



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

Τομέας Μηχανικής, Υλικών & Κατεργασιών

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΟΡΙΑ ΛΥΓΗΡΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ**

**ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ ΜΕΛΗ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ**

υπό

**ΣΟΦΙΑ ΜΑΚΡΗ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Π. Πατρών., 2001

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2008



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 6728/1  
Ημερ. Εισ.: 12-11-2008  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ  
624.177 62  
ΜΑΚ

© 2008 ΣΟΦΙΑ ΜΑΚΡΗ

Η έγκριση της μεταπτυχιακής 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 Πενταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

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

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

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

Τέταρτος Εξεταστής **Δρ. Φίλιππος Περδικάρης**  
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πέμπτος Εξεταστής **Δρ. Αλέξιος Κερμανίδης**  
Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, καθηγητή κ. **Σπύρο Καραμάνο**, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης ευχαριστώ την οικογένεια μου και ιδιαίτερος τον σύζυγο μου , για την κατανόηση και συμπαράσταση τους καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Τέλος ευχαριστώ τους συναδέλφους μου, Αργύρη Κελαϊδόπουλο, Μυριούνη Νίκη και Σκρέκα Βάιο για την επιστημονική τους βοήθεια κατά το χρονικό διάστημα της φοίτησης μου.

Σοφία Μακρή

# ΟΡΙΑ ΛΥΓΗΡΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ ΜΕΛΗ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

ΣΟΦΙΑ ΜΑΚΡΗ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2008

Επιβλέπων: Δρ. Σπύρος Καραμάνος, Επίκουρος Καθηγητής

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία εστιάζει στον τοπικό λυγισμό και στην πλαστική παραμόρφωση μεταλλικών κυκλικών κυλινδρικών διατομών. Βασίζεται σε αποτελέσματα προγενέστερων πειραμάτων, αξονικής συμπίεσης και κάμψης κυλινδρικών μεταλλικών μελών, τα οποία πραγματοποιήθηκαν ως επί το πλείστον σε χαλύβδινες κυκλικές κυλινδρικές διατομές και εν μέρει σε διατομές αλουμινίου. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων συγκρίνονται μεταξύ τους αλλά και με τους κανονισμούς του Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1-1 [1] 'κανόνες σχεδιασμού μεταλλικών κτιρίων' και Μέρος 1-6 'κανόνες σχεδιασμού μεταλλικών κελυφών' [2], και δίδονται απαντήσεις στα εξής ερωτήματα:

- υπό ποιες προϋπόθεσης μπορεί να θεωρηθεί ένας κύλινδρος ως κέλυφος και πότε ως κυκλικό κυλινδρικό δομικό μέλος
- ποια είναι η διαφορά στον υπολογισμό της οριακής αντοχής του μέλους, μεταξύ των δύο κανονισμών και ποιος από τους δύο είναι κοντά σε πειραματικά αποτελέσματα
- σε συνέχεια του ανωτέρω, ποια είναι τα όρια λυγηρότητας κυλινδρικών κοίλων διατομών
- κατά πόσο είναι δυνατόν να καμφθούν οι κυκλικές διατομές σχετικά μικρής λυγηρότητας στην πλαστική περιοχή, χωρίς να προκληθεί κατάρρευση λόγω τοπικού λυγισμού

Η βασική παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη για την σύγκριση και αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι ο λόγος  $D/t$  της εξωτερικής διαμέτρου  $D$  της διατομής προς το πάχος της  $t$ .

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στόχος της εργασίας είναι η αξιοπιστία των Ευρωπαϊκών κανονισμών του Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1-1 [1] και Μέρος 1-6 [2], σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα αξονικής συμπίεσης και κάμψης. Οι οριακές τιμές αντοχής του μέλους που ορίζονται από τον κάθε κανονισμό, συγκρίνονται γραφικά (*διαγράμματα 1-2*) μεταξύ τους αλλά και με τις οριακές τιμές αντοχής οι οποίες υπολογίστηκαν στα πειράματα.

Η αντοχή μίας μεταλλικής κυκλικής κυλινδρικής διατομής εξαρτάται σε αποφασιστικό βαθμό από το αν ή πότε τα θλιβόμενα/καμπτόμενα μέρη της θα αστοχήσουν λόγω τοπικού λυγισμού. Σαν κάποιο μέτρο για αυτό χρησιμεύει η στροφική ικανότητα, η ικανότητα δηλαδή στην πλαστική περιοχή να μπορεί να αναλάβει στροφές καθοριστικές για την αξιολόγηση. Μεταξύ των άλλων παραγόντων βασικοί παράγοντες αξιολόγησης είναι, η λυγηρότητα-σχέση διαμέτρου προς πάχος-, το είδος-κατηγορία του χάλυβα, καθώς και οι συνθήκες στήριξης των άκρων τους. Για μία δεδομένη διατομή μπορεί από τα μεγέθη αυτά να προσδιοριστεί η λεγόμενη στροφική ικανότητα.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι κανόνες σχεδιασμού μεταλλικών κυκλικών κυλινδρικών διατομών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1-1 [1] και Μέρος 1-6 [2], καθώς και τα όρια παραμορφωσιμότητας σύμφωνα με άλλους κανονισμούς αφού ο Ευρωκώδικας δεν παρέχει την αντίστοιχη πληροφορία.

### 1.1 ΚΑΝΟΝΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ Ευρωκώδικα 3, part 1-1

Για τον έλεγχο αν η ικανότητα υπερβαίνει τις απαιτήσεις, προσφέρεται στον EC.3 μία απλοποιημένη οδός. Οι υπάρχουσες λυγηρότητες πρέπει να συγκρίνονται με οριακές τιμές (*οριακό  $D/t$* ). Οι οριακές τιμές εξαρτώνται από την μέθοδο ελέγχου ( πλαστική-πλαστική, ελαστική-πλαστική και ελαστική-ελαστική) και λαμβάνονται από τον *πίνακα 1.1*. με

$$\text{λυγηρότητα ίση με } \lambda = \frac{d}{t} \cdot \frac{f_y}{235} \text{ και } \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}.$$

Σύμφωνα με τον EC.3 οι διατομές ταξινομούνται, μέσω των λυγηροτήτων σε κλάσεις/κατηγορίες. Ανάλογα με τις κατηγορίες αυτές καθορίζεται το ποιες μέθοδοι υπολογισμού και διαστασιολόγησης επιτρέπεται να εφαρμόζονται.

Ο τοπικός λυγισμός μίας μεταλλικής κυκλικής κυλινδρικής διατομής μπορεί να περιορίσει τη φέρουσα ικανότητα της, πιθανώς πριν την ανάπτυξη της τάσης διαρροής. Πρόωρη αστοχία (προερχόμενη από τις επιδράσεις τοπικού λυγισμού) μπορεί να αποφευχθεί περιορίζοντας το λόγο  $D/t$ . Αυτή είναι η βάση της διαδικασίας κατάταξης των διατομών. Ο EC3 part 1-1 ορίζει τέσσερις κατηγορίες διατομών. Η κατηγορία στην οποία κατατάσσεται μία συγκεκριμένη διατομή εξαρτάται από τη λυγηρότητα της (οριζόμενη ως ο λόγος διαμέτρου προς πάχος) και την κατανομή της θλιπτικής τάσης, δηλαδή ομοιόμορφη ή γραμμική. Οι κατηγορίες ορίζονται σε σχέση με τις απαιτήσεις συμπεριφοράς για αντοχή σε καμπτικές ροπές. Στον *πίνακα 1.2* συνοψίζονται οι κατηγορίες σε σχέση με τη συμπεριφορά, τη φέρουσα ικανότητα και την ικανότητα στροφής.

## Κατάταξη

**Κλάση 1:** Οι διατομές κατηγορίας 1 είναι εκείνες που μπορούν να δημιουργήσουν πλαστική άρθρωση με την απαιτούμενη ικανότητα στροφής για πλαστική ανάλυση.

**Κλάση 2:** Οι διατομές κατηγορίας 2 είναι εκείνες οι οποίες, αν και ικανές για την ανάπτυξη πλαστικής ροπής, έχουν περιορισμένη ικανότητα στροφής και επομένως είναι ακατάλληλες για κατασκευές που σχεδιάζονται με πλαστική ανάλυση.

**Κλάση 3:** Οι διατομές κατηγορίας 3 είναι εκείνες στις οποίες η τάση στην ακραία θλιβόμενη ίνα μπορεί να φθάσει στη διαρροή, αλλά ο τοπικός λυγισμός εμποδίζει την ανάπτυξη πλαστικής ροπής αντοχής.

**Κλάση 4:** Οι διατομές κατηγορίας 4 είναι εκείνες στις οποίες ο τοπικός λυγισμός περιορίζει τη ροπή αντοχής (ή την θλιπτική αντοχή για αξονικά θλιβόμενα μέλη). Είναι απαραίτητη η συγκεκριμένη πρόβλεψη για τις επιρροές του τοπικού λυγισμού.

## Οριακές τιμές

Σύμφωνα με τον EC3 part 1-1 οι οριακές τιμές θλιπτικής δύναμης και ροπής κάμψης λαμβάνονται ως εξής:

- Η μέγιστη θλιπτική δύναμη  $N_{Rk}$  δεν πρέπει να υπερβαίνει την οριακή θλιπτική δύναμη  $N_y$ :

$$N_{Rk} < N_y \quad (1.1)$$

Η οριακή θλιπτική δύναμη για σωληνωτές διατομές είναι ίση με

$$N_y = f_y 2\pi r t \quad \text{για διατομές κλάσης 1,2,3} \quad (1.2)$$

- Η μέγιστη ροπή κάμψης  $M_{Rk}$  λαμβάνεται ίση με:

$$M_{Rk} = W_{pl} f_y = 1,273(\pi r^2 t) f_y \quad \text{για διατομές κλάσης 1,2} \quad (1.3)$$

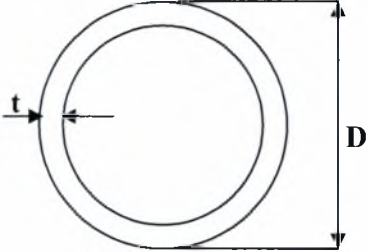
$$M_{Rk} = W_{el} f_y = (\pi r^2 t) f_y \quad \text{για διατομές κλάσης 3} \quad (1.4)$$

Η ροπή διαρροής για σωληνωτές διατομές είναι ίση με

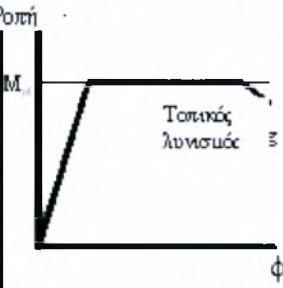
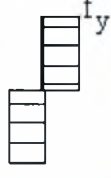
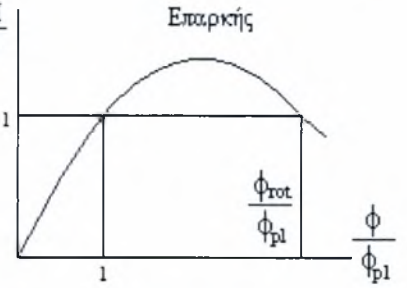
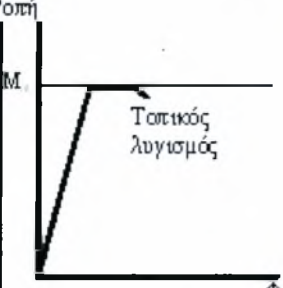
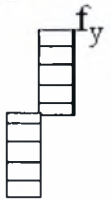
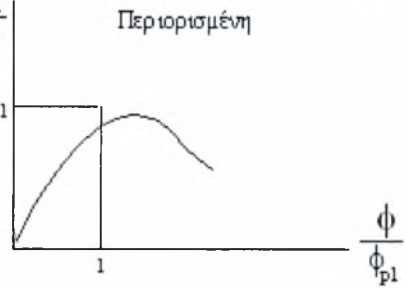
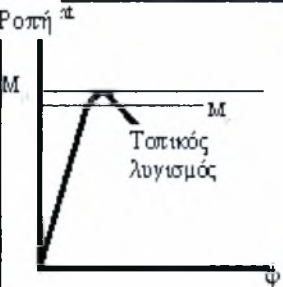
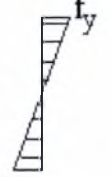
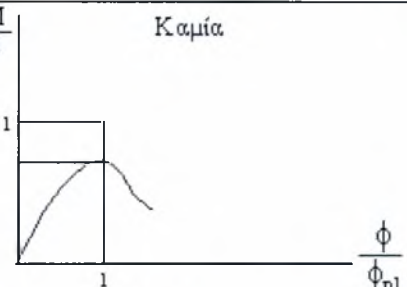
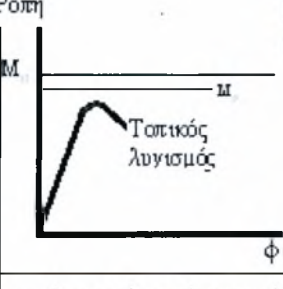

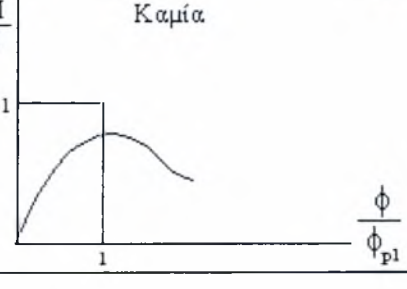
$$M_y = f_y (\pi r^2 t) \quad (1.5)$$

**ΣΗΜΕΙΩΣΗ:** ο συντελεστής ασφάλειας  $\gamma_{M0}$  τίθεται ίσος με 1 στην σύγκριση των παραπάνω τιμών δύναμης και ροπής.



Κοίλες Διατομές							
ΚΛΑΣΗ	Διατομές καταπονούμενες σε κάμψη και / ή σε θλίψη						
1	$D/t \leq 50 \varepsilon^2$						
2	$50 \varepsilon^2 < D/t \leq 70 \varepsilon^2$						
3	$70 \varepsilon^2 < D/t \leq 90 \varepsilon^2$						
4	Όταν ένα θλιβόμενο τμήμα δεν ικανοποιεί τις οριακές σχέσεις της κλάσης 3 κατατάσσεται στην κλάση 4, $90 \varepsilon^2 < d/t$						
$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y (N/mm^2)}}$	Κατηγορία χάλυβα	S235	S275	S355	S420	S460	
	t ≤ 40mm	$\varepsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
		$\varepsilon_2$	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51
	40 < t ≤ 100mm	$\varepsilon$	1,00	0,96	0,84	0,78	0,74
$\varepsilon_2$		1,00	0,92	0,70	0,60	0,55	

**Πίνακας 1.1** Μέγιστες τιμές αναλογίας D/t – Όρια λυγηρότητας για κυλινδρικές κυκλικές διατομές

Μοντέλο Συμπεριφοράς	Ροπή Αντοχής	Ικανότητα Στροφής	Κατηγορία
<p>Ροπή</p>  <p>Τοπικός λυγισμός</p>	<p>Πλαστική ροπή της πλήρους διατομής</p>  <p><math>f_y</math></p>	<p><math>\frac{M}{M}</math></p> <p>Επαρκής</p>  <p>1</p> <p><math>\frac{\phi_{rot}}{\phi_{pl}}</math></p> <p><math>\frac{\phi}{\phi_{pl}}</math></p>	1
<p>Ροπή</p>  <p>Τοπικός λυγισμός</p>	<p>Πλαστική ροπή της πλήρους διατομής</p>  <p><math>f_y</math></p>	<p><math>\frac{M}{M}</math></p> <p>Περιορισμένη</p>  <p>1</p> <p><math>\frac{\phi}{\phi_{pl}}</math></p>	2
<p>Ροπή</p>  <p>Τοπικός λυγισμός</p>	<p>Ελαστική ροπή της πλήρους διατομής</p>  <p><math>f_y</math></p>	<p><math>\frac{M}{M}</math></p> <p>Καμία</p>  <p>1</p> <p><math>\frac{\phi}{\phi_{pl}}</math></p>	3
<p>Ροπή</p>  <p>Τοπικός λυγισμός</p>	<p>Ελαστική ροπή της ενεργού διατομής</p>  <p><math>f_y</math></p>	<p><math>\frac{M}{M}</math></p> <p>Καμία</p>  <p>1</p> <p><math>\frac{\phi}{\phi_{pl}}</math></p>	4
<p><math>M_{el}</math> ελαστική ροπή αντοχής της διατομής <math>n</math></p> <p><math>M_{pl}</math> πλαστική ροπή αντοχής της διατομής <math>1</math></p> <p><math>M</math> δρώσα ροπή</p> <p><math>\phi</math> : στροφή (καμπυλότητα) της διατομής</p> <p><math>\phi_{pl}</math> στροφή (καμπυλότητα) της διατομής απαιτούμενη για να προκαλέσει πλήρη πλαστική κατανομή τάσεων στη διατομή</p>			

Πίνακας 1.2 Κατάταξη διατομών σε σχέση με τη ροπή αντοχής και την ικανότητα στροφής

## 1.2 ΚΑΝΟΝΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ Ευρωκώδικα 3, part 1-6

Ο EN 1993 1-6 ορίζει βασικούς κανόνες υπολογισμού λεπτών μεταλλικών κελυφών. Ως κέλυφος ορίζεται μια δομή ή ένα δομικό στοιχείο το οποίο προέρχεται από την διαμόρφωση κυρτού λεπτού ελάσματος.

Οι απαιτήσεις του κανονισμού για τον υπολογισμό των κελυφών είναι οι εξής:

- Ο λόγος της ακτίνας προς το πάχος του κελύφους να είναι:  $r/t: 20 \leq r/t \leq 5.000$

Για τον υπολογισμό της κρίσιμης τάσης  $\sigma_{x,Rk}$  ισχύει η σχέση

$$\sigma_{x,Rk} = \chi \times f_{yk} \quad (1.6)$$

όπου  $\chi$  μειωτικός συντελεστής λυγισμού, ο οποίος υπολογίζεται:

$$\chi = 1, \lambda \leq \lambda_0 \quad (1.6.1)$$

$$\chi = 1 - \beta \left( \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_p - \lambda_0} \right)^n, \lambda_0 \leq \lambda \leq \lambda_p \quad (1.6.2)$$

$$\chi = \frac{\alpha}{\lambda^2}, \lambda_p \leq \lambda \quad (1.6.3)$$

όπου:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} \quad (1.7)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x,Rcr}}} \quad (1.8)$$

$\beta$  είναι ο συντελεστής πλαστικής διακύμανσης = **0,60**

$\eta$  είναι ο εκθέτης αλληλεπίδρασης = **1**

$\lambda_0$  το σχετικό όριο λυγηρότητας (βλ. σχέση 1.16)

$\alpha$  είναι ελαστικός παράγοντας μείωσης των ατελειών και ισούται με:

$$\alpha = \frac{0,62}{1 + 1,91 \left( \frac{\Delta w_k}{t} \right)^{1,44}}$$

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} \cdot t$$

Q είναι η ποιοτική παράμετρος επεξεργασίας, οι τιμές της οποίας, για την κάθε κατηγορία ανοχής της κατεργασίας, δίδονται από τον πίνακα 1.3.

Στους υπολογισμούς της παρούσας εργασίας λαμβάνεται Q=25

Ποιοτική κατηγορία ανοχής κατεργασίας	Περιγραφή	Q
Class A	Άριστη	40
Class B	Υψηλή	25
Class C	Κανονική	16

**Πίνακας 1.3** Τιμές της ποιοτικής παραμέτρου επεξεργασίας κελυφών

Σύμφωνα με το ANNEX D του part1-6, η κρίσιμη ελαστική τάση λυγισμού πρέπει να λαμβάνεται ίση με:

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 E C_x \frac{r}{t} \quad (1.9)$$

Για τον υπολογισμό της παραμέτρου  $C_x$  απαιτείται ο υπολογισμός της αδιάστατης παραμέτρου  $\omega$  όπου:

$$\omega = \frac{l}{r} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{l}{\sqrt{rt}} \quad (1.10)$$

- Για μεσαίου μήκους κυλίνδρους οι ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$1,7 \leq \omega \leq 0,5 \frac{r}{t} \quad (1.11)$$

$$C_x = 1$$

- Για κοντούς κυλίνδρους οι ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$\omega \leq 1,7$$

$$C_x = 1,36 - \frac{1,83}{\omega^2} + \frac{2,07}{\omega^2} \quad (1.12)$$

- Για μεγάλου μήκους κυλίνδρους οι ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$\omega > 0,5 \frac{r}{t} \quad (1.13)$$

Για την παράμετρο  $C_x$  λαμβάνεται η μεγαλύτερη από τις δύο παρακάτω τιμές:

$$C_x = 1 + \frac{0,20}{C_{xb}} \left[ 1 - 2\omega \frac{r}{t} \right] \quad (1.14)$$

$$C_x = 0,60$$

όπου  $C_{xb}$  παράμετρος η οποία εξαρτάται από τις συνοριακές συνθήκες

- Για μεγάλους μήκους κυλίνδρους που ικανοποιούν την συνθήκη  $500 \leq \frac{E}{f_{y,k}} \leq 1000$  η τιμή του  $C_x$  μπορεί να λαμβάνεται

$$C_x = 0,60 + 0,40 \left[ \frac{\sigma_{xE/M}}{\sigma_{xE}} \right] \quad (1.15)$$

και το σχετικό όριο λυγηρότητας  $\lambda_{x0}$  μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$\lambda_{x0} = 0,20 + 0,10 \left[ \frac{\sigma_{xE,M}}{\sigma_{xE}} \right] \quad (1.16)$$

$\sigma_{xE}$  η τάση σχεδιασμού για κάμψη

$\sigma_{xE,M}$  η τάση σχεδιασμού για κάμψη σε σύνθετη καταπόνηση κάμψης και αξονικής συμπίεσης

Οι διατομές που αξιολογούνται στην εργασία ικανοποιούν την σχέση  $500 \leq \frac{E}{f_{y,k}} \leq 1000$  και για τον σχεδιασμό της καμπύλης της κρίσιμης τάσης λαμβάνεται η σχέση (1.15)

### 1.3 ΟΡΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

Ο Ευρωκώδικας 3 δεν παρέχει πληροφορίες για τα όρια παραμορφωσιμότητας κυκλικών κυλινδρικών διατομών, για αυτό θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω πειραματικές σχέσεις [(1,18) (1,19)] και κανονισμοί [(1,17), (1,20), (1,21), (1,22)] προκειμένου να συγκριθούν τα πειραματικά αποτελέσματα με οριακές τιμές παραμόρφωσης.

Όπου  $\varepsilon_c$  η οριακή παραμόρφωση της διατομής,  $D_o$  η εξωτερική διάμετρος,  $t$  το μετρούμενο πάχος τοιχώματος και  $t_{nom}$  το ονομαστικό πάχος τοιχώματος της διατομής. Η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τους παρακάτω κανονισμούς και πειραματικές σχέσεις, παρουσιάζεται στο *διάγραμμα 5*.

$$\text{BS 8010 (1993): } \varepsilon_c = 15 \left( \frac{t_{nom}}{D_o} \right)^2 \quad (1.17)$$

$$\text{Gresnigt (1986): } \varepsilon_c = 0.5 \left( \frac{t}{D_o - t} \right) - 0.0025 \quad (1.18)$$

$$\text{Murphey and Langner (1985): } \varepsilon_c = 0.5 \left( \frac{t}{D_o - t} \right) \quad (1.19)$$

$$\text{Iglan (1993): } \varepsilon_c = 0.005 + 13 \left( \frac{t}{D_o} \right)^2 \quad (1.20)$$

$$\text{DNV (1996): } \varepsilon_c = \left( \frac{t}{D_o} \right) - 0.01 \quad (1.21)$$

$$\text{ABS (2001) } \varepsilon_c = 0.5 \left( \frac{t}{D_o} \right) \quad (1.22)$$

## 2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ- ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειραμάτων που διεξήχθησαν σε κυκλικές κυλινδρικές διατομές για αξονική συμπίεση και κάμψη. Τα δεδομένα συγκρίνονται με τις θεωρίες του **EC.3 , part 1-1 και part 1-6**, έχοντας ως βασική παράμετρο την αναλογία διαμέτρου προς πάχους **D/t** και δίδονται οι απαντήσεις στα ερωτήματα που τέθηκαν αρχικά. Παρουσιάζονται διαγράμματα:

$$P_u/P_y- D/t,$$

$$M_u/M_y- D/t,$$

$$k_u/k_y- D/t,$$

$$k_L/k_y- D/t ,$$

$$\varepsilon- D/t,$$

$$P_u/P_y- \lambda$$

$$M_u/M_y- \lambda$$

$P_{ult}$  , η μέγιστη εφαρμοζόμενη δύναμη μέχρι την αστοχία

$P_y$ , η οριακή θλιπτική δύναμη της διατομής

$M_y$  η οριακή ροπή της διατομής

$M_u$  η μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή μέχρι την αστοχία

$k_y$  η καμπυλότητα που αντιστοιχεί στην  $M_y$

$k_L$  η καμπυλότητα που αντιστοιχεί στην μέγιστη ροπή  $M_u$

$k_u$  η καμπυλότητα που αντιστοιχεί στην καταστροφική αστοχία

$\varepsilon_L$  η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην μέγιστη ροπή

$\varepsilon_{max}$  η τελική παραμόρφωση

$\lambda$  η λυγηρότητα του μέλους

Το φάσμα των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν είναι αρκετά μεγάλο περιλαμβάνοντας λόγους D/t από 18 έως 120, κυρίως για χαλύβδινες διατομές αλλά και αλουμινίου. Τα πειράματα περιγράφονται περιληπτικά και αναφέρονται χρήσιμα συμπεράσματα και παρατηρήσεις για το καθένα. Η παρουσίαση δεν είναι το ίδιο αναλυτική για όλα τα πειράματα λόγω έλλειψης περαιτέρω στοιχείων στην αντίστοιχη δημοσίευση. Επισυνάπτονται συγκεντρωτικοί πίνακες όλων των πειραματικών αποτελεσμάτων πίνακες 2.1 και 2.2

## 2.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

### 1. Πειράματα των H. Jiao, X.-L. Zhao (2003)

Οι Jiao και Zhao μελέτησαν την επίδραση των παραμενουσών τάσεων και των ορίων λυγηρότητας σε κυλινδρικούς σωλήνες με πολύ υψηλό όριο διαρροής  $f_y = 1350 \text{ Mpa}$  (καλούνται VHS και είναι κοίλες κυκλικές διατομές οι οποίες έχουν υποστεί επεξεργασία βαφής και επαναφοράς).

Ελέγχθηκαν οκτώ δοκίμια χαλυβδωσωλήνων VHS με ποσοστό παραμενουσών τάσεων περίπου 4% του ορίου διαρροής, λυγηρότητα  $135 \leq \lambda \leq 258$ , λόγο  $24 \leq D/t \leq 46$  και κλάσης 4. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε κατακόρυφη θέση, με το κάτω άκρο να ακουμπά σε μία σταθερή βάση και στο πάνω άκρο να ασκείται το θλιπτικό φορτίο από την πειραματική μηχανή. Επίσης με την ίδια πειραματική διαδικασία ελέγχθηκαν δύο δοκίμια μη θερμικά κατεργασμένων χαλυβδωσωλήνων, με λυγηρότητα  $\lambda = 42$ , λόγο  $D/t = 23$  και κλάσης 1.

Οι δύο κατηγορίες έχουν περίπου τις ίδιες αρχικές ατέλειες αλλά το ποσοστό των παραμενουσών τάσεων είναι πολύ διαφορετικό: 4% του ορίου διαρροής για τους VHS χαλυβδωσωλήνες και στις δύο διευθύνσεις, ενώ 50% στην κατά μήκος διεύθυνση και 20% στην εγκάρσια για τους μη θερμικά κατεργασμένους σωλήνες.

Οι συγγραφείς συγκρίνουν τα πειραματικά τους αποτελέσματα, με εκείνα άλλων πειραμάτων για εν ψυχρώ διαμορφωμένους σωλήνες (Bradford MA, Loh HY, Uy B. In: Puthli H, editor. Slenderness limits for CHS sections: tubular structures IX. Rotterdam: Balkema; 2001. p. 377-81), αλλά και με τον Ευρωπαϊκό κανονισμό EC.3 part 1-1 και τον Αυστραλιανό AS 4100

#### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ:

- I. Όλα τα δοκίμια αστόχησαν σε τοπικό λυγισμό σε μία απόσταση κοντά στην στήριξη τους, ίση με  $D/5$ .
- II. Τα δοκίμια με λόγο  $D/t=47$  και  $\lambda = 238$ , παρουσίασαν πλαστική παραμόρφωση αφού πρώτα δημιουργήθηκε δακτυλιοειδή διόγκωση της επιφάνειάς τους, κάτι που δεν συνέβη στα υπόλοιπα δείγματα.
- III. Το όριο λυγηρότητας είναι  $\lambda=90$ , για κλάση διατομής 4 σύμφωνα με τον EC.3 part 1-1, είναι πολύ συντηρητικά για VHS σωλήνες.
- IV. Η αναλογία του ισχύοντος ορίου λυγηρότητας είναι  $\lambda=90$  με αυτό του  $\lambda=258$  που προτείνεται στο πείραμα είναι  $258/82=2,86$ , παρόμοια με την αναλογία των ορίων διαρροής των VHS σωλήνων και των εν ψυχρώ διαμορφωμένων σωλήνων:  $1350 \text{ Mpa}/(350-450) \text{ Mpa}=3,86-3,0$ , γεγονός που δηλώνει πως η λυγηρότητα ενός χαλυβδωσωλήνα σαφέστατα επηρεάζεται από την διαδικασία παράγωγής του αλλά και από το όριο διαρροής του.
- V. Τα δύο δοκίμια (9-10) μη θερμικά κατεργασμένων χαλυβδωσωλήνων εμφάνισαν παρόμοιο ποσοστό αντοχής με εκείνα των VHS σωλήνων (7-8), ίδιων γεωμετρικών χαρακτηριστικών, παρόλο που τα μεν πρώτα κατατάσσονται στην κλάση 1 ενώ τα υπόλοιπα στην κλάση 4, γεγονός που οφείλεται επίσης στο υψηλό όριο διαρροής.



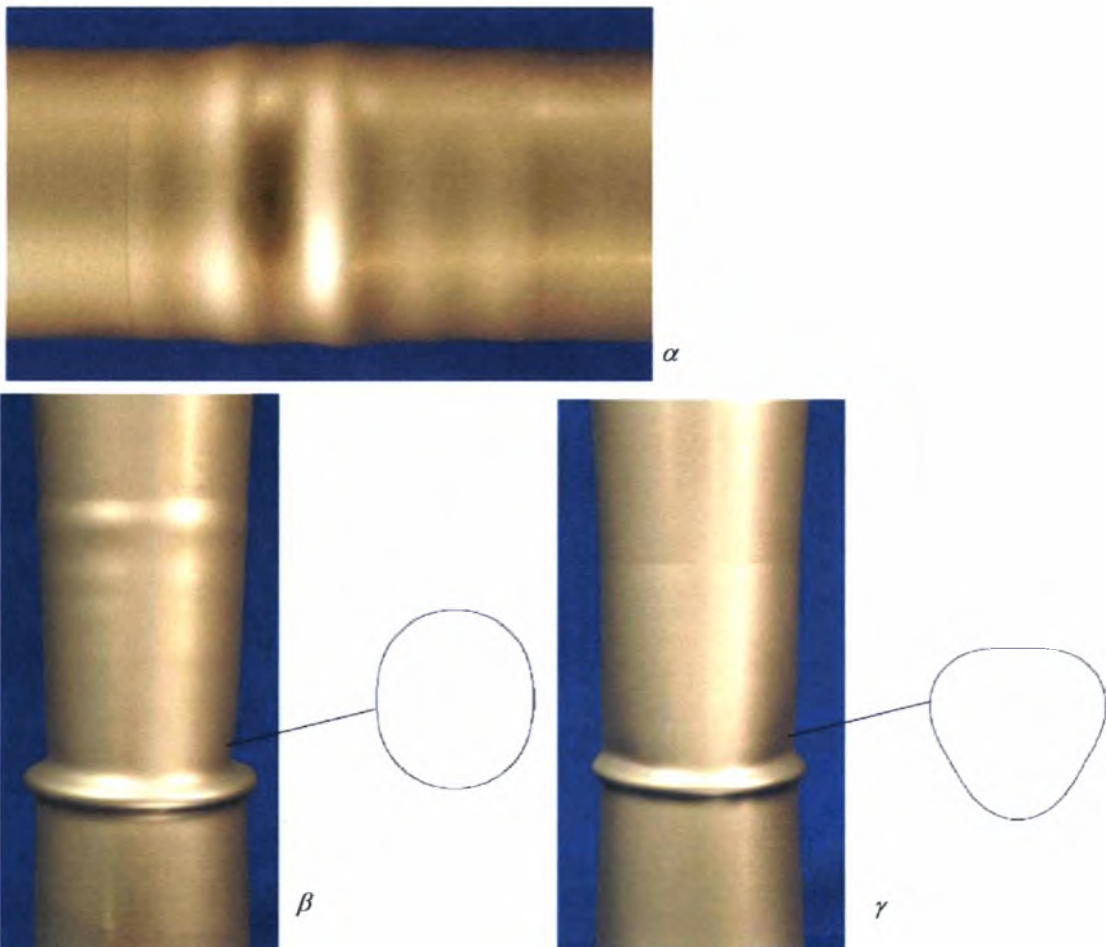
## 2. Πειράματα F.C. Bardi, S. Kyriakides (2006)

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε 15 δοκίμια ανοξείδωτου χάλυβα με  $65 \leq \lambda \leq 150$ , λόγο  $23 \leq D/t \leq 52$ . Τα 11 δοκίμια προερχόταν από τον ίδιο μητρικό σωλήνα και τα υπόλοιπα 4 από διαφορετικό, ενώ όλα είχαν αρχικό μήκος 280mm, με όριο διαρροής από 561Μpa έως 622Μpa. Λαμβάνονται υπ' όψη στο παρόν έγγραφο μόνο 13 δοκίμια, λόγω έλλειψης πληροφοριών για τα υπόλοιπα.

Δύο δοκίμια ταξινομούνται στην *κλάση 2* τέσσερα στην *κλάση 3* του E.C. και όλα τα υπόλοιπα στην *κλάση 4*. Υποβλήθηκαν σε αξονική συμπίεση, παραμορφώθηκαν αρχικά ελαστικά και στην συνέχεια δημιουργήθηκε πλαστική παραμόρφωση με μορφή συνεχώς αυξανόμενων 'ρυτιδων' (κύρτωση τοιχώματος) όπως φαίνεται στην *εικόνα 2*.

### Εικόνα 2.1

- α) έναρξη τοπικού λυγισμού,
- β) τοπικός λυγισμός, μορφή παραμόρφωσης για δοκίμιο με  $D/t=28,77$  κλάση 3
- γ) τοπικός λυγισμός, μορφή παραμόρφωσης για δοκίμιο με  $D/t=45,14$  κλάση 4



**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ:**

- I. Ο τοπικός λυγισμός σε μορφή κύρτωσης τοιχώματος συνέβη όταν η επιβαλλόμενη τάση έφθασε σε ποσοστό 8,5% έως 18,5% της τάσης διαρροής του δοκιμίου.
- II. Ο ρυθμός αύξησης των κυματοειδών κυρτώσεων είναι πιο αργός σε δοκίμια με χαμηλότερο D/t.
- III. Όσο συνεχιζόταν η φόρτιση οι κυρτώσεις αυξανόταν και η ακαμψία σαφώς μειωνόταν.

**3. Πειράματα των Wai F.Chen, David A.Ross (1977)**

Διεξήχθησαν πειράματα αξονικής φόρτισης σε 10 σωλήνες μεγάλου μήκους και διαμέτρου, με  $D/t=48$ ,  $\lambda = 54$  (class 3),  $D/t=70$   $\lambda = 90$  (class 4.) και  $L/r$  από 39 έως 83. Οι σωλήνες παράγονται από επίπεδα ελάσματα τα οποία καμπυλώνονται συγκολλώντας τα δύο άκρα τους ώστε να δημιουργηθεί η σωληνωτή διατομή. Κατά μήκος της ένωσης υπάρχει ραφή ηλεκτροσυγκόλλησης. Αυτή η διαδικασία παραγωγής δημιουργεί σημαντικές παραμένουσες τάσεις τόσο κατά μήκος των σωλήνων όσο και στην περιφέρεια τους.

Το όριο διαρροής των δοκιμίων είναι μεταξύ 273 MPa και 305MPa

**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ:**

- I. Ο λόγος  $D/t=60$  φαίνεται πως αποτελεί μία κρίσιμη τιμή, μετά από την οποία γίνεται η αλλαγή της παραμόρφωσης από τοπικό λυγισμό σε ασταθή πλαστική παραμόρφωση.
- II. Σε δοκίμια με  $D/t=70$ , τα οποία αστόχησαν με τοπικό λυγισμό, υπήρξε μια απότομη απώλεια της αξονικής φέρουσας ικανότητας. Η απώλεια της φέρουσας ικανότητας των δοκιμίων με  $D/t=48$  είναι λιγότερο απότομη πριν από την φάση του λυγισμού.
- III. Η διαδικασία κατασκευής έχει πολύ μεγάλη σημασία για αυτού του είδους σωλήνες.
- IV. Δοκίμια ίδιου λόγου  $D/t$  εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή σε λυγισμό όσο μικραίνει το μήκος τους.
- V. Όλα τα δοκίμια αστόχησαν με την μορφή τοπικού λυγισμού οριακά πριν την τάση διαρροής τους.

#### 4. Πειράματα των *A.Y. Kiziltug, R.B.Grove, S.W.Peters, C.D. Miller(1985)*

Διεξήχθησαν πειράματα αξονικής συμπίεσης σε 4 σωλήνες μήκους 600mm περίπου, με λόγο  $D/t$  31, 41, 58, 76 και  $31 \leq \lambda \leq 86$ . Τα δοκίμια κατατάσσονται σε **class 1, 2, 3**, έχουν όριο διαρροής 230 MPa -280MPa και αποτελούνται από χάλυβα ASTM A370. Τα πάχη και οι διάμετροι των δοκιμίων μετρήθηκαν με ηλεκτρονική συσκευή, ταυτόχρονα σε πέντε διαφορετικά σημεία κατά μήκος τους και οι μετρήσεις αποτυπωνόταν σε μαγνητικό δίσκο για την μετέπειτα χρήση τους.

Η πειραματική διαδικασία των παραπάνω δειγμάτων ήταν η εξής: Τα δοκίμια φορτίζονται μέχρι η παραμόρφωση γίνει ίση με 0,005, οπότε και λαμβάνεται το δυναμικό όριο διαρροής. Στην συνέχεια σταματά η φόρτιση για 5min, ώστε να σταθεροποιηθεί το φορτίο και λαμβάνεται το στατικό όριο διαρροής. Έπειτα συνεχίζεται η φόρτιση με την ίδια ταχύτητα μέχρι το δοκίμιο να αστοχήσει.

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για το εν λόγω πείραμα, αποτελείται από δύο υδραυλικούς γρύλλους ικανότητας 250 ton (ένα σε κάθε άκρο του δοκιμίου) και δύο υδραυλικές αντλίες 25 ton (δεξιά και αριστερά του δοκιμίου) . Το αξονικό φορτίο δημιουργήθηκε από τους δύο κατακόρυφους γρύλλους.

#### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ:

1. Όλα τα δοκίμια, πλην εκείνου με λόγο  $D/t=76$  αστόχησαν πάνω από την οριακή δύναμη αντοχή  $P_y$

Imperfection, residual stress and yield slenderness limit of very high strength (VHS) circular steel tubes H. Jiao, X.-L. Zhao (2003)												
	D	t	D/t	L	$P_{ult}$	$P_y$	$P_{ult}/P_y$	$\sigma_{ult}$	$\sigma_y$		E	
1	73,81	1,61	45,84	299	547	515	1,06	1464	1377	class4	200	
2	73,89	1,62	45,61	299	549	516	1,06	1464	1377	class4	200	
3	73,70	1,61	45,78	299	547	513	1,07	1468	1377	class4	200	
4	55,78	1,64	34,01	239	425	391	1,09	1479	1360	class4	200	
5	55,84	1,63	34,26	239	430	388	1,11	1506	1360	class4	200	
6	55,79	1,63	34,23	240	423	389	1,09	1479	1360	class4	200	
7	36,62	1,58	23,18	140	298	254	1,17	1638	1398	class4	200	
8	36,60	1,58	23,16	140	295	254	1,16	1622	1398	class4	200	
9	36,41	1,59	22,90	140	93	79	1,18	511	433	class1	200	
10	36,38	1,59	22,88	140	93	79	1,18	512	433	class1	200	

Plastic buckling of circular tubes under axial compression—part I: Experiments F.C. Bardi, S. Kyriakides (2006)												
	D	t	D/t	L	$P_y$	$P_{ult}$	$P_{ult}/P_y$	$\sigma_{ult}$	$\sigma_y$		E	
1	58,36	2,55	22,89	72,2	317	380	1,20	812	677	class2	194,5	
2	57,60	2,19	26,28	72,2	261	304	1,17	767	658	class3	194,5	
3	57,23	2,01	28,52	72,2	239	271	1,13	751	662	class3	194,5	
4	56,73	1,74	32,60	72,2	210	231	1,10	745	677	class4	194,5	
5	56,32	1,54	36,47	72,2	177	194	1,10	712	648	class4	194,5	
6	55,82	1,29	43,26	72,2	144	158	1,10	697	636	class4	194,5	
7	55,72	1,30	45,14	72,2	149	163	1,09	715	654	class4	194,5	
8	55,44	1,10	50,64	72,2	130	136	1,05	710	679	class4	194,5	
9	55,39	1,07	51,87	72,2	126	130	1,03	697	679	class4	194,5	
10	58,11	2,38	24,43	127	301	350	1,16	805	692	class3	197,9	
11	57,29	2,40	28,12	127	285	327	1,15	756	659	class3	196,5	
12	56,16	1,55	36,33	127	182	199	1,09	726	667	class4	196,5	
13	56,16	1,41	39,84	127	168	180	1,07	723	677	class4	197,9	

Test of fabricated tubular columns By Wai F. Chen and David A. Ross (1977)												
	D	t	D/t	L	P <sub>ult</sub>	P <sub>y</sub>	P <sub>ult</sub> /P <sub>y</sub>	σ <sub>ult</sub>	σ <sub>y</sub>	E		
1	372,08	7,92	47,0	5500	2476	2523	0,98	268	273	211	class2	
2	372,08	7,92	47,0	5500	2492	2523	0,99	269	273	211	class2	
3	372,09	7,92	47,0	7600	2270	2523	0,90	245	273	211	class2	
4	372,08	7,92	47,0	7600	2296	2523	0,91	248	273	211	class2	
5	552,00	8,00	69,0	7600	4263	4228	1,01	307	305	211	class3	
6	552,00	8,00	69,0	7600	4112	4228	0,97	296	305	211	class3	
7	372,08	7,92	47,0	11000	2212	2523	0,88	239	273	211	class2	
8	372,10	7,92	47,0	11000	2367	2523	0,94	256	273	211	class2	
9	552,00	8,00	69,0	11000	4183	4228	0,99	302	305	211	class3	
10	552,00	8,00	69,0	11000	4094	4228	0,97	295	305	211	class3	

Collapse tests of short tubular columns subjected to combined loads A.Y. Kiziltug, R.B.Grove, S.W.Peters, C.D. Miller (1985)												
	D	t	D/t	L	P <sub>ult</sub>	P <sub>y</sub>	P <sub>ult</sub> /P <sub>y</sub>	σ <sub>ult</sub>	σ <sub>y</sub>	E		
1	196,90	6,35	31,0	610,4	1020	941	1,08	260	239,6	212,9	class1	
2	198,68	4,80	41,4	610,0	822	776	1,06	275	259,2	210,1	class1	
3	200,00	3,43	58,4	610,0	633	606	1,05	294	281,2	211,9	class2	
4	200,74	2,63	76,2	610,3	440	442	0,99	265	266,2	194,3	class3	

**Πίνακας 2.1** Γεωμετρικά χαρακτηριστήρια και πειραματικά αποτελέσματα για κάθε σειρά πειραμάτων αξονικής συμπίεσης.

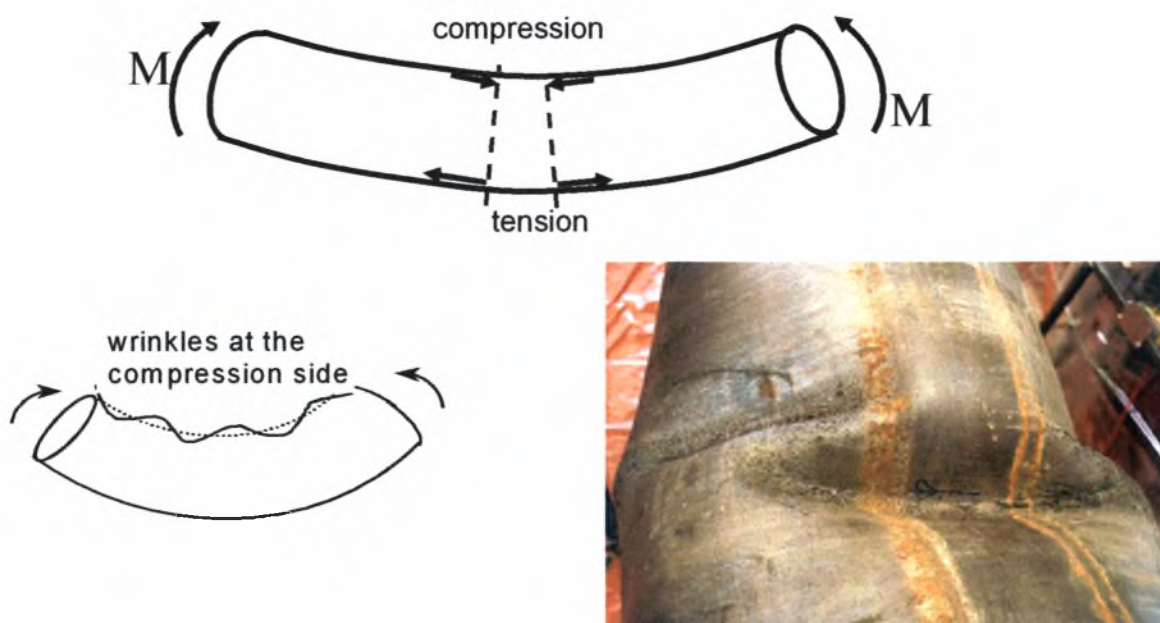
## 2.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΜΨΗΣ

### 1. Πειράματα των *S. Kyriakides and G. T. Ju (2006)*

Τα πειράματα διεξήχθησαν κυλινδρικές διατομές κράματος αλουμινίου T6-6061, με λόγο  $D/t$  από 18,5 έως 59,50 και  $31 \leq \lambda \leq 86$ . Τα δοκίμια κατατάσσονται σε class 1, 2, 3, και έχουν όριο διαρροής περίπου 300 MPa.

#### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ:

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως δεν αστόχησαν όλα τα δοκίμια με τον ίδιο τρόπο: Τα δοκίμια με  $D/t \leq 40$  παρουσίασαν πλαστική παραμόρφωση μέχρι την αστοχία τους πάνω από την μέγιστη ροπή, κάτι που δεν συνέβη για τα δοκίμια με  $D/t \geq 40$



Εικόνα 2.2 Κάμψη σωληνωτής διατομής

### 2. Πειράματα των *M. Elchalakani, X.L. Zhao, R. Grzebieta (2002)*

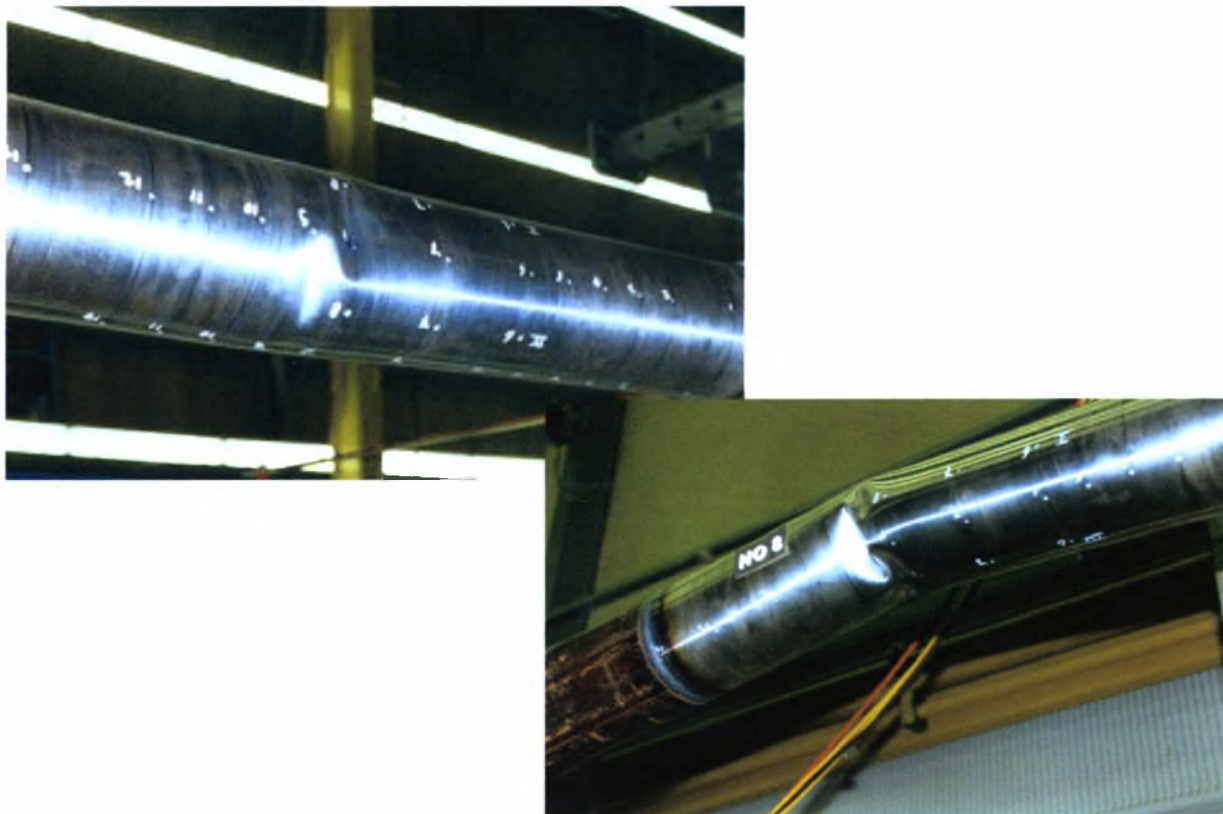
Σε αυτή την σειρά πειραμάτων εξετάζονται 12 δείγματα εν ψυχρώ διαμορφωμένου χάλυβα τύπου C350L0, με λυγρότητα  $64 \leq \lambda \leq 212$ , λόγο  $37 \leq D/t \leq 122$  και όριο διαρροής περίπου 400MPa και κατάταξη class 2,3,4.

Η πειραματική διαδικασία έγινε με την συσκευή καθαρής κάμψης όπως φαίνεται στην εικόνα 2.4. Το πλεονέκτημα αυτής της εγκατάστασης είναι η δυνατότητά του να εφαρμόσει μια καθαρή καμπτική ροπή πέρα από τη μέση έκταση του δοκιμίου χωρίς πρόκληση σημαντικών αξονικών ή διατμητικών δυνάμεων. Το κάθε δείγμα τοποθετήθηκε οριζόντια στην συσκευή με κατάλληλη στήριξη στα άκρα του.

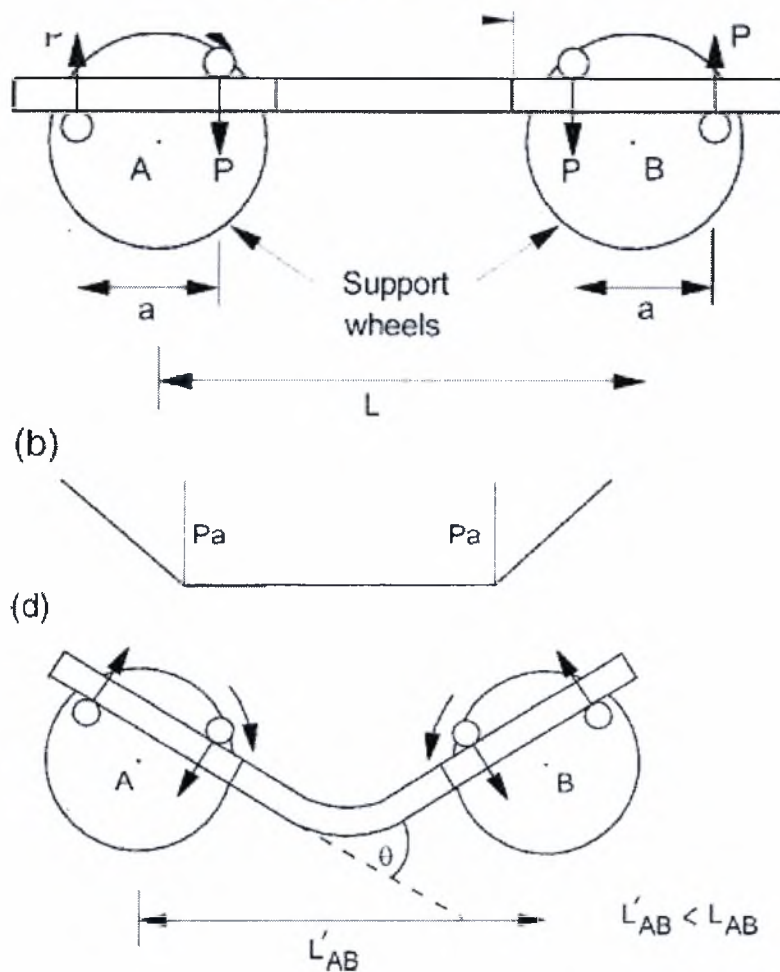
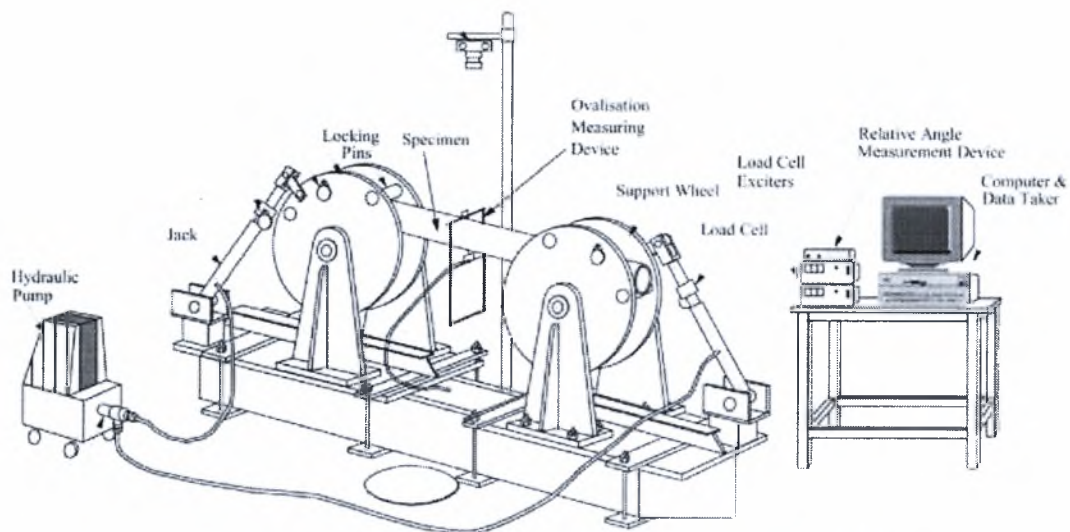
Η ροπή εφαρμόστηκε στο δοκίμιο χρησιμοποιώντας μια υδραυλική αντλία που συνδέθηκε με δύο υδραυλικούς γρύλους μέσω ενός πολλαπλασιαστή. Η παρουσία του πολλαπλασιαστή εξασφάλισε ότι το φορτίο που εφαρμόστηκε και από τους δύο γρύλους ήταν περίπου το ίδιο. Οι γρύλοι συνδέονται με τις ρόδες εφαρμογής φορτίων από κάθε πλευρά του δοκιμίου. Η επέκταση των γρύλων αναγκάζει τις ρόδες να περιστρέφουν η μία απέναντι από την άλλη και ως εκ τούτου να εφαρμοστεί μια ροπή κάμψης στο δείγμα μέσω τεσσάρων κεφαλών εφαρμογής φορτίων.

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ:

- I. Τα δείγματα κατηγορίας 4 όπως ήταν αναμενόμενο αστόχησαν σε τοπικό λυγισμό πριν επιτευχθεί η ροπή διαρροής.
- II. Τα δείγματα κατηγορίας 2 εμφάνισαν πολύ μεγάλες καμπυλότητες και η αστοχία παρουσιάστηκε αρκετά πιο μακριά από την ροπή διαρροής.
- III. Οι συγγραφείς, βάσει των πειραματικών δεδομένων, προτείνουν ως όριο λυγηρότητας  $\lambda=88$  για σωλήνες κλάσης 2, ενώ για λεπτότοιχες διατομές προτείνεται η τιμή  $\lambda=140$ . Επίσης διαπιστώνεται πως σωλήνες με λυγηρότητα  $\lambda < 60$  παρουσιάζουν υψηλή πλαστική παραμόρφωση μέχρι την στιγμή της αστοχίας τους.



**Εικόνα 2.3** Τοπικός λυγισμός σχετικά λεπτότοιχου σωλήνα ( $D/t=100$ )



Εικόνα 2.4 Διαδικασία κάμψης πειραμάτων των M. Elchalakani, X.L. Zhao , R. Grzebieta

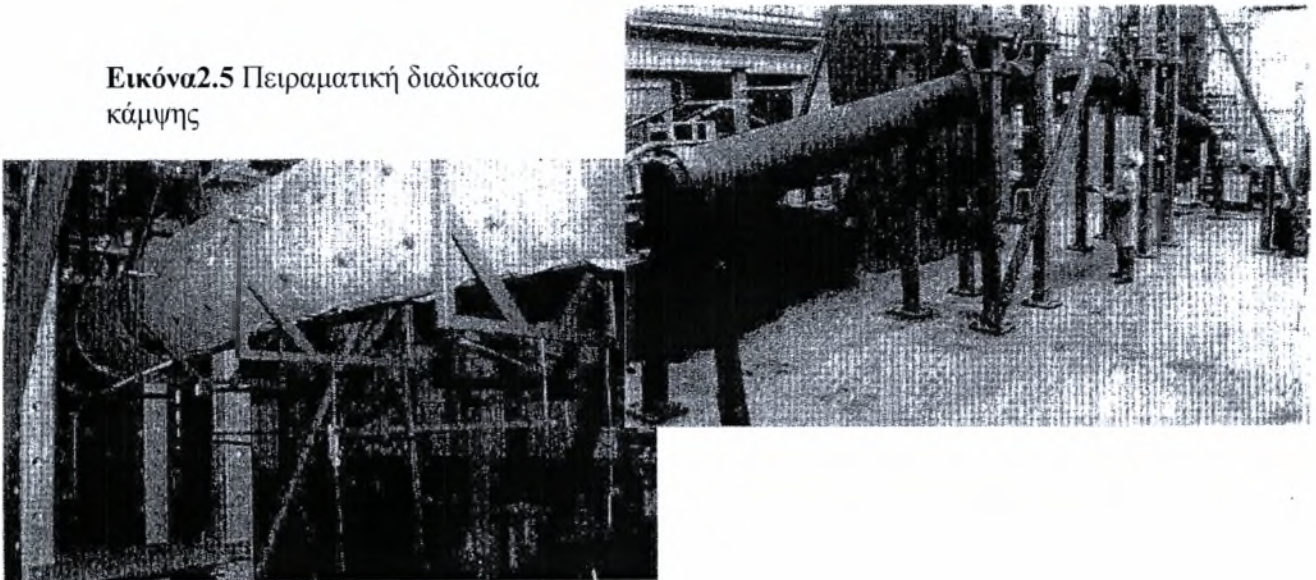


### 3. Πειράματα των A.M. Gresnigt, R.J. van Foeken(2001)

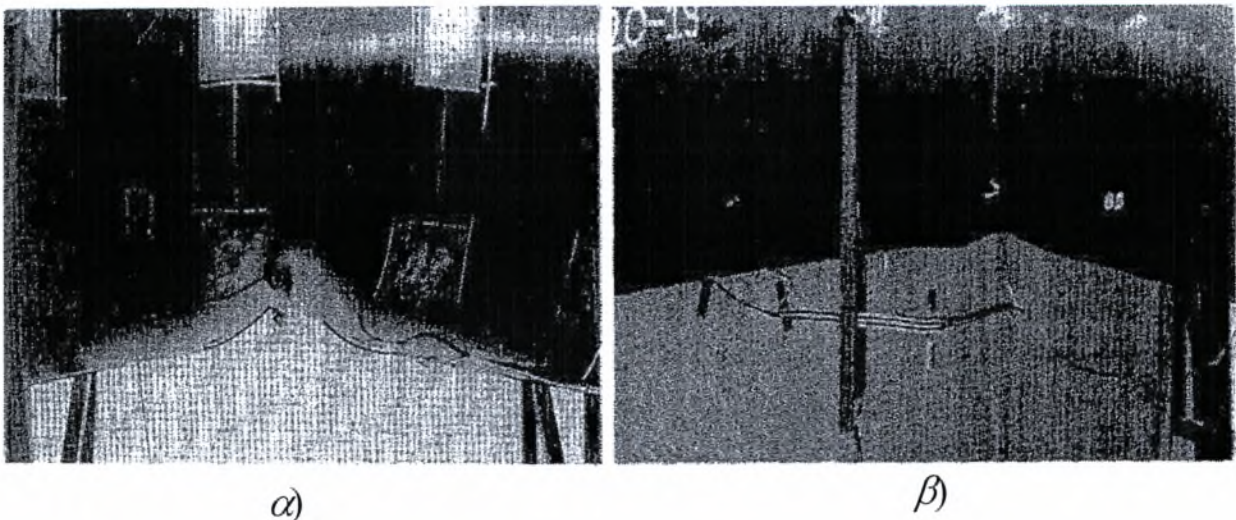
Σε αυτό το πείραμα επιλέχθηκαν τέσσερα χαλύβδινα δοκίμια διαμέτρου περίπου 500mm, λόγου  $D/t$  45, 27, 22, 29, ορίου διαρροής περίπου 450-480MPa και κατάταξης **class 1,2,3**.  $41 \leq \lambda \leq 90$ . Όλα τα δείγματα πλην εκείνου με  $D/t=29$  (το οποίο είναι άνευ ραφής) είναι κατεργασμένα με την μέθοδο **UOE**.

Η πειραματική διαδικασία έγινε λαμβάνοντας δοκίμια μήκους 12m, τα οποία φορτίζονται σε τέσσερα σημεία, στα δύο άκρα και σε δύο ενδιάμεσες θέσεις. Σε αυτές τις ενδιάμεσες θέσεις το φορτίο εφαρμόζεται από τρεις ράβδους περιφερειακά της διατομής, με μεταξύ τους απόσταση 0,70m. Το μεσαίο τμήμα του σωλήνα φορτίζεται με σταθερή ροπή για μήκος περίπου 2,0m, ενώ το ενεργό μήκος το οποίο λαμβάνεται υπ' όψη στα πειραματικά αποτελέσματα είναι 1,50m. Η διαδικασία απεικονίζεται στην *εικόνα 2.5*

**Εικόνα 2.5** Πειραματική διαδικασία κάμψης



**Εικόνα 2.6** Τοπικός λυγισμός για δοκίμιο με :  
α)  $D/t=29$  άνευ ραφής , β)  $D/t=27$  κατεργασμένο με την μέθοδο **UOE**



#### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ:

- I. Όλα τα δοκίμια αστόχησαν πάνω από την ροπή διαρροής, ενώ και η τελική τιμή της ροπής κάμψης βρίσκεται πιο πάνω από την ροπή διαρροής.
- II. Η διαφορετική κατεργασία επηρεάζει την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα των σωλήνων, *εικόνα 2.6.*

#### 4. Πειράματα των *J.O.Jirsa, Fook-Hoy Lee, J.C.Wilhot,Jr, J.E.Mewin (1972)*

Σε αυτή την πειραματική διαδικασία ελέγχονται σε καθαρή κάμψη 4 σωλήνες μεγάλης διαμέτρου και πάχους, από χάλυβα με όριο διαρροής 330-380 MPa και κατάταξης **class 1,2,3,4**, (κατατάσσονται ένα σε κάθε κατηγορία) με λυγηρότητα  $41 \leq \lambda \leq 123$ . Ο λόγος D/t κυμαίνεται από 30 έως 78 και το μήκος των δειγμάτων είναι περίπου 915mm. Τα πειραματικά αποτελέσματα ελήφθησαν διαγραμματικά και για αυτό μπορεί να υπάρξει απόκλιση από τα πραγματικά.

#### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

- I. Η αστοχία γίνεται με διαφορετικό τρόπο σε κάθε δοκίμιο διαφορετικής κατηγορίας και όπως είναι αναμενόμενο η σχέση ροπής-καμπυλότητας διαφοροποιείται αρκετά.
- II. Οι σωλήνες ελεγχθήκαν σαν απλή αμφίπακτη δοκός με δύο σημεία επιβολής φορτίου κατά μήκος τους
- III. Για class I υπάρχει μεγάλη παραμόρφωση και καθώς αυξάνεται ο λόγος D/t μειώνεται η ακαμψία της διατομής και αστοχεί πολύ πιο γρήγορα.

#### 5. Πειράματα του *D.R. Sherman (1976)*

Τα πειράματα που διεξήχθησαν από τον *D.R. Sherman* περιλαμβάνουν δοκίμια κατάταξης **class 1,2,3,4**,  $21 \leq \lambda \leq 144$  και ορίου διαρροής από 280 έως 400 MPa. Ο λόγος D/t κυμαίνεται από 18 έως 102 και το μήκος των δοκιμίων από 3700mm έως 15240mm. Δοκίμια ίδιας διαμέτρου και πάχους ελέγχθηκαν σε κάμψη έχοντας διαφορετικό τρόπο στήριξης και μήκος.

Διακρίνονται δοκοί με μορφή στήριξης :

- αμφιέριστης δοκού με δύο ενδιάμεσα φορτία (Simple Span)
- αμφίπακτης δοκού με δύο ενδιάμεσα φορτία μήκους 15240mm (Fixed ends, third point load)
- αμφίπακτης δοκού με δύο ενδιάμεσα φορτία μήκους 6096mm (Fixed ends, third point load)
- πρόβολος με φορτίο στο άκρο του (Cantilever)

Παρόλο που παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για όλες τις παραπάνω κατηγορίες μήκους και στήριξης των δοκών, εκείνα τα οποία αναφέρονται σε δοκούς μήκους 15240mm δεν θα ληφθούν υπόψη σε όποια σύγκριση και συμπεράσματα της παρούσας εργασίας. Αυτό γίνεται διότι σε τέτοιες περιπτώσεις τα φαινόμενα λυγισμού είναι τύπου Euler και όχι τοπικού λυγισμού.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

- I. Διαπιστώθηκε πως οι σωλήνες με  $D/t \leq 35$  μπορούν να αναπτύξουν πλαστική ροπή με ικανοποιητική στροφική ικανότητα χωρίς να προκληθεί αστοχία διατομής.
- II. Τα δοκίμια ιδίων γεωμετρικών χαρακτηριστικών με στήριξη αμφιέριστης δοκού και προβόλου παρουσίασαν την ίδια αντοχή σε κάμψη.
- III. Στα δοκίμια ίδιας διαμέτρου και πάχους, με στήριξη αμφίπακτης δοκού, παρατηρείτε μεγαλύτερη αντοχή όταν το μήκος τους είναι μεγαλύτερο.
- IV. Στα δοκίμια ίδιας διαμέτρου και πάχους αλλά διαφορετικού μήκους, με στήριξη αμφιέριστης δοκού και προβόλου, παρατηρείτε μειωμένη αντοχή σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια αμφίπακτης στήριξης.

### 6. Πειράματα των *A.Y. Kiziltug, R.B.Grove, S.W.Peters, C.D. Miller (1972)*

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα κάμψης σε 4 σωλήνες μήκους 600mm περίπου, με λόγο  $D/t$  31, 41, 58, 76. Τα δοκίμια κατατάσσονται σε **class 1, 2, 3,  $32 \leq \lambda \leq 86$**  έχουν όριο διαρροής 230 MPa -280MPa και αποτελούνται από χάλυβα ASTM A370.

Η πειραματική διαδικασία των παραπάνω δειγμάτων ήταν η εξής: Τα δοκίμια φορτίζονται μέχρι η παραμόρφωση γίνει ίση με 0,005, οπότε και λαμβάνεται το δυναμικό όριο διαρροής. Στην συνέχεια σταματά η φόρτιση για 5min, ώστε να σταθεροποιηθεί το φορτίο και λαμβάνεται το στατικό όριο διαρροής. Έπειτα συνεχίζεται η φόρτιση με την ίδια ταχύτητα μέχρι το δοκίμιο να αστοχήσει.

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για το εν λόγω πείραμα, αποτελείται από δύο υδραυλικούς γρύλλους ικανότητας 250 ton (ένα σε κάθε άκρο του δοκιμίου) και δύο υδραυλικές αντλίες 25 ton (δεξιά και αριστερά του δοκιμίου). Το αξονικό φορτίο δημιουργήθηκε από τους δύο κατακόρυφους γρύλλους. Η συσκευή εξασφαλίζει την σωστή στήριξη των δοκιμίων ενώ χρησιμοποιείται και για το πείραμα κάμψης χρησιμοποιείται η λειτουργία των υδραυλικών αντλιών.

### 7. Πειράματα του *D.R. Sherman(1983)*

Τα πειράματα γίνανε από τον D.R. Sherman, σε 16 χαλύβδινα δοκίμια τα 8 από αυτά ποιότητας A36 και τα υπόλοιπα 8 ποιότητας A633-C, με όριο διαρροής από 280 MPa - 430MPa και λόγο  $D/t$  από 17 έως 85. Τα δεδομένα που παρέχονται από την δημοσίευση είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων και τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα δοκίμια κατατάσσονται σε **class 1,2,3,4.  $19 \leq \lambda \leq 156$**

**Bifurcation and localization Instabilities in cylindrical shells under**

**Bending-I. EXPERIMENTS**

**S. KYRIAKIDES and G. T. Ju (1992)**

	$D_m$	$t$	$D/t$	$L$	$M_u$	$M_v$	$M_u/M_v$	$\sigma_u$	$\sigma_v$	$E$	$10^{-3} k_c$	$10^{-3} k_L$	$10^{-3} k_v$	$k_c/k_v$	$k_L/k_v$
1	31,29	0,53	59,50	375,5	140	121	1,16	346,4	299,0	69	0,4831		0,2771	1,743	
2	24,89	0,51	49,00	225,3	90	76	1,19	363,9	307,0	70	0,7480		0,3542	2,112	
3	31,06	0,72	43,00	465,9	205	166	1,23	374,5	304,0	71	0,7581		0,2770	2,737	
4	30,86	0,89	34,70	370,3	244	189	1,29	366,7	283,4	67	0,9616	0,8734	0,2733	3,519	3,196
5	27,74	0,89	31,20	332,9	202	155	1,31	376,5	288,0	67	1,1064	1,0196	0,3082	3,589	3,308
6	30,54	1,26	24,30	398,6	366	263	1,39	397,9	286,0	71	1,3051	1,1808	0,2632	4,959	4,487
7	30,15	1,63	18,50	361,8	509	360	1,41	437,1	309,0	69	2,0009	1,5330	0,2964	6,751	5,172

**Bending tests to determine slenderness limits for cold-formed circular hollow sections**

**M. Elchalakani, X.L. Zhao, R. Grzebieta (2002)**

	$D_m$	$t_m$	$D/t$	$L$	$M_u$	$M_v$	$M_u/M_v$	$\sigma_u$	$\sigma_v$	$E$	$10^{-3} k_c$	$10^{-3} k_L$	$10^{-3} k_v$	$k_c/k_v$	$k_L/k_v$
1	110,10	1,10	100,10	800,2	3,890	4,138	0,94	383,5	408,0	191	0,1217	0,0390418	0,0388	3,135	1,006
2	109,90	1,00	109,90	798,7	3,670	3,784	0,97	395,8	408,0	191	0,1380	0,0373648	0,0389	3,548	0,961
3	109,70	0,90	121,90	801,8	3,420	3,386	1,01	412,1	408,0	191	0,2510	0,0398360	0,0390	6,441	1,022
4	110,40	1,25	88,30	811,4	4,530	4,719	0,96	391,7	408,0	191	0,1518	0,0367823	0,0387	3,921	0,950
5	98,60	1,70	58,00	873,3	5,780	5,070	1,14	467,4	410,0	212	0,3257	0,0753481	0,0392	8,314	1,923
6	98,80	1,20	82,30	795,7	4,330	3,579	1,21	488,8	404,0	191	0,2775	0,0734813	0,0428	6,488	1,718
7	99,20	1,40	70,90	798,9	4,920	4,205	1,17	472,7	404,0	191	0,3583	0,0838897	0,0426	8,412	1,969
8	99,60	1,60	62,30	802,1	5,380	4,804	1,12	452,5	404,0	191	0,2348	0,0715856	0,0424	5,533	1,687
9	100,00	1,80	55,60	802,5	5,350	4,908	1,09	397,9	365,0	200	0,2879	0,0782926	0,0365	7,879	2,143
10	99,80	2,30	43,40	798,2	8,890	6,891	1,29	528,9	410,0	212	0,4351	0,1071411	0,0387	11,242	2,768
11	87,30	2,40	36,40	801,8	5,670	5,452	1,04	428,5	412,0	218	0,9643	0,2444457	0,0433	22,261	5,643
12	100,60	2,10	47,90	801,9	7,500	6,356	1,18	476,7	404,0	191	0,7242	0,1752121	0,0420	17,240	4,171

**Local Buckling of UOE and Seamless Steel Pipes**  
**A.M. Gresnigt, R.J. van Foeken (2001)**

	$D_m$	$t_m$	D/t	L	$M_u$	$M_v$	$M_u/M_v$	$\sigma_u$	$\sigma_v$	E	$10^{-3} k_c$	$10^{-3} k_L$	$10^{-3} k_y$	$k_c/k_y$	$k_L/k_y$
1	497,78	11,22	44,4	1500,0	1.570.000	1.045.907	1,50	719,0	479,0	205	0,0619	0,0590	0,0094	6,599	6,296
2	497,16	17,54	28,3	1500,0	1.821.000	1.562.876	1,17	534,8	459,0	197	0,0715	0,0427	0,0094	7,614	4,546
3	488,91	18,99	25,7	1500,0	2.290.000	1.689.861	1,36	642,3	474,0	203	0,1344	0,0686	0,0095	14,081	7,189
4	501,99	23,61	21,3	1500,0	2.693.000	2.102.754	1,28	576,3	450,0	193	0,0270	0,0896	0,0093	2,902	9,638

**Ovaling of Pipelines Under Pure Bending**  
**J.O.Jirsa, Fook-Hoy Lee, J.C.Wilhot,Jr and J.E.Mewin (1972)**

	$D_m$	t	D/t	L	$M_u$	$M_v$	$M_u/M_v$	$\sigma_u$	$\sigma_v$	E	$10^{-3} k_c$	$10^{-3} k_L$	$10^{-3} k_y$	$k_c/k_y$	$k_L/k_y$
1	267,13	5,92	45,12		169.024	125.730	1,34	509,4	379,0	162	0,1610	0,1080	0,0175	9,193	6,167
2	264,16	8,89	29,71		236.634	157.777	1,50	485,7	323,8	188	0,3070		0,0130	23,541	
3	399,80	6,60	60,54		385.375	279.897	1,38	464,8	337,6	196	0,0470	0,0400	0,0086	5,454	4,642
4	501,52	6,48	77,40		581.443	476.271	1,22	454,2	372,1	196	0,0179	0,0148	0,0076	2,359	1,950

**Tests of circular steel tubes in bending**  
**D.R. Sherman- (Simple Span)- (Γραφικά Sherman1) (1976)**

	$D_m$	t	D/t	L	$M_u$	$M_v$	$M_u/M_v$	$\sigma_u$	$\sigma_v$	E	$10^{-3} k_c$	$10^{-3} k_L$	$10^{-3} k_y$	$k_c/k_y$	$k_L/k_y$
1	258,55	14,86	17,40	3657,6	323.590	226.286	1,43	414,8	290,1	192	0,0725	0,0000	0,0117	6,200	
2	265,90	7,80	34,10	3657,6	165.784	131.575	1,26	382,8	303,8	192	0,0726	0,0000	0,0119	6,100	
3	267,20	5,61	47,60	3657,6	141.980	116.289	1,21	488,5	403,8	192	0,0850	0,0519	0,0157	5,400	3,300
4	268,06	4,93	54,40	3657,6	145.361	118.993	1,22	513,6	421,0	192	0,0949	0,0311	0,0164	5,800	1,900
5	269,38	3,53	76,30	3657,6	66.257	58.820	1,13	325,4	288,0	192	0,0690	0,0256	0,0111	6,200	2,300
6	270,28	2,46	109,70	3657,6	48.541	43.731	1,11	343,4	309,4	192	0,0346	0,0346	0,0119	2,900	2,900

## Tests of circular steel tubes in bending

## D.R. Sherman- (Fixed ends, third point load) (γραφικά Sherman3) (1976)

	$D_m$	t	D/t	L	$M_u$	$M_v$	$M_u/M_v$	$\sigma_u$	$\sigma_v$	E	$10^{-3} k_c$	$10^{-3} k_L$	$10^{-3} k_v$	$k_c/k_v$	$k_L/k_v$
1	258,55	14,86	17,40	6096,0	416,367	226,286	1,84	533,7	290,1	192	0,0760	0,0000	0,0117	6,500	
2	265,48	7,92	33,50	6096,0	237,259	133,291	1,78	540,9	303,8	192	0,1252	0,0000	0,0119	10,500	
3	267,20	5,61	47,60	6096,0	141,980	116,289	2,07	835,8	403,8	192	0,1590	0,0944	0,0157	10,100	6,000
4	268,19	4,93	54,43	6096,0	145,361	118,993	1,59	669,4	421,0	192	0,0850	0,0523	0,0164	5,200	3,200
5	269,34	3,53	76,29	6096,0	66,257	58,820	1,45	417,6	288,0	192	0,1002	0,0245	0,0111	9,000	2,200
6	271,01	2,67	101,62	6096,0	66,630	47,593	1,40	433,1	309,4	192	0,0642	0,0642	0,0119	5,400	5,400

## Tests of circular steel tubes in bending

## D.R. Sherman- (Fixed ends, third point load) (γραφικά Sherman4) (1976)

	$D_m$	t	D/t	L	$M_u$	$M_v$	$M_u/M_v$	$\sigma_u$	$\sigma_v$	E	$10^{-3} k_c$	$10^{-3} k_L$	$10^{-3} k_v$	$k_c/k_v$	$k_L/k_v$
1	258,55	14,86	17,40	15240,0	520,459	226,286	2,30	667,2	290,1	192	0,0479	0,0000	0,0117	4,100	
2	265,90	7,80	34,10	15240,0	296,043	131,575	2,25	683,7	303,8	192	0,1155	0,0000	0,0119	9,700	
3	270,28	2,46	109,70	14843,8	69,969	43,731	1,60	495,0	309,4	192	0,0823	0,0000	0,0119	6,900	

## Tests of circular steel tubes in bending

## D.R. Sherman- (Cantilever) (γραφικά Sherman5) (1976)

	$D_m$	t	D/t	L	$M_u$	$M_v$	$M_u/M_v$	$\sigma_u$	$\sigma_v$	E	$10^{-3} k_c$	$10^{-3} k_L$	$10^{-3} k_v$	$k_c/k_v$	$k_L/k_v$
4	268,06	4,93	54,40	3657,6	145,361	118,993	1,22	513,6	421,0	192	0,1391	0,1391	0,0164	8,500	8,500
5	269,38	3,53	76,30	3657,6	66,257	58,820	1,13	325,4	288,0	192	0,1169	0,0924	0,0111	10,500	8,300
6	270,28	2,46	109,70	3657,6	48,541	43,731	1,11	343,4	309,4	192	0,0715	0,0477	0,0119	6,000	4,000

## Collapse tests of short tubular columns subjected to combined loads

## A.Y. Kiziltug, R.B.Grove, S.W.Peters, C.D. Miller(172)

	$D_m$	t	D/t	L	$M_u$	$M_v$	$M_u/M_v$	$\sigma_u$	$\sigma_v$	E	$10^{-3} k_c$	$10^{-3} k_L$	$10^{-3} k_v$	$k_c/k_v$	$k_L/k_v$
1	196,92	6,33	31,11	609,6	81,537	52,809	1,544	419,6	239,6	213		0,2397	0,0114	20,974	
2	198,70	4,78	41,54	609,6	63,833	37,593	1,698	440,3	261,5	198		0,2396	0,0133	18,028	
3	199,93	3,47	57,54	609,6	44,186	30,182	1,464	412,0	281,2	212	0,2000	0,1360	0,0133	15,061	10,241
4	200,74	2,66	75,49	609,6	31,849	22,133	1,439	383,1	266,2	197	0,1210	0,0769	0,0134	9,002	5,725

Bending Capacity Of Fabricated Pipes  
D.R. Sherman (Γραφικά Sherman2) (1983)

	$D_m$	$t$	$D/t$	$L$	$M_u$	$M_v$	$M_u/M_v$	$\sigma_u$	$\sigma_v$	$E$	$10^{-3} k_c$	$10^{-3} k_L$	$10^{-3} k_v$	$k_c/k_v$	$k_L/k_v$
1	430,81	26,64	16,17		1.456.302	1.024.721	1,42	457,5	279,0	210					
2	438,34	18,60	23,56		1.230.343	810.061	1,52	505,7	298,3	210					
3	441,93	16,54	26,73		1.198.709	827.008	1,45	511,2	337,6	210					
4	444,86	13,11	33,94		827.008	590.881	1,40	474,7	298,3	210					
5	447,78	9,93	45,09		563.766	449.657	1,25	466,5	293,5	210					
6	450,85	6,86	65,74		381.870	350.236	1,09	454,1	324,5	210					
7	596,93	12,93	46,17		1.495.845	1.113.975	1,34	490,6	314,2	210					
8	602,82	6,78	88,89		808.931	714.029	1,13	480,2	372,7	210					
9	431,29	25,40	16,98		1.900.310	1.316.208	1,44	540,2	374,1	210					
10	438,35	19,61	22,35		1.402.072	1.106.066	1,27	555,3	389,3	210					
11	441,33	16,38	26,94		1.303.780	1.025.851	1,27	567,7	423,7	210					
12	444,70	13,26	33,54		1.111.715	822.489	1,35	0,0	410,6	210					
13	447,93	10,03	44,65		784.076	634.943	1,23	549,8	410,0	210					
14	451,69	6,78	66,60		540.041	464.345	1,16	570,5	433,4	210					
15	596,47	13,64	43,73		1.725.192	1.511.662	1,14	0,0	405,1	210					
16	602,06	7,04	85,57		919.651	850.733	1,08	562,2	429,2	210					

Πίνακας 2.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και πειραματικά αποτελέσματα για κάθε σειρά πειραμάτων κάμψης.

**Bifurcation and localization Instabilities in cylindrical shells under  
Bending--I. EXPERIMENTS  
S. KYRIAKIDES and G. T. Ju**

	D/t	L	$\epsilon_u$	$\epsilon_L$
1	59,50	375,5	0,007686	
2	49,00	225,3	0,009500	
3	43,00	465,9	0,012045	
4	34,70	370,3	0,015266	0,013866
5	31,20	332,9	0,015839	0,014596
6	24,30	398,6	0,020751	0,018775
7	18,50	361,8	0,031795	0,024359

**Bending tests to determine slenderness limits for cold-formed circular hollow  
sections**

**M. Elchalakani, X.L. Zhao \*, R. Grzebieta**

	D/t	L	$\epsilon_u$	$\epsilon_L$
1	100,10	800,2	0,006768	0,002171
2	109,90	798,7	0,007651	0,002072
3	121,90	801,8	0,013879	0,002203
4	88,30	811,4	0,008475	0,002053
5	58,00	873,3	0,016332	0,003779
6	82,30	795,7	0,013876	0,003674
7	70,90	798,9	0,018024	0,004220
8	62,30	802,1	0,011879	0,003622
9	55,60	802,5	0,014652	0,003985
10	43,40	798,2	0,022212	0,005470
11	36,40	801,8	0,043247	0,010963
12	47,90	801,9	0,037188	0,008997

**Local Buckling of UOE and Seamless Steel Pipes  
A.M. Gresnigt, R.J. van Foeken,**

	D/t	L	$\epsilon_u$	$\epsilon_L$
1	44,4	1500,0	0,015745	0,015021
2	28,3	1500,0	0,018392	0,010980
3	25,7	1500,0	0,034131	0,017427
4	21,3	1500,0	0,007090	0,023547

**Ovaling of Pipelines Under Pure Bending  
J.O.Jirsa, Fook-Hoy Lee, J.C.Wilhot,Jr and J.E.Mewin, Rice U.**

	D/t	L	$\epsilon_u$	$\epsilon_L$
1	45,12	914,4	0,021981	0,014745
2	29,71	914,4	0,041913	
3	60,54	914,4	0,009550	0,008128
4	77,40	914,4	0,004536	0,003750

**Tests of circular steel tubes in bending  
D.R. Sherman- (Simple Span)**

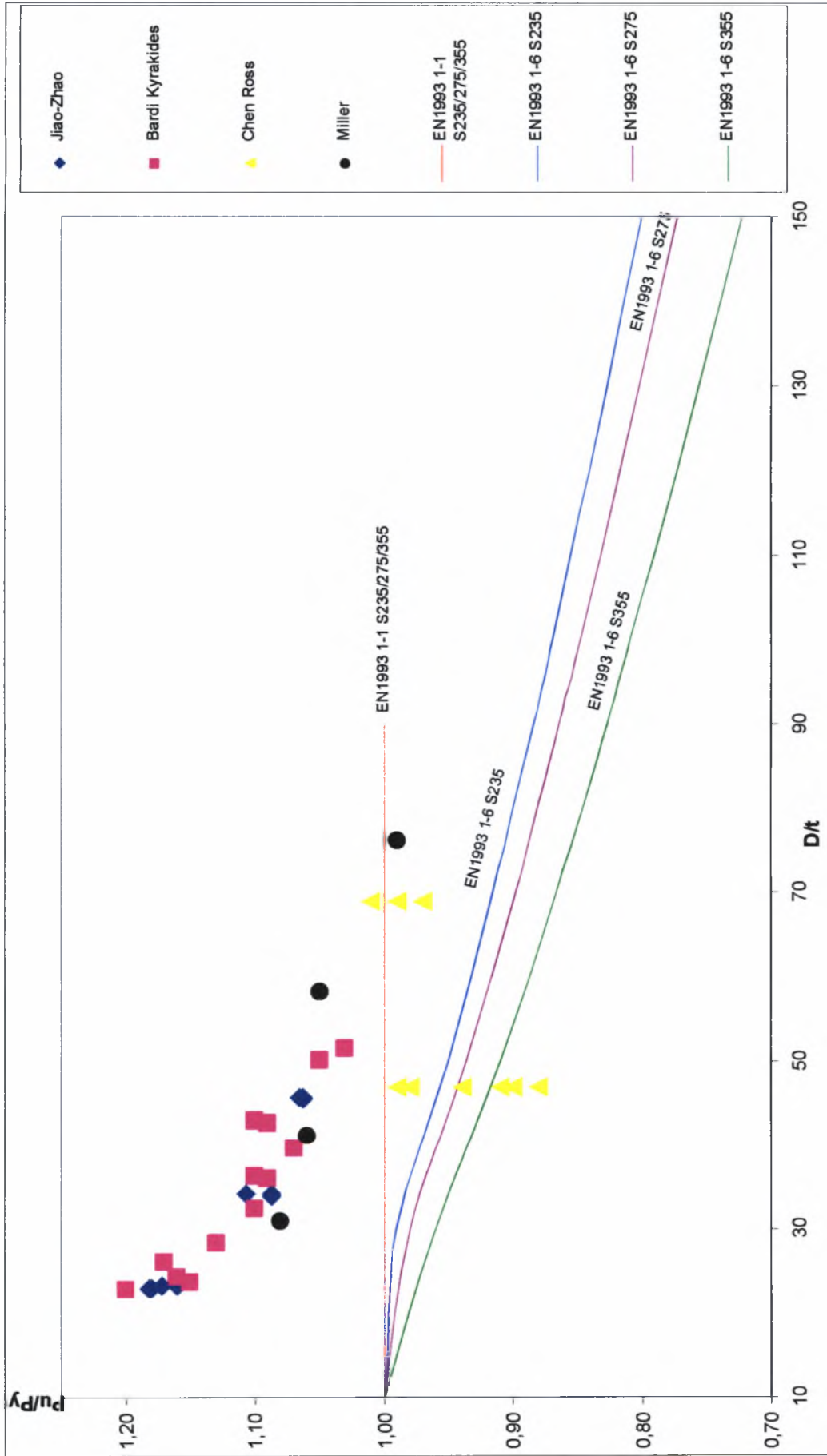
	D/t	L	$\epsilon_u$	$\epsilon_L$
1	17,40	3657,6	0,009905	
2	34,10	3657,6	0,009937	
3	47,60	3657,6	0,011594	0,007085
4	54,40	3657,6	0,012951	0,004243
5	76,30	3657,6	0,009422	0,003495
6	109,70	3657,6	0,004715	0,004715



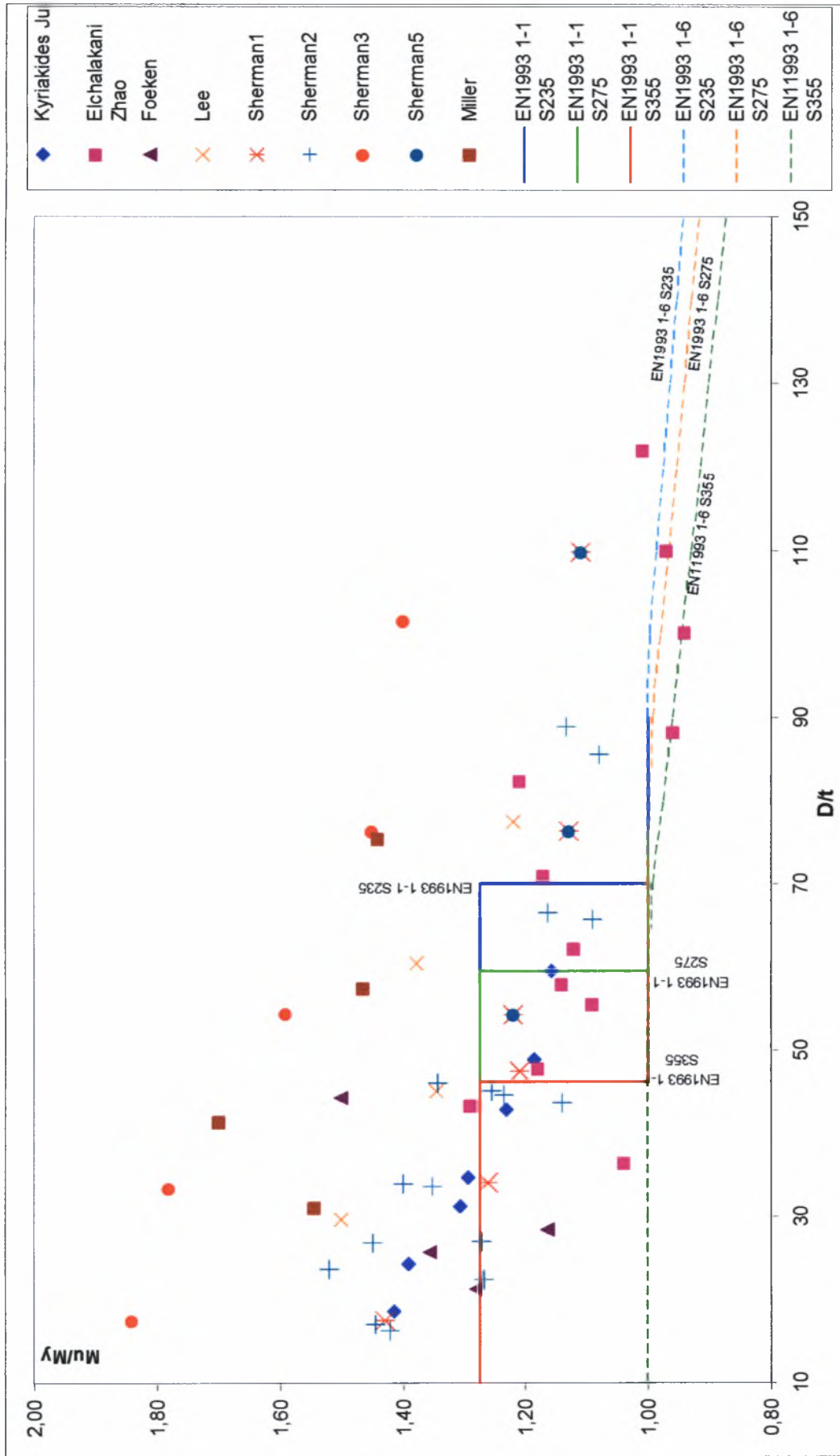
<b>Tests of circular steel tubes in bending D.R. Sherman- (Fixed ends, third point load)</b>				
	<b>D/t</b>	<b>L</b>	<b><math>\epsilon_u</math></b>	<b><math>\epsilon_L</math></b>
<b>1</b>	17,40	6096,0	0,010384	
<b>2</b>	33,50	6096,0	0,017113	
<b>3</b>	47,60	6096,0	0,021685	0,012882
<b>4</b>	54,43	6096,0	0,011611	0,007145
<b>5</b>	76,29	6096,0	0,013677	0,003343
<b>6</b>	101,62	6096,0	0,008786	0,008786
<b>Tests of circular steel tubes in bending D.R. Sherman- (Fixed ends, third point load)</b>				
	<b>D/t</b>	<b>L</b>	<b><math>\epsilon_u</math></b>	<b><math>\epsilon_L</math></b>
<b>1</b>	17,40	15240,0	0,006550	
<b>2</b>	34,10	15240,0	0,015801	
<b>3</b>	109,70	14843,8	0,011219	
<b>Tests of circular steel tubes in bending D.R. Sherman- (Cantilever)</b>				
	<b>D/t</b>	<b>L</b>	<b><math>\epsilon_u</math></b>	<b><math>\epsilon_L</math></b>
<b>1</b>	54,40	3657,6	0,018980	0,018980
<b>2</b>	76,30	3657,6	0,015957	0,012613
<b>3</b>	109,70	3657,6	0,009756	0,006504
<b>Collpase tests of short tubular columns subjected to combined loads A.Y. Kiziltug, R.B.Grove, S.W.Peters, C.D. Miller</b>				
	<b>D/t</b>	<b>L</b>	<b><math>\epsilon_u</math></b>	<b><math>\epsilon_L</math></b>
<b>1</b>	31,11	609,6	0,000000	0,024360
<b>2</b>	41,54	609,6	0,000000	0,024377
<b>3</b>	57,54	609,6	0,020340	0,013831
<b>4</b>	75,49	609,6	0,012302	0,007824

**Πίνακας 2.3** Πειραματικά αποτελέσματα των παραμορφώσεων ( δεν παρέχονται από τις δημοσιεύσεις για όλα τα πειράματα)

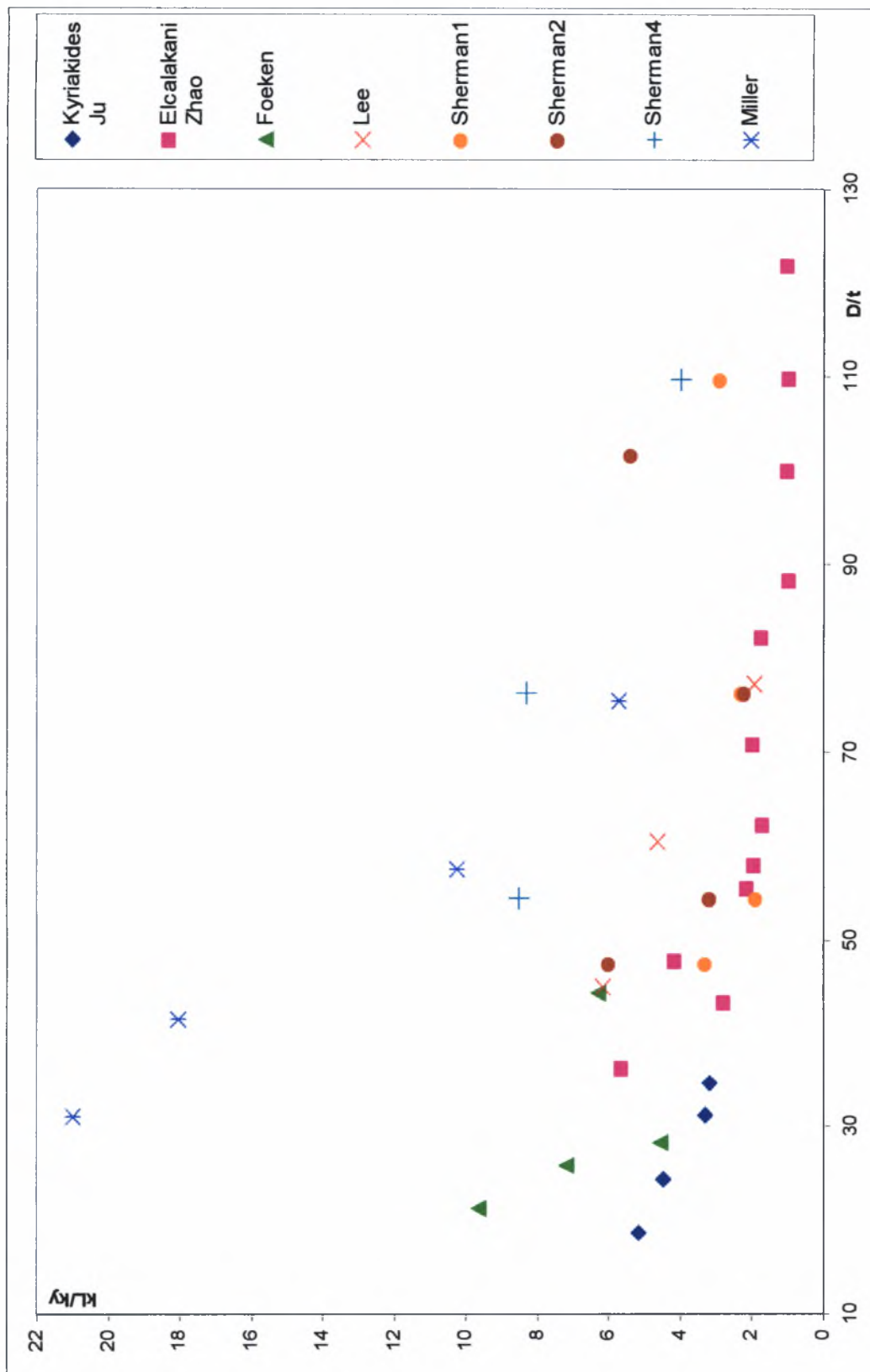
## **2.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ**



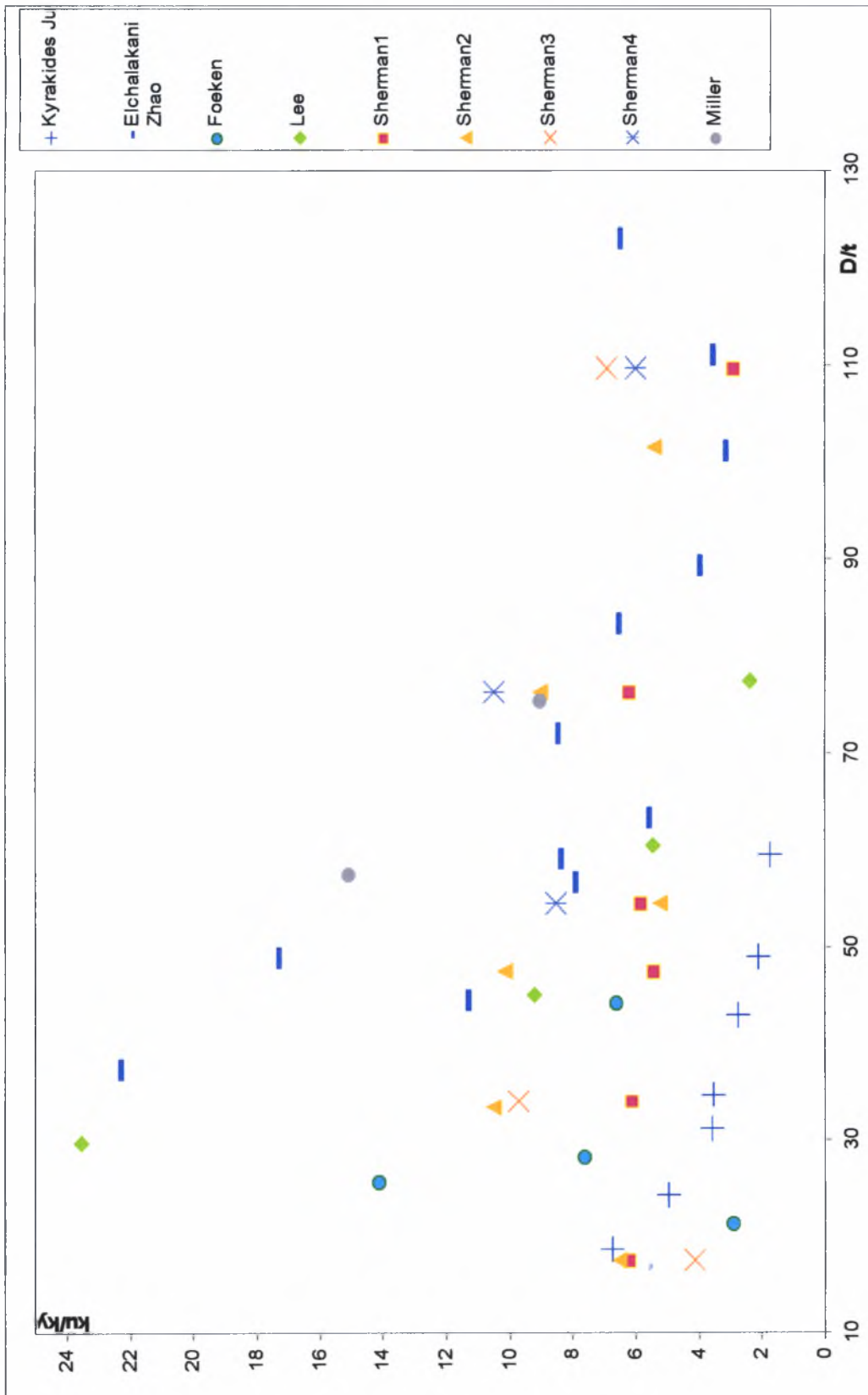
Διάγραμμα 1: σχέση των λόγων  $P_u/P_y - D/t$  για πειραματικά δεδομένα /EN 1993-1-1/EN 1993-1-6,



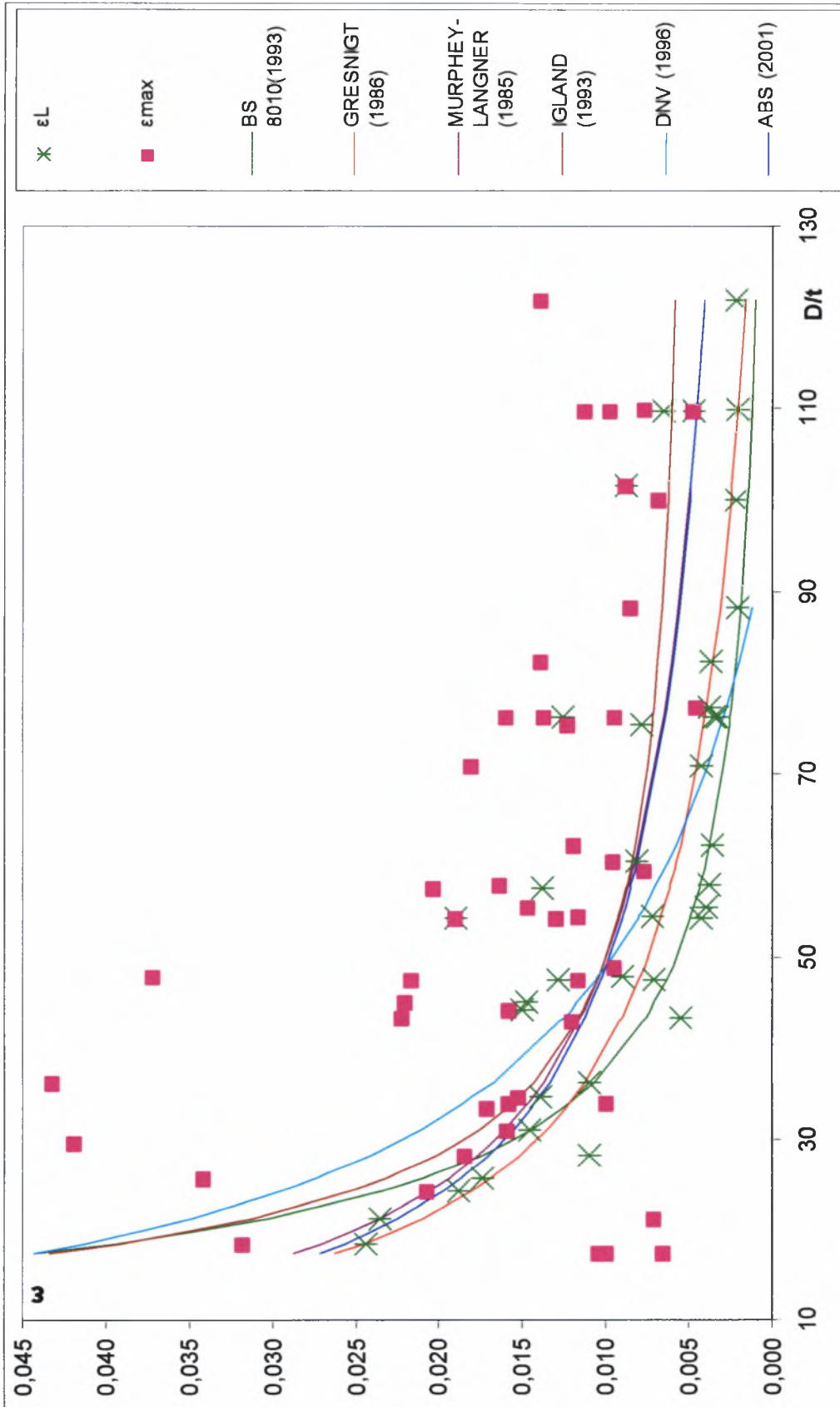
Διάγραμμα 2: σχέση των λόγων  $M_u/M_y$  –  $D/t$  για πειραματικά δεδομένα /EN 1993-1-1/EN 1993-1-6,



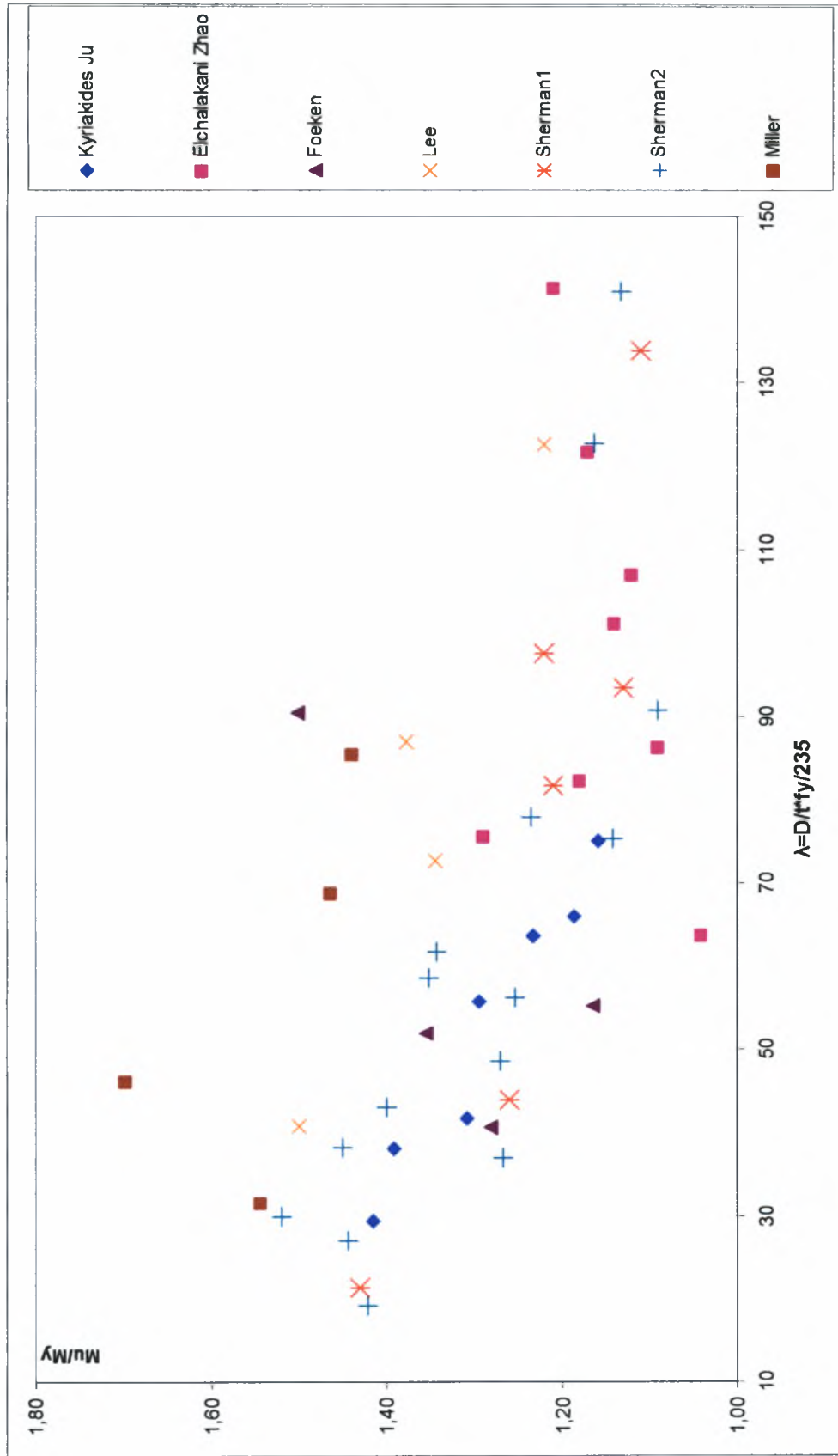
Διάγραμμα 3: σχέση καμπυλότητας  $k_L/k_y$  –και  $D/t$  για τις σειρές πειραμάτων



Διάγραμμα 4: σχέση του λόγου  $k_w/k_y$  – και  $D/t$  για τις σειρές πειραμάτων

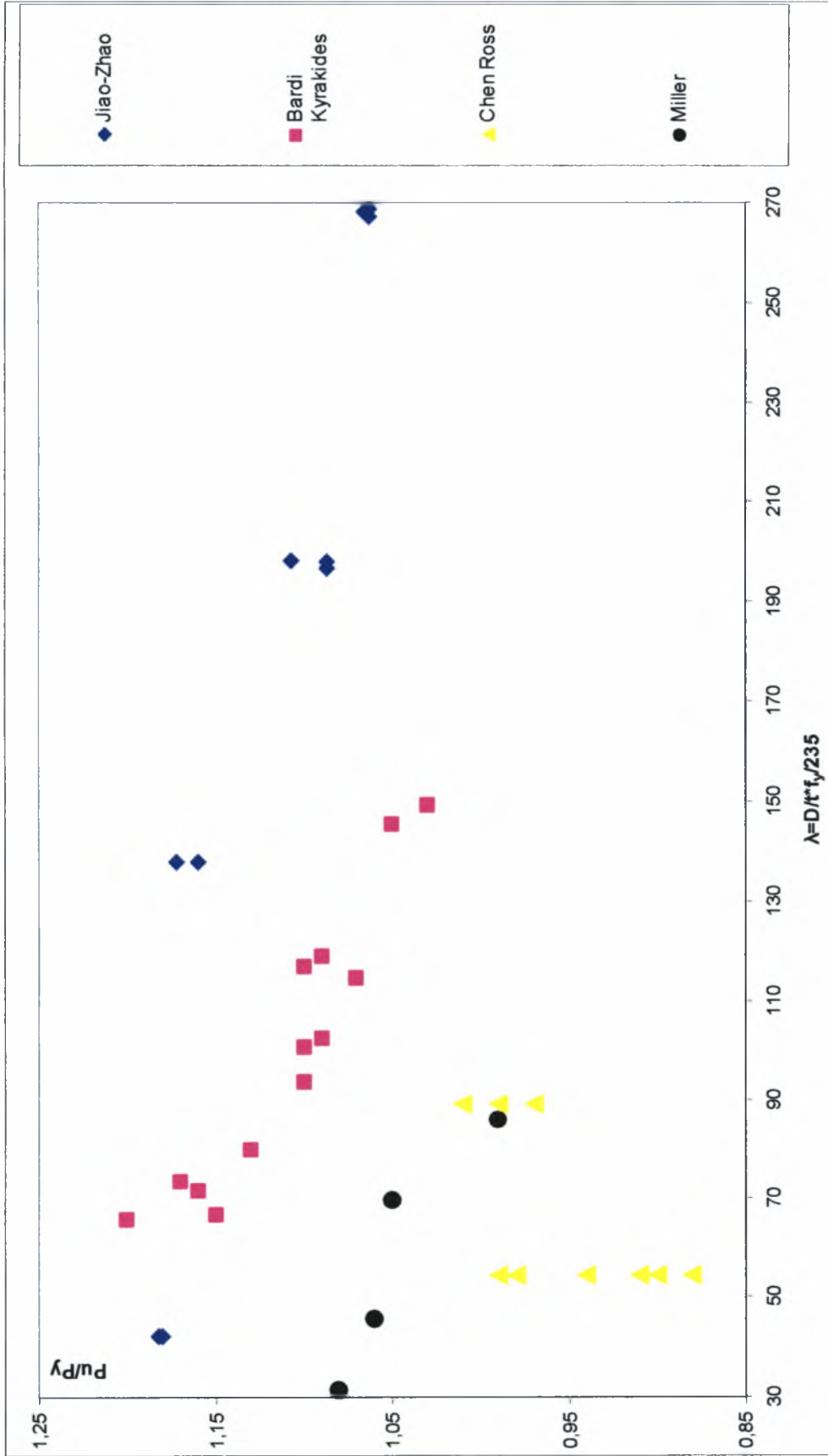


Διάγραμμα 5: σχέση παραμόρφωσης  $-D/t$  για τις σειρές πειραμάτων και τους ισχύοντες κανονισμούς



**Διάγραμμα 6:** σχέση των λόγων  $M_u/M_y$  - $\lambda$  λυγηρότητας  $\lambda$  μέρος των πειραματικών δεδομένων





**Διάγραμμα 7:** σχέση των λόγων  $P_w/P_y$  - λυγηρότητας  $\lambda$  των πειραματικών δεδομένων

### 3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

#### 3.1 ΘΛΙΨΗ

Από τους δύο κανονισμούς του Ευρωκώδικα και τα τέσσερα πειράματα αξονικής συμπίεσης που μελετήθηκαν προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι δύο κανονισμοί του Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1-1 [1] και Μέρος 1-6 [2] παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στον υπολογισμό της οριακής θλιπτικής αντοχής με τον Ευρωκώδικα 3 Μέρος 1-6, εμφανώς πιο συντηρητικό στον υπολογισμό της  $P_u$ , η οποία μειώνεται καθώς η αναλογία  $D/t$  αυξάνεται. Είναι απολύτως ευδιάκριτο πως για διατομές κλάσης 1,2,3 ο υπολογισμός της οριακής αντοχής του μέλους θα πρέπει να λαμβάνεται από τον Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1-1, ενώ για διατομές κλάσης 4 ο αντίστοιχος υπολογισμός θα πρέπει να λαμβάνεται από τον Ευρωκώδικα 3 Μέρος 1-6.
- Η μέγιστη θλιπτική δύναμη  $P_u$ , η οποία υπολογίστηκε πειραματικά, είναι μεγαλύτερη από την οριακή θλιπτική αντοχή  $P_y$  με αναλογία  $1.03 \leq \frac{P_u}{P_y} \leq 1.20$ , εκτός από την περίπτωση του πειράματος των Chenn και Ross, όπου  $0.88 \leq \frac{P_u}{P_y} \leq 1.01$ . Αυτό οφείλεται αφενός μεν στον τρόπο κατασκευής των εν λόγω δοκιμίων (συγκόλληση καμπυλωμένων επίπεδων ελασμάτων), ο οποίος δημιούργησε υψηλό ποσοστό παραμενουσών τάσεων και αφετέρου δε στο μεγάλο μήκος τους  $5500mm \leq L \leq 11000mm$  που μπορεί να δημιουργεί φαινόμενα λυγισμού τύπου Euler.
- Καθώς η αναλογία  $D/t$  αυξάνεται η μέγιστη θλιπτική αντοχή  $P_u$  μειώνεται και πλησιάζει την οριακή θλιπτική αντοχή  $P_y$  όταν ο λόγος  $D/t$  είναι μεταξύ 50 και 60.
- Από πείραμα των Jiao και Zhao βλέπουμε πως οι κοίλες διατομές τύπου *VHS*, που ταξινομούνται στην κλάση 4, εμφανίζουν υψηλή θλιπτική αντοχή και μάλιστα πολύ κοντά σε αυτή των μη θερμικά κατεργασμένων διατομών οι οποίες κατατάσσονται στην κλάση I. Μπορούμε να συμπεράνουμε λοιπόν πως μία λεπτότοιχη διατομή αυξάνει την θλιπτική της αντοχή έχοντας υποστεί *κατεργασία βαφής και επαναφοράς και κατ'επέκταση έχοντας υψηλό όριο διαρροής*.

#### 3.2 ΚΑΜΨΗ

Από τους δύο κανονισμούς του Ευρωκώδικα και τα τέσσερα πειράματα αξονικής συμπίεσης που μελετήθηκαν προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Όπως και στην περίπτωση της αξονικής συμπίεσης έτσι και στην κάμψη οι δύο κανονισμοί του Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1-1 [1] και Μέρος 1-6 [2] παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στον υπολογισμό της οριακής αντοχής με το Μέρος 1-6, εμφανώς

πιο συντηρητικό στον υπολογισμό της  $M_u$ . Οι κανονισμοί επαληθεύονται από τα πειραματικά αποτελέσματα αναφορικά με τις διατομές κλάσης 1,2,3, ενώ για τα δοκίμια κατάταξης κλάσης 4, [8], [9], [11], [10], προκύπτει διαφοροποίηση σε σχέση με το Μέρος 1-6 του Ευρωκώδικα.

- Από τα πειραματικά αποτελέσματα των [8], [9], [11], [10], βλέπουμε πως δοκίμια με λόγο  $D/t$  από 58 έως 110, τα οποία κατατάσσονται στην κλάση 4 και έχουν υψηλό όριο διαρροής, αναπτύσσουν μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα σε σχέση με αυτή που ορίζει ο κανονισμός [2]. Για αυτές τις κυκλικές κυλινδρικές διατομές προτείνεται ο υπολογισμός της οριακής αντοχής μέλους σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1-1. Τα συγκεκριμένα δοκίμια έχουν αναλογία μήκους-διαμέτρου  $7 \leq \frac{L}{D} \leq 55$ , το μεγάλο εύρος της οποίας δεν επηρεάζει την κατάταξη τους ως κυκλικά κυλινδρικά δομικά μέλη και όχι ως κελύφη.
- Δοκίμια από διατομές αλουμινίου [7] εμφανίζουν παρόμοια φέρουσα καμπτική ικανότητα με τα χαλύβδινα για κατάταξη διατομής κλάση 1,2,3.
- Η παραμόρφωση  $\epsilon_L$  η οποία αντιστοιχεί στην μέγιστη ροπή  $M_u$ , επαληθεύεται κυρίως από τους κανονισμούς, BS 8010 (1993) και Gresnigt (1986). Υπάρχει σημαντική διαφορά όμως σε κάποια δοκίμια με  $50 \leq \frac{D}{t} \leq 75$ , η κρίσιμη παραμόρφωση των οποίων είναι πολύ μεγαλύτερη από όλους τους προτεινόμενους κανονισμούς. Αυτά είναι κυρίως δοκίμια μεγάλης διαμέτρου και μήκους και κατάταξης κλάσης 3,4
- Δοκίμια κατάταξης κλάσης 1 και 2 συνεχίζουν να παραμορφώνονται και μετά την μέγιστη ροπή κάμψης εμφανίζοντας πλαστική παραμόρφωση  $\epsilon_u$  αρκετά μεγαλύτερη της  $\epsilon_L$ , φθάνοντας ακόμη και την τριπλάσια τιμή της  $\epsilon_L$ . Τα δοκίμια αυτά είναι κατασκευασμένα από εν ψυχρώ διαμορφωμένο χάλυβα, όπως φαίνεται από τα πειράματα των *M. Elchalakani, X.L. Zhao, R. Grzebieta* [8]
- Δοκίμια από διατομές αλουμινίου [7] και αμφιέριστης στήριξης [8] [11], [12] εμφανίζουν μικρότερη καμπυλότητα έναντι των υπόλοιπων. Γενικότερα οι καμπυλότητες των δοκιμίων είναι σε αντιστοιχία με τις παραμορφώσεις τους.
- Από τα πειραματικά αποτελέσματα των *A.Y. Kiziltug, R.B.Grove, S.W.Peters, C.D. Miller* [6] παρατηρούμε πως για διατομές κλάσης 1,2,3 με αναλογία διαμέτρου προς μήκους  $D/L \approx \frac{1}{3}$  εμφανίζουν υψηλή φέρουσα καμπτική ικανότητα με  $1.44 \leq \frac{M_u}{M_y} \leq 1.70$
- Τα όρια λυγρότητας  $\lambda$  (πίνακας 1.1) συμφωνά με τον Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1-1 διαπιστώνεται πως είναι αρκετά συντηρητικά σε σχέση με τα αποτελέσματα των πειραμάτων

## Βιβλιογραφία

- [1] Eurocode 3. Design of Steel Structures, Part 1.1, General rules and rules for buildings. prEN 1993-1-1 : 2003 19 May 2003.
- [2] Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures EN 1993-1-6: 2007 January 2007.
- [3] H. Jiao, X.-L. Zhao, Imperfection, residual stress and yield slenderness limit of very high strength (VHS) circular steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research Vol. 59 pp.233-249, (2003).*
- [4] F.C. Bardi, S. Kyriakides, Plastic buckling of circular tubes under axial compression—part I: Experiments. *International Journal of Mechanical Sciences Vol. 48, pp.330-841,(2006.)*
- [5] Wai F. Chen, M. ASCE and David A. Ross, Test Of Fabricated Tubular Columns. *JOURNAL OF THE STRUCTURE DIVISION ASCE, 1977, Vol.103 (3) pp.619-634.*
- [6] A.Y. Kiziltug, R.B.Grove, S.W.Peters, C.D. Miller, Collapse tests of short tubular columns subjected to combined loads. *CBI INDUSTRIES INC, Final report December 1985.*
- [7] S. Kyriakides and G. T. Ju. Bifurcation and localization instabilities in cylindrical shells under bending—I. Experiments. *International Journal Solids Structure Vol 29 pp.1117-1142, (1992.)*
- [8] M. Elchalakani, X.L. Zhao, R. Grzebieta, Bending tests to determine slenderness limits for cold-formed circular hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research Vol.58, pp. 1407-1430, (2002).*
- [9] A.M. Gresnigt, (Delft University of Technology Delft, The Netherlands)-  
R.J. van Foeken, (TNO Building and Construction Research the Netherlands).  
Local Buckling of UOE and Seamless Steel Pipes. *Proceedings of the Eleventh (2001) International Offshore and Polar Engineering Conference Stavanger, Norway, June 17-22, 2001.*
- [10] J.O.Jirsa, Fook-Hoy Lee, J.C.Wilhot,Jr and J.E.Mewin, Rice U. Ovaling of Pipelines Under Pure Bending. 4th Offshore Technology Conference Houston May 1-3, 1972, Paper No OTC1569.
- [11] DonaldR. Sherman, Tests of circular steel tubes in bending. *JOURNAL OF THE STRUCTURE DIVISION, Vol ST11, pp. 2182-2195, November 1976*
- [12] DonaldR. Sherman. Ultimate capacity of tubular members. *Shell oil company, Head Office Civil Engineering, Houston Texas. CE-15 Report August 1985,*
- [13] Donald R. Sherman. Bending Capacity Of Fabricated Pipes, *THE UNIVERSITY OF WISCONSIN MILWAUKEE, COLLEGE OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCE, TA417.7.F5S53x1983 c.2*



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091661

