



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ
ΣΩΛΗΝΩΤΟΥΣ ΔΟΜΙΚΟΥΣ ΦΟΡΕΙΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ. Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΠΑΣΧΑΛΙΔΟΥ ΦΩΤΕΙΝΗ

ΑΘΗΝΑ, 2013

Πρόλογος

Η εργασία στοχεύει στη διερεύνηση της πλευρικής κατάρρευσης συστοιχιών κυλινδρικών μεταλλικών σωλήνων. Η βασική διάταξη / συστοιχία (ίδια διάταξη – διαφορετικές διαστάσεις) είναι η 2x2 (τέσσερις σωλήνες ανά δύο κάθετα διασταυρούμενοι). Για αυτή τη διάταξη διερευνήθηκε η επίδραση διαφορετικών διαστάσεων σωλήνων.

Επιπλέον, επιλέχθηκε σωλήνας συγκεκριμένων διαστάσεων ώστε να διερευνηθεί περαιτέρω η συμπεριφορά σε αντίστοιχη (πλευρική) καταπόνηση όλων των δυνατών συνδυασμών διάταξης / συστοιχίας (ίδιες διαστάσεις – διαφορετική διάταξη) από έναν έως τέσσερις σωλήνες. Η προετοιμασία των δοκιμών και η πειραματική διαδικασία έλαβαν χώρα στον Τομέα Κατεργασιών, στο κτίριο Ξ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Παράλληλα επιχειρήθηκε η μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (κώδικας LS-DYNA) όλων των παραπάνω περιπτώσεων πλευρικής καταπόνησης προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς των συγκεκριμένων διατάξεων. Η προσομοίωση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε σε υπολογιστές του Εργαστηρίου του Τομέα, όπου παρέχεται το πρόγραμμα για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή Δημήτριο Μανωλάκο που μου ανέθεσε την εκπόνηση της εργασίας και μου παρείχε όλα τα απαραίτητα για την περάτωσή της. Επίσης ευχαριστώ πολύ τον διδάκτορα και μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. Πρωτεσίλαο Κωστάζο για την πολύτιμη βοήθειά του και το μέλος Ε.Τ.Ε.Π. του τομέα Κωνσταντίνο Κερασιώτη.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΩΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Πλευρική κατάρρευση	1
1.2 Θεωρία πλευρικής κατάρρευσης σωλήνων κυκλικής διατομής	2
1.2.1 Αρχική διαρροή	4
1.2.2 Συμπεριφορά μετά το όριο διαρροής	6
1.2.3 Αναλυτικά μοντέλα	8
1.2.4 Η θεωρία των πλαστικών αρμών σε κυκλικές διατομές	11

Κεφάλαιο 2

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Πειραματική διαδικασία	15
2.2. Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA 3D	17
2.2.1 Διακριτοποίηση και δημιουργία του μοντέλου	18
2.2.2 Διατύπωση μεγεθών	20
2.2.3 Explicit – Implicit μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων	21

Κεφάλαιο 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Διάταξη δοκιμών	22
3.2 Μοντελοποίηση και προσεγγίσεις	22
3.3. Πείραμα – προσομοίωση και σύγκριση αποτελεσμάτων	24
3.3.1 Προσομοίωση συστοιχίας δοκιμών 19x25	24
3.3.2 Προσομοίωση συστοιχίας δοκιμών 13x20	28
3.3.3 Προσομοίωση συστοιχίας δοκιμών 28x30	32

<i>3.3.4 Προσομοίωση συστοιχίας δοκιμών 27x30 (ένας σωλήνας)</i>	36
<i>3.3.5 Προσομοίωση συστοιχίας δοκιμών 27x30 (δύο παράλληλα τοποθετημένοι σωλήνες)</i>	40
<i>3.3.6 Προσομοίωση συστοιχίας δοκιμών 27x30 (δύο σταυρωτά τοποθετημένοι σωλήνες)</i>	44
<i>3.3.7 Προσομοίωση συστοιχίας δοκιμών 27x30 (δύο παράλληλα τοποθετημένοι σωλήνες και ένας κάθετα σε αυτούς)</i>	48
<i>3.3.8 Προσομοίωση συστοιχίας δοκιμών 27x30</i>	54
<i>3.3.9 Γενική σύγκριση (πειραματική) δοκιμών 27x30</i>	58
Κεφάλαιο 4	
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΧΟΛΙΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	60
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΩΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ

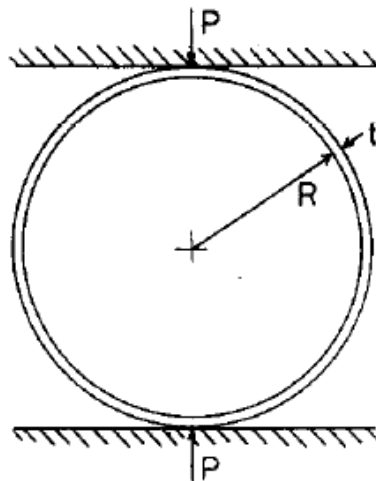
Οι μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας, όπως είναι τα συστήματα πέδης και οι αποσβεστήρες κραδασμών, σταματούν ελεγχόμενα μια κινούμενη μάζα ανάλογα με το ποσό απορρόφησης της ενέργειας που προέρχεται από την παραγωγή πλαστικής παραμόρφωσης. Η χρήση σωλήνων σε μηχανισμούς απορρόφησης ενέργειας έχει αποτελέσει το αντικείμενο ενδιαφέροντος και μελέτης [1], [2]. Στόχος αυτών των αναλύσεων είναι η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο παραμορφώνονται τοπικά οι σωλήνες.

Αρχικά για να υποθεθεί το ποσό απορρόφησης ενέργειας αυτών των μηχανισμών, εξετάζεται η συμπεριφορά του κυλινδρικού σωλήνα που υπόκειται σε πλευρική συμπίεση υπό οιονεί στατικό φορτίο, ως μη γραμμικό πρόβλημα της πλαστικότητας. Όταν ένας κυλινδρικός σωλήνας συμπιέζεται ακτινικά μεταξύ δύο επίπεδων, παράλληλων και άκαμπτων πλακών, το φορτίο αυξάνεται μονοτονικά με τη μείωση της κατακόρυφης διαμέτρου του σωλήνα. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας είναι πιθανή η πρόκληση δύο στρεβλώσεων στην κεντρική γραμμή, μία στην κορυφή και μία στο κάτω μέρος. Ο Mutchler [3] επιχείρησε να υπολογίσει την απορροφόμενη ενέργεια ενός σωλήνα που συμπιέζεται πλευρικά μεταξύ δύο πλακών, κάνοντας χρήση μιας αριθμητικής τεχνικής ενσωμάτωσης. Για το υπό συμπίεση μοντέλο θεωρήθηκε ότι αυξάνεται βαθμιαία η επιφάνεια του σωλήνα που βρίσκεται σε επαφή με την επίπεδη πλάκα, χωρίς αυτές να διαχωρίζονται όσο ασκείται το φορτίο, ενώ η ακτίνα μεταξύ των επίπεδων επιφανειών, που υποτίθεται ότι παραμένουν ημικυκλικές, μειώνεται. Οι DeRuntz και Hodge [4] προέβησαν σε μια οριακή ανάλυση ενός σωλήνα που συμπιέζεται μεταξύ δύο άκαμπτων πλακών για άκαμπτα, απολύτως πλαστικά υλικά, έχοντας προηγουμένως υποθέσει ότι το μοντέλο αυτό αποτελείται από τέσσερις πλαστικούς αρμούς, οι οποίοι παραμένουν σταθεροί σε σχέση με τα άκαμπτα μέρη του σωλήνα. Ο Johnson [5] αναφέρει την οιονεί στατική συμπίεση ενός σωλήνα κυκλικής διατομής που πραγματοποιείται μεταξύ άκαμπτων, παράλληλων πλακών και επισημαίνει ότι η επίδραση της τριβής θα είναι μικρή, αλλά η εργοσκήρυνση στους πλαστικούς αρμούς θα είναι πολύ σημαντικότερη. Όμως οι Reid και Reddy [6] μελετώντας την επίδραση της εργοσκήρυνσης κατά την πλευρική συμπίεση σωλήνων μεταξύ άκαμπτων πλακών, συμπεραίνουν ότι αυτή είναι λογικό να προσεγγίζεται όταν η μεταβολές της γεωμετρίας του μοντέλου επιδρούν στον κυρίως μηχανισμό που βρίσκεται υπό φορτίο.

Οι προαναφερθείσες μέθοδοι βασίζονται σε αριθμητική προσομοίωση ολόκληρης της διαδικασίας της παραμόρφωσης, όμως λόγω της μη γραμμικότητας των μεγάλων παραμορφώσεων αυτό καθίσταται ιδιαίτερος δύσκολο. Η δυσκολία έγκειται σε παράγοντες όπως είναι η πολύπλοκη γεωμετρία που προκαλείται από μεγάλες μετατοπίσεις, μεγάλες περιστροφές και μεγάλες καταπονήσεις, η μη γραμμική συμπεριφορά των συστατικών στοιχείων του υλικού λόγω της ανελαστικότητας που παρουσιάζεται κατά τις μεγάλες παραμορφώσεις και τέλος οι οριακές συνθήκες που ποικίλουν κατά τη φόρτιση δημιουργούν μη γραμμική χαρακτηριστική καμπύλη παραμόρφωσης. Στις μέρες μας η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών ευνοεί τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, που είναι η ακριβέστερη.

1.2 ΘΕΩΡΙΑ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται λεπτότοιχες κυκλικές διατομές ώστε η ανάλυση των τάσεων να εκφράζεται με τις συνισταμένες τάσεις, ροπές και διατμήσεις [4]. Μια πλήρης ανάλυση του φαινομένου της κατάρρευσης θα έπρεπε να συμπεριλαμβάνει τις ελαστικές και πλαστικές εκτατικές παραμορφώσεις, τις εργοσκληρύνσεις, τις γεωμετρικές μεταβολές, την τριβή των πλακών και τις δυναμικές επιδράσεις. Επειδή όμως δεν είναι όλες οι άνωθεν παράμετροι εξίσου σημαντικές, θα αμελήσουμε κάποιες προκειμένου να απλοποιήσουμε την ανάλυση.



Σχήμα 1.1. Σχηματική απεικόνιση της συμπίεσης ενός λεπτότοιχου σωλήνα κυκλικής διατομής από άκαμπτες πλάκες [6], [14], [15]

Επειδή οι ελαστικές παραμορφώσεις των μετάλλων είναι της τάξεως του 0.001, ενώ οι ολικές σχετικές μετατοπίσεις είναι της τάξεως του 1 στο υπό εξέταση ζήτημα, μπορούμε να τις παραλείψουμε. Θα παραλείψουμε και την εργοσκληρύνση (παρόλο που εξαιτίας της εμφάνισης πολυάριθμων πλαστικών εκτατικών παραμορφώσεων ίσως να έπρεπε να ασχοληθούμε εκτενώς), καθώς είναι δυνατόν να προκύψει μια ποιοτικώς ορθή ανάλυση χωρίς η εργοσκληρύνση να ληφθεί υπόψη. Έτσι ως αρχική προσέγγιση θα θεωρήσουμε ότι ο σωλήνας είναι κατασκευασμένος από άκαμπτο πλαστικό υλικό.

Στο παρελθόν από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν και αφορούσαν στην επίδραση των άμεσων τάσεων και διατμήσεων στην οριακή ανάλυση τόξων και πλαισίων αποδεικνύουν ότι αυτές μπορούν να αγνοηθούν στις περισσότερες περιπτώσεις όπου οι διαστάσεις των πλαισίων και των τόξων είναι μεγαλύτερες σε σύγκριση με το πάχος της δοκού. Φαίνεται λογικό να γίνει η ίδια απλοποίηση και στη περίπτωση των λεπτότοιχων σωλήνων χωρίς να επηρεαστεί το αποτέλεσμα της μελέτης, επομένως η επίδραση των διατμήσεων και άμεσων τάσεων στην πλαστική συμπεριφορά του σωλήνα θα παραλειφθούν. Ωστόσο αυτές οι δυνάμεις θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την κατάσταση ισορροπίας και οι συνισταμένες προσεγγίσεις των μεγεθών τους θα δικαιολογούν την παράλειψή τους στην κατάσταση διαρροής.

Εφόσον έχουμε υποθέσει ότι το υλικό θα είναι απόλυτα πλαστικό, η συμπεριφορά του περιγράφεται ως εξής [4]:

$$\begin{aligned}
 d\beta/dt &= 0 \text{ αν } |M| < M_0 \\
 d\beta/dt &\geq 0 \text{ αν } M = M_0 \\
 d\beta/dt &\leq 0 \text{ αν } M = -M_0 \\
 |M| &\leq M_0
 \end{aligned} \tag{1}$$

Όπου:

$d\beta/dt$: Ρυθμός σχετικής περιστροφής του τμήματος του σωλήνα

M_0 : Σημείο διαρροής ανά μονάδα μήκους του σωλήνα

Επειδή το μήκος του σωλήνα είναι πολύ μεγαλύτερο από το πάχος του, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η παραμόρφωση του επιπέδου υπάρχει στα τμήματα που έχουν μετακινηθεί αρκετά από τα άκρα του σωλήνα. Στην περίπτωση αυτή για το M_0 ισχύει [4]:

$$M_0 = \frac{1}{2} \sigma_0 h^2 / a \tag{2}$$

Όπου:

$a=2$ ή $a=\sqrt{3}$ στην κατάσταση διαρροής για το κριτήριο του Tresca ή Mises αντίστοιχα

σ_0 : Τάση διαρροής

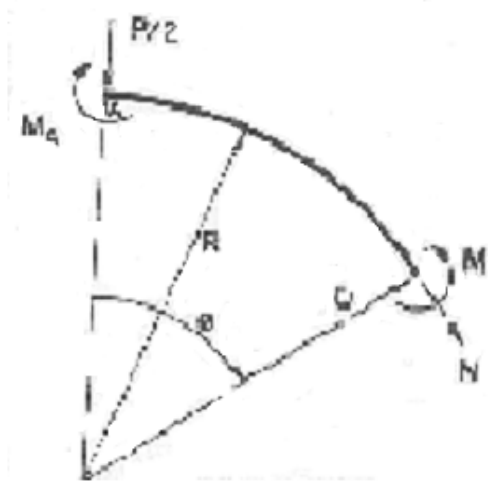
h : Πάχος σωλήνα

Οι παραμορφώσεις που θα επεξεργαστούμε να είναι μεγάλες και οι αναμενόμενες γεωμετρικές αλλαγές θα ληφθούν υπόψη στην ανάλυση.

Υποθέτουμε ότι το ποσοστό της φόρτισης είναι αρκετά μικρό ώστε οι δυναμικές επιδράσεις να θεωρηθούν αμελητέες. Επιπλέον θα αγνοήσουμε οποιαδήποτε αντίσταση τριβής μεταξύ των πλακών και του σωλήνα.

1.2.1 Αρχική διαρροή

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο σε κατάσταση ισορροπίας είναι οι ακόλουθες [4]:



Σχήμα 1.2. Ισορροπία [4]

$$\begin{aligned}
 N &= -\frac{1}{2} P \sin \varphi \\
 Q &= \frac{1}{2} P \cos \varphi \\
 M &= M_A - \frac{1}{2} PR \sin \varphi
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Όπου:

N: Τάσεις

Q: Διατμήσεις

M: Συνισταμένες ροπής

Για την ελαστική περιοχή το M_A ισούται με:

$$M_A = PR / \pi \tag{4}$$

Άρα στην ελαστική περιοχή το M δίνεται από τον τύπο:

$$M = (PR/\pi)(1 - \frac{1}{2} \pi \sin \varphi) \tag{5}$$

Η μέγιστη απόλυτη ροπή είναι η M_A . Έτσι βάσει της εξίσωσης (4), ο σωλήνας είναι πλαστικός παντού υπό την προϋπόθεση ότι ισχύει:

$$P < P_1 \equiv \pi M_0 / R$$

(6)

Όμως ο σχηματισμός των αρμών στο σημείο A δεν μετατρέπει τον σωλήνα σε μηχανισμό διότι μπορεί να δεχθεί κι άλλη φόρτιση. Συνεπώς πρέπει να εγκαταλείψουμε τη λογική περί ελαστικότητας που μας οδήγησε στην εξίσωση (4) και να αντικαταστήσουμε την εξίσωση (4) από τη σχέση:

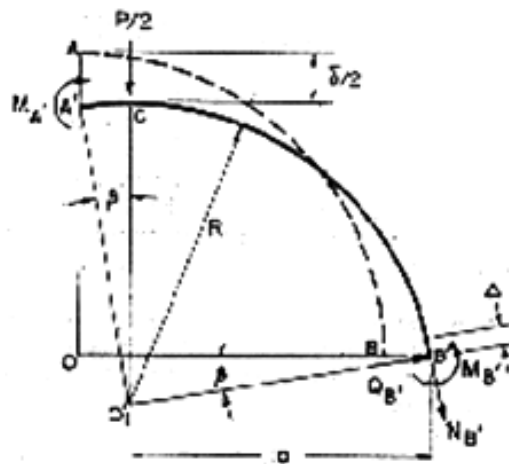
$$M_A = M_0 \text{ για } P \geq P_1 \quad (7)$$

Έστω τώρα σε κάθε σημείο η ροπή ισούται με:

$$M = M_0 - \frac{1}{2} P R \sin \varphi \quad (8)$$

Παρατηρούμε ότι η M είναι η μονοτονική συνάρτηση της φ . Επομένως η μέγιστη αρνητική τιμή που λαμβάνει η M είναι για $\varphi = \pi/2$. Άρα το φορτίο P_0 στο σημείο διαρροής θα είναι τέτοιο ώστε να προκύπτει $M(\pi/2) = -M_0$. Από την εξίσωση (8) συνεπάγεται ότι:

$$P_0 = 4M_0 / R \quad (9)$$



Σχήμα 1.3. Γεωμετρία και ισορροπία μετά το όριο διαρροής [4], [14]

Για $P = P_0$ ο σωλήνας μπορεί να αρχίσει να παραμορφώνεται σαν μηχανισμός, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3. Είναι φανερό ότι οι ασυνέχειες στην κλίση που παρουσιάζονται και στους δύο αρμούς βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με την εξίσωση (1), οπότε αυτή η λύση είναι πλήρης. Ας σημειωθεί ότι μετά από την αρχική διαρροή το σημείο A μετακινείται προς τα κάτω πιο γρήγορα από τα σημεία που

βρίσκονται κοντά σε αυτό, όπως για παράδειγμα το C. Για τον λόγο αυτό το σημείο όπου ασκείται το φορτίο μετατοπίζεται εκτός του κατακόρυφου άξονα συμμετρίας.

Η εξίσωση (9) ορίστηκε για πρώτη φορά από τους Dyrbye και Lange Hansen.

1.2.2. Συμπεριφορά μετά το όριο διαρροής

Μόλις αρχίσει η διαρροή του σωλήνα η δομή του ενός τεταρτημορίου είναι αυτή που αναπαρίσταται με τη συνεχή καμπύλη γραμμή στο Σχήμα 1.3. Από την κατάσταση της ισορροπίας προκύπτει ότι [15]:

$$\begin{aligned} N_B' &= -\frac{1}{2} P \cos\beta \\ Q_B' &= \frac{1}{2} P \sin\beta \end{aligned} \quad (10)$$

$$M_B' = M_A' - \frac{1}{2} Pa$$

Εντούτοις απαιτούμε να είναι τα σημεία A' και B' αρμοί διαρροής, οπότε θα ισχύουν: $M_A' = M_0$ και $M_B = -M_0$. Το απαιτούμενο φορτίο προκειμένου να προκληθεί η διαρροή υπολογίζονται ως εξής:

$$P = 4M_0/a \quad (11)$$

Το a ορίζεται, όπως βλέπουμε και από το Σχήμα 1.3, ως:

$$a = \frac{1}{2} d \cos\beta \quad (12)$$

$$\delta = d \sin\beta$$

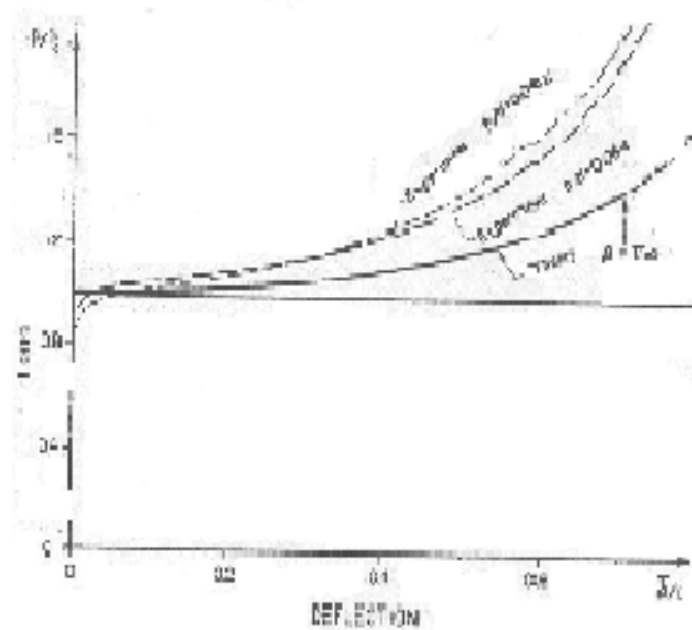
$$d = 2R$$

Άρα:

$$a = \frac{1}{2} d [1 - (\delta/d)^2]^{1/2} \quad (13)$$

Από τις εξισώσεις (9) και (11) προκύπτει:

$$P = P_0 / [1 - (\delta/d)^2]^{1/2} \quad (14)$$



Σχήμα 1.4. Θεωρητικές και πειραματικές καμπύλες φορτίου – απόκλισης [4]

Η πιο έντονη καμπύλη του Σχήματος 1.4 έχει προκύψει από τη σχέση (14).

Η εξίσωση (14) ισχύει έως να συμπέσουν τα σημεία Α' που βρίσκονται στην κορυφή και το κάτω μέρος του σωλήνα. Όταν αυτό συμβεί, θα έχουμε:

$$\begin{aligned}\beta &= \pi/4 \\ \delta &= d/\sqrt{2} \\ P &= P_0\sqrt{2}\end{aligned}\tag{15}$$

Στο το Σχήμα 1.3 φαίνεται ότι η ροπή έχει σταθερή τιμή M_0 κατά μήκος του τόξου Α'C, οπότε σύμφωνα με την εξίσωση (1) δεν είναι αναγκαίο να συγκεντρώνεται ο αρμός διαρροής στο Α'. Η έλλειψη της μοναδικότητας που παρουσιάζεται στο $M = M_0$ είναι τυπική όταν εξιδανικεύουμε ένα τελείως πλαστικό υλικό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παραδοχή μόνο σε ένα πραγματικό μοντέλο. Βέβαια τα πειραματικά αποτελέσματα που θα αναπτύξουμε πιο κάτω δείχνουν ότι είναι πιθανός ορθότερο να δεχθούμε ότι η μεγαλύτερη διαρροή λαμβάνει χώρα στο σημείο Α' ή πολύ κοντά σε αυτό.

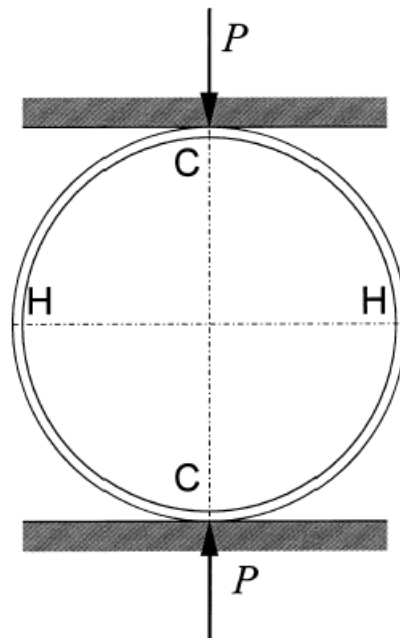
Σε κάθε περίπτωση η έλλειψη της μοναδικότητας επηρεάζει αποκλειστικά και μόνο το σχήμα του τόξου Α'C, επειδή οι εξισώσεις (10) και (12) δεν εξαρτώνται από τις λεπτομέρειες του σχήματος. Αν όμως ο αρμός καταναμηθεί στο Α'C, τότε το όριο της εξίσωσης (15) μπορεί να ξεπεραστεί λίγο.

Από την εξίσωση (11) συνάγουμε το συμπέρασμα ότι η ελάττωση του μοχλοβραχίονα α προκαλεί την αύξηση του φορτίου καθώς ο σωλήνας συμπιέζεται. Η αυξομείωση εξαρτάται από το σχήμα των πλακών που συμπιέζουν τον σωλήνα και θα διέφερε αν για παράδειγμα αυτός συμπιέζονταν από άκαμπτους κυλίνδρους. Συγκεκριμένα αν το φορτίο ασκούνταν με τρόπο ώστε να παρέμενε πάντα στο σημείο Α', το α θα ξεκινούσε να αυξάνεται μετά την αρχική διαρροή, οπότε θα

μειώνονταν η τιμή του φορτίου P , γεγονός που θα σήμαινε άμεση κατάρρευση του σωλήνα. Αυτή θα μπορούσε να συμβεί αν ο σωλήνας φορτιζόταν από δύο αιχμηρές ακμές. Στην περίπτωση αυτή το φορτίο αρχικής διαρροή P_0 θα εξακολουθούσε να προκύπτει από την εξίσωση (9) και θα συμβόλιζε τη μέγιστη δυνατότητα φόρτισης.

1.2.3. Αναλυτικά μοντέλα

Η συμπεριφορά ενός κυκλικής διατομής λεπτότοιχου σωλήνα, που συμπιέζεται πλευρικά μεταξύ δύο άκαμπτων, επίπεδων παράλληλων πλακών, στο αρχικό στάδιο απεικονίζεται στο Σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5. Σχηματική απεικόνιση πλευρικής φόρτισης σωλήνα [17]

Τα πρώτα σημεία επαφής βρίσκονται στα άκρα της διαμέτρου CC και το τοίχωμα του σωλήνα συμπεριφέρεται σαν κυκλικό τόξο, που παραμορφώνεται ελαστικά. Όσο το φορτίο τείνει προς την κρίσιμη τιμή, ξεκινά η πλαστική ροή: το πρώτο ζεύγος πλαστικών αρμών δημιουργείται στα τμήματα CC και σε μικρό χρονικό διάστημα ένα δεύτερο ζεύγος εμφανίζεται στα άκρα της διαμέτρου HH . Από τώρα και στο εξής οι μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερες και η απόσταση μεταξύ των πλακών μειώνεται προοδευτικά. Οι πλαστικές περιοχές επεκτείνονται στο τοίχωμα του σωλήνα και οι ζώνες επαφής αυτών των τοίχων γίνονται σχεδόν επίπεδες, ενώ προκαλείται κάμψη πέριξ των σημείων HH .

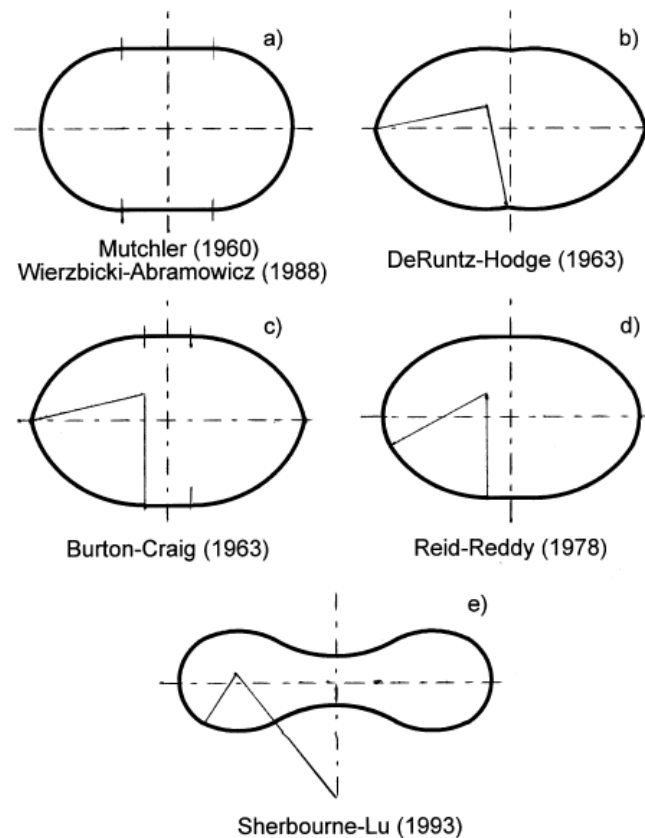
Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές θεωρητικές μελέτες σχετικά με την κατάρρευση και κάθε μια από αυτές αφορά σε διαφορετικό τύπο αναλυτικών μοντέλων. Θα αναφερθούμε στις ακόλουθες:

- a) Mutchler [3] και Wierzbicki, Abramowicz [7]
- b) DeRuntz και Hodge [4], [16]
- c) Burton και Craig [8], [16]

d) Reid και Reddy [6]

e) Sherbourne και Lu [9]

Οι παραμορφώσεις που προέκυψαν από τις μελέτες τους παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.6.

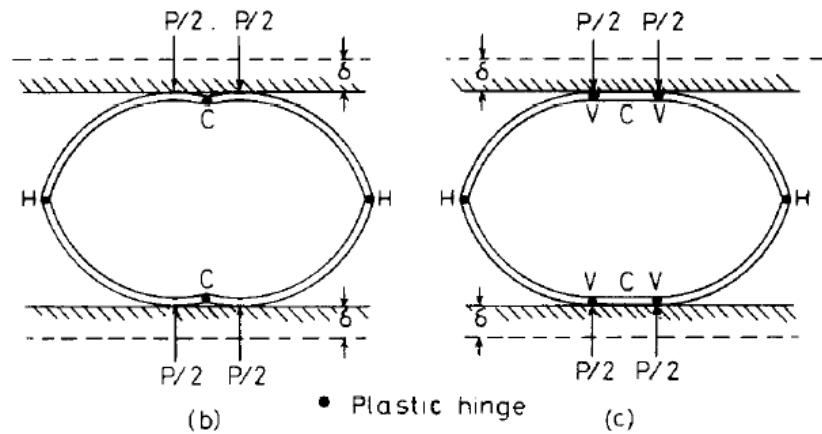


Σχήμα 1.6. Θεωρητικά μοντέλα πλευρικής συμπίεσης κυλινδρικών σωλήνων [17]

Από το Σχήμα 1.6 προκύπτει το συμπέρασμα ότι υπάρχουν δύο κοινά χαρακτηριστικά σε όλα τα μοντέλα. Πρώτον, η μέση γραμμή της διατομής θεωρείται καμπύλη δοκός που υφίσταται λυγισμό και έτσι προκύπτει ένα μονοδιάστατο πρόβλημα. Δεύτερον η ελαστική συμπεριφορά είναι αμελητέα και λαμβάνεται υπόψη μόνο η πλαστική παραμόρφωση.

Οι διαφορές που παρουσιάζουν τα μοντέλα μεταξύ τους είναι οι ακόλουθες:

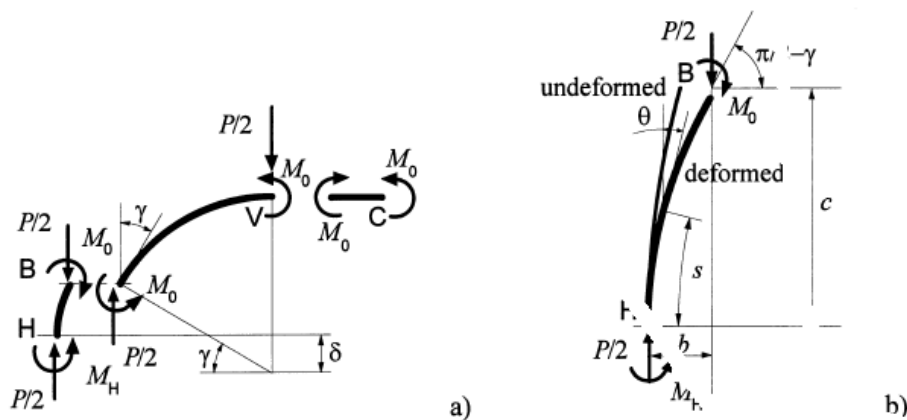
- Υπάρχουν ασυνέχειες κατά την περιστροφή των πλαστικών αρμών σε δύο ή τέσσερα σημεία [μοντέλα (b) και (c)] ή παραμορφωμένα σχήματα με λείες όψεις [μοντέλα (a), (d) και (e)]. Στο Σχήμα 1.7 οι αρμοί των μοντέλων (b) και (c) είναι περισσότερο εμφανείς.



Σχήμα 1.7. (b) Μοντέλο DeRuntz και Hodge, (c) Μοντέλο Burton και Craig [9]

- Στο μοντέλο (a) το παραμορφωμένο προφίλ σχηματίζεται από δύο κυκλικά τόξα, των οποίων η ακτίνα μειώνεται προοδευτικά κατά την συμπίεση. Αυτά τα τόξα ενώνονται με ευθεία τμήματα. Στο μοντέλο (e) εντοπίζεται παραμόρφωση σε όλα τα τεταρτημόρια και διαμορφώνονται τρία κυκλικά τόξα. Συνεπώς και στις δύο αυτές περιπτώσεις το υλικό υφίσταται πλαστική παραμόρφωση παντού.
- Στα μοντέλα (a), (c) και (d) μέρη των τοιχωμάτων του σωλήνα γίνονται επίπεδα εξ' αιτίας της επαφής τους με τις πλάκες. Στο μοντέλο (b) ο σωλήνας παραμορφώνεται σαν μηχανισμός (τα τέσσερα κυκλικά τόξα διατηρούν την αρχική ακτίνα τους) και συμβαίνει πλαστική παραμόρφωση μόνο στους αρμούς. Επιπλέον στο μοντέλο (e) δεν υπάρχουν επίπεδα τμήματα.
- Για τα μοντέλα (d) και (e) πρέπει να συνυπολογιστεί η εργοσκήληρυνση του υλικού, κάτι που δεν θα ληφθεί υπόψη στα υπόλοιπα.

Στη δική μας περίπτωση, όπως θα δούμε πιο κάτω, ταιριάζει το μοντέλο DeRuntz-Hodge. Η πρόταση των Reid και Reddy αφορά στο πιο εξελιγμένο μοντέλο και τα αποτελέσματα είναι περισσότερο ικανοποιητικά από απόψεως περιγραφής του πεδίου εκτατικής παραμόρφωσης, διότι καθιστά εφικτή τη συνεχή διακύμανση των καμπυλοτήτων σε όλη την επιφάνεια.



Σχήμα 1.8. Μοντέλο Reid – Reddy: (a) δυνάμεις κα ροπές που ασκούνται σε ένα τεταρτημόριο, (b) παραμορφωμένο σχήμα του τμήματος BH. [14], [17]

Σύμφωνα με την υπόθεσή τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8, σε κάθε τεταρτημόριο του σωλήνα υπάρχει ένα μη παραμορφωμένο κυκλικό τόξο BV μεταξύ των τμημάτων CV και BH, στο οποίο το υλικό παραμορφώνεται πλαστικά. Η περιοχή CV γίνεται επίπεδη πάνω στη φορτισμένη πλάκα και αντιστέκεται στην συνεχή καμπτική ροπή που ασκείται ανά μονάδα αξονικού μήκους $M_0 = \sigma_0 t^2 / 4$, όπου:

t : Πάχος τοιχώματος

σ_0 : Τάση διαρροής

Το τμήμα BH βρίσκεται υπό πλαστική κάμψη και η καμπυλότητα προοδευτικά αυξάνεται διατηρώντας το αρχικό κυκλικό σχήμα.

Για την εργοσκήρυνση γίνεται χρήση της ακόλουθης εξίσωσης:

$$k = (M - M_0) / E_p I \quad \text{για } M \geq M_0 \quad \text{και} \quad k = 0 \quad \text{για } M < M_0 \quad (16)$$

k : Οι μεταβολές της καμπυλότητας του προφίλ

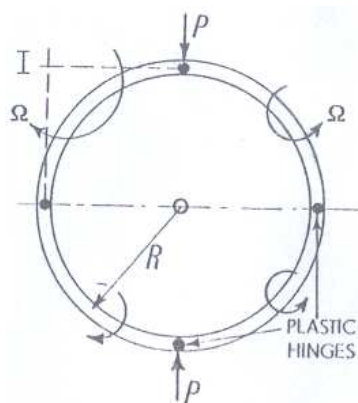
M : Καμπτική ροπή που ασκείται κατά τη μονάδα αξονικού μήκους

E_p : Εφαπτόμενη του μεγέθους της εργοσκήρυνσης (θεωρούμε υλικά άκαμπτο και γραμμική εργοσκήρυνση)

Για τη ροπή αδράνειας ανά μονάδα μήκους άξονα ισχύει: $I = t^3 / 12$. Το τόξο BH έχει σχεδιαστεί σαν καμπυλόγραμμη δοκός υπό το φορτίο $P/2$ [Σχήμα 1.8 (b)] και τις ροπές M_H και M_0 στα άκρα της.

1.2.4. Η θεωρία των πλαστικών αρμών σε κυκλικές διατομές

Ένας κυκλικός δακτύλιος μέσης ακτίνας R , που δεν είναι πολύ λεπτός ούτε πολύ εύκαμπτος, όταν φορτίζεται από διαμετρικό φορτίο P , θα οδηγηθεί σε πλαστική κατάρρευση μόνο εφόσον έχουν σχηματισθεί τέσσερις αρμοί, οι οποίοι θα του επιτρέψουν να συμπεριφέρεται σαν μηχανισμός (Σχήμα 1.9).



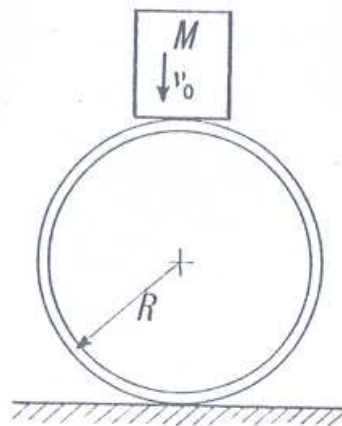
Σχήμα 1.9. Σωλήνας κυκλικής διατομής πριν την πλαστική κατάρρευση [5]

Αναμένεται η εμφάνιση των πλαστικών αρμών στις θέσεις που εφαρμόζονται οι μέγιστες ελαστικές καμπτικές ροπές. Είναι φανερό ότι αν το κέντρο του δακτυλίου O παραμένει σταθερό, τότε κατά την κατάρρευση τα τέσσερα άκαμπτα τμήματα που βρίσκονται μεταξύ των αρμών, περιστρέφονται με γωνιακή ταχύτητα Ω γύρω από το στιγμιαίο κέντρο I και οι δυνάμεις P κινούνται προς το κέντρο του δακτυλίου με ταχύτητα $R \cdot \Omega$. Άρα το ποσοστό του έργου κατά την είσοδο είναι $2P \cdot R \cdot \Omega$ και το ποσοστό του πλαστικού έργου απωλειών είναι $8M_p \cdot \Omega$. Έτσι έχουμε [5]:

$$2P \cdot R\Omega = 8M_p \cdot \Omega \implies P = 4M_p/R \quad (17)$$

Στην περίπτωση που μία μεγάλη μάζα M κινούμενη με χαμηλή ταχύτητα v_0 συγκρουσθεί με κυκλικό δακτύλιο μικρής μάζας διαμέτρου D , στηριζόμενου σε επίπεδη πλάκα, η επίδραση της αδράνειας στο δακτύλιο μπορεί να παραληφθεί. Τότε όλη η κινητική ενέργεια της μάζας χρησιμοποιείται για την πλαστική παραμόρφωση του κυλίνδρου. Η διαμετρική συμπίεση ΔD , δεδομένου ότι η ποσότητα $\Delta D/D$ δίνεται από [5]:

$$4M_p \Delta D / (D/2) = \frac{1}{2} M v_0^2 \quad \text{ή} \quad \Delta D = M v_0^2 D / 16M_p \quad (18)$$



Σχήμα 1.10. Πρόσκρουση μάζας M με δακτύλιο διαμέτρου D . [5]

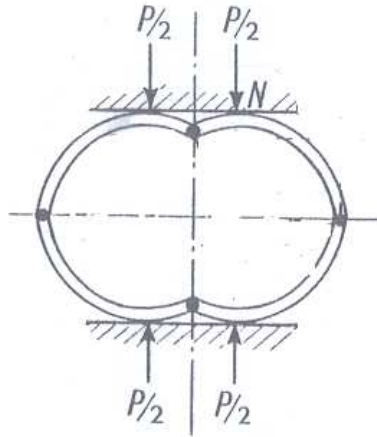
Η επιβράδυνση της μάζας M είναι P/M , ο χρόνος πλαστικής πρόσκρουσης είναι $Mv_0/P = Mv_0R/4M_p$ και η αυξομειώση της πίεσης που ασκείται στον δακτύλιο θα γίνει της τάξεως δευτέρου βαθμού.

Πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έχουν δείξει ότι προκειμένου να μην εμποδιστεί η κυματική μετάδοση της τάσης και άλλων μορφών απώλειας ενέργειας, είναι θεμιτό να υποθέσουμε ότι το 85% της διαθέσιμης κινητικής ενέργειας χρησιμοποιείται για την παραγωγή πλαστικού έργου.

Όταν η οιοσδήποτε στατική κρούση ενός δακτυλίου, που συμβαίνει μεταξύ άκαμπτων, παράλληλων επιφανειών είναι συνεχόμενη, τότε προφανώς το κρουστικό φορτίο αυξάνεται με τη μείωση της κάθετης διαμέτρου του δακτυλίου. Μία ένδειξη της δύναμης σε σχέση με την αναμενόμενη κατακόρυφη μετατόπιση φαίνεται στο Σχήμα 1.11. Οι αρχικοί τέσσερις πλαστικοί αρμοί δημιουργούνται μεν, αλλά το σημείο ή τα σημεία εφαρμογής του φορτίου που συμπίεζει τον δακτύλιο διαιρούν το φορτίο σε $P/2$. Κάθε τεταρτημόριο του δακτυλίου υποτίθεται ότι περιστρέφεται ενώ εξακολουθεί να είναι άκαμπτο.

Δουλεύοντας όπως παραπάνω, για το τεταρτημόριο προκύπτει ότι [5]:

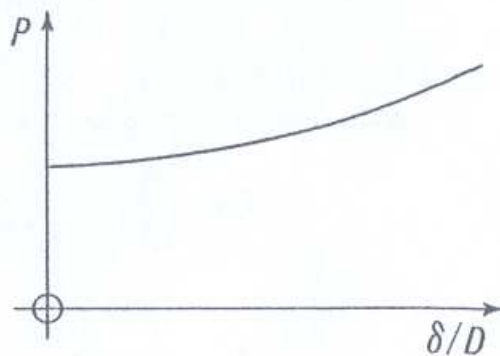
$$P \cdot NI \cdot \Omega = 2M_p \cdot \Omega \quad \text{ή} \quad P = 4 M_p / NI \quad (19)$$



Σχήμα 1.12. Κατάρρευση κυκλικού δακτυλίου που συμπιέζεται από άκαμπτες, παράλληλες πλάκες. [2],[5]

Συμβολίζουμε με δ τη συνολική μετατόπιση των τοιχωμάτων του σωλήνα: $NI^2 = (D^2 - \delta^2) / 4$, οπότε [5]:

$$P / (4M_p / R) = 1 / [1 - (\delta/D)^2]^{1/2} \quad (20)$$



Σχήμα 1.13. [5]

Η καμπύλη που αντιστοιχεί στη εξίσωση (20), φαίνεται στο Σχήμα 1.13 και ισχύει για $0 \leq \beta \leq \pi/4$. Αν λάβουμε υπόψη την δύναμη της τριβής $\mu P/2$ οι εξισώσεις (19) και (20) λαμβάνουν τις ακόλουθες μορφές [5]:

$$(P \cdot NI \cdot \Omega / 2) + (\mu P \cdot MI \cdot \Omega / 2) = 2M_p \cdot \Omega$$

Και

$$(P / 4M_p/R) = 1 / [[1 - (\delta/D)^2]^{1/2} + \mu(1 - \cos\beta)] \quad (21)$$

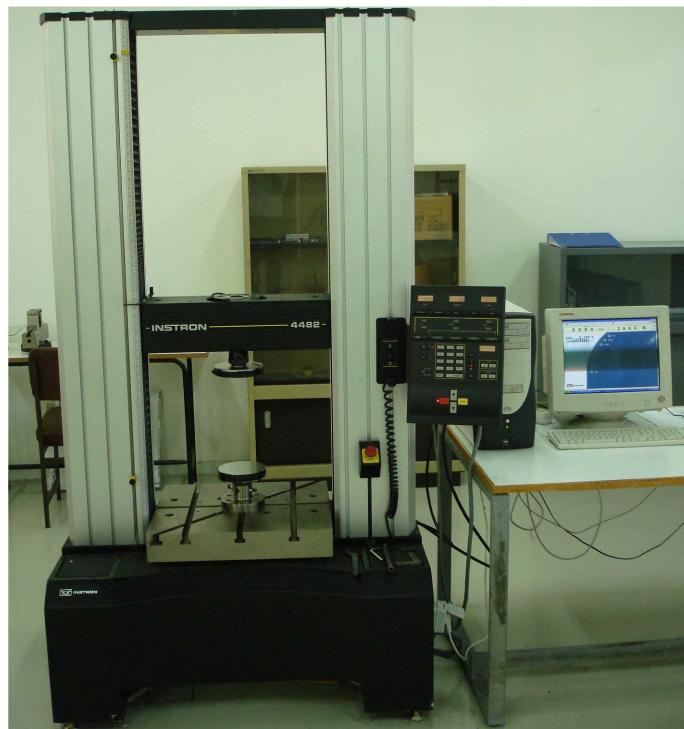
Γενικά η επίδραση της τριβής θα είναι μικρή για κάθε πραγματικό υλικό, όμως η εργοσκήρυνση στους αρμούς θα είναι μεγαλύτερης σημασίας. Για την παραπάνω δοθείσα λύση έχουμε υποθέσει ότι θα σχηματιστούν δύο καμπύλες στο δακτύλιο, η μία στην κορυφή του και η άλλη στο κάτω μέρος κοντά στις πλάκες που τον συμπιέζουν, όπως προέκυψε από πειράματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η πλευρική θλίψη των ευθύγραμμων λεπτότοιχων σωλήνων κυκλικής διατομής πραγματοποιήθηκε στη μηχανική πρέσα (κοχλία) δοκιμών INSTRON 4482 ονομαστικού φορτίου 100 kN (10 tn) του εργαστηρίου του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων η ταχύτητα συμπίεσης του εμβόλου ήταν ίση με 10mm/min.



Σχήμα 2.1. Μηχανική πρέσα ονομαστικού φορτίου 100kN

Μετρήθηκε και καταγράφηκε η ελάττωση του μεγέθους των δοκιμίων καθώς και η διακύμανση του φορτίου, κάνοντας χρήση του συνεργαζόμενου λογισμικού καταγραφής και ανάλυσης δεδομένων, σε συνδεδεμένο Η/Υ.

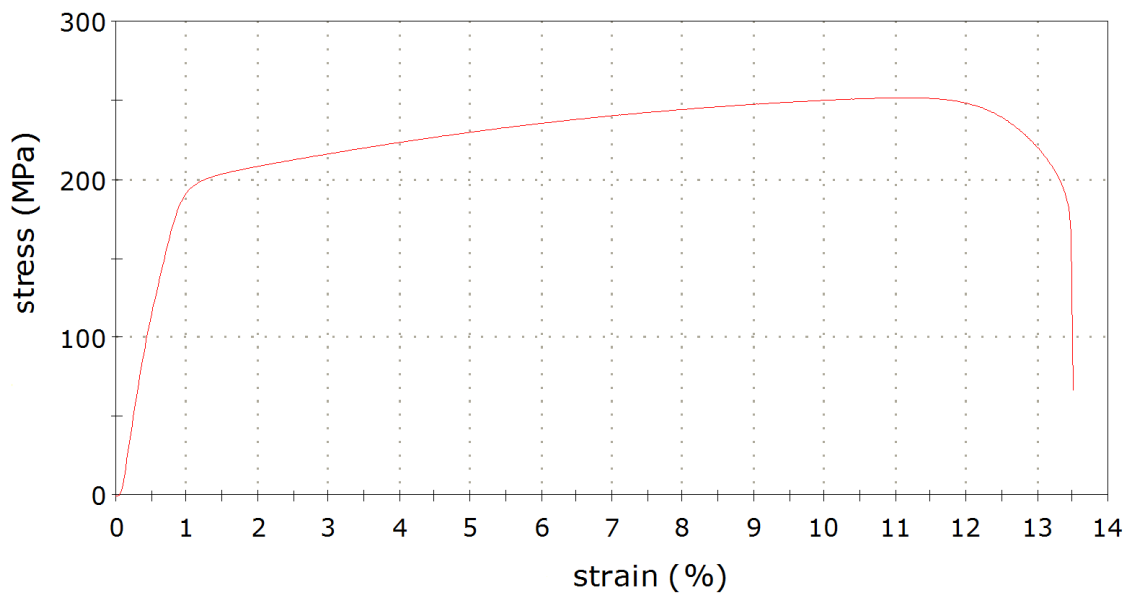
Επίσης καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας των πειραμάτων με μηχανή δοκιμών λαμβάνονταν φωτογραφίες, προκειμένου να καταστεί δυνατή η απεικόνιση και η καλύτερη περιγραφή της καταπόνησης των δοκιμίων σε διαφορετικές φάσεις.

Τα δοκίμια είναι αλουμινένια και για την κατασκευή τους χρειάστηκε να κοπούν λεπτότοιχοι σωλήνες κυκλικής διατομής.

Για την εξαγωγή των ιδιοτήτων του αλουμινίου ως υλικού κατασκευής των δοκιμίων μας, διενεργήθηκε πείραμα εφελκυσμού στη μηχανή δοκιμών με ταχύτητα φόρτισης 10mm/min. Το δοκίμιο είχε πλάτος 15.9 mm, πάχος 1.80 mm και ενεργό μήκος 45.50 mm. Στο Σχήμα 2.2. φαίνεται το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης (μηχανικών – engineering) του υλικού.

Επιπλέον χαρακτηριστικές ιδιότητες του υλικού είναι οι εξής:

- Μέτρο ελαστικότητας $E = 70000 \text{ MPa}$
- Πυκνότητα $\rho = 2.7 \text{ gr/cm}^3$
- Λόγος Poisson $\nu = 0.30$
- Αρχικό όριο διαρροής $\sigma_y = 192 \text{ MPa}$



Σχήμα 2.2. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης αλουμινίου

Από το Σχήμα 2.2. προκύπτουν τα παρακάτω ζεύγη τιμών Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (επιλέχθηκαν για να ενσωματωθούν στην μοντελοποίηση του υλικού στον κώδικα LS-DYNA):

Τάση σ (MPa)	Παραμόρφωση e
192	0
200	0.0055
207	0.021
225	0.075
240	0.127
247	0.170
250	0.216

Κάνοντας χρήση των τύπων: $\varepsilon = \ln(1+e)$ και $\sigma_t = \sigma(1+e)$ τα ζεύγη τιμών μετατρέπονται στις αντίστοιχες πραγματικές (true) τιμές, όπως ορίζει ο κώδικας.

Πραγματική Τάση ε (mm)	σ_t (MPa)
192	0
201.1	0.0055
211.3	0.020
241.9	0.0723
270.5	0.1196
289	0.157
304	0.1956

Σχήμα 2.3. Ζεύγη τιμών Τάσης – Παραμόρφωσης (πραγματικές)

Κατά τη μοντελοποίηση με τον κώδικα LS-Dyna της κατάρρευσης των δοκιμών δίνουμε τα παραπάνω ζεύγη τιμών κατά απόλυτη τιμή και ορίζουμε σταθερή ταχύτητα πρόωσης του εμβόλου: $v = -1$ mm/msec με φορά προς τα κάτω (στα αρνητικά του άξονα Z). Η ταχύτητα φόρτισης κατά την προσομοίωση ορίστηκε μεγαλύτερη, προκειμένου η ανάλυση να ολοκληρωθεί σε εύθετο χρόνο (explicit κώδικας), χωρίς ωστόσο να λαμβάνουν χώρα ανεπιθύμητα αδρανειακά φαινόμενα.

2.2. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ LS-DYNA 3D

Για την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα LS DYNA 3D, που διαθέτει το εργαστήριο του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών στο κτίριο Ξ. Πρόκειται για EXPLICIT κώδικα πεπερασμένων στοιχείων που ειδικεύεται στην ανάλυση μη γραμμικών δυναμικών τρισδιάστατων προβλημάτων (προβλήματα πλαστικής παραμόρφωσης). Η εταιρία κατασκευής είναι η LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, και η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε ήταν η 970.

2.2.1. Διακριτοποίηση και δημιουργία του μοντέλου

Δύο είναι τα βασικά μέρη του προγράμματος που συντελούν στη μοντελοποίηση. Αρχικά χρησιμοποιούμε τον `preprocessor` του προγράμματος για την κατασκευή του μοντέλου μας, ο οποίος προέρχεται από την εταιρεία ETA, η τρέχουσα έκδοση του οποίου είναι η 28.

Για τη δημιουργία του μοντέλου ορίζουμε πλήρως τη γεωμετρία του δίνοντας τις ακριβείς διαστάσεις. Στη συνέχεια δηλώνεται το υλικό ή τα υλικά από τα οποία αποτελείται μαζί με τις φυσικές ή τις μηχανικές τους ιδιότητες. Ακολουθεί η διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία και προκειμένου να πραγματοποιηθεί η διακριτοποίηση χρειάζεται να δηλωθούν οι ιδιότητες των πεπερασμένων στοιχείων. Ύστερα ορίζονται οι διεπιφάνειες μεταξύ των σωμάτων που πρόκειται να έρθουν σε επαφή κατά την εξέλιξη της προσομοίωσης, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα εισχώρησης ενός τμήματος του μοντέλου εντός του άλλου. Τέλος προσδιορίζονται τα εξωτερικά του φορτία καθώς και οι αρχικές συνθήκες, όπως είναι η αρχική ταχύτητα, η αρχική επιτάχυνση κλπ.

Επιλέχθηκαν δοκίμια κυκλικής διατομής και διαμέτρων (εσωτερική x εξωτερική) 28x30, 27x30, 19x25, 13x20 με το μήκος τους να είναι 60 mm, 50 mm και 40 mm αντίστοιχα. Επιλέχθηκε πλέγμα τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων (*Solid Elements*) για όλα τα δοκίμια εκτός από το 28x30, για το οποίο επιλέξαμε δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία (*Shell Elements*) με μέση ακτίνα 29 mm, λόγω του ιδιαίτερα λεπτού πλέγματος. Για τα *solid* στοιχεία επιλέχθηκε η διατύπωση (*formulation*) 2 και για τα *shell* στοιχεία η διατύπωση 6 για αποτελεσματικότερη απόδοση απόδοσης της παραμόρφωσης των κελυφών.

Η πυκνότητα της διακριτοποίησης είναι σημαντική για να δίνει σωστά αποτελέσματα το πρόγραμμα, αλλά και για να μην χρειάζεται μεγάλος χρόνος επίλυσης. Αρχικά δεδομένου του είδους της καταπόνησης, η οποία είναι πλευρική και της αναμενόμενης παραμόρφωσης, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί σχετικά πυκνό πλέγμα σε όλο το μήκος του δοκιμίου.

Επιπλέον εισάγονται στον κώδικα τα ζεύγη τιμών τάσης –παραμόρφωσης του Σχήματος 2.3. και ορίζουμε σταθερή ταχύτητα πρόωσης του εμβόλου: $v = -1\text{mm/msec}$ με φορά προς τα κάτω, δηλαδή στα αρνητικά του άξονα Z.

Ο τύπος του υλικού με το οποίο μοντελοποιήθηκε το αλουμίνιο ήταν το MAT_24 (PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY). Η ακίνητη πλάκα καθώς και το κινούμενο έμβολο (σε σχήμα πλάκας) μοντελοποιήθηκαν με απαραμόρφωτο υλικό MAT 20 (RIGID) και γι' αυτό δεν διακριτοποιήθηκαν, αλλά θεωρήθηκε ότι αποτελούνται από ένα και μόνο οκτακομβικό στοιχείο *solid element*.

Για την προσομοίωση ορίσαμε τις εξής διεπιφάνειες επαφής / αλληλεπίδρασης μεταξύ των τμημάτων του εκάστοτε μοντέλου:

A) Δοκίμια διαστάσεων 19x25, 13x20, 27x30 και 28x30 σε διάταξη σταυρού (2 δοκίμια τοποθετημένα κάθετα επάνω σε άλλα δύο δοκίμια), 27x30 σε διάταξη σταυρού (1 δοκίμιο τοποθετημένο κάθετα επάνω σε άλλο δοκίμιο), 27x30 σε διάταξη σταυρού (1 δοκίμιο τοποθετημένο κάθετα επάνω σε δύο δοκίμια).

1. Διεπιφάνεια επαφής μεταξύ της κάτω επιφάνειας της άνω πλάκας και των κελυφών (`surface_to_surface`).

2. Διεπιφάνεια επαφής μεταξύ της άνω επιφάνειας της κάτω πλάκας και των κελυφών (surface_to_surface).

3. Διεπιφάνεια επαφής μεταξύ των επιμέρους κελυφών της κάθε διάταξης καθώς και μεταξύ των τμημάτων του ίδιου κελύφους (self contact) κατά την εξέλιξη της συμπίεσης / παραμόρφωσης (single_surface).

Σε όλες τις επαφές δόθηκε τιμή συντελεστή στατικής τριβής (FS) ίση με 0,20 και δυναμικής τριβής (FD) ίση με 0,15.

Τα δεδομένα σώζονται από τον preprocessor σε μορφή ψηφιακού αρχείου τύπου *.fmb, στο οποίο βασικά περιέχεται όλο το μοντέλο που θα επιλυθεί με πεπερασμένα στοιχεία από το LS-DYNA και μπορούμε ανά πάσα στιγμή να επέμβουμε και να το τροποποιήσουμε εκ νέου τη γεωμετρία και τα υπολογιστικά στοιχεία για τον κώδικα του προγράμματος. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα εκτός από αρχεία μορφής *.fmb, να εξαχθούν και αρχεία τύπου *.dgn. Αυτού του είδους το αρχείο μπορεί να ανοιχτεί από οιονδήποτε editor (πχ Notepad) και ως εκ τούτου να τροποποιηθεί από τον χρήστη. Περιέχει σε μορφή καρτών όλα τα στοιχεία που εισάγονται στον κώδικα του για την προσομοίωση της πλευρικής κατάρρευσης της κάθε διατομής. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη γιατί γλιτώνει τον χρήστη από επίπονη διαδικασία, όταν επιθυμεί αυτός να πραγματοποιήσει σχετικά απλές αλλαγές, που μπορούν να γίνουν μέσα από τον editor χωρίς να είναι απαραίτητη η εργασία στο περιβάλλον του pre-processor από το αντίστοιχο αρχείο *.fmb.

Το αρχείο *.dgn είναι αυτό που στη συνέχεια επεξεργάζεται το πρόγραμμα για την επίλυση του προβλήματος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο SOLVER του LS-DYNA, που αποτελεί και το κύριο τμήμα του πακέτου του λογισμικού. Όταν η επίλυση ολοκληρωθεί, το πρόγραμμα παρουσιάζει τα απαραίτητα αρχεία στα οποία έχουν καταγραφεί τα αποτελέσματα της επεξεργασίας. Τα αρχεία αυτά είναι μορφής *.d3plot και *.graph και χρησιμοποιούνται από τον post-processor (εταιρίας ETA) αντίστοιχα, για να γίνει η εμφάνιση των αποτελεσμάτων στον χρήστη με μορφή γραφημάτων για τις δυνάμεις και τις τάσεις κατά την κατάρρευση των δοκιμίων, αλλά και τα ίδια τα animation, για την ακριβή προσομοίωση της κατάρρευσης των διατάξεων.

Με τα αποτελέσματα που εξάγονται φτιάχνεται το διάγραμμα φορτίου –μετατόπισης (P-s) στον Graph Processor και υπολογίζεται η συνολική απορροφούμενη ενέργεια W, που προκύπτει από το διάγραμμα με ολοκλήρωση:

$$W = \int Pds$$

Ενώ το μέσο μεταελαστικό φορτίο P προκύπτει από την σχέση:

$$P=W/S$$

2.2.2. Διατύπωση Μεγεθών

Οι φυσικές ιδιότητες ενός τρισδιάστατου 3D συνεχούς μέσου περιγράφονται κατά κανόνα σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων x, y, z . Εάν "F" είναι μια συγκεκριμένη ιδιότητα του συνεχούς μέσου (π.χ. μετατόπιση, θερμοκρασία, πίεση κλπ), τότε η συνάρτηση F είναι βαθμωτή και ίση με:

$$F = F(x, y, z)$$

Εάν η ιδιότητα μεταβάλλεται και χρονικά, τότε:

$$F = F(x, y, z, t)$$

Όπου t , ο χρόνος.

Εάν η φυσική ιδιότητα έχει διανυσματικό χαρακτήρα, π.χ. αντιστοιχεί στις μετατοπίσεις u, v και w ενός σημείου "p" στις κατευθύνσεις των αξόνων x, y, z του καρτεσιανού συστήματος, τότε ισχύει:

$$\vec{u} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z, t) \\ v(x, y, z, t) \\ w(x, y, z, t) \end{Bmatrix}$$

όπου \vec{u} είναι το σχετικό διάνυσμα.

Τέλος, εάν οι φυσικές ιδιότητες του σημείου "p" είναι περισσότερες από τον αριθμό των καρτεσιανών συντεταγμένων, όπως π.χ. οι παραμορφώσεις ενός ελαστικού σώματος $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ τότε αυτές περιγράφονται μέσω ενός αντίστοιχου διανύσματος $\vec{\varepsilon}$,

$$\vec{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x(x, y, z, t) \\ \varepsilon_y(x, y, z, t) \\ \varepsilon_z(x, y, z, t) \\ \gamma_{xy}(x, y, z, t) \\ \gamma_{yz}(x, y, z, t) \\ \gamma_{zx}(x, y, z, t) \end{Bmatrix}$$

Η περιγραφή του φυσικού φαινομένου γίνεται, για όλα τα προβλήματα συνεχών μέσων, με βάση την Εξίσωση Συνέχειας, την Καταστατική Εξίσωση και την Εξίσωση Ισορροπίας.

2.2.3. Explicit – Implicit Μέθοδοι Πεπερασμένων Στοιχείων

Το LS-DYNA ([10], [11], [12]), είναι ένας explicit κώδικας πεπερασμένων στοιχείων, που χρησιμοποιεί την μέθοδο της κεντρικής διαφοράς, η οποία απαιτεί για την μετατόπιση U_t , την ταχύτητα \dot{U}_t , και την επιτάχυνση \ddot{U}_t , να ικανοποιούνται οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\ddot{U}_t = \frac{1}{\Delta t^2} (U_{t-\Delta t} - 2U_t + U_{t+\Delta t})$$

$$\dot{U}_t = \frac{1}{2\Delta t} (-U_{t-\Delta t} + U_{t+\Delta t})$$

Όπου το Δt , είναι ένα κατάλληλο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την αριθμητική ολοκλήρωση. Η μέθοδος αυτή λέγεται εξωτερική μέθοδος ολοκλήρωσης (explicit method), επειδή η λύση του $U_{t+\Delta t}$, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ισότητα των συνθηκών σε χρόνο t . Ακριβώς για το λόγο αυτό, αυτό το είδος ολοκλήρωσης δεν απαιτεί κανένα μετασχηματισμό των εξισώσεων, ούτε μετασχηματισμό του μητρώου δυσκαμψίας $\hat{K} = K + a_0 M + a_1 C$, σε επίλυση για βήμα προς βήμα, αφού το μητρώο δυσκαμψίας K , δεν εμφανίζεται σαν παράγοντας για τις απαιτούμενες μετατοπίσεις $U_{t+\Delta t}$ και επομένως, δεν χρειάζεται κανένα ουσιαστικό μητρώο δυσκαμψίας να μετασχηματιστεί.

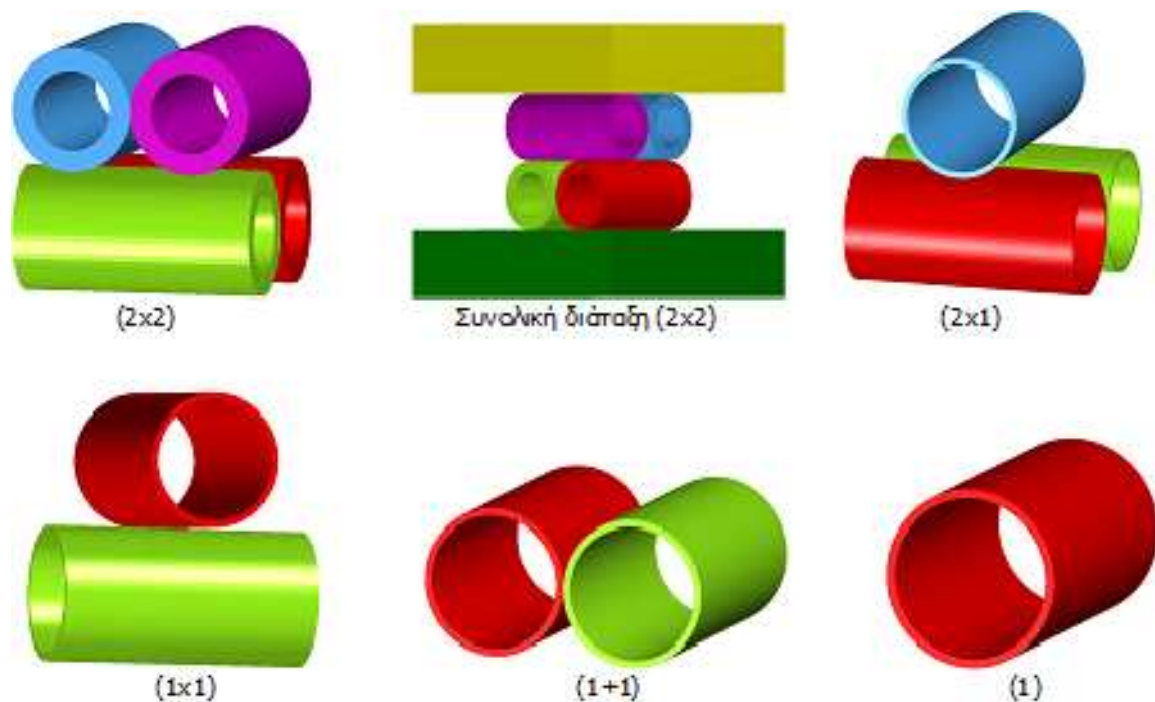
Αντίθετα, το μητρώο μάζας $\hat{M} = a_0 M + a_1 C$, θα διαμορφωθεί κατάλληλα, όπου τα $a_0 = 1/\Delta t^2$, και $a_1 = 1/2\Delta t$, είναι οι κατάλληλες σταθερές ολοκλήρωσης, και θα πρέπει να μεταβληθούν ώστε να υπάρξει λύση για την $U_{t+\Delta t}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τα δοκίμια που μελετώνται είναι όλα σωλήνες κυκλικής διατομής, διαστάσεων 27x30 mm, 28x30 mm, 19x25 mm, και 13x20 mm με μήκος 60 mm (για τους δύο πρώτους) και 50 mm και 40 mm για τους τρίτους και τέταρτους αντίστοιχα. Για τα ανωτέρω κελύφη επιλέχθηκε η διάταξη σταυρού (2 δοκίμια τοποθετημένα κάθετα επάνω σε άλλα δύο δοκίμια), ενώ τα δοκίμια διαστάσεων 27x30 μελετήθηκαν και στις ακόλουθες διατάξεις: διάταξη σταυρού (ένα δοκίμιο κάθετα τοποθετημένο επάνω σε δύο δοκίμια και ένα δοκίμιο κάθετα τοποθετημένο σε άλλο δοκίμιο), δύο παράλληλα τοποθετημένα δοκίμια και τέλος, ένα μοναδικό δοκίμιο. Το μήκος των κελυφών επιλέχθηκε τέτοιο (κατά περίπτωση), ώστε να ισούται με το άθροισμα δύο (εξωτερικών) διαμέτρων στις διατάξεις κάθετα τοποθετημένων (2x1, 2x2) σωλήνων.



Σχήμα 3.1. Διατάξεις δοκιμίων

3.2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

Η προσομοίωση προσεγγίζει την πειραματική διαδικασία. Ωστόσο το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων διαφέρει από το πραγματικό δοκίμιο. Ενώ το περιβάλλον των πεπερασμένων στοιχείων είναι ιδεατό και εξιδανικευμένο, σε πραγματικές συνθήκες συναντάμε ατέλειες, οι οποίες δεν μπορούν να μετρηθούν και πολλές φορές δεν μπορούν να προβλεφθούν. Έτσι για το θεωρητικό μοντέλο λαμβάνουμε υπόψη ότι το υλικό είναι ισότροπο, ομοιογενές και με πάχος ίσο με το ονομαστικό σε όλα τα σημεία.

Όσον αφορά στην κατεργασία του υλικού με σκοπό την κατασκευή των πειραματικών δοκιμίων, αυτά υπόκεινται σε κοπή, που πραγματοποιήθηκε σε πρίονι (κορδέλα). Συνεπώς μπορεί να υπάρξουν έστω και απειροστές αποκλίσεις ως προς τις διαστάσεις της διαμέτρου, αλλά της επιφάνειας του μετώπου των σωλήνων. Αντιθέτως κατά την προσομοίωση η γεωμετρία είναι τέλεια.

Επιπλέον κατά τη μοντελοποίηση προσεγγίζουμε και τις οριακές συνθήκες. Αυτές αφορούν στην τριβή των πλακών συμπίεσης και των πλευρών των δοκιμίων, καθώς και στην τριβή μεταξύ των ίδιων των πλευρών των δοκιμίων κατά τη δημιουργία των λοβών, κατά την επαφή. Στο πρόγραμμα εισάγουμε τους συντελεστές τριβής που αντιστοιχούν στις κατεργασμένες επιφάνειες και τα υλικά τους, όμως υπάρχει η πιθανότητα η παραμόρφωση των δοκιμίων με τη δημιουργία λοβών και η εφαρμογή των φορτίων να αλλάζουν τους συντελεστές που έχουμε προεπιλέξει.

Απόκλιση μεταξύ φυσικού μοντέλου και προσομοίωσης προκύπτει και στις συνοριακές συνθήκες. Στην πραγματικότητα η επαφή της πλευράς του δοκιμίου με την πλάκα συμπίεσης είναι πιο ομαλή. Στην προσομοίωση όμως προκύπτει ουδέτερη λόγω της διαμήκου ακμής των πεπερασμένων στοιχείων (διακριτοποίηση των κελυφών).

Για τις ανάγκες της διεξαγωγής του πειράματος ρυθμίσαμε την ταχύτητα συμπίεσης της πρέσας σε 10 mm/min. Αντίθετα, στο θεωρητικό μοντέλο προγραμματίσαμε την ταχύτητα καθόδου της πλάκας συμπίεσης σε 1 mm/ms, διότι είναι αποδοτικός χρόνος ανάλυσης και σε αυτή την ταχύτητα δεν εισάγονται ανεπιθύμητα αδρανειακά φαινόμενα. Σε περίπτωση που προγραμματιζόταν ο κώδικας με ταχύτητα αντίστοιχη της πειραματικής, θα αυξάνονταν δραματικά ο χρόνος επίλυσης του κάθε μοντέλου.

Προσομοίωση	Πείραμα
Υλικό μοντέλου <ul style="list-style-type: none"> • Ισότροπο • Ομοιογενές 	Πραγματικό υλικό <ul style="list-style-type: none"> • Ενδεχομένως ανισότροπο και ανομοιογενές με πιθανές ενσωματωμένες ατέλειες
Ιδεατή γεωμετρία <ul style="list-style-type: none"> • Ακριβείς διαστάσεις • Παράλληλα μέτωπα 	Γεωμετρία δοκιμίου <ul style="list-style-type: none"> • Αποκλίσεις στις διαστάσεις • Αποκλίσεις στην παραλληλότητα των μετώπων
Οριακές συνθήκες <ul style="list-style-type: none"> • Σταθεροί συντελεστές τριβής • Γραμμική επαφή μοντέλου – πλάκας συμπίεσης • Ταχύτητα καθόδου πλάκας συμπίεσης 1mm/ms 	Οριακές συνθήκες <ul style="list-style-type: none"> • Συντελεστές τριβής πιθανώς μεταβαλλόμενοι • Ταχύτητα καθόδου πλάκας συμπίεσης 10mm/min

Πίνακας 3.1. Σύνοψη διαφορών προσομοίωσης – πειράματος

3.3. ΠΕΙΡΑΜΑ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Παρατίθενται σε ενότητες τα δοκίμια που καταπονήθηκαν σε πλευρική φόρτιση. Παράλληλα θα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του μοντέλου στο LS-DYNA. Η σύγκριση των δοκιμών γίνεται ως προς το μηχανισμό κατάρρευσης, το μέσο φορτίο καθώς και ως προς το μέγιστο φορτίο.

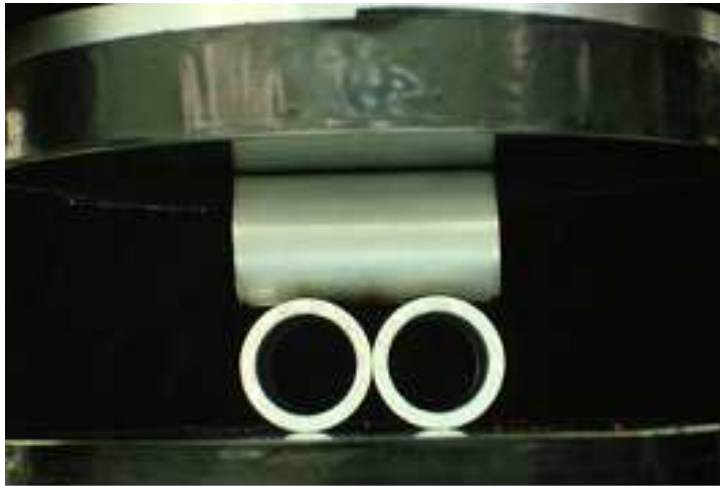
3.3.1. Προσομοίωση συστοιχίας δοκιμών 19x25

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται τα τέσσερα δοκίμια διαστάσεων διατομής 19x25 (mm x mm), πάχους 3mm και μήκους 50mm. Στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνονται ως ομοιογενή και ισότροπα. Η διάταξη τους είναι η ακόλουθη: δύο δοκίμια κάθετα τοποθετημένα πάνω σε άλλα δύο δοκίμια.

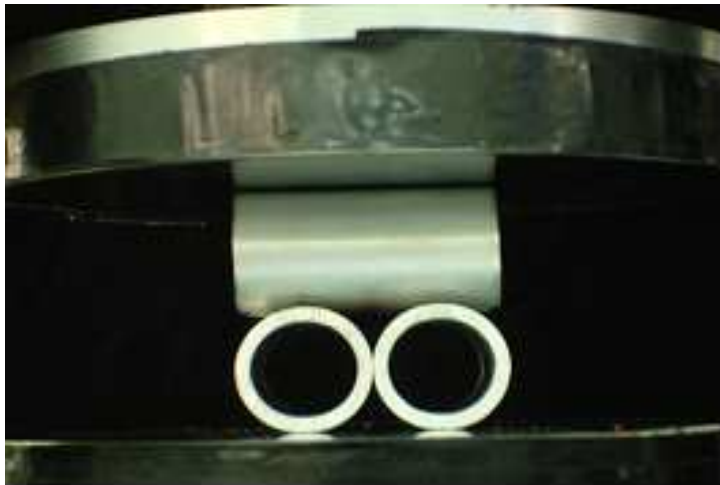
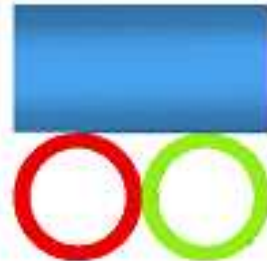


Σχήμα 3.2. Παρουσίαση δοκιμών 19x25 (mm x mm) όπως προσομοιώνονται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

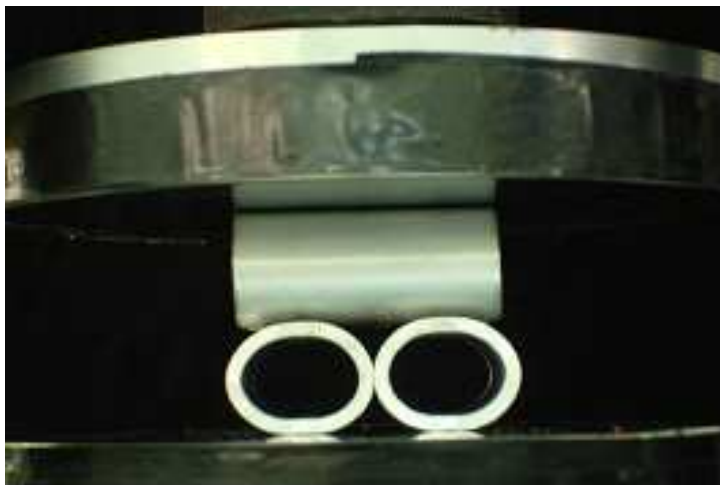
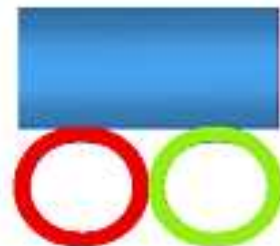
Η κατάρρευση των δοκιμών παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3 σε στιγμιότυπα της πειραματικής διαδικασίας καθώς και σε αντίστοιχα στιγμιότυπα από την προσομοίωση στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.



1

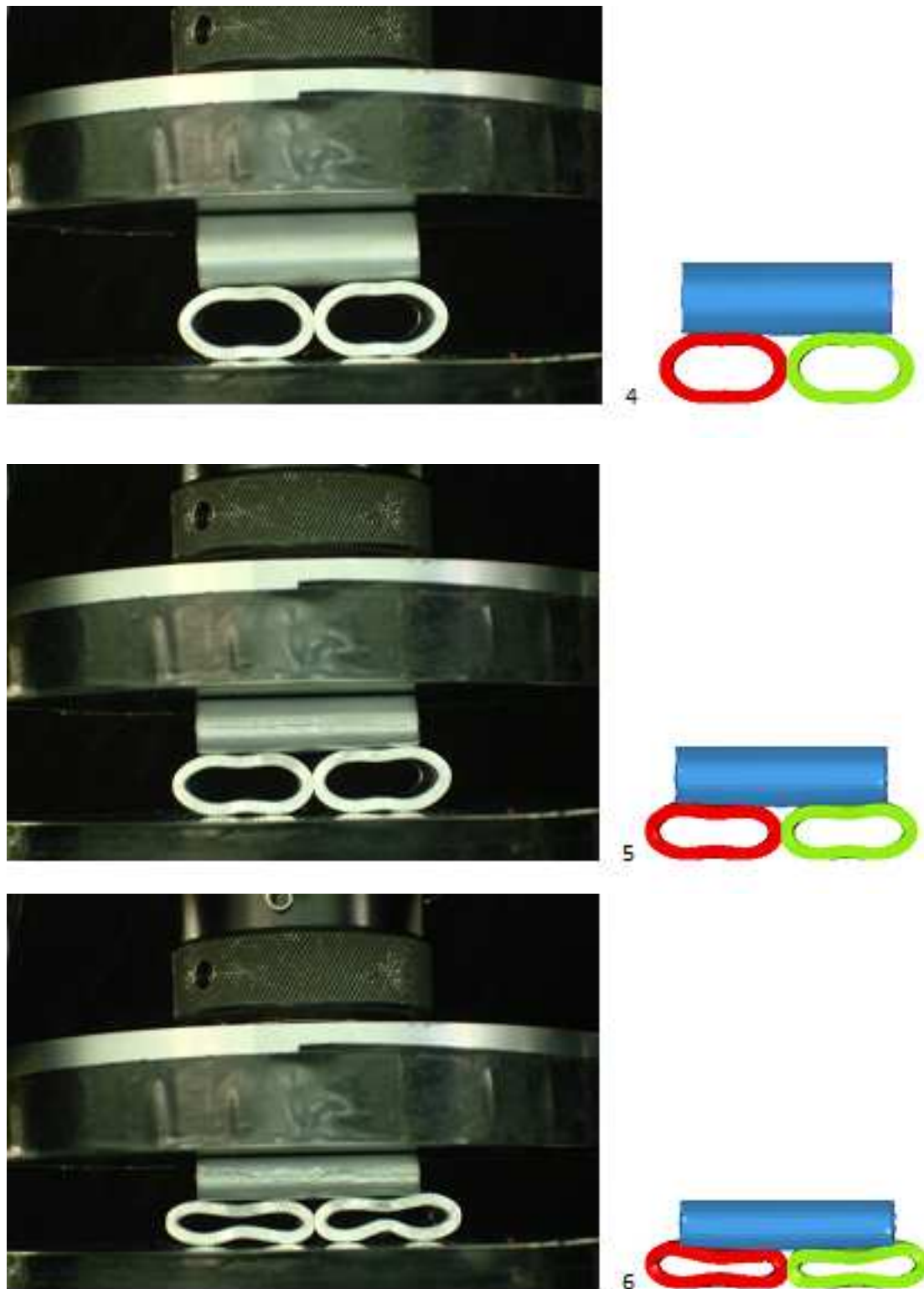


2



3

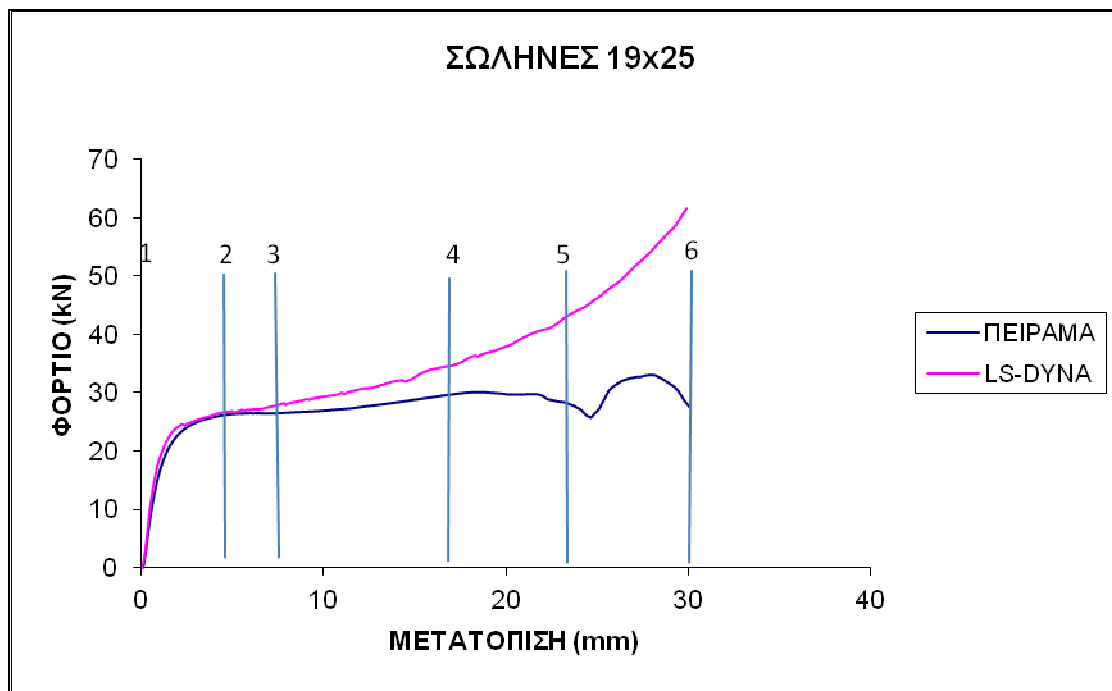




Σχήμα 3.3. Στιγμιότυπα των δοκιμών 19x25 (mm x mm), όπως έχουν ληφθεί από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση στον υπολογιστή.

Είναι εμφανές ότι τόσο στα πειραματικά δοκίμια όσο και στο υπολογιστικό μοντέλο, η κατάρρευση ξεκινάει από το ίδιο σημείο. Δεν παρατηρούνται αποκλίσεις μεταξύ των δύο διαδικασιών. Τα αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα, διότι είτε οι ατέλειες των πειραματικών δοκιμών είναι ασήμαντες είτε γιατί αυτές προσομοιώθηκαν σωστά στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Η κατάρρευση ξεκινάει δημιουργώντας μη εκτατό λοβό και στις δύο περιπτώσεις (στιγμιότυπο 2).

Στο Σχήμα 3.4. παρουσιάζεται το διάγραμμα της καταπόνησης του δοκιμίου. Πάνω στο διάγραμμα απεικονίζονται οι χρόνοι στους οποίους αντιστοιχούν τα στιγμιότυπα του Σχήματος 3.3.



Σχήμα 3.4. Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης των δοκιμών 19x25 mm

Ακολουθεί πίνακας με τις τιμές των μέσων και μέγιστων φορτίων του διαγράμματος και σύγκριση των τιμών αυτών (Πίνακας 3.2.)

19x25	Πειραματικό φορτίο (kN)		Φορτίο προσομοίωσης (kN)	
	Μέση Τιμή	Μέγιστο	Μέση Τιμή	Μέγιστο
	24.4	33	35.1	61.6

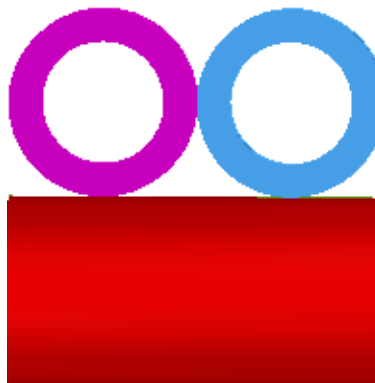
Πίνακας 3.2. Μέγιστα και μέσα φορτία του διαγράμματος.

Στην καμπύλη του πειράματος παρουσιάζεται ιδιομορφία/διακύμανση του φορτίου. Πρόκειται για την απεικόνιση επιφανειακής (εξωτερικά) θραύσης των δοκιμών, καθώς αυτά ρηγματώθηκαν κατά

μήκος των παράπλευρων λοβών, που εκδηλώνεται με παράλληλη πτώση του φορτίου. Το φαινόμενο της διαμήκου ρηγμάτωσης (θραύσης) ξεκίνησε λίγο μετά τα 17 mm της συμπίεσης γι' αυτό παρουσιάζουν τη συγκεκριμένη συμπεριφορά (ανάπτυξη υψηλών περιφερειακών εφελκυστικών τάσεων –στην εξωτερική επιφάνεια- και θραύση). Σε σχέση με τα λεπτότερα (πάχος τοιχώματος) δοκίμια, στα οποία δεν σχηματίστηκαν ρωγμές, τα 19x25 (mm x mm) έχουν σημαντικά μεγαλύτερο πάχος.

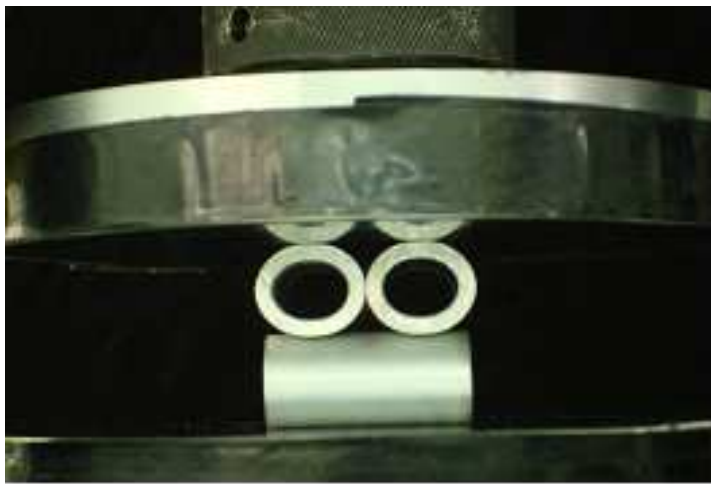
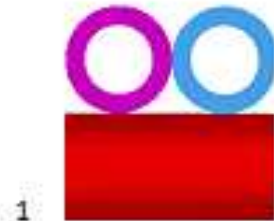
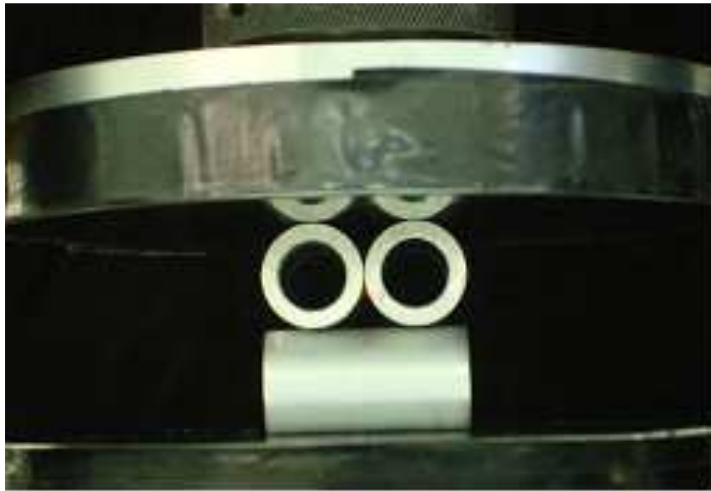
3.3.2. Προσομοίωση συστοιχίας δοκιμίων 13x20

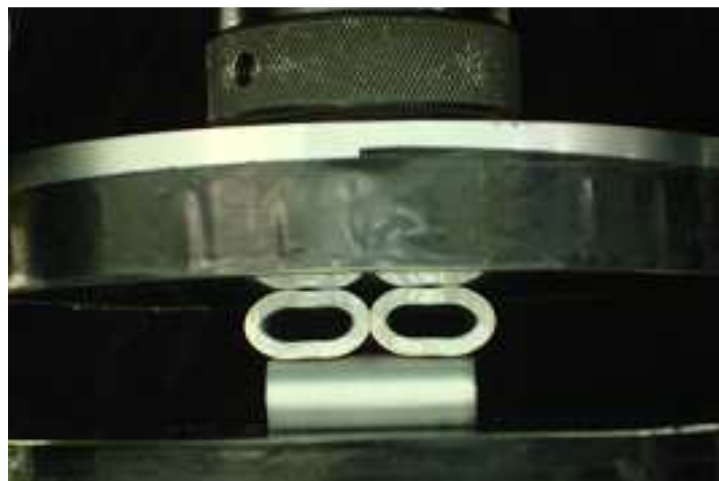
Στο Σχήμα 3.5. παρουσιάζονται τα τέσσερα δοκίμια διαστάσεων διατομής 13x20 (mm x mm), πάχους 3,5mm και μήκους 40mm. Στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνονται ως ομοιογενή και ισότροπα. Η διάταξη τους είναι η ακόλουθη: δύο δοκίμια κάθετα τοποθετημένα πάνω σε άλλα δύο δοκίμια.



Σχήμα 3.5. Παρουσίαση δοκιμίων 13x20 (mm x mm) όπως προσομοιώνονται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

Η κατάρρευση των δοκιμίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6 σε στιγμιότυπα της πειραματικής διαδικασίας καθώς και σε αντίστοιχα στιγμιότυπα από την προσομοίωση στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

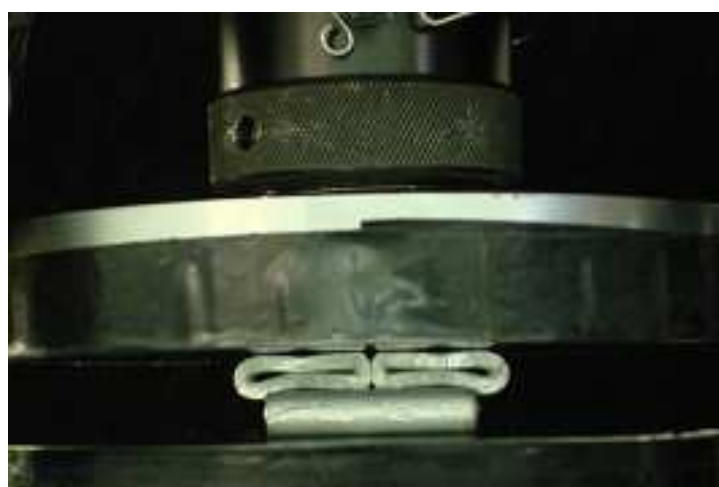




4



5

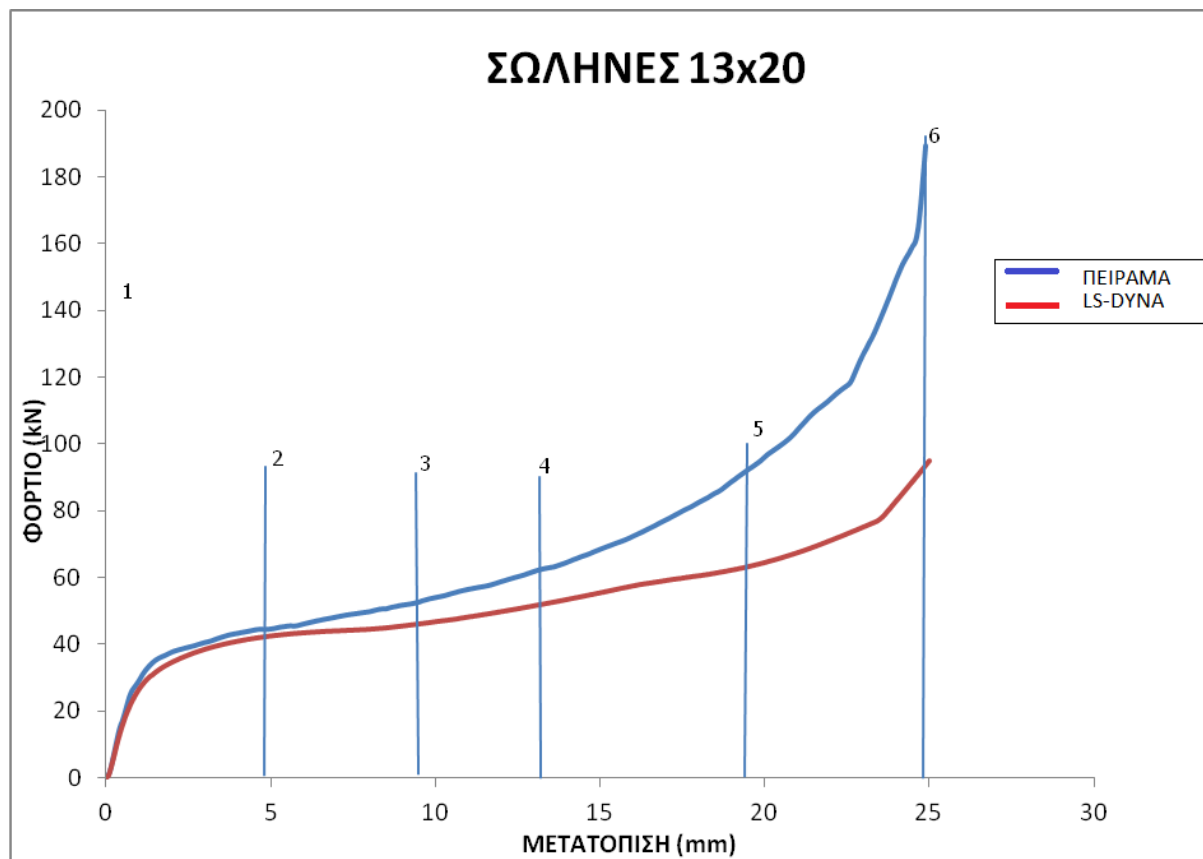


6

Σχήμα 3.6. Στιγμιότυπα των δοκιμών 13x20 (mm x mm), όπως έχουν ληφθεί από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση στον υπολογιστή.

Όπως και στην περίπτωση των δοκιμών διαστάσεων 19x25, παρατηρείται και εδώ ότι τόσο στα πειραματικά δοκίμια όσο και στο υπολογιστικό μοντέλο, η κατάρρευση ξεκινάει από το ίδιο σημείο. Δεν παρατηρούνται αποκλίσεις μεταξύ των δύο διαδικασιών. Τα αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα, διότι είτε οι ατέλειες των πειραματικών δοκιμών είναι ασήμαντες είτε γιατί αυτές προσομοιώθηκαν σωστά στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Η κατάρρευση ξεκινάει δημιουργώντας μη εκτατό λοβό και στις δύο περιπτώσεις (στιγμιότυπο 2). Στο έκτο στιγμιότυπο φαίνεται η πλευρική αλληλεπίδραση μεταξύ των παράλληλων σωλήνων της συστοιχίας κατά τη διαδικασία του πειράματος (αποτυπώνεται και στο μοντέλο).

Στο Σχήμα 3.7. παρουσιάζεται το διάγραμμα της καταπόνησης του δοκιμίου. Πάνω στο διάγραμμα απεικονίζονται οι χρόνοι στους οποίους αντιστοιχούν τα στιγμιότυπα του Σχήματος 3.6.



Σχήμα 3.7. Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης των δοκιμών 13x20 mm

Ακολουθεί πίνακας με τις τιμές των μέσων και μέγιστων φορτίων του διαγράμματος και σύγκριση των τιμών αυτών (Πίνακας 3.2.)

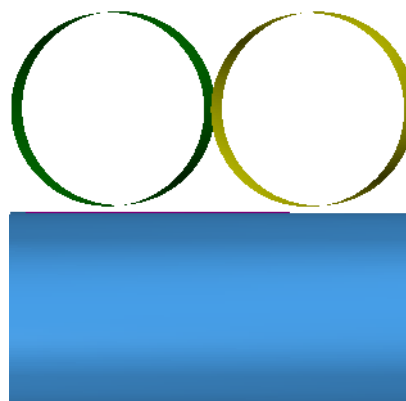
13x20	Πειραματικό φορτίο (kN)		Φορτίο προσομοίωσης (kN)	
	Μέση Τιμή	Μέγιστο	Μέση Τιμή	Μέγιστο
	52.4	94.9	69.6	189.1

Πίνακας 3.2. Μέγιστα και μέσα φορτία του διαγράμματος.

Το φορτίο αυξάνει συνεχώς καθώς κατά την κατάρρευση ολοένα και μεγαλύτερο ποσοστό των διατομών όπου αλληλεπιδρούν συμμετέχει στη διαδικασία συμπίεσης. Στην καμπύλη του πειράματος παρουσιάζεται ιδιομορφία/διακύμανση του φορτίου. Πρόκειται για την απεικόνιση επιφανειακής (εξωτερικά) θραύσης των δοκιμίων, καθώς αυτά ρηγματώθηκαν κατά μήκος των παράπλευρων λοβών, που εκδηλώνεται με παράλληλη πτώση του φορτίου. Το φαινόμενο της διαμήκου ρηγματώσης (θραύσης) ξεκίνησε λίγο μετά τα 13 mm της συμπίεσης γι' αυτό παρουσιάζουν τη συγκεκριμένη συμπεριφορά (ανάπτυξη υψηλών περιφερειακών εφελκυστικών τάσεων –στην εξωτερική επιφάνεια- και θραύση). Σε σχέση με τα λεπτότερα (πάχος τοιχώματος) δοκίμια, στα οποία δεν σχηματίστηκαν ρωγμές, τα 13x20 (mm x mm) έχουν σημαντικά μεγαλύτερο πάχος.

3.3.3. Προσομοίωση συστοιχίας δοκιμίων 28x30

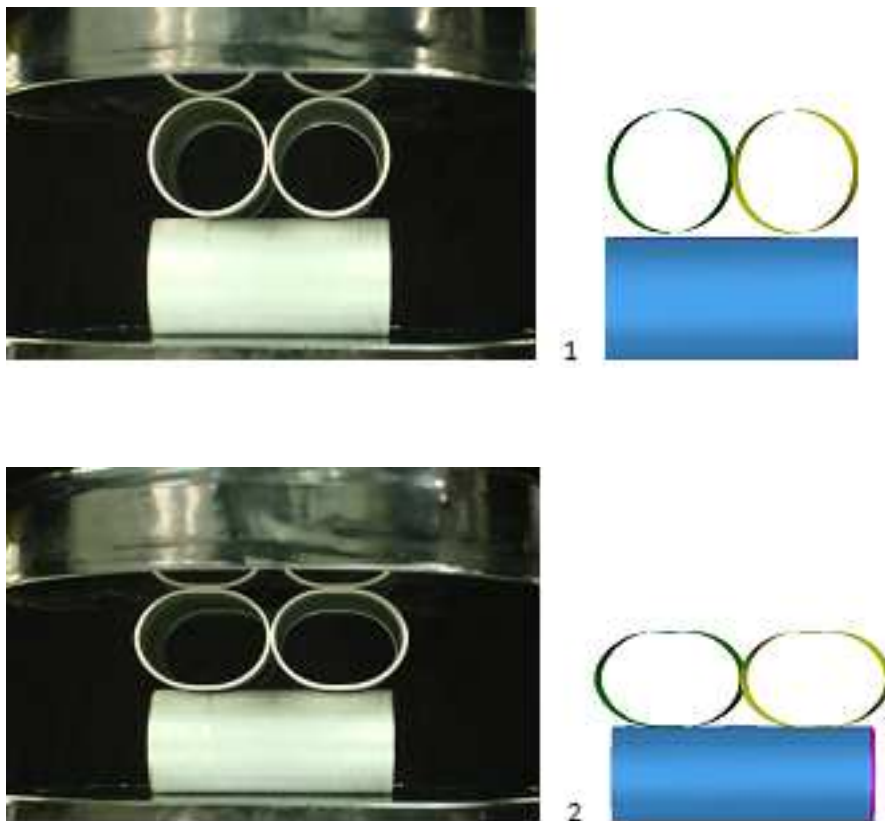
Στο Σχήμα 3.8. παρουσιάζονται τα τέσσερα δοκίμια διαστάσεων διατομής 28x30 (mm x mm), πάχους 1,0mm και μήκους 60mm. Στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνονται ως ομοιογενή και ισότροπα. Η διάταξη τους είναι η ακόλουθη: δύο δοκίμια κάθετα τοποθετημένα πάνω σε άλλα δύο δοκίμια.

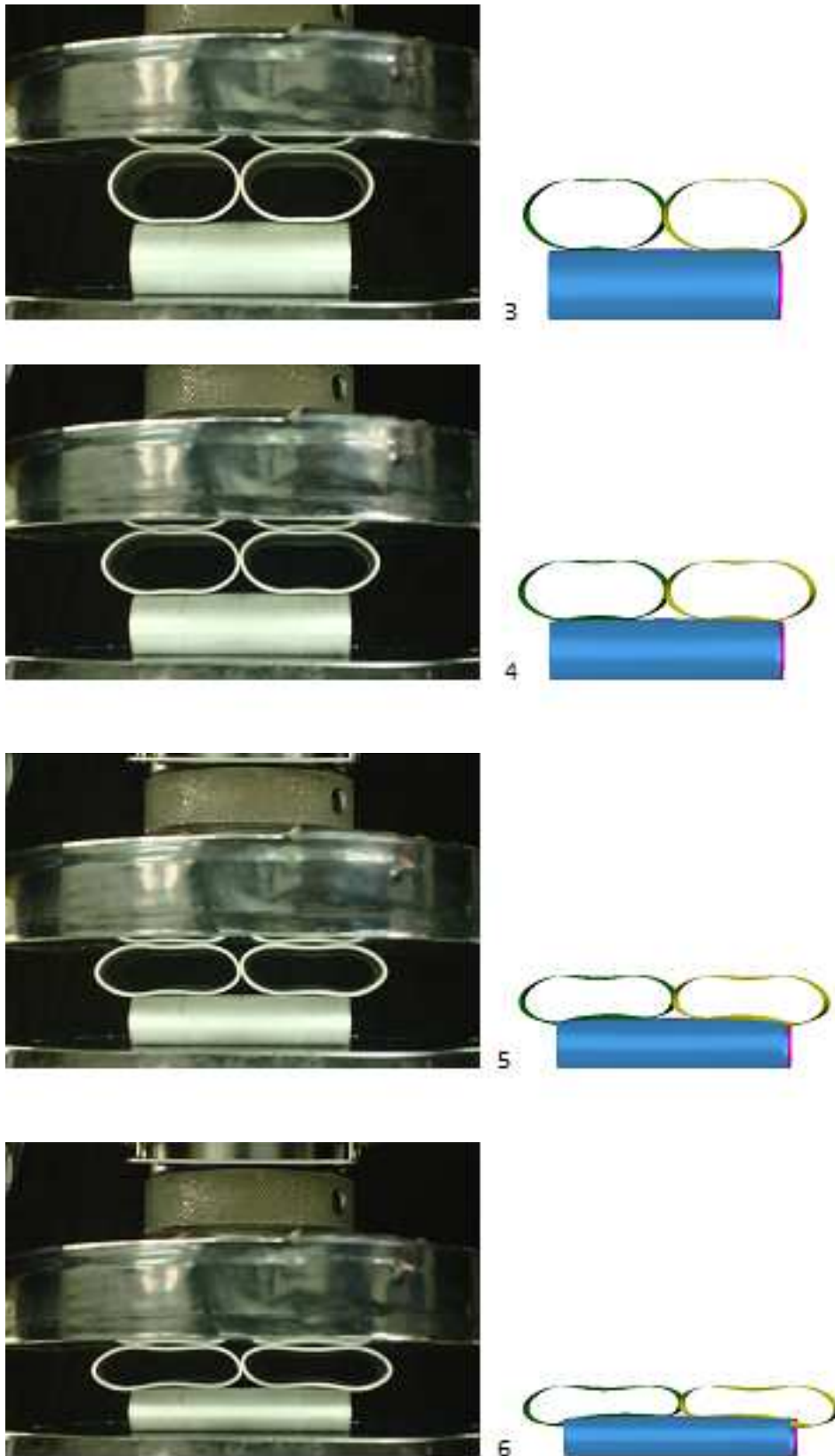


Σχήμα 3.8. Παρουσίαση δοκιμίων 28x30 (mm x mm) όπως προσομοιώνονται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA (απεικόνιση "shade mode").

Η εικόνα είναι ελαφρά στραμμένη περί τον κατακόρυφο άξονα (δηλαδή δεν είναι ακριβώς πρόοψη) προκειμένου να απεικονίζονται οι άνω σωλήνες. Επειδή οι σωλήνες είναι μοντελοποιημένοι με shell elements (δηλαδή σχεδιαστικά δεν έχουν πάχος τοιχώματος) δεν θα φαίνονται σε ακριβώς πρόοψη. Επιπλέον, επειδή έχει ληφθεί υπόψη το αντιστάθμισμα του πάχους του τοιχώματος (shell elements thickness offset) των σωλήνων –έχουν σχεδιαστεί με τη μέση διάμετρο τους- σχεδιαστικά απεικονίζονται απομακρυσμένοι μεταξύ τους κατά το πάχος του τοιχώματός τους ($\frac{1}{2}$ πάχος + $\frac{1}{2}$ πάχος). Η θεώρηση αυτή έχει ενσωματωθεί και στην αντίστοιχη επεξεργασία των επαφών αλληλεπίδρασης (contact interfaces).

Η κατάρρευση των δοκιμίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9. σε στιγμιότυπα της πειραματικής διαδικασίας καθώς και σε αντίστοιχα στιγμιότυπα από την προσομοίωση στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

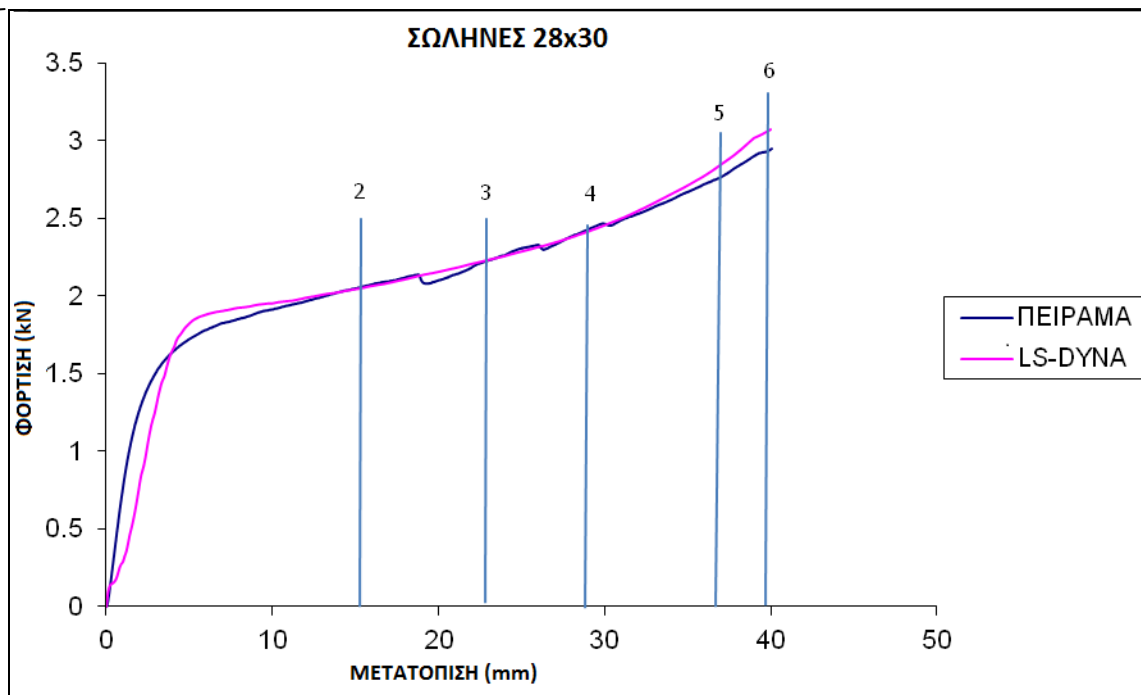




Σχήμα 3.9. Στιγμιότυπα των πλήρων δοκιμών 28x30 (mm x mm), όπως έχουν ληφθεί από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση στον υπολογιστή.

Το φορτίο αυξάνει συνεχώς καθώς κατά την κατάρρευση ολοένα και μεγαλύτερο ποσοστό των διατομών όπου αλληλεπιδρούν συμμετέχει στη διαδικασία συμπίεσης. Όπως και στην περίπτωση των δοκιμών διαστάσεων 19x25, παρατηρείται και εδώ ότι τόσο στα πειραματικά δοκίμια όσο και στο υπολογιστικό μοντέλο, η κατάρρευση ξεκινάει από το ίδιο σημείο. Δεν παρατηρούνται αποκλίσεις μεταξύ των δύο διαδικασιών. Τα αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα, διότι είτε οι ατέλειες των πειραματικών δοκιμών είναι ασήμαντες είτε γιατί αυτές προσομοιώθηκαν σωστά στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Η κατάρρευση ξεκινάει δημιουργώντας μη εκτατό λοβό και στις δύο περιπτώσεις (στιγμιότυπο 2). Στο στιγμιότυπο 2 απεικονίζεται και το φαινόμενο της βύθισης στη ζώνη επαφής.

Στο Σχήμα 3.10. παρουσιάζεται το διάγραμμα της καταπόνησης του δοκιμίου. Πάνω στο διάγραμμα απεικονίζονται οι χρόνοι στους οποίους αντιστοιχούν τα στιγμιότυπα του Σχήματος 3.9. Λόγω του ιδιαίτερα λεπτού πάχους των τοιχωμάτων των σωλήνων 28x30 και της υψηλότερης ταχύτητας συμπίεσης στην αρχική φάση της φόρτισης παρουσιάστηκε σχετικά ηψίσυχη διακύμανση του φορτίου. Για καλύτερη σύγκριση με την πειραματική καμπύλη, η καμπύλη της προσομοίωσης απεικονίζεται φιλτραρισμένη στην αντίστοιχη περιοχή.



Ακολουθεί πίνακας με τις τιμές των μέσων και μέγιστων φορτίων του διαγράμματος και σύγκριση των τιμών αυτών (Πίνακας 3.3.)

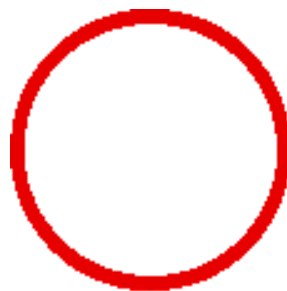
28x30	Πειραματικό φορτίο (kN)		Φορτίο προσομοίωσης (kN)	
	Μέση Τιμή	Μέγιστο	Μέση Τιμή	Μέγιστο
	19.5	29.4	19.2	31.3

Πίνακας 3.3. Μέγιστα και μέσα φορτία του διαγράμματος.

Το φορτίο αυξάνει συνεχώς καθώς κατά την κατάρρευση ολοένα και μεγαλύτερο ποσοστό των διατομών όπου αλληλεπιδρούν συμμετέχει στη διαδικασία συμπίεσης. Επιλέχθηκε η χρήση των shell elements λόγω του ιδιαίτερα μικρού λόγου πάχους τοιχώματος (t) προς διάμετρο σωλήνων (D_0) (εξαιρετικά λεπτότοιχο κέλυφος). Επιπλέον, δεδομένου ότι στην περίπτωση χρήσης των solid elements απαιτούνται τουλάχιστο δύο στοιχεία κατά το πάχος, είναι προφανές ότι προκύπτει –με χρήση shell elements- αποδοτικότερο μοντέλο (ικανοποιητική ακρίβεια σε μικρότερο υπολογιστικό χρόνο).

3.3.4. Προσομοίωση δοκιμίου 27x30 (ένας σωλήνας)

Στο Σχήμα 3.11. παρουσιάζεται το δοκίμιο διαστάσεων διατομής 27x30 (mm x mm), πάχους 1,5mm και μήκους 60mm. Στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνεται ως ομοιογενές και ισότροπο.



Σχήμα 3.11. Παρουσίαση δοκιμίου 27x30 (mm x mm) όπως προσομοιώνεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

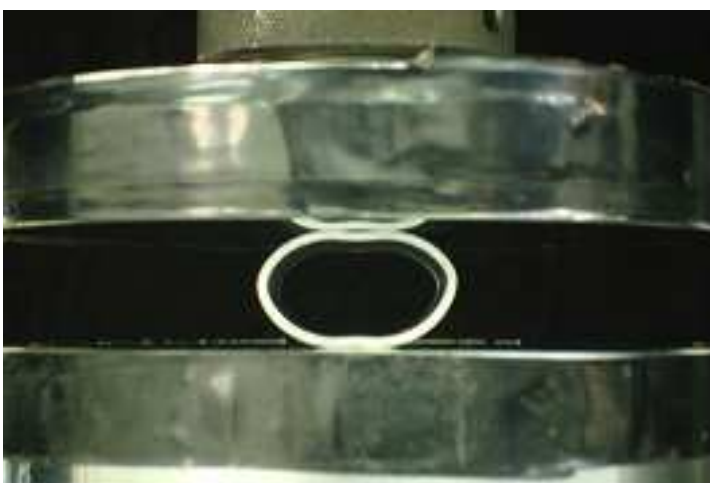
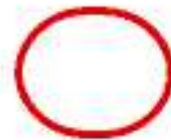
Η κατάρρευση του δοκιμίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12. σε στιγμιότυπα της πειραματικής διαδικασίας καθώς και σε αντίστοιχα στιγμιότυπα από την προσομοίωση στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.



1

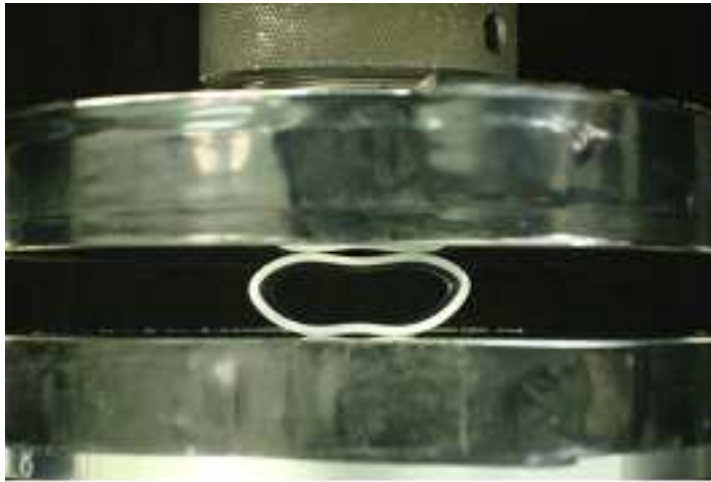


2

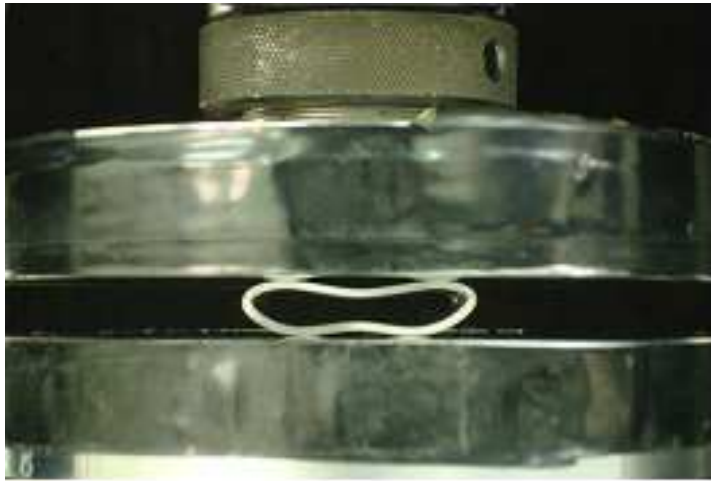


3





4



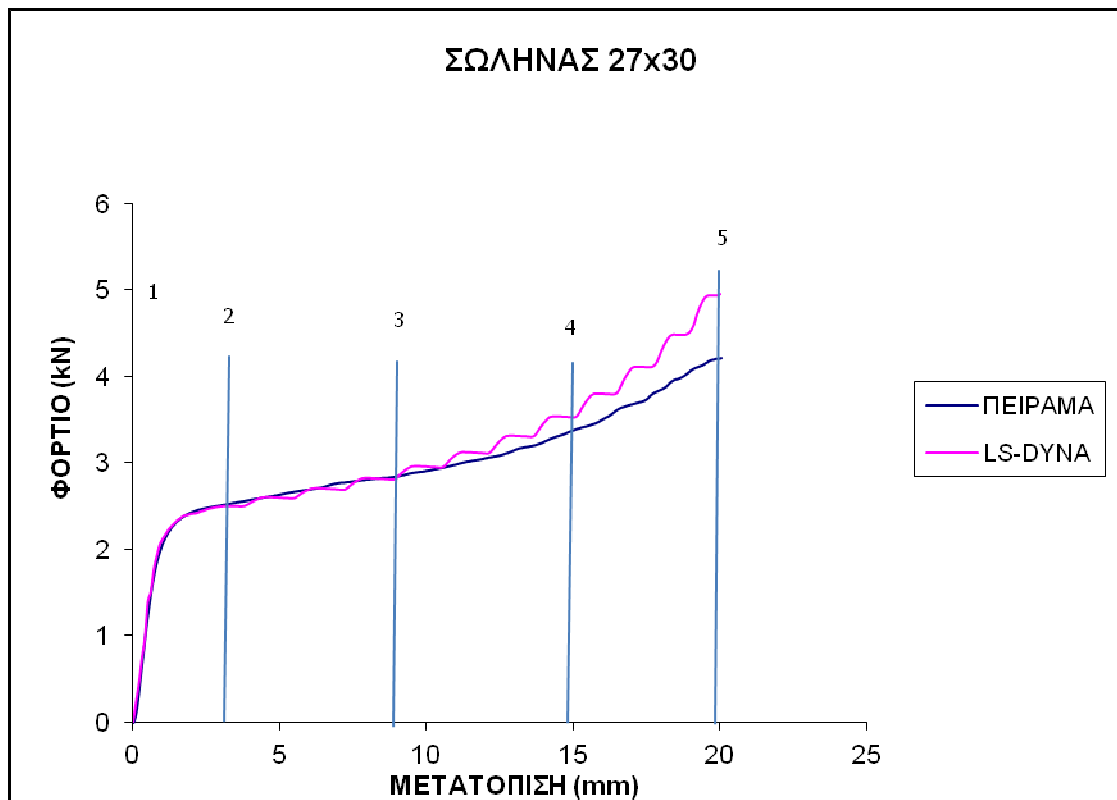
5



Σχήμα 3.12. Στιγμιότυπα του δοκιμίου 27x30 (mm x mm), όπως έχει ληφθεί από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση στον υπολογιστή.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις των δοκιμών παρατηρούμε και εδώ ότι τόσο στα πειραματικά δοκίμια όσο και στο υπολογιστικό μοντέλο, η κατάρρευση ξεκινάει από το ίδιο σημείο. Δεν παρατηρούνται αποκλίσεις μεταξύ των δύο διαδικασιών. Τα αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα, διότι είτε οι ατέλειες των πειραματικών δοκιμών είναι ασήμαντες είτε γιατί αυτές προσομοιώθηκαν σωστά στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Η κατάρρευση ξεκινάει δημιουργώντας μη εκτατό λοβό και στις δύο περιπτώσεις (στιγμιότυπο 2).

Στο Σχήμα 3.13. παρουσιάζεται το διάγραμμα της καταπόνησης του δοκιμίου. Πάνω στο διάγραμμα απεικονίζονται οι χρόνοι στους οποίους αντιστοιχούν τα στιγμιότυπα του Σχήματος 3.12.



Σχήμα 3.13. Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης του δοκιμίου 27x30 mm

Ακολουθεί πίνακας με τις τιμές των μέσων και μέγιστων φορτίων του διαγράμματος και σύγκριση των τιμών αυτών (Πίνακας 3.4.)

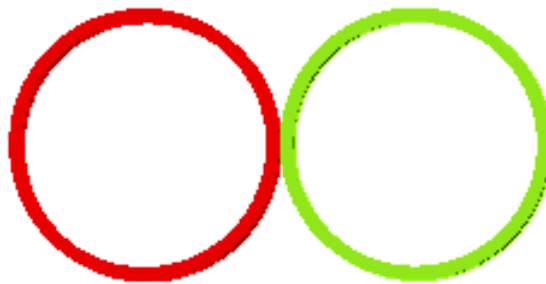
27x30	Πειραματικό φορτίο (kN)		Φορτίο προσομοίωσης (kN)	
	Μέση Τιμή	Μέγιστο	Μέση Τιμή	Μέγιστο
	29.4	42.1	29.3	49.5

Πίνακας 3.4. Μέγιστα και μέσα φορτία του διαγράμματος.

Το φορτίο αυξάνει συνεχώς καθώς κατά την κατάρρευση ολοένα και μεγαλύτερο ποσοστό των διατομών όπου αλληλεπιδρούν συμμετέχει στη διαδικασία συμπίεσης. Η πριονωτή μορφή του διαγράμματος οφείλεται στην (περιφερειακή) διακριτοποίηση του κελύφους και την προκύπτουσα διαδοχική επαφή των πεπερασμένων στοιχείων του σωλήνα με τις πλάκες συμπίεσης κατά την παραμόρφωσή του. Κατά την διεξαγωγή του πειράματος δεν προκλήθηκε θραύση, διότι το δοκίμιο είναι λεπτότοιχο.

3.3.5. Προσομοίωση συστοιχίας δοκιμίων 27x30 (δύο παράλληλα τοποθετημένοι σωλήνες)

Στο Σχήμα 3.14. παρουσιάζονται δύο δοκίμια διαστάσεων διατομής 27x30 (mm x mm), πάχους 1,5mm και μήκους 60mm. Στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνονται ως ομοιογενή και ισότροπα.



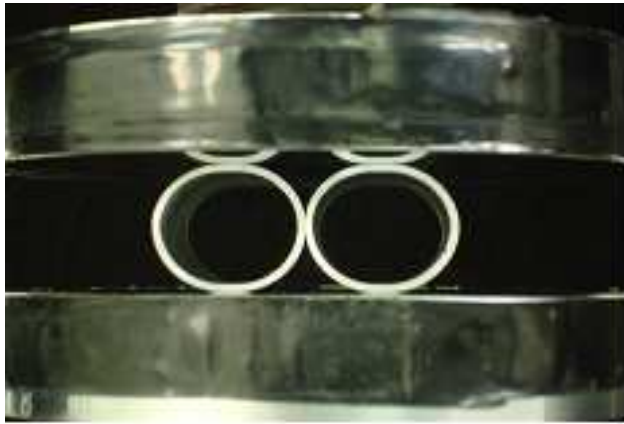
Σχήμα 3.14. Παρουσίαση συστοιχίας δοκιμίων 27x30 (mm x mm) όπως προσομοιώνονται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

Η κατάρρευση των δοκιμίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.15. σε στιγμιότυπα της πειραματικής διαδικασίας καθώς και σε αντίστοιχα στιγμιότυπα από την προσομοίωση στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.



1

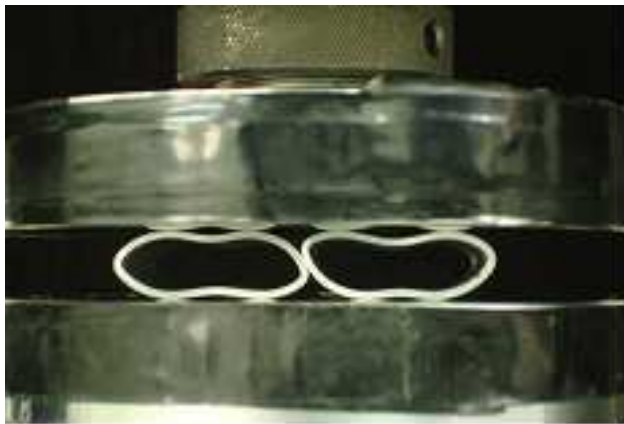




2

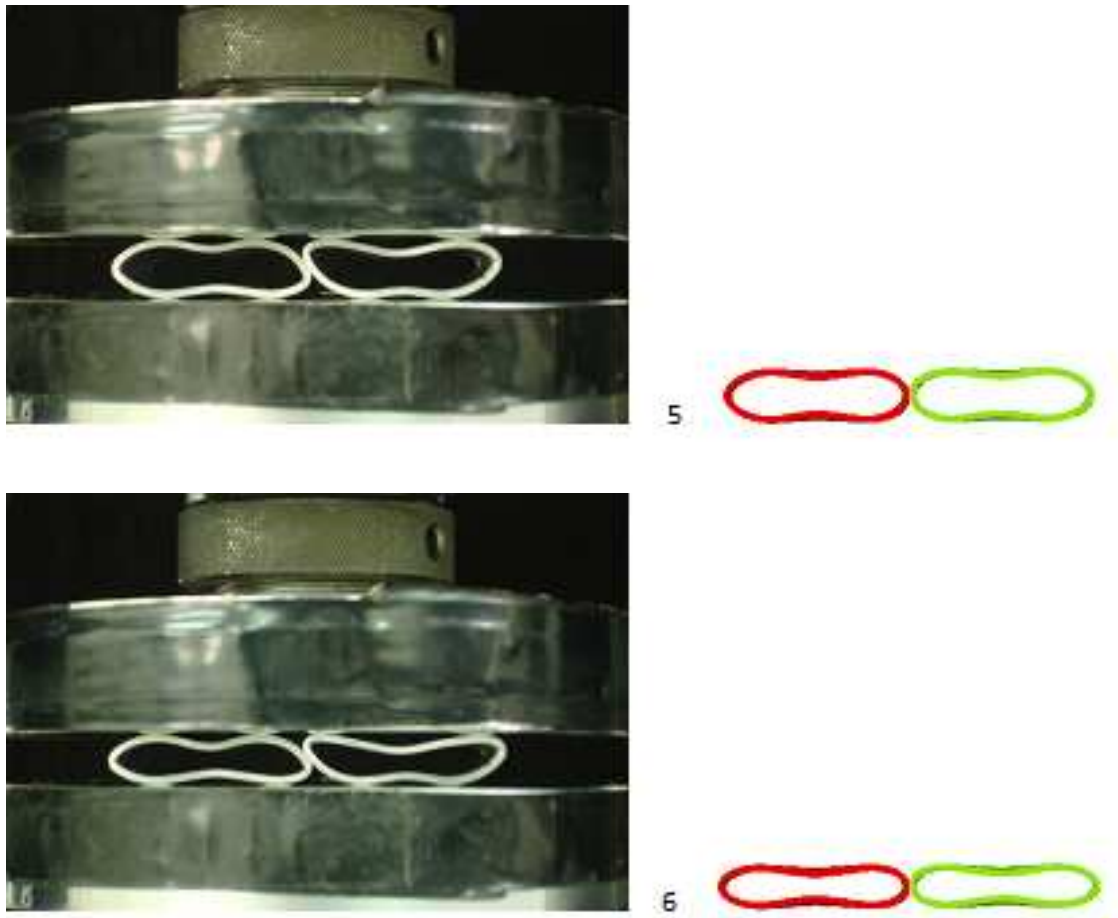


3



4

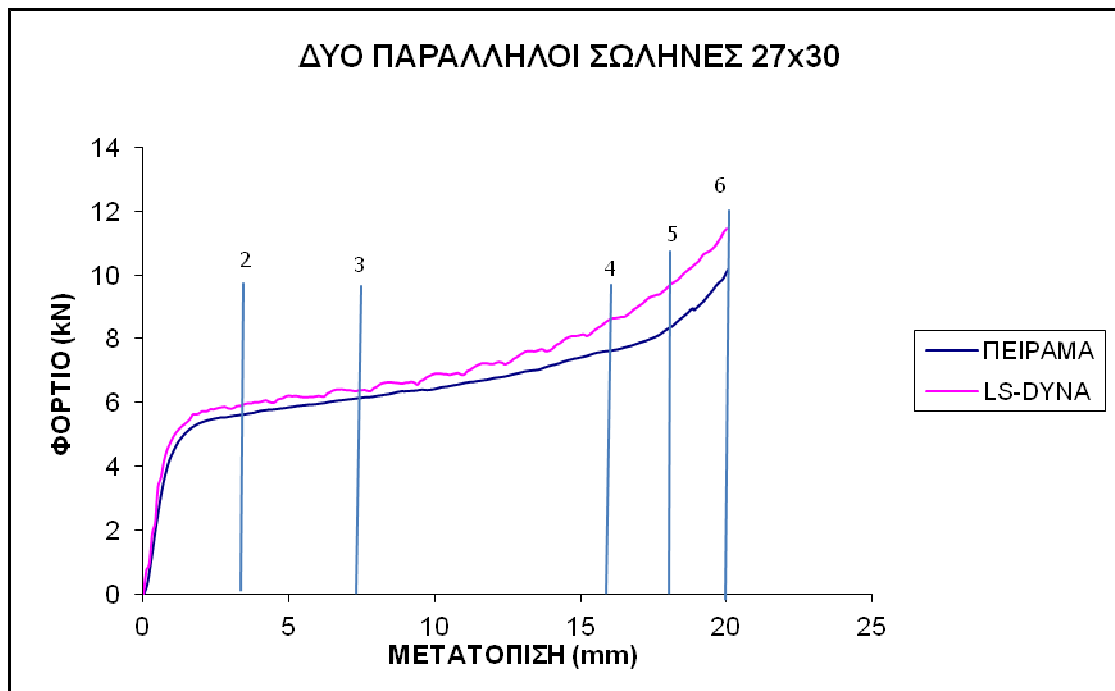




Σχήμα 3.15. Στιγμιότυπα των δοκιμίων 27x30 (mm x mm), όπως έχουν ληφθεί από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση στον υπολογιστή.

Στο μοντέλο –λόγω της εξιδανικευμένης αποτύπωσης- η κατάρρευση παρουσιάζεται συμμετρικά όσον αφορά τους παρακείμενους σωλήνες. Κατά την πειραματική διαδικασία η πλευρική αλληλεπίδραση (απόθεση) των παράλληλων σωλήνων σε συνδυασμό με τις υπάρχουσες συνοριακές συνθήκες (τριβή), οδηγεί σε συμμετρική καθ' ύψος επικάλυψη των τοιχωμάτων τους (μη συμμετρική παραμόρφωση).

Στο Σχήμα 3.16. παρουσιάζεται το διάγραμμα της καταπόνησης του δοκιμίου. Πάνω στο διάγραμμα απεικονίζονται οι χρόνοι στους οποίους αντιστοιχούν τα στιγμιότυπα του Σχήματος 3.15.



Σχήμα 3.15. Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης των παράλληλα τοποθετημένων δοκιμίων 27x30 mm

Ακολουθεί πίνακας με τις τιμές των μέσων και μέγιστων φορτίων του διαγράμματος και σύγκριση των τιμών αυτών (Πίνακας 3.5.)

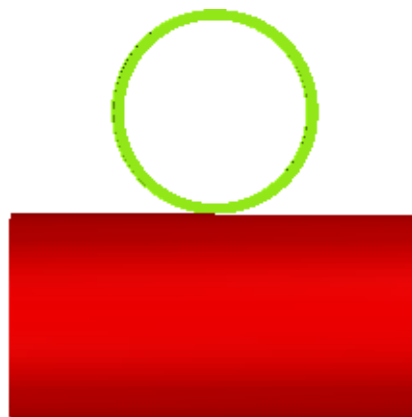
27x30 (2 παρ. σωλήνες)	Πειραματικό φορτίο (kN)		Φορτίο προσομοίωσης (kN)	
	Μέση Τιμή	Μέγιστο	Μέση Τιμή	Μέγιστο
	64.5	101.6	70.2	114.4

Πίνακας 3.5. Μέγιστα και μέσα φορτία του διαγράμματος.

Το φορτίο αυξάνει συνεχώς καθώς κατά την κατάρρευση ολοένα και μεγαλύτερο ποσοστό των διατομών όπου αλληλεπιδρούν συμμετέχει στη διαδικασία συμπίεσης. Η προιονωτή μορφή του διαγράμματος οφείλεται στην (περιφερειακή) διακριτοποίηση του κελύφους και την προκύπτουσα διαδοχική επαφή των πεπερασμένων στοιχείων του σωλήνα με τις πλάκες συμπίεσης κατά την παραμόρφωσή του. Δεν παρατηρείται θραύση στα δοκίμια, διότι το πάχος τους είναι μικρό. Σύμφωνα με τις καμπύλες που προέκυψαν, ο συσχετισμός των αντίστοιχων φορτίων προέκυψε ιδιαίτερα ικανοποιητικός.

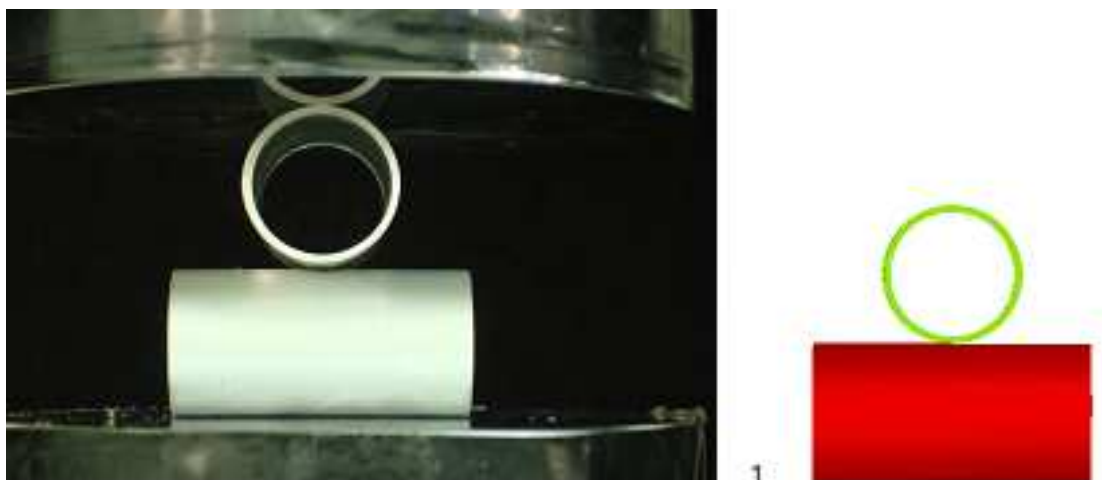
3.3.6. Προσομοίωση συστοιχίας δοκιμίων 27x30 (δύο σταυρωτά τοποθετημένοι σωλήνες)

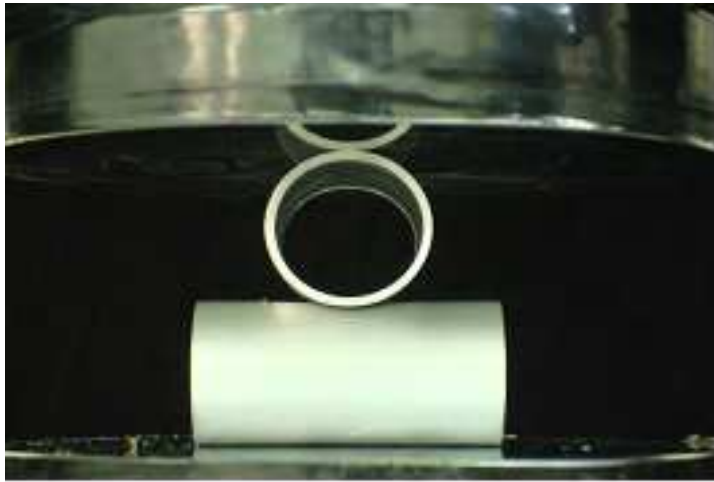
Στο Σχήμα 3.15. παρουσιάζονται δύο δοκίμια διαστάσεων διατομής 27x30 (mm x mm), πάχους 1,5mm και μήκους 60mm. Στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων εμφανίζονται ως ομοιογενή και ισότροπα.



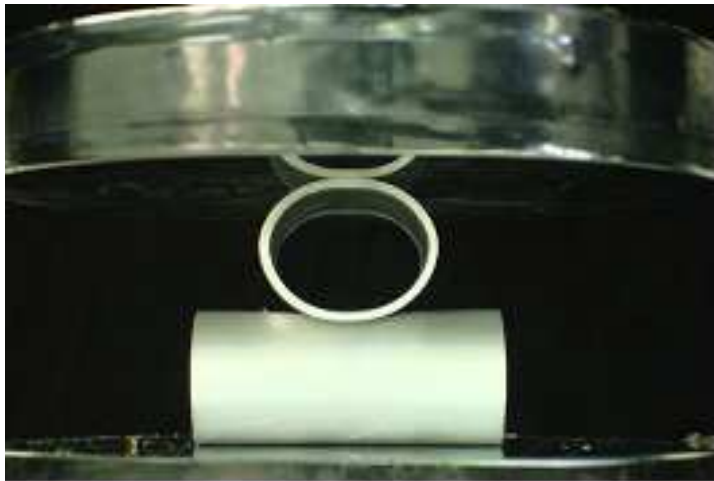
Σχήμα 3.15. Παρουσίαση πλήρων δοκιμίων 27x30 (mm x mm) όπως προσομοιώνονται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

Η κατάρρευση των δοκιμίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.16. σε στιγμιότυπα της πειραματικής διαδικασίας καθώς και σε αντίστοιχα στιγμιότυπα από την προσομοίωση στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

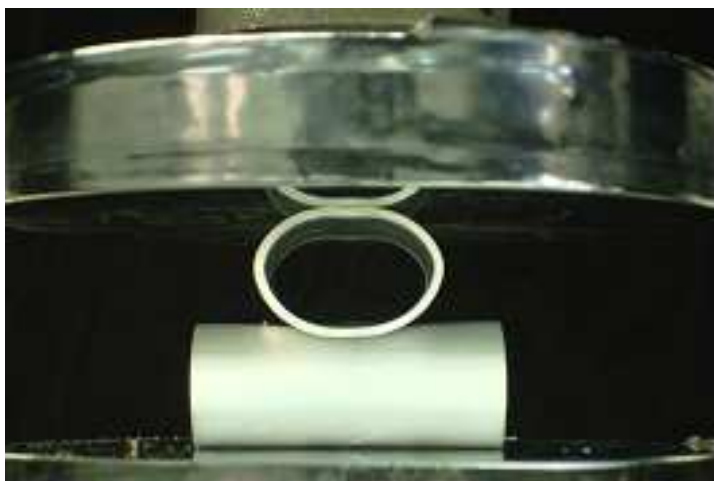




2

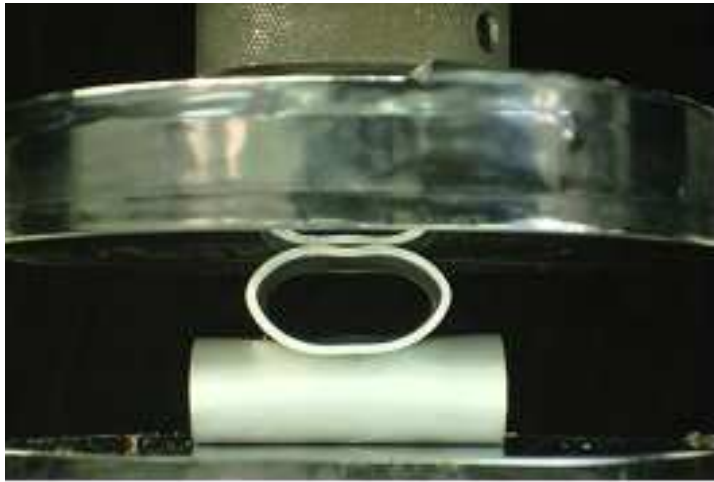


3

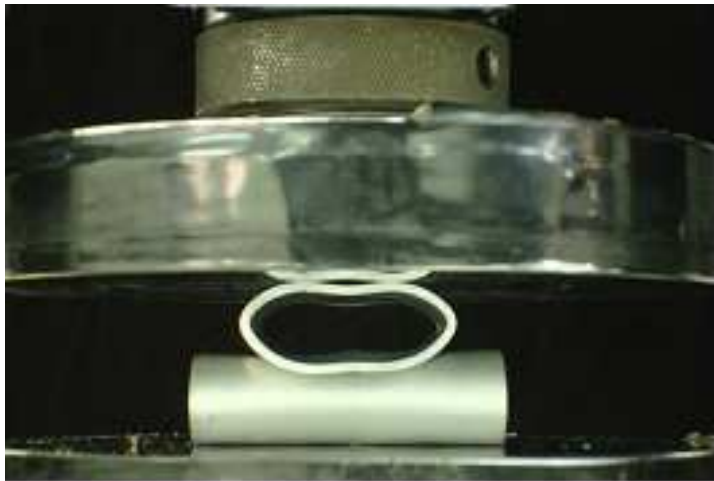


4

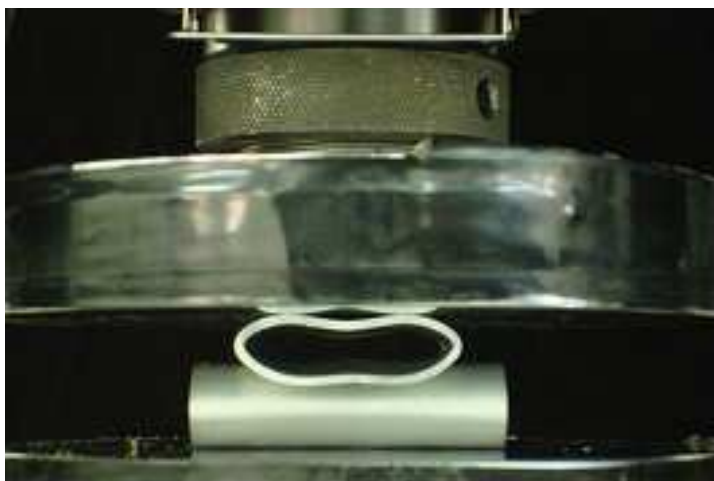




5

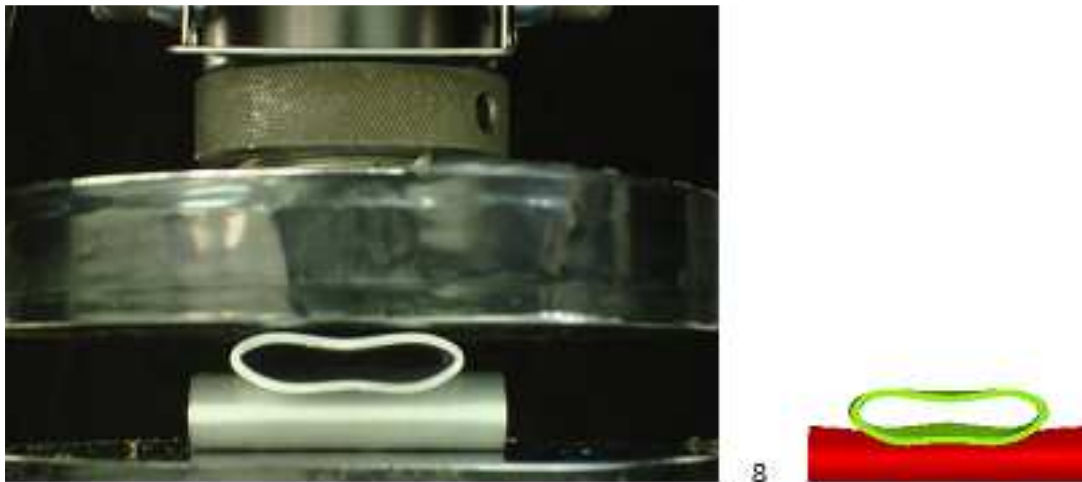


6



7

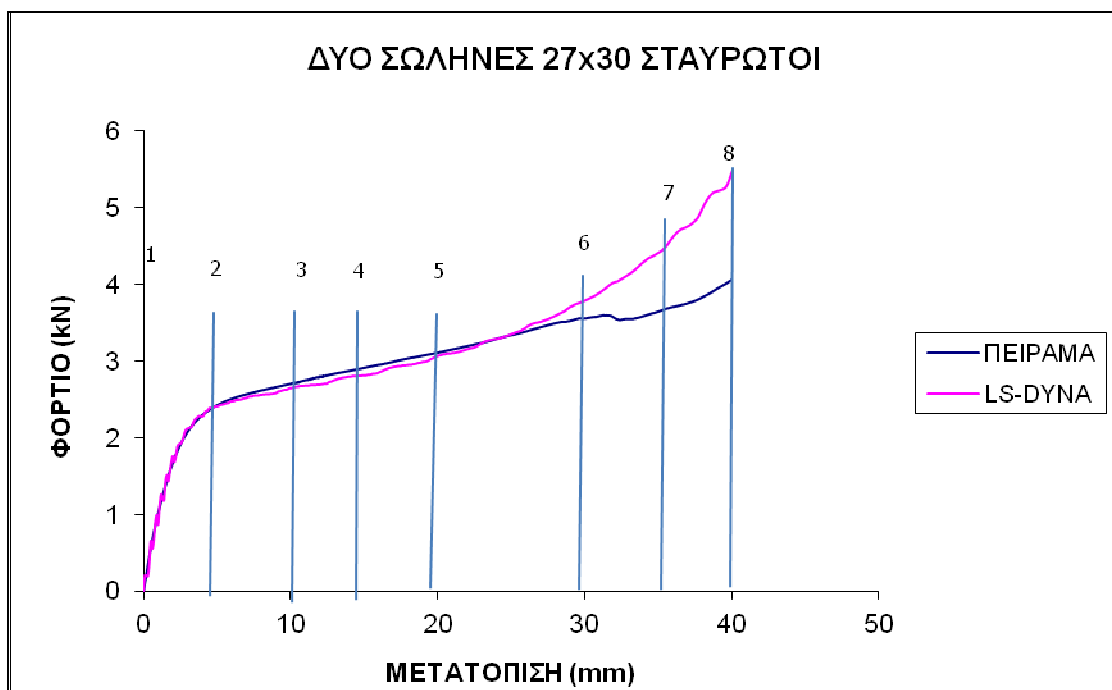




Σχήμα 3.16. Στιγμιότυπα των δοκιμών 27x30 (mm x mm), όπως έχουν ληφθεί από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση στον υπολογιστή.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις των δοκιμών παρατηρούμε και εδώ ότι τόσο στα πειραματικά δοκίμια όσο και στο υπολογιστικό μοντέλο, η κατάρρευση ξεκινάει από το ίδιο σημείο. Δεν παρατηρούνται αποκλίσεις μεταξύ των δύο διαδικασιών. Τα αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα, διότι είτε οι στέλειες των πειραματικών δοκιμών είναι ασήμαντες είτε γιατί αυτές προσομοιώθηκαν σωστά στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Η κατάρρευση ξεκινάει δημιουργώντας μη εκτατό λοβό και στις δύο περιπτώσεις (στιγμιότυπο 3).

Στο Σχήμα 3.17. παρουσιάζεται το διάγραμμα της καταπόνησης του δοκιμίου. Πάνω στο διάγραμμα απεικονίζονται οι χρόνοι στους οποίους αντιστοιχούν τα στιγμιότυπα του Σχήματος 3.16.



Σχήμα 3.17. Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης των σταυρωτά τοποθετημένων δοκιμών 27x30 mm

Ακολουθεί πίνακας με τις τιμές των μέσων και μέγιστων φορτίων του διαγράμματος και σύγκριση των τιμών αυτών (Πίνακας 3.6.)

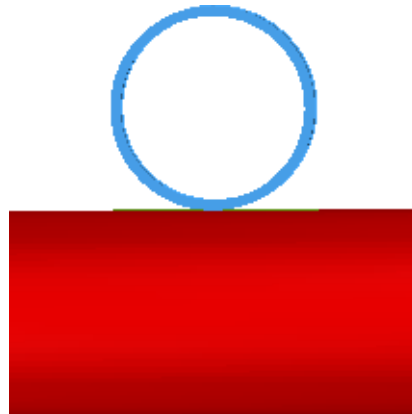
27x30 (2 σταυρ. σωλήνες)	Πειραματικό φορτίο (kN)		Φορτίο προσομοίωσης (kN)	
	Μέση Τιμή	Μέγιστο	Μέση Τιμή	Μέγιστο
	27.9	40.6	30.7	55.01

Πίνακας 3.6. Μέγιστα και μέσα φορτία του διαγράμματος.

Το φορτίο αυξάνει συνεχώς καθώς κατά την κατάρρευση ολοένα και μεγαλύτερο ποσοστό των διατομών όπου αλληλεπιδρούν συμμετέχει στη διαδικασία συμπίεσης. Η πριονωτή μορφή του διαγράμματος οφείλεται στην (περιφερειακή) διακριτοποίηση του κελύφους και την προκύπτουσα διαδοχική επαφή των πεπερασμένων στοιχείων του σωλήνα με τις πλάκες συμπίεσης κατά την παραμόρφωσή του. Δεν παρατηρείται θραύση στα δοκίμια, διότι το πάχος τους είναι μικρό. Οι καμπύλες που προέκυψαν ταυτίζονται για τα πρώτα 30 περίπου mm συμπίεσης και γενικά, η σύγκριση των φορτίων συμπίεσης προκύπτει πολύ ικανοποιητική. Η απόκλιση του φορτίου στην τελική φάση της παραμόρφωσης είναι μικρή, καθώς δεν οφείλεται σε διαμήκη θραύση των σωλήνων, όπως συνέβη σε εκείνους με μεγαλύτερο πάχος τοιχώματος. Εντούτοις, η απόκλιση μπορεί να αποδοθεί στη μη απολύτως συμμετρική (ως προς τον βαθμό) παραμόρφωσης των δύο αλληλεπιδρώντων σωλήνων, που έλαβε χώρα στην πειραματική διαδικασία (βλ. εικόνα 3.16 – 8). Ο κάτω σωλήνας δεν παραμορφώθηκε στον ίδιο βαθμό με αποτέλεσμα να μην καταγραφεί το αντίστοιχο τμήμα του φορτίου.

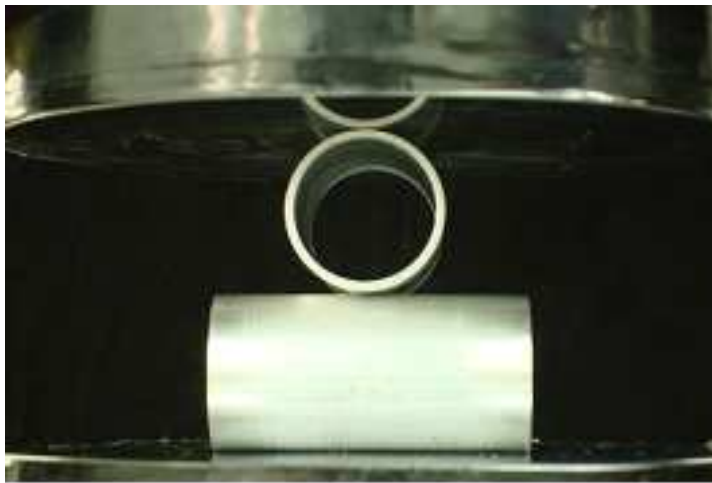
3.3.7. Προσομοίωση συστοιχίας δοκιμίων 27x30 (δύο παράλληλα τοποθετημένοι σωλήνες και ένας κάθετα σε αυτούς)

Στο Σχήμα 3.18. παρουσιάζονται τρία δοκίμια διαστάσεων διατομής 27x30 (mm x mm), πάχους 1,5mm και μήκους 60mm. Στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων εμφανίζονται ως ομοιογενή και ισότροπα.

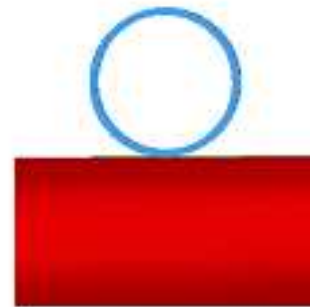


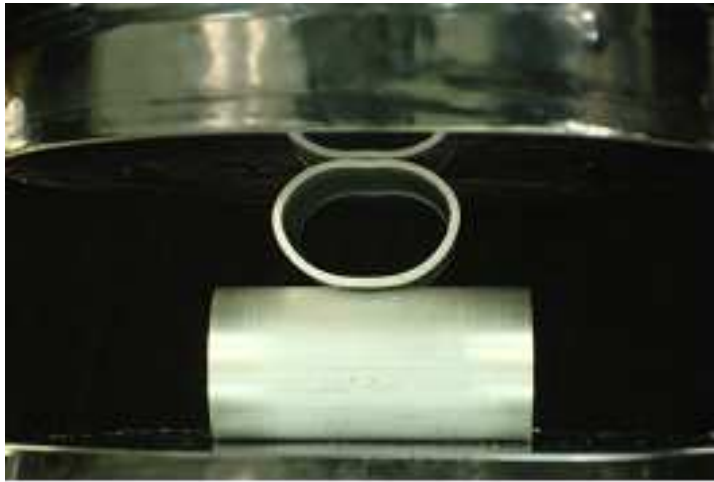
Σχήμα 3.18. Παρουσίαση δοκιμίων 27x30 (mm x mm) όπως προσομοιώνονται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

Η κατάρρευση των δοκιμίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.19. σε στιγμιότυπα της πειραματικής διαδικασίας καθώς και σε αντίστοιχα στιγμιότυπα από την προσομοίωση στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

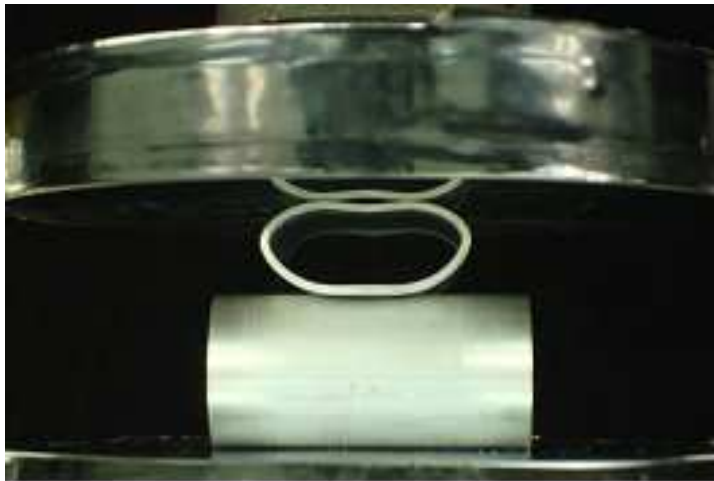
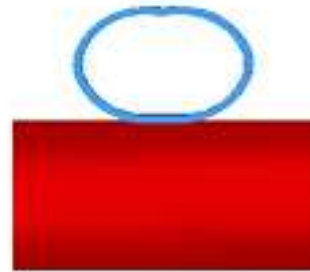


1

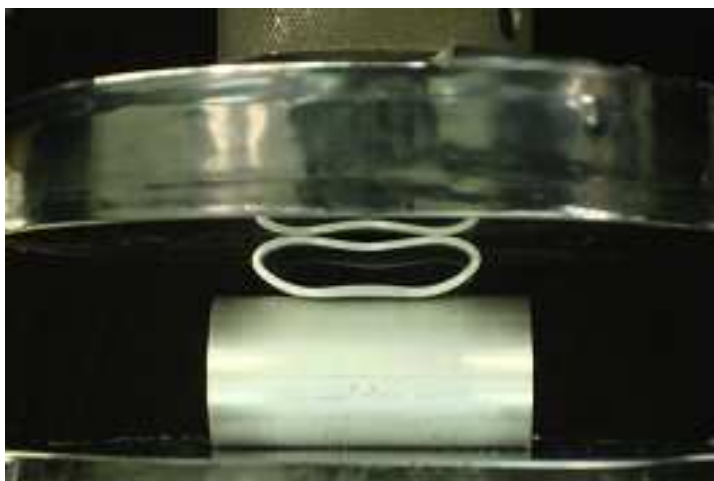
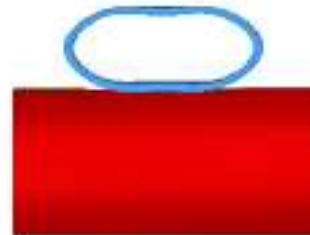




2

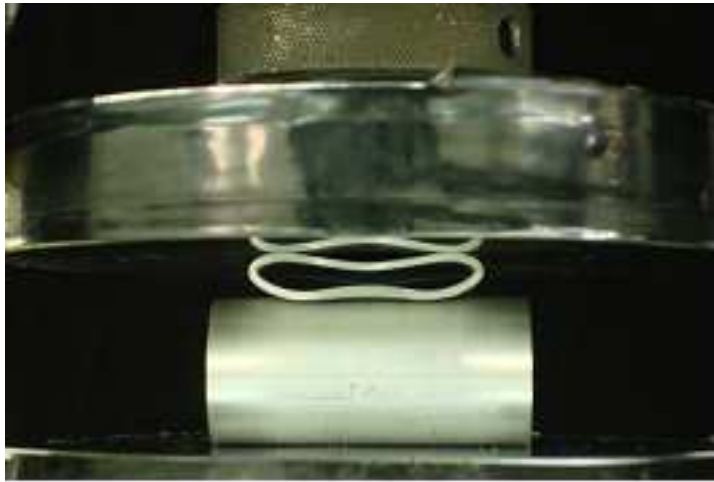


3

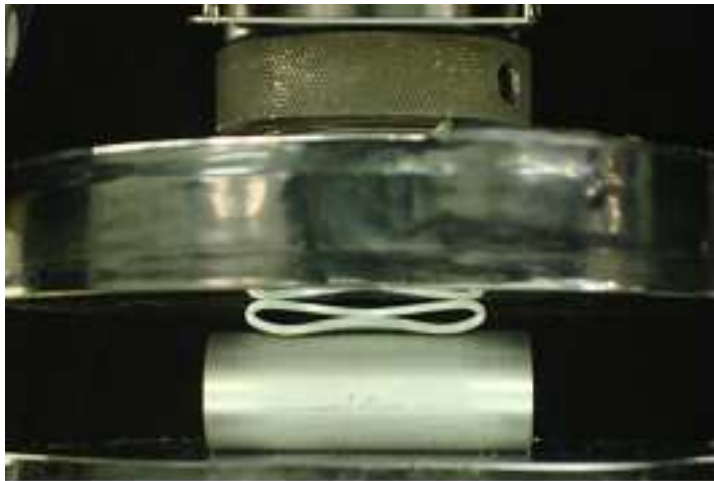


4

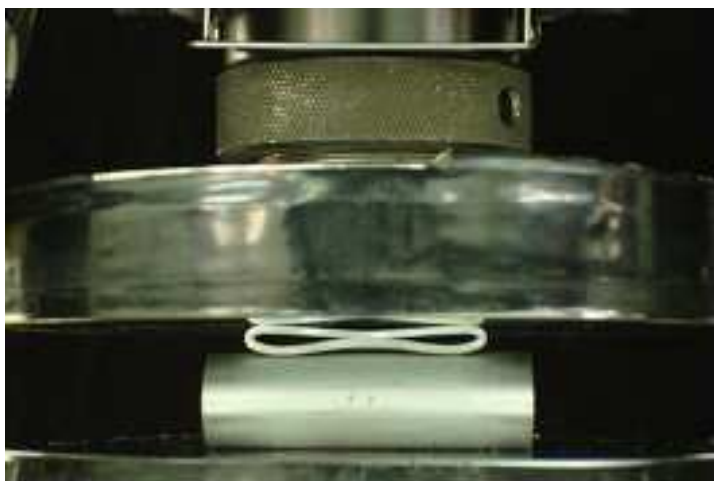




5

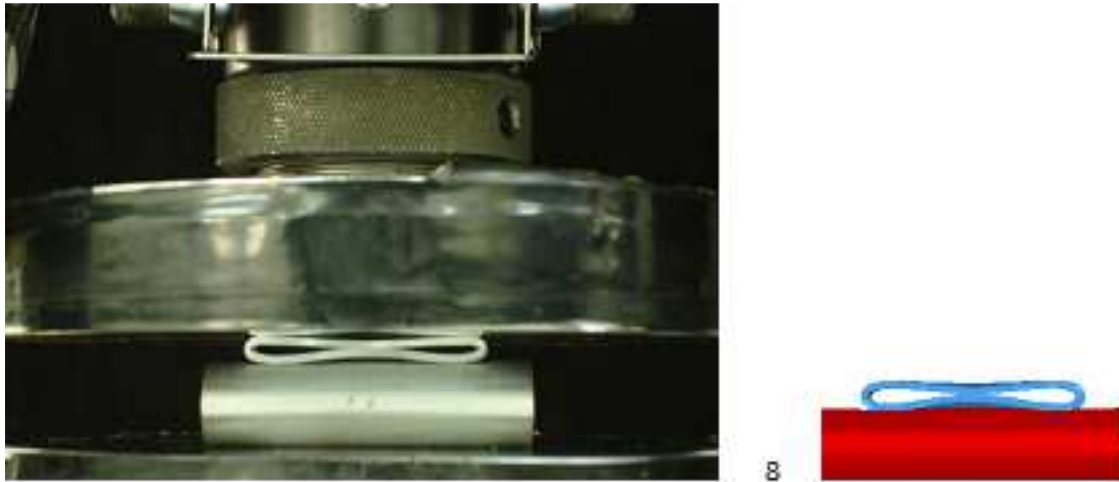


6



7

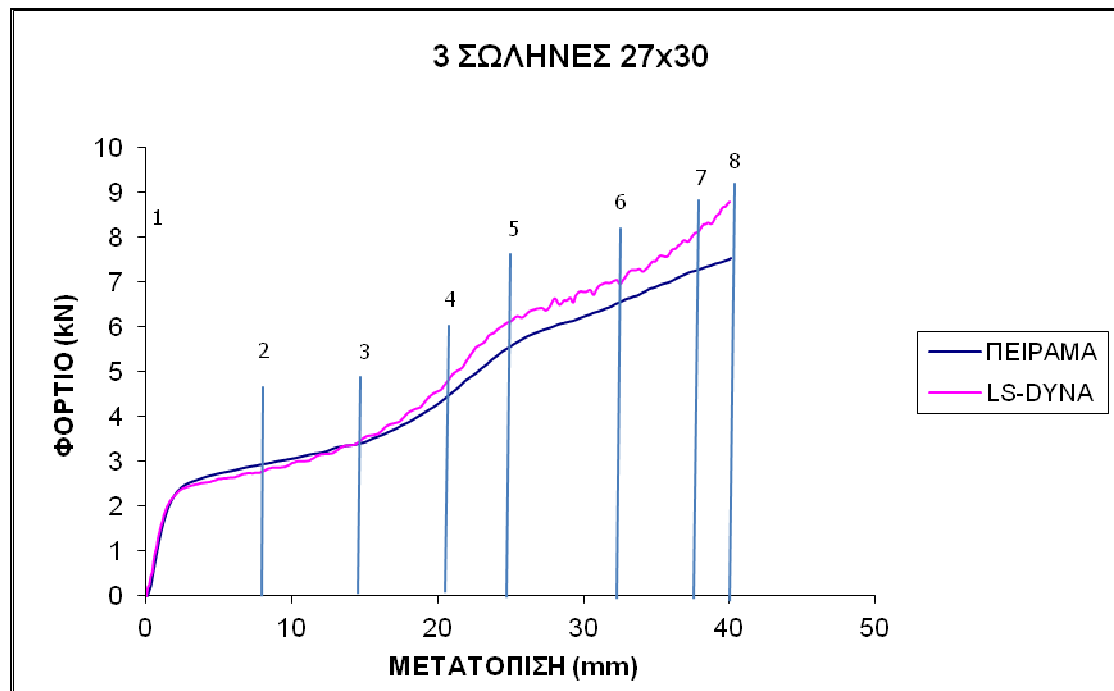




Σχήμα 3.19. Στιγμιότυπα των δοκιμίων 27x30 (mm x mm), όπως έχουν ληφθεί από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση στον υπολογιστή.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις των δοκιμίων παρατηρούμε και εδώ ότι τόσο στα πειραματικά δοκίμια όσο και στο υπολογιστικό μοντέλο, η κατάρρευση ξεκινάει από το ίδιο σημείο. Τα αποτελέσματα των δύο διαδικασιών είναι πανομοιότυπα, διότι είτε οι ατέλειες των πειραματικών δοκιμίων είναι ασήμαντες είτε γιατί αυτές προσομοιώθηκαν σωστά στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Η κατάρρευση ξεκινάει δημιουργώντας μη εκτατό λοβό και στις δύο περιπτώσεις (στιγμιότυπο 2). Παρατηρείται ότι πρώτα παραμορφώνεται ο πάνω (μονός) σωλήνας (στιγμιότυπο 5), που αποτελεί το ασθενέστερο τμήμα της συστοιχίας. Το κάτω ζεύγος σωλήνων αρχίζει να παραμορφώνεται όταν έχει εξαντληθεί η δυνατή παραμόρφωση του άνω μονού σωλήνα.

Στο Σχήμα 3.20. παρουσιάζεται το διάγραμμα της καταπόνησης του δοκιμίου. Πάνω στο διάγραμμα απεικονίζονται οι χρόνοι στους οποίους αντιστοιχούν τα στιγμιότυπα του Σχήματος 3.19.



Σχήμα 3.20. Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης των τριών δοκιμών διαστάσεων 27x30 mm

Ακολουθεί πίνακας με τις τιμές των μέσων και μέγιστων φορτίων του διαγράμματος και σύγκριση των τιμών αυτών (Πίνακας 3.7.)

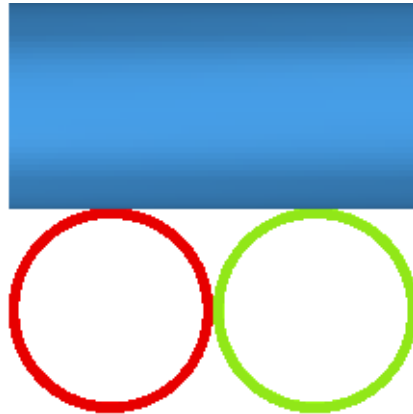
27x30 (3 σωλήνες)	Πειραματικό φορτίο (kN)		Φορτίο προσομοίωσης (kN)	
	Μέση Τιμή	Μέγιστο	Μέση Τιμή	Μέγιστο
	38.1	75.2	47,2	87.7

Πίνακας 3.7. Μέγιστα και μέσα φορτία του διαγράμματος.

Το φορτίο αυξάνει συνεχώς καθώς κατά την κατάρρευση ολοένα και μεγαλύτερο ποσοστό των διατομών όπου αλληλεπιδρούν συμμετέχει στη διαδικασία συμπίεσης. Η προιονωτή μορφή του διαγράμματος οφείλεται στην (περιφερειακή) διακριτοποίηση του κελύφους και την προκύπτουσα διαδοχική επαφή των πεπερασμένων στοιχείων του σωλήνα με τις πλάκες συμπίεσης κατά την παραμόρφωσή του. Δεν παρατηρείται θραύση στα δοκίμια, διότι το πάχος τους είναι μικρό. Ο σωλήνας που έχει τοποθετηθεί κάθετα επάνω στους δύο άλλους σωλήνες παραμορφώνεται ολικά σε μήκος συμπίεσης μικρότερο των 30mm (διάμετρος του σωλήνα). Αυτό είναι λογικό και αναμενόμενο να συμβεί, διότι η διατομή ενός σωλήνα είναι ασθενέστερη από τη διατομή δύο σωλήνων. Τα δύο παράλληλα κελύφη ξεκινούν να παραμορφώνονται από το σημείο αυτό.

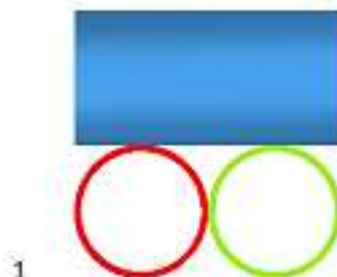
3.3.8. Προσομοίωση συστοιχίας δοκιμών 27x30

Στο Σχήμα 3.21. παρουσιάζονται τα τέσσερα δοκίμια διαστάσεων διατομής 27x30 (mm x mm), πάχους 1,5mm και μήκους 60mm. Στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων εμφανίζονται ως ομοιογενή και ισότροπα.



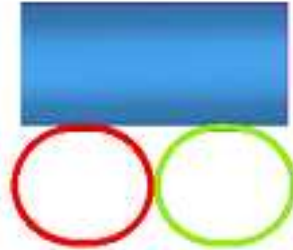
Σχήμα 3.21. Παρουσίαση δοκιμών 27x30 (mm x mm) όπως προσομοιώνονται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

Η κατάρρευση των δοκιμών παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.22. σε στιγμιότυπα της πειραματικής διαδικασίας καθώς και σε αντίστοιχα στιγμιότυπα από την προσομοίωση στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

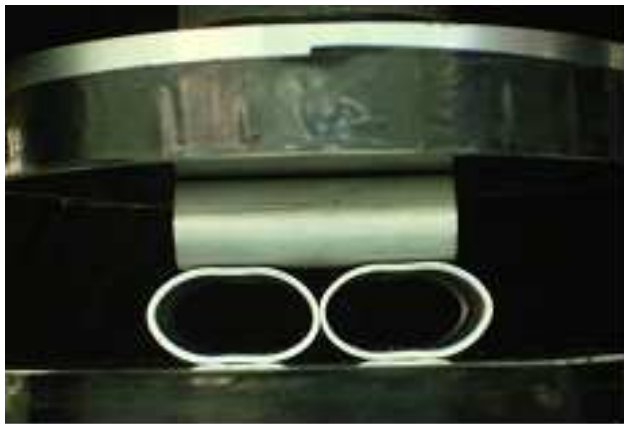
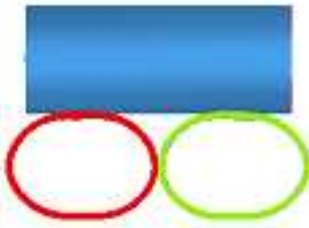




2

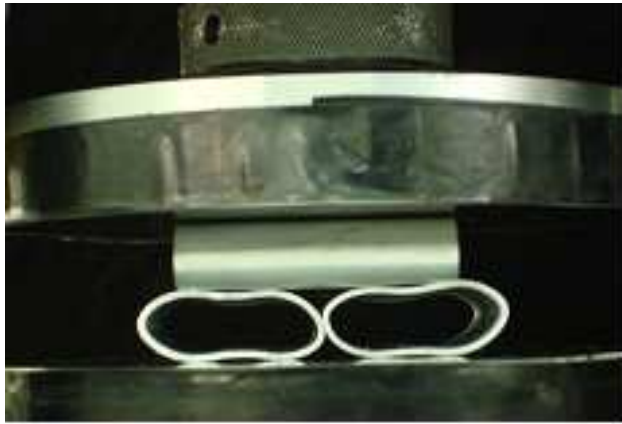


3

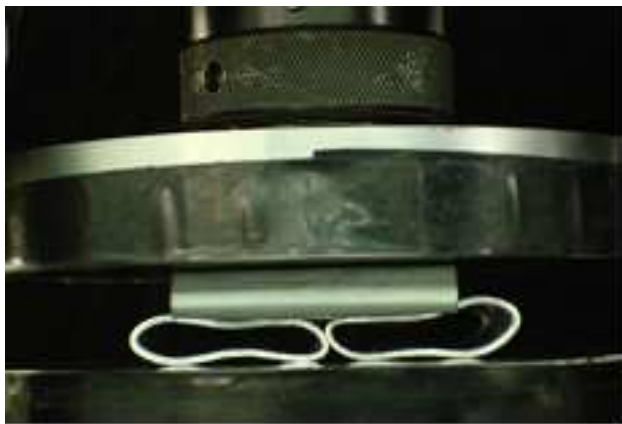


4





5



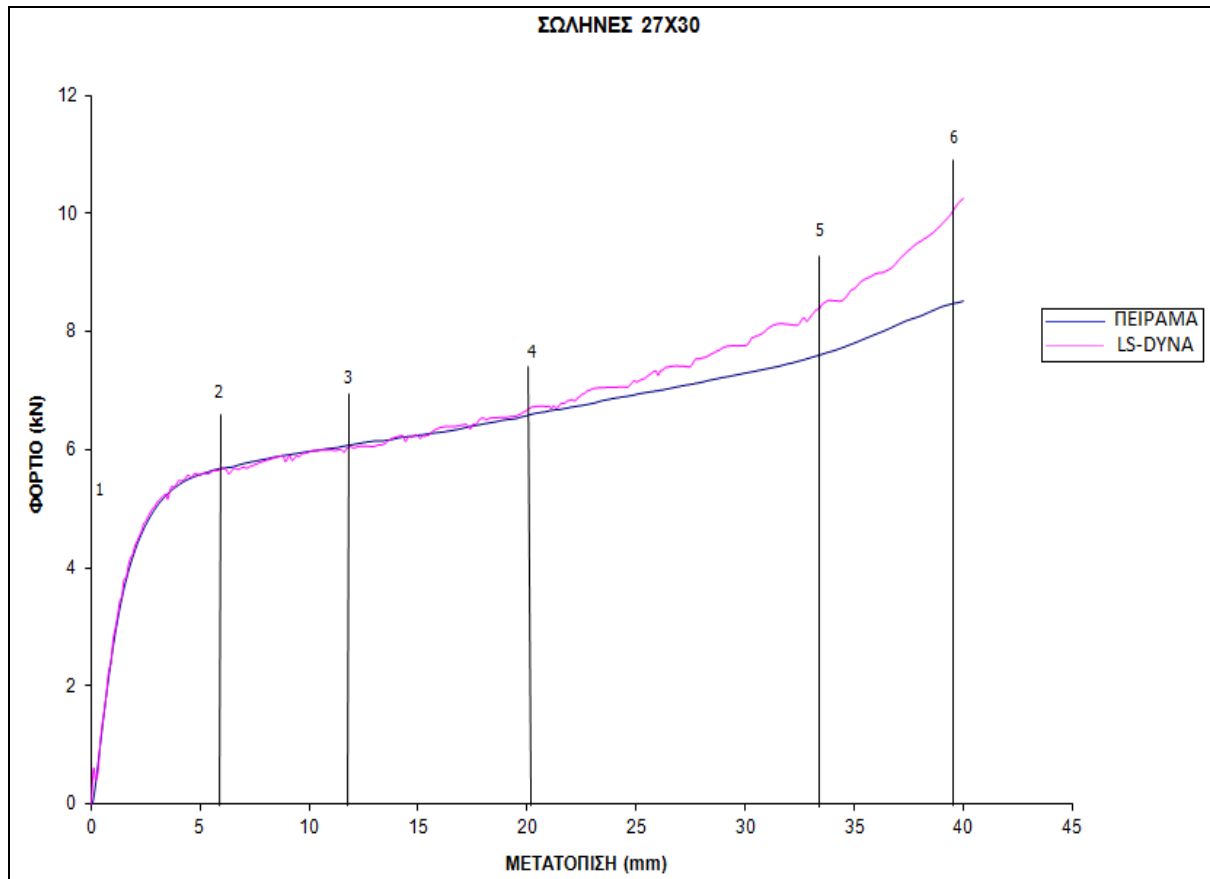
6



Σχήμα 3.22. Στιγμιότυπα των 2 δοκιμίων 27x30 (mm x mm), όπως έχουν ληφθεί από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση στον υπολογιστή.

Παρατηρούμε και εδώ ότι τόσο στα πειραματικά δοκίμια όσο και στο υπολογιστικό μοντέλο, η κατάρρευση ξεκινάει από το ίδιο σημείο. Δεν παρατηρούνται αποκλίσεις μεταξύ των δύο διαδικασιών. Τα αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα, διότι είτε οι στέλειες των πειραματικών δοκιμίων είναι ασήμαντες είτε γιατί αυτές προσομοιώθηκαν σωστά στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Η κατάρρευση ξεκινάει δημιουργώντας μη εκτατό λοβό και στις δύο περιπτώσεις (στιγμιότυπο 2).

Στο Σχήμα 3.23. παρουσιάζεται το διάγραμμα της καταπόνησης του δοκιμίου. Πάνω στο διάγραμμα απεικονίζονται οι χρόνοι στους οποίους αντιστοιχούν τα στιγμιότυπα του Σχήματος 3.22.



Σχήμα 3.23. Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης των τεσσάρων δοκιμών διαστάσεων 27x30 mm

Ακολουθεί πίνακας με τις τιμές των μέσων και μέγιστων φορτίων του διαγράμματος και σύγκριση των τιμών αυτών (Πίνακας 3.8.)

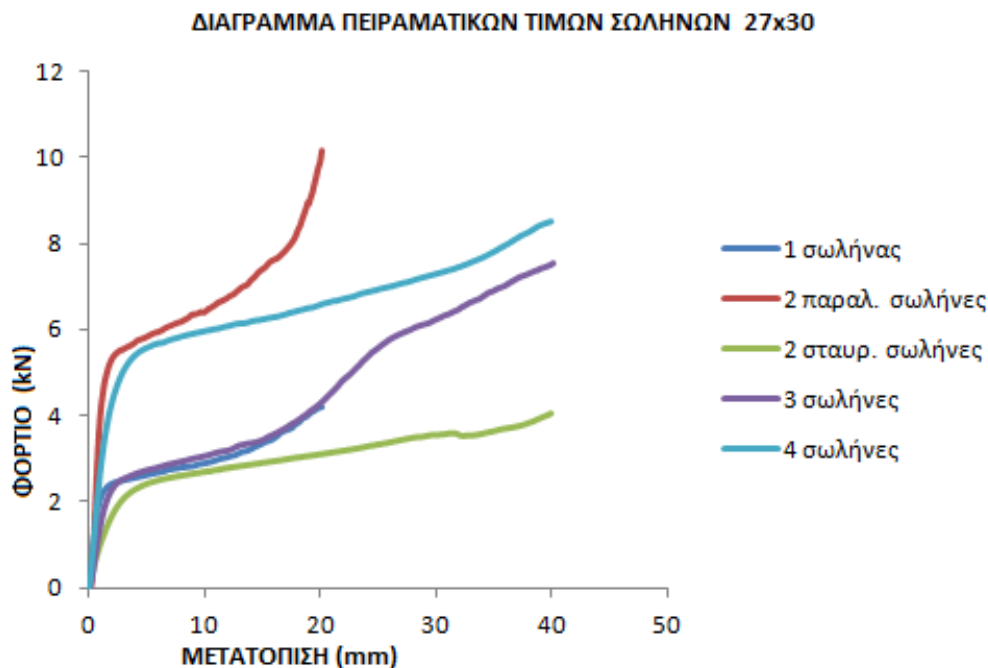
27x30	Πειραματικό φορτίο (kN)		Φορτίο προσομοίωσης (kN)	
	Μέση Τιμή	Μέγιστο	Μέση Τιμή	Μέγιστο
	64,7	85.3	66.01	102.6

Πίνακας 3.8. Μέγιστα και μέσα φορτία του διαγράμματος.

Το φορτίο αυξάνει συνεχώς καθώς κατά την κατάρρευση ολοένα και μεγαλύτερο ποσοστό των διατομών όπου αλληλεπιδρούν συμμετέχει στη διαδικασία συμπίεσης. Η προιοντική μορφή του διαγράμματος οφείλεται στην (περιφερειακή) διακριτοποίηση του κελύφους και την προκύπτουσα διαδοχική επαφή των πεπερασμένων στοιχείων του σωλήνα με τις πλάκες συμπίεσης κατά την παραμόρφωσή του. Δεν παρατηρείται θραύση στα δοκίμια, διότι το πάχος τους είναι μικρό και γενικά, η σύγκριση των φορτίων συμπίεσης προκύπτει πολύ ικανοποιητική.

3.3.9. Γενική σύγκριση (πειραματική) δοκιμών 27x30

Ακολουθεί το συγκεντρωτικό διάγραμμα των πειραματικών τιμών των κελυφών με διαστάσεις 27x30.



Σχήμα 3.24. Συνολικό διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης των πειραματικών τιμών των δοκιμών διαστάσεων 27x30 mm

Οι επισημάνσεις που μπορούν να διατυπωθούν με βάση το παραπάνω (συνολικό) διάγραμμα είναι οι ακόλουθες:

- Σύγκριση περιπτώσεων ενός σωλήνα με δύο διασταυρούμενους σωλήνες.** Για την ίδια μετατόπιση του εμβόλου η αντίστοιχη παραμόρφωση λαμβάνει χώρα σε ολόκληρο στον σωλήνα (1 σωλήνας) ή κατανέμεται στους δύο διασταυρούμενους σωλήνες. Επίσης – στην πρώτη περίπτωση- ο σωλήνας καταρρέει καθ' όλο το μήκος του (ομοιόμορφα) λόγω της αμφίπλευρης επαφής με τις επίπεδες οριζόντιες πλάκες συμπίεσης.

Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρείται ομοιόμορφη κατάρρευση και των δύο σωλήνων στην πλευρά επαφής τους με τις πλάκες συμπίεσης και κυρίως συγκεντρωμένη κατάρρευση (αρχικά σημειακή επαφή και τοπική παραμόρφωση (denting)) στη μεταξύ τους ζώνη επαφής. Για τους παραπάνω λόγους παρατηρείται λίγο μικρότερο φορτίο στη δεύτερη περίπτωση (και μέχρι το ίδιο μήκος συμπίεσης -20mm).

- Σύγκριση περιπτώσεων ενός σωλήνα με δύο παράλληλα τοποθετημένους σωλήνες.** Είναι αναμενόμενο στη δεύτερη περίπτωση το ακριβώς διπλάσιο φορτίο, μιας και οι δύο παράλληλοι σωλήνες δεν αλληλεπιδρούν.

- **Σύγκριση περιπτώσεων δύο σταυρωτών σωλήνων με τέσσερις (ανά δύο διασταυρούμενους) σωλήνες.** Είναι αναμενόμενο το φορτίο στη δεύτερη περίπτωση να είναι διπλάσιο, εφ' όσον ουσιαστικά επαναλαμβάνεται η πρώτη αλληλεπίδραση (διάταξη) δύο φορές.
- **Σύγκριση περιπτώσεων δύο παράλληλων σωλήνων με τέσσερις (ανά δύο διασταυρούμενους) σωλήνες.** Η διαφορά στο φορτίο οφείλεται στους μηχανισμούς που περιγράφηκαν στην πρώτη επισήμανση (αντίστοιχα φαινόμενα).
- **Σύγκριση περιπτώσεων ενός σωλήνα με τρεις σωλήνες.** Παρατηρείται σχεδόν ταύτιση του φορτίου καθώς στην περίπτωση των τριών σωλήνων (μέχρι τα 20mm συμπίεσης) καταρρέει αποκλειστικά ο μονός (επάνω) σωλήνας (στιγμιότυπα 2-5) ως πιο ασθενές τμήμα (σε σχέση με τους δύο παράλληλους) μιας συνολικής εν σειρά (κατά τη διεύθυνση της φόρτισης) κατασκευής. Ουσιαστικά δηλαδή είναι σαν οι δύο παράλληλοι σωλήνες να λειτουργούν ως προέκταση της κάτω πλάκας συμπίεσης και τελικά να συμπιέζεται πλήρως μόνο ο επάνω σωλήνας (ίδιες συνθήκες με αυτές της συμπίεσης του μονού σωλήνα).
- Για τους παραπάνω λόγους αναμενόμενη είναι και η διακύμανση του φορτίου στην περίπτωση των τριών σωλήνων σε σχέση με τα φορτία που κατεγράφησαν στους δύο διασταυρούμενους και τους τέσσερις (ανά δύο διασταυρούμενους) σωλήνες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΧΟΛΙΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στα θεωρητικά μοντέλα που μελετήθηκαν η γεωμετρία, η διάταξη, οι διαστάσεις, οι συνοριακές συνθήκες (τριβές), οι ιδιότητες και η ποιότητα των υλικών καθώς και η διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου θεωρούνται εξιδανικευμένα.

Οι τρόποι κατάρρευσης είναι ομαλοί, ελεγχόμενοι και προοδευτικοί, ενώ τα απορροφούμενα ποσά ενέργειας είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά, αφού οι καμπύλες του φορτίου συμπίεσης προκύπτουν ομαλές (χωρίς τις διακυμάνσεις των περιπτώσεων αξονικής καταπόνησης κελυφών) και μονότονα αυξανόμενες. Επιπλέον, η αριθμητική προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (κώδικας LS-DYNA) αποδείχτηκε ιδιαίτερα ικανοποιητική ως προς την πρόβλεψη της απόκρισης των συγκεκριμένων συστημάτων απορρόφησης ενέργειας.

Η υψηλή απόδοση της συμπεριφοράς των συστοιχιών κυλινδρικών σωλήνων σε πλευρική κατάρρευση προκαλεί το ενδιαφέρον διερεύνησης της απόκρισης και συστοιχιών κελυφών διαφορετικής γεωμετρίας διατομής (π.χ. ορθογωνικές, εξαγωνικές, κυψελωτές και συνδυασμοί τους). Επιπλέον ενδιαφέρον θα είχε και η ενσωμάτωση πιθανών μηχανισμών θραύσης / συστοιχίας των κατασκευών αυτών κατά την διαδικασία μοντελοποίησης τους με κώδικες πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να αποδοθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η κατάρρευσή τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Watson AR, Reid SR, Johnson W. Large deformations of thin-walled circular tubes under transverse loading–III. *International Journal Of Mechanical Sciences* 1976, 18, 501-509.
- [2] Watson AR, Reid SR, Johnson W. Large deformations of thin-walled circular tubes under transverse loading–II. *International Journal Of Mechanical Sciences* 1976, 18, 387-397.
- [3] Mutchler LD. Energy absorption of aluminum tubing. *Transactions of ASME, Journal of Applied Mechanics* 1960, 27, 740-743.
- [4] DeRuntz JA, Hodge PG. Crushing of a tube between rigid plates. *Transactions of ASME, Journal of Applied Mechanics* 1963, 30, 391-395.
- [5] Johnson W. *Impact Strength of Material*. London, Arnold, 1972.
- [6] Reid SR, Reddy TY. Effect of strain hardening on the lateral compression of tubes between rigid plates. *International Journal of Solids and Structures* 1978, 14, 213-225.
- [7] Wierzbicki, T, Abramowicz W. *Manual Of Crashworthiness Engineering*, 1988 (Center for Transportation Studies, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts)
- [8] Burton R.H, Craig J.M. an investigation into the energy absorbing properties of metal tubes loaded in the transverse direction. BSc report, University of Bristol, Bristol, 1963.
- [9] Sherbourne A.N, Lu F. strain hardening in the moving hinge method. *Int. J. Solids and Structs*, 1993, 30, 3475-3489.
- [10] Ι. Αντωνιάδης & Χρ. Προβατιδής. *ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ*, Αθήνα 2004, Εκδόσεις ΕΜΠ.
- [11] BATHE KJ, Upper Saddle River. *FINITE ELEMENT PROCEDURES*, NJ: Prentice – Hall; 1996.
- [12] Zienkiewicz OC, Taylor RL. *FINITE ELEMENT METHOD*, 4th Edition, London: McGraw – Hill Book Company Europe; 1997.
- [13] *Journal Of Applied Mechanics*, December 1960, 740, 741
- [14] T. Yella Reddy, S.R. Reid. On Obtaining Material Properties From The Ring Compression Test. University Engineering Department, Trumping Street, Cambridge CB2 1 PZ, UK. *Nuclear Engineering and Design* 52 (1979), 257-263. North Holland Publishing Company
- [15] T. Yella Reddy, S.R. Reid. Phenomena Associated With The Crushing Of Metal Tubes Between Rigid Plates. University Engineering Department, Trumping Street, Cambridge CB2 1 PZ, UK. (Received 18 April 1979; received for publication 8 September 1979). *Int. J. Solids Structures* Vol. 16. pp. 545-562. Pergamon Press Ltd. 1980 Printed in Great Britain.

- [16] A. R. Watson, S. R. Reid, W. Johnson and S. G. Thomas. Large Deformations Of Thin Walled Circular Tubes Under Transverse Loading – II. University of Manchester Institute of Science and Technology, Sackville Street, Manchester, England. Int. J. mech. Sci. Pergamon Press, 1976. Vol 18, pp. 387-397
- [17] M. Avalle and L. Goglio (Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italy). Static Lateral Compression Of Aluminium Tubes: Strain Gauge Measurements And Discussion Of Theoretical Models (the Ms was received on 12 June 1996 and was accepted for publication on 23 May 1997)., Journal Of Strain Analysis Vol 32 No 5, 335-343