση (3.25) και για τους δύο κλάδους με βάση την κρίσιμη καμπυλότητα που βρέθηκε στο 2^ο βήμα.
4. Υπολογισμός κρίσιμης τοπικής ακτίνας r_{cr} από τη σχέση (3.24) και για τους δύο κλάδους με βάση την οβαλοποίηση που βρέθηκε στο 3^ο βήμα.
5. Υπολογισμός της κρίσιμης παραμόρφωσης ε'_{cr} από τη σχέση (3.23) για την κρίσιμη τοπική ακτίνα που βρέθηκε για κάθε κλάδο στο 4^ο βήμα. Εάν υπάρχει σύγκλιση μεταξύ των ε_{cr} και ε'_{cr} η διαδικασία σταματάει εδώ, ειδάλλως επιστρέφουμε στο 1^ο βήμα.

Κατά την παραπάνω διαδικασία, επειδή δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων αν ο λόγος r_{cr}/t είναι μεγαλύτερος ή μικρότερος του 60 εφαρμόζεται η επαναληπτική διαδικασία και για τους δύο κλάδους της εξίσωσης (3.23) και έπειτα αναλόγως εάν το r_{cr} είναι πάνω ή κάτω από το όριο επιλέγεται το αποτέλεσμα του αντίστοιχου κλάδου. Για τα δεδομένα των πειραμάτων του πίνακα 2.5 εκτελέστηκε μόνο μία επανάληψη, διότι ότι η σύγκλιση κρίθηκε ικανοποιητική.

3.2.1 Γεωμετρικές επιδράσεις και επιδράσεις εργοσκλήρυνσης στο κρίσιμο σημείο τοπικού λυγισμού

Για τον υπολογισμό του κρίσιμου σημείου αστοχίας λόγω τοπικού λυγισμού θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι γεωμετρικές ατέλειες των δοκιμίων καθώς και η θετική επίδραση της εργοσκλήρυνσης του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Οι επιδράσεις των γεωμετρικών ατελειών, όπως και της εργοσκλήρυνσης λαμβάνονται υπόψιν πολλαπλασιάζοντας την κρίσιμη παραμόρφωση με τους συντελεστές a_{geo} και a_{sh} αντίστοιχα.

$$\varepsilon_{cr}^* = \varepsilon_{cr} a_{geo} a_{sh} \quad (3.27)$$

Έπειτα η κρίσιμη καμπυλότητα δίνεται από τη σχέση:

$$\kappa_{cr}^* = \frac{\varepsilon_{cr}^*}{r} \quad (3.28)$$

Επίδραση γεωμετρικών ατελειών

Στην παρούσα εργασία μελετάται μόνο η επίδραση των κυματισμών που δημιουργούνται στον σωλήνα και τα τη διαδικασία ψυχρής έλασής όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 2.1.2. Επομένως ο συντελεστής των γεωμετρικών επιδράσεων ταυτίζεται με τον συντελεστή επίδρασης των κυματισμών $a_{geo} \equiv a_{un}$:

$$a_{geo} \equiv a_{un} = 0.0135 \frac{D}{t} \left(\frac{\delta_0}{t} \right)^{0.3} - 0.00423 \frac{D}{t} - 2.102 \left(\frac{\delta_0}{t} \right)^{0.3} + 1.653 \quad (3.29)$$

όπου δ_0 το πλάτος κυματισμού όπως έχει οριστεί στην ενότητα 2.1.2.

Επίδραση εργοσκλήρυνσης

Η επίδραση της εργοσκλήρυνσης είναι θετική στη διαμόρφωση του τοπικού λυγισμού. Έτσι, ο συντελεστής της επίδρασης της εργοσκλήρυνσης a_{sh} είναι μεγαλύτερος της μονάδα, γεγονός που σημαίνει ότι το κρίσιμο σημείο τοπικού λυγισμού μεταφέρεται σε μεγαλύτερη καμπυλότητα. Ο συντελεστής της εργοσκλήρυνσης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\alpha_{sh} = 1.33 - \frac{0.04}{1 - \sigma_y / \sigma_u} \quad (3.30)$$

όπου σ_u είναι το όριο θραύσης του υλικού.

Αφού βρεθεί η κρίσιμη καμπυλότητα από τη σχέση (3.28), η μέγιστη ροπή κάμψης βρίσκεται από το διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας.

3.2.2 Τροποποιημένη σχέση πρόβλεψης της κρίσιμης παραμόρφωσης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια βελτίωσης της πρόβλεψης του κρίσιμου σημείου σε τοπικό λυγισμό. Έτσι, τροποποιήθηκε η σχέση (3.23) της κρίσιμης παραμόρφωσης με οδηγό τα πειραματικά αποτελέσματα των Van Es. et al. (2016) [1].

Το πρόβλημα που εντοπίστηκε με την αναλυτική μεθοδολογία της σχέσης (3.23), είναι ότι για τους λεπτότοιχους σωλήνες οι μέγιστες ροπές κάμψης που προβλέπονταν ήταν πολύ συντηρητικές σε σχέση με αυτές που λαμβάνονται από τα πειράματα. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στην ενότητα 4. Πρέπει, βέβαια, να ληφθεί υπόψιν ότι για τους λεπτότοιχους

σωλήνες είναι επιθυμητό να υπάρχει μεγαλύτερος συντελεστής ασφαλείας απ' ό τι για τους πιο παχύς, δεδομένου ότι, ο τοπικός λυγισμός στους λεπτότοιχους σωλήνες δεν αναπτύσσεται σταδιακά, αλλά ραγδαία. Έτσι, το ζητούμενο της τροποποίησης αυτής, δεν είναι η αναλυτική μεθοδολογία να προβλέψει ακριβώς την μέγιστη ροπή κάμψης των πειραματικών αποτελεσμάτων, αλλά να τα πλησιάσει περισσότερο σε σχέση με την υπάρχουσα σχέση.

Στην κατεύθυνση αυτή αναπτύχθηκαν τέσσερις τροποποιημένες σχέσεις για την εύρεση της κρίσιμης παραμόρφωσης. Η τελική επιλογή της σχέσης που θα εκφράζει την κρίσιμη παραμόρφωση εξαρτάται και από το πόσο συντηρητική απαιτείται να είναι.

Αρχικά θεωρήθηκε καλό να κρατηθεί ο πρώτος κλάδος της εξίσωσης (3.23) που αναφέρεται στους πιο παχύς σωλήνες ως έχει. Έτσι για να αυξηθεί η ροπή κάμψης για τον δεύτερο κλάδο και για να παραμείνει συνεχής η εξίσωση στο όριο που γίνεται η αλλαγή κλάδου χρειάστηκε να μειωθεί το όριο αυτό. Με αυτόν τον τρόπο προέκυψε η παρακάτω τροποποιημένη σχέση (3.31):

$$\varepsilon_{cr}^{(1)} = \begin{cases} 0.25 \frac{t}{r_{cr}} - 0.0025, & \frac{r_{cr}}{t} \leq 50 \\ 0.125 \frac{t}{r_{cr}}, & \frac{r_{cr}}{t} > 50 \end{cases} \quad (3.31)$$

Με τη χρήση της σχέσης (3.31) στην αναλυτική μεθοδολογία αντί για τη σχέση (3.23) όντως, για τα πειράματα που μελετώνται, οι ροπές κάμψης, για σωλήνες με λόγους $D/t \geq 116$ είναι πιο κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα. Ωστόσο, για να αυξηθούν περαιτέρω οι τιμές αυτές και να πλησιάσουν ακόμα περισσότερο τα αποτελέσματα, διαμορφώθηκε η σχέση (3.32):

$$\varepsilon_{cr}^{(2)} = \begin{cases} 0.25 \frac{t}{r_{cr}} - 0.0025, & \frac{r_{cr}}{t} \leq 40 \\ 0.15 \frac{t}{r_{cr}}, & \frac{r_{cr}}{t} > 40 \end{cases} \quad (3.32)$$

Στην σχέση (3.32) παρέμεινε και πάλι ίδιος ο πρώτος κλάδος, ενώ το όριο αλλαγής μειώθηκε στο 40. Με αυτόν τον τρόπο αυξήθηκαν ακόμα περισσότερο οι μέγιστες ροπές κάμψης για τους πιο λεπτότοιχους σωλήνες.

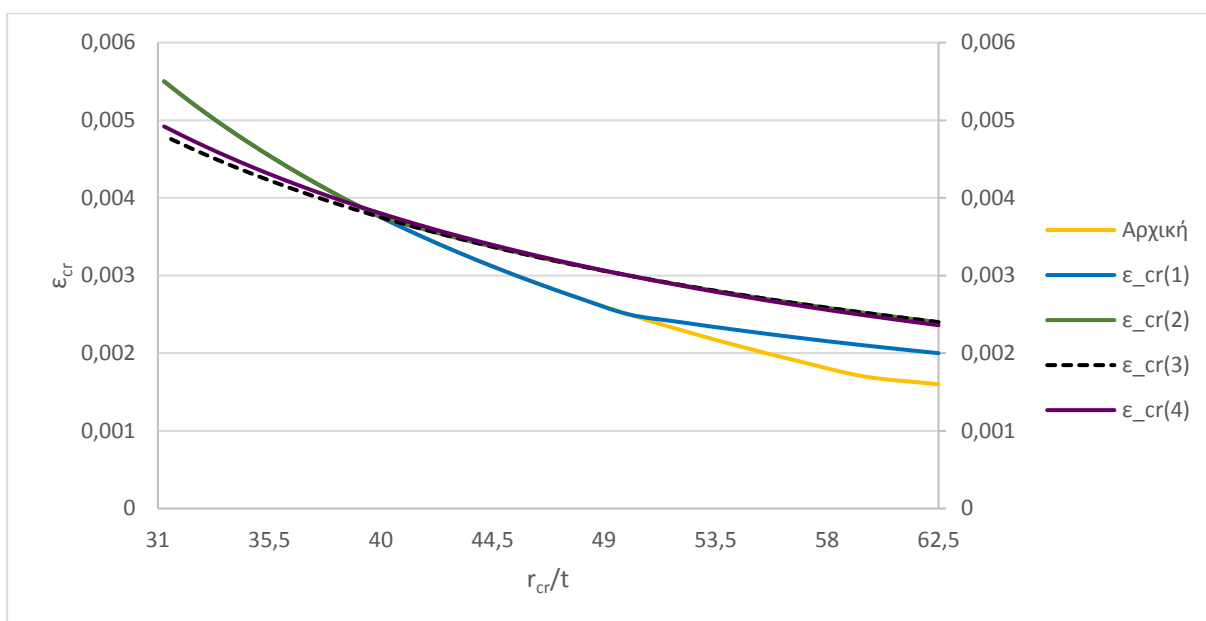
Στην επόμενη προσπάθεια βελτίωσης επιχειρήθηκε να δημιουργηθεί μία σχέση για την κρίσιμη παραμόρφωση που να μην είναι κλαδική αλλά να μπορεί να προβλέπει καλά την κρίσιμη παραμόρφωση και για τους λεπτότοιχους αλλά και για του πιο παχύς σωλήνες. Αρχικά δοκιμάστηκε η σχέση (3.33), η οποία παρόλο που δεν είναι κλαδική, τελικά παρατηρήθηκε ότι εξέφραζε πολύ καλά τα αποτελέσματα που έχουν ληφθεί από τα πειράματα.

$$\varepsilon_{cr}^{(3)} = 0.15 \frac{t}{r_{cr}} \quad (3.33)$$

Τέλος, για την δημιουργία μίας λίγο πιο συντηρητικής σχέσης από την (3.33) προέκυψε η σχέση (3.34):

$$\varepsilon_{cr}^{(4)} = 0.16 \frac{t}{r_{cr}} - 0,0002 \quad (3.34)$$

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι σχέσεις για την κρίσιμη παραμόρφωση που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή η αρχική σχέση (3.23) και οι νέες, τροποποιημένες σχέσεις (3.31) έως (3.34).

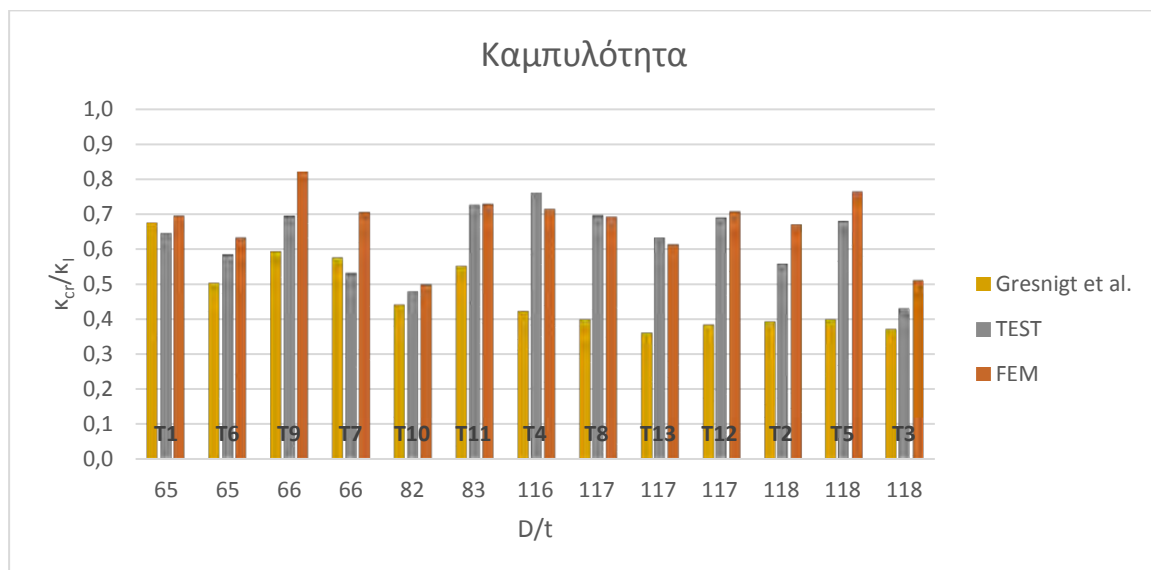


Εικόνα 3.11 Διάγραμμα κρίσιμης παραμόρφωσης – λόγου κρίσιμης ακτίνας προς πάχος για την αρχική (Gresnigt et al) και τις προτεινομενες τροποποιημένες σχέσεις.

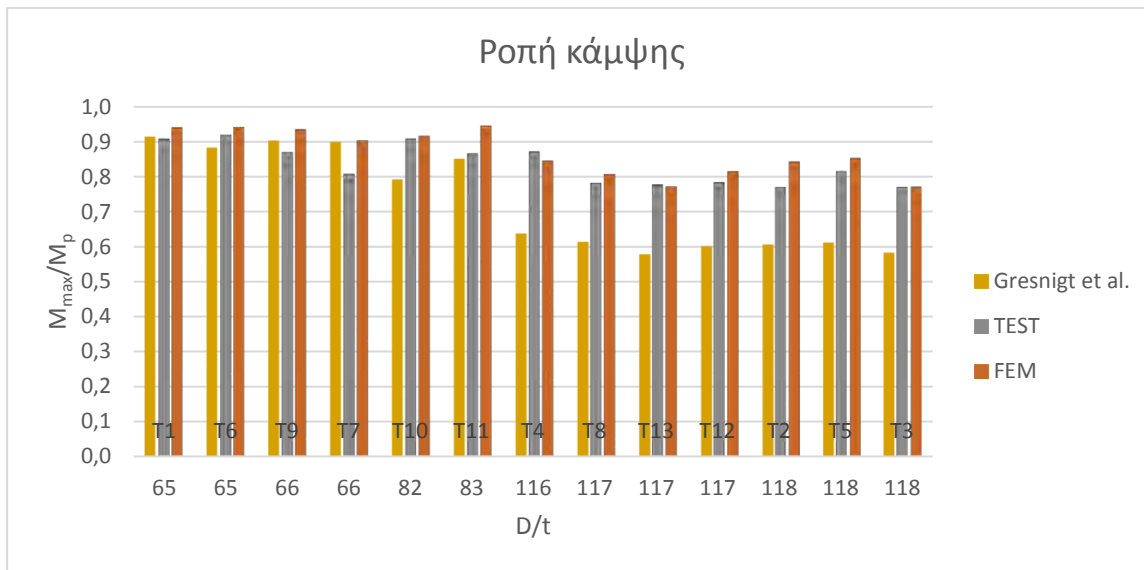
4. Αποτελέσματα

4.1 Σύγκριση αναλυτικών μεθοδολογιών

Αρχικά συγκρίθηκαν τα πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την αναλυτική μεθοδολογία όταν ακολουθηθεί η αρχική σχέση (3.23) για την κρίσιμη παραμόρφωση, εικόνες 4.1 και 4.2.



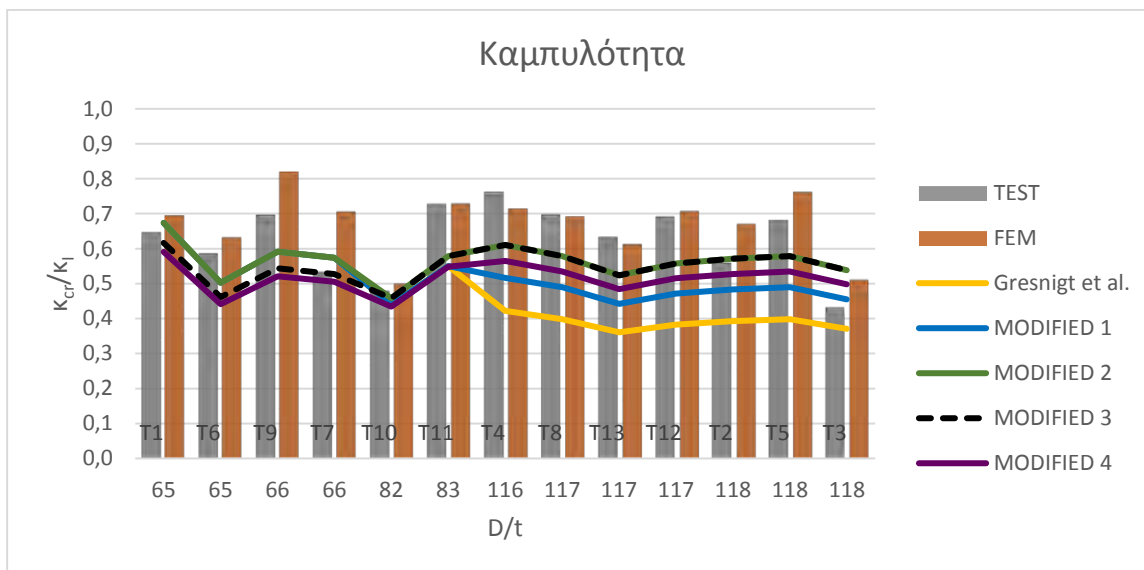
Εικόνα 4.1 Συγκριτικό γράφημα κρίσιμης καμπυλότητας για τα πειραματικά (TEST), υπολογιστικά (FEM) και αναλυτικά (Gresnigt et al) αποτελέσματα μέσω της σχέσης κρίσιμης παραμόρφωσης (3.23).



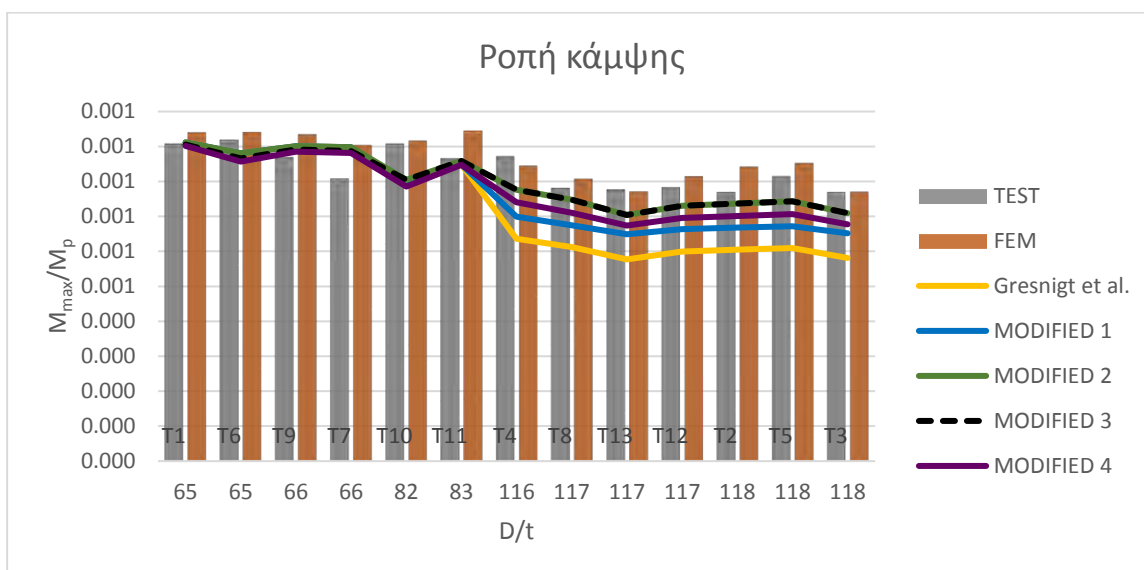
Εικόνα 4.2 Συγκριτικό γράφημα μέγιστων ροπών κάμψης για τα πειραματικά (TEST), υπολογιστικά (FEM) και αναλυτικά (Gresnigt et al) αποτελέσματα μέσω της σχέσης κρίσιμης παραμόρφωσης (3.23).

Όπως παρατηρείται στις εικόνες 4.1 και 4.2, οι προβλέψεις της αναλυτικής μεθοδολογίας για τα πιο λεπτότοιχα πειράματα ($D/t \geq 116$), είναι αρκετά συντηρητικές σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Παρακάτω, παρουσιάζονται τα συγκριτικά γραφήματα των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων με την αρχική αναλυτική και τις τροποποιημένες αναλυτικές μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 4.3 Συγκριτικό γράφημα κρίσιμης καμπυλότητας για τα πειραματικά (TEST), υπολογιστικά (FEM) και αναλυτικά (Gresnigt et al) αποτελέσματα μέσω της αρχικής σχέσης κρίσιμης παραμόρφωσης (3.23) και των τροποποιημένων σχέσεων (MODIFIED 1 – MODIFIED 4) που λήφθηκαν από τις σχέσεις (3.31) – (3.34).



Εικόνα 4.4 Συγκριτικό γράφημα κρίσιμης ροπής κάμψης για τα πειραματικά (TEST), υπολογιστικά (FEM) και αναλυτικά (Gresnigt et al.) αποτελέσματα μέσω της αρχικής σχέσης κρίσιμης παραμόρφωσης (3.23) και των τροποποιημένων σχέσεων (MODIFIED 1 – MODIFIED 4) που λήφθηκαν από τις σχέσεις (3.31) – (3.34).

Όπως παρατηρείται, οι τροποποιημένες σχέσεις (3.31) – (3.34), ενώ παραμένουν πρακτικά ίδιες με την αρχική για τους πιο παχύς σωλήνες, προβλέπουν αρκετά καλύτερα την κρίσιμη καμπυλότητα, στην οποία θα εμφανιστεί ο τοπικός λυγισμός, για τους πιο λεπτότοιχους σωλήνες. Αυτό που παρατηρείται τελικά είναι ότι η καλύτερη πρόβλεψη των αποτελεσμάτων

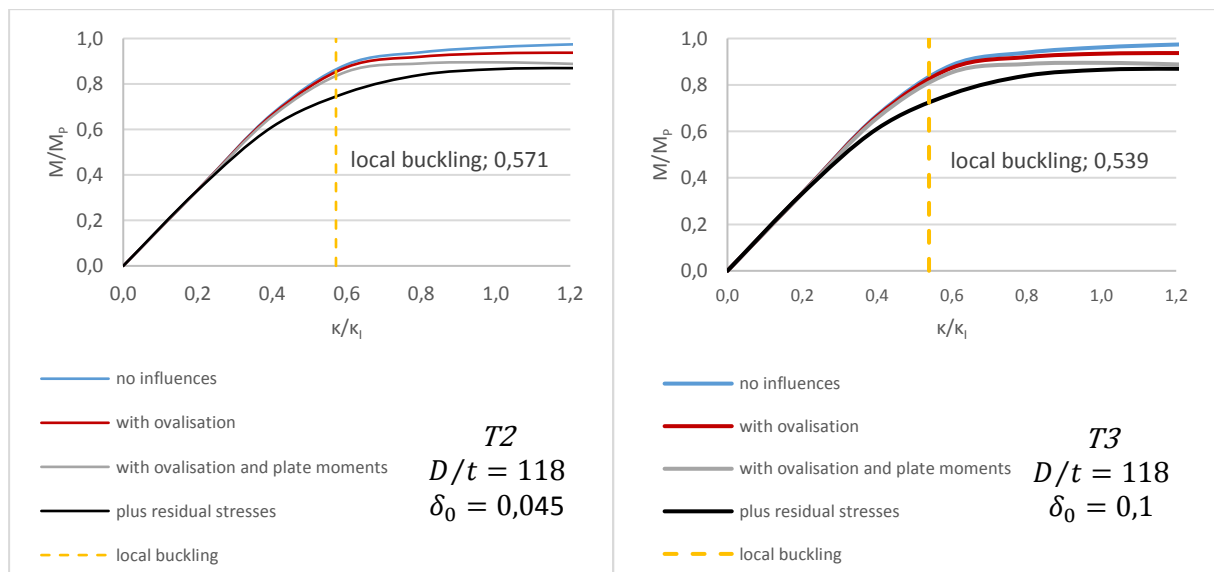
δίνεται από τις σχέσεις (3.32) και (3.33). Ενώ το πιο ενδιαφέρον είναι ότι η σχέση (3.33) μπορεί και προβλέπει πολύ καλά τα αποτελέσματα για όλους τους σωλήνα χωρίς να είναι κλαδική.

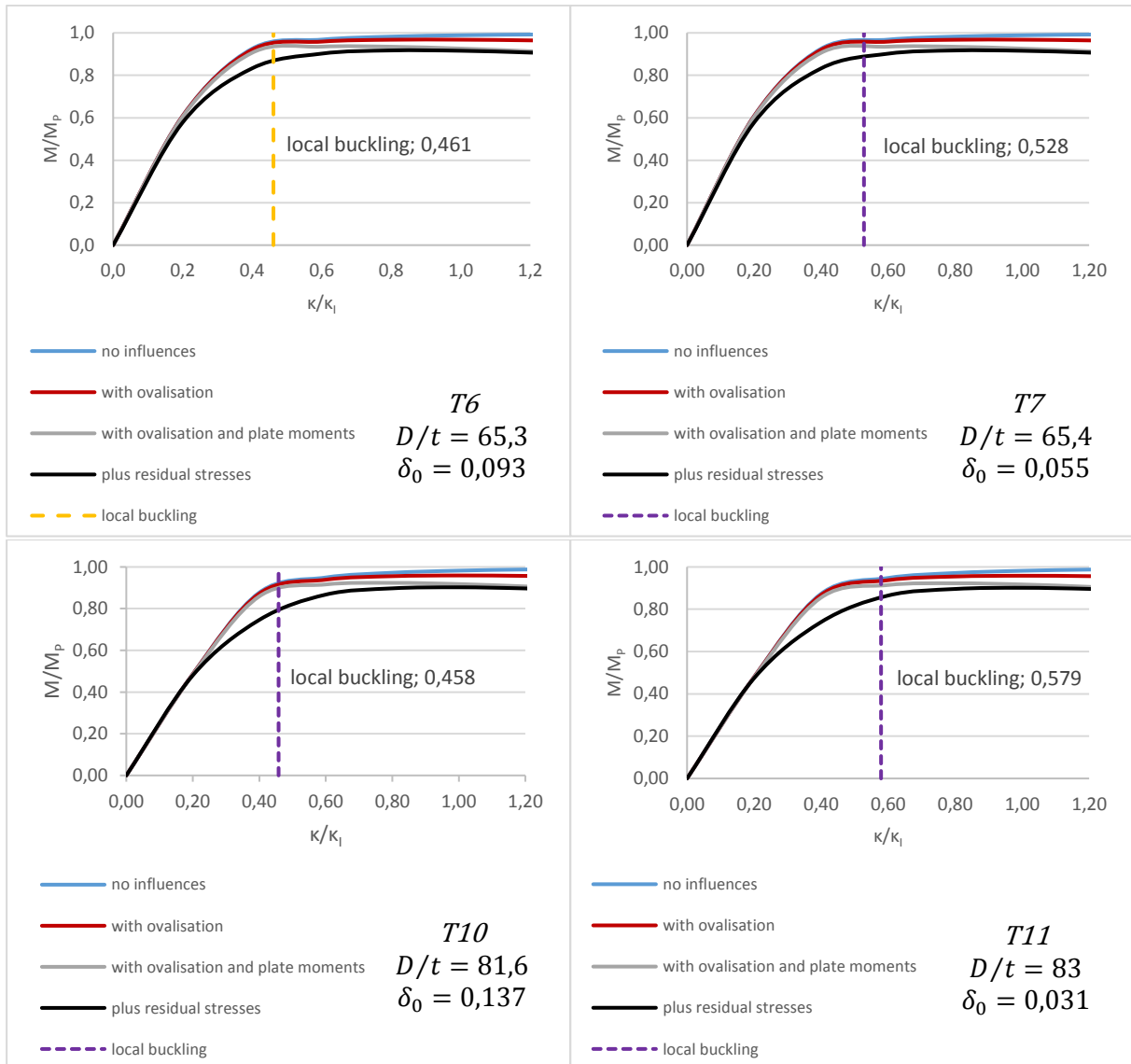
Παρόλο που η σχέση (3.33) δίνει καλύτερες προβλέψεις για όλα τα αποτελέσματα, η σχέση (3.34) θεωρείται τελικά, ότι είναι η καταλληλότερη σχέση για την πρόβλεψη της κρίσιμης παραμόρφωσης, διότι καταφέρνει, χωρίς να είναι κλαδική συνάρτηση, να είναι πιο συντηρητική για τους λεπτότοιχους σωλήνες απ' ότι στους πιο παχύς.

4.2 Διαγράμματα ροπής κάμψης – καμπυλότητας

Σ' αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα διαγράμματα ροπής κάμψης – καμπυλότητας που εξήχθησαν με την αναλυτική μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω, και συγκρίνονται με τα πειραματικά [1] και υπολογιστικά αποτελέσματα [2] των εργασιών που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενες ενότητες της παρούσας εργασίας.

Στην παρακάτω εικόνα 4.5 παρουσιάζονται μερικά από τα διαγράμματα ροπής κάμψης – καμπυλότητας όπως υπολογίστηκαν από την αναλυτική μεθοδολογία. Επίσης στα διαγράμματα φαίνεται και η κρίσιμη καμπυλότητα για τοπικό λυγισμό (σχέση (3.34)).





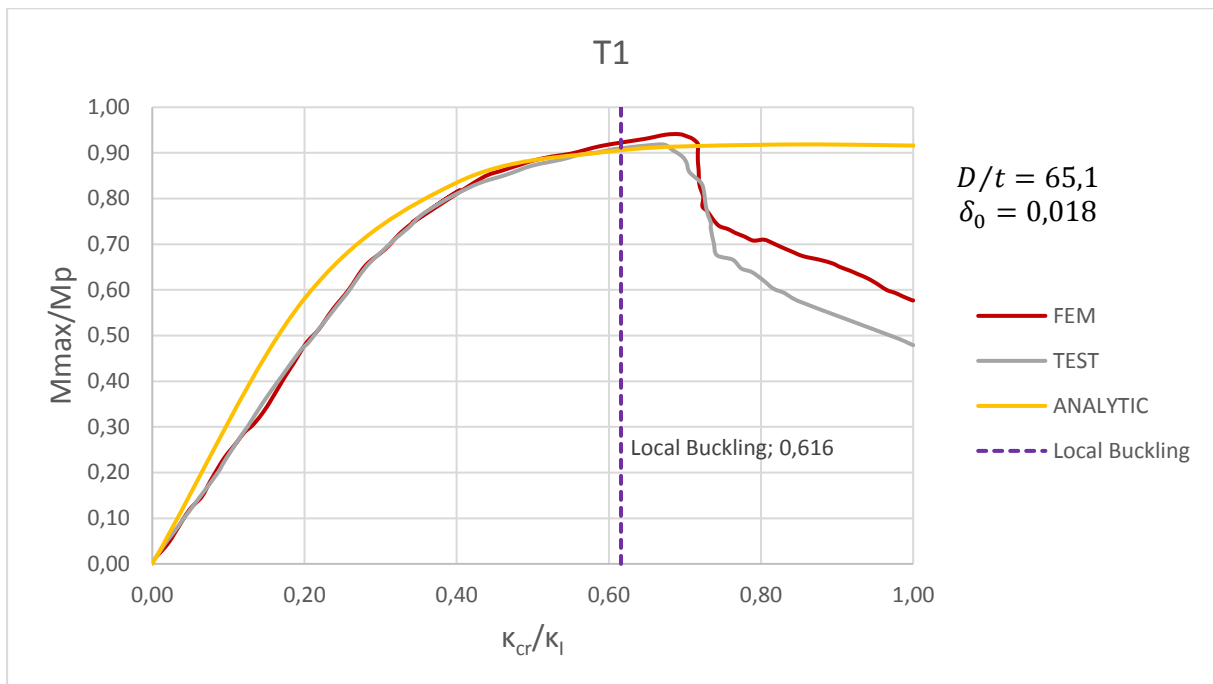
Εικόνα 4.5 Διαγράμματα ροπής κάμψης – καμπυλότητας σύμφωνα με την αναλυτική μεθοδολογία για τα δείγματα T2, T3, T6, T7, T10 και T11. Κρίσιμη καμπυλότητα για τοπικό λυγισμό (local buckling) σύμφωνα με τη σχέση (3.34).

Στις εικόνες 4.6 – 4.8 παρουσιάζονται μερικά διαγράμματα ροπής κάμψης – καμπυλότητας που υπολογίστηκαν από την αναλυτική μεθοδολογία σε σύγκριση με τα αντίστοιχα διαγράμματα από τα πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα.

Όπως παρατηρείται και στα τρία διαγράμματα η αναλυτική μεθοδολογία ανταπεξέρχεται αρκετά καλά. Οι τιμές της κρίσιμης καμπυλότητας για τοπικό λυγισμό που παρουσιάζονται στα διαγράμματα προβλέπονται από την σχέση (3.34) και φαίνεται και στις τρεις περιπτώσεις να είναι λίγο μικρότερες από αυτές των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

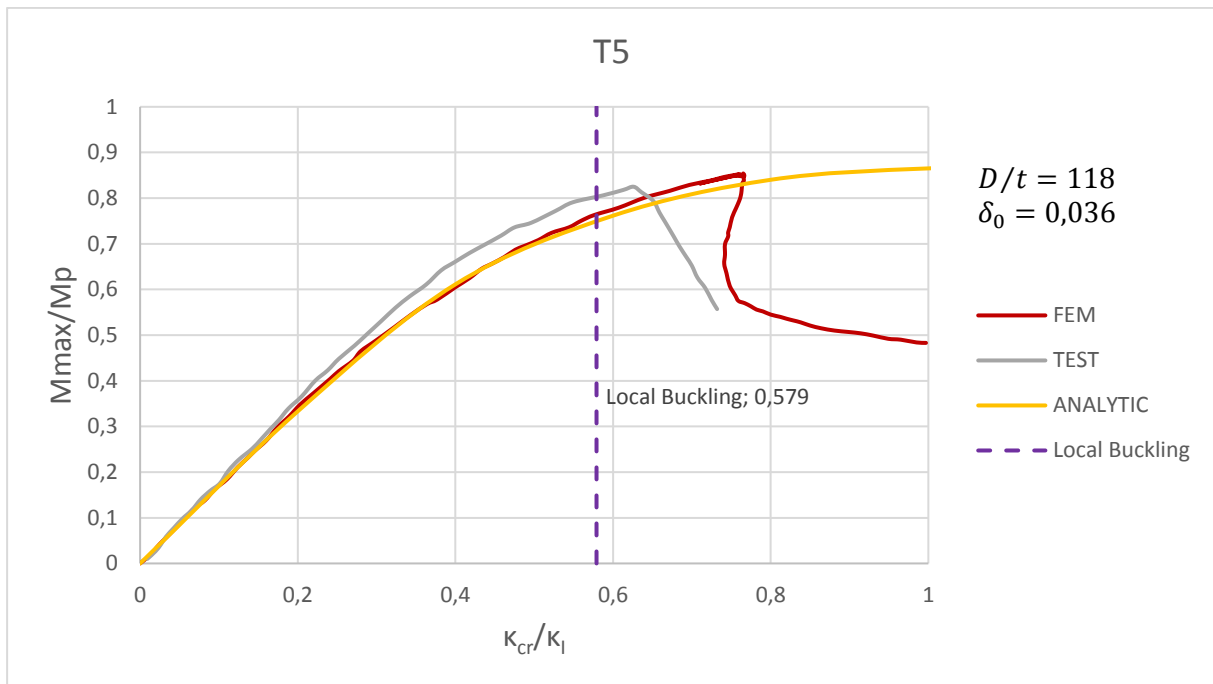
Στο πείραμα T1 (εικόνα 4.6), το οποίο έχει και τον μικρότερο λόγο D/t από τα τρία πειράματα που παρουσιάζονται, παρόλο που η αναλυτική πρόβλεψη της κρίσιμης

καμπυλότητας είναι λίγο μικρότερη, η αντίστοιχη ροπή έχει την ίδια τιμή με τη μέγιστη ροπή κάμψης των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

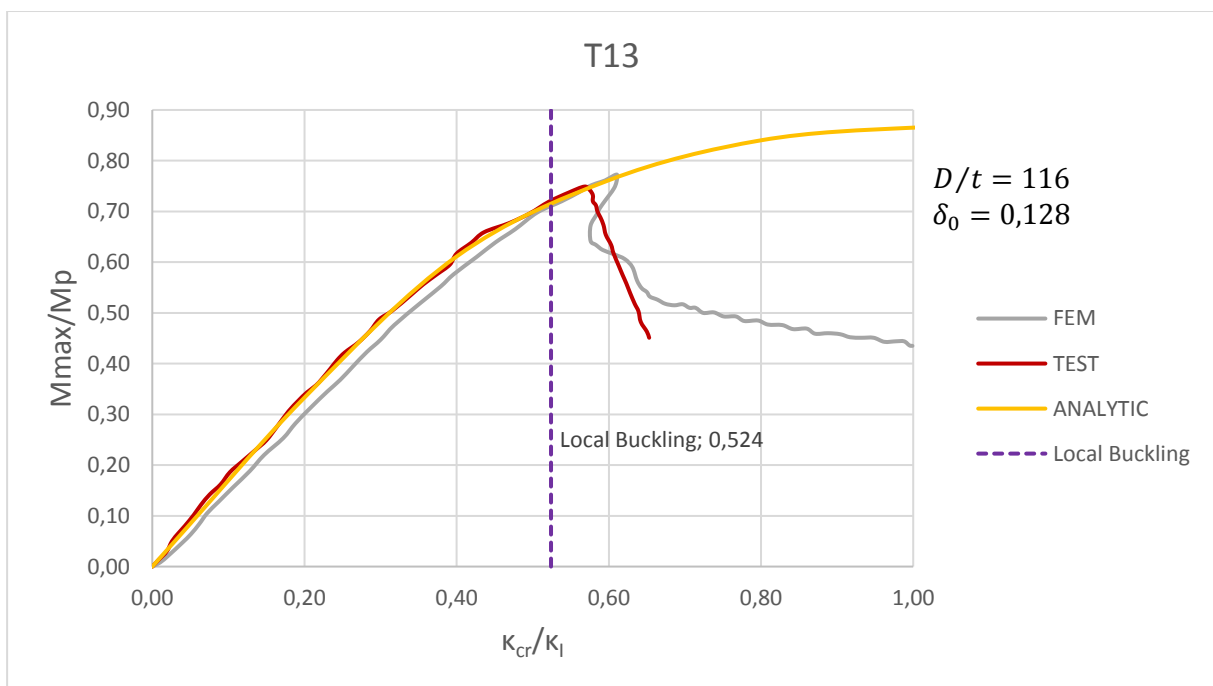


Εικόνα 4.6 Συγκριτικό διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας υπολογιστικών, πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για το δείγμα T1. Κρίσιμη καμπυλότητα για τοπικό λυγισμό (Local Buckling), σχέση (3.34).

Σε αντίθεση με το πείραμα T1 οι τιμές της μέγιστης ροπής κάμψης όπως υπολογίστηκαν από τη σχέση (3.34) για τα πειράματα T5 και T13 (εικόνες 4.7 και 4.8), τα οποία αντιστοιχούν σε πολύ πιο λεπτότοιχους σωλήνες, είναι πιο συντηρητικές σε σχέση με αυτές των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων.



Εικόνα 4.7 Συγκριτικό διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας υπολογιστικών, πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για το δείγμα T5. Κρίσιμη καμπυλότητα για τοπικό λυγισμό (Local Buckling), σχέση (3.34).



Εικόνα 4.8 Συγκριτικό διάγραμμα ροπής κάμψης – καμπυλότητας υπολογιστικών, πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για το δείγμα T13. Κρίσιμη καμπυλότητα για τοπικό λυγισμό (Local Buckling), σχέση (3.34).

5. Συμπεράσματα

Αυτό που προκύπτει από την σύγκριση των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων με την αναλυτική μεθοδολογία είναι ότι η μεθοδολογία αυτή παρέχει μία πολύ καλή προσομοίωση της συμπεριφοράς σωλήνων που υποβάλλονται σε κάμψη.

Αυτό που παρατηρήθηκε από τα πειραματικά αποτελέσματα είναι ότι πολύ μεγάλο ρόλο στην συμπεριφορά του σωλήνα παίζουν οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες που μπορεί να έχει από τη διαδικασία κατασκευής του, οι παραμένουσες τάσεις, η μη ομοιομορφία των ιδιοτήτων του υλικού σε όλη την έκταση του σωλήνα και η ανισοτροπία. Επίσης παρατηρήθηκε ότι οι πιο λεπτότοιχοι σωλήνες έχουν μικρότερη αντοχή και παρουσιάζουν απότομα λυγισμό σε αντίθεση με τους πιο παχύς σωλήνες που αστοχούν σταδιακά.

Παρόλο που κατά την αναλυτική μεθοδολογία δεν λήφθηκαν υπόψιν όλες οι παραπάνω παράμετροι παρέχετε μία καλή πρόβλεψη της κρίσιμης καμπυλότητας στην οποία προκύπτει ο τοπικός λυγισμός και συνεπώς της ικανότητας του σωλήνα σε κάμψη. Η τροποποιημένες σχέσεις κρίσιμης παραμόρφωσης που αναπτύχθηκαν παρέχουν ακόμη καλύτερα αποτελέσματα ειδικά για την περίπτωση των λεπτότοιχων σωλήνων, για τους οποίους η υπάρχουσα μεθοδολογία ήταν αρκετά συντηρητική. Παρόλα αυτά και στη σχέση την οποία προτείνει η παρούσα εργασία για τους λεπτότοιχους σωλήνες κρατείται μία πιο συντηρητική στάση λόγω της απότομης αστοχίας που συνηθίζουν να παρουσιάζουν.

Βιβλιογραφία

- [1] Gresnigt, A. M. (Nol), van Es, S. H. J. (Sjors), Karamanos, S. A. (Spyros) & Vasilikis, D. (Daniel). Strain-Based Design Rules for Spiral-Welded Tubes Using Analytical Modelling. The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference (2016).
- [2] Van Es, S. H. J., Gresnigt, A. M., Vasilikis, D. & Karamanos, S. A. Ultimate bending capacity of spiral-welded steel tubes – Part I: Experiments. *Thin-Walled Struct.* 102, 286–304 (2016).
- [3] Vasilikis, D., Karamanos, S. A., van Es, S. H. J. & Gresnigt, A. M. Ultimate bending capacity of spiral-welded steel tubes – Part II: Predictions. *Thin-Walled Struct.* 102, 305–319 (2016).
- [4] Combitube “Bending resistance of steel tubes in CombiWalls – Final Report”, European Commission, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (RFCS), Brussels (2016).
- [5] Gresnigt, A. M. Plastic design of buried pipes in settlement areas. *HERON*, Delft Univ. Technol. 31, (1986).
- [6] Arcelor Mittal, Spirally welded steel pipes, Advertisement Publication, 2010.
- [7] Arcelor Mittal, Cuxhaven – Greener Energy – Thanks to Arcelor Mittal sheet piles. [Online] Available: (<http://sheetpiling.arcelormittal.com/projects/display/title/cuxhaven>), (2008).
- [8] Van Es, S., Gresnigt, A. M. (Nol, Kolstein, H. & Bijlaard, F. S. K. Local Buckling of Spirally Welded Tubes - Analysis of Imperfections and Physical Testing. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference (2013).
- [9] A.M. Gresnigt, C.H. Jo, S.A. Karamanos. Local buckling of tubular sections in structural applications, Proceedings of the World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM), Seoul, Korea, (2011).
- [10] Brazier, L. G. On the Flexure of Thin Cylindrical Shells and Other ‘Thin’ Sections. *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 116, 104–114 (1927).

- [11] Moore, R. L. & Clark, J. W. Torsion, compression and bending tests of tubular sections machined from 75S-T6 rolled round rod. Natl. Advis. Comm. Aeronaut. Washington, DC, United States (1952).
- [12] Wilhoit Jr., J. C. & Merwin, J. E. Critical Plastic Buckling Parameter for Tubing in Bending Under Axial Tension. Offshore Technology Conference (1973).
- [13] Johns, T. G., Mesloh, R. E., Winegardner, R. G. & Sorenson, J. E. Inelastic Buckling of Pipelines under Combined Loads. Offshore Technology Conference (1975).
- [14] P. Tugcu, J. Schroeder, Plastic deformation and stability of pipes exposed to external couples, *Int. J. Solids Struct.* 15, 643–658 (1979).
- [15] .B.D. Reddy, An experimental study of the plastic buckling of circular cylinders in pure bending, *Int. J. Solids Struct.* 15, 669–683 (1979).
- [16] A.A. Van Douwen, A.M. Gresnigt, J.W.B. Stark, Plastic Design of Buried Steel Pipelines for Transport of Oil, Gas or Water, Verified by Tests on Scale Models, TNO-IBBC, Rijswijk, The Netherlands, (1974).
- [17] S. Kyriakides, P.K. Shaw, Inelastic buckling of tubes under cycling bending, *J. Press. Vessel Technol.* 109, 169–178 (1987).
- [18] S. Kyriakides, G.T. Ju, Bifurcation and localization instabilities in cylindrical shells under bending – Part I: experiments, *Int. J. Solids Struct.* 29 (9), 1117–1142 (1992).
- [19] J.O. Jirsa, L. Fook-Hoy, J.C. Wilhoit, J.E. Merwin, U. Rice. Ovaling of pipelines under pure bending, in: *Proceedings of the Offshore Technology Conference*, Dallas, USA, 1972.
- [20] C.S. Ades, Bending strength of tubing in the plastic range, *J. Aeronaut. Sci.* 605–610 (1957).
- [21] D.R. Sherman, Tests of circular steel tubes in bending, *J. Struct. Div. ASCE* 102 (ST11) S2181–S2195 (1976).
- [22] A.B. Dorey, D.W. Murray, J.J.R. Cheng, An experimental evaluation of critical buckling strain criteria, in: *Proceedings of the International Pipeline Conference*, (2000).
- [23] P.R. DelCol, G.Y. Grondin, R.J.J. Cheng, D.W. Murray, Behavior of Large Diameter Line Pipe Under Combined Loads, University of Alberta, Department of Civil and

- Environmental Engineering, Alberta, Canada, Structural Engineering Report No. 224 (1998).
- [24] A.B. Dorey, D.W. Murray, R.J.J. Cheng, G.Y. Grondin, Testing and experimental results for NPS30 line pipe under combined loads, in: Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), St. Johns, Canada, (1999).
- [25] M.E. Mohareb, A.E. Elwi, G.L. Kulak, D.W. Murray, Deformation Behaviour of Line Pipe, University of Alberta, Department of Civil Engineering, Alberta, Canada, Structural Engineering Report No. 202 (1994).
- [26] N. Yoosef-Ghodsi, G. Kulak, D.W. Murray, Behaviour of Girth-Welded Line Pipe, University of Alberta, Department of Civil Engineering, Alberta, Canada, Structural Engineering Report No. 203, (1994)
- [27] J.G. Bouwkamp, Buckling and post-buckling strength of circular tubular sections, in: Proceedings of the Offshore Technology Conference, Dallas, Texas, (1975).
- [28] J.G. Bouwkamp, R.M. Stephen, Full-Scale Studies on the Structural Behaviour of Large Diameter Pipes Under Combined Loading, Structural Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, (1974).
- [29] R.J. Van Foeken, A.M. Gresnigt, Buckling and Collapse of UOE manufactured steel pipes – PR-238-9423 TNO, Rijswijk, The Netherlands, (1998).
- [30] A.M. Gresnigt, R.J. Van Foeken, Local buckling of UOE and seamless steel pipes, in: Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Stavanger, Norway, (2001).
- [31] T. Zimmerman, J. Xie, C. Timms, J. Asante, Buckling resistance of large diameter spiral welded linepipe, in: Proceedings of the International Pipeline Conference (IPC), Calgary, Canada, (2004).
- [32] S. Zimmermann, H. Karbasian, F.M. Knoop, Helical submerged arc welded line pipe engineered for strain based design, in: Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Alaska, USA, (2013).
- [33] T. Reinke, A.J. Sadowski, T. Ummenhofer, J.M. Rotter, Large scale bending tests of spiral welded steel tubes, in: Proceedings of Eurosteel, Naples, Italy, (2014).

- [34] Det Norske Veritas. Offshore Standard OS-F101 – Submarine Pipeline Systems, DNV, Oslo, Norway, (2010).
- [35] S.P. Timoshenko, J.M. Gere, Theory of Elastic Stability, Dover Publications, New York, USA, (1961).
- [36] A.J. Sadowski, S.H.J. van Es, T. Reinke, J.M. Rotter, A.M. Gresnigt, T. Ummenhofer, Harmonic analysis of measured initial geometric imperfections in thick spiral-welded steel Combitubes, Eng. Struct. 85, 234–248 (2015).
- [37] American Institute of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings, AISC, Chicago, USA, (2010).
- [38] European Committee for Standardization, Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1 -1: General Rules for Buildings, CEN, Brussels, Belgium, (2006).
- [39] E.L. Aksel'rad (Axelrad), Refinement of buckling-load analysis for tube flexure by way of considering precritical deformation, Izv. Akad. Nauk. SSSR Otd. Tekhnicheskikh Nauk. Mekhanika i Mashinostroenie 4 133–139 (1965).
- [40] O. Fabian, Collapse of cylindrical, elastic tubes under combined bending, pressure and axial loads, Int. J. Solids Struct. 13 (1977) 1257–1270.
- [41] E.L. Axelrad, Flexible shells, in: Proceedings of the 15th IUTAM Congress, Toronto, 1980, pp. 45–56.
- [42] F.A. Emmerling, Nichtlineare Biegung und Beulen von Zylindern und Krümmen Röhren bei Normaldruck, Ing.-Arch. 52 (1982) 1–16.
- [43] S.A. Karamanos, Bending instabilities of elastic tubes, Int. J. Solids Struct. 39 (8) (2002) 2059–2085.
- [44] S. Houliara, S.A. Karamanos, Buckling and post-buckling of pressurized thin-walled elastic tubes under in-plane bending, Int. J. Nonlinear Mech. 41 (4) (2006) 491–511.
- [45] C.S. Ades, Buckling strength of tubing in plastic region, J. Aeronaut. Sci. 24 (1957) 605–610.
- [46] S. Kyriakides, P.K. Shaw, Response and stability of elastoplastic circular pipes under combined bending and external pressure, Int. J. Solids Struct. 18 (11) (1982) 957–973.

- [47] E. Corona, S. Kyriakides, On the collapse of inelastic tubes under combined bending and pressure, *Int. J. Solids Struct.* 24 (5) (1988) 505–535.
- [48] S.A. Karamanos, J.L. Tassoulas, Stability of inelastic tubes under external pressure and bending, *J. Eng. Mech.*, 117, ASCE (1991), pp. 2845–2861.
- [49] G.T. Ju, S. Kyriakides, Bifurcation and localization instabilities in cylindrical shells under bending ii: predictions, *Int. J. Solids Struct.* 29 (1992) 1143–1171.
- [50] S. Gellin, The plastic buckling of long cylindrical shells under pure bending, *Int. J. Solids Struct.* 10 (1980) 397–407.
- [51] O. Fabian, Elastic-plastic collapse of long tubes under combined bending and pressure load, *Ocean Eng.* 8 (3) (1981) 295–330.
- [52] S.A. Karamanos, J.L. Tassoulas, Tubular members I: stability analysis and preliminary results, *ASCE: J. Eng. Mech.* 122 (1996) 64–71.
- [53] S.A. Karamanos, J.L. Tassoulas, Tubular members II: local buckling and experimental verification, *ASCE: J. Eng. Mech.* 122 (1996) 72–78.
- [54] ABAQUS, User's Manual: Version 6.12, Simulia, United States, 2013.