



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

**Αξονική κατάρρευση συστήματος ομοαξονικών
μεταλλικών σωλήνων:
Πειραματική μελέτη και αριθμητική προσομοίωση**

Axial collapse of a system of coaxial metallic tubes:
Experimental study and numerical simulation

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
του Μουσταφά Αντώνιου-Ιάντ

Επιβλέπων: Μανωλάκος Δημήτριος (Καθηγητής Ε.Μ.Π.)

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

**Αξονική κατάρρευση συστήματος ομοαξονικών
μεταλλικών σωλήνων:
Πειραματική μελέτη και αριθμητική προσομοίωση**

Axial collapse of a system of coaxial metallic tubes:
Experimental study and numerical simulation

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του Μουσταφά Αντώνιου-Ιάντ

Επιβλέπων: Μανωλάκος Δημήτριος (Καθηγητής Ε.Μ.Π.)

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Οκτωβρίου 2017.

- 1) Μανωλάκος Δημήτριος (καθηγητής Ε.Μ.Π.)
- 2) Βοσνιάκος Γεώργιος-Χριστόφορος (καθηγητής Ε.Μ.Π.)
- 3) Μαρκόπουλος Άγγελος (επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.)

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Δ. Μανωλάκο για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω στο εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Ε.Μ.Π. Συνεχίζοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Μηχ. Π. Κωστάζο (ΕΔΙΠ) για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και τις συμβουλές του για τη διπλωματική μου εργασία και τον Τεχνικό του Εργαστηρίου, κ. Ν. Μελισσά για την κατασκευή των δοκιμίων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αλουμίνιο και τα κράματά του αποτελούν κάποια από τα πλέον ευρύτατα χρησιμοποιούμενα μεταλλικά υλικά, με ποικίλες τεχνολογικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Από πλευράς μηχανικών ιδιοτήτων δεν παρουσιάζει αυξημένη μηχανική αντοχή αφού με την άσκηση σχετικά χαμηλών τάσεων παραμορφώνεται πλαστικά. Ωστόσο, η επιτακτική ανάγκη στις μέρες μας για ελαφρές κατασκευές και υλικά υψηλότατων απαιτήσεων, οδήγησε στην ανάπτυξη διαφόρων κραμάτων του αλουμινίου.

Οι μεταλλικές δομές λεπτού πάχους (κελύφη) χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη βιομηχανία, οπότε κρίνεται σκόπιμο να διερευνηθεί περαιτέρω η αντοχή τους, η ικανότητα τους να απορροφούν ενέργεια και ο τρόπος κατάρρευσης διαφορετικού είδους δοκιμίων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται συστήματα ομοαξονικών σωλήνων (δοκιμίων) αλουμινίου για να αναλυθεί ο τρόπος κατάρρευσης τους και να διαπιστωθεί κατά πόσο θα επηρεαστεί η αντοχή τους σε θλιπτικά φορτία. Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς κατάρρευσης των ζευγών δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων, LS-DYNA και έγινε λεπτομερής σύγκριση με τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διενεργήσαμε και εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: κυλινδρικό δοκίμιο, ζεύγος δοκιμίων, απορροφητής ενέργειας, πλαστικός αρμός, αξονική κατάρρευση, οιονεί στατική καταπόνηση, Ls-Dyna.

ABSTRACT

Aluminum and its alloys are some of the most widely used metallic materials, with a variety of industrial applications. In terms of mechanical properties, it does not exhibit high mechanical strength since, with the application of relatively low stresses, it deforms plastically. However, the urgent need for lightweight and high grade materials has led to the development of various aluminum alloys.

Metallic thin-walled structures are extensively used in many types of industries, so it is necessary to further investigate their strength, ability to absorb energy and way of collapse of different types of specimens.

In this Diploma thesis, systems of coaxial cylindrical aluminum tubes are being studied to analyze how they collapse and to see whether their compressive strength will be affected. The finite element code, LS-DYNA, was used to simulate the crushing behavior of the couples of tubes and a detailed comparison was conducted between real experiments and the numerical simulation and useful concluding remarks were drawn.

KEYWORDS: cylindrical tube, pair of tubes, couple of tubes, energy absorber, plastic hinge, axial crushing, quasi-static loading, Ls-Dyna.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1. Αλουμίνιο	9
1.1.1. Γενικά για το αλουμίνιο	9
1.1.2. Ιδιότητες αλουμινίου.....	9
1.1.3. Χρήσεις του αλουμινίου	11
1.1.4. Κράματα αλουμινίου	12
1.2. Συμπεριφορά έναντι πρόσκρουσης (crashworthiness)	16
1.3. Απορροφητές ενέργειας (energy absorbers).....	16
2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – ΚΩΔΙΚΑΣ LS-DYNA	19
2.1. Γενικά	19
2.2. LS-DYNA.....	20
3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ	23
3.1. Ανόπτηση.....	23
3.2. Ροπή πλήρους πλαστικοποίησης (M_p).....	25
3.3. Πλαστικός αρμός (plastic hinge)	26
3.4. Τρόποι κατάρρευσης μεταλλικών κελυφών	27
3.4.1. Γενικά.....	27
3.4.2. Αξονοσυμμετρική κατάρρευση	28
3.4.3. Μη αξονοσυμμετρική κατάρρευση.....	30
3.4.4. Μικτός τρόπος κατάρρευσης	30
3.4.5. Λυγισμός.....	31
3.5. Οιονεί στατική φόρτιση (Quasi-static loading)	32
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	35
4.1. Γενικά	35
4.2. Σκοπός πειραματικής διαδικασίας.....	35
4.3. Περιγραφή και ονοματολογία δοκιμίων	35

4.4. Πειραματική διάταξη.....	39
4.5. Πειραματικές συνθήκες.....	41
5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ & ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	
43	
5.1. Γενικά.....	43
5.2. Πειραματικά μοντέλα.....	43
5.2.1. Γενικά.....	43
5.2.2. (40x1.5 & 35x2)_Y1.....	44
5.2.3. (35x2 & 25x2)_Y1.....	53
5.2.4. (40x1.5 & 25x2)_Y2.....	60
5.2.5. (35x3 & 25x2)_Y2.....	68
5.2.6. Σχολιασμός.....	74
5.3. Σύγκριση πειραματικών-αριθμητικών αποτελεσμάτων.....	80
5.3.1. Γενικά.....	80
5.3.2. (40x1.5 & 35x2)_Y1n.....	82
5.3.3. (35x2 & 25x2)_Y1n.....	87
5.3.4. (40x1.5 & 25x2)_Y2n.....	92
5.3.5. (35x3 & 25x2)_Y2n.....	97
5.3.6. Σχολιασμός.....	100
5.4. Πρόσθετα αριθμητικά μοντέλα (Παραμετρική ανάλυση).....	106
5.5. Επιλεγμένα αριθμητικά μοντέλα μεγαλύτερης ακρίβειας.....	118
5.6. Συμπεράσματα.....	121
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	123
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	125

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

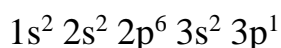
1.1 Αλουμίνιο

1.1.1. Γενικά για το αλουμίνιο

Το αλουμίνιο είναι ένα μέταλλο με ευρεία εφαρμογή σε πολλούς τομείς (κατασκευή κτηρίων, αυτοκινητοβιομηχανία, ναυπηγική, αεροπορική και αεροδιαστημική βιομηχανία, κατασκευή στρατιωτικού εξοπλισμού, παρασκευή συσκευασιών τροφίμων) και αυτό οφείλεται στο χαμηλό του κόστος παραγωγής καθώς και στις πολύ καλές φυσικές του ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα το αλουμίνιο είναι ένα ελαφρύ μέταλλο με καλή αντοχή στη διάβρωση, σε ατμοσφαιρικές συνθήκες όσο και στο νερό (συμπεριλαμβανομένου του θαλασσινού νερού), όπως και σε διαφόρων τύπων χημικών ουσιών και λαδιών.

Είναι το πιο άφθονο μέταλλο στο φλοιό της γης, αποτελώντας το 8% του βάρους του. Είναι δύσκολο να βρεθεί ελεύθερο στη φύση εξαιτίας της έντονης δραστηρότητας του και γι' αυτό το λόγο βρίσκεται ενωμένο σε πάνω από 270 ορυκτά, με την κύρια πηγή για τη βιομηχανική παραγωγή του να προέρχεται από την επεξεργασία του βωξίτη.

Το αλουμίνιο είναι χημικό στοιχείο με σύμβολο Al και ατομικό αριθμό 13. Η ηλεκτρονιακή διαμόρφωση του είναι:



,οπότε συμπεραίνουμε ότι ανήκει στην 13^η (δέκατη τρίτη) ομάδα του Περιοδικού Πίνακα, στην 3^η (τρίτη) περίοδο και στον τομέα p. Έχει ατομικό βάρος λίγο μεγαλύτερο από 26,98 και πυκνότητα 2,7g/cm³, ενώ το σημείο τήξης του είναι περίπου 660,32 °C και το σημείο βρασμού περίπου 2519 °C.

1.1.2. Ιδιότητες αλουμινίου

Το αλουμίνιο είναι σχετικά μαλακό, ανθεκτικό και εύπλαστο, ενώ το χρώμα του είναι συνήθως ασημένιο που ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας του φτάνει το σκούρο γκρι. Ένα καινούργιο φύλλο αλουμινίου που δεν έχει προλάβει να οξειδωθεί η επιφάνεια του, ανακλά πολύ καλά τα χρώματα του φωτεινού φάσματος (σε ποσοστό περίπου 92%) και εξαιρετικά την υπέρυθη ακτινοβολία (98%).

Η υψηλή αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις για τόσο χαμηλό βάρος ανά μονάδα όγκου και η εξαιρετική του αντοχή σε διάβρωση, έχει καταστήσει το αλουμίνιο πολύ σημαντικό στη βιομηχανία και στις κατασκευές. Βέβαια η αντοχή του είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με το χάλυβα (περίπου το 1/3) και στην καθαρή του μορφή είναι αρκετά μαλακό και όλκιμο. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, προστίθενται διάφορα στοιχεία όπως χαλκός, μαγνήσιο, μαγγάνιο, πυρίτιο, κασσίτερος, ψευδάργυρος κ.ά. (σε διάφορα ποσοστά) δημιουργώντας μεγάλη ποικιλία στις «σειρές» αλουμινίου και επιτυγχάνοντας θεαματική βελτίωση στις μηχανικές του ιδιότητες.

Είναι καλός αγωγός της θερμότητας και του ηλεκτρισμού, έχοντας το 59% της αγωγιμότητας του χαλκού (θερμική και ηλεκτρική) αλλά μόνο το 30% της πυκνότητάς του. Σε καθαρή κατάσταση, το αλουμίνιο, φέρεται σε εύκαμπτες πλάκες ή σε σκόνη, που όταν καίγεται σε ατμόσφαιρα οξυγόνου παράγουν έντονο φως (λυχνία αλουμινίου). Είναι πολύ ανθεκτικό στη διάβρωση, πράγμα που οφείλεται στον άμεσο σχηματισμό ενός λεπτού, επιφανειακού στρώματος οξειδίου του που εμποδίζει τη βαθύτερη διάβρωσή του (φαινόμενο της παθητικοποίησης). Πάντως, τα πιο ισχυρά κράματα αλουμινίου είναι λιγότερο ανθεκτικά στη διάβρωση εξαιτίας της παρουσίας χαλκού. Δεν προσβάλλεται από το νιτρικό οξύ σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, αλλά αντιδρά έντονα με το υδροχλωρικό και το υδροφθορικό οξύ με καταστροφικές συνέπειες για αυτό.

Διαθέτει 6 ραδιενεργά ισότοπα, από τα οποία μόνο το ^{27}Al είναι ευσταθές και βρίσκεται σε κάποιους μετεωρίτες, στους οποίους παράγεται από την κοσμική ακτινοβολία, ενώ χάρη στο μεγάλο χρόνο υποδιπλασιασμού του χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ραδιενέργειας ως πρότυπο και σε έρευνες της διάβρωσης κραμάτων.

	Αλουμίνιο	Χάλυβας	Μαγνήσιο	Τιτάνιο
Πυκνότητα (g/cm^3 σε θερμοκρασία $20\text{ }^\circ\text{C}$)	2.7	7.83	1.74	4.5
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	70	210	45	110
Αντοχή σε εφελκυσμό (N/mm^2)	150-680	300-1200	100-380	910-1190

Πίνακας 1.1. Σύγκριση αλουμινίου με άλλα μέταλλα.

1.1.3. Χρήσεις του αλουμινίου

Λόγω του συνδυασμού των ιδιοτήτων του και της εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται, οι χρήσεις του αλουμινίου αυξάνονται συνεχώς και αποτελούν μέρος της καθημερινής μας ζωής προσφέροντας λύσεις στις ανάγκες της κοινωνίας. Η χρήση του εξαπλώνεται στους παρακάτω τομείς:

Στον τομέα των μεταφορών και συγκεκριμένα στην κατασκευή αυτοκινήτων, φορτηγών, αεροπλάνων, τραίνων, πλοίων, διαστημικών οχημάτων, ακόμα και ποδηλάτων. Το χαμηλό του βάρος, η στιβαρότητά του και η αντοχή του σε διάβρωση το καθιστούν ένα από τα πιο σημαντικά υλικά στις βιομηχανίες. Ειδικότερα στην αυτοκινητοβιομηχανία, που δίνεται μεγάλη βαρύτητα στην προσεκτική επιλογή ελαφρών υλικών, το αλουμίνιο έχει αντικαταστήσει το χάλυβα σε συγκεκριμένα σημεία του πλαισίου (chassis) του οχήματος και ταυτόχρονα «ντύνει» το εξωτερικό του. Η μείωση του βάρους που επιτυγχάνεται με αυτό τον τρόπο, οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου και συνεπώς σε λιγότερους εκπεμπόμενους ρύπους για το περιβάλλον.

Στις οικοδομικές κατασκευές το αλουμίνιο ανταποκρίνεται επιτυχώς σε κάθε αρχιτεκτονική ιδέα και απαίτηση από πλευράς μηχανικών αντοχών, ηχομόνωσης και θερμομόνωσης, προσφέροντας μεγάλη λειτουργικότητα. Ειδικότερα, σε μια οικοδομή το αλουμίνιο βρίσκει εφαρμογή σε πόρτες, παράθυρα, συστήματα υαλοπετασμάτων, συστήματα σκίασης, ρολλά, περσίδες και κάγκελα. Παρουσιάζει καλή θερμική συμπεριφορά στις εκάστοτε κλιματολογικές συνθήκες καθώς έρευνες έδειξαν ότι μέσω της χρήσης αλουμινίου στη δόμηση εξοικονομείται ενέργεια (περισσότερο το καλοκαίρι παρά το χειμώνα).

Στις συσκευασίες τροφίμων και άλλων προϊόντων καθημερινής χρήσης. Το αλουμίνιο είναι αδιαπέραστο από μικροοργανισμούς και φως διατηρώντας έτσι τη φρεσκάδα των προϊόντων που συσκευάζονται. Επίσης η ευκολία κατεργασίας του μας δίνει τη δυνατότητα να το χρησιμοποιήσουμε σε διάφορα πάχη με ασφάλεια για την προστασία των προϊόντων, ενώ το χαμηλό του βάρος εξοικονομεί καύσιμα από τις μεταφορές και βοηθά και στην προστασία του περιβάλλοντος. Επιπρόσθετα, είναι πλήρως ανακυκλώσιμο χωρίς υποβάθμιση των ιδιοτήτων του και η διαδικασία της ανακύκλωσής του εξοικονομεί 95% ενέργεια σε σχέση με τη διαδικασία παραγωγής πρωτόχυτου μετάλλου.

Τέλος χρησιμοποιείται στη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικών καλωδίων και λόγω της εξαιρετικής ευχυτότητας μπορούμε να του δώσουμε ιδιαίτερα και πολύπλοκα σχήματα κάνοντας τη χρήση του ακόμα πιο διαδεδομένη και σε άλλους τομείς.

1.1.4. Κράματα αλουμινίου

Το αλουμίνιο στην καθαρή του μορφή είναι ένα σχετικά μαλακό και εύπλαστο μέταλλο και έτσι δεν συνιστάται σε κατασκευές που απαιτούν υψηλές μηχανικές ιδιότητες. Αυτό αντιμετωπίζεται με την προσθήκη κραματικών στοιχείων (όπως χαλκού, σιδήρου, μαγνησίου, μαγγανίου, πυριτίου, κασσίτερου, ψευδάργυρου κ.ά.) το κάθε ένα από τα οποία προσδίδει διαφορετικές ιδιότητες στο παραγόμενο κράμα, δημιουργώντας έτσι μια μεγάλη γκάμα για να επιλέξουμε ανάλογα με τις ανάγκες μας. Όπως το καθαρό αλουμίνιο, έτσι και τα κράματά του έχουν χαμηλή πυκνότητα, καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, υψηλή αντοχή σε διάβρωση και μεγάλη ευχυτότητα. Βέβαια, τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά διαφέρουν ως προς την «ένταση» ανάλογα με την περιεκτικότητα στα προστιθέμενα υλικά.

ΠΡΟΣΘΗΚΗ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ
Χαλκός	Σε ποσοστό ως 12%, βελτιώνει τη μηχανική αντοχή και τη κατεργασιμότητα.
Σίδηρος	Βελτιώνει την αντοχή και την σκληρότητα και μειώνει τις πιθανότητες θερμής ρωγμάτωσης κατά την χύτευση.
Μαγγάνιο	Βελτιώνει την ολκιμότητα και, σε συνδυασμό με τον σίδηρο, τη χυτευσιμότητα.
Μαγνήσιο	Βελτιώνει την μηχανική αντοχή και την αντοχή σε διάβρωση. Σε ποσοστό μεγαλύτερο από 6% προκαλεί σκλήρυνση με κατακρήμνιση.
Πυρίτιο	Βελτιώνει, σε μεγάλο βαθμό, την χυτευσιμότητα και την αντοχή σε διάβρωση.
Ψευδάργυρος	Μειώνει την χυτευσιμότητα, όμως σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία προσθήκης, βελτιώνει την μηχανική αντοχή.

Πίνακας 1.2. Επίδραση των κραματικών στοιχείων στις ιδιότητες του αλουμινίου ξεχωριστά

Κατηγοριοποίηση διαμορφωμένων κραμάτων

Λόγω της ποικιλίας που δημιουργήθηκε αλλά και της ευρύτατης εφαρμογής των διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου, ήταν επιτακτική η κατηγοριοποίησή τους. Σύμφωνα με το πιο διαδεδομένο σύστημα ονοματολογίας, το International Alloy Designation System, κάθε κράμα χαρακτηρίζεται από τέσσερις αριθμούς (1XXX, 2XXX, κτλ.). Το πρώτο ψηφίο δηλώνει το προστιθέμενο κραματικό στοιχείο, ενώ το δεύτερο, αν είναι διαφορετικό του μηδενός, είναι ενδεικτικό των αλλαγών στην καθαρότητα του αρχικού κράματος (ο αριθμός μηδέν υποδεικνύει το αρχικό κράμα). Το τρίτο και τέταρτο ψηφίο δεν έχουν αριθμητική σημασία και χρησιμοποιούνται για να διαχωρίσουν τα κράματα της ίδιας σειράς. Αυτό δεν συμβαίνει στη σειρά 1XXX, όπου ο τρίτος και τέταρτος αριθμός δηλώνουν το ποσοστό του αλουμινίου που είναι μεγαλύτερο από 99%, δηλαδή αν ένα κράμα έχει περιεκτικότητα σε αλουμίνιο 99,67%, τα δυο τελευταία ψηφία θα ήταν 67 [1].

Σειρά κράματος αλουμινίου	Κύρια προσθήκη
1XXX	Αλουμίνιο (καθαρότητας 99% και άνω)
2XXX	Χαλκός
3XXX	Μαγγάνιο
4XXX	Πυρίτιο
5XXX	Μαγνήσιο
6XXX	Μαγνήσιο και Πυρίτιο
7XXX	Ψευδάργυρος
8XXX	Άλλα στοιχεία

Πίνακας 1.3. Ονοματολογία σειρών κραμάτων αλουμινίου (σύμφωνα με το πρώτο ψηφίο)

Τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε "σειράς" των διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου είναι [2]:

1XXX: σε αυτή ανήκουν τα κράματα που περιέχουν πάνω από 99% αλουμίνιο και συχνά αποκαλείται η "σειρά καθαρού αλουμινίου". Αυτή η σειρά συνήθως επιλέγεται για την

εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση και την καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Επειδή είναι μαλακά τα κράματα της σειράς αυτής, δεν είναι κατάλληλα για χρήση σε κατασκευές με απαίτηση για μεγάλη αντοχή σε φορτία.

2XXX: η προσθήκη χαλκού σε αυτή τη σειρά κραμάτων, σε ποσοστό 2 έως 10%, προσφέρει ουσιαστική αύξηση της αντοχής, με ταυτόχρονη μείωση της ευπλαστότητας και της αντίστασης σε διάβρωση, παρόλα αυτά. Επίσης αυξάνεται η ευαισθησία στη δημιουργία ρωγμών κατά τη στερεοποίηση, με αποτέλεσμα η συγκόλληση τέτοιων κραμάτων να θέτει αρκετές προκλήσεις. Χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική, στα βαρέα οχήματα (π.χ. στρατιωτικά) και αλλού.

3XXX: η σειρά αυτή είναι εμπλουτισμένη με μαγγάνιο και έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του αλουμινίου και συγκεκριμένα την αντοχή σε καταπονήσεις χαμηλής έντασης και μεγάλης συχνότητας. Άλλα χαρακτηριστικά αυτών των κραμάτων είναι η εύκολη μορφοποίηση, η καλή αντοχή στη διάβρωση και η δυνατότητα συγκόλλησης με τις απλές μεθόδους. Χρησιμοποιούνται σε εναλλάκτες θερμότητας σε ψυγεία αυτοκινήτων και σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας.

4XXX: το πυρίτιο που προστίθεται σε αυτή τη σειρά, μειώνει το σημείο τήξης και αυξάνει τη ρευστότητα (μειώνει το ιξώδες θα μπορούσαμε να πούμε) όταν είναι λιωμένο. Αυτό το κάνει κατάλληλο για χρήση σε καλώδια πλήρωσης σε συγκολλήσεις τεμαχίων αλουμινίου.

5XXX: η παρουσία μαγνησίου στα κράματα της σειράς αυτής βελτιώνουν τις μηχανικές ιδιότητες αλλά έως ένα μέτριο επίπεδο. Επιπρόσθετα, βελτιώνεται η συγκολλησιμότητα και η αντοχή σε διάβρωση σε θαλάσσιο περιβάλλον. Παρόλα αυτά, κράματα με περιεκτικότητα σε μαγνήσιο πάνω από 3% δεν είναι κατάλληλα για χρήση σε περιβάλλον με θερμοκρασία άνω των 65 °C καθώς καθίστανται ευπαθή σε αστοχίες. Χρησιμοποιείται ευρέως στη ναυπηγική, στη χημική βιομηχανία, στις οικοδομές και στα μεταφορικά μέσα. Τα πλέον χρησιμοποιούμενα κράματα αυτής της σειράς είναι τα 5005, 5052, 5754, 5083, 5086, 5182.

6XXX: τα κύρια προστιθέμενα στοιχεία στα κράματα αυτά είναι το μαγνήσιο και το πυρίτιο που δίνουν τη δυνατότητα για ενδυνάμωση της αντοχής με θερμική επεξεργασία, λόγω της δημιουργίας πυριτιούχου μαγνησίου, είναι όμως ευαίσθητα στη δημιουργία ρωγμών κατά τη στερεοποίηση και γι' αυτό έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις κατά τη

συγκόλληση. Τα κράματα αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως στη διέλαση για την παραγωγή προφίλ αλουμινίου. Τα πιο γνωστά κράματα της σειράς αυτής είναι τα 6005, 6061, 6082, 6060, 6063.

7XXX: η προσθήκη ψευδαργύρου δημιουργεί μια από τις πιο δυνατές σειρές κραμάτων αλουμινίου, με μεγάλη αντοχή στα φορτία και έτσι έχουν επικρατήσει σε απαιτητικές κατασκευές, όπως στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική τεχνολογία.

Διαδικασίες διαμόρφωσης αλουμινίου

- Επανάτηξη και δεύτερη χύτευση του υλικού: Το σημαντικότερο στάδιο αυτής της διαδικασίας είναι η κατεργασία της επανάτηξης του κράματος. Αρχικά, οι κλίβανοι γεμίζονται είτε απευθείας με το τηγμένο αλουμίνιο από την πρωτογενή τήξη ή από μπριγκέτες που πρόκειται να επανατηχθούν. Μαζί με το αλουμίνιο προστίθενται κραματικά στοιχεία και φλογιστά (refiners). Το τήγμα του μετάλλου καθαρίζεται με την απομάκρυνση της σκουριάς που βρίσκεται στην επιφάνεια του, καθώς και με την διοχέτευση αερίου χλωρίου (κατακρατεί το υδρογόνο) μέσα από αυτό. Αφού το κράμα καθαριστεί ικανοποιητικά χυτεύεται ξανά.
- Επιφανειακή εκλέπτυνση του υλικού: Στην περίπτωση των ελασμάτων, πριν διοχετευθούν σε συσκευή θερμής έλασης, αφαιρείται μέρος της επιφάνειάς τους, προκειμένου αυτές να αποκτήσουν μια καθαρή και λεία επιφάνεια.
- Προθέρμανση και ομογενοποίηση του υλικού: Οι περισσότερες μπριγκέτες των κραμάτων, πριν οδηγηθούν για έλαση, προθερμαίνονται για περίπου 10 με 20 ώρες προκειμένου να επιτευχθεί ομαλή διάχυση των ατόμων στο κράμα. Η θερμοκρασία προθέρμανσης θα πρέπει να είναι χαμηλότερη από το σημείο τήξεως του πιο εύτηκτου συστατικού στοιχείου του κράματος.
- Θερμή έλαση: Οι προθερμασμένες μπριγκέτες ξαναθερμαίνονται και οδηγούνται στα περιστρεφόμενα έλαστρα. Αφού υποστούν την πρώτη ελάττωση πάχους από τα αρχικά έλαστρα, ξαναθερμαίνονται και οδηγούνται σε νέα έλαστρα. Συνήθως από αυτήν την διαδικασία μπορεί να παραχθεί έλασμα που να έχει μόνο το 10% του αρχικού του πάχους.

- Έλαση εν-ψυχρώ: Μετά από το στάδιο της ανόπτησης το κράμα οδηγείται σε συσκευή ψυχρής έλασης. Μετά το πέρας της διαδικασίας αυτής, το πάχος του κράματος έχει μειωθεί κατά 30 με 65%. Η διαδικασία της εν-ψυχρώ έλασης συνοδεύεται συνήθως από μια νέα τελική ανόπτηση.

1.2. Συμπεριφορά έναντι πρόσκρουσης (crashworthiness)

Ο όρος crashworthiness χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ικανότητα μιας κατασκευής να προστατεύει τους επιβάτες κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης και συνήθως μελετάται στην κατασκευή αεροσκαφών και αυτοκινήτων. Τα κριτήρια για να περιγράψουν την αντοχή σε σύγκρουση μιας κατασκευής διαφέρουν ανάλογα με τη φύση της σύγκρουσης και τον τύπο του αναλυόμενου οχήματος. Κάποια τέτοια κριτήρια είναι ο τρόπος παραμόρφωσης του πλαισίου του οχήματος (μοτίβο παραμόρφωσης της δομής), η επιβράδυνση του οχήματος κατά τη σύγκρουση και η πιθανότητα τραυματισμού των επιβατών που περιλαμβάνει μεταξύ άλλων και το κριτήριο πρόσκρουσης της κεφαλής (head impact criterion) [1].

Η αντοχή σε σύγκρουση μπορεί να υπολογιστεί με πειραματικά μοντέλα σε προσομοιώσεις τέτοιων ατυχημάτων (Euro NCAP) ή να εκτιμηθεί με τη δημιουργία υπολογιστικών μοντέλων κάνοντας χρήση λογισμικών πακέτων (όπως το LS-DYNA, το PAM-CRASH, το MSC Dytran και το MADYMO) και συγκρίνοντας τα με τα αποτελέσματα από τις πειραματικές δοκιμές [1].

Χρησιμοποιούνται μέθοδοι και στοιχεία στατιστικής, που προέρχονται από την καταγραφή και ανάλυση πραγματικών ατυχημάτων, για την αξιολόγηση της αντοχής στις συγκρούσεις. Στις μέρες μας η αντοχή των οχημάτων σε σύγκρουση αξιολογείται σε τέσσερα ξεχωριστά πεδία. Αυτά είναι η εμπρόσθια αντοχή, η οπίσθια, η πλευρική και τέλος η αντοχή του οχήματος όταν αυτό ανατρέπεται [5].

1.3 Απορροφητές ενέργειας (energy absorbers)

Για την επιτυχημένη προστασία κατά τη σύγκρουση χρησιμοποιούμε απορροφητές ενέργειας, δηλαδή συστήματα που μετατρέπουν μέρος ή όλη την κινητική ενέργεια του

συστήματος σε άλλες μορφές ενέργειας, όπως πλαστική παραμόρφωση του απορροφητή, ενέργεια τριβής και ενέργεια θραύσης [14].

Ιδανικά η ενέργεια αυτή δεν πρέπει να μπορεί να ανακτηθεί, δηλαδή πρέπει να είναι μη αντιστρεπτή. Για το λόγο αυτό θέλουμε την πλαστική παραμόρφωση για τη διάχυση της ενέργειας, γιατί ειδιάλλως (δηλαδή αν η αρχική κινητική ενέργεια μετατραπεί σε ελαστική παραμόρφωση) μετά την επίτευξη μίας μέγιστης ελαστικής παραμόρφωσης, η αποθηκευμένη ελαστική ενέργεια θα απελευθερωθεί και θα προκαλέσει ζημιά σε αυτό που έχουμε σκοπό να προστατέψουμε [7].

Κάτι που πρέπει να προσέξουμε κατά τη σχεδίαση ενός απορροφητή είναι η μέγιστη δύναμη αντίστασης που μπορεί να προβάλλει κατά τη σύγκρουση. Αν η δύναμη αυτή είναι μεγάλη, τότε η επακόλουθη απότομη επιβράδυνση του συστήματος θα είναι ικανή να δημιουργήσει πρόβλημα στους επιβαίνοντες. Σκοπός μας είναι να κρατήσουμε τη μέγιστη αυτή δύναμη κάτω από ένα όριο αλλά και σταθερή ώστε το σύστημα μας να έχει τη δυνατότητα απορρόφησης μεγάλου μέρους της ενέργειας σύγκρουσης [7].

Ένας άλλος τρόπος για να αυξήσουμε την διάχυση της αρχικής κινητικής ενέργειας είναι να αυξήσουμε το μήκος του τμήματος του συστήματος που πρόκειται να παραμορφωθεί, αναλογιζόμενοι ότι το έργο που παράγεται από μια δύναμη ισούται με το μέτρο της πολλαπλασιασμένο με τη μετατόπιση της πάνω στη διεύθυνση που δρα. Με άλλα λόγια, αν η κατασκευή προορίζεται να απορροφά πού ενέργεια πρέπει η «μετατόπιση» της να είναι μεγάλη. Για ομοιόμορφη επιβράδυνση από αρχική ταχύτητα (u) σε στάση, χρειάζεται απόσταση $\frac{u \cdot t}{2}$. Όσο περισσότερος είναι ο χρόνος (t) που ασκείται η δύναμη (F), τόσο μικρότερη μπορεί να είναι αυτή η δύναμη αντίστασης, πράγμα επιθυμητό.

2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – ΚΩΔΙΚΑΣ LS-DYNA

2.1. Γενικά

Για την επίλυση τεχνικών προβλημάτων αρχικά κατασκευάζουμε το μαθηματικό μοντέλο κάνοντας κάποιες παραδοχές για την απλούστευση της διαδικασίας. Συνήθως, η τελική μαθηματική έκφραση αποτελείται από διαφορικές εξισώσεις και αρχικές συνθήκες. Σε πολύπλοκα προβλήματα, αυτές οι διαφορικές εξισώσεις είναι δύσκολο να επιλυθούν αναλυτικά και πολλές φορές είναι ακατόρθωτο. Στις περιπτώσεις αυτές, τα προβλήματα λύνονται με αριθμητικές μεθόδους που δίνουν μεν προσεγγιστικές λύσεις αλλά τα αποτελέσματά τους είναι αξιόπιστα. Από τις πιο διαδεδομένες αριθμητικές μεθόδους επίλυσης τεχνικών προβλημάτων είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) [1], [3].

Η FEM μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα, γράφοντας ένα γενικό πρόγραμμα με προκαθορισμένες αρχικές συνθήκες. Το σκεπτικό πίσω από αυτήν τη μέθοδο είναι ο διαχωρισμός της υπό εξέταση περιοχής, σε πολλές μικρότερες που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Όταν πρωτοεμφανίστηκε η FEM, το βασικό της μειονέκτημα ήταν η απαίτηση μεγάλης υπολογιστικής ισχύος, όμως στις μέρες μας με τη ραγδαία ανάπτυξη των Η/Υ, αυτό το πρόβλημα έχει μετριαστεί σημαντικά [3].

Επιστήμονες όπως ο Ιωάννης Αργύρης, ο Ray W. Clough, ο Walter Ritz, ο Boris G. Galerkin και άλλοι, έθεσαν τις βάσεις για την εξέλιξη των μητρικών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων, σε αυτό που ονομάζουμε σήμερα FEM [1].

Βήματα της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων:

- 1) Σχεδιάζεται η υπό μελέτη γεωμετρία σε πρόγραμμα CAD και πραγματοποιείται το 3D μοντέλο.
- 2) Πραγματοποιείται διαμερισμός του μοντέλου και εισάγονται τα απαιτούμενα δεδομένα. Τα προγράμματα που χρησιμοποιούνται γι' αυτήν τη διαδικασία ονομάζονται pre-processors.

- 3) Μετά την εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων ακολουθεί η διαδικασία της επίλυσης του προβλήματος. Αυτή πραγματοποιείται από προγράμματα που ονομάζονται solvers.
- 4) Όταν ολοκληρωθεί η επίλυση του προβλήματος, τα αποτελέσματα εισάγονται σε προγράμματα που ονομάζονται post-processors, ώστε ο μελετητής να δει και να επεξεργαστεί τα αποτελέσματα [1].

Ένα τέτοιο ολοκληρωμένο πακέτο για ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι το LS-DYNA από την εταιρεία Livermore Software Technology Corporation (LSTC).

2.2. LS-DYNA

Το LS-DYNA είναι ένα πακέτο προσομοίωσης γενικής χρήσης, την εταιρίας Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Καθώς στο πρόγραμμα προστίθενται ολοένα και περισσότερες δυνατότητες για την επίλυση διάφορων προβλημάτων, η βασική του ικανότητα είναι η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων σε μεταβατικά-δυναμικά προβλήματα που παρουσιάζουν έντονη μη γραμμικότητα. Η μη γραμμικότητα συνεπάγεται τουλάχιστον ένα από τα παρακάτω:

- Αλλαγή των συνοριακών συνθηκών κατά την επίλυση του προβλήματος
- Μεγάλες παραμορφώσεις (π.χ. κατάρρευση μεταλλικών κελυφών)
- Μη γραμμικά υλικά που δεν επιδεικνύουν τυπική ελαστική συμπεριφορά.

Μεταβατικό δυναμικό φαινόμενο σημαίνει, ανάλυση μικρής διάρκειας γεγονότων που συμβαίνουν σε υψηλές ταχύτητες και οι αδρανειακές δυνάμεις είναι σημαντικές. Τέτοιες εφαρμογές είναι η σύγκρουση οχημάτων, οι κατεργασίες υλικών και οι ελεγχόμενες εκρήξεις, όπως στα ορυχεία.

Το LS-DYNA χρησιμοποιείται ευρέως από την αυτοκινητοβιομηχανία για την ανάλυση του σχεδιασμού οχημάτων. Έχει την ικανότητα να προσομοιάζει με ακρίβεια τη σύγκρουση ενός οχήματος, καθώς και να προβλέπει τις επιπτώσεις στους επιβάτες. Με αυτό το πρόγραμμα είναι δυνατή η δοκιμή των σχεδίων ενός αυτοκινήτου χωρίς να κατασκευαστεί πρωτότυπο και να διενεργηθεί crash test, εξοικονομώντας χρήματα και

χρόνο.

Όπως αναφέραμε στα βήματα της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων, έτσι και στην περίπτωση του LS-DYNA, για την επίλυση ενός προβλήματος χρειάζονται τέσσερις συνιστώσες (CAD, pre-processor, solver, post-processor). Η εταιρία LSTC πέρα από τον solver, ανέπτυξε το λογισμικό Ls-PrePost, που περιλαμβάνει τις υπόλοιπες τρεις συνιστώσες. [1], [4].

3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

3.1. Ανόπτηση

Η θερμική κατεργασία στην οποία υποβάλλεται ένα μέταλλο ή κράμα που έχει υποστεί κάποια κατεργασία, προκειμένου στη συνέχεια υποβαλλόμενο σε ψύξη να βελτιωθεί η ευκαμψία του και να γίνει λιγότερο εύθρυπτο ονομάζεται ανόπτηση. Η εφαρμογή της είναι πολύ κοινή σε διαδικασίες παραγωγής οι οποίες απαιτούν εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση, όπως έλαση, διέλαση, ενδοτράχυνση κ.ά. για να επιτρέψει μια παράταση της παραμόρφωσης, χωρίς να επέλθει θραύση ή να χρειαστεί υπερβολική κατανάλωση ενέργειας.

Η ενδοτράχυνση είναι μέθοδος αύξησης της αντοχής και της σκληρότητας ενός μεταλλικού υλικού με παραμόρφωση πέρα από το όριο διαρροής. Η ενδοτράχυνση έχει ιδιαίτερη σημασία στην μεταλλοτεχνία του χάλυβα, όταν το μέταλλο αυτό υποβληθεί σε ψυχρή κατεργασία, δηλ. σε πλαστική παραμόρφωση υπό θερμοκρασία χαμηλότερη από το μισό της θερμοκρασίας τήξης. Η παραμόρφωση πέρα από το όριο διαρροής οδηγεί σε δραματική αύξηση της πυκνότητας των διαταραχών, γραμμικών και διεπιφανειακών, στο εσωτερικό των κρυστάλλων του υλικού. Για παράδειγμα, σε ένα ανοπτημένο μεταλλικό υλικό, η πυκνότητα διαταραχών είναι της τάξης των $10^{10}/\text{m}^2$, ενώ σε ένα υλικό που έχει πάθει ψυχρή ολκή ή έλαση, η πυκνότητα διαταραχών είναι της τάξης των $10^{15}/\text{m}^2$. Καθώς μεγαλώνει η παραμόρφωση του υλικού, οι διαταραχές μετακινούνται (ολισθαίνουν), τέμνονται, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και συσσωρεύονται σε ορισμένα σημεία, με αποτέλεσμα να εμποδίζει η μία την κίνηση της άλλης. Με την αύξηση της πυκνότητας των ατελειών, την αλλαγή της κατανομής τους και την παρεμπόδιση της κίνησής τους, το υλικό χάνει την ολκιμότητά του και γίνεται πιο σκληρό. Με πιο απλά λόγια η σκλήρυνση κατά την διάρκεια των εργασιών συμβαίνει γιατί με τις μηχανικές κατεργασίες στο μέταλλο, τα μόρια τοποθετούνται σε «άβολες» για αυτά θέσεις. Στη φάση αυτή απαιτείται ανόπτηση για να μαλακώσει και να γίνει η κατεργασία ευκολότερη. Με την ανόπτηση τους δίνουμε με την θερμότητα την απαραίτητη ενέργεια για να ξαναέρθουν στις «βολικές» τους θέσεις, οπότε το αποτέλεσμα είναι το «μαλάκωμα» του μετάλλου.

Κατά τη διάρκεια αυτής της κατεργασίας είναι δυνατό να συμβούν αποκατάσταση και ανακρυστάλλωση. Συνήθως είναι επιθυμητή η απόκτηση λεπτοκρυσταλλικής δομής και

συνεπώς η θερμική διεργασία τερματίζεται εγκαίρως, πριν επέλθει σημαντική ανάπτυξη του μεγέθους των κόκκων. Η επιφανειακή οξείδωση αποφεύγεται ή ελαχιστοποιείται εάν η θερμοκρασία της ανόπτησης παραμείνει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, (υψηλότερα όμως της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης), ή εάν η διεργασία πραγματοποιηθεί σε μη οξειδωτική ατμόσφαιρα.

Η ανόπτηση γίνεται συνήθως σε μέταλλα ή κράματα που έχουν υποστεί ψυχρή έλαση και περιλαμβάνει τρία στάδια:

1. *Αποκατάσταση*: Κατά το στάδιο αυτό, το υλικό θερμαίνεται σε θερμοκρασία περίπου ίση με $0,3T_m$, όπου T_m η θερμοκρασία τήξης του υλικού. Με την θέρμανση του υλικού, επιτυγχάνεται αναδιοργάνωση και αποδέσμευση των κρυσταλλικών διαταραχών (ατελειών) που προκάλεσε η ενδοτράχυνση. Η πυκνότητα των διαταραχών μειώνεται λίγο με συνέπεια την μικρή μείωση της σκληρότητας και την μικρή βελτίωση της ολκιμότητας του υλικού.
2. *Ανακρυστάλλωση*: Κατά την ανακρυστάλλωση, το υλικό θερμαίνεται σε θερμοκρασία υψηλότερη από $0,4T_m$. Η υψηλότερη θέρμανση επιτρέπει τον σχηματισμό νέων κόκκων (κρυστάλλων) που έχουν πολύ λίγες διαταραχές και η μικροδομή του υλικού γίνεται πιο σφαιρική. Επίσης, η πυκνότητα των διαταραχών μειώνεται δραστικά (π.χ. από $10^{15}/m^2$ στις $10^{10}/m^2$).
3. *Ανάπτυξη των κρυστάλλων*: Η αύξηση του μεγέθους των κόκκων (κρυστάλλων) επιτυγχάνεται με διατήρηση του υλικού στην θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης για μεγάλο χρόνο. Οι κόκκοι που δημιουργούνται στο στάδιο της ανακρυστάλλωσης αρχίζουν να μεγαλώνουν, καθώς σ' αυτούς ενσωματώνονται οι μικροί κόκκοι που τους περιβάλλουν. Έτσι, μειώνεται σημαντικά η σκληρότητα του υλικού, αλλά και η αντοχή του.

Η ανόπτηση γίνεται συνήθως σε ατμόσφαιρα αναγωγικού αερίου (H_2 , CO , κ.ά.) για να μην οξειδωθεί η επιφάνεια του μεταλλικού υλικού. Μεγάλο ρόλο στην ανόπτηση παίζει η διάχυση των ατόμων στην στερεά κατάσταση.

Με την ανόπτηση ένα μεταλλικό υλικό χάνει μεγάλο μέρος της σκληρότητας που απέκτησε με την ενδοτράχυνση και γίνεται πιο αγωγίμο στον ηλεκτρισμό. Επίσης, με την εξάλειψη κρυσταλλικών ατελειών, η πυκνότητα του υλικού αυξάνεται [1].

Η διαδικασία της ανόπτησης που ακολουθήθηκε στο εργαστήριο για τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, ήταν πιο απλή όπως θα εξηγήσουμε και σε επόμενο κεφάλαιο.

3.2. Ροπή πλήρους πλαστικοποίησης (M_p)

Η ροπή που ολόκληρη η διατομή έχει φτάσει στο όριο διαρροής ονομάζεται ροπή πλήρους πλαστικοποίησης M_p και για δεδομένη διατομή είναι πάντα μεγαλύτερη από την ροπή διαρροής (την καμπτική ροπή που ένα μέρος της διατομής αγγίζει το όριο διαρροής ενώ η υπόλοιπη έχει μικρότερη τάση). Για γραμμικούς φορείς αυτό το όριο είναι το όριο διαρροής σε μονοαξονικό εφελκυσμό (σ_y), ενώ για τους επιφανειακούς φορείς χρησιμοποιείται το ισοδύναμο όριο διαρροής $\sigma_0 = 2/\sqrt{3}\sigma_y$ (κριτήριο Von Mises για επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση). Η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$M_p = \sigma_0 \int_{t_1}^{t_2} y dy ,$$

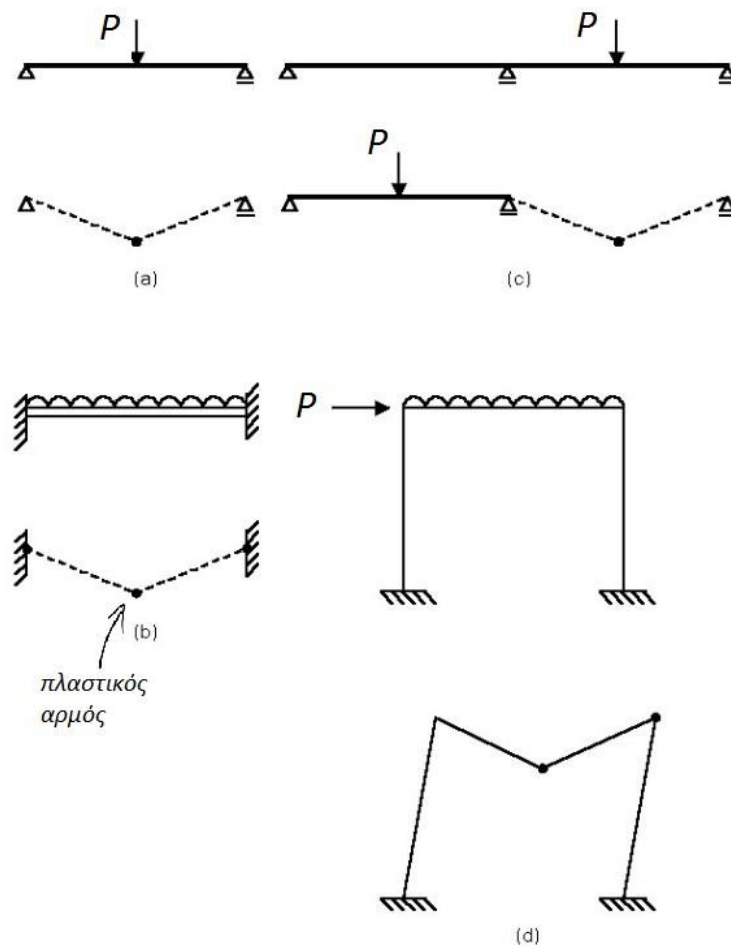
όπου:

- y είναι η απόσταση από το ουδέτερο επίπεδο,
- t_1, t_2 είναι οι αποστάσεις από το ουδέτερο επίπεδο και $t = (t_1 + t_2)$ είναι το πάχος του φορέα,
- για γραμμικούς φορείς ισχύει για το όριο διαρροής σε μονοαξονικό εφελκυσμό: $\sigma_0 = \sigma_y$,
- για επιφανειακούς φορείς ισχύει για το ισοδύναμο όριο διαρροής: $\sigma_0 = 2/\sqrt{3}\sigma_y$ [1], [8].

Στην οριακή ανάλυση δομικών φορέων που υπόκεινται κάμψη, μια απότομη μετάβαση από την ελαστική στην ιδεωδώς πλαστική συμπεριφορά εμφανίζεται όταν η καμπτική ροπή πάρει συγκεκριμένη τιμή, την τιμή της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης. Μέχρι τότε η συμπεριφορά του φορέα θεωρείται ελαστική, ενώ όταν γίνει M_p σχηματίζεται πλαστικός αρμός.

3.3. Πλαστικός αρμός (plastic hinge)

Ο πλαστικός αρμός επιτρέπει μεγάλες περιστροφές με σταθερή ανθιστάμενη ροπή, τη ροπή πλήρους πλαστικοποίησης M_p . Οι πλαστικοί αρμοί εκτείνονται σε μικρού μήκους τμήματα πάνω στον φορέα και οι πραγματικές τιμές του έχουν άμεση εξάρτηση από την κατανομή του φορτίου και τη διατομή του φορέα. Λεπτομερής ανάλυση έχει δείξει ότι είναι μια καλή προσέγγιση να θεωρήσουμε τους φορείς άκαμπτους-ιδεωδώς πλαστικούς με την πλαστικότητα να βρίσκεται στους πλαστικούς αρμούς.



Εικόνα 3.1. Πλαστικοί αρμοί σε διάφορους μηχανισμούς κατάρρευσης [9].

3.4. Τρόποι κατάρρευσης μεταλλικών κελυφών

3.4.1. Γενικά

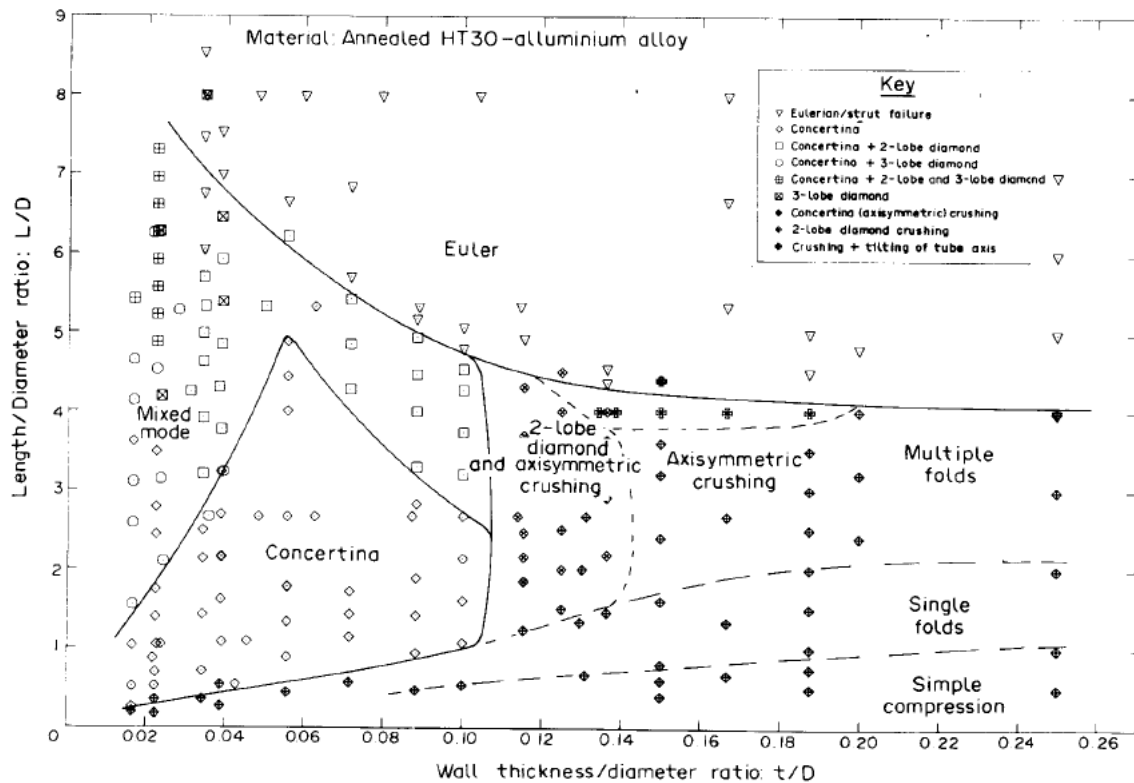
Τα γεωμετρικά μεγέθη των σωλήνων κυκλικής διατομής επηρεάζουν τον τρόπο κατάρρευσης τους όταν σε αυτά ασκήσουμε αξονικό θλιπτικό φορτίο. Διακρίνουμε τους εξής:

- Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης (axisymmetrical),
- Μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης (non-axisymmetrical),
- Μικτός τρόπος κατάρρευσης,
- Λυγισμός,



Εικόνα 3.2. Διάφοροι τρόποι κατάρρευσης. Αξονοσυμμετρικός (αριστερά), μικτός (μέση), λυγισμός τύπου Euler (δεξιά).

και για διάφορες τιμές των λόγων διαμέτρου προς πάχος (D/t) και μήκους προς πάχος (L/t) παρουσιάζεται διαφορετική κατάρρευση. Βάσει πολλών πειραμάτων με σωλήνες διάφορων διαστάσεων, μπορεί να εξαχθεί ένα διάγραμμα κατάταξης του τρόπου κατάρρευσης ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένοι [10]. Η εικόνα 3.3 παρουσιάζει ένα τέτοιο διάγραμμα για σωλήνες αλουμινίου. Σε σωλήνες μεγάλου μήκους έχουμε λυγισμό τύπου Euler [7].

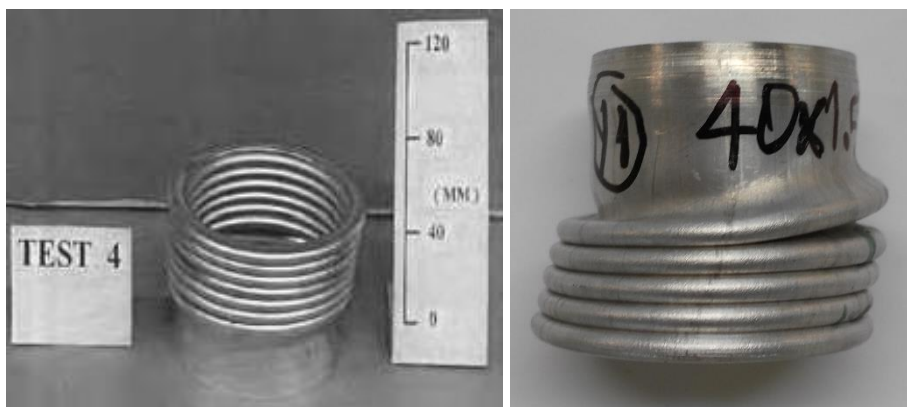


Εικόνα 3.3. Διάγραμμα προσδιορισμού του τρόπου κατάρρευσης σωλήνων αλουμινίου κυκλικής διατομής [10].

Πάντως τα κελύφη τετραγωνικής διατομής παρουσιάζουν ένα συγκεκριμένο μοτίβο κατάρρευσης, που φαίνεται να είναι ανεξάρτητο του λόγου πλευράς προς πάχος [12], [13].

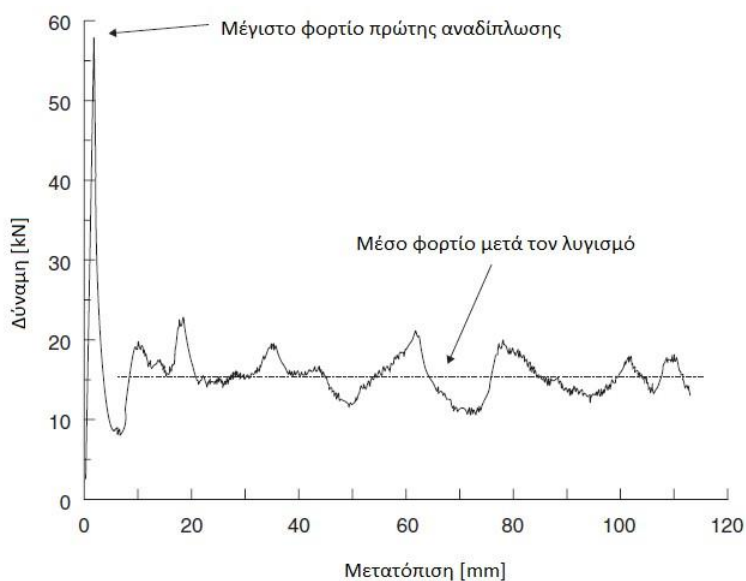
3.4.2. Αξονοσυμμετρική κατάρρευση

Αυτός ο τύπος κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από τις ευθείες αναδιπλώσεις που δημιουργούνται κάθετα στον άξονα του σωλήνα κυκλικής διατομής (μοτίβο κατάρρευσης φουσαρμόνικα ή concertina mode), όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4 αριστερά. Βέβαια, σπάνια βλέπουμε τόσο μεγάλη συμμετρία. Στην εικόνα 3.4 δεξιά, φαίνεται πώς μπορεί να επηρεαστεί το δοκίμιο από τη μη παραλληλότητα των πλακών θλίψης ή τυχόν ανομοιομορφίες της επιφάνειας επαφής του, ακολουθώντας πάντα μοτίβο κατάρρευσης φουσαρμόνικας αλλά χάνοντας τη συμμετρία ως προς τον αρχικό άξονα του.



Εικόνα 3.4. Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης ή μοτίβο κατάρρευσης φουσαρμόνικας.

Το έργο που χρειάζεται για να δημιουργηθεί μια αναδίπλωση (λοβός) είναι το άθροισμα της ενέργειας που χρειάζεται για να γίνει η κάμψη του ελάσματος γύρω από τον πλαστικό αρμό και της ενέργειας για να εφελκυστεί το υλικό μεταξύ των αρμών. Χάριν απλότητας αμελούμε τις ελαστικές παραμορφώσεις, την κράτυνση του υλικού και την αλληλεπίδραση κάμψης-εφελκυσμού και θεωρούμε το υλικό άκμπτο-ιδεωδώς πλαστικό [12]. Η ενέργεια που μετατρέπεται σε πλαστικό έργο είναι η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης, βλ. εικόνα 3.5. Όπως παρατηρούμε, το φορτίο παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή του στην άρχη, ακολουθεί απότομη πτώση και στη συνέχεια εμφανίζονται τοπικά μέγιστα που αντιπροσωπεύουν την έναρξη δημιουργίας λοβών στο δοκίμιο. Αυτό συμβαίνει γιατί η μέγιστη αντίσταση από το υλικό συναντάται λίγο πριν τη δημιουργία του πλαστικού αρμού καθώς εκεί το υλικό είναι σαν να συμπιέζεται.



Εικόνα 3.5. Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης σε σωλήνα αλουμινίου κυκλικής διατομής που καταρρέει αξονοσυμμετρικά [7].

3.4.3. Μη αξονοσυμμετρική κατάρρευση

Σε αυτόν τον τρόπο κατάρρευσης έχουμε μειωμένη απορρόφηση ενέργειας λόγω της έλλειψης συμμετρίας ως προς τον άξονα συμπίεσης και επακόλουθο είναι να παρατηρούνται χαμηλότερα φορτία κατά την κατάρρευση.

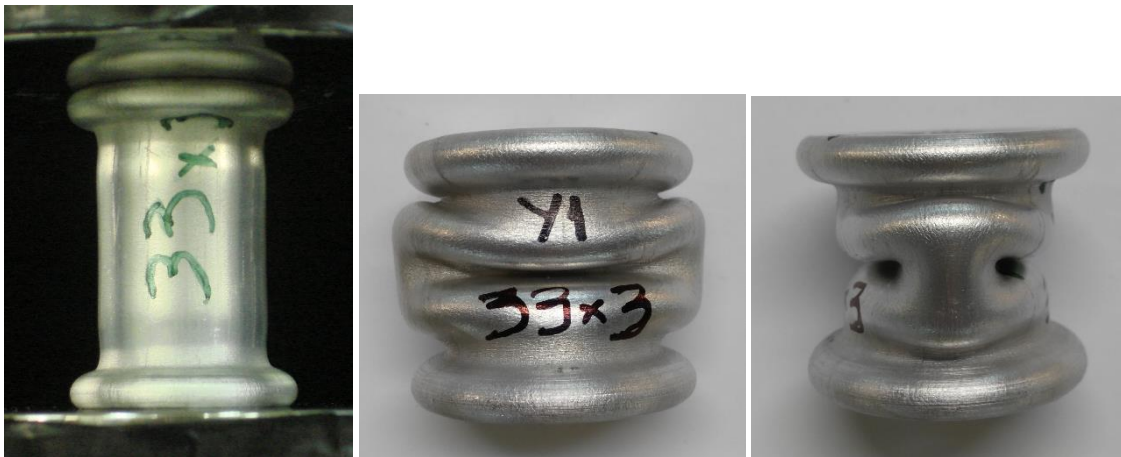
Συγκεκριμένα, οι λοβοί δημιουργούνται με μη εκτατό τρόπο, δηλαδή δεν έχουμε αύξηση της περιμέτρου του. Ο κάθε λοβός έχει συγκεκριμένο αριθμό ακμών (m), χαρακτηριστικό που του δίνει την ονομασία "διαμάντι" και ανάλογα με τις ακμές (m) του ονομάζεται 2D, 3D, 4D-diamond και ούτω καθεξής. Ο καθένας είναι περιστραμμένος από τον προηγούμενό του κατά μια γωνία, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

Έστω ότι ο λοβός μας έχει m αριθμό ακμών, δηλαδή είναι της μορφής mD -diamond. Στην προκειμένη περίπτωση θα είναι περιστραμμένος από τον προηγούμενο κατά γωνία $\frac{\pi}{m} rad$.

3.4.4. Μικτός τρόπος κατάρρευσης

Στον συγκεκριμένο τρόπο κατάρρευσης εμφανίζονται και ο αξονοσυμμετρικός και ο μη-αξονοσυμμετρικός τύπος κατάρρευσης. Η κυριότερη αιτία παρουσίασης του είναι ασυμμετρίες και ατέλειες στη δομή των δοκιμίων και στη γεωμετρία τους, που τις περισσότερες φορές δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι, καθιστώντας τες μη παρατηρήσιμες.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων το δοκίμιο ξεκινά την κατάρρευση του αξονοσυμμετρικά και ύστερα εμφανίζεται ο μη αξονοσυμμετρικός με τον οποίο και συνεχίζει να καταρρέει μέχρι το πέρας της διαδικασίας, όπως φαίνεται και από την εικόνα 3.6 αριστερά, στην οποία έχουν δημιουργηθεί πρώτα οι αξονοσυμμετρικοί λοβοί πάνω και κάτω και τελικά εμφανίζεται ενδιάμεσα και ο μη αξονοσυμμετρικός η έναρξη της δημιουργίας του οποίου είναι ορατή. Σε κάποιες περιπτώσεις βέβαια έχουμε και λυγισμό τύπου Euler πριν την εμφάνιση του μη αξονοσυμμετρικού τύπου κατάρρευσης.

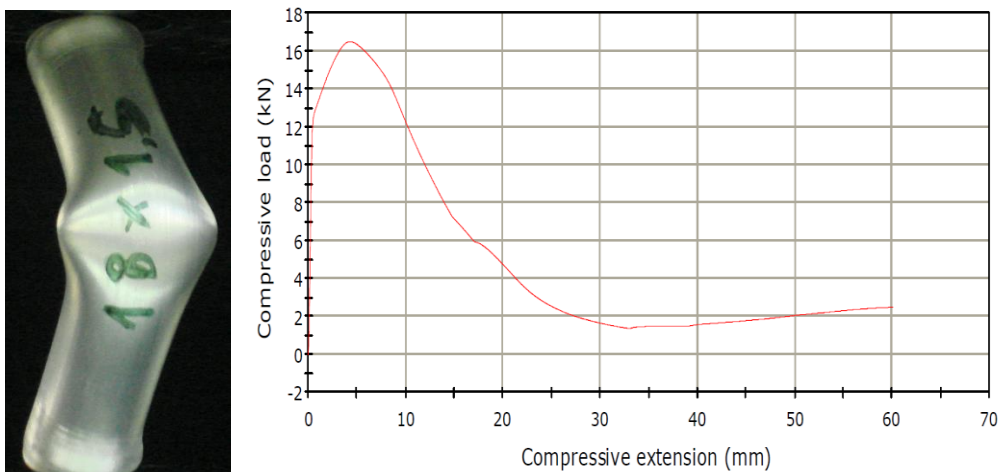


Εικόνα 3.6. Δοκίμιο (33x3)_Y1 παρούσας διπλωματικής εργασίας το οποίο κατέρρευσε με τον μικτό τρόπο κατέρρευσης. Αριστερά είναι φωτογραφία κατά την διάρκεια των πειραμάτων.

3.4.5. Λυγισμός

Ο πρώτος που μελέτησε το φαινόμενο του λυγισμού ήταν ο Euler, ο οποίος και διατύπωσε μαθηματικές σχέσεις για την ανάλυση του σε ράβδους (columns).

Κατά το λυγισμό το πειραματικό δοκίμιο μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αστοχεί κατά την άσκηση αξονικού φορτίου. Δεν είναι επιθυμητή κατέρρευση καθώς δεν είναι ικανή να απορροφήσει μεγάλα ποσά ενέργειας. Ο λυγισμός, σε δοκίμια που τους ασκείται αξονικό φορτίο, συμβαίνει συνήθως σε μεγάλου μήκους τεμάχια που έχουν μικρή διάμετρο συγκριτικά με το μήκος τους και μικρό πάχος.



Εικόνα 3.7. Λυγισμός στο δοκίμιο (18x1.5)_Y1 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στη φωτογραφία διακρίνεται ο λυγισμός. Στο διάγραμμα φαίνεται η μειωμένη ικανότητα παραλαβής αξονικού φορτίου και επακολούθως η μειωμένη απορρόφηση ενέργειας.

3.5. Οιονεί στατική φόρτιση (Quasi-static loading)

Για μια σύγκρουση χαμηλής ταχύτητας, τα μοτίβα της πλαστικής παραμόρφωσης είναι παρόμοια με αυτά που παράγονται με οιονεί στατική (quasi-static) φόρτιση. Είναι βολικό να ξεκινάει η διερεύνηση με τη διεξαγωγή οιονεί στατικών δοκιμών, για δύο λόγους. Πρώτον, γιατί η πειραματική διάταξη είναι απλούστερη από αυτή για τη δοκιμή κρούσης, και δεύτερον, γιατί μας επιτρέπει να παρατηρούμε το ιστορικό της παραμόρφωσης με σχετική ευκολία [7].

Είναι ευρέως γνωστό ότι η πλαστική ενέργεια εξαρτάται από το φορτίο και το ιστορικό της παραμόρφωσης, και όχι μόνο από την τελική παραμόρφωση όπως στην περίπτωση της ελαστικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, η συνεχής παρακολούθηση του φορτίου, της μετατόπισης και της παραμόρφωσης σε διάφορες χαρακτηριστικές θέσεις, καθώς επίσης και η παρατήρηση των τελικών δομών, οδηγούν σε πολύ καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών της πλαστικής παραμόρφωσης. Τέτοιες πληροφορίες είναι πολύ δύσκολο να αποκτήσουμε από δυναμικές δοκιμές [7].

Οιονεί στατικές δοκιμές εφελκυσμού ή θλίψης μπορούν εύκολα να πραγματοποιηθούν με τη χρήση μίας πρότυπης universal μηχανής δοκιμών (standard universal testing machine). Σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{L(t) - L_0}{L_0} \right) = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt}(t) = \frac{v(t)}{L_0}$$

μπορεί να υπολογιστεί ή/και να ελεγχθεί ο ρυθμός παραμόρφωσης (strain rate) σε μια δοκιμή και χρησιμοποιώντας τον πίνακα 3.1, βλέπουμε τι είδους φόρτιση έχουμε. Όπως παρατηρούμε για να χαρακτηριστεί μια καταπόνηση ως οιονεί στατική, η τιμή του ρυθμού παραμόρφωσης πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ $10^0 \div 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

Strain rate (s ⁻¹)	Common testing methods	Dynamic considerations	
10 ⁷	HIGH-VELOCITY IMPACT – Explosives	SHOCK-WAVE PROPAGATION	Inertial forces important
10 ⁶	– Normal plate impact – Pulsed laser – Exploding foil		
10 ⁵	– Incl. plate impact (pressure-shear) DYNAMIC-HIGH	SHEAR-WAVE PROPAGATION	
10 ⁴	– Taylor anvil tests – Hopkinson bar – Expanding ring	PLASTIC-WAVE PROPAGATION	
10 ³	DYNAMIC-LOW	MECHANICAL RESONANCE IN SPECIMEN AND MACHINE IS IMPORTANT	
10 ²	High-velocity hydraulic, or pneumatic machines: cam plastometer		
10 ¹			Inertial forces negligible
10 ⁰	QUASI-STATIC Hydraulic, servo-hydraulic or screw-driven testing machines	TESTS WITH CONSTANT CROSSHEAD VELOCITY STRESS THE SAME THROUGHOUT LENGTH OF SPECIMEN	
10 ⁻¹			
10 ⁻²			
10 ⁻³			
10 ⁻⁴			
10 ⁻⁵	CREEP AND STRESS-RELAXATION	VISCOPLASTIC RESPONSE OF METALS	
10 ⁻⁶	– Conventional testing machine		
10 ⁻⁷			
10 ⁻⁸	Creep testers		
10 ⁻⁹			

Πίνακας 3.1. Κατηγοριοποίηση των τεχνικών δοκιμής ανάλογα με τον ρυθμό παραμόρφωσης [7].

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

4.1. Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ειδικότερα, θα γίνει παρουσίαση των δοκιμίων που χρησιμοποιήσαμε, των διαδικασιών στις οποίες υποβλήθηκαν, των μηχανημάτων και των συνθηκών κάτω από τις οποίες έγιναν τα πειράματα.

4.2. Σκοπός πειραματικής διαδικασίας

Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας (και της διπλωματικής εργασίας) είναι η μελέτη της κατάρρευσης ζευγών ομοαξονικών σωλήνων με διαστάσεις που εξασφαλίζουν την αλληλεπίδρασή τους προΐοισης της κατάρρευσης, και η συσχέτιση με τη συμπεριφορά των αντίστοιχων μεμονωμένων σωλήνων.



Εικόνα 4.1. Παρουσίαση ομοαξονικού ζεύγους δοκιμίων με τα μονά δοκίμια που το αποτελούν.

4.3. Περιγραφή και ονοματολογία δοκιμίων

Το κράμα αλουμινίου που χρησιμοποιήσαμε, μετά από δοκιμές σε κυκλικής και τετραγωνικής (βλ. εικόνα 4.2) διατομής δοκίμια, παρατηρήσαμε ότι είχε ψαθυρή συμπεριφορά. Ειδικότερα, στις ακμές των τετραγωνικής διατομής δοκιμίων, που είναι συγκεντρωτές τάσεων, υπήρξαν μεγάλες ρωγμές στο υλικό όπως επίσης και στα κυκλικής διατομής υπήρξαν ρωγμές στους λοβούς, μικρότερου μεγέθους βέβαια. Για να μην έχουμε

πρόβλημα ψαθυρότητας και ευθραυστότητας, ακολουθήσαμε τη διαδικασία της ανόπτησης ώστε να «μαλακώσει» το υλικό μας. Αυτό είχε άμεσες συνέπειες στις μηχανικές ιδιότητες του κράματος μας, οι οποίες μειώθηκαν περίπου 10%. Λόγω προβλημάτων που προέκυψαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήσαμε δυο φορές τον φούρνο του υπογείου του Κτιρίου Ξ, γι' αυτό θα υπάρχει η διάκριση Y1 και Y2 (το Y υποδηλώνει το "υπόγειο") κι αυτό γιατί δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι για την ομοιότητα των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν σε κάθε φουρνιά, όποτε δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι και για τα αποτελέσματα στα δοκίμια, πράγμα που επιβεβαιώνεται από τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης ανάμεσα σε ίδια δοκίμια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το κυλινδρικό δοκίμιο (40x1.5) (διάμετρος x πάχος), όπου το (40x1.5)_Y1 το μέγιστο φορτίο που δέχτηκε ήταν 30kN, ενώ στο (40x1.5)_Y2 ήταν 38kN.



Εικόνα 4.2. Ρωγμές που δημιουργήθηκαν, χωρίς να υποβληθεί πρώτα σε ανόπτηση.

Η ονοματολογία των δοκιμίων θα γίνει βάσει των διαστάσεων τους και της φουρνιάς που μπήκαν, αλλά θα γίνει και διαχωρισμός ανάμεσα σε singles και couples. Όλα τα δοκίμια και ζεύγη δοκιμίων που θα αναλυθούν σε αυτή τη διπλωματική εργασία είναι κυκλικής διατομής. Ο πρώτος αριθμός συμβολίζει την εξωτερική διάμετρο του δοκιμίου ενώ ο δεύτερος το πάχος του τοιχώματος. Τα Y1 και Y2 χαρακτηρίζουν τη φουρνιά.

Singles

	(40x1.5)_Y1	(35x2)_Y1	(25x2)_Y1	(40x1.5)_Y2	(35x3)_Y2	(25x2)_Y2	
L	100						mm
D	40	35	25	40	35	25	mm
t	1.5	2	2	1.5	3	2	mm
A	181.5	207.4	144.5	181.5	301.6	144.5	mm ²

Πίνακας 4.1. Διαστάσεις και ονοματολογία δοκιμίων (singles)

, όπου **L**: ύψος δοκιμίου, **D**: εξωτερική διάμετρος δοκιμίου, **t**: πάχος δοκιμίου, **A**: εμβαδόν ενεργούς διατομής δοκιμίου.

Couples

Τα ζεύγη που θα αναλυθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελούν συνδυασμό των παραπάνω μονών δοκιμίων (singles). Αυτά είναι:

	(40x1.5 & 35x2)_Y1	(35x2 & 25x2)_Y1	(40x1.5 & 25x2)_Y2	(35x3 & 25x2)_Y2	
Εξωτερικό δοκίμιο	(40x1.5)_Y1	(35x2)_Y1	(40x1.5)_Y2	(35x3)_Y2	mm
Εσωτερικό δοκίμιο	(35x2)_Y1	(25x2)_Y1	(25x2)_Y2	(25x2)_Y2	mm
Συνολικό εμβαδόν $A_{ολ}$	388.9	351.8	326	446.1	mm ²
r	1	3	6	2	mm

Πίνακας 4.2. Διαστάσεις και ονοματολογία ζευγών δοκιμίων (couples)

, όπου **r**: ακτινικό διάκενο ή ακτινική απόσταση μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού δοκιμίου (πόσο απέχουν η εσωτερική πλευρά του εξωτερικού δοκιμίου από την εξωτερική πλευρά του εσωτερικού δοκιμίου).

Ουσιαστικά, για το κάθε ζεύγος δοκιμίων κόπηκαν 4 δοκίμια. Τα δυο (2) από αυτά αποτελούν το ζεύγος, ενώ τα άλλα δυο (2) χρησιμοποιήθηκαν για να μελετήσουμε τον τρόπο κατάρρευσης τους ως ανεξάρτητα (singles). Τα ζεύγη επιλέχθηκαν έτσι ώστε το συνολικό εμβαδόν της ενεργούς διατομής τους και τα ακτινικά διάκενα, να είναι

διαφορετικά μεταξύ τους ώστε να δούμε πώς επηρεάζεται ο τρόπος κατάρρευσης αλλά και η αντοχή στις διάφορες περιπτώσεις.

Παράλληλα δοκιμάστηκαν και άλλα ζεύγη, τα οποία δεν μπορεί να είναι τμήμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είτε επειδή υπέστησαν λυγισμό, είτε επειδή κατά τη θλίψη ξεπεράστηκε το ονομαστικό φορτίο της μηχανής Instron και σταμάτησε η διαδικασία, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3, η οποία ελήφθη μετά την αποτυχημένη θλίψη. Τα ζεύγη αυτά, είναι:

	(35x3 & 28x3)_Y1	(33x3 & 25x3)_Y1	(40x1.5 & 33x3)_Y1	(25x3 & 18x1.5)_Y1	(25x2 & 20x1.5)_Y1	
Εξωτερικό δοκίμιο	(35x3)_Y1	(33x3)_Y1	(40x1.5)_Y1	(25x3)_Y1	(25x2)_Y1	mm
Εσωτερικό δοκίμιο	(28x3)_Y1	(25x3)_Y1	(33x3)_Y1	(18x1.5)_Y1	(20x1.5)_Y1	mm
Συνολικό εμβαδόν	537	490	464.2	285.1	231.7	mm ²
r	0.5	1	2	0.5	0.5	mm
Αποτέλεσμα	ξεπέρασε το ονομ.φορτίο	ξεπέρασε το ονομ.φορτίο	ξεπέρασε το ονομ.φορτίο	λυγισμός	λυγισμός	

Πίνακας 4.3. Διαστάσεις ζευγών δοκιμών που απέτυχαν στην πειραματική διαδικασία.



Εικόνα 4.3. Πρόχειρη απεικόνιση της διάταξης ζευγών (τα συγκεκριμένα ζεύγη της φωτογραφίας δεν χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία καθώς ξεπέρασαν το ονομαστικό φορτίο της μηχανής Instron και η διαδικασία σταμάτησε αρκετά γρήγορα. Η παραμόρφωση τους δεν είναι καθόλου ορατή).

4.4. Πειραματική διάταξη

ΜΗΧΑΝΗΜΑ ΚΟΠΗΣ



Εικόνα 4.4. Κοπτικό μηχανήμα εργαστηρίου Ξ, στο οποίο κόψαμε τα τεμάχια.

ΤΟΡΝΟΣ

Στον τόρνο λειάναμε τις επιφάνειες που θα έρθουν σε επαφή τα δοκίμιά μας, χρησιμοποιώντας αρχικά εργαλείο κοπής για μεγαλύτερη αφαίρεση υλικού και στη συνέχεια γυαλόχαρτο για τις λεπτομέρειες. Η διαδικασία έγινε με πολύ προσοχή και τελικώς δεν υπήρχε διαφορά στα τελικά μήκη (η αφαίρεση υλικού ήταν ελάχιστη).



Εικόνα 4.5. Τόρνος εργαστηρίου Ξ.

ΦΟΥΡΝΟΣ

Στον φούρνο τοποθετήσαμε τα κομμένα και έτοιμα δοκίμια για τη διαδικασία της ανόπτησης. Χρησιμοποιήθηκε δυο φορές και για αυτό υπάρχει ο διαχωρισμός Y1 και Y2 στα διάφορα τεμάχια. Και τις δυο φορές τα βάλουμε στον προ-θερμασμένο φούρνο σε θερμοκρασία 300 °C όπου και τα κρατήσαμε εκεί για μισή ώρα, στη συνέχεια κλείσαμε τον φούρνο και τα αφήσαμε μέσα να κρυώσουν για περίπου 3 μέρες. Τη δεύτερη φορά που τον χρησιμοποιήσαμε, τα βγάλαμε στις 2 μέρες και ίσως για αυτό να είχαμε αυτή τη διαφορά στην αντοχή όμοιων γεωμετρικά δοκιμίων διαφορετικής φουρνιάς.



Εικόνα 4.6. Φούρνος εργαστηρίου Ξ.

INSTRON 4482

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τη Universal μηχανή δοκιμών, έναν Η/Υ και το λογισμικό της εταιρίας Bluehill που είναι απαραίτητο για την επεξεργασία των δεδομένων, βλ. εικόνα 4.7 (αριστερά). Η Universal μηχανή είναι της εταιρίας Instron και έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί δοκιμές εφελκυσμού, κάμψης και θλίψης τοποθετώντας τα κατάλληλα εργαλεία. Στην εικόνα 4.7 (δεξιά) φαίνονται τα εργαλεία θλίψης που είναι προσαρμοσμένα στις κεφαλές της μηχανής. Το υλικό τους είναι βαμμένος χάλυβας ενώ οι δυο πλάκες δεν είναι τελείως παράλληλες, κάτι που οδήγησε στον λυγισμό κάποιων δοκιμίων με συγκεκριμένη κατεύθυνση.

Τεχνικά χαρακτηριστικά της Instron 4482 [6]:

- Ονομαστικό φορτίο: 10kN,
- Μέγιστη ταχύτητα κεφαλής: 500mm/min,
- Μέγιστο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα: 75kN,
- Μέγιστη ταχύτητα κεφαλής στο μέγιστο φορτίο: 250mm/min.



Εικόνα 4.7. Η πειραματική διάταξη που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών του ΕΜΠ (αριστερά). Τα εργαλεία θλίψης της INSTRON 4482 (δεξιά).

4.5. Πειραματικές συνθήκες

Τα δοκίμια (μονά και ζεύγη) είναι τοποθετημένα στη μηχανή δοκιμών με τέτοιο τρόπο ώστε η βάση τους να έχει δεσμευμένο μόνο τον κατακόρυφο βαθμό ελευθερίας. Κατά την αξονική συμπίεση η άνω κεφαλή, η οποία είναι και η κινητή κεφαλή, έχει ρυθμιστεί να διανύσει 60mm (δηλαδή να παραμορφώσει τα 3/5 του συνολικού ύψους των δοκιμίων) με κατακόρυφη ταχύτητα εμβόλου 20mm/min. Η επιλογή του μήκους βράχυνσης των δοκιμίων έγινε έτσι ώστε να μην έχουμε συμπίεση συμπαγούς υλικού, πράγμα που θα συνέβαινε αν η διαδρομή της άνω πλάκας ήταν ακόμα μεγαλύτερη. Το ύψος όλων των δοκιμίων είναι 100mm και σε αυτή την ταχύτητα εμβόλου αντιστοιχεί ολικός ρυθμός παραμόρφωσης $\frac{d\varepsilon}{dt} = 3.33 * 10^{-3}$, που σύμφωνα με τον πίνακα 3.1, η δοκιμή χαρακτηρίζεται οιονεί στατική.

5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ & ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1. Γενικά

Το κεφάλαιο αυτό χωρίζεται σε τέσσερα μέρη. Στο πρώτο θα αναλυθούν τα πειραματικά μοντέλα μας, ενώ στο δεύτερο θα γίνει σύντομη περιγραφή της μοντελοποίησης της πειραματικής διαδικασίας και σύγκρισή των αριθμητικών μοντέλων με τα πειραματικά. Εφόσον κριθεί ότι η μοντελοποίηση προσομοιάζει ικανοποιητικά την πειραματική διαδικασία, θα περάσουμε στο τρίτο κομμάτι του κεφαλαίου, όπου θα παρουσιαστούν τα ζεύγη δοκιμίων που ξεπέρασαν το ονομαστικό φορτίο της μηχανής Instron, για τα οποία θα γίνει μόνο αριθμητική προσομοίωση. Τέλος, στο τέταρτο μέρος θα εξάγουμε συμπεράσματα.

5.2. Πειραματικά μοντέλα

5.2.1. Γενικά

Στην κάθε υποενότητα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα κατάρρευσης πρώτα των εξωτερικών δοκιμίων (μονό δοκίμιο, δηλαδή πώς κατέρρευσε χωρίς την επίδραση άλλου), δεύτερα των εσωτερικών δοκιμίων (μονό δοκίμιο) και τρίτα των ζευγών δοκιμίων (διπλό δοκίμιο το οποίο αποτελείται από τα δυο προηγούμενα μονά). Στη συνέχεια παρατίθενται οι τελικές τους όψεις, τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης και γίνεται η περιγραφή της κατάρρευσης τους.

Τα μεγέθη με τα οποία θα αξιολογήσουμε τη συμπεριφορά των συστημάτων ομοαξονικών σωλήνων ως απορροφητές ενέργειας, είναι τα ακόλουθα:

P_{max} : είναι το μέγιστο φορτίο που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια του πειράματος και είναι συνήθως το πρώτο peak του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης. Ιδανικά προτιμάται να είναι χαμηλό ώστε να έχουμε μικρή επιβράδυνση.

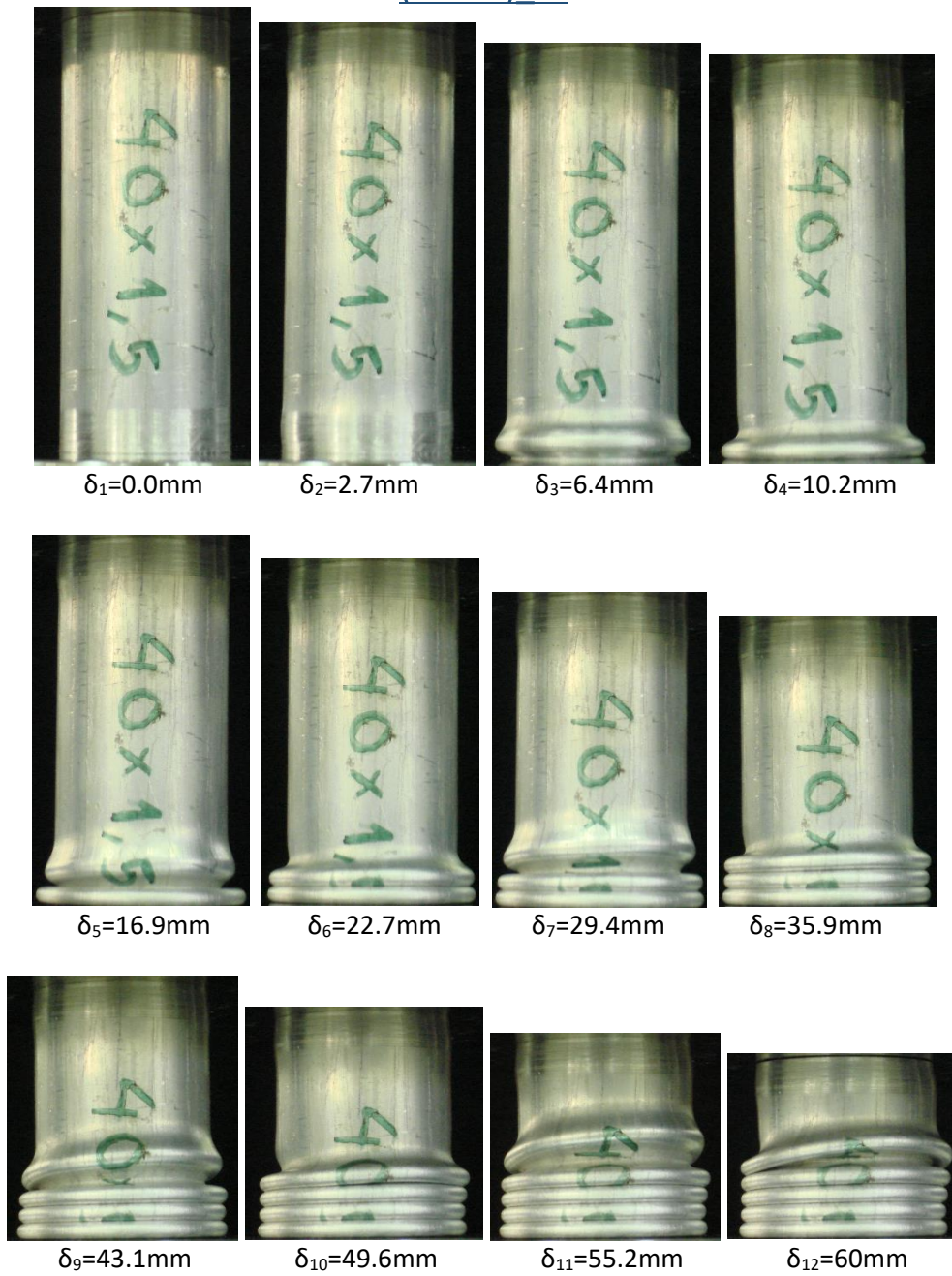
W : είναι η συνολική ενέργεια που απορροφήθηκε κατά τη διάρκεια της δοκιμής και αντιπροσωπεύει το εμβαδό κάτω από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης.

P_{μ} : είναι το μέσο φορτίο κατά τη δοκιμή και είναι ενδεικτικό της ενέργειας απορρόφησης για δεδομένη μετατόπιση. Συγκεκριμένα: $P_{\mu} = \frac{W}{\delta_2 - \delta_1}$.

CFE : είναι ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (crush force efficiency) και ορίζεται ως ο λόγος του μέσου φορτίου προς το μέγιστο. Στη βέλτιστη περίπτωση η τιμή του θέλουμε να προσεγγίζει τη μονάδα (100%). $CFE = \frac{P_{\mu}}{P_{max}} 100\%$.

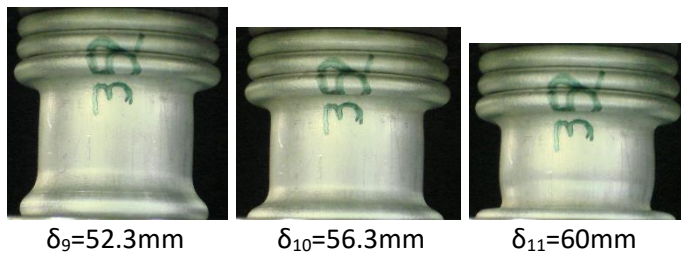
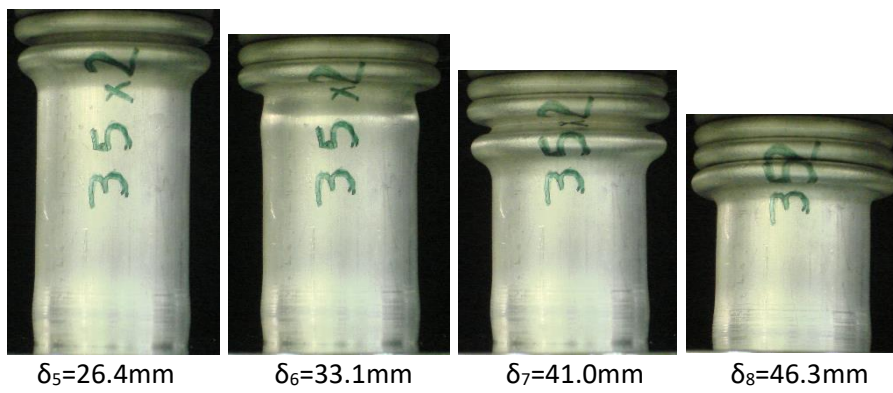
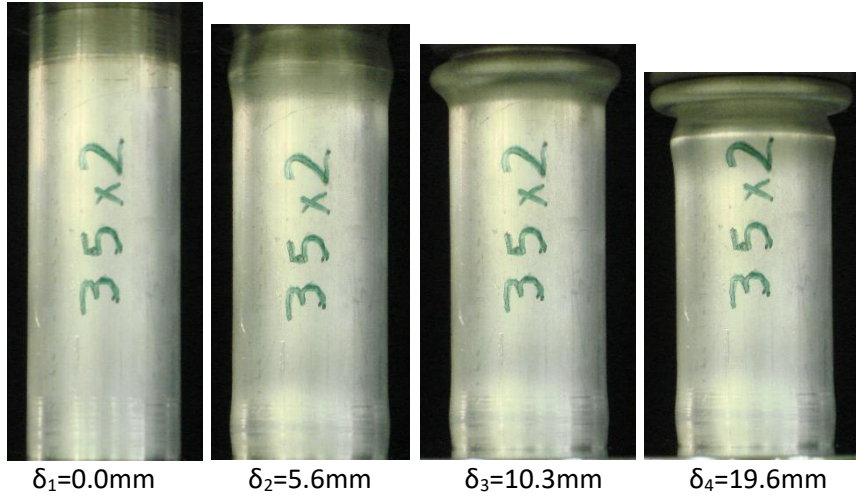
5.2.2. (40x1.5 & 35x2)_Y1

(40x1.5) Y1



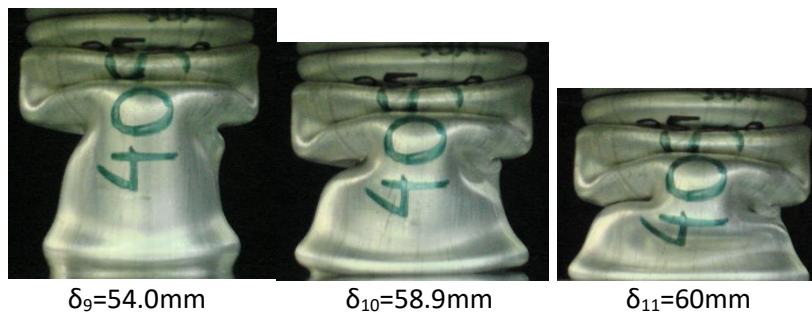
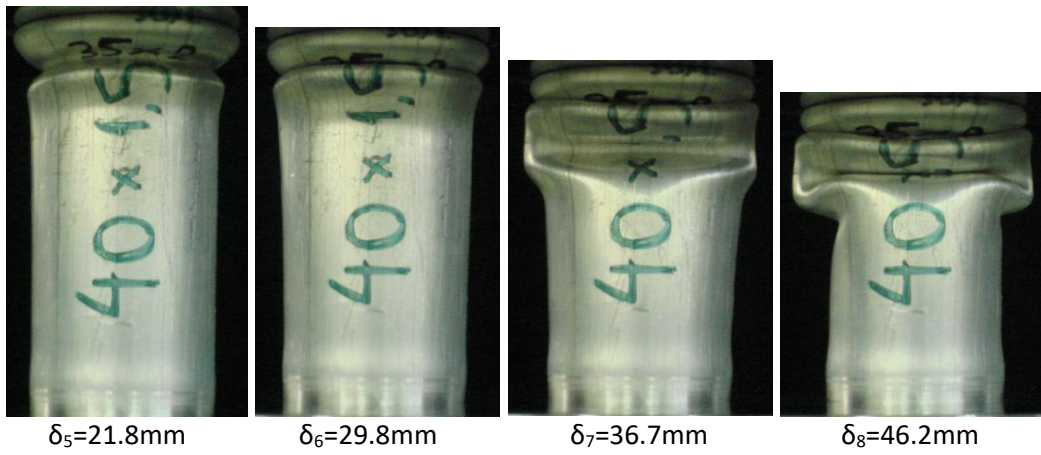
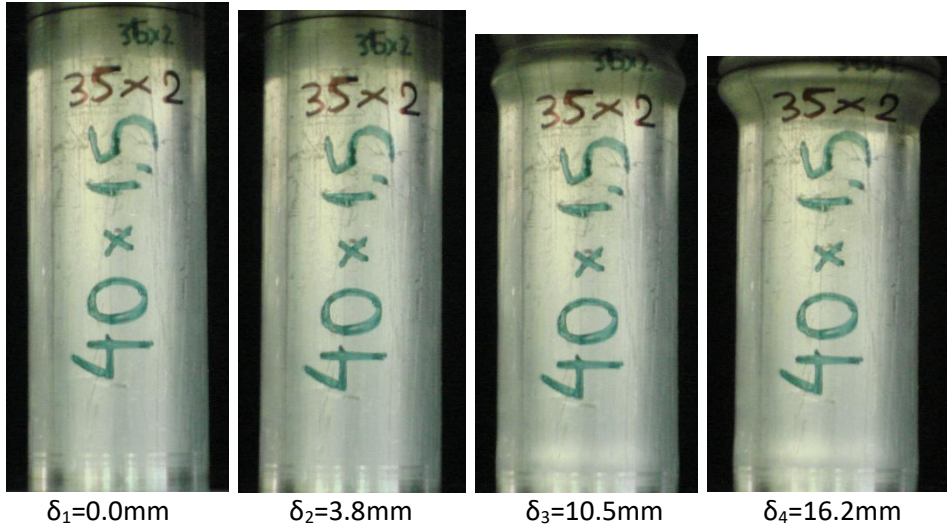
Εικόνα 5.1. Στιγμιότυπα κατάρρευσης (40x1.5)_Y1.

(35x2) Y1



Εικόνα 5.2. Στιγμιότυπα κατάρρευσης (35x2)_Y1.

(40x1.5 & 35x2) Y1



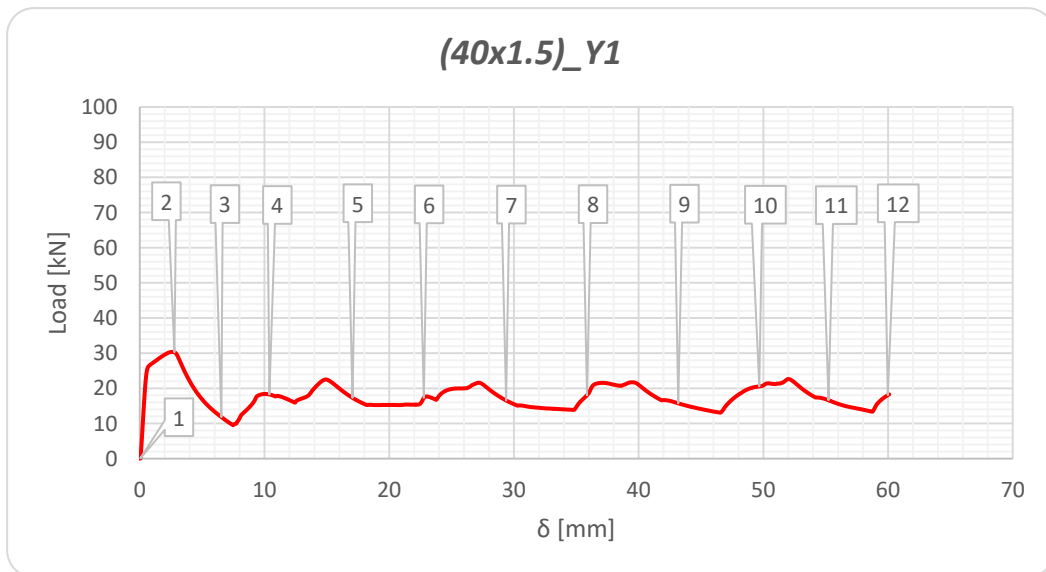
Εικόνα 5.3. Στιγμιότυπα κατάρρευσης (40x1.5 & 35x2)_Y1.

ΤΕΛΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ
(40x1.5 & 35x2) Y1

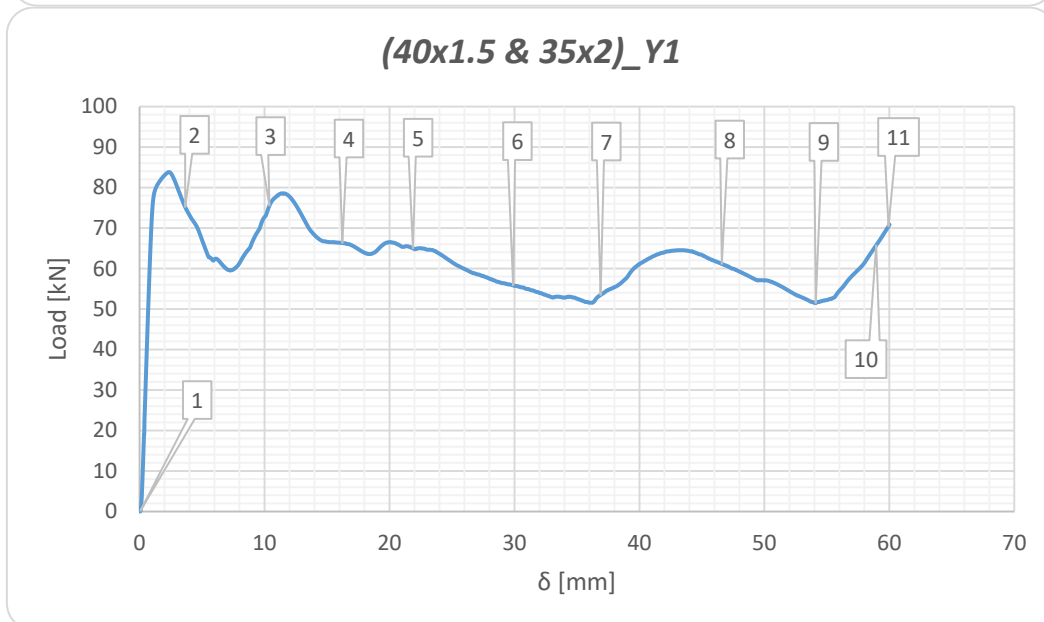


Εικόνα 5.4. Τελικές όψεις του (40x1.5 & 35x2)_Y1.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



Εικόνα 5.5. Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης των δοκιμών (μονών και ζευγών). Οι αριθμοί προσδιορίζουν τα στιγμιότυπα κατάρρευσης που αντιστοιχούν στο κάθε σημείο της καμπύλης.



Εικόνα 5.5. Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης των δοκιμών (μονών και ζευγών). Οι αριθμοί προσδιορίζουν τα στιγμιότυπα κατάρρευσης που αντιστοιχούν στο κάθε σημείο της καμπύλης (συνέχεια).

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1

	(40x1.5)_Y1	(35x2)_Y1	(40x1.5 & 35x2)_Y1	
P_{max}	30.3	45.2	83.8	kN
P_{μ}	17.7	31.5	61.7	kN
W	1.07	1.9	3.7	kJ
CFE	58.4	69.7	73.6	%
A (ή $A_{ολ}$)	181.5	207.4	388.9	mm ²

Πίνακας 5.1. Αποτελέσματα δοκιμών που αφορούν το ζεύγος (40x1.5 & 35x2)_Y1.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

➤ (40x1.5)_Y1

Το δοκίμιο κατέρρευσε αξονοσυμμετρικά και έτσι όλοι οι λοβοί έχουν μορφή δαχτυλιδιού (πολύ χαρακτηριστικό μοτίβο φουσαρμόνικας).

1^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 2\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 11\text{mm}$.

2^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 12\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 24\text{mm}$.

3^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 25\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 37\text{mm}$.

4^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 38\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 51\text{mm}$.

5^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 52\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 60\text{mm}$ (δεν έχει «πατηθεί» πλήρως).

Παρατηρήσεις: στο άνω άκρο παρατηρείται ένα μικρό «φούσκωμα» ($\delta \approx 2\text{mm}$) το οποίο παραμένει σε αυτό το μέγεθος σχεδόν για όλη τη διάρκεια του πειράματος καθώς στο τέλος ($\delta \approx 43\text{mm}$) αρχίζει να μεγαλώνει, δείχνοντας ότι πάει να σχηματίσει ακόμα ένα αξονοσυμμετρικό λοβό. Αυτό οφείλεται στην κλίση που έχουν οι λοβοί οι οποίοι κάνουν τη μια μεριά να φορτίζεται περισσότερο. Η κλίση αυτή είναι αίτιο ανόμοιου πάχους τοιχώματος που παρατηρήθηκε στον σωλήνα (40x1.5). Το μεγαλύτερο πάχος δημιουργεί πιο παχείς λοβούς, για αυτό και οι λοβοί εδώ είναι ανασηκωμένοι.

➤ (35x2)_Y1

Το δοκίμιο κατέρρευσε αξονοσυμμετρικά και έτσι όλοι οι λοβοί έχουν μορφή δαχτυλιδιού (πολύ χαρακτηριστικό μοτίβο φουσαρμόνικας).

1^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 2\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 14\text{mm}$.

2^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 16\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 30\text{mm}$.

3^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 31\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 46\text{mm}$.

4^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 2\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 60\text{mm}$.

Παρατήρηση: στο κάτω άκρο δημιουργείται σχετικά νωρίς ο τελευταίος λοβός αλλά ολοκληρώνεται αφού δημιουργηθούν πλήρως όλοι οι υπόλοιποι.

➤ **(40x1.5 & 35x2)_Y1**

1^{ος} λοβός:

- Τύπος: αξονοσυμμετρικός (μορφή δαχτυλιδιού,ring),
- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 5\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 17\text{mm}$.

2^{ος} λοβός:

- Τύπος: 2D (διαμαντιού, μη εκτατός)
- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 17\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 32\text{mm}$.

3^{ος} λοβός:

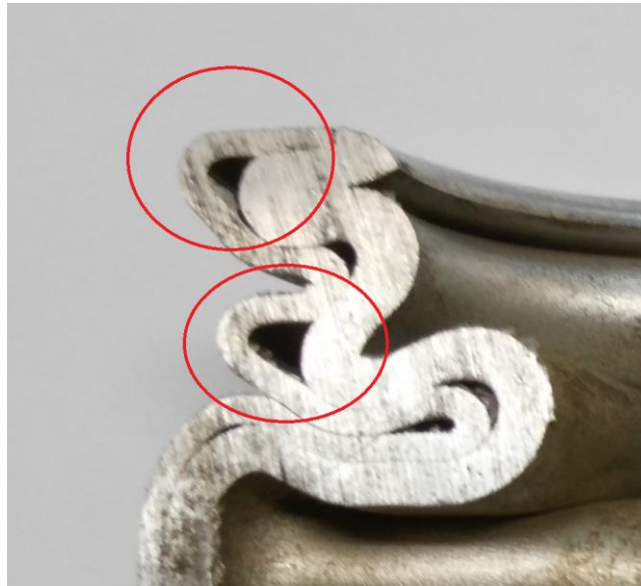
- Τύπος: 2D (διαμαντιού, μη εκτατός)
- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 32\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 46\text{mm}$.

4^{ος} λοβός:

- Τύπος: 2D (διαμαντιού, μη εκτατός)
- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 46\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 60\text{mm}$.

Κατάρρευση:

Το ζεύγος κατέρρευσε με μικτό τρόπο, συνδυάζοντας και τον αξονοσυμμετρικό και το μη συμμετρικό. Για ακόμα μια φορά στο κάτω άκρο ο κάτω λοβός ξεκινάει το σχηματισμό του αρκετά νωρίς δημιουργώντας φούσκωμα, σταματάει, και ξεκινάει ξανά στο $\delta \approx 50\text{mm}$ παίρνοντας τη μορφή 2D λοβού. Οι διαδοχικοί 2D λοβοί είναι στραμμένοι μεταξύ τους κατά π rad, όπως ήταν αναμενόμενο και φαίνονται πολύ καλά και στην τομή του ζεύγους (βλ. εικόνα 5.4). Στην εικόνα 5.6 φαίνεται ότι οι λοβοί του εξωτερικού δοκιμίου δεν έχουν «κλείσει» μεταξύ τους, αλλά παρεμβάλλονται οι λοβοί του εσωτερικού οι οποίοι έχουν «κλείσει» κανονικά. Σε γενικές γραμμές, παρατηρούμε ότι τα δυο δοκίμια εφάπτονται μεταξύ τους πολύ καλά, οπότε βρίσκονται σε επαφή σε πολύ μεγάλο ποσοστό της επιφάνειάς τους, χωρίς να δημιουργούνται μεγάλα κενά μεταξύ τους.



Εικόνα 5.6

Ενέργεια απορρόφησης:

Αυτή η καλή επαφή και συμμετρία συμβάλλει ώστε το ζεύγος (40x1.5 & 35x2)_Y1 να απορροφά ενέργεια (3.7 kJ) 25% μεγαλύτερη από το άθροισμα των ενεργειών που απορρόφησαν τα δυο ανεξάρτητα μονά, (40x1.5)_Y1 (1.07 kJ) και (35x2)_Y1 (1.9 kJ), παρόλο που τα μονά κατέρρευσαν με τον αξονοσυμμετρικό τρόπο (για τις ενέργειες απορρόφησης βλ. και πίνακα 5.1).

Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης:

Η μέγιστη τιμή της δύναμης αντίστασης και των μονών και του ζεύγους δοκιμίων εμφανίστηκε στην αρχή της κατάρρευσης, δηλαδή κατά τη δημιουργία του πρώτου

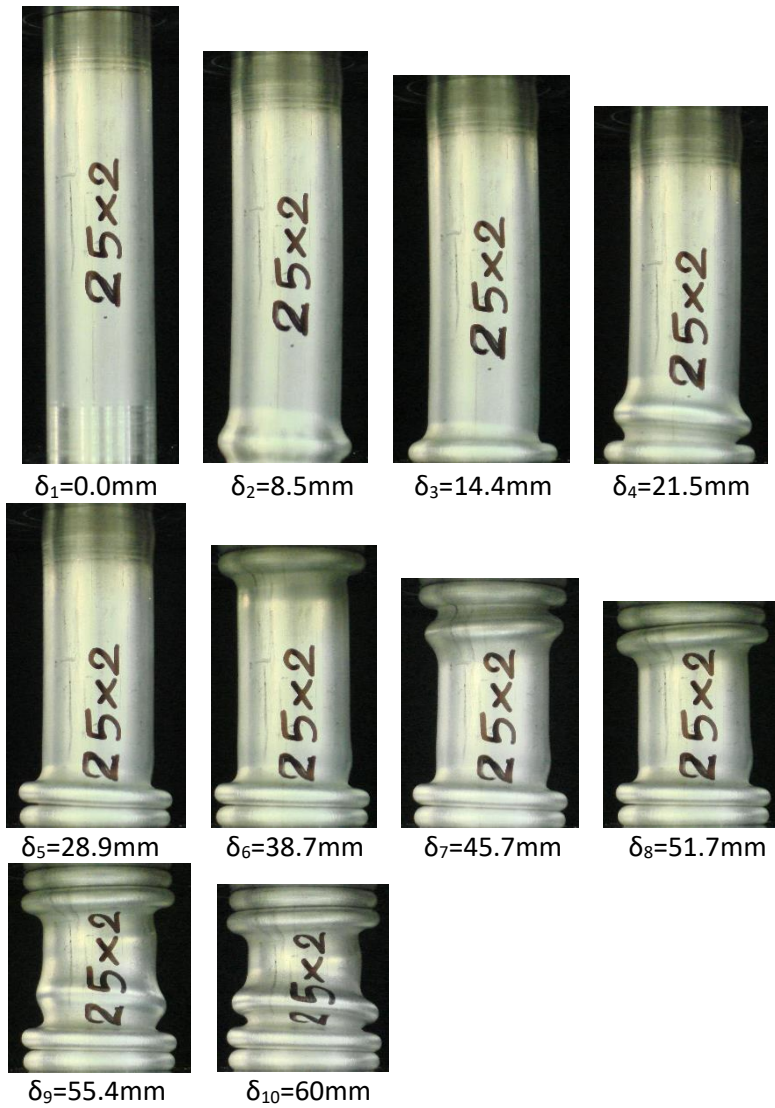
λοβού, ο οποίος σε όλες τις περιπτώσεις είναι αξονοσυμμετρικός. Το μέγιστο φορτίο του ζεύγους ξεπερνά κατά περίπου 11% το άθροισμα των μεγίστων φορτίων των μονών δοκιμίων, γεγονός που αποδίδεται στη μικρή ακτινική απόσταση που κάνει τον εσωτερικό και εξωτερικό σωλήνα να αλληλεπιδρούν έντονα μεταξύ τους. Τα μονά δοκίμια εμφανίζουν περιοδικότητα στις αυξομειώσεις του φορτίου, αποτέλεσμα του σχετικά ομοιόμορφου πάχους των τοιχωμάτων τους και της επιφάνειας χωρίς ατέλειες. Από τα τοπικά μέγιστα είναι εμφανής και ο αριθμός των λοβών. Στο διάγραμμα του ζεύγους (40x1.5 & 35x2)_Y1, παρατηρούμε δυο peak, λίγο πριν το στιγμιότυπο δ₂ και λίγο μετά το δ₃. Το πρώτο οφείλεται στην έναρξη δημιουργίας του 1^{ου} αξονοσυμμετρικού λοβού και το δεύτερο σε πιθανή εσωτερική επαφή των δοκιμίων, καθώς δεν δικαιολογείται από τις φωτογραφίες δημιουργία άλλου λοβού μετά το δ₃. Όσο το σύστημα καταρρέει αξονοσυμμετρικά, τόσο υψηλότερες τιμές αντίστασης σημειώνονται. Στο στιγμιότυπο δ₅ και μέχρι το δ₉, έχουμε μεγάλη πτώση φορτίου, γεγονός που οφείλεται στη μη συμμετρική κατάρρευση και δημιουργία 2D λοβών. Μετά από αυτό το διάστημα, η δύναμη αντίστασης αυξάνεται λόγω δημιουργίας και πάλι λοβού μορφής δαχτυλιδιού.

Η ομοιομορφία του φορτίου είναι ακόμα κάτι που χρίζει προσοχής. Στο (35x2)_Y1 τα τοπικά μέγιστα είναι σχεδόν ίσα με το ολικό μέγιστο (επειδή όσο υψηλότερα τα τοπικά μέγιστα, τόσο μεγαλύτερο το μέσο φορτίο), χαρακτηριστικό που του προσδίδει αυξημένο (69.7%) δείκτη ομοιομορφίας, CFE. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο πάχος τοιχώματος που σε συνδυασμό με τη μικρότερη διάμετρο, κάνουν το δοκίμιο αυτό πιο στιβαρό, καθώς κατά τη δημιουργία των λοβών το υπόλοιπο υλικό δεν «τραυματίζεται» και συνέπεια είναι η υψηλή αντίσταση και κατά τη δημιουργία των επόμενων λοβών. Έτσι είναι ικανό να απορροφήσει περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με το (40x1.5)_Y1 που τα τοπικά μέγιστα είναι ίσα μεταξύ τους αλλά όχι και με το ολικό, μειώνοντας έτσι το δείκτη ομοιομορφίας του (58.4%). Ο δείκτης CFE είναι αρκετά μεγάλος και στο ζεύγος, παρόλο που τα τοπικά μέγιστα δεν είναι ίσα με το ολικό. Αυτό εξηγείται γιατί οι τιμές και του μέγιστου και του μέσου φορτίου είναι μεγάλες, οπότε ο λόγος τους μας δίνει ικανοποιητικό CFE (73.6%).

5.2.3. (35x2 & 25x2)_Y1

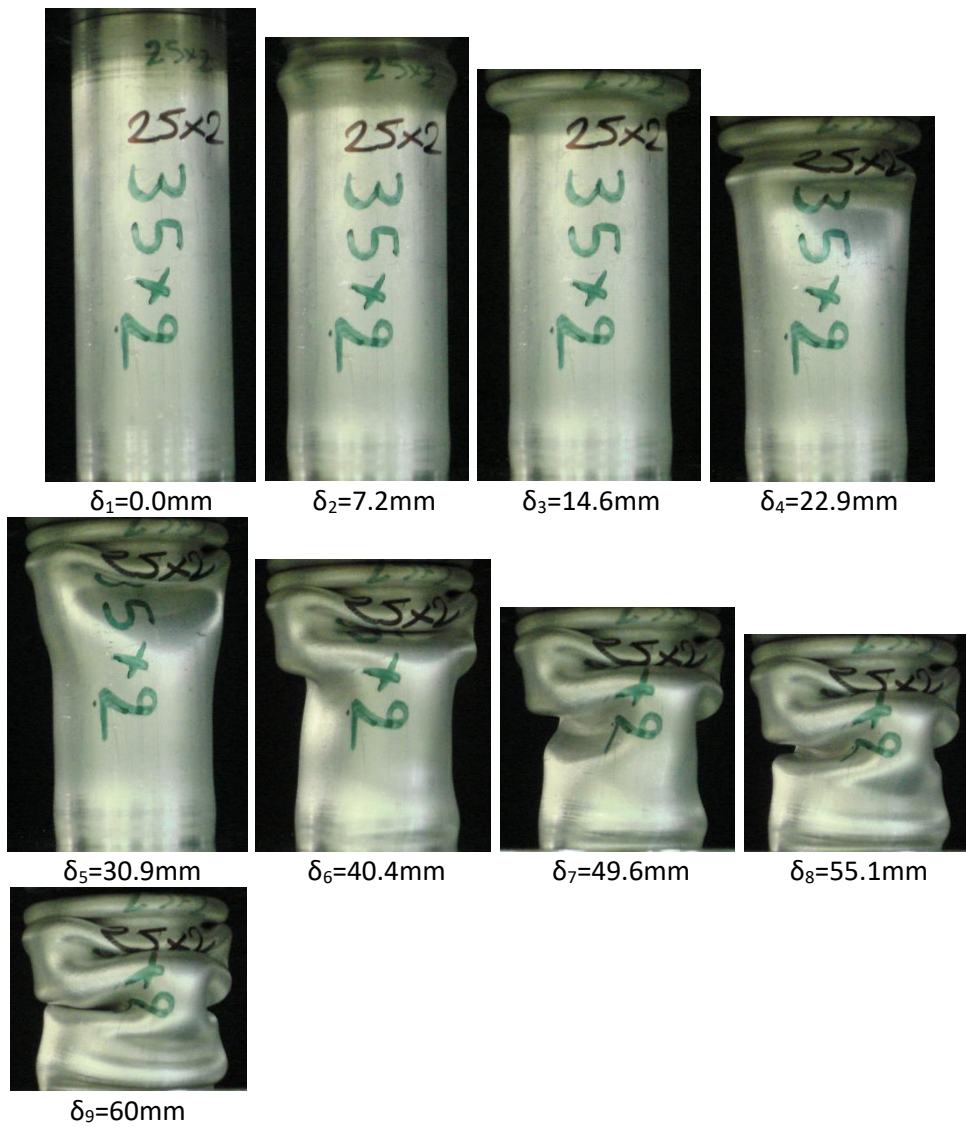
Το εξωτερικό δοκίμιο (35x2)_Y1 παρατίθεται στην παρουσίαση του προηγούμενου ζεύγους, οπότε για λόγους οικονομίας χώρου δεν θα παρουσιαστεί και εδώ.

(25x2) Y1



Εικόνα 5.7. Στιγμιότυπα κατάρρευσης (25x2)_Y1.

(35x2 & 25x2) Y1



Εικόνα 5.8. Στιγμιότυπα κατάρρευσης (35x2 & 25x2)_Y1.

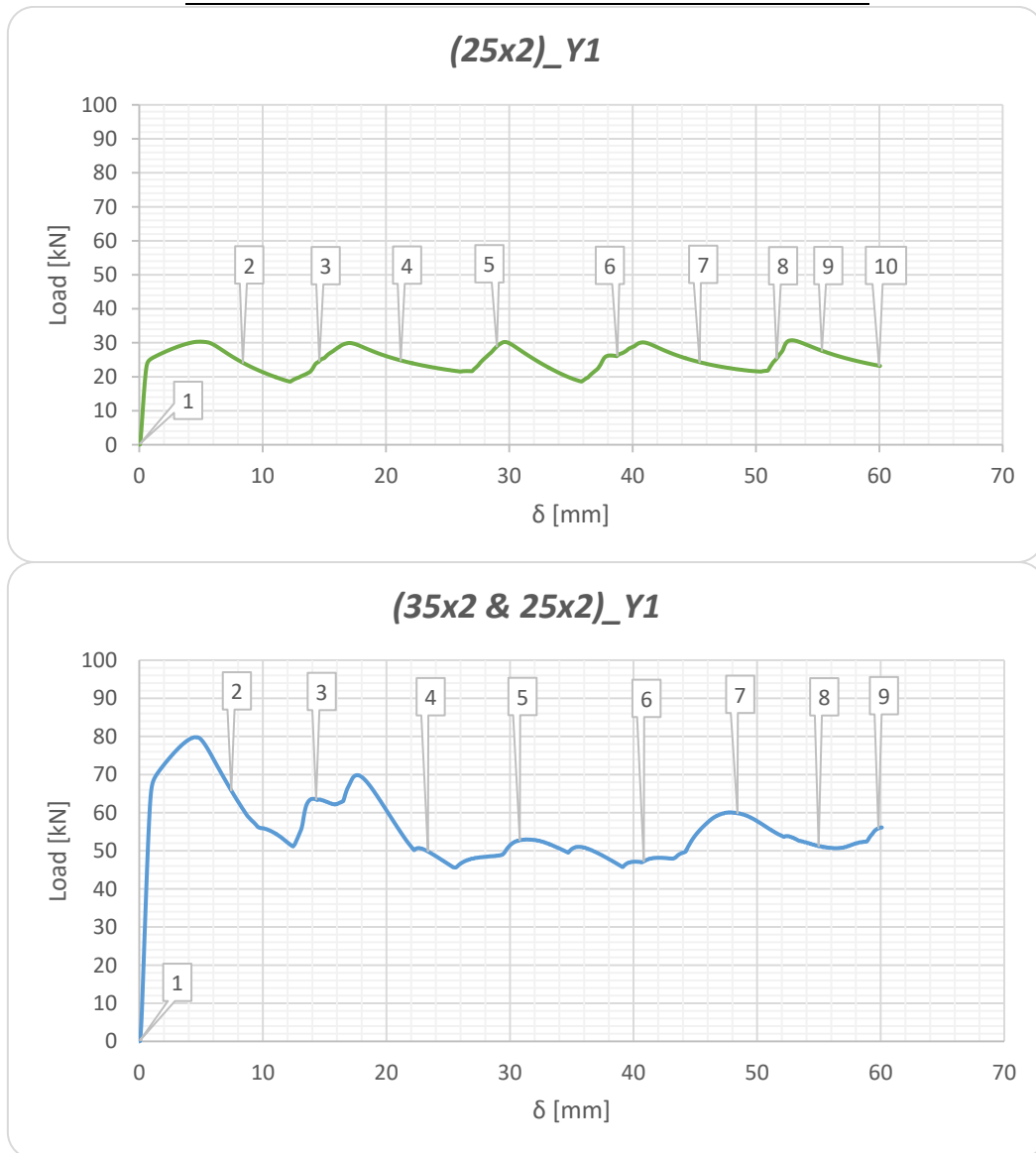
ΤΕΛΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ
(35x2 & 25x2) Y1





Εικόνα 5.9. Τελικές όψεις του (35x2 & 25x2)_Y1 (συνέχεια).

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



Εικόνα 5.10. Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης των δοκιμών (μονών και ζευγών). Οι αριθμοί προσδιορίζουν τα στιγμιότυπα κατάρρευσης που αντιστοιχούν στο κάθε σημείο της καμπύλης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2

	(35x2)_Y1	(25x2)_Y1	(35x2 & 25x2)_Y1	
P_{max}	45.2	30.7	79.8	kN
P_{μ}	31.5	25.0	55.7	kN
W	1.9	1.5	3.35	kJ
CFE	69.7	81.4	69.8	%
A (ή $A_{ολ}$)	207.4	144.5	351.8	mm ²

Πίνακας 5.2. Αποτελέσματα δοκιμών που αφορούν το ζεύγος (35x2 & 25x2)_Y1.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

➤ (25x2)_Y1

Το δοκίμιο κατέρρευσε αξονοσυμμετρικά και έτσι όλοι οι λοβοί έχουν μορφή δαχτυλιδιού (πολύ χαρακτηριστικό μοτίβο φουσαρμόνικας).

1^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 2\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 16\text{mm}$.

2^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 16\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 29\text{mm}$.

3^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 28\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 40\text{mm}$.

4^{ος} λοβός:

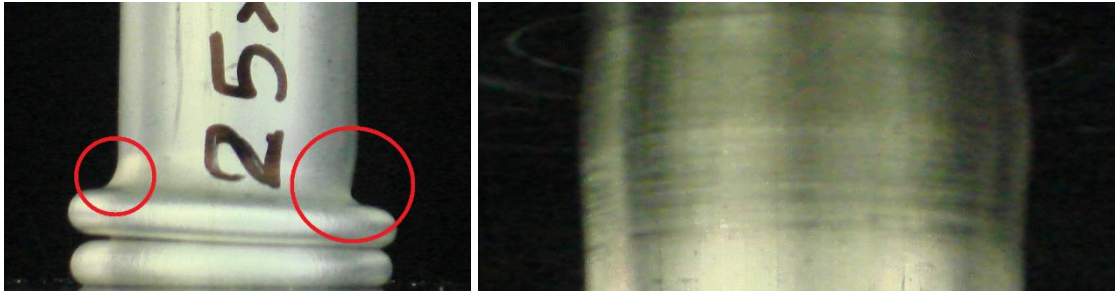
- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 41\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 52\text{mm}$.

5^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 28\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 60\text{mm}$ (δεν έχει «πατηθεί» πλήρως).

Παρατηρήσεις: ο 2^{ος} λοβός έχει μια μικρή κλίση, πάλι λόγω διαφορετικού πάχους περιφερειακά, η οποία προκαλεί συμπίεση συμπαγούς υλικού στη δεξιά (όπως το βλέπουμε στη φωτογραφία) πλευρά του δοκιμίου, αλλά όχι στην αριστερή. Έχουμε δημιουργία έντονης καμπύλης από τα δεξιά (βλ. εικόνα 5.11, αριστερά) αφού από εκεί ο

λοβός είναι ολοκληρωμένος και η έτσι η αριστερή αντιστέκεται περισσότερο. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη αντίσταση σε σχέση με το άνω άκρο (που σίγουρα έχει δεχτεί μικροτραυματισμούς στο υλικό του) και έτσι ο 3^{ος} λοβός ξεκινάει από πάνω (βλ. εικόνα 5.11, δεξιά). Στο στιγμιότυπο όπου $\delta_2=8.5\text{mm}$ παρατηρούμε ότι το δοκίμιο έχει κάνει ένα ελαφρύ τόξο, οδεύοντας προς λυγισμό, όμως προοδευτικά μετατρέπεται ($\delta \approx 28\text{mm}$) στον τελευταίο αξονοσυμμετρικό λοβό, ενώ χαρακτηριστική είναι και η κλίση του.



Εικόνα 5.11. Μεγαλύτερη αντίσταση από την αριστερή μεριά, λόγω ελαφριάς κυρτότητας (αριστερή φωτογραφία), έναρξη 3^{ου} λοβού στο πάνω μέρος (δεξιά φωτογραφία).

➤ (35x2 & 25x2)_Y1

1^{ος} λοβός:

- Τύπος: αξονοσυμμετρικός (μορφή δαχτυλιδιού, ring),
- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 2\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 15\text{mm}$.

2^{ος} λοβός:

- Τύπος: 2D (διαμαντιού, μη εκτατός),
- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 15.5\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 40\text{mm}$.

3^{ος} λοβός:

- Τύπος: 2D (διαμαντιού, μη εκτατός),
- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 28\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 50\text{mm}$.

4^{ος} λοβός:

- Τύπος: 2D (διαμαντιού, μη εκτατός),
- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 40\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 60\text{mm}$.

Κατάρρευση:

Η ακτινική απόσταση των $r = 3\text{mm}$, βοηθάει ώστε και το εξωτερικό και το εσωτερικό δοκίμιο να τείνουν να καταρρεύσουν αξονοσυμμετρικά (παρόλο που υπάρχει επαφή η οποία αλλάζει την «πορεία» του εσωτερικού δοκιμίου, βλ. εικόνα 5.9 και πιο συγκεκριμένα την κάτοψη). Στην συνέχεια όμως, καθώς τα δοκίμια έρχονται σε επαφή, μπορούμε να πούμε ότι έχουν κοινό τρόπο κατάρρευσης, με το εσωτερικό να ακολουθεί μια πιο ανώμαλη συμπεριφορά. Ο 2D λοβός του εσωτερικού έχει ακουμπήσει την απέναντι μεριά και την σπρώχνει προς τα πάνω, ενώ και ο 2D λοβός του εξωτερικού δεν εφάπτεται στον εσωτερικό με αποτέλεσμα να δημιουργείται κενό (βλ. εικόνα 5.9 την τομή).

Ενέργεια απορρόφησης:

Στα μονά δοκίμια περιμέναμε αυτές τις διαφορές μεταξύ τους, μιας και τα δυο καταρρέουν αξονοσυμμετρικά και η επιφάνεια του (35x2)_Y1 είναι μεγαλύτερη του (25x2)_Y1 (βλ. πίνακα 5.2).

Μετά την κατάρρευση, μεγάλο μέρος των επιφανειών των δοκιμίων του ζεύγους είναι σε επαφή και σε αρκετά σημεία έχουμε συμπίεση συμπαγούς υλικού, πράγμα που μας οδηγεί στην υπόθεση ότι θα πρέπει η ενέργεια απορρόφησης του (35x2 & 25x2)_Y1 (3.35 kJ) να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των μονών (35x2)_Y1 (1.9 kJ) και (25x2)_Y1 (1.5 kJ). Όμως η έλλειψη συμμετρίας στην κατάρρευση, ιδιαίτερα του (25x2)_Y1 που καταρρέει «άτσαλα», δηλαδή δεν ενισχύει το εξωτερικό δοκίμιο και το γεγονός ότι τα μονά δοκίμια κατέρρευσαν αξονοσυμμετρικά, καθιστά την υπόθεση αυτή εσφαλμένη, καθώς ο μη συμμετρικός τρόπος κατάρρευσης που ακολούθησε το ζεύγος απορροφά λιγότερη ενέργεια (συγκεκριμένα 1% λιγότερο).

Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης:

Το άθροισμα των μέγιστων φορτίων των μονών δοκιμίων (45.2kN το εξωτερικό και 30.7kN το εσωτερικό) είναι μικρότερο κατά περίπου 5% από το μέγιστο φορτίο του ζεύγους (79.8kN). Η διαφορά τους είναι πολύ μικρή και μπορεί να αποδοθεί στην επαφή του εσωτερικού με τον εξωτερικό σωλήνα καθώς σε εκείνο το σημείο μπορεί να ακουμπάνε μεταξύ τους ελαφρώς.

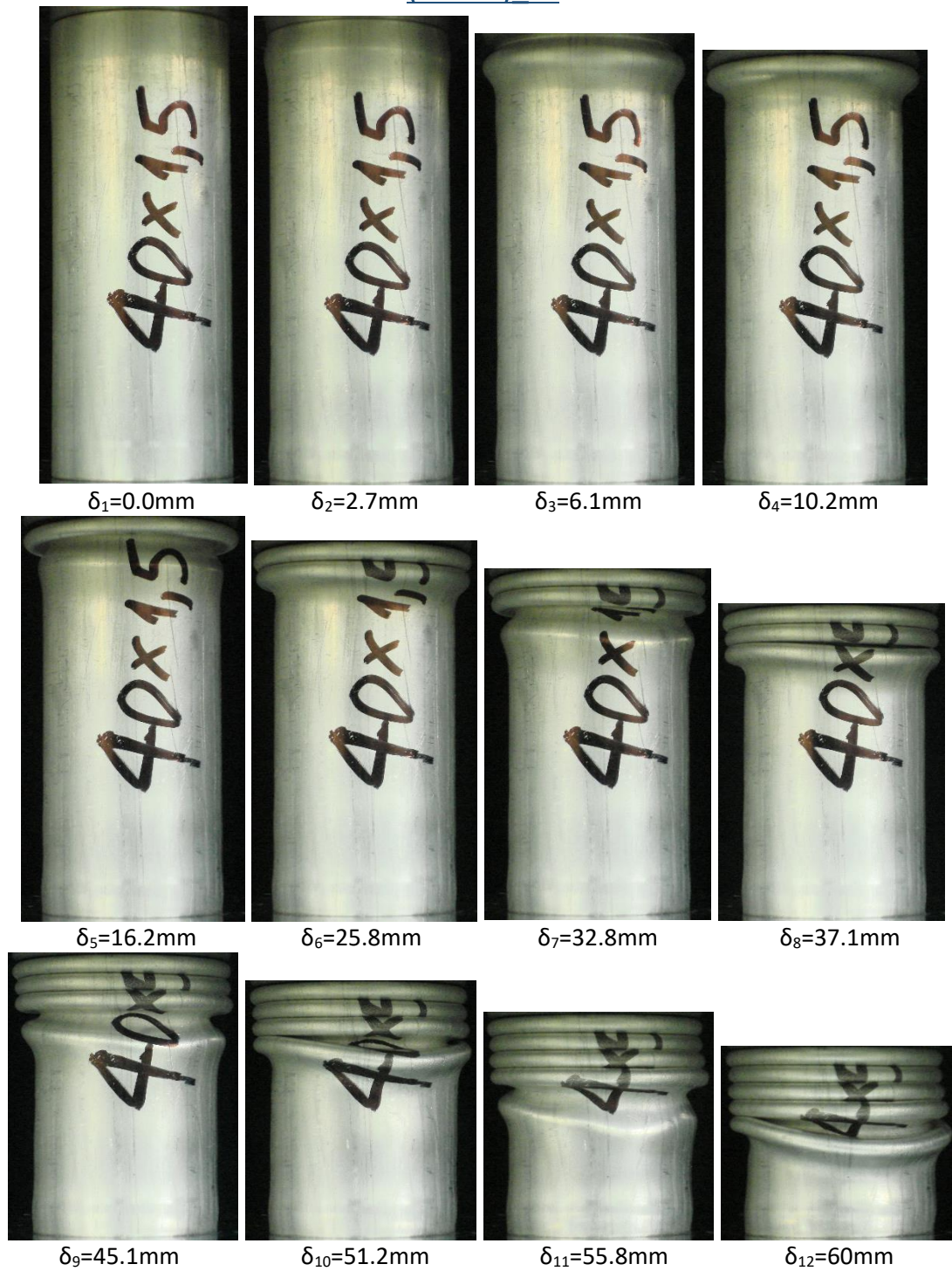
Στο δοκίμιο (25x2)_Y1 και οι πέντε λοβοί που δημιουργήθηκαν ήταν εξίσου ανθεκτικοί ως προς το φορτίο θλίψης φτάνοντας την τιμή των 30 kN και κάτι παραπάνω. Η μέγιστη

τιμή όμως σημειώθηκε για $\delta \approx 53\text{mm}$ επειδή, κοιτάζοντας τα στιγμιότυπα κατάρρευσης, παρατηρούμε ότι το κομμάτι του σωλήνα που έχει απομείνει προς συμπίεση είναι αρκετά κοντό, μειώνοντας έτσι το λόγο L/D και κάνοντας το κομμάτι αυτό πολύ συμπαγές. Στο ζεύγος (35x2 & 25x2)_Y1 η μέγιστη τιμή του φορτίου σημειώνεται στην αρχή για μικρή μετατόπιση ($\delta \approx 4.5\text{mm}$), όπως ήταν αναμενόμενο και για μετατόπιση $\delta \approx 31\text{mm}$ έχουμε ένα τοπικό peak που είναι πιο μικρό και από το μέσο φορτίο του ζεύγους. Μια πιθανή εξήγηση είναι ότι η άτσαλη κατάρρευση του εσωτερικού δοκιμίου έχει δημιουργήσει τις συνθήκες για μειωμένη αντίσταση του συνόλου. Ο αριθμός των λοβών φανερώνεται και από το διάγραμμα, επιβεβαιώνοντας την μη ολοκλήρωση του 5^{ου} λοβού.

Το στιβαρό (25x2)_Y1 ήταν αναμενόμενο ότι θα είχε πολύ καλό δείκτη CFE, με την τιμή 81.4% να θεωρείται πάρα πολύ ικανοποιητική. Επίσης ομοιόμορφο μπορεί να χαρακτηριστεί και το φορτίο του ζεύγους (69.8%), όμως και αυτό οφείλεται στις υψηλές τιμές του μέγιστου και μέσου φορτίου, καθώς ρίχνοντας μια πρόχειρη ματιά στο διάγραμμα υπάρχουν σημαντικές αλλά όχι μεγάλες αυξομειώσεις.

5.2.4. (40x1.5 & 25x2)_Y2

(40x1.5) Y2



Εικόνα 5.12. Στιγμιότυπα κατάρρευσης (40x1.5)_Y2.

(25x2) Y2 short

Για το δοκίμιο (25x2)_Y2 δεν έχουν ληφθεί στιγμιότυπα γιατί το υλικό δεν έφτανε ώστε να κοπεί ένα κομμάτι 100mm. Αντί αυτού, κόπηκε ένα δοκίμιο 85mm το οποίο συμπιέστηκε 50mm αντί για 60mm και λάβαμε τελικές φωτογραφίες.

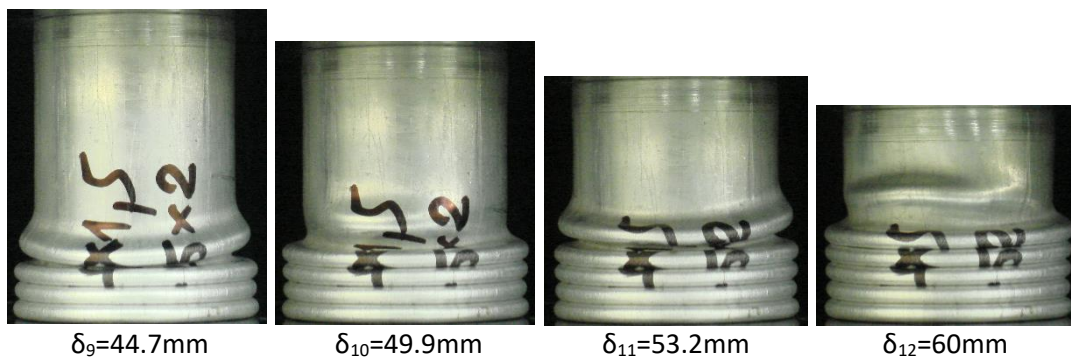


Εικόνα 5.13. Τελικές όψεις (25x2)_Y2_short.

(40x1.5 & 25x2) Y2



Εικόνα 5.14. Στιγμιότυπα κατάρρευσης (40x1.5 & 25x2)_Y2.



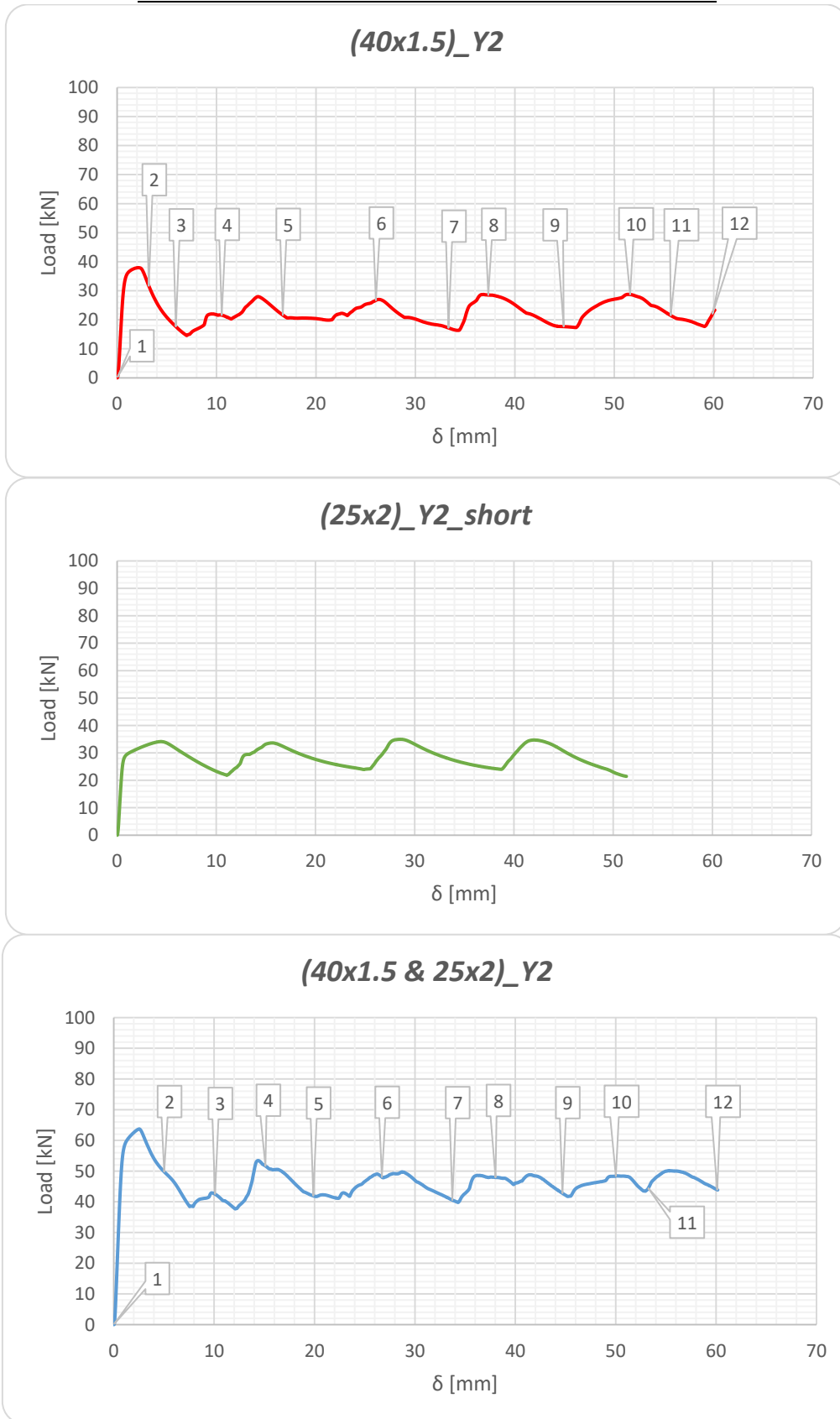
Εικόνα 5.14. Στιγμιότυπα κατάρρευσης (40x1.5 & 25x2)_Y2 (συνέχεια).

ΤΕΛΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ
(40x1.5 & 25x2) Y2



Εικόνα 5.15. Τελικές όψεις του (40x1.5 & 25x2)_Y2.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



Εικόνα 5.16. Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης των δοκιμών (μονών και ζευγών). Οι αριθμοί προσδιορίζουν τα στιγμιότυπα κατάρρευσης που αντιστοιχούν στο κάθε σημείο της καμπύλης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3

	(40x1.5)_Y2	(25x2)_Y2_short	(25x2)_Y2t	(40x1.5 & 25x2)_Y2	
P_{max}	37.9	34.9	38.4	63.7	kN
P_{μ}	22.8	28.5	32.2	46.2	kN
W	1.37	1.46	1.92	2.78	kJ
CFE	60.2	81.7	83.8	72.5	%
A (ή $A_{ολ}$)	181.5	144.5	144.5	326	mm ²

Πίνακας 5.3. Αποτελέσματα δοκιμών που αφορούν το ζεύγος (40x1.5 & 25x2)_Y2.

Για προφανείς λόγους δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα αποτελέσματα του κοντού δοκιμίου γιατί δεν είναι αντιπροσωπευτικά. Αντί αυτού, υποθέτουμε το δοκίμιο (25x2)_Y2t (t: theoretical, θεωρητικό), του οποίου τις τιμές τις υπολογίζουμε προσεγγιστικά συγκρίνοντας τα δοκίμια (40x1.5)_Y1 και (25x2)_Y1. Για κάθε μέγεθος (P_{max} , P_{μ} , W) ξεχωριστά, διαιρούμε την τιμή του (25x2)_Y1 προς την τιμή του (40x1.5)_Y1 και προκύπτει ένας συντελεστής, με τον οποίο πολλαπλασιάζουμε την τιμή του (40x1.5)_Y2 και προκύπτει η προσεγγιστική τιμή του θεωρητικού δοκιμίου (25x2)_Y2t.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

➤ (40x1.5)_Y2

Το δοκίμιο κατέρρευσε αξονοσυμμετρικά και έτσι όλοι οι λοβοί έχουν μορφή δαχτυλιδιού (πολύ χαρακτηριστικό μοτίβο φουσαρμόνικας).

1^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 1.5\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 12\text{mm}$.

2^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 13\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 27\text{mm}$.

3^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 28\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 39\text{mm}$.

4^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 39\text{mm}$,

- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 52\text{mm}$.

5^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 52\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 60\text{mm}$ (δεν έχει «πατηθεί» πλήρως).

Παρατηρήσεις: όπως και στο δοκίμιο (40x1.5)_Y1, έτσι κι εδώ οι αξονοσυμμετρικοί λοβοί βγαίνουν με κλίση (βλ. εικόνα 5.12), η οποία εξαφανίζεται μερικώς όταν οι λοβοί ολοκληρώνονται πλήρως, όπως στην περίπτωση του 3^{ου} και 4^{ου} λοβού στο (40x1.5)_Y2. Ο 5^{ος} δεν «πατήθηκε» πλήρως και η κλίση του είναι εμφανής. Ακόμα, στο κάτω άκρο έχουμε τοπικό φούσκωμα που δημιουργήθηκε από την αρχή ($\delta \approx 2\text{mm}$), άρχισε να αυξάνεται ελαφρώς προς το τέλος της πειραματικής διαδικασίας, αλλά δεν μπορεί να θεωρηθεί λοβός.

➤ (25x2)_Y2_short

Η σειρά σχηματισμού των λοβών δεν είναι γνωστή, επειδή δεν έχουμε φωτογραφίες από τα στιγμιότυπα κατάρρευσης. Για αυτό και θα ασχοληθούμε με τους λοβούς με σειρά από πάνω προς τα κάτω.

1^{ος} λοβός: αξονοσυμμετρικός (μορφή δαχτυλιδιού,ring),

2^{ος} λοβός: αξονοσυμμετρικός (μορφή δαχτυλιδιού,ring),

3^{ος} λοβός: αξονοσυμμετρικός (μορφή δαχτυλιδιού,ring),

4^{ος} λοβός: 2D (διαμαντιού, μη εκτατός).

➤ (40x1.5 & 25x2)_Y2

1^{ος} λοβός:

- Τύπος: αξονοσυμμετρικός (μορφή δαχτυλιδιού,ring),
- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 2\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 14\text{mm}$.

2^{ος} λοβός:

- Τύπος: αξονοσυμμετρικός (μορφή δαχτυλιδιού,ring),
- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 15\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 28\text{mm}$.

3^{ος} λοβός:

- Τύπος: αξονοσυμμετρικός (μορφή δαχτυλιδιού,ring),

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 29\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 38\text{mm}$.

4^{ος} λοβός:

- Τύπος: αξονοσυμμετρικός (μορφή δαχτυλιδιού,ring),
- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 39\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 48\text{mm}$.

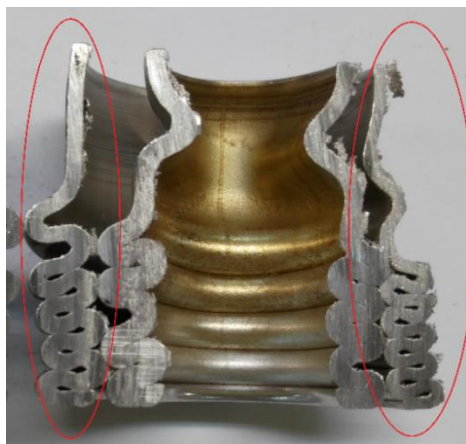
5^{ος} λοβός:

- Τύπος: αξονοσυμμετρικός (μορφή δαχτυλιδιού,ring),
- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 48\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 60\text{mm}$.

Κατάρρευση:

Παρατηρείται και στο ζεύγος (40x1.5 & 25x2)_Y2 η κλίση που έχουν ο 2^{ος}, 3^{ος}, 4^{ος} και 5^{ος} λοβός του εξωτερικού δοκιμίου, αλλά αυτή τη φορά με διαφορετική κατεύθυνση, η οποία πιθανότατα οφείλεται στο διαφορετικό πάχος που είχε ο σωλήνας (40x1.5) περιμετρικά. Αυτή η ανομοιομορφία φαίνεται στην εικόνα 5.17, και είναι αυτή που κάνει τη μια μεριά των δοκιμίων να καταρρέει πιο γρήγορα σε σχέση με την απέναντι που αντιστέκεται περισσότερο.

Το ζεύγος αυτό είχε τη μεγαλύτερη ακτινική απόσταση μεταξύ των δοκιμίων που το αποτελούσαν ($r = 6\text{mm}$) και όπως φαίνεται από την τομή στην εικόνα 5.15, έχει μεγάλη σημασία στην κατάρρευση των δυο σωλήνων μαζί. Τα δυο δοκίμια έρχονται μόνο σε απλή επαφή και δεν «αγκαλιάζονται» σε κανένα σημείο, ενώ και ο τρόπος κατάρρευσης τους μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν ανεξάρτητος. Ο πιο πάνω λοβός του εσωτερικού (25x2)_Y2 έχει μοτίβο κατάρρευσης διαμαντιού 2D και είναι ιδιαίτερα εμφανής στην κάτοψη της εικόνας 5.15. Στο στιγμιότυπο $d_{12}=60\text{mm}$ φαίνεται μια καινούργια τσάκιση η οποία δεν έχει χαρακτήρα λοβού, αλλά δημιουργήθηκε λόγω της κλίσης που έχουν οι υπόλοιποι λοβοί. Ουσιαστικά η λεπτή μεριά είναι αυτή που παραμορφώνεται πρώτη και ακολουθεί η πιο παχιά, που σημαίνει ότι αν είχαμε μεγαλύτερη μετατόπιση των 60mm μπορεί να δημιουργούνταν 6^{ος} λοβός από τη συγκεκριμένη τσάκιση.



Εικόνα 5.17. Διαφορά πάχους περιμετρικά του τοιχώματος του (40x1.5).

Ενέργεια απορρόφησης:

Παρά το μικρότερο εμβαδό ενεργούς διατομής του (25x2)_{Y2} σε σχέση με το (40x1.5)_{Y2}, το πρώτο καθίσταται πιο στιβαρό επειδή ο λόγος του D/t είναι μικρότερος. Αυτό κάνει το (25x2)_{Y2} να έχει μεγάλα τοπικά peaks σχεδόν ίσα με την P_{max} του, που του δίνει έτσι μεγάλη P_{μ} και έτσι έχουμε μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

Η ενέργεια που απορροφά το σύστημα (40x1.5 & 25x2)_{Y2} (2.78kJ), είναι μικρότερη περίπου 16% του αθροίσματος των δυο μονών που το αποτελούν (εξωτερικό 1.37kJ και εσωτερικό θεωρητικό 1.92kJ), γεγονός που μας επιβεβαιώνει την μικρή αλληλεπίδραση που είχαν οι σωλήνες του ζεύγους κατά την κατάρρευση.

Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης:

Κι εδώ η περιοδικότητα είναι ορατή και στα μονά δοκίμια αλλά και στο ζεύγος, καθώς όλα κατέρρευσαν αξονοσυμμετρικά (με εξαίρεση τον 2D λοβό του εσωτερικού (25x2)_{Y2} του ζεύγους) και πολύ ομαλά.

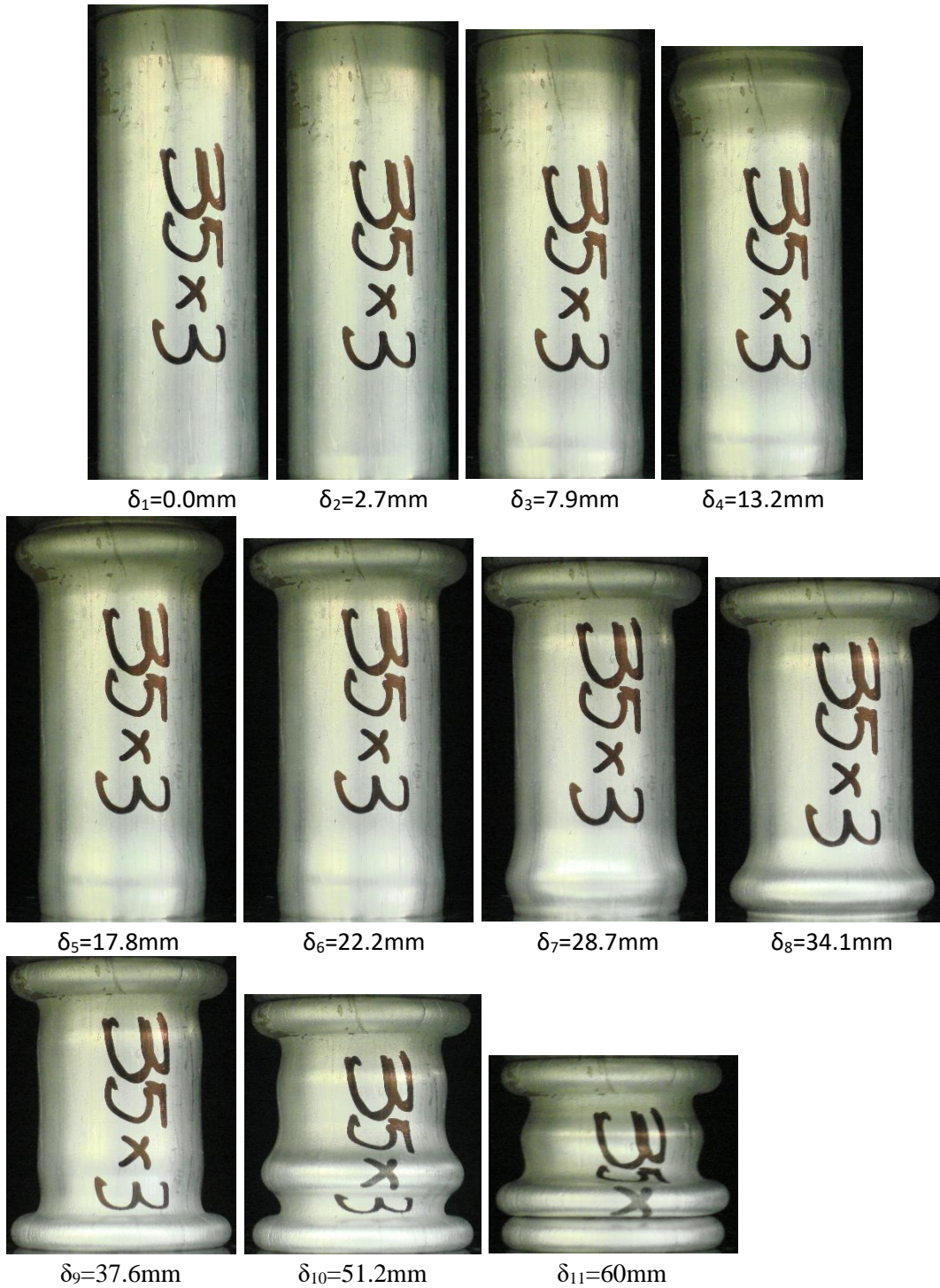
Το διάγραμμα του συστήματος (40x1.5 & 25x2)_{Y2} είναι κάπως πιο «κυματιζόμενο» λόγω της κατάρρευσης και των δυο που κάνει τα δοκίμια να έρχονται σε επαφή, δημιουργώντας μερικά τοπικά peaks που όμως δεν είναι ικανά να αυξήσουν το μέσο φορτίο που το περιμέναμε λίγο μεγαλύτερο. Η P_{max} έρχεται στην αρχή όπως την περιμέναμε.

Το μεγάλο μέσο φορτίο που δέχεται το (25x2)_{Y2} κάνει τον δείκτη ομοιομορφίας CFE να είναι άριστος (81.7% και το θεωρητικό 83.8%) για ακόμα μια φορά, όπως και στο (25x2)_{Y1}, ενώ μια μέτρια τιμή περιμέναμε για το (40x1.5)_{Y2}. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι το ζεύγος (40x1.5 & 25x2)_{Y2} είχε δείκτη περίπου στο μέσο όρο των τιμών των μονών δοκιμίων και κοιτώντας το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης υπάρχει όντως μεγάλη ομοιομορφία.

5.2.5. (35x3 & 25x2)_Y2

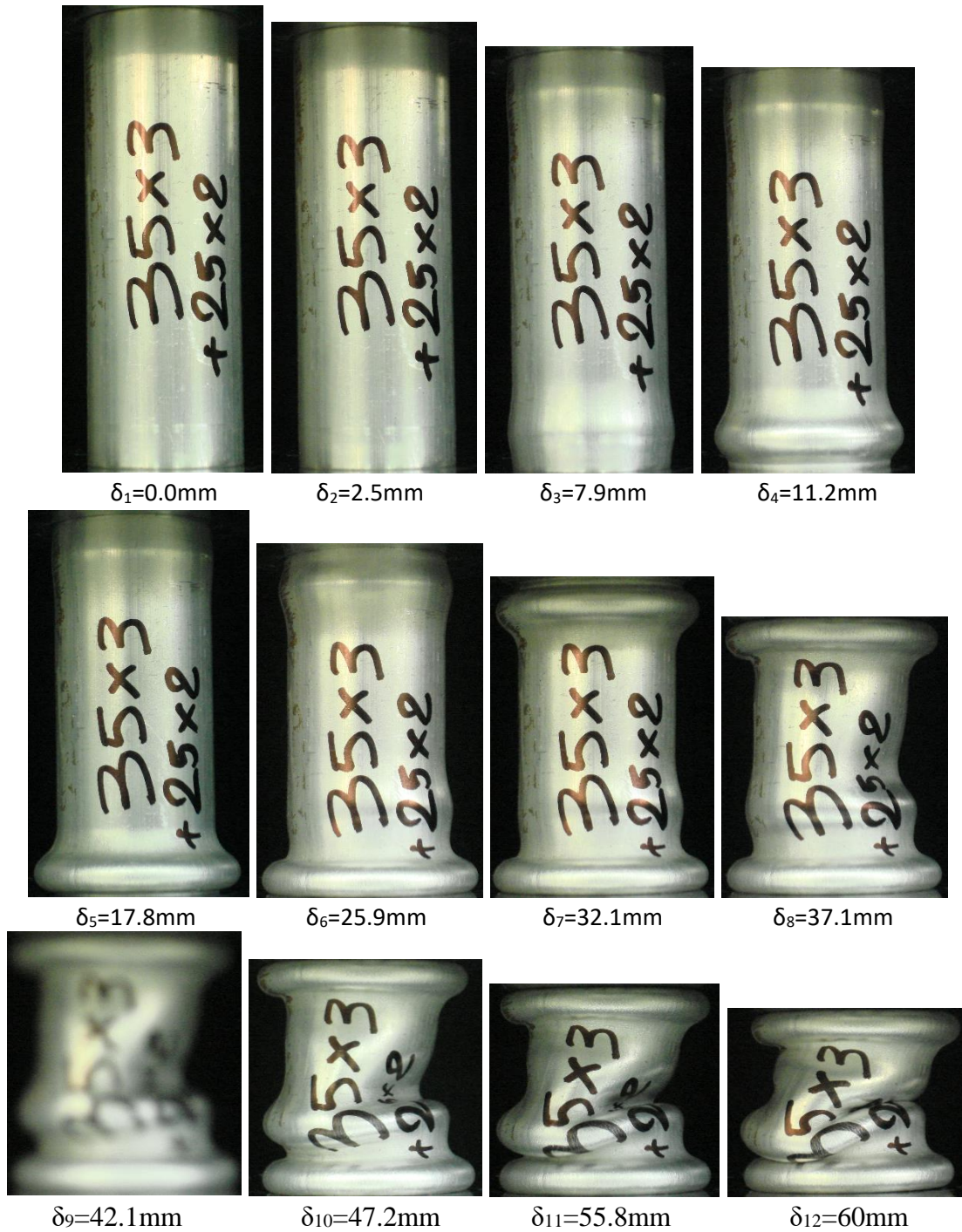
Το εσωτερικό δοκίμιο (25x2)_Y2 παρατίθεται στην παρουσίαση του προηγούμενου ζεύγους, οπότε για λόγους οικονομίας χώρου δεν θα παρουσιαστεί και εδώ.

(35x3) Y2



Εικόνα 5.18. Στιγμιότυπα κατάρρευσης (35x3)_Y2.

(35x3 & 25x2) Y2



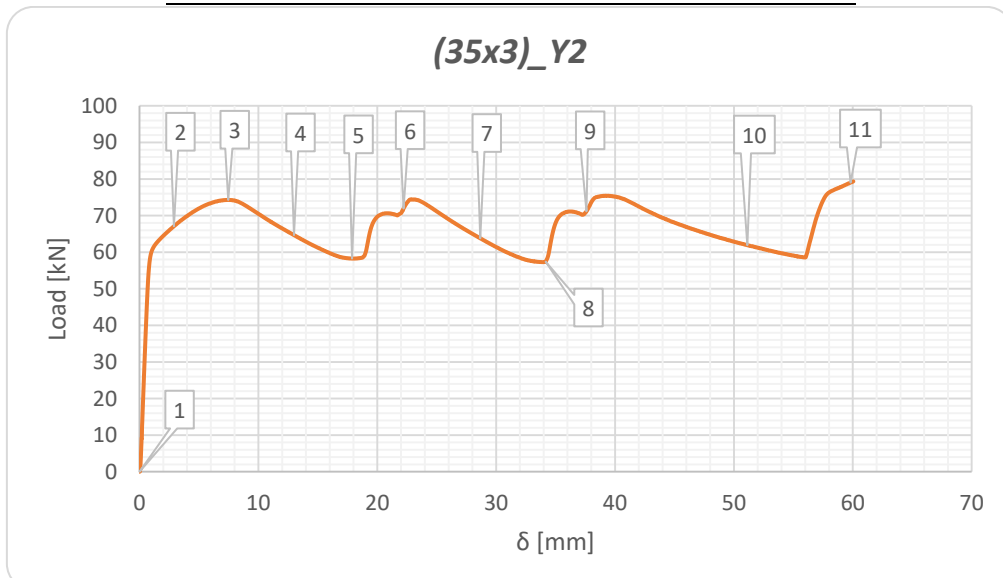
Εικόνα 5.19. Στιγμιότυπα κατάρρευσης (35x3 & 25x2)_Y2.

ΤΕΛΙΚΕΣ ΟΨΕΙΣ
(35x3 & 25x2) Y2

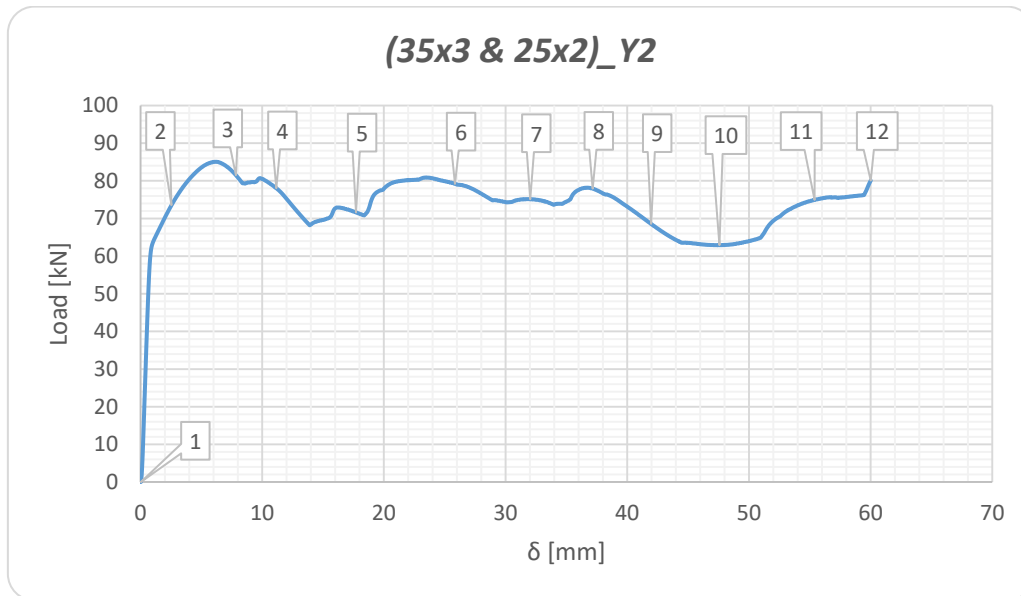


Εικόνα 5.20. Τελικές όψεις του (35x3 & 25x2)_Y2.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



Εικόνα 5.21. Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης των δοκιμών (μονών και ζευγών). Οι αριθμοί προσδιορίζουν τα στιγμιότυπα κατάρρευσης που αντιστοιχούν στο κάθε σημείο της καμπύλης.



Εικόνα 5.21. Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης των δοκιμών (μονών και ζευγών). Οι αριθμοί προσδιορίζουν τα στιγμιότυπα κατάρρευσης που αντιστοιχούν στο κάθε σημείο της καμπύλης (συνέχεια).

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4

	(35x3)_Y2	(25x2)_Y2_short	(25x2)_Y2t	(35x3 & 25x2)_Y2	
P_{max}	79.4	34.9	38.4	85	kN
P_{μ}	66.5	28.5	32.2	73.4	kN
W	3.99	1.46	1.92	4.4	kJ
CFE	83.8	81.7	81.5	86.4	%
A (ή $A_{ολ}$)	301.6	144.5	144.5	446.1	mm ²

Πίνακας 5.4. Αποτελέσματα δοκιμών που αφορούν το ζεύγος (35x3 & 25x2)_Y2.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

➤ (35x3)_Y2

Το δοκίμιο κατέρρευσε αξονοσυμμετρικά και έτσι όλοι οι λοβοί έχουν μορφή δαχτυλιδιού (πολύ χαρακτηριστικό μοτίβο φουσαρμόνικας).

1^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 7.5\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 28\text{mm}$.

2^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 13\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 37\text{mm}$.

3^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 37\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 60\text{mm}$.

4^{ος} λοβός:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 51\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 60\text{mm}$ (δεν έχει «πατηθεί» πλήρως).

➤ (35x2 & 25x2)_Y2

1^{ος} λοβός:

- Τύπος: αξονοσυμμετρικός (δαχτυλίδι, ring),
- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 5\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 25\text{mm}$.

2^{ος} λοβός:

- Τύπος: αξονοσυμμετρικός (δαχτυλίδι, ring),
- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 7\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 37\text{mm}$.

3^η παραμόρφωση:

- Έναρξη σχηματισμού: $\delta \approx 24\text{mm}$,
- Ολοκλήρωση σχηματισμού: $\delta \approx 60\text{mm}$.

Κατάρρευση:

Οι δυο πρώτοι λοβοί δημιουργούνται σχεδόν ταυτόχρονα αλλά ο σχηματισμός του πάνω σταματάει και αναπτύσσεται πρώτα ο κάτω. Ανάμεσα τους, στην πορεία, δημιουργείται τέτοια παραμόρφωση που δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως λοβός, απόρροια των πολύ έντονων αλληλεπιδράσεων που είχαν τα δοκίμια του συστήματος. Κοιτάζοντας το στιγμιότυπο δ₆ της εικόνας 5.19, φαίνεται η έναρξη της δημιουργίας ενός όγκου, που πιθανότατα οφείλεται σε σπρώξιμο από λοβό του εσωτερικού (25x2)_Y2, πιθανότατα λόγω κακής εκκεντρότητας των δυο δοκιμίων. Αυτή ήταν η αρχή της δημιουργίας αυτού του «γλιστρήματος» και ο άτσαλος τρόπος κατάρρευσης φαίνεται στην τομή της εικόνας 5.20. Οι εσωτερικοί παχιοί κομμένοι όγκοι είναι κομμένες αναδιπλώσεις υλικού του

εσωτερικού (25x2)_Y2 που έχουν περάσει στην απέναντι μεριά (μπορεί κανείς να το καταλάβει καλύτερα με το τεμάχιο στα χέρια του, καθώς οι φωτογραφίες δεν δείχνουν τη λεπτομέρεια του γλιστρήματος). Τα δοκίμια στο σύστημα έχουν έρθει σε επαφή μεν, δεν έχουν «αγκαλιαστεί» δε, με συνέπεια τη δημιουργία πολλών κενών, ενώ και πιθανώς το κακό κεντράρισμά τους να έχει δημιουργήσει αυτές τις μεγάλες ασυμμετρίες.

Ενέργεια απορρόφησης:

Αυτή η ιδιαίτερη παραμόρφωση έκανε το σύστημα (35x3 & 25x2)_Y2 να απορροφήσει ενέργεια πολύ λιγότερη από αυτή που περιμέναμε (4.4kJ) και 26% λιγότερη από το άθροισμα των δυο μονών σωλήνων που το αποτελούν (εξωτερικό 3.99kJ και εσωτερικό θεωρητικό 1.92kJ). Παρ' όλα αυτά, είναι μεγαλύτερη από την απορρόφηση ενέργειας που πέτυχε μόνο του το πιο δυνατό από τα δυο, (35x3)_Y2.

Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης:

Όπως όλα τα στιβαρά δοκίμια, έτσι και τα (35x3)_Y2 και (25x2)_Y2 είχαν τοπικά μέγιστα στο φορτίο τους σχεδόν ίσα με τα ολικά μέγιστά τους. Η περιοδικότητα στην δημιουργία τοπικών μεγίστων (και κατ' επέκταση λοβών) είναι εμφανής κοιτώντας τα διαγράμματα της εικόνας 5.21. Αναλογιζόμενοι τη διαφορά που έχουν στο εμβαδό ενεργούς διατομής τους τα μονά δοκίμια μεταξύ τους, δικαιολογούμε πλήρως τη διαφορά και στο μέγιστο φορτίο που υπόκεινται και στο μέσο.

Στο διάγραμμα του συστήματος (35x3 & 25x2)_Y2, το μέγιστο φορτίο δεν είναι τόσο μεγάλο όσο αναμενόταν και στη συνέχεια φαίνεται ξεκάθαρα η πτώση που έχει η παραλαβή φορτίου από το ζεύγος στα στιγμιότυπα από δ_8 έως δ_{11} , αλλά δεν ήταν αρκετή ώστε να ρίξει κατά πολύ το μέσο φορτίο, ενώ στο τέλος του διαγράμματος σημειώνεται αύξηση του φορτίου που δείχνει την συμπίεση συμπαγούς υλικού που ξεκινάει εσωτερικά του ζεύγους. Η μη δυνατότητα πρόβλεψης των τοπικών μεγίστων είναι φυσιολογική και αποτέλεσμα των εσωτερικών δυνάμεων λόγω πολλαπλών επαφών.

Πάντως το ζεύγος (35x3 & 25x2)_Y2, λόγω του σχετικά μικρού μέγιστου φορτίου P_{max} και του σχετικά μεγάλου μέσου φορτίου P_{μ} , είχε άριστο δείκτη CFE (86.4%), κάτι επιθυμητό για απορροφητές ενέργειας ώστε να έχουμε σταθερή επιβράδυνση. Άριστες ήταν και οι τιμές των δεικτών αυτών των μονών δοκιμίων (35x3)_Y2 (83.8%) και (25x2)_Y2t (81.5%)

5.2.6. Σχολιασμός

Στον πίνακα 5.9 παρατίθενται τα αποτελέσματα κάποιων μονών δοκιμίων, τα οποία όντας μέρος δυο ζευγών δοκιμίων, του (33x3 & 25x3)_Y1 και του (35x3 & 28x3)_Y1, αυτά ξεπέρασαν το ονομαστικό φορτίο της μηχανής μας και η πειραματική διαδικασία σταμάτησε. Τα δοκίμια όμως πήραν κανονικά μέρος στο πείραμα ως μονά (singles). Επειδή όμως σκοπός της συγκεκριμένης ενότητας είναι η σύγκριση μεταξύ των μονών και έπειτα η σύγκριση μεταξύ των ζευγών, η παρουσίαση της κατάρρευσής του (33x3)_Y1 και του (35x3)_Y1 θα γίνει σε επόμενη ενότητα, όπου θα παρουσιάσουμε τα «αποτυχημένα» δοκίμια (μονά και ζεύγη) και θα γίνει σύγκριση και με τα αριθμητικά τους μοντέλα. Να σημειωθεί ότι στο (33x3)_Y1 δημιουργήθηκαν δυο (2) αξονοσυμμετρικοί λοβοί και ένας μη συμμετρικός 2D, ενώ το (35x3)_Y1 κατέρρευσε αξονοσυμμετρικά εμφανίζοντας τρεις (3) ολοκληρωμένους λοβούς και έναν (1) ανολοκλήρωτο.

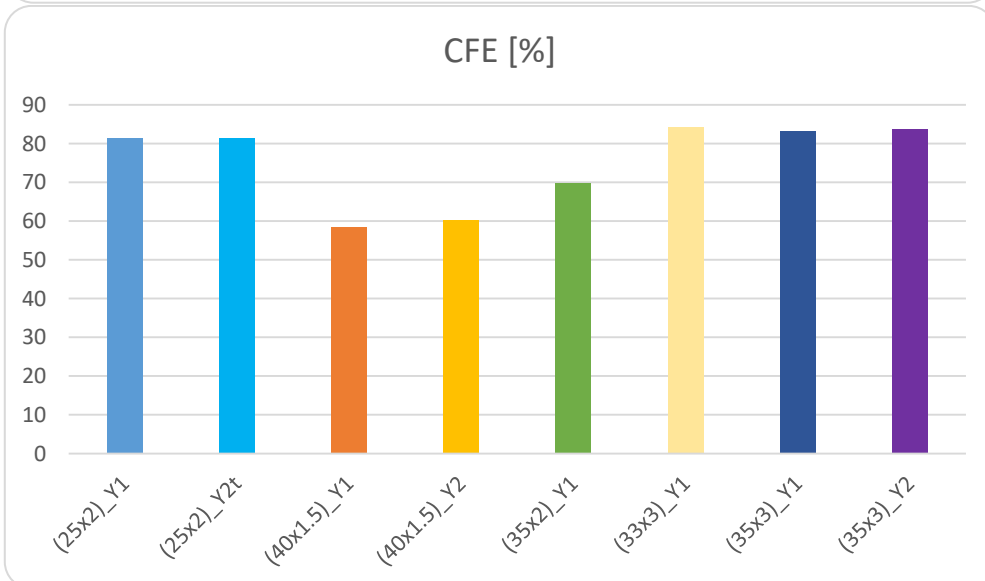
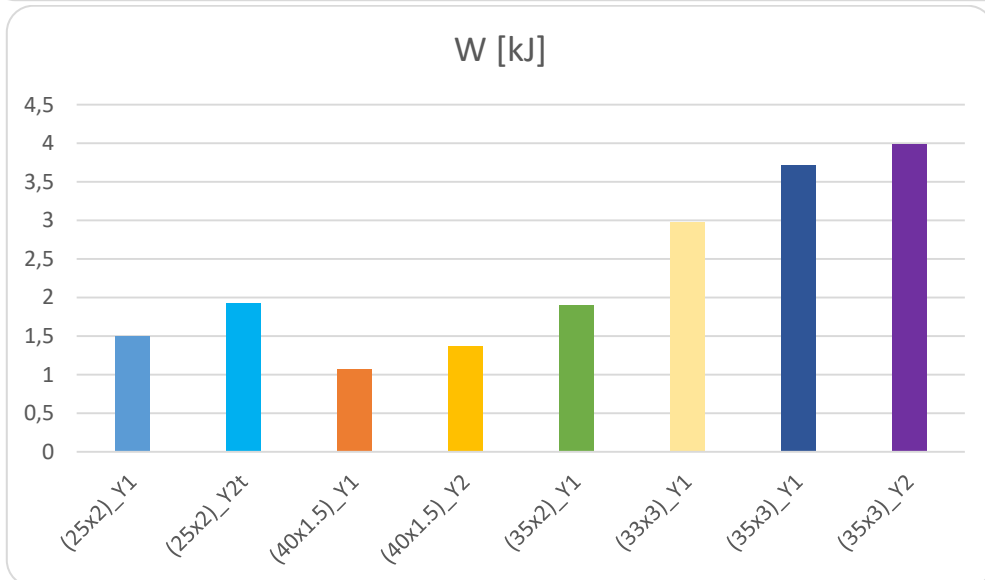
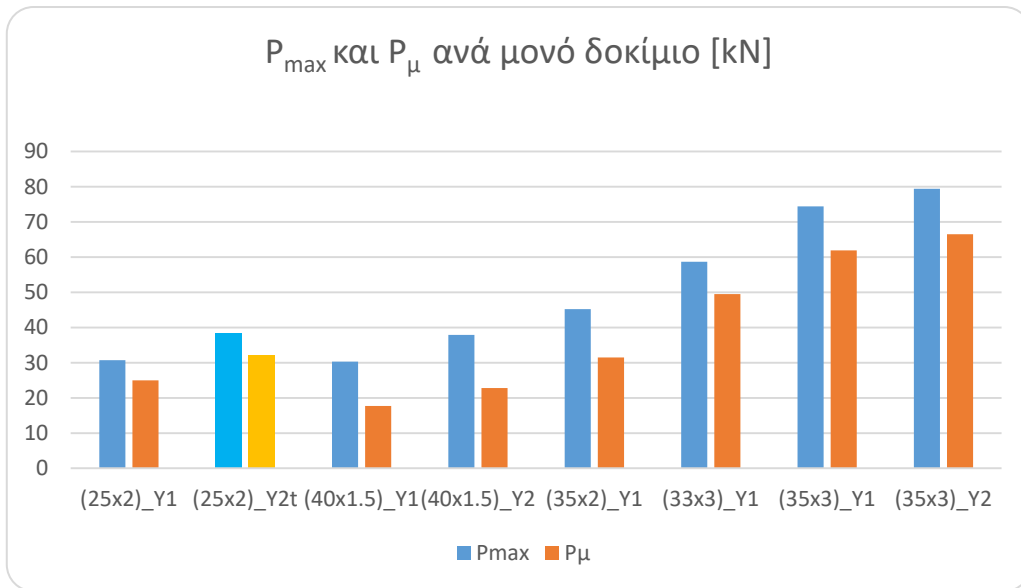
Ο σχολιασμός-σύγκριση των μονών δοκιμίων και των ζευγών δοκιμίων θα γίνει ξεχωριστά.

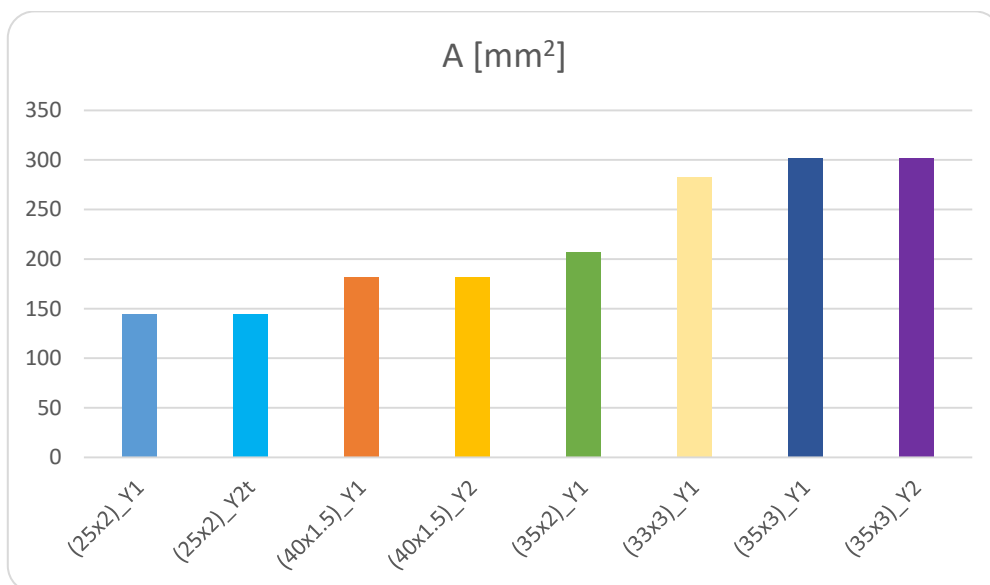
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9

	(33x3)_Y1	(35x3)_Y1	
P_{max}	58.7	74.4	kN
P_{μ}	49.5	61.9	kN
W	2.98	3.72	kJ
CFE	84.3	83.2	%
A	282.7	301.6	mm ²

Πίνακας 5.9. Αποτελέσματα μονών δοκιμίων που δεν αποτέλεσαν μέρος ζευγών (τα θεωρούμε ως «αποτυχημένα»).

MONA ΔΟΚΙΜΙΑ (singles)





Εικόνα 5.22. Σύγκριση μέγιστου (P_{max}) και μέσου φορτίου (P_{μ}), ενέργειας απορρόφησης (W), δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (CFE) και εμβαδού διατομής (A) όλων των μονών δοκιμίων. Η σειρά παρουσίασης είναι με αύξον εμβαδόν.

Σε γενικές γραμμές τα μονά δοκίμια είχαν τη συμπεριφορά και τα αριθμητικά αποτελέσματα που περιμέναμε. Όσο αυξάνει το εμβαδό ενεργούς διατομής τους, τόσο αυξάνονται το μέγιστο φορτίο (P_{max}), το μέσο φορτίο (P_{μ}) και κατ' επέκταση η ενέργεια απορρόφησης (W) αφού έχουμε την ίδια μετατόπιση (με εξαίρεση το (25x2)_Y2_short για το οποίο υποθέσαμε ένα καινούργιο θεωρητικό δοκίμιο (25x2)_Y2t).

Το μεγάλο πάχος βοηθάει ώστε το υλικό να μην τραυματίζεται και κάθε καινούργιος λοβός που δημιουργείται να φέρνει αντίσταση ίση με το μέγιστο φορτίο. Έτσι οι σωλήνες μεγαλύτερου πάχους είχαν καλύτερη ομοιομορφία στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, λόγω των μεγάλων τοπικών μεγίστων που αυξάνουν το μέσο φορτίο.

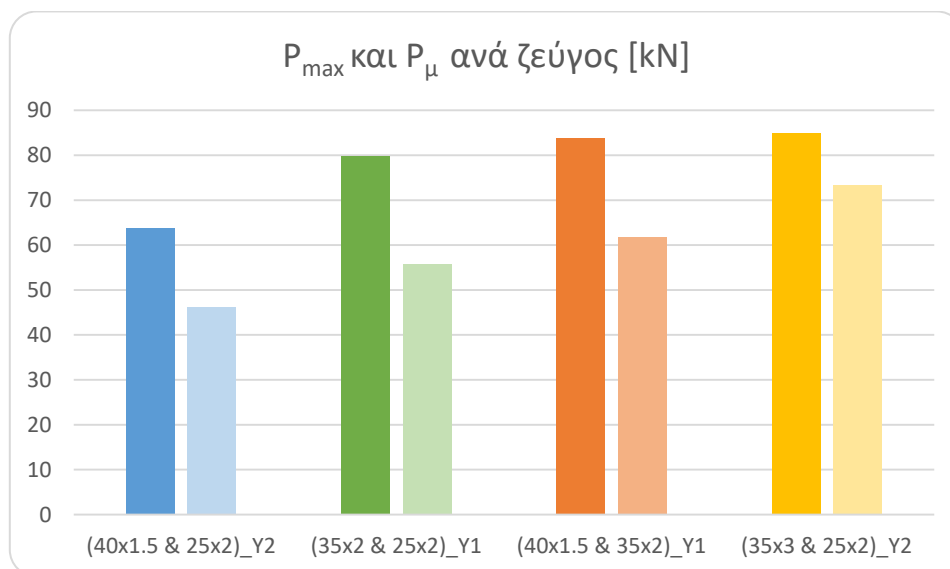
Η περιοδικότητα των τοπικών μεγίστων στα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης είναι σε όλα τα μονά δοκίμια ορατή, αλλά όσο πιο στιβαρό το δοκίμιο τόσο πιο ομαλή ήταν η καμπύλη του διαγράμματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα για το αντίθετο, είναι οι σωλήνες (40x1.5) που η καμπύλη τους ήταν πιο κυματώδης από όλες τις υπόλοιπες (βλ. εικόνες 5.5 και 5.16).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα δοκίμια (25x2) και των δυο διαφορετικών διαδικασιών ανόπτησης (Y1 και Y2) που παρόλο το μικρότερο εμβαδόν διατομής, πέτυχαν αξιοσημείωτη ικανότητα παραλαβής φορτίων. Συγκρίνοντας τα (25x2) με τα (40x1.5), βλέπουμε ότι το μέγιστο φορτίο (P_{max}) που δέχτηκαν τα πρώτα ήταν σχεδόν

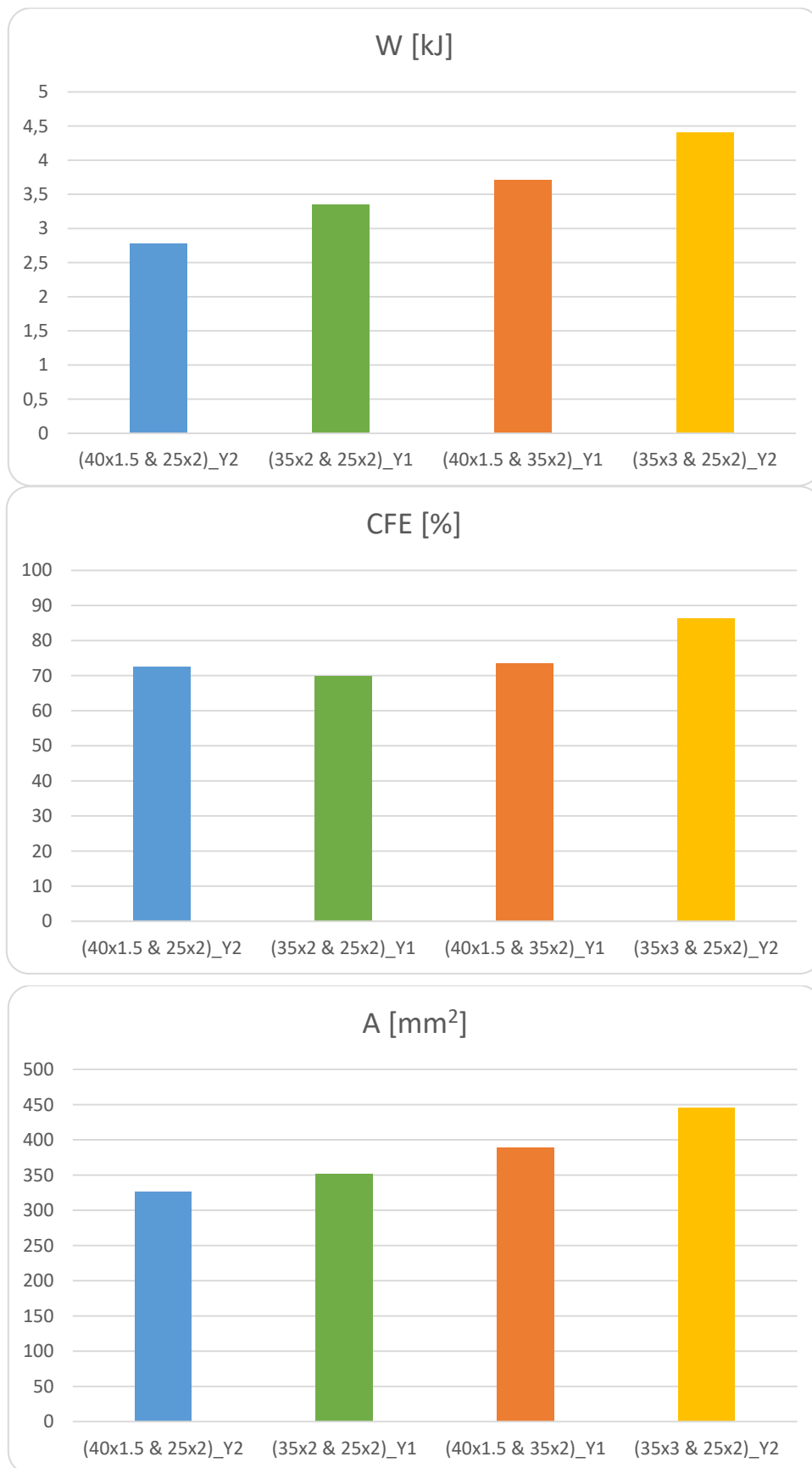
ίσο με το αντίστοιχο των δεύτερων, ενώ το μέσο φορτίο (P_{μ}) των πρώτων ήταν μεγαλύτερο του μέσου φορτίου των δεύτερων (βλ. πίνακα 5.9), κάτι που είχε και επίπτωση στην απορρόφηση ενέργειας. Αιτία είναι η στιβαρότητα των (25x2) που προέρχεται από τη μικρή διάμετρο και το σχετικά μεγάλο πάχος για δοκίμια τέτοιων διαστάσεων.

Τέλος, όπως φαίνεται στη σύγκριση του CFE, η πιθανώς διαφορετική διαδικασία που ακολουθήθηκε στην απόκτηση δεν επηρεάζει την ομοιομορφία του φορτίου των σωλήνων, συγκρίνοντας πάντα σωλήνες ίδιων διαστάσεων, σε αντίθεση με το μέγιστο και μέσο φορτίο που είχαν διαφορά. Ο (40x1.5)_Y2 παρέλαβε 25% μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο από τον (40x1.5)_Y1, ενώ ο (35x3)_Y2 παρέλαβε μόλις 7% παραπάνω από τον (35x3)_Y1. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο πάχος των δοκιμίων και φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερο το πάχος, τόσο πιο μικρή η διαφορά στην αντοχή. Παρόμοια ποσοστιαίες διαφορές εντοπίζονται και στη σύγκριση του μέσου φορτίου.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (couples)



Εικόνα 5.23. Σύγκριση μέγιστου (P_{max}) και μέσου φορτίου (P_{μ}), ενέργειας απορρόφησης (W), δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (CFE) και εμβαδού ενεργούς διατομής (A) των ζευγών δοκιμίων. Η σειρά παρουσίασης είναι με αύξον εμβαδόν ενεργούς διατομής.



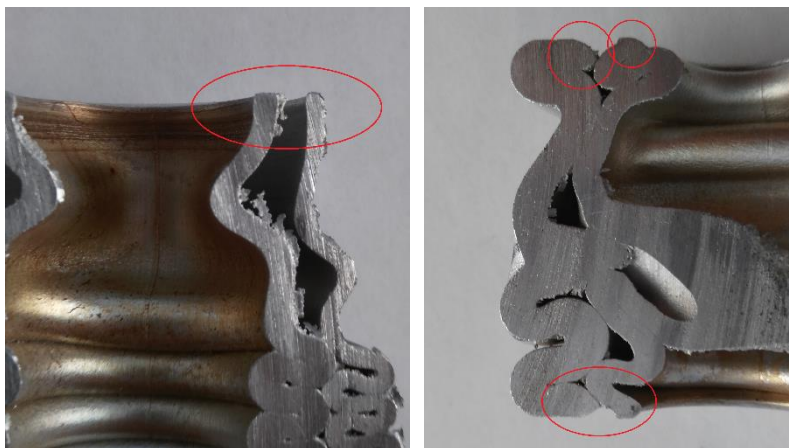
Εικόνα 5.23. Σύγκριση μέγιστου (P_{max}) και μέσου φορτίου (P_{μ}), ενέργειας απορρόφησης (W), δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (CFE) και εμβαδού ενεργούς διατομής (A) των ζευγών δοκιμίων. Η σειρά παρουσίασης είναι με αύξον εμβαδόν ενεργούς διατομής (συνέχεια).

Και στην περίπτωση των ζευγών σωλήνων σημαντικό ρόλο έπαιξε το εμβαδόν της διατομής τους. Όσο αυξάνεται το εμβαδό, τόσο αυξάνονται τα μετρούμενα μεγέθη, P_{max} , P_{μ} , W . Ωστόσο περιμέναμε από το (35x3 & 25x2)_Y2 να πετύχει μεγαλύτερες τιμές των μεγεθών αυτών, όμως η άτσαλη κατάρρευση του, αιτία των ισχυρών και ανομοιόμορφων εσωτερικών αλληλεπιδράσεων των σωλήνων, οδήγησε σε χαμηλότερα νούμερα.

Κάτι που χρίζεται παρατήρησης είναι ο δείκτης ομοιομορφίας CFE. Τα τρία μικρότερα (σε εμβαδό) συστήματα δοκιμών είχαν πάνω-κάτω ίσους δείκτες, που σημαίνει ίδια ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στα μέσα και μέγιστα φορτία του. Το (35x3 & 25x2)_Y2 όμως, που αποτελούνταν από τα δυο πιο στιβαρά δοκίμια, πέτυχε τον καλύτερο τέτοιο δείκτη.

Ένας ακόμα παράγοντας που πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας είναι η ακτινική απόσταση (r), δηλαδή της απόστασης μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού σωλήνα και της εξωτερικής επιφάνειας του εσωτερικού σωλήνα. Η απόσταση αυτή επηρεάζει κυρίως τον τρόπο κατάρρευσης. Μικρή τιμή r σημαίνει ότι όταν ξεκινήσει η μετατόπιση, τα δυο δοκίμια που αποτελούν το σύστημα, θα έρθουν πολύ γρήγορα σε επαφή και θα καταρρεύσουν σχεδόν «αγκαλιασμένα». Έτσι έγινε στην περίπτωση του (40x1.5 & 35x2)_Y1, όπου η $r=1\text{mm}$. Από την άλλη, όταν το διάκενο αυτό ήταν μεγάλο παρατηρήσαμε κάπως ανεξάρτητο τρόπο κατάρρευσης, με εξαίρεση κάποιες επαφές σημείων (περίπτωση ζεύγους (40x1.5 & 25x2)_Y2 με $r=6\text{mm}$). Όταν η τιμή του διακένου ήταν κάπου ενδιάμεσα, υπήρχε μεγάλη επαφή και υπήρχαν τμήματα που εφάπτονταν πολύ καλά, αλλά υπήρχαν και κάποια μεγάλα τμήματα που δεν υπήρχε αλληλεπίδραση με αποτέλεσμα να έχουμε μείωση της ικανότητας παραλαβής φορτίου (περίπτωση (35x2 & 25x2)_Y1 με $r=3\text{mm}$ και (35x3 & 25x2)_Y2 με $r=2\text{mm}$).

Τέλος το μέγιστο φορτίο του πιο δυνατού μας συστήματος, (35x3 & 25x2)_Y2, δεν είναι τόσο μεγαλύτερο από το δεύτερο πιο δυνατό, (40x1.5 & 35x2)_Y1, αναλογιζόμενοι τα εμβαδά διατομής τους. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από τις συνοριακές συνθήκες, δηλαδή την επαφή των δοκιμών με τις πλάκες θλίψης. Οι διατομές των σωλήνων περάστηκαν με γυαλόχαρτο (οι σωλήνες περιστρέφονταν στον τόρνο) για να απομακρυνθούν γρέζια ώστε να έχουμε καλή και ομοιόμορφη επαφή. Αν κατά τη διαδικασία στον τόρνο, απομακρύνουμε από κάποιο από τους σωλήνες του (35x3 & 25x2)_Y2 περισσότερο υλικό δημιουργείται μηχανισμός triggering που βοηθάει να ξεκινήσει η κατάρρευση μειώνοντας το μέγιστο φορτίο (βλ. εικόνα 5.24).



Εικόνα 5.24. τετραγωνισμένη επιφάνεια (αριστερά), καμπύλη επιφάνεια (δεξιά). (βέβαια, η καμπυλότητα της επιφάνειας στη δεξιά φωτογραφία μπορεί να είναι αποτέλεσμα της θλίψης).

5.3. Σύγκριση πειραματικών-αριθμητικών αποτελεσμάτων

5.3.1. Γενικά

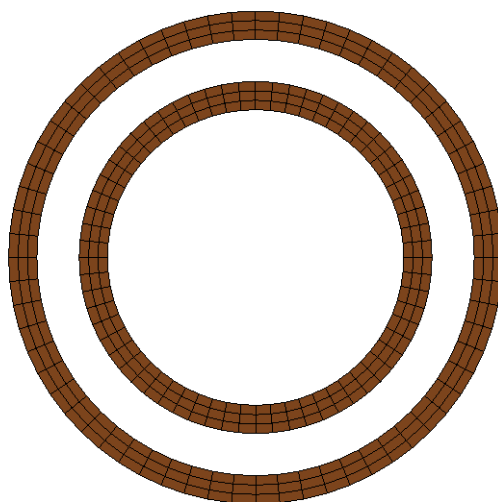
Στην ενότητα αυτή θα γίνει η σύγκριση των πειραματικών μοντέλων με τα αντίστοιχα αριθμητικά τους και θα κρίνουμε την ικανότητα του λογισμικού LS-DYNA, με το οποίο σχεδιάσαμε τα αριθμητικά μοντέλα, να προβλέπει τον τρόπο κατάρρευσης και να υπολογίζει τα μεγέθη προς μελέτη ικανοποιητικά.

Οι υποενότητες που ακολουθούν αφορούν ένα σύστημα σωλήνων η κάθε μια. Σε αυτές θα γίνεται παρουσίαση των στιγμιότυπων κατάρρευσης* των μονών σωλήνων και των ζευγών σωλήνων, θα παρατίθενται οι τελικές όψεις των πειραματικών μοντέλων προς σύγκριση, τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης και πίνακες αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια θα γίνεται σχολιασμός-σύγκριση.

Τα αριθμητικά μοντέλα τα ονομάζουμε όπως και τα πειραματικά, με την προσθήκη του αγγλικού γράμματος "n" (n: numerical) στο τέλος. Δηλαδή το αριθμητικό μοντέλο του (40x1.5)_Y1 ονομάζεται (40x1.5)_Y1n και του ζεύγους (35x3 & 25x2)_Y2 ονομάζεται (35x3 & 25x2)_Y2n.

Η διακριτοποίηση που εφαρμόσαμε στα μοντέλα, ήταν η ακόλουθη:

- 50 στοιχεία (elements) καθ' ύψος (μήκος στοιχείου 2mm),
- 64 στοιχεία περιφερειακά,
- 3 στοιχεία ακτινικά.

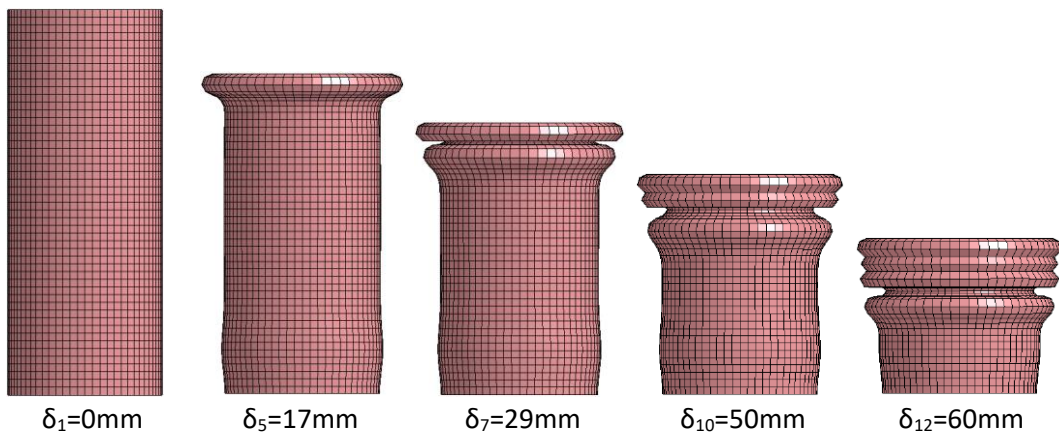


Εικόνα 5.25. Κάτοψη αριθμητικού μοντέλου. Η διακριτοποίηση είναι φανερή.

Η ταχύτητα της άνω πλάκας ορίστηκε στο 1mm/s και όχι στα 20mm/min που ήταν στα πειράματα, ώστε να γίνει η αριθμητική προσομοίωση σε εύθετο χρόνο. Η ταχύτητα αυτή δεν κρίνεται υψηλή ώστε να εισαχθούν ανεπιθύμητα αδρανειακά φαινόμενα και να αλλοιωθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

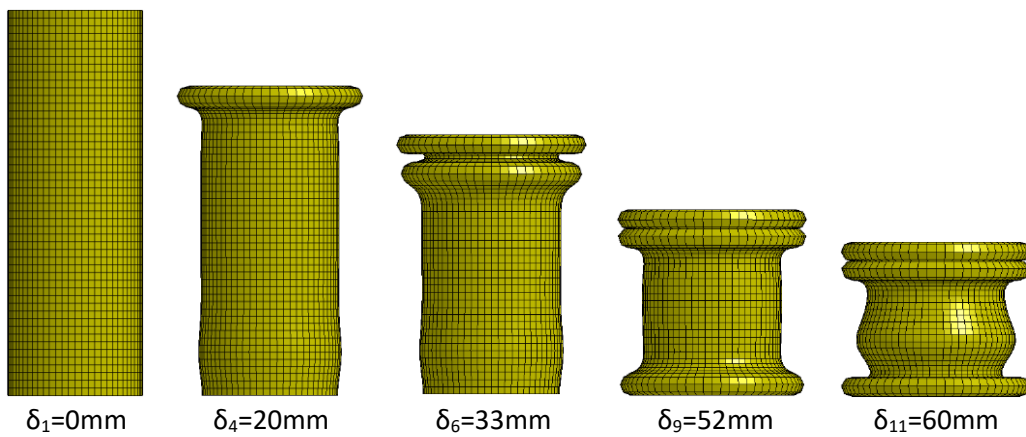
*Τα στιγμιότυπα είναι αριθμημένα σύμφωνα με τα αντίστοιχα πειραματικά τους.

5.3.2. (40x1.5 & 35x2)_Y1n
(40x1.5) Y1n



Εικόνα 5.26. Στιγμιότυπα κατάρρευσης αριθμητικού μοντέλου (40x1.5)_Y1n.

(35x2) Y1n



Εικόνα 5.27. Στιγμιότυπα κατάρρευσης αριθμητικού μοντέλου (35x2)_Y1n.

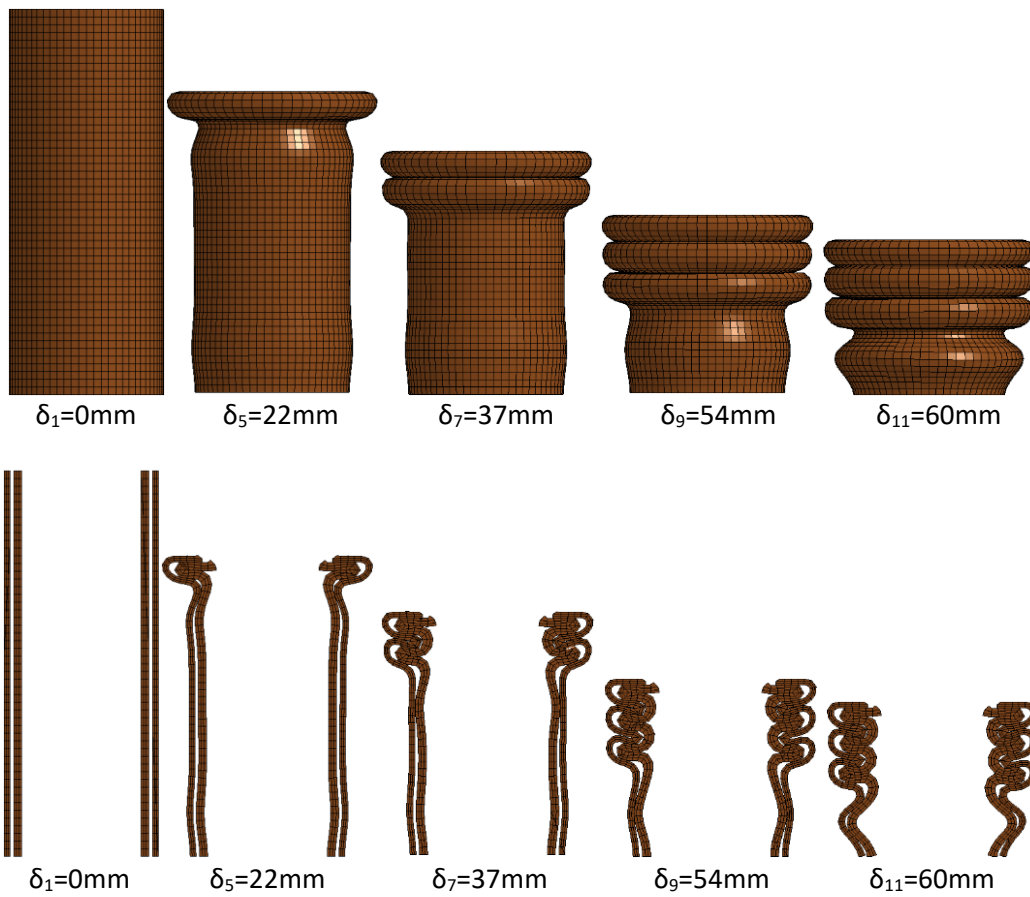
(40x1.5) Y1

(35x2) Y1



Εικόνα 5.28. Τελικές όψεις των πειραματικών μονών δοκιμίων, (40x1.5)_Y1 (αριστερά) και (35x2)_Y1 (δεξιά).

(40x1.5 & 35x2) Y1n



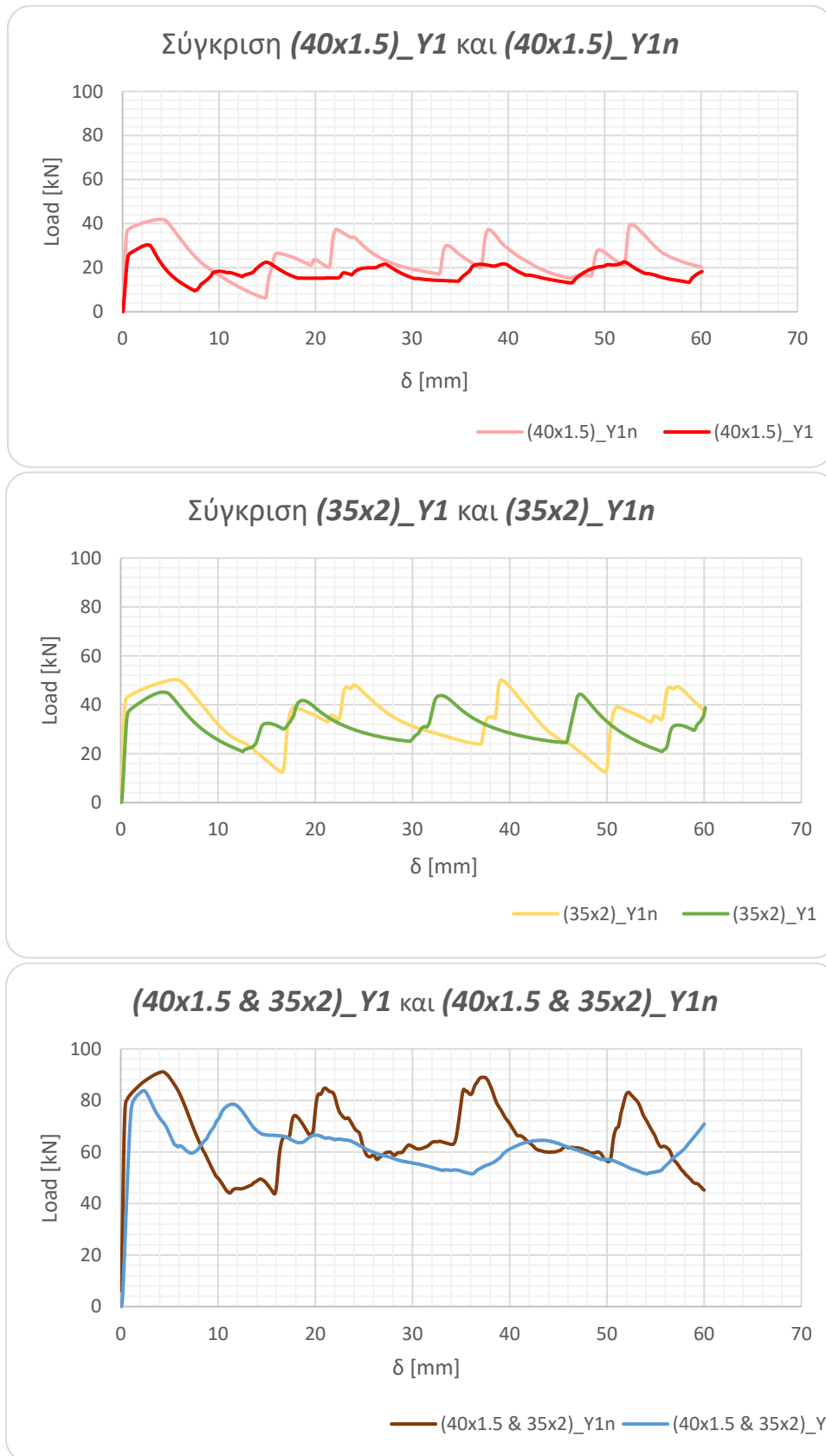
Εικόνα 5.29. Στιγμιότυπα κατάρρευσης αριθμητικού μοντέλου (40x1.5 & 35x2)_Y1n (πάνω είναι η ρεαλιστική όψη, κάτω είναι η τομή).

(40x1.5 & 35x2)_Y1



Εικόνα 5.30. Τελικές όψεις πειραματικού ζεύγους (40x1.5 & 35x2)_Y1.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



Εικόνα 5.31. Συγκρίσεις διαγραμμάτων φορτίου-μετατόπισης ανάμεσα στα δοκίμια που αφορούν το ζεύγος $(40 \times 1.5 \ \& \ 35 \times 2)_{Y1}$ και $(40 \times 1.5 \ \& \ 35 \times 2)_{Y1n}$.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5

	(40x1.5)_Y1n	(35x2)_Y1n	(40x1.5 & 35x2)_Y1n	
P_{max}	41.9	50.3	91.1	kN
P_{μ}	24.8	31.5	66.2	kN
W	1.49	2.06	3.77	kJ
CFE	59.2	62.6	72.7	%
A (ή $A_{ολ}$)	181.5	207.4	388.9	mm ²

Πίνακας 5.5. Αποτελέσματα αριθμητικών μοντέλων που αφορούν το ζεύγος (40x1.5 & 35x2)_Y1n.

Κατάρρευση:

Το αριθμητικό μοντέλο (40x1.5)_Y1n προέβλεψε σωστά τον αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης που ακολούθησε το αντίστοιχο πειραματικό του, αλλά δεν πέτυχε τον αριθμό των λοβών. Στην προσομοίωση έχουμε 4 αξονοσυμμετρικούς λοβούς, από τους οποίους ο 4^{ος} δεν έχει ολοκληρωθεί πλήρως, σε αντίθεση με το πειραματικό μοντέλο που είχε 5. Μια πιθανή αιτιολόγηση έχει να κάνει με την διακριτοποίηση που εφαρμόσαμε στα μοντέλα μας. Όσο περισσότερα στοιχεία αποτελούν το μοντέλο μας, τόσο πιο ακριβής η προσομοίωση. Τα 50 στοιχεία για 100mm ύψος, ίσως αποδειχτούν λίγα.

Όμοια κατάσταση έχουμε και στο (35x2)_Y1n όπου ο τρόπος κατάρρευσης ήταν ίδιος με τον πειραματικό (αξονοσυμμετρικός), αλλά είχαμε ένα λοβό λιγότερο από ότι στο αντίστοιχο πείραμα. Η αιτία και εδώ είναι η διακριτοποίηση.

Στην περίπτωση του (40x1.5 & 35x2)_Y1n είχαμε καλή πρόβλεψη του αριθμού των λοβών αλλά κακή του τρόπου κατάρρευσης. Στα πειράματα είχαμε δημιουργία τριών (3) 2D λοβών από τους οποίους ο 3^{ος} (δηλαδή ο 4^{ος} συνολικά) δεν πατήθηκε πλήρως, ενώ στην αριθμητική προσομοίωση όλοι οι λοβοί ήταν μορφής δαχτυλιδιού και επίσης ο 4^{ος} δεν πατήθηκε πλήρως. Εσωτερικά, τα δυο δοκίμια και στις δυο περιπτώσεις ακολούθησαν κοινό τρόπο κατάρρευσης, δηλαδή αυτόν που βλέπουμε εξωτερικά, με λιγότερη βέβαια συμμετρία στα πειράματα και πιο καλά πατημένους λοβούς στα αριθμητικά μοντέλα.

Ενέργεια απορρόφησης:

Το (40x1.5)_Y1n είχε απόκλιση από το πραγματικό, απορροφώντας 39% περισσότερη ενέργεια από το (40x1.5)_Y1. Στην περίπτωση του (35x2)_Y1, το αριθμητικό ξεπέρασε το πειραματικό κατά περίπου 8%. Φαίνεται πως η ανόπτηση προκάλεσε μεγαλύτερη μείωση στις μηχανικές ιδιότητες του (40x1.5), λόγω μικρότερου πάχους (την καμπύλη

σ-ε την πήραμε από τεμάχιο σωλήνα διαστάσεων (25x2)).

Η ενέργεια που απορρόφησε το σύστημα (40x1.5 & 35x2)_Y1n είναι 6% μεγαλύτερη από το άθροισμα των δυο μονών αριθμητικών μοντέλων και 2% μεγαλύτερη από το αντίστοιχο πειραματικό σύστημα, ποσοστό που μας κάνει να κρίνουμε άριστη την αριθμητική προσομοίωση ως προς την απορρόφηση ενέργειας.

Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης:

Και στο (40x1.5)_Y1 και στο (40x1.5)_Y1n, η μέγιστη δύναμη αντίστασης (P_{max}) επιτεύχθηκε στην αρχή και αυτή του αριθμητικού μοντέλου είναι μεγαλύτερη κατά 38% σε σχέση με το πειραματικό, δείχνοντας ότι στην προσομοίωση οι ιδιότητες που του εισαγάγαμε ήταν αυξημένες.

Η κατάσταση αλλάζει στα δοκίμια (35x2). Το (35x2)_Y1n είχε αυξημένη την P_{max} κατά 11% σε σύγκριση με το (35x2)_Y1, κάτι που δικαιολογείται από τις καλύτερες συνοριακές συνθήκες του αριθμητικού μοντέλου μιας και οι επιφάνειες επαφής του τεμαχίου με τις πλάκες έχουν καλύτερη γεωμετρία (πιο επίπεδη).

Το ίδιο συμβαίνει και στο ζεύγος (40x1.5 & 35x2)_Y1n, όπου η P_{max} ξεπέρασε το (40x1.5 & 35x2)_Y1 κατά 9%.

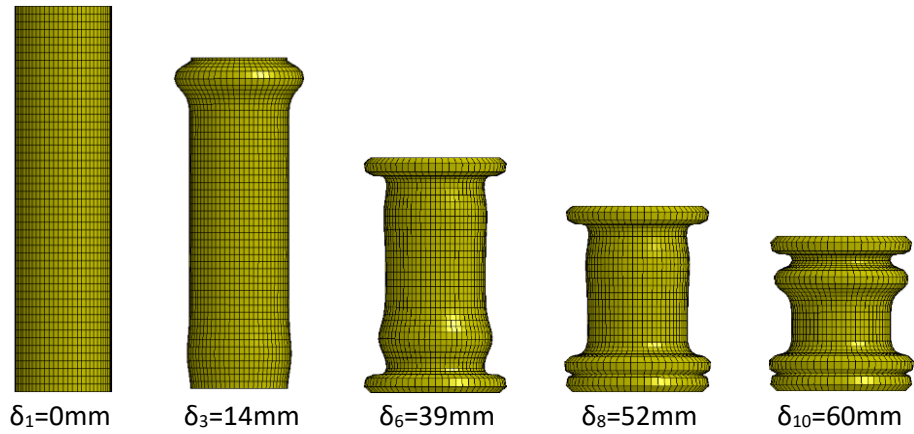
Στα διαγράμματα των μονών σωλήνων, φαίνεται η περιοδικότητα εμφάνισης τοπικών μεγίστων (και κατ' επέκταση λοβών) και η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ τοπικών μεγίστων και τοπικών ελαχίστων που παρουσιάζουν τα αριθμητικά μοντέλα. Το λογισμικό υπολόγισε σωστά τη μικρή διαφορά που πρέπει να έχουν τα τοπικά μέγιστα στα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης των πιο στιβαρών δοκιμίων σε σχέση με το μέγιστο φορτίο (εδώ το (35x2)_Y1n). Ακόμα, το ζεύγος (40x1.5 & 35x2)_Y1n υπολογίστηκε ότι καταρρέει αξονοσυμμετρικά και οι λοβοί του δημιουργούνται ταυτόχρονα, κάτι που αποδεικνύεται και από το διάγραμμα του, το οποίο έχει πολύ χαρακτηριστικές αυξομειώσεις φορτίου με καλή περιοδικότητα (πιο κυματώδεις σε σχέση με το στιβαρό (35x2)_Y1n).

Οι δείκτες ομοιομορφίας ήταν σχεδόν ίδιοι σε αριθμητικά και πειραματικά μοντέλα με εξαίρεση το (35x2)_Y1n που λόγω των μεγαλύτερων αυξομειώσεων είχε μικρότερο CFE από το πραγματικό (η προσομοίωση είχε 62.6% ενώ το πραγματικό είχε 69.7%)

5.3.3. (35x2 & 25x2)_Y1n

Το εξωτερικό δοκίμιο (35x2)_Y1n παρατίθεται στην παρουσίαση του προηγούμενου ζεύγους, οπότε για λόγους οικονομίας χώρου δεν θα παρουσιαστεί και εδώ.

(25x2) Y1n



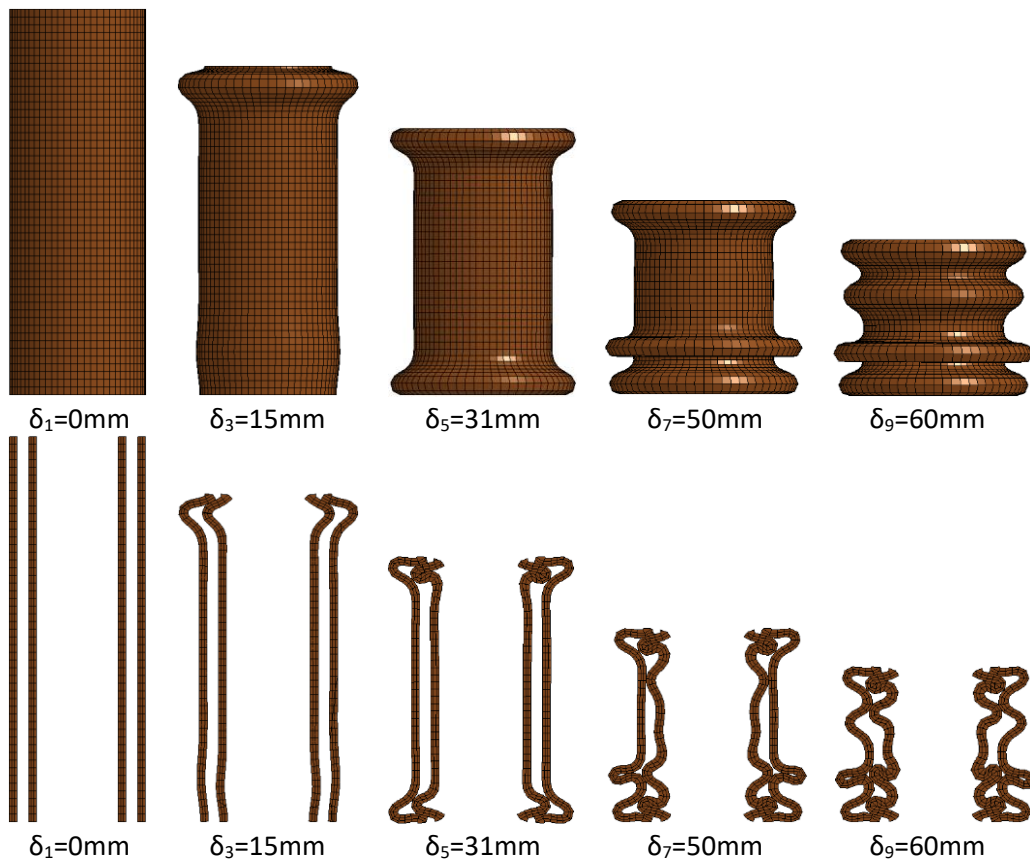
Εικόνα 5.32. Στιγμιότυπα κατάρρευσης αριθμητικού μοντέλου (35x2)_Y1n.

(25x2) Y1



Εικόνα 5.33. Τελικές όψεις πειραματικού μονού δοκιμίου (25x2)_Y1.

(35x2 & 25x2) Y1n



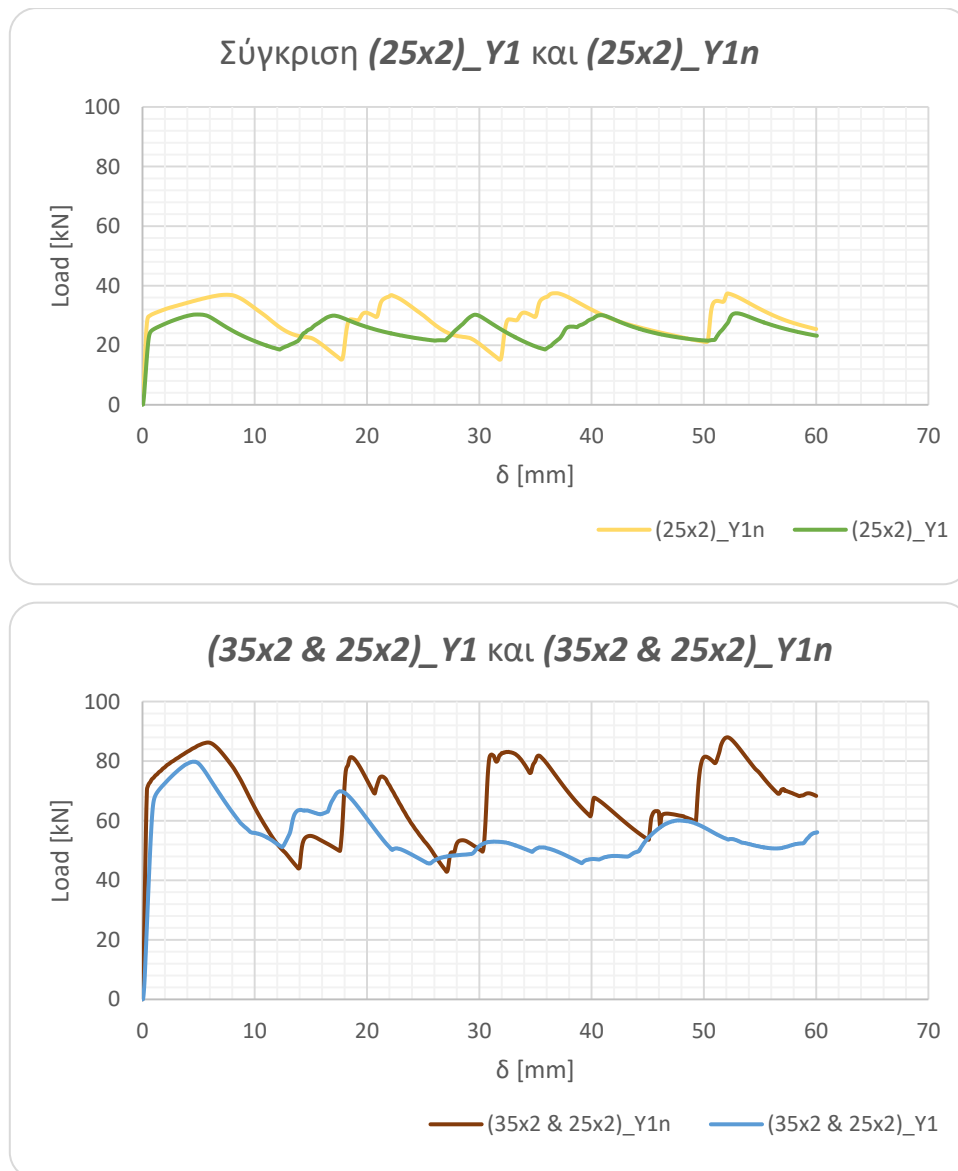
Εικόνα 5.34. Στιγμιότυπα κατάρρευσης αριθμητικού μοντέλου (35x2 & 25x2)_Y1n (πάνω είναι η ρεαλιστική όψη, κάτω είναι η τομή).

(35x2 & 25x2) Y1



Εικόνα 5.35. Τελικές όψεις πειραματικού ζεύγους (35x2 & 25x2)_Y1.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



Εικόνα 5.36. Συγκρίσεις διαγραμμάτων φορτίου-μετατόπισης ανάμεσα στα δοκίμια που αφορούν το ζεύγος (35x2 & 25x2)_Y1 και (35x2 & 25x2)_Y1n.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6

	(35x2)_Y1n	(25x2)_Y1n	(35x2 & 25x2)_Y1n	
P_{max}	50.3	37.5	88	kN
P_{μ}	31.5	28.8	67.7	kN
W	2.06	1.73	4.06	kJ
CFE	62.6	76.8	76.9	%

Πίνακας 5.6. Αποτελέσματα αριθμητικών μοντέλων που αφορούν το ζεύγος (35x2 & 25x2)_Y1n.

Κατάρρευση:

Το (25x2)_Y1n κατέρρευσε με τέσσερις (4) λοβούς, ένα λιγότερο από το (25x2)_Y1 αλλά ο τρόπος κατάρρευσης είναι όμοιος, αξονοσυμμετρικός (μορφή φουσαρμόνικας). Στα αριθμητικά μοντέλα οι λοβοί δεν έχουν κάποια κλίση λόγω άριστης συμμετρίας.

Το ζεύγος (35x2 & 25x2)_Y1n είχε σωστό αριθμό λοβών (τέσσερις) αλλά μόνο ο πρώτος προβλέφθηκε σωστά ως λοβός μορφής δαχτυλιδιού. Οι επόμενοι τρεις υπολογίστηκαν από το λογισμικό ως αξονοσυμμετρικοί, σε αντίθεση με το πειραματικό (35x2 & 25x2)_Y1 που ήταν μορφής 2D. Επίσης η κατάρρευση του εσωτερικού δοκιμίου στο (35x2 & 25x2)_Y1n μπορούμε να πούμε ότι είναι όμοια με αυτή που βλέπουμε εξωτερικά αλλά έχουμε πολύ λιγότερη εσωτερική επαφή σε σχέση με το (40x1.5 & 35x2)_Y1n. Εδώ, ο πάνω και ο κάτω λοβός του εξωτερικού δοκιμίου, έχουν γραπώσει τους αντίστοιχους λοβούς του εσωτερικού δοκιμίου, οι οποίοι συμπιέζονται, αλλά δεν έχουμε την μεγάλης έκτασης επαφή που έχουμε στο πειραματικό.

Ενέργεια απορρόφησης:

Το (25x2)_Y1n απορρόφησε 15% παραπάνω ενέργεια από το (25x2)_Y1.

Το ζεύγος (35x2 & 25x2)_Y1n ξεπέρασε κατά 7% την ενέργεια που απορρόφησε το άθροισμα των δυο μονών αριθμητικών μοντέλων, (35x2)_Y1n και (25x2)_Y1n, που το αποτελούν, απόδειξη ότι η αλληλεπίδραση εσωτερικά του ζεύγους είχε θετικό αποτέλεσμα. Σε σχέση με το πειραματικό (35x2 & 25x2)_Y1, το (35x2 & 25x2)_Y1n απορρόφησε 21% περισσότερη ενέργεια. Στην περίπτωση του πειραματικού συστήματος, περιμέναμε μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας αλλά λόγω της κακής εσωτερικής επαφής των δοκιμίων είχαμε μειωμένη τιμή, η οποία αυξάνει τη διαφορά με το αριθμητικό μοντέλο.

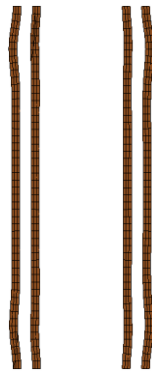
Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης:

Το σχετικά μεγάλο πάχος για σωλήνες τέτοιας διαμέτρου κάνει το (25x2)_Y1n στιβαρό και αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα, όπου τα τοπικά μέγιστα είναι σχεδόν ίσα με το μέγιστο φορτίο. Και το (25x2)_Y1n και το (25x2)_Y1 έχουν ομαλές καμπύλες χωρίς πολλές κυματώσεις. Ως προς το μέγιστο φορτίο (P_{max}), το (25x2)_Y1n έχει αποδώσει

καλύτερα φτάνοντας τα 37.5 kN, 22% παραπάνω από το (25x2)_Y1 που αντιστάθηκε με μέγιστη τιμή τα 30.7 kN.

Στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης του (35x2 & 25x2)_Y1n φαίνεται η κοινή πορεία που είχαν τα δυο δοκίμια του ζεύγους ως προς το σχηματισμό των λοβών καθώς δημιουργούνται τέσσερα (4) πολύ εμφανή τοπικά μέγιστα. Η καμπύλη βέβαια είναι αρκετά κυματώδης, ένδειξη των πολλών και μικρών επαφών που υπήρχαν εσωτερικά. Το (35x2 & 25x2)_Y1n είχε ίδιο μέγιστο φορτίο (P_{max}) με το άθροισμα των αριθμητικών μοντέλων που το αποτελούν, πράγμα λογικό αφού στην αρχή της κατάρρευσης τα δυο δοκίμια του ζεύγους δεν έχουν ακουμπήσει μεταξύ τους (βλ. εικόνα 5.37) . Σε σχέση με το πειραματικό ζεύγος (35x2 & 25x2)_Y1, το (P_{max}) του αριθμητικού (35x2 & 25x2)_Y1n ήταν 10% μεγαλύτερο, πιθανώς λόγω καλύτερης συμμετρίας και καλύτερων συνοριακών συνθηκών.

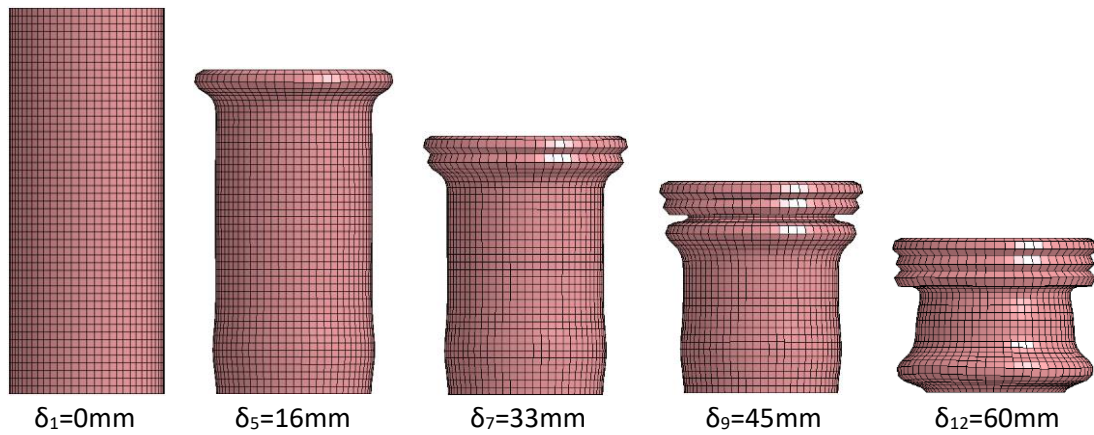
Λόγω των μεγάλων αυξομειώσεων στο φορτίο του (25x2)_Y1n έχουμε χειρότερο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου από το (25x2)_Y1 (76.8% το πρώτο και 81.4% το δεύτερο), έχοντας παρόλα αυτά ικανοποιητικές τιμές. Όσον αφορά το (35x2 & 25x2)_Y1n, ο αντίστοιχος δείκτης του ήταν 76.9%, δηλαδή το φορτίο του ήταν πιο ομοιόμορφο σε σύγκριση με το (35x2 & 25x2)_Y1 (69.8%) που το επηρέασε πολύ η πτώση φορτίου που είχε κατά το σχηματισμό του 2^{ου} 2D λοβού (3^{ου} συνολικά) και το «γλίστρημα» που είχε εσωτερικά το (25x2)_Y1 του πειραματικού ζεύγους.



Εικόνα 5.37. Στιγμιότυπο τομής συστήματος (35x2 & 25x2)_Y1n όπου παρουσιάζεται το μέγιστο φορτίο (P_{max}), ($\delta=6\text{mm}$).

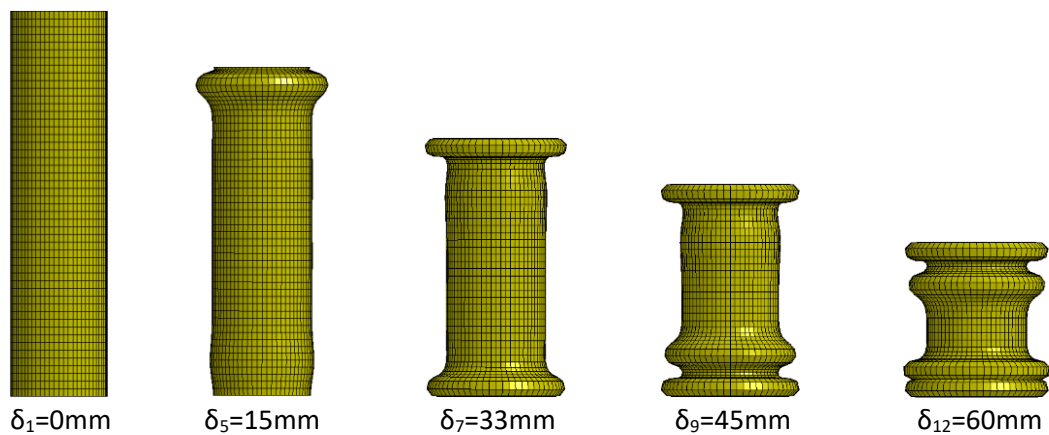
5.3.4. (40x1.5 & 25x2)_Y2n

(40x1.5) Y2n



Εικόνα 5.38. Στιγμιότυπα κατάρρευσης αριθμητικού μοντέλου (40x1.5)_Y2n.

(25x2) Y2n



Εικόνα 5.39. Στιγμιότυπα κατάρρευσης αριθμητικού μοντέλου (25x2)_Y2n.

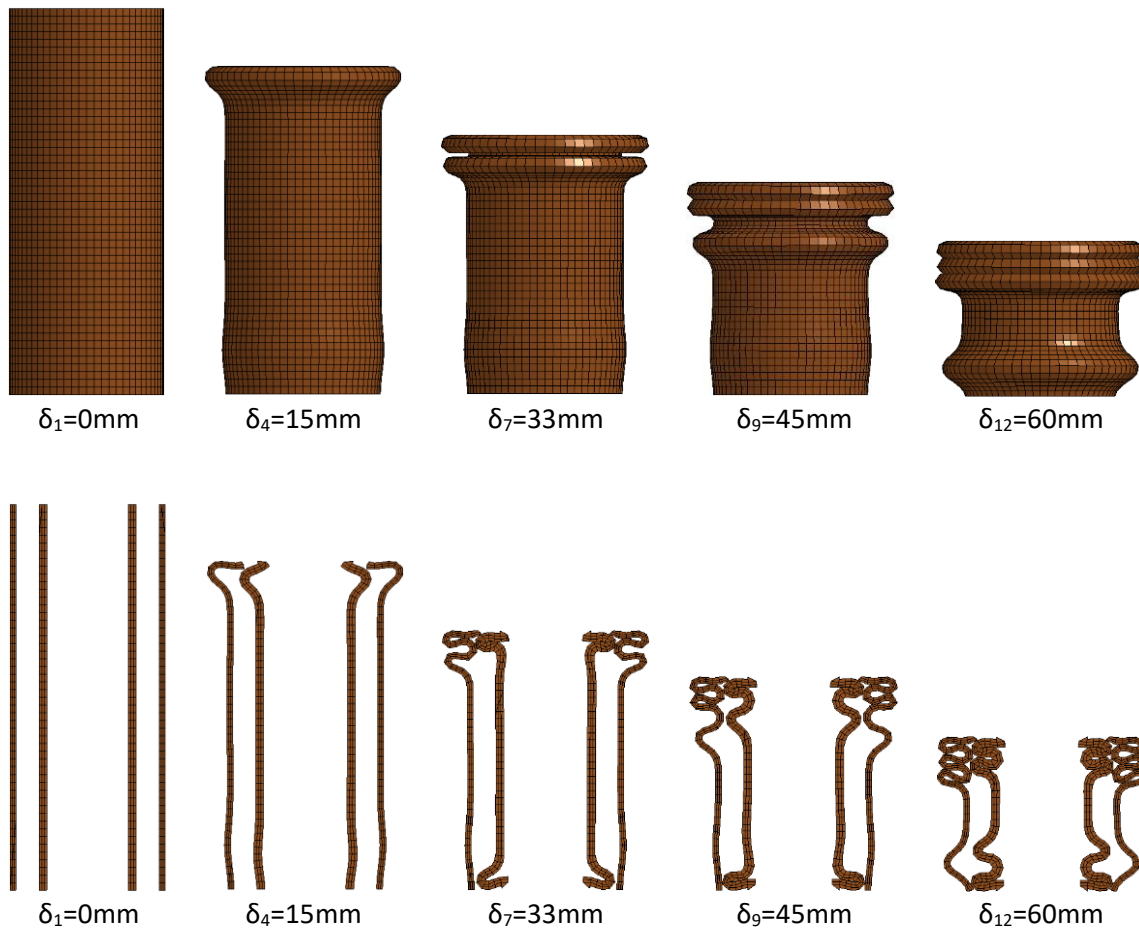
(40x1.5) Y2

(25x2) Y2 short



Εικόνα 5.40. Τελικές όψεις των πειραματικών μονών δοκιμίων, (40x1.5)_Y2 (αριστερά) και (25x2)_Y2 (δεξιά).

(40x1.5 & 25x2) Y2n



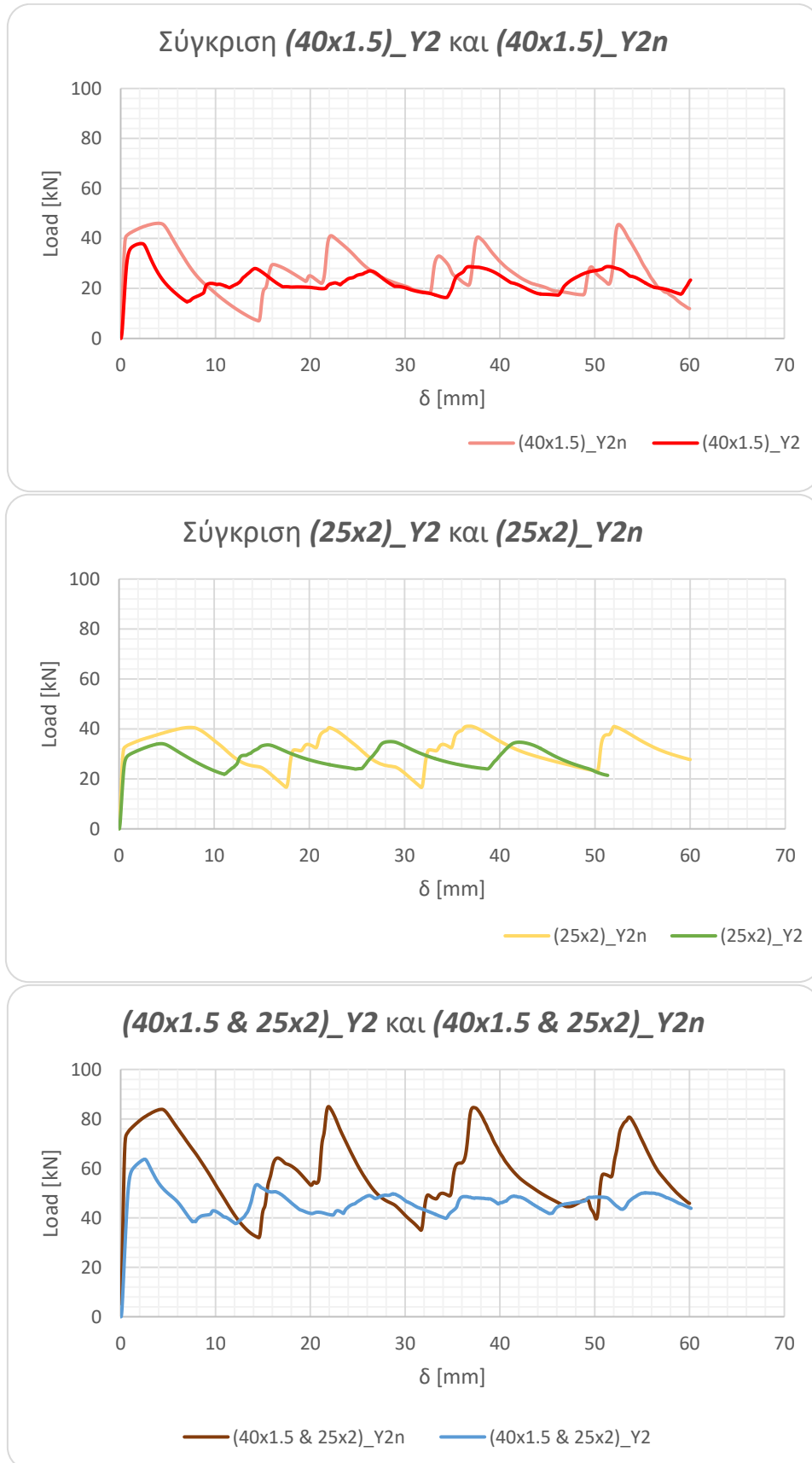
Εικόνα 5.41. Στιγμιότυπα κατάρρευσης αριθμητικού μοντέλου (40x1.5 & 25x2)_Y2n (πάνω είναι η ρεαλιστική όψη, κάτω είναι η τομή)

(40x1.5 & 25x2) Y2



Εικόνα 5.42. Τελικές όψεις πειραματικού ζεύγους (40x1.5 & 25x2)_Y2.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



Εικόνα 5.43. Συγκρίσεις διαγραμμάτων φορτίου-μετατόπισης ανάμεσα στα δοκίμια που αφορούν το ζεύγος (40x1.5 & 25x2)_Y2 και (40x1.5 & 25x2)_Y2n.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7

	(40x1.5)_Y2n	(25x2)_Y2n	(40x1.5 & 25x2)_Y2n	
P_{max}	46.1	41.1	85.2	kN
P_{μ}	26.4	31.6	58.6	kN
W	1.59	1.9	3.52	kJ
CFE	57.3	76.9	68.8	%

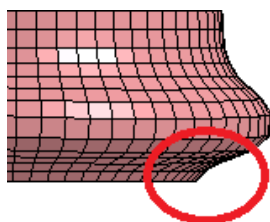
Πίνακας 5.7. Αποτελέσματα αριθμητικών μοντέλων που αφορούν το ζεύγος (40x1.5 & 25x2)_Y2n.

Κατάρρευση:

Το αριθμητικό μοντέλο (40x1.5)_Y2n προέβλεψε σωστά το μοτίβο κατάρρευσης φουσαρμόνικας, αλλά όχι τον αριθμό των λοβών, πιθανώς λόγω του αραιού πλέγματος που επιλέξαμε. Στο κάτω μέρος του μοντέλου, στο στιγμιότυπο $\delta_{12}=60\text{mm}$, φαίνεται η καλή επαφή που κάνει το δοκίμιο με τις πλάκες θλίψης (βλ. εικόνα 5.44).

Το (25x2)_Y2n δεν μπορούμε να το συγκρίνουμε ούτε ως προς τον τρόπο κατάρρευσης ούτε ως προς τον αριθμό λοβών, καθώς το πειραματικό (25x2)_Y2_short είχε μικρότερο ύψος. Το (25x2)_Y2n κατέρρευσε αξονοσυμμετρικά και εμφάνισε τέσσερις (4) λοβούς.

Στην αρχή της κατάρρευσης του (40x1.5 & 25x2)_Y2n και οι δυο σωλήνες υποχωρούν από το άνω άκρο. Για $\delta=23\text{mm}$ ακουμπάνε μεταξύ τους αποτρέποντας τον εσωτερικό σωλήνα να προχωρήσει στον επόμενο λοβό και έτσι συνεχίζεται η κατάρρευση του από το κάτω άκρο, ενώ ο εξωτερικός συνεχίζει από ψηλά. Στη συνέχεια, ο εσωτερικός δημιουργεί τον 3^ο του λοβό στο άνω άκρο, όπως και ο εξωτερικός, ενώ ο 4^{ος} λοβός και για τα δυο δοκίμια δημιουργείται χαμηλά. Το εξωτερικό είχε εμφανίσει φούσκωμα το οποίο ήταν αποτέλεσμα όλης της καταπόνησης που δέχτηκε, για αυτό και ο 4^{ος} λοβός δημιουργήθηκε κάτω. Το (40x1.5 & 25x2)_Y2n είναι το ζεύγος με το μεγαλύτερο διάκενο, σημαντικός παράγοντας για την αλληλεπίδραση του συστήματος. Οι επαφές είναι πολύ λίγες και σε κανένα σημείο δεν έχουμε επαφή μεγάλης επιφάνειας, όπως και στο (40x1.5 & 25x2)_Y2 μόνο που η επαφή στο πείραμα είναι λίγο μεγαλύτερης έκτασης. Αν είχαμε χρησιμοποιήσει πιο πυκνό πλέγμα, ίσως να βλέπαμε παρόμοια συμπεριφορά και από το αριθμητικό μοντέλο καθώς τα στοιχεία είναι απαραμόρφωτα.



Εικόνα 5.44. Συνοριακές συνθήκες στο (40x1.5)_Y2n.

Ενέργεια απορρόφησης:

Όπως και στα πειράματα, έτσι και εδώ το (25x2)_{Y2n} απορρόφησε περισσότερη ενέργεια από το (40x1.5)_{Y2n} (1.9 kJ το πρώτο και 1.59 kJ το δεύτερο) λόγω γεωμετρίας και κατανομής πάχους. Σε σύγκριση με το αντίστοιχο πειραματικό του, το (40x1.5)_{Y2n} πέτυχε καλύτερη απορρόφηση ενέργειας κατά 16%. Όσον αφορά το (25x2)_{Y2n}, αυτό μπορεί να συγκριθεί μόνο με το θεωρητικό δοκίμιο (25x2)_{Y2t} που είχαμε υποθέσει. Το θεωρητικό είχε περισσότερη απορρόφηση ενέργειας κατά 1%, όμως η πιθανότητα σφάλματος είναι μεγάλη καθώς αποτελεί υπόθεση.

Η αριθμητική προσομοίωση του συστήματος, (40x1.5 & 25x2)_{Y2n}, έδειξε μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας κατά 26% από το (40x1.5 & 25x2)_{Y2} και άθροισμα των ενεργειών που απορρόφησαν τα δυο δοκίμια, (40x1.5)_{Y2n} και (25x2)_{Y2n}, είναι ίση αυτή του συστήματος (40x1.5 & 25x2)_{Y2n}.

Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης:

Στο διάγραμμα του (40x1.5)_{Y2n} έχει μεγάλο μέγιστο φορτίο (P_{max}) ίσο με 46.1 kN και μικρότερα τοπικά peaks, σε αντίθεση με το (25x2)_{Y2n} που έχει μικρότερο P_{max} (41.1 kN) και τοπικά peaks ίσα με είναι ίσα με αυτό. Η περιοδικότητα είναι εμφανής και στα δυο διαγράμματα με το (40x1.5)_{Y2n} να είναι πιο κυματώδες.

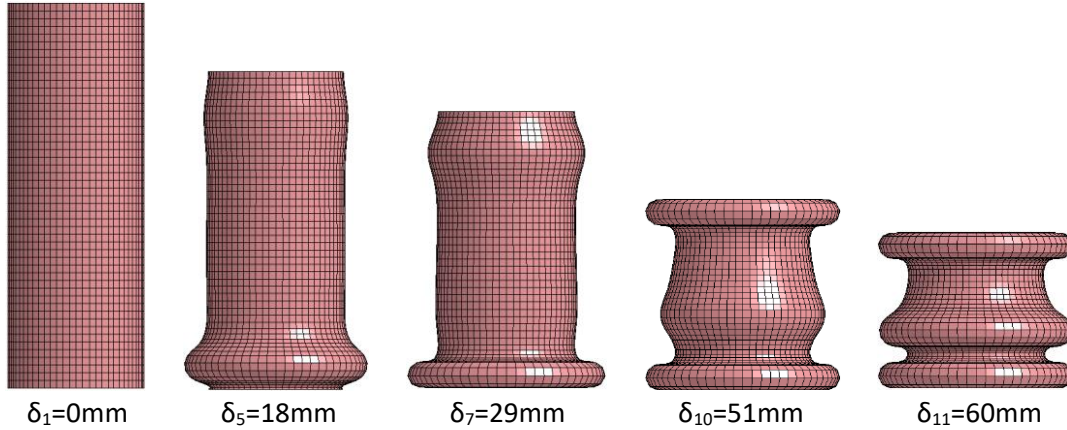
Το άθροισμα των μέγιστων φορτίων των δυο μονών αριθμητικών προσομοιώσεων, (40x1.5)_{Y2n} και (25x2)_{Y2n}, είναι σχεδόν ίσο με το μέγιστο φορτίο του συστήματος (40x1.5 & 25x2)_{Y2n} και παράλληλα είναι 34% μεγαλύτερο του πειραματικού (40x1.5 & 25x2)_{Y2}. Ανομοιομορφίες και λοιπές ασυμμετρίες είναι η αιτία για αυτό το μεγάλο ποσοστό.

Ως προς το δείκτη ομοιομορφίας φορτίου, οι μεγάλες αυξομειώσεις του φορτίου του (40x1.5 & 25x2)_{Y2n} (68.8%), κάνουν το ζεύγος να έχει λίγο χειρότερο δείκτη από το αντίστοιχο πείραμά του (72.5%). Το ίδιο ισχύει και για τα αριθμητικά μοντέλα (βλ. πίνακα 5.7).

5.3.5. (35x3 & 25x2)_Y2n

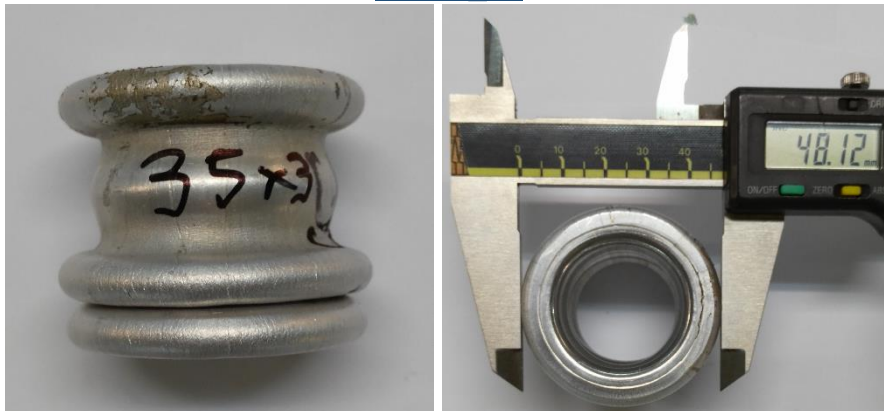
Το εξωτερικό δοκίμιο (25x2)_Y2n παρατίθεται στην παρουσίαση του προηγούμενου ζεύγους, οπότε για λόγους οικονομίας χώρου δεν θα παρουσιαστεί και εδώ.

(35x3)_Y2n



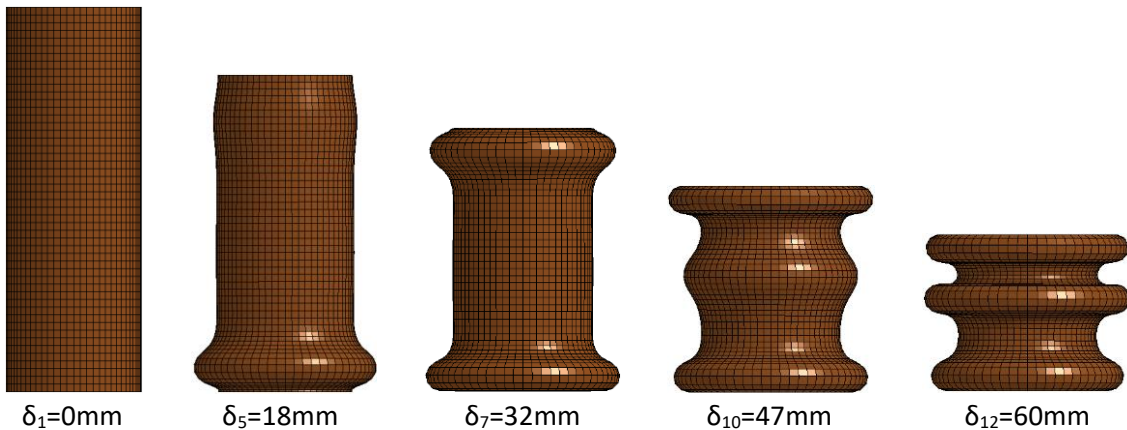
Εικόνα 5.45. Στιγμιότυπα κατάρρευσης αριθμητικού μοντέλου (35x3)_Y2n.

(35x3)_Y2

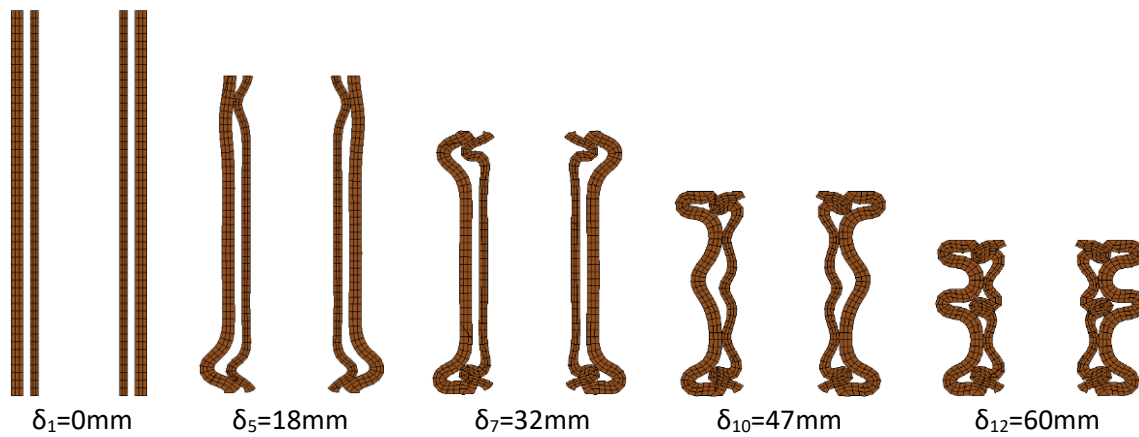


Εικόνα 5.46. Τελικές όψεις πειραματικού δοκίμιου (35x3)_Y2. Στη δεξιά φωτογραφία φαίνεται ότι ο αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης είναι εκτατός.

(35x3 & 25x2)_Y2n

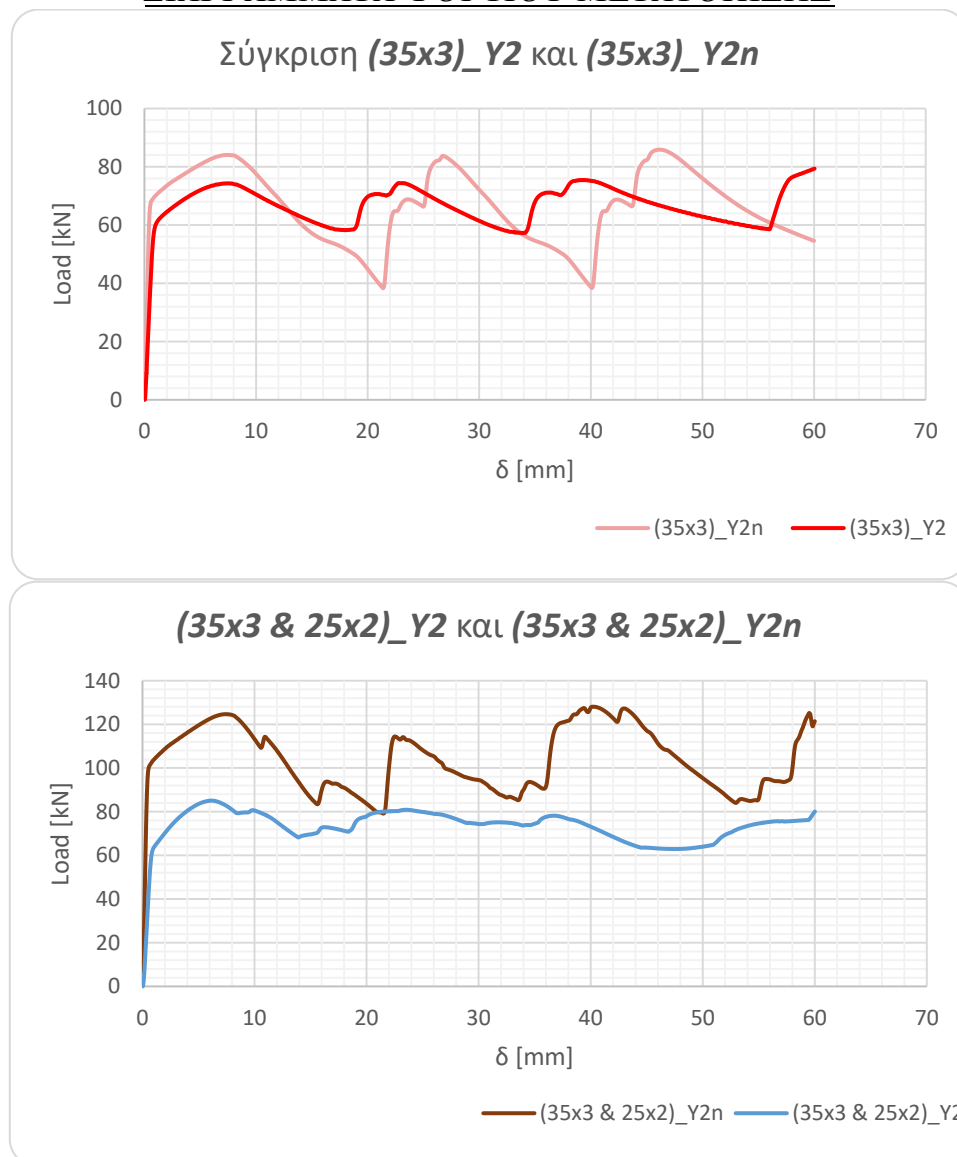


Εικόνα 5.47. Στιγμιότυπα κατάρρευσης αριθμητικού μοντέλου (35x2 & 25x2)_Y2n (πάνω είναι η ρεαλιστική όψη, κάτω είναι η τομή).



Εικόνα 5.47. Στιγμιότυπα κατάρρευσης αριθμητικού μοντέλου (35x2 & 25x2)_Y2n (πάνω είναι η ρεαλιστική όψη, κάτω είναι η τομή) (συνέχεια).

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



Εικόνα 5.48. Συγκρίσεις διαγραμμάτων φορτίου-μετατόπισης ανάμεσα στα δοκίμια που αφορούν το ζεύγος (35x3 & 25x2)_Y2 και (35x3 & 25x2)_Y2n.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8

	(35x3)_Y2n	(25x2)_Y2n	(35x3 & 25x2)_Y2n	
P_{max}	85.9	41.1	128.1	kN
P_{μ}	66.3	31.6	103.6	kN
W	3.98	1.9	6.22	kJ
CFE	77.2	76.9	80.9	%

Πίνακας 5.8. Αποτελέσματα αριθμητικών μοντέλων που αφορούν το ζεύγος (35x3 & 25x2)_Y2n.

Κατάρρευση:

Το (35x3)_Y2n κατέρρευσε αξονοσυμμετρικά, όπως και το αντίστοιχο πειραματικό του μοντέλο (35x3)_Y2, αλλά για ακόμα μια φορά ο αριθμός των λοβών δεν προβλέφθηκε σωστά. Στην αριθμητική προσομοίωση είχαμε το σχηματισμό τριών (3) λοβών, ενώ στην πραγματικότητα είχαμε τέσσερις (4), με τον 4^ο να είναι ανολοκλήρωτος.

Στην αριθμητική προσομοίωση του ομοαξονικού συστήματος (35x3 & 25x2)_Y2n είχαμε σωστό αριθμό λοβών, αλλά ο αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης που προβλέφθηκε δεν αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα. Στο (35x3 & 25x2)_Y2 είχαμε μια περίεργη παραμόρφωση του 3^{ου} λοβού που στο (35x3 & 25x2)_Y2n εμφανίστηκε ως λοβός μορφής δαχτυλιδιού. Στα στιγμιότυπα των τομών (βλ. εικόνα 5.47), βλέπουμε την τάση του εσωτερικού (25x2)_Y2n να σχηματίζει 5 λοβούς, όμως η επαφή που κάνουν στα τοιχώματα του εξωτερικού (35x3)_Y2n εμποδίζει τον σχηματισμό του 3^{ου} και 4^{ου} και δημιουργεί τον μεσαίο ο οποίος βρίσκεται χώρο λόγω της υποχώρησης σε εκείνο το σημείο του (35x3)_Y2n. Οι λοβοί του εσωτερικού σωλήνα δεν εισέρχονται εσωτερικά των λοβών του εξωτερικού (δεν αγκαλιάζονται) αλλά μαγκώνονται από αυτούς όπως έγινε και στο πείραμα, όμως στο πειραματικό (35x3 & 25x2)_Y2 είχαμε περισσότερη επαφή (και σημείων και επιφανειών που εφάπτονταν μεταξύ τους). Για το λόγο αυτό ο 1^{ος} και 2^{ος} λοβός του εξωτερικού δοκιμίου του (35x3 & 25x2)_Y2n δεν έχουν πατηθεί πλήρως και έτσι ο 3^{ος} έχει πατηθεί περισσότερο σε σύγκριση με το μονό δοκίμιο (35x3)_Y2n.

Ενέργεια απορρόφησης:

Το (35x3)_Y2n απορρόφησε την ίδια ποσότητα ενέργειας με το (35x3)_Y2.

Το (35x3 & 25x2)_Y2n ξεπέρασε την ενέργεια απορρόφησης του (35x3 & 25x2)_Y2 κατά 41%. Σε αυτό ευθύνεται το μειωμένο μέσο φορτίο που εμφάνισε το (35x3 & 25x2)_Y2 λόγω της κακής εσωτερικής αλληλεπίδρασης («γλίστρημα»). Η τάση που είχε

το εσωτερικό δοκίμιο του (35x3 & 25x2)_Y2n να σχηματίσει 5 λοβούς, αύξησε τα τοπικά μέγιστα της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης οπότε και το μέσο φορτίο με συνέπεια η ενέργεια που απορρόφησε το σύστημα (35x3 & 25x2)_Y2n να είναι λίγο μεγαλύτερη (6%) από το άθροισμα των δυο μονών αριθμητικών προσομοιώσεων, (35x3)_Y2n και (25x2)_Y2n.

Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης:

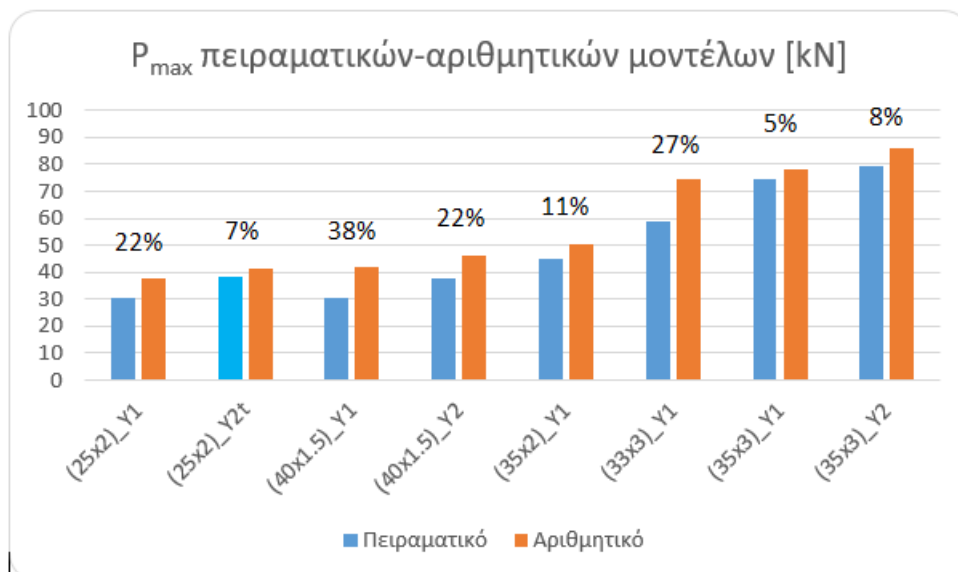
Το (35x3)_Y2n είχε (85.9 kN) μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο (P_{max}) από το (35x3)_Y2 (79.4 kN) κατά 8%.

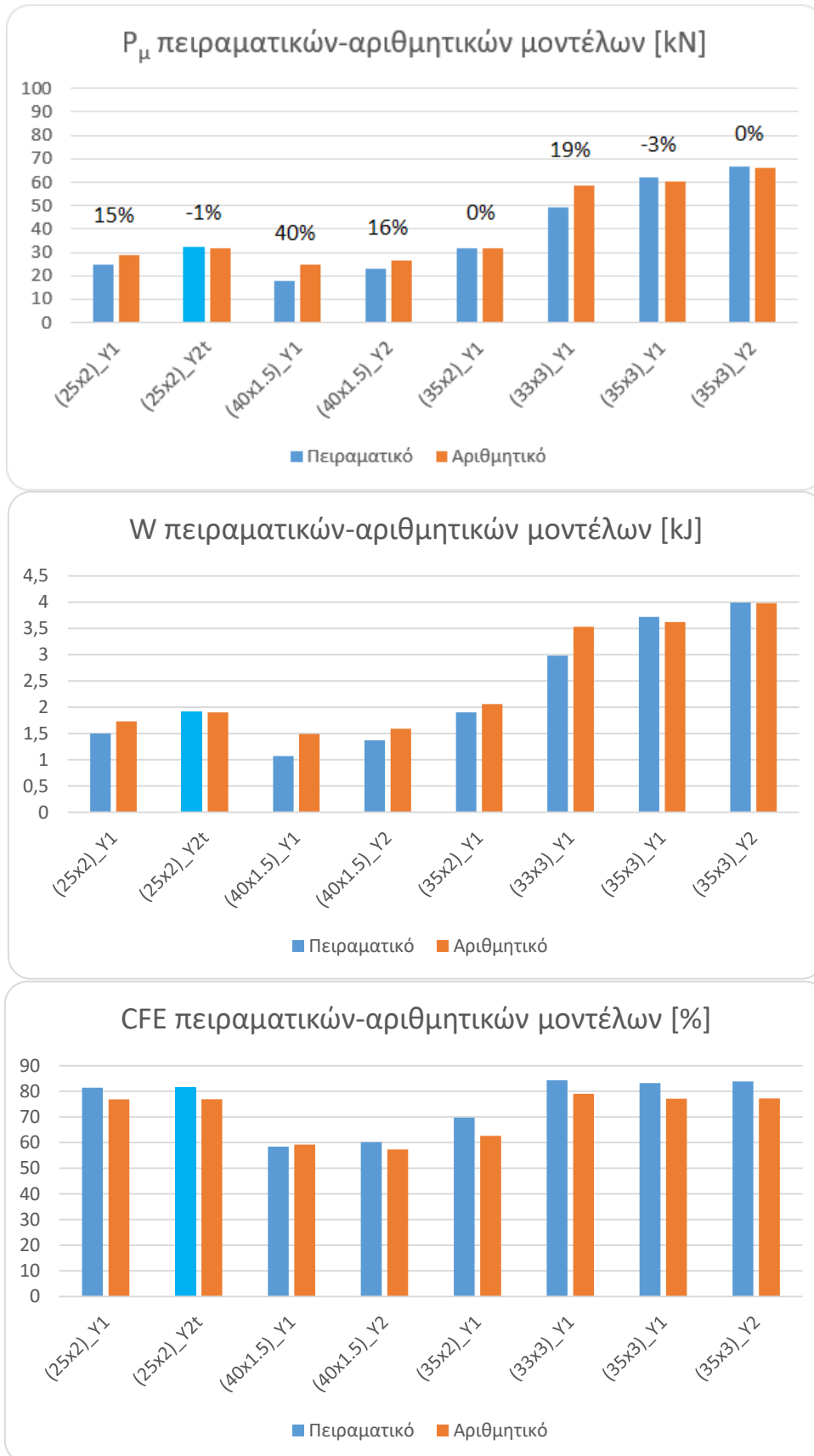
Το άθροισμα των μέγιστων φορτίων (P_{max}) των δυο μονών αριθμητικών μοντέλων, ήταν ίσο με το (P_{max}) του συστήματος (35x3 & 25x2)_Y2n και σε σύγκριση με το αντίστοιχο πείραμά του είχε 50% διαφορά, λόγω της μειωμένης μέγιστης αντίστασης που παρουσίασε το πείραμα.

Και εδώ οι δείκτες ομοιομορφίας ήταν καλύτεροι για τα πειραματικά δοκίμια. Στην περίπτωση του (35x3)_Y2 είχαμε 83.8% με το αριθμητικό (35x3)_Y2n να έχει 77.2%, στο (25x2)_Y2 είχαμε 81.5% έναντι 76.9% του αντίστοιχου αριθμητικού του και στο σύστημα (35x3 & 25x2)_Y2 είχαμε 86.4% όταν το (35x3 & 25x2)_Y2n είχε 80.9%. Πάλι η αιτία είναι τα μικρά τοπικά ελάχιστα και τα μεγάλα τοπικά μέγιστα των διαγραμμάτων των προσομοιώσεων.

5.3.6. Σχολιασμός

MONA ΔΟΚΙΜΙΑ (singles)





Εικόνα 5.49. Σύγκριση μέγιστου φορτίου (P_{max}), μέσου φορτίου (P_{μ}), ενέργειας απορρόφησης (W) και δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (CFE) μεταξύ των μονών πειραματικών-αριθμητικών μοντέλων. Η σειρά παρουσίασης είναι με αύξον εμβαδόν ενεργούς διατομής.

Αναλογιζόμενοι την ενεργό διατομή των δοκιμίων (βλ. εικόνα 5.22), παρατηρούμε ότι σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα μεταξύ των αριθμητικών μοντέλων είναι τα αναμενόμενα. Σε σύγκριση όμως με τα πειραματικά δοκίμια παρατηρούνται αποκλίσεις που σε κάποιες περιπτώσεις δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

Στα διαγράμματα μέγιστου (P_{max}) και μέσου (P_{μ}) φορτίου της εικόνας 5.49, έχουν σημειωθεί πάνω από το κάθε είδος δοκιμίου ποσοστά που αντιπροσωπεύουν την ποσοστιαία διαφορά των αριθμητικών μοντέλων από τα πειραματικά. Αιτίες για αυτές τις αποκλίσεις είναι:

- *το μικρότερο του ονομαστικού πάχος των πειραματικών σωλήνων. Στο σχεδιασμό των μοντέλων μας χρησιμοποιήσαμε τις ονομαστικές διαστάσεις κάτι που έκανε την ενεργή διατομή τους μεγαλύτερη από το πραγματικό. Έτσι παρατηρούνται αυξημένες τιμές μέγιστου φορτίου, μέσου φορτίου και κατ' επέκταση ενέργειας απορρόφησης.*
- *η ανομοιομορφία στην κατανομή του πάχους των πειραματικών σωλήνων, η οποία δεν υπήρχε στα αριθμητικά μοντέλα όπου εφαρμόσαμε τέλεια συμμετρία.*
- *η μη κυκλικότητα των πειραματικών σωλήνων, που είχαν ελαφρώς τη μορφή έλλειψης.*
- *οι συνοριακές συνθήκες, που στην πραγματικότητα ήταν χειρότερες των ιδανικών που είχαν τα αριθμητικά μοντέλα.*
- *η ανισοτροπία του υλικού των πειραματικών δοκιμίων, που προέρχεται από τη διέλαση των σωλήνων για την παραγωγή τους.*
- *η διαφορά των ιδιοτήτων των υλικών των διάφορων σωλήνων λόγω φουρνιάς και θέσης στο φούρνο. Όπως παρατηρήθηκε, η δεύτερη φουρνιά (Y2) είχε ως αποτέλεσμα πιο σκληρό υλικό από την πρώτη (Y1). Διαφορές στη σκληρότητα μεταξύ δοκιμίων που υπέστησαν την ίδια διαδικασία ανόπτησης (ίδια φουρνιά) μπορεί να οφείλονται στην τοποθέτηση τους μέσα στο φούρνο. Για παράδειγμα αν κάποιος σωλήνας βρίσκεται δίπλα στην αντίσταση (η οποία βρίσκεται στα τοιχώματα του φούρνου) η επίδραση είναι πολύ μεγαλύτερη σε αυτόν από κάποιο άλλο που βρίσκεται στο κέντρο. Σημαντικό ρόλο μπορεί να παίζει και το πάχος*

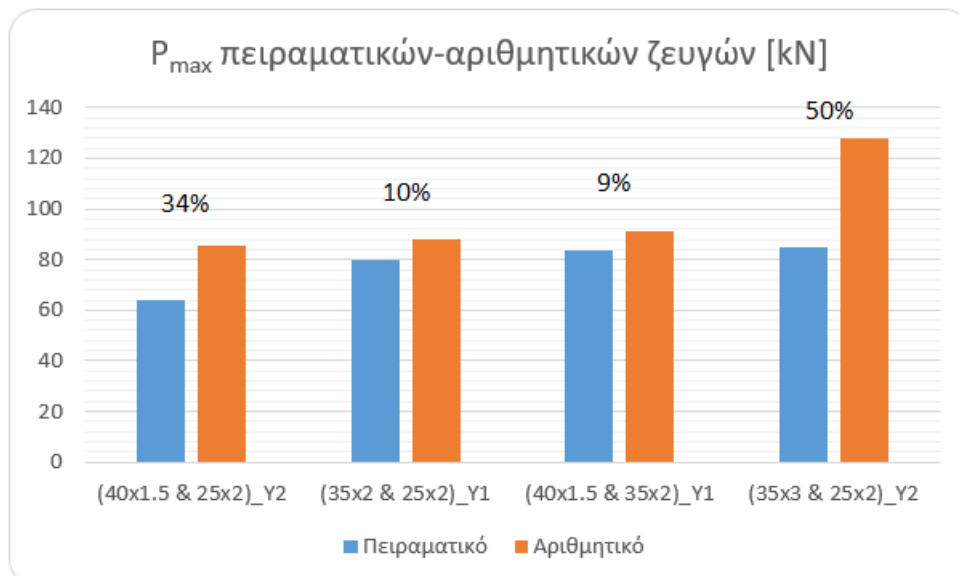
του σωλήνα καθώς τα (40x1.5)_Y1 και (40x1.5)_Y2 (που είχαν το μικρότερο πάχος), έδειξαν μεγαλύτερη διαφορά από τα αντίστοιχα αριθμητικά τους μοντέλα σε σχέση με άλλα δοκίμια μεγαλύτερου πάχους, κάτι που μας οδηγεί δικαιολογημένα σε αυτή την υπόθεση.

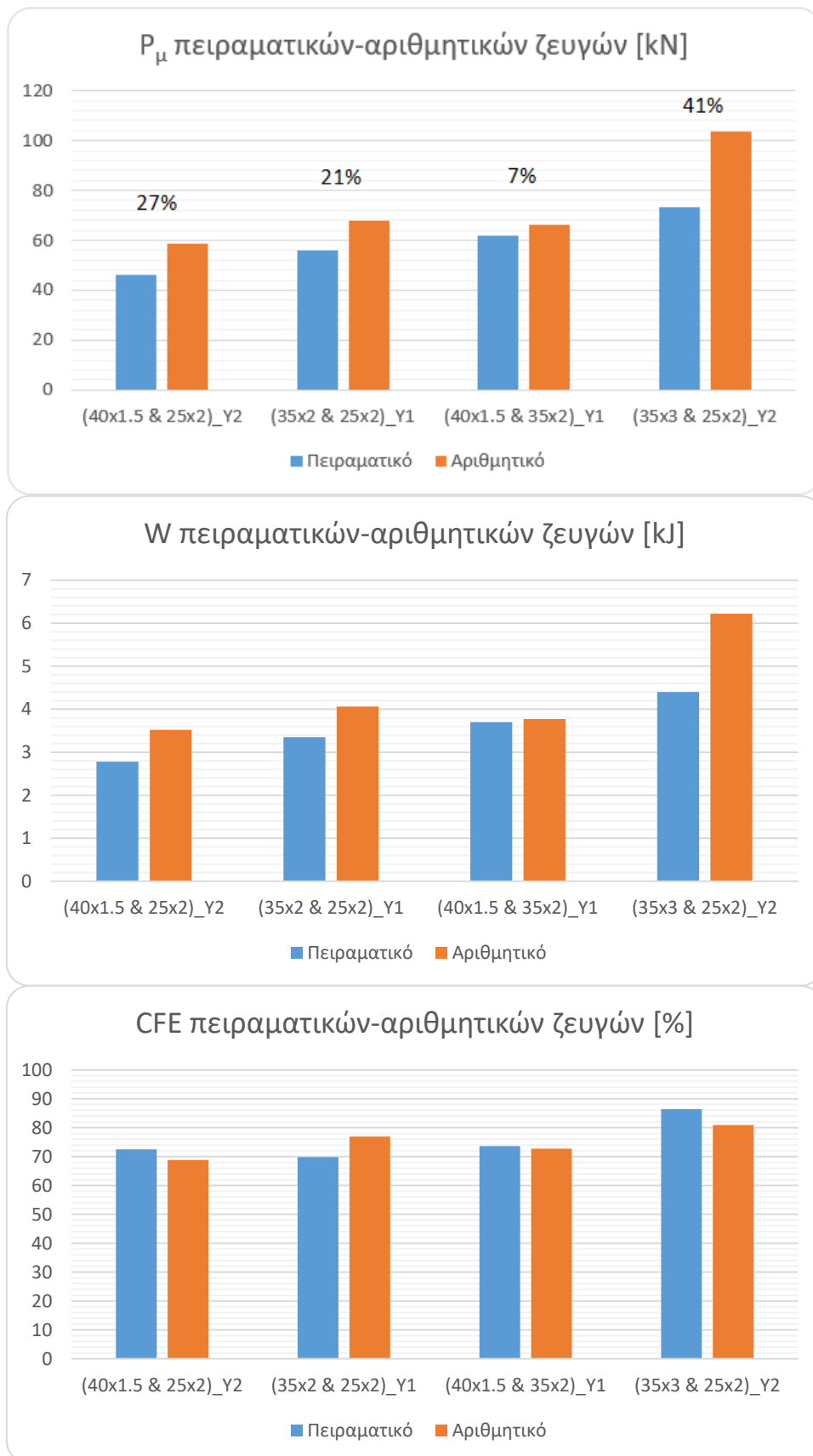
- η μη παραλληλότητα των πλακών θλίψης, που έκανε τα δοκίμια που υπέστησαν λυγισμό, να καταρρεύσουν με συγκεκριμένη κατεύθυνση (οι φωτογραφίες βρίσκονται στο Παράρτημα Α).

Όλα αυτά έπαιξαν το ρόλο τους ώστε να έχουμε αυτές τις διαφορές μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών μοντέλων.

Κάτι αξιοσημείωτο είναι η πολύ καλή ομοιομορφία φορτίου που είχαν τα πειραματικά μοντέλα και γενικά και σε σύγκριση με τις αριθμητικές προσομοιώσεις. Τα αριθμητικά μοντέλα, καθώς είχαν (συνήθως) ένα λοβό λιγότερο από τα πειραματικά, είχαν μεγαλύτερες αυξομειώσεις στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης κάτι που οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές του δείκτη ομοιομορφίας CFE.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (couples)





Εικόνα 5.50. Σύγκριση μέγιστου φορτίου (P_{max}), μέσου φορτίου (P_{μ}), ενέργειας απορρόφησης (W) και δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (CFE) μεταξύ των πειραματικών-αριθμητικών ζευγών. Η σειρά παρουσίασης είναι με αύξον εμβαδόν ενεργούς διατομής (συνέχεια).

Κάτι ανάλογο με τα μονά δοκίμια συμβαίνει και στη σύγκριση πειραματικών-αριθμητικών προσομοιώσεων των αριθμητικών αποτελεσμάτων των συστημάτων ομοαξονικών σωλήνων.

Σε γενικές γραμμές και σύμφωνα πάντα με το εμβαδό της ενεργούς διατομής (A) τους (βλ. εικόνα 5.23), τα αριθμητικά μοντέλα-ζεύγη είχαν τα αναμενόμενα αριθμητικά αποτελέσματα με κάποιες εξαιρέσεις. Το $(40 \times 1.5 \ \& \ 35 \times 2)_{Y1n}$, περιμέναμε να έχει μεγαλύτερο μέσο φορτίο (P_μ) από το $(35 \times 2 \ \& \ 25 \times 2)_{Y1n}$, για δυο λόγους. Πρώτον λόγω μεγαλύτερου A και δεύτερον επειδή το διάκενο του ήταν μικρότερο σε σχέση με το $(35 \times 2 \ \& \ 25 \times 2)_{Y1n}$. Εδώ ρόλο έπαιξε η στιβαρότητα του (40×1.5) που όπως φαίνεται και στα charts P_μ των εικόνων 5.49, βλέπουμε ότι ακόμα και το πιο μαλακό (λόγω φουρνιάς, $Y1$ πιο μαλακό από $Y2$) $(25 \times 2)_{Y1n}$ είχε μεγαλύτερο P_μ από το πιο σκληρό $(40 \times 1.5)_{Y2n}$.

Επίσης στα charts P_{max} και P_μ της εικόνας 5.50, παρατηρούμε ότι σε όλα τα ζεύγη πλην του $(35 \times 2 \ \& \ 25 \times 2)_{Y1}$, η ποσοστιαία διαφορά των P_μ μειώνεται σε σχέση με την ποσοστιαία διαφορά των P_{max} . Η πτώση φορτίου στο πειραματικό $(35 \times 2 \ \& \ 25 \times 2)_{Y1}$ κατά τη δημιουργία του 2D λοβού που εσωτερικά χάθηκε η επαφή δικαιολογεί αυτή την παρατήρηση.

Αυτό που παρατηρήσαμε σε όλες τις προσομοιώσεις συστημάτων ομοαξονικών σωλήνων είναι ότι το άθροισμα των μέγιστων φορτίων (P_{max}) των μονών δοκιμίων ισούται με το μέγιστο φορτίο του συστήματος σωλήνων που αποτελούν μαζί. Δεν ισχύει όμως το ίδιο και για το μέσο φορτίο (P_μ) όπου στα αριθμητικά μοντέλα-ζεύγη ήταν ίσο (στην περίπτωση του $(40 \times 1.5 \ \& \ 25 \times 2)_{Y2n}$ που είχε το μεγαλύτερο διάκενο και η αλληλεπίδραση δεν ήταν μεγάλη) ή μεγαλύτερο (στις υπόλοιπες περιπτώσεις) από το άθροισμα των μονών αριθμητικών μοντέλων που το αποτελούν. Το ίδιο με τα μέσα φορτία ισχύει και για τις ενέργειες απορρόφησης.

Και εδώ οι δείκτες ομοιομορφίας CFE ήταν καλύτεροι στα πειράματα από τα αντίστοιχα αριθμητικά τους μοντέλα με μόνη εξαίρεση το $(35 \times 2 \ \& \ 25 \times 2)_{Y1n}$ όπου στο $(35 \times 2 \ \& \ 25 \times 2)_{Y1}$ είχαμε πτώση φορτίου λόγω άτσαλης συμπεριφοράς του εσωτερικού δοκιμίου και συνεπώς τη μείωση του δείκτη CFE. Κάτι ακόμα ενδιαφέρον είναι ότι όσο πιο στιβαρά δοκίμια χρησιμοποιούσαμε στα ζευγάρια δοκιμίων, τόσο μεγαλύτερο τέτοιο δείκτη έχουμε (οι διαφορές τους είναι μικρές αλλά φανερές). Ένα καλό παράδειγμα είναι τα δυο ζεύγη στα οποία περιλαμβάνονται δοκίμια διαστάσεων (40×1.5) .

Το λογισμικό σπάνια προέβλεψε σωστά τον αριθμό των λοβών και στα μονά και στα ζεύγη δοκιμίων, γιατί το πλέγμα που χρησιμοποιήσαμε ήταν αραιό ως προς το ύψος.

5.4. Πρόσθετα αριθμητικά μοντέλα (Παραμετρική ανάλυση)

Η διαδικασία που προηγήθηκε επιβεβαίωσε την καλή προσέγγιση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης ως προς την απορροφούμενη ενέργεια και το μέσο φορτίο. Σε αυτή την ενότητα, θα ασχοληθούμε με λοιπά αριθμητικά μοντέλα μονών δοκιμίων και συστημάτων δοκιμίων και θα τα συγκρίνουμε με τα προηγούμενα αριθμητικά μοντέλα. Στους πίνακες που ακολουθούν εισάγεται ως μέγεθος το φορτίο ελαστικού λυγισμού (P_b), που αντιπροσωπεύει την τιμή του πρώτου τοπικού μεγίστου στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης.

MONA ΔΟΚΙΜΙΑ (singles)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9

	(18x1.5)_Y1n	(20x1.5)_Y1n	(25x3)_Y1n	(28x3)_Y1n	(33x3)_Y1n	(35x3)_Y1n	
P_b	18.1	21.2	55.2	61.8	72.3	76.4	kN
P_{max}	18.1	21.2	55.2	65.6	74.4	78.2	kN
P_{μ}	5.36	7.06	42.1	53.5	58.8	60.3	kN
W	0.32	0.42	2.53	3.21	3.53	3.62	kJ
CFE	29.6	33.3	76.3	81.6	79	77.1	%
A	77.8	87.2	207.3	235.6	282.7	301.6	mm ²
Αποτέλεσμα αντίστοιχου πειράματος	Λυγισμός	Λυγισμός	Λυγισμός	Λυγισμός	Κατάρρευση	Αξονοσυμμετρική κατάρρευση	
Αποτέλεσμα αριθμητικής προσομοίωσης	Λυγισμός	Λυγισμός	Λυγισμός	Αξονοσυμμετρική κατάρρευση	Αξονοσυμμετρική κατάρρευση	Αξονοσυμμετρική κατάρρευση	

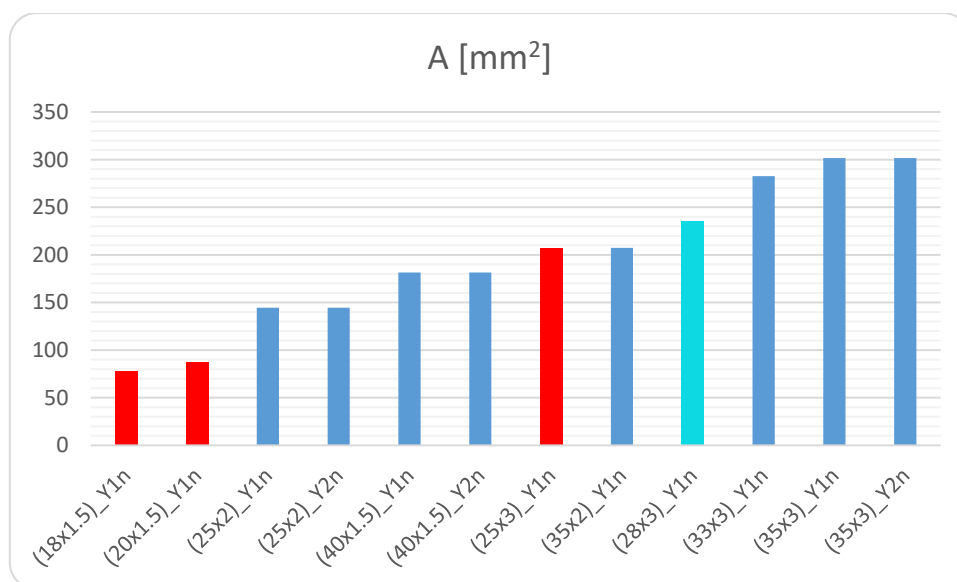
Πίνακας 5.9. Αποτελέσματα λοιπών μονών αριθμητικών μοντέλων.

Όλα τα δοκίμια του πίνακα 5.9, έχουν υποστεί την πειραματική διαδικασία και τα διαγράμματα σύγκρισης τους με τα αριθμητικά μοντέλα (τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στον πίνακα 5.9) βρίσκονται στο Παράρτημα Α, καθώς επίσης και τα στιγμιότυπα κατάρρευσης τους.

Ως προς την κατάρρευση, το λογισμικό προέβλεψε σωστά τον τύπο του κάθε αριθμητικού μοντέλου με εξαίρεση μόνο τα (28x3)_Y1n και (33x3)_Y1n. Το πρώτο

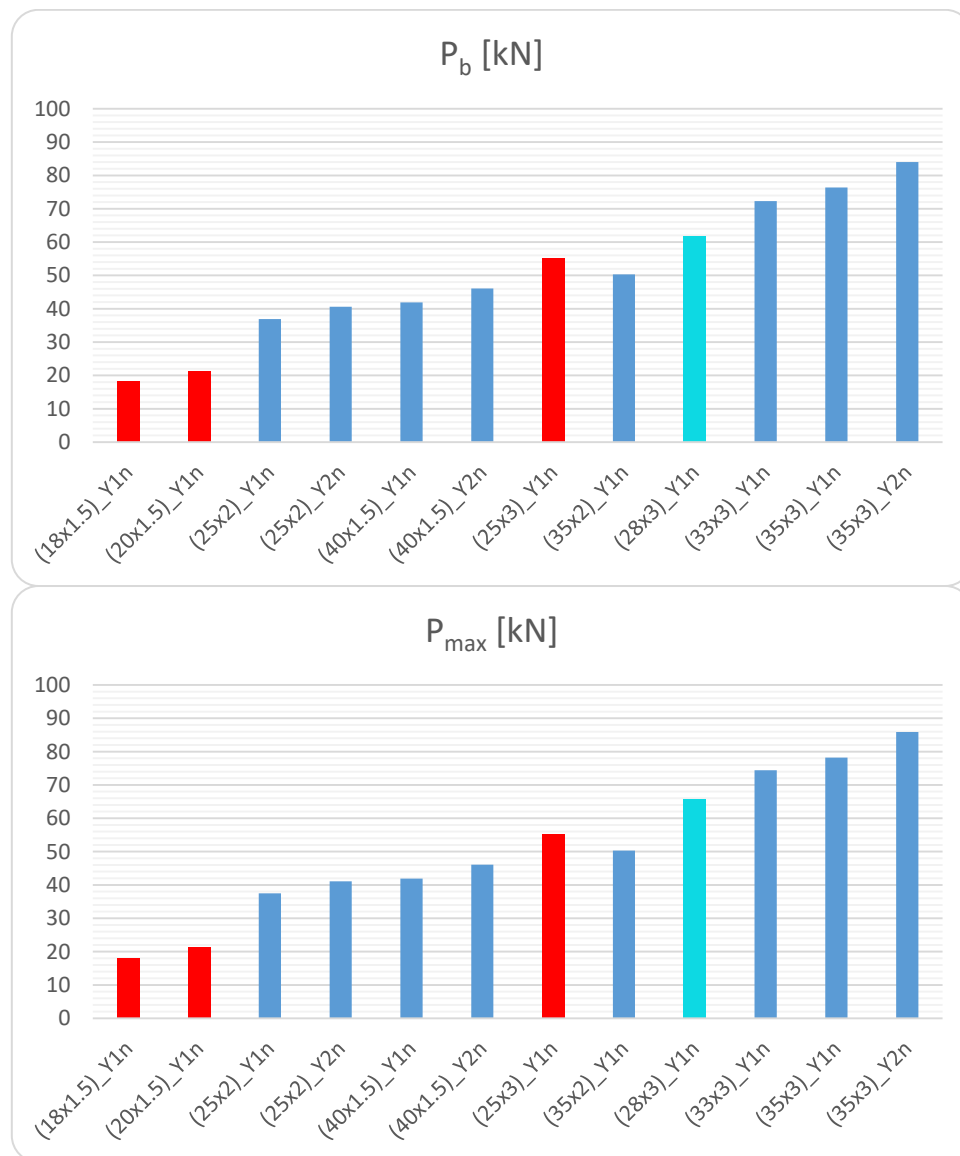
λύγισε, όμως σε αυτό μπορεί να ευθύνεται η μη παραλληλότητα των πλακών θλίψης της μηχανής. Οι διαστάσεις του (28x3)_Y1n μπορεί να είναι τέτοιες που να βρίσκεται κοντά στο όριο μεταξύ της αξονοσυμμετρικής κατέρρευσης και του λυγισμού και η μη συμμετρική φόρτιση που δέχτηκε το πειραματικό (28x3)_Y1 να οδήγησε στο λυγισμό του (το (28x3)_Y1n σίγουρα δέχεται ομοιόμορφη φόρτιση γιατί οι συνθήκες στην προσομοίωση είναι ιδανικές). Το (33x3)_Y1n κατέρρευσε αξονοσυμμετρικά με τρεις (3) λοβούς, ενώ το αντίστοιχο πειραματικό του, (33x3)_Y1, εμφάνισε το μικτό τρόπο κατέρρευσης με τους δυο πρώτους να είναι μορφής δαχτυλιδιού και τον τρίτο να είναι μορφής 2D.

Παρακάτω είναι τα chats όλων των αριθμητικών μοντέλων μόνων δοκιμίων στα οποία παρατίθενται το εμβαδόν της ενεργούς διατομής τους (A), το φορτίο ελαστικού λυγισμού (P_b), το μέγιστο φορτίο (P_{max}), το μέσο φορτίο (P_μ), η ενέργεια απορρόφησης (W) και ο δείκτης ομοιομορφίας (CFE). Με κόκκινο χρώμα είναι τα δοκίμια που λύγισαν και στην πειραματική διαδικασία και στην αριθμητική προσομοίωση και με τирκουάζ χρώμα είναι το (28x3)_Y1n που λύγισε στο πείραμα αλλά το αριθμητικό μοντέλο κατέρρευσε αξονοσυμμετρικά.



Εικόνα 5.51. Σύγκριση εμβαδού ενεργούς διατομής (A) των αριθμητικών μοντέλων όλων των μόνων δοκιμίων. Η σειρά παρουσίασης είναι με αύξον εμβαδόν ενεργούς διατομής.

Διαγράμματα P_b και P_{max}

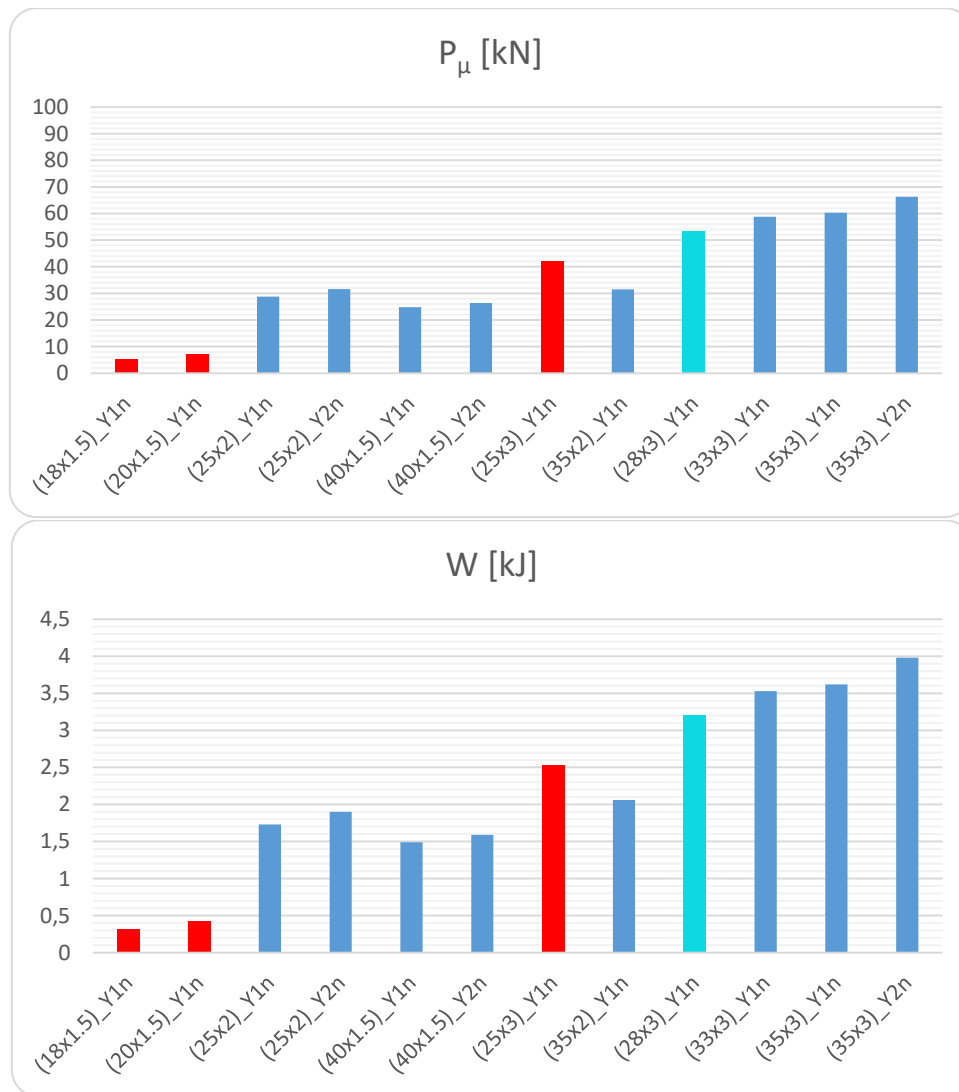


Εικόνα 5.52. Σύγκριση φορτίου ελαστικού λυγισμού (P_b) και μέγιστου φορτίου (P_{max}) των αριθμητικών μοντέλων όλων των μονών δοκιμών. Η σειρά παρουσίασης είναι με αύξον εμβαδόν ενεργούς διατομής.

Τα δυο charts έχουν μεγάλη ομοιότητα ως προς τις αναλογίες και γενικότερα, κοιτώντας και το chart του εμβαδού ενεργούς διατομής, τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το (25x3)_Y1n που λύγισε, ξεπέρασε σε μέγιστο φορτίο το ίδιο εμβαδού (35x2)_Y1n, που κατέρρευσε αξονοσυμμετρικά. Η στιβαρότητα έπαιξε καθοριστικό ρόλο σε αυτό το αποτέλεσμα, καθώς η διάμετρος του (25x3)_Y1n είναι μικρότερη από διάμετρο του (35x2)_Y1n και το πάχος μεγαλύτερο, κάτι που το κάνει πιο συμπαγές. Επίσης δοκίμια ίδιων διαστάσεων (δηλαδή ίδιου εμβαδού ενεργού διατομής) αλλά φουρνιάς Y2 είναι πιο ανθεκτικά από αυτά φουρνιάς Y1.

Διαγράμματα P_{μ} και W



Εικόνα 5.53. Σύγκριση μέσου φορτίου (P_{μ}) και ενέργειας απορρόφησης (W) των αριθμητικών μοντέλων όλων των μονών δοκιμίων. Η σειρά παρουσίασης είναι με αύξον εμβαδόν ενεργούς διατομής.

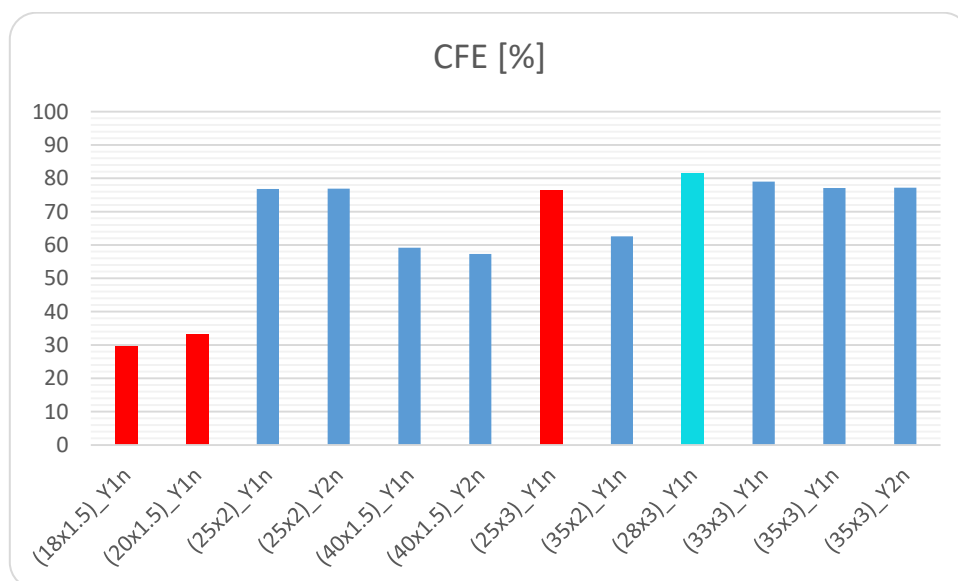
Η ενέργεια απορρόφησης (W) προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του μέσου φορτίου (P_{μ}) επί τη μετατόπιση (που είναι πάντα σταθερή και ίση με 60mm). Οπότε ότι ισχύει για το P_{μ} ισχύει και για την W και έτσι θα αναφερθούμε μόνο στο P_{μ} .

Τα P_{μ} των (18x1.5)_Y1n και (20x1.5)_Y1n είναι εξαιρετικά μικρά, λόγω λυγισμού που σαν τρόπος κατάρρευσης απορροφά τη λιγότερη ενέργεια. Διαφορά παρατηρείται μεταξύ των (25x2) και (40x1.5). Ενώ τα P_{\max} τους συμβάδιζαν με την ενεργό διατομή τους, στην περίπτωση του P_{μ} δεν έγινε έτσι, με τα πιο στιβαρά (25x2) να πετυχαίνουν καλύτερες τιμές από τα (40x1.5). Το ακόμα πιο στιβαρό (25x3)_Y1n παρόλο που υπέστη λυγισμό είχε μεγάλο P_{μ} λόγω του μεγάλου όγκου υλικού που διαθέτει και προκάλεσε

κατά την κατάρρευση συμπίεση συμπαγούς υλικού. Αυτό το έκανε να πετύχει καλύτερη τιμή και από το ίδιο εμβαδού ενεργούς διατομής (35x2)_Y1n το οποίο πάλι λόγω της μικρότερης στιβαρότητας είχε χειρότερο P_{μ} . Παρατηρούμε το ίδιο, πάλι με το (35x2)_Y1n και το (28x3)_Y1n, όπου το δεύτερο λόγω μικρότερης διαμέτρου και μεγαλύτερου πάχους καθίσταται πιο στιβαρό από το πρώτο με αποτέλεσμα η διαφορά των μέσων φορτίων τους να είναι δυσανάλογη με τη διαφορά των εμβαδών ενεργούς διατομής τους (+70% το P_{μ} του (28x3)_Y1n από το (35x2)_Y1n, +14% το A του (28x3)_Y1n από το (35x2)_Y1n).

Από τη σύγκριση των {(35x2)_Y1n - (25x2)_Y1n} και {(35x3)_Y1n - (33x3)_Y1n} φαίνεται ότι αυξάνοντας μόνο τη διατομή και κρατώντας το πάχος σταθερό έχουμε αύξηση του P_{μ} και αν θέλουμε αύξηση της στιβαρότητας στο μικρότερης διατομής δοκίμιο, πρέπει να αυξήσουμε το πάχος του τοιχώματός του. Τέλος, και εδώ είναι φανερή η μεγαλύτερη σκληρότητα του υλικού της φουρνιάς Y2 έναντι της Y1.

Διάγραμμα CFE



Εικόνα 5.54. Σύγκριση δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (CFE) των αριθμητικών μοντέλων όλων των μονών δοκιμίων. Η σειρά παρουσίασης είναι με αύξον εμβαδόν ενεργούς διατομής.

Όπως βλέπουμε στο chart του δείκτη ομοιομορφίας φορτίου της εικόνας 5.54, τα πιο στιβαρά δοκίμια ήταν αυτά που είχαν πιο ομοιόμορφο φορτίο. Η στιβαρότητα ενός σωλήνα έχει να κάνει με τις γεωμετρικές του διαστάσεις και συγκεκριμένα με το λόγο D/t , όπου D η εξωτερική διάμετρος και t το πάχος του σωλήνα. Όσο πιο μικρός ο λόγος

D/t , τόσο μεγαλύτερη τιμή του δείκτη πετυχαίνει το αριθμητικό μοντέλο. Για να δούμε καλύτερα τη συσχέτιση, δημιουργήθηκε ο πίνακας 5.10, στον οποίο έχουν συμπεριληφθεί μόνο δοκίμια φουρνιάς Y1 εκτός από αυτά που υπέστησαν λυγισμό (η σειρά παρουσίασης είναι με φθίνον τιμή λόγου D/t ή αύξον CFE).

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10

	(40x1.5)_Y1n	(35x2)_Y1n	(25x2)_Y1n	(35x3)_Y1n	(33x3)_Y1n	(28x3)_Y1n	
D/t	26.6	17.5	12.5	11.7	11	9.33	
CFE	59.2	62.6	76.8	77.1	79	81.6	%

Πίνακας 5.10. Συσχέτιση του λόγου D/t με το δείκτη ομοιομορφίας φορτίου CFE.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (couples)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.11

	(25x2 & 20x1.5)_Y1n	(25x3 & 18x1.5)_Y1n	
P_b	57.7	70.4	kN
P_{max}	57.7	70.4	kN
P_μ	26.8	40.1	kN
W	1.61	2.41	kJ
CFE	46.4	57	%
A	231.7	285.1	mm ²
r	0.5	0.5	mm
Αποτέλεσμα αντίστοιχου πειράματος	Λυγισμός	Λυγισμός	
Αποτέλεσμα αριθμητικής προσομοίωσης	Λυγισμός	Λυγισμός	

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.11 (συνέχεια)

	(40x1.5 & 33x3)_Y1n	(33x3 & 25x3)_Y1n	(35x3 & 28x3)_Y1n	
P_b	109.4	126.9	137.7	kN
P_{max}	113.1	161.9	155.1	kN
P_μ	92.6	121.5	126.6	kN
W	5.56	7.29	7.6	kJ
CFE	81.9	75	81.6	%
A	464.2	490	537.2	mm ²
r	2	1	0.5	mm
Αποτέλεσμα πειράματος	Ξεπέρασε το ονομ. φορτίο	Ξεπέρασε το ονομ. φορτίο	Ξεπέρασε το ονομ. φορτίο	
Αποτέλεσμα αριθμητικής προσομοίωσης	Αξονοσυμμετρική κατάρρευση	Αξονοσυμμετρική κατάρρευση	Αξονοσυμμετρική κατάρρευση	

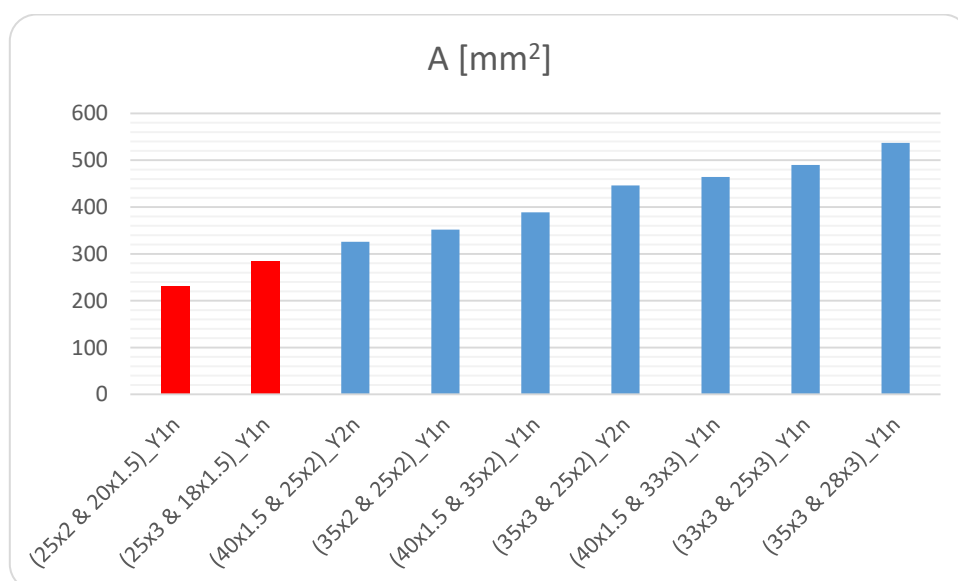
Πίνακας 5.11. Αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων συστημάτων ομοαξονικών σωλήνων.

Στον πίνακα 5.11 περιέχονται όλες οι αριθμητικές προσομοιώσεις των ζευγών ομοαξονικών σωλήνων που κατά την πειραματική διαδικασία ξεπέρασαν το ονομαστικό φορτίο της μηχανής Instron ή λύγισαν.

Τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσαν εύστοχα τον τρόπο κατάρρευσης, καθώς τα δυο ζεύγη που λύγισαν στην πειραματική διαδικασία, τα (25x2 & 20x1.5)_Y1 και (25x3 & 18x1.5)_Y1, λύγισαν και στην προσομοίωση τα αντίστοιχα μοντέλα τους, τα (25x2 & 20x1.5)_Y1n και (25x3 & 18x1.5)_Y1n.

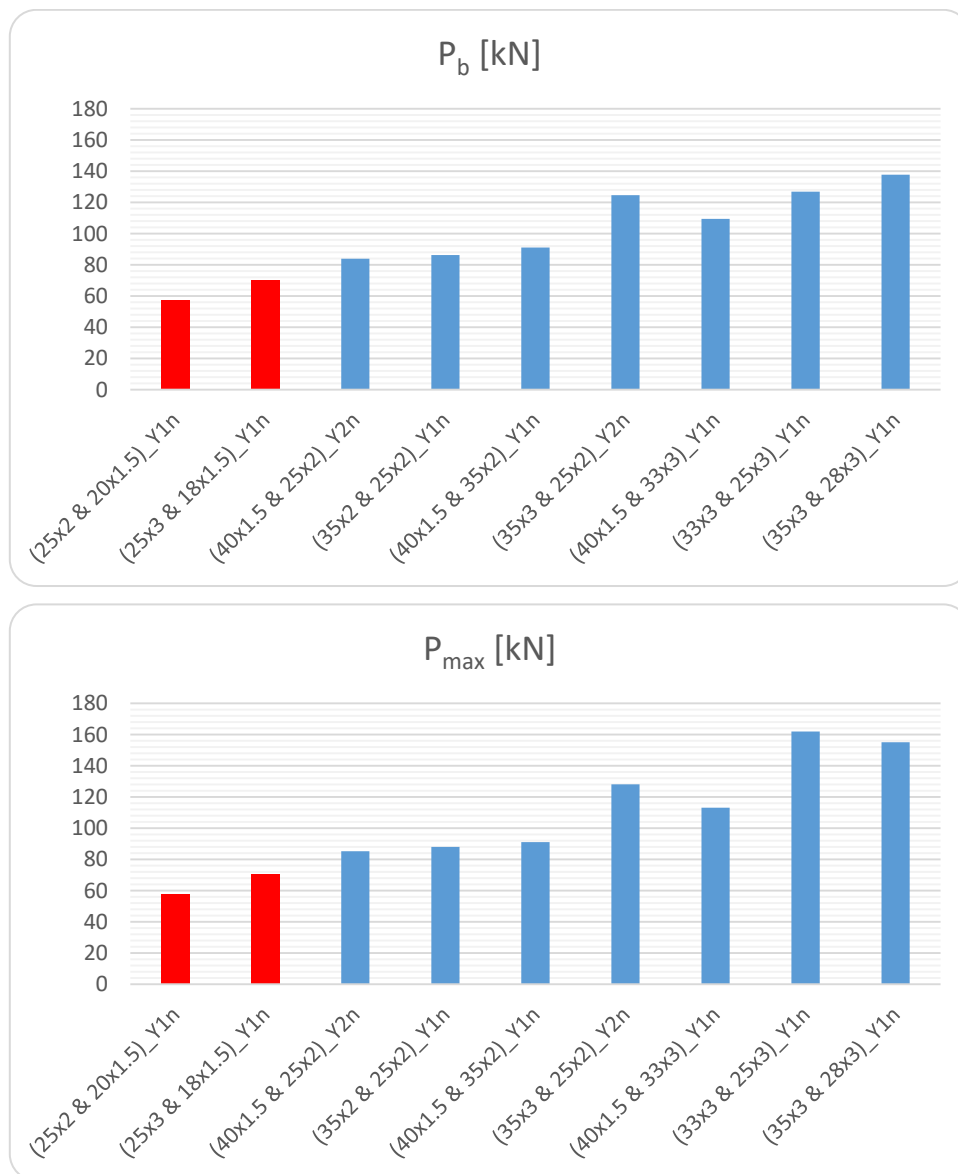
Τα πειράματα και η αριθμητική προσομοίωση έδειξαν ότι αν ένα από τα δυο δοκίμια που αποτελούν ένα ζεύγος, έχει λυγίσει στην θλίψη που υπέστη μόνο του (ως μονό δοκίμιο), τότε λυγίζει και το ζεύγος, όπως έγινε στην περίπτωση του (25x2 & 20x1.5)_Y1, όπου το (25x2)_Y1 κατέρρευσε αξονοσυμμετρικά ενώ το (20x1.5)_Y1 λύγισε (βέβαια, δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι για αυτή την υπόθεση γιατί είχαμε μόνο ένα τέτοιο δείγμα).

Παρακάτω είναι τα chats όλων των αριθμητικών μοντέλων των συστημάτων ομοαξονικών σωλήνων στα οποία παρατίθενται το συνολικό εμβαδόν της ενεργούς διατομής τους (A), το φορτίο ελαστικού λυγισμού (P_b), το μέγιστο φορτίο (P_{max}), το μέσο φορτίο (P_μ), η ενέργεια απορρόφησης (W) και ο δείκτης ομοιομορφίας (CFE) τους. Με κόκκινο χρώμα είναι σημειωμένα τα ζεύγη που λύγισαν (και στην πειραματική διαδικασία και στην αριθμητική προσομοίωση).



Εικόνα 5.55. Σύγκριση εμβαδού ενεργούς διατομής (A) των αριθμητικών μοντέλων όλων των συστημάτων ομοαξονικών δοκιμών. Η σειρά παρουσίασης είναι με αύξον εμβαδόν ενεργούς διατομής.

Διαγράμματα P_b και P_{max}



Εικόνα 5.56. Σύγκριση φορτίου ελαστικού λυγισμού (P_b) και μέγιστου φορτίου (P_{max}) των αριθμητικών μοντέλων όλων των συστημάτων ομοαξονικών δοκιμών. Η σειρά παρουσίασης είναι με αύξον εμβαδόν ενεργούς διατομής.

Κοιτώντας τα charts της εικόνας 5.55 και 5.56, βλέπουμε ότι κατά κύριο λόγο οι P_b των αριθμητικών μοντέλων συστημάτων σωλήνων ακολουθούν τις αναλογίες του A [mm²]. Εξάιρεση αποτελεί το (35x3 & 25x2)_Y2n που η A του είναι μεγαλύτερη του (40x1.5 & 35x2)_Y1n κατά 14% ενώ το P_b του πρώτου είναι 37% μεγαλύτερο του δεύτερου. Ακόμα το (35x3 & 25x2)_Y2n ξεπερνάει σε P_b και το αμέσως μεγαλύτερο του (40x1.5 & 33x3)_Y1n (-4% ως προς A και +14% ως προς P_b). Σε αυτό ευθύνεται η διαφορά του υλικού λόγω διαφορετικής φουρνιάς. Τέλος, με τη σειρά τους το (40x1.5 & 33x3)_Y1n

με το μεγαλύτερο (33x3 & 25x3)_Y1n παρουσιάζουν και αυτά δυσανάλογη συμπεριφορά, με τη διαφορά του A τους να είναι περίπου 6% και τη διαφορά του P_b τους 16%. Από τις μέχρι στιγμής παρατηρήσεις, τα δοκίμια διαστάσεων (40x1.5) λόγω της μειωμένης τους αντοχής, λόγω γεωμετρίας (έλλειψη στιβαρότητας), έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής των συστημάτων των οποίων αποτελούν μέρος.

Τα ίδια με το P_b ισχύουν και για το P_{max} με τη διαφορά ότι στη σύγκριση των δυο μεγαλύτερων ως προς A συστημάτων, του (33x3 & 25x3)_Y1n με το (35x3 & 28x3)_Y1n. Το πρώτο αν και μικρότερο, έχει μεγαλύτερη P_{max} από το δεύτερο. Και στα δυο αριθμητικά μοντέλα ζευγών η P_{max} σημειώθηκε στο τέλος της μετατόπισης, ένδειξη ότι είχαμε συμπίεση συμπαγούς υλικού και στα δυο συστήματα. Το γεγονός όμως ότι το (33x3 & 25x3)_Y1n αποτελείται από σωλήνες ίδιου πάχους με το (35x3 & 28x3)_Y1n αλλά μικρότερης διαμέτρου, κάνει το πρώτο σύστημα πιο συμπαγές (θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο όγκος του υλικού του είναι πιο πολύ συγκεντρωμένος μεταξύ του από το (35x3 & 28x3)_Y1n) με αποτέλεσμα την αυξημένη P_{max}.

Στο σχολιασμό των P_b δεν κρίνουμε βάση του διάκενου r, καθώς στην αρχή της κατάρρευσης όπως φαίνεται και από τα στιγμιότυπα τους που βρίσκονται στο Παράρτημα Α, δεν υπάρχει επαφή στα πρώιμα αυτά στάδια, ούτε στα ζεύγη με πολύ μικρό r.

Κάτι ενδιαφέρον που παρατηρήθηκε είναι ότι σε όλες τις αριθμητικές προσομοιώσεις, το P_b του συστήματος ήταν ελαφρώς μικρότερο από το άθροισμα των P_b των μονών αριθμητικών μοντέλων που το αποτελούν. Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τα P_b του συστήματος, τα P_b αθροίσματος και τη ποσοστιαία διαφορά τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.12

	(25x2 & 20x1.5)_Y1n	(25x3 & 18x1.5)_Y1n	(40x1.5 & 25x2)_Y2n	
P _b συστήματος	57.7	70.4	83.9	kN
P _b αθροίσματος	58.1	73.3	86.7	kN
Ποσοστιαία διαφορά	-0.7	-4	-3	%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.12 (συνέχεια)

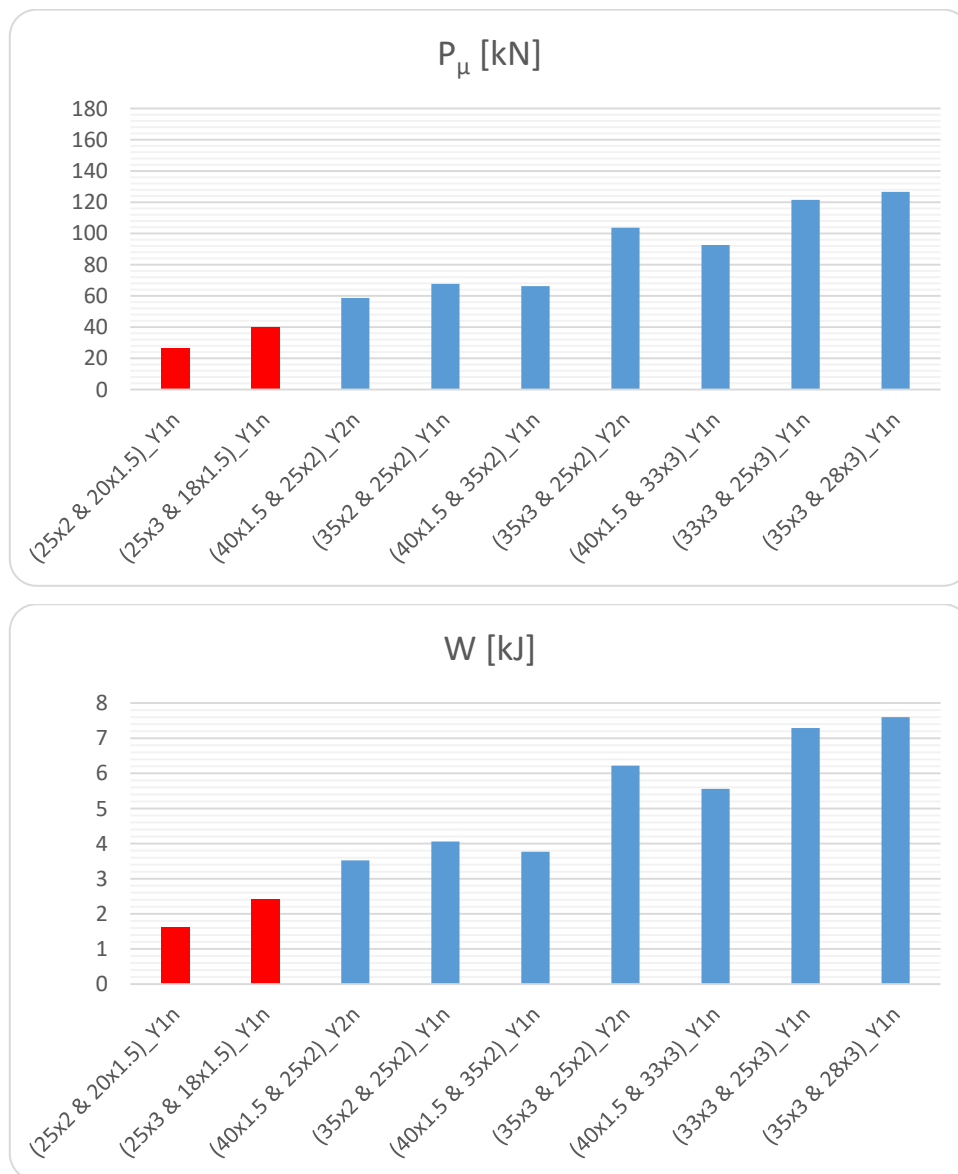
	(35x2 & 25x2)_Y1n	(40x1.5 & 35x2)_Y1n	(35x3 & 25x2)_Y2n	
P _b συστήματος	86.3	91.1	124.6	kN
P _b αθροίσματος	90.9	92.2	124.6	kN
Ποσοστιαία διαφορά	-5	-1	0	%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.12 (συνέχεια)

	(40x1.5 & 33x3)_Y1n	(33x3 & 25x3)_Y1n	(35x3 & 28x3)_Y1n	
P _b συστήματος	109.4	126.9	137.7	kN
P _b αθροίσματος	114.2	127.5	138.2	kN
Ποσοστιαία διαφορά	-4	-0.5	-0.4	%

Πίνακας 5.12. Φορτίο ελαστικού λυγισμού (P_b) του κάθε συστήματος και άθροισμα των P_b των μονών δοκιμίων που το αποτελούν (αριθμητική προσομοίωση).

Διαγράμματα P_μ και W



Εικόνα 5.57. Σύγκριση μέσου φορτίου (P_μ) και ενέργειας απορρόφησης (W) των αριθμητικών μοντέλων όλων των συστημάτων ομοαξονικών δοκιμίων. Η σειρά παρουσίασης είναι με αύξον εμβαδόν ενεργούς διατομής.

Ότι ισχύει για το P_{μ} ισχύει και για την W και έτσι θα αναφερθούμε μόνο στο P_{μ} .

Η έλλειψη στιβαρότητας του (40x1.5) φαίνεται ότι προκαλεί και στα P_{μ} των αριθμητικών μοντέλων των συστημάτων που τα περιέχουν, μειωμένες τιμές. Έτσι παρατηρούμε ότι το (40x1.5 & 35x2)_Y1n παρόλο που έχει μεγαλύτερο A από το (35x2 & 25x2)_Y1n κατά 10%, το P_{μ} του είναι μικρότερο από του (35x2 & 25x2)_Y1n κατά 2% παρά το γεγονός ότι και τα δυο ζεύγη είναι της ίδιας φουρνιάς.

Το ίδιο με το P_{\max} ισχύει για το P_{μ} στη σύγκριση του (40x1.5 & 35x2)_Y1n με το (35x3 & 25x2)_Y2n, όπως και στη τη σύγκριση του (35x3 & 25x2)_Y2n με το (40x1.5 & 33x3)_Y1n, δηλαδή ότι η διαφορετική φουρνιά και η έλλειψη στιβαρότητας των σωλήνων (40x1.5) δημιουργεί αυτές τις διαφορές.

Αν για κάθε αριθμητικό μοντέλο συστήματος ομοαξονικών σωλήνων, συγκρίνουμε το P_{μ} του συστήματος με το άθροισμα των P_{μ} των σωλήνων που το αποτελούν, θα δούμε ότι το πρώτο είναι μεγαλύτερο του δεύτερου, απόρροια της αλληλεπίδρασης που έχουν τα δοκίμια του συστήματος, τουλάχιστον σε ιδανικές συνθήκες (τέλεια γεωμετρία, συμμετρία, ομοαξονικότητα). Ο πίνακας 5.13 παρουσιάζει τα P_{μ} συστήματος και αθροίσματος, την ποσοστιαία διαφορά τους και το διάκενο (r). Στην εικόνα 5.19, παρατίθεται chart για να γίνει η συσχέτιση μεταξύ διακένου (r) και της ποσοστιαίας διαφοράς των P_{μ} . Είναι σαφής η μείωση της διαφοράς με την αύξηση του διακένου, δηλαδή όσο αυξάνεται το r τόσο μειώνονται οι αλληλεπιδράσεις των δοκιμίων του συστήματος. Δεν υπάρχει λόγος να ασχοληθούμε σε αυτή τη συσχέτιση με τα συστήματα που λύγισαν (αυτά που λύγισαν έχουν μεγαλύτερο P_{μ} αθροίσματος, γιατί αποτελούνται και από μονά αριθμητικά μοντέλα που δεν λύγισαν μόνο τους και έτσι έχουν μεγάλο P_{μ}).

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.13

	(25x2 & 20x1.5)_Y1n	(25x3 & 18x1.5)_Y1n	(40x1.5 & 25x2)_Y2n	
P_{μ} συστήματος	26.8	40.1	58.6	kN
P_{μ} αθροίσματος	35.9	47.5	58	kN
Ποσοστιαία διαφορά	-	-	1	%
r	0.5	0.5	6	mm

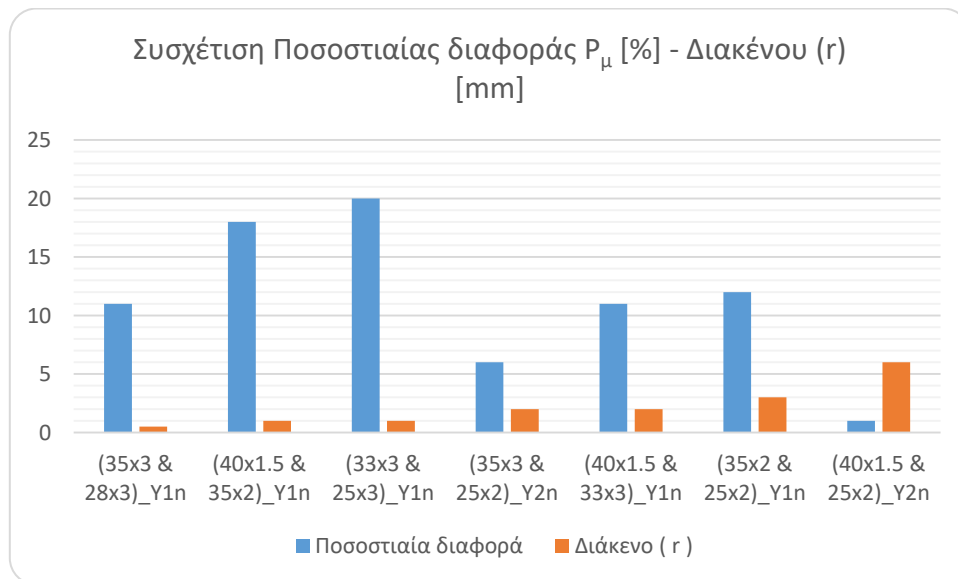
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.13 (συνέχεια)

	(35x2 & 25x2)_Y1n	(40x1.5 & 35x2)_Y1n	(35x3 & 25x2)_Y2n	
P_{μ} συστήματος	67.7	66.2	103.6	kN
P_{μ} αθροίσματος	60.3	56.3	97.9	kN
Ποσοστιαία διαφορά	12	18	6	%
r	3	1	2	mm

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.13 (συνέχεια)

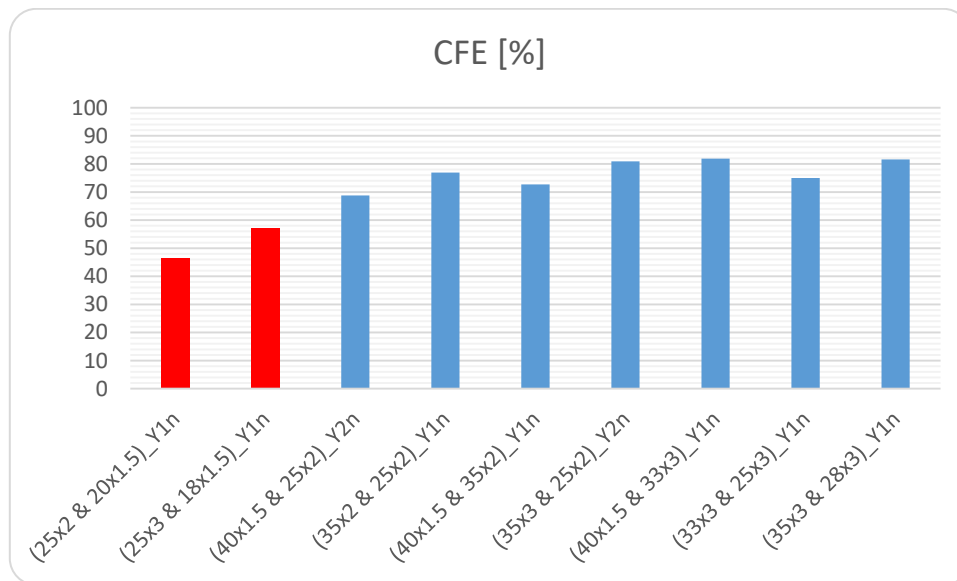
	(40x1.5 & 33x3)_Y1n	(33x3 & 25x3)_Y1n	(35x3 & 28x3)_Y1n	
P_{μ} συστήματος	92.6	121.5	126.6	kN
P_{μ} αθροίσματος	83.6	100.9	113.8	kN
Ποσοστιαία διαφορά	11	20	11	%
r	2	1	0.5	mm

Πίνακας 5.13. Μέσο φορτίο (P_{μ}) του κάθε συστήματος και άθροισμα των P_{μ} των μονών δοκιμίων που το αποτελούν (αριθμητική προσομοίωση).



Εικόνα 5.58. Συσχέτιση διακένου (r) – ποσοστιαίας διαφοράς P_{μ} .

Διάγραμμα CFE



Εικόνα 5.59. Σύγκριση δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (CFE) των αριθμητικών μοντέλων όλων των συστημάτων ομοαξονικών δοκιμών. Η σειρά παρουσίασης είναι με αύξον εμβαδόν ενεργούς διατομής.

Η γενική παρατήρηση ότι τα πιο στιβαρά δοκίμια έχουν πιο σταθερά διαγράμματα φορτίου μετατόπισης επιβεβαιώνεται και στις αριθμητικές προσομοιώσεις των συστημάτων ομοαξονικών σωλήνων.

Τα (40x1.5 & 25x2)_Y1n και (40x1.5 & 35x2)_Y1n, όπου και τα δυο περιλαμβάνουν δοκίμιο διαστάσεων (40x1.5) στο συνδυασμό τους, παρουσιάζουν μειωμένη ομοιομορφία φορτίου σε σύγκριση με τα υπόλοιπα. Παρόλα αυτά, τον καλύτερο δείκτη CFE είχε το (40x1.5 & 33x3)_Y1n λόγω του ότι η P_{max} του δεν αυξήθηκε τόσο πολύ προς το τέλος της θλίψης στην προσομοίωση, κάτι που κράτησε χαμηλό τον παρονομαστή του δείκτη και του αύξησε την τιμή. Και το (33x3 & 25x3)_Y1n και το (35x3 & 28x3)_Y1n είχαν συμπίεση συμπαγούς υλικού στα τελευταία στάδια της μετατόπισης μειώνοντας τον δείκτη CFE (παρέμεινε υψηλός) περισσότερο στο πρώτο και λιγότερο στο δεύτερο.

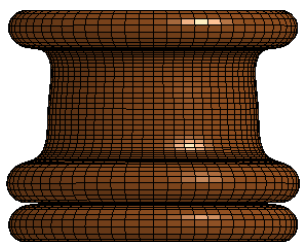
5.5. Επιλεγμένα αριθμητικά μοντέλα μεγαλύτερης ακρίβειας

Όπως έχουμε αναφέρει κατ' επανάληψη, ο τρόπος κατάρρευσης και συγκεκριμένα ο αριθμός των λοβών θα ήταν πιο καλά προβλέψιμος από τα αριθμητικά μοντέλα αν είχαμε χρησιμοποιήσει πιο πυκνό πλέγμα, δηλαδή περισσότερα πεπερασμένα στοιχεία καθ'

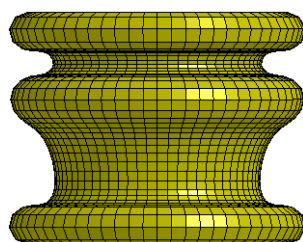
ύψος (γιατί στις άλλες διαστάσεις ο αριθμός των στοιχείων ήταν ικανοποιητικός). Σε αυτή την ενότητα λοιπόν θα παρουσιαστούν συγκεκριμένων διαστάσεων αριθμητικά μοντέλα μεγαλύτερης ακρίβειας και θα συγκριθούν οπτικά τόσο με τα πειραματικά όσο και με τα άλλα αριθμητικά μοντέλα πιο αραιού πλέγματος. Να σημειωθεί ότι όσα αριθμητικά μοντέλα παρουσιάστηκαν μέχρι στιγμής, είχαν 50 πεπερασμένα στοιχεία καθ' ύψος (ύψος του κάθε element 2mm). Τα καινούργια αριθμητικά αποτελέσματα (P_{max} , P_{μ} , W , CFE) των μεγαλύτερης ακρίβειας αριθμητικών μοντέλων, δεν διέφεραν από τα παλιά και για αυτό δεν θα παρουσιαστούν.

(35x3) Y1n (100 πεπερασμένα στοιχεία καθ' ύψος)

Η βελτίωση της πρόβλεψης του αριθμού λοβών είναι σαφής, με το καινούργιο μοντέλο των 100 πεπερασμένων στοιχείων να ολοκληρώνει τους τρεις λοβούς. Αν είχαμε χρησιμοποιήσει ακόμα πιο πολλά στοιχεία καθ' ύψος θα είχαμε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα, αλλά θα αυξάναμε κατά πολύ το υπολογιστικό κόστος.



(35x3)_Y1n (100 elements)



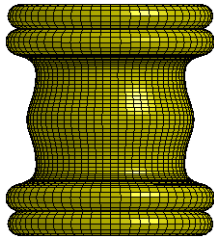
(35x3)_Y1n (50 elements)



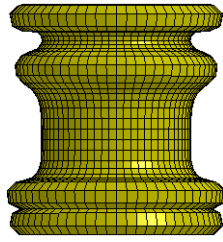
(35x3)_Y1

(25x2) Y1n (120 πεπερασμένα στοιχεία καθ' ύψος)

Το καινούργιο αριθμητικό μοντέλο των 120 πεπερασμένων στοιχείων προσομοίωσε πολύ καλύτερα το πειραματικό. Αν βάζαμε ακόμα πιο πυκνό πλέγμα θα είχαμε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα, δηλαδή και τους πέντε λοβούς πλήρως σχηματισμένους, όπως θα δούμε παρακάτω. Η κλίση των λοβών του πειραματικού (25x2)_Y1 οφείλεται σε ανισοκατανομή του πάχους τοιχώματος.



(25x2)_Y1n (120 elements)



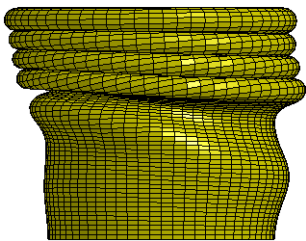
(25x2)_Y1n (50 elements)



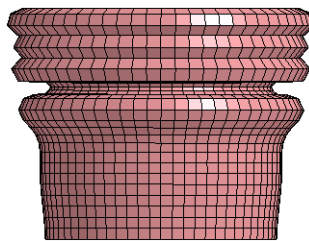
(25x2)_Y1

(40x1.5) Y1n έκκεντρο (120 πεπερασμένα στοιχεία καθ' ύψος)

Στις μετρήσεις που κάναμε πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας στα διάφορα δοκίμια παρατηρήσαμε ότι δεν είχαν ούτε την ονομαστική διάμετρο, ούτε το ονομαστικό πάχος και ότι υπήρχε ανισοκατανομή του πάχους περιφερειακά. Ένα παράδειγμα είναι ο σωλήνας (40x1.5) που είχε διάμετρο 39.8mm και πάχος στο πιο λεπτό μέρος του τοιχώματος 1.28mm και από την απέναντι μεριά (που θεωρητικά είναι και η πιο παχιά αφού μιλάμε για σχήμα κύκλου) 1.62mm (για να μπορούσαμε να πούμε ότι τουλάχιστον η ενεργός διατομή είναι ίδια έπρεπε το πάχος στο πιο παχύ σημείο να είναι 1.72mm αντί 1.62mm). Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης του (40x1.5)_Y1 που είχε πάχος 1.3mm από τη λεπτή μεριά και 1.7mm από την πιο παχιά (για να έχουμε ίδιο εμβαδό ενεργούς διατομή με το προηγούμενο μοντέλο). Παρατηρούμε την κλίση που έχουν πάρει οι λοβοί λόγω της μεγαλύτερης αντίστασης από την μεριά μεγαλύτερου πάχους.



(40x1.5)_Y1n (120 elements)



(40x1.5)_Y1n (50 elements)

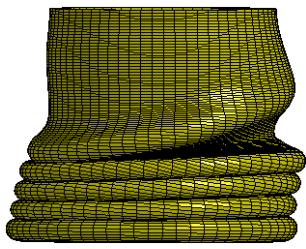


(40x1.5)_Y1

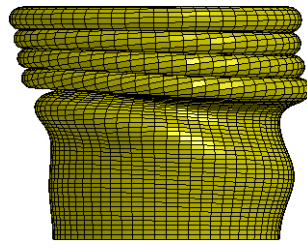
(40x1.5) Y1n έκκεντρο (200 πεπερασμένα στοιχεία καθ' ύψος)

Το αποτέλεσμα βελτιώθηκε αλλά για ακριβέστερα αποτελέσματα δημιουργήθηκε ίδιο μοντέλο με 200 πεπερασμένα στοιχεία αυτή τη φορά. Η διαφορά είναι αξιοσημείωτη, καθώς βλέπουμε τον 5° λοβό να έχει πατηθεί καλύτερα από το μοντέλο των 120 πεπερασμένων στοιχείων. Το συγκεκριμένο αριθμητικό μοντέλο χρειάστηκε κάτι

λιγότερο από 28 ώρες για να «τρέξει». Παρατηρούμε και την ομοιότητα που έχουν οι καμπύλες μεταξύ τους στο παρακάτω διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης, ιδιαίτερα στα τοπικά peaks.



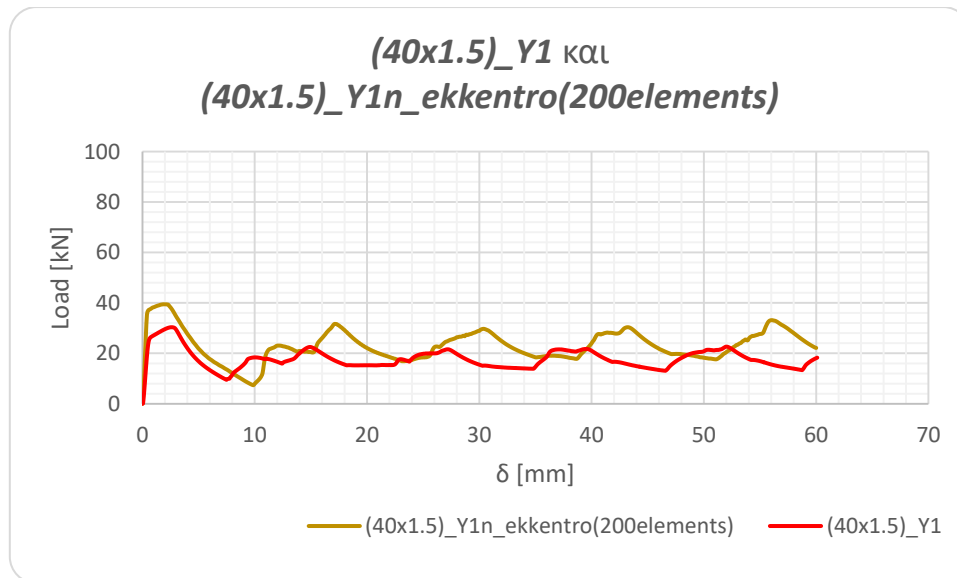
(40x1.5)_Y1n (200 elements)



(40x1.5)_Y1n (120 elements)



(40x1.5)_Y1



5.6. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των τεσσάρων συστημάτων ομοαξονικών σωλήνων που υποβάλαμε σε θλίψη, έδειξαν πως η ενέργεια που απορροφούν είναι μειωμένη σε σχέση με το άθροισμα των ενεργειών που απορροφούν οι δυο σωλήνες ξεχωριστά (δηλαδή σε σχέση με την ενέργεια που θα απορροφούσαν και οι δυο σωλήνες μαζί αν τους τοποθετούσαμε κατά την πειραματική διαδικασία τον ένα δίπλα στον άλλο), με εξαίρεση το (40x1.5 & 35x2)_Y1 που οι σωλήνες του είχαν τη μικρότερη ακτινική απόσταση r με αποτέλεσμα η αλληλεπίδραση τους να είναι έντονη. Το κακό κεντράρισμα μπορεί να παίζει ρόλο στην ανάπτυξη μη συμμετρικών δυνάμεων που κάνει τα συστήματα να αλληλεπιδρούν άτσαλα και να μειώνεται η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

Τα αριθμητικά μοντέλα των συστημάτων ομοαξονικών σωλήνων, κατά κύριο λόγο, δεν προέβλεψαν σωστά τον τρόπο κατάρρευσης, καθώς στα πειράματα στις τρεις από τις τέσσερις περιπτώσεις είχαμε μικτό τρόπο κατάρρευσης και τα η αριθμητική προσομοίωση έδειξε σε όλα τα μοντέλα αξονοσυμμετρικό. Οι τέλειες συμμετρίες των αριθμητικών μοντέλων και η έλλειψη ακρίβειας στα πειράματα έφερε αυτό το αποτέλεσμα. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης είχαν κάποια απόκλιση σε σύγκριση με τα πειραματικά, αλλά μεγάλο ρόλο έπαιξε η χρησιμοποίηση των ονομαστικών διαστάσεων των δοκιμίων στα αριθμητικά μοντέλα, κάτι που δεν χαρακτήριζε τα πειραματικά δοκίμια. Σε γενικές γραμμές όμως μπορούμε να πούμε ότι ήταν αξιόπιστα.

Γενικά, το μεγάλο εμβαδό ενεργούς διατομής, η χρησιμοποίηση δοκιμίων με μικρό λόγο D/t και το μικρό διάκενο μεταξύ των δοκιμίων ενός συστήματος ομοαξονικών σωλήνων, έχουν θετική επίδραση στο μέγιστο φορτίο (P_{max}), στο μέσο φορτίο (P_{μ}), στην ενέργεια απορρόφησης (W) και στο δείκτη ομοιομορφίας (CFE).

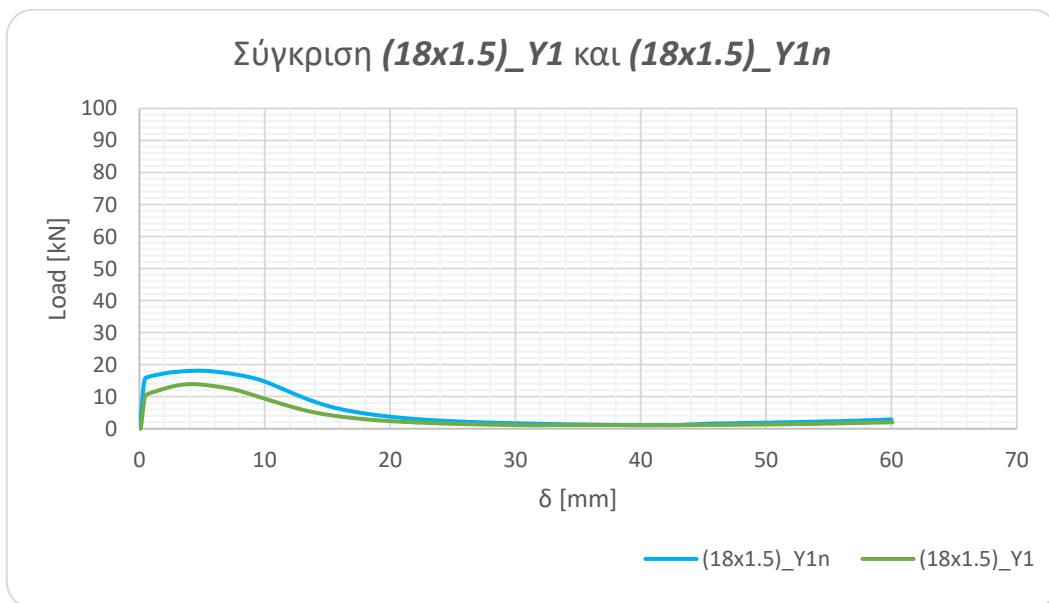
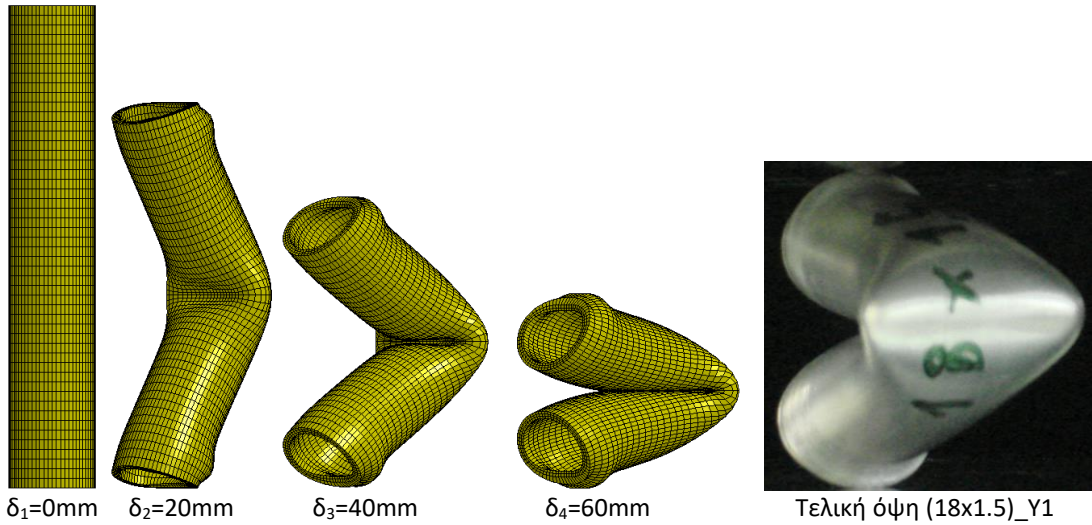
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <https://en.wikipedia.org>
- [2] X. N. Παναγόπουλος, Βιομηχανικά Κράματα, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [3] Kwon YW and Bang HC, The finite element method using matlab. 2nd ed, New York: CRC Press, 2000.
- [4] <http://www.lstc.com/>
- [5] <http://web.iitd.ac.in/>
- [6] Βουρεξιάκης Λ, Μελέτη της συμπεριφοράς μη κανονικών λεπτότοιχων πυραμίδων σε αξονική καταπόνηση, Αθήνα: Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, 2015.
- [7] Lu G and Yu T, Energy Absorption of Structures and Materials, Cambridge: Woodhead Publishing, 2003.
- [8] Δ. Ε. Μανωλάκος, Σημειώσεις του μαθήματος: Κατεργασίες Ι, Αθήνα: Τυπογραφείο ΕΜΠ, 2010.
- [9] <http://www.fgg.uni-lj.si/>
- [10] Andrews KRF, England GL and Ghani E, "Classification of the axial collapse of circular tubes under quasi-static loading," *Int J Mech Sci*, vol. 25, pp. 687-696, 1983.
- [11] Alexander JM, "An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading," *Quart J Mech Appl Math*, vol. 13, pp. 10-15, 1960.
- [12] Mamalis AG, Manolakos DE and Viegelman GL, "The axial crushing of thin PVC tubes and frusta of square cross-section," *Int J Impact Engng*, vol. 8(3), pp. 241-264, 1989.
- [13] Meng Q, Al-Hassani STS and Soden PD, "Axial crushing of square tubes," *Int J Mech Sci*, Vols. 25(9-10), pp. 747-773, 1983.
- [14] Olabi AG, Morris Edmund and Hashmi MSJ, "Metallic tube type energy absorbers: A Synopsis, Thin-Walled Structures," vol. 45, pp. 706-726, 2007.
- [15] Alper Tasdemirci, "The effect of tube end constraining on the axial crushing behavior of an aluminum tube," *Materials and Design*, vol. 29, 2008.
- [16] A.A.A. Alghamdi, "Collapsible impact energy absorbers: An overview, Thin-Walled Structures," vol. 39, pp. 189-213, 2000.
- [17] Johnson W and Mamalis AG, Crashworthiness of vehicles, Mechanical Engineering Applications, 1978.
- [18] Johnson W and Reid S.R, "Metallic energy dissipating systems," *Appl Mech Rev*, vol. 31(3), pp. 277-288, 1978.

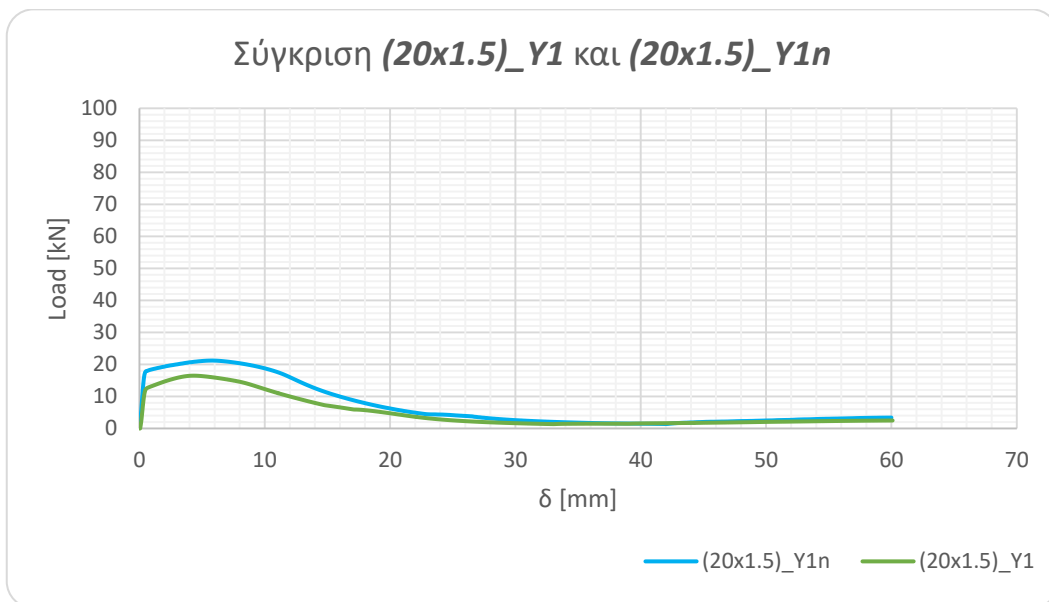
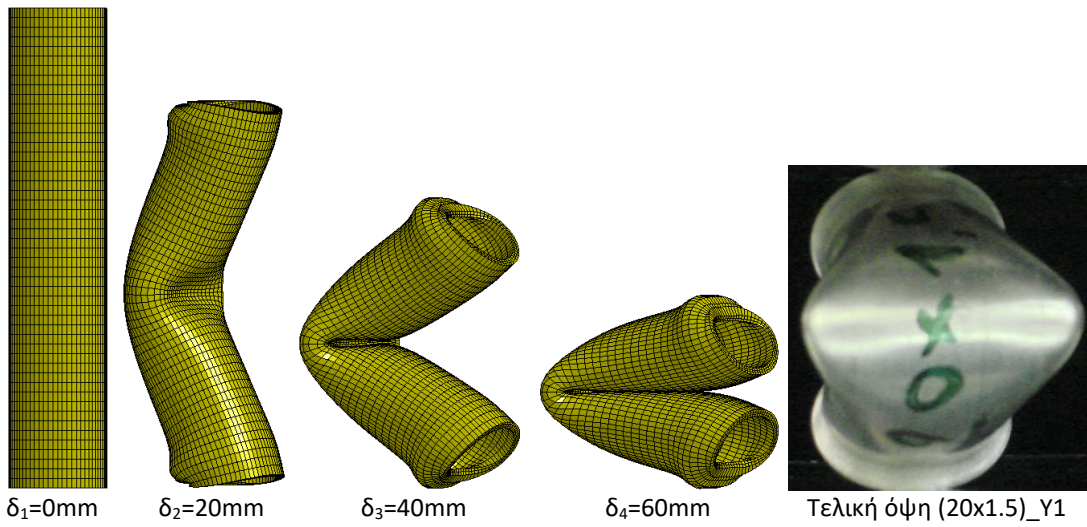
- [19] Batterman S.C, "Plastic collapse of axially compressed cylindrical shells," *AIAA J*, vol. 3, p. 316, 1965.
- [20] Morton J, *Structural impact and crashworthiness*, 1984.
- [21] Gupta N. K. and Velmurugan R, "An analysis of axi-symmetrical axial collapse of round tubes, *Thin-Walled Structures*," vol. 22, pp. 261-274, 1995.
- [22] Bardi FC, Yun HD and Kyrikides S, "On the axisymmetric progressive crushing of circular tubes under axial compression," *Int J Solids Struct*, vol. 40, pp. 3137-3155, 2003.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

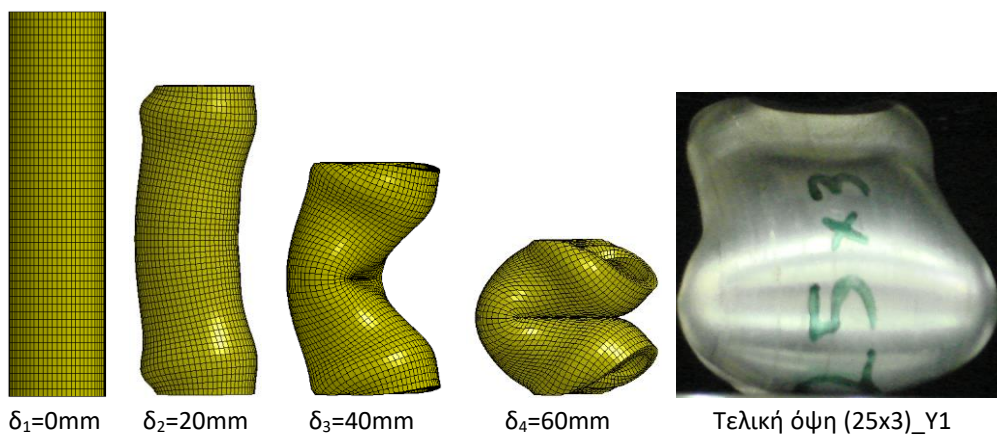
(18.5x1.5) Y1n

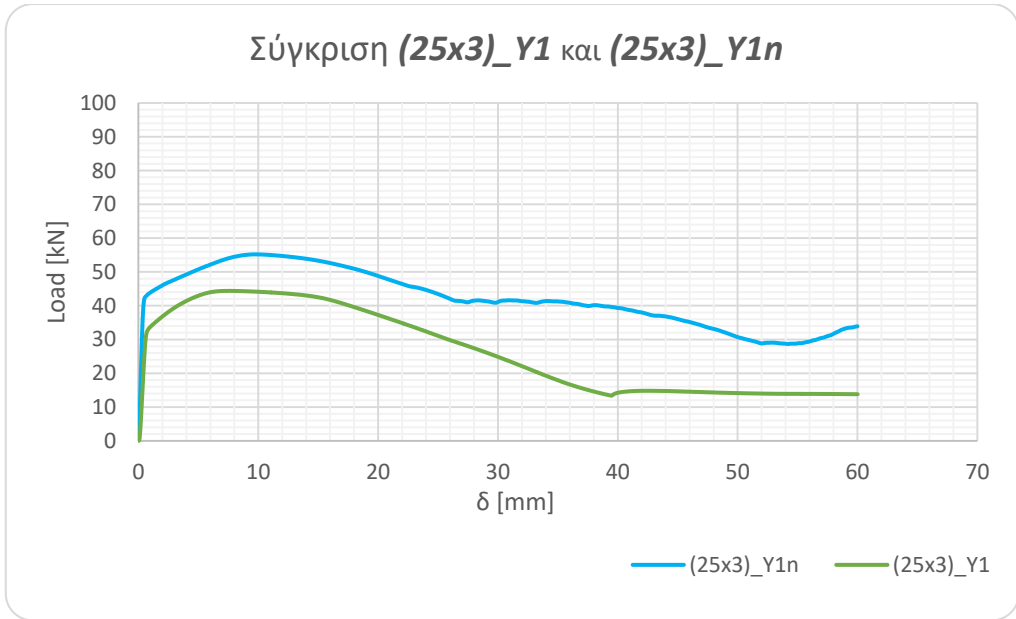


(20x1.5) Y1n

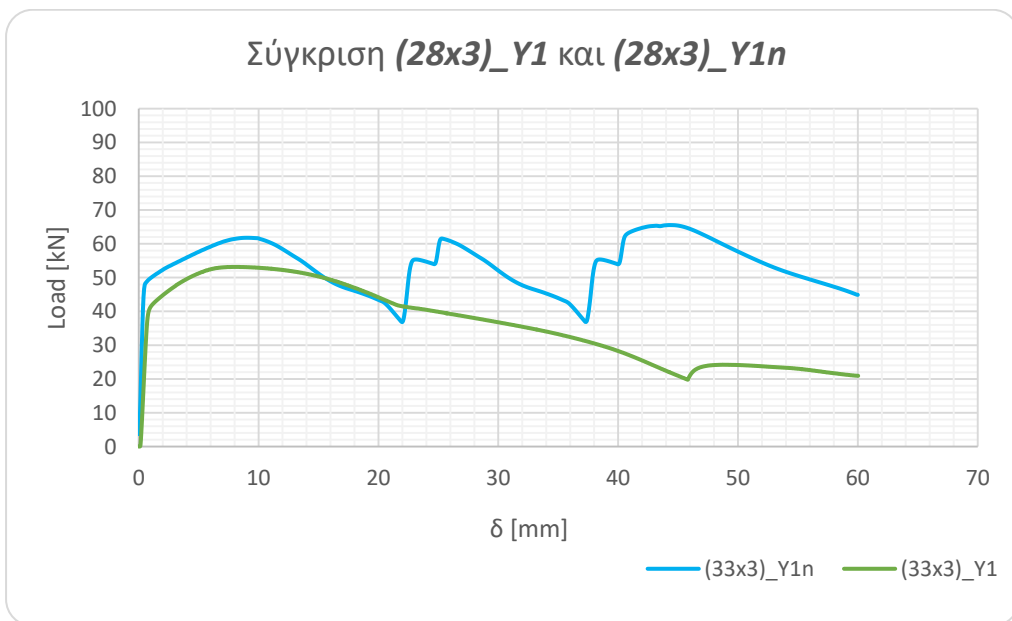
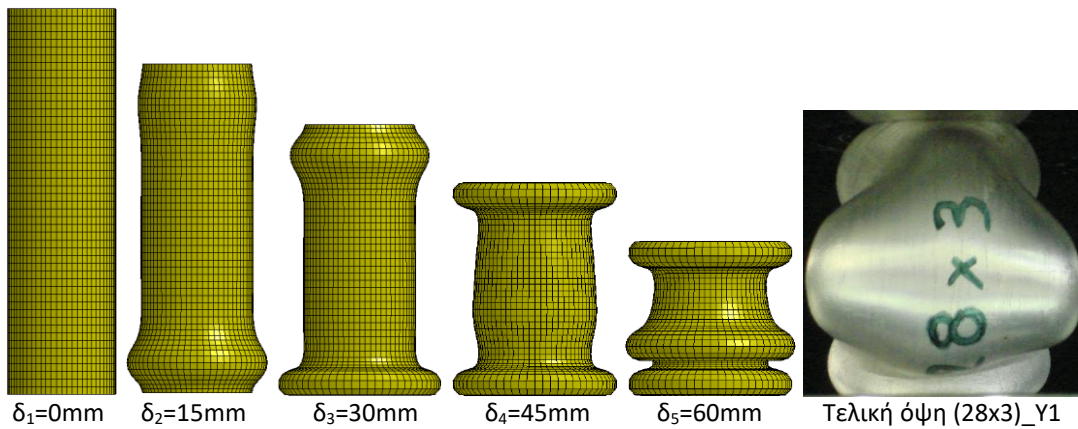


(25x3) Y1n

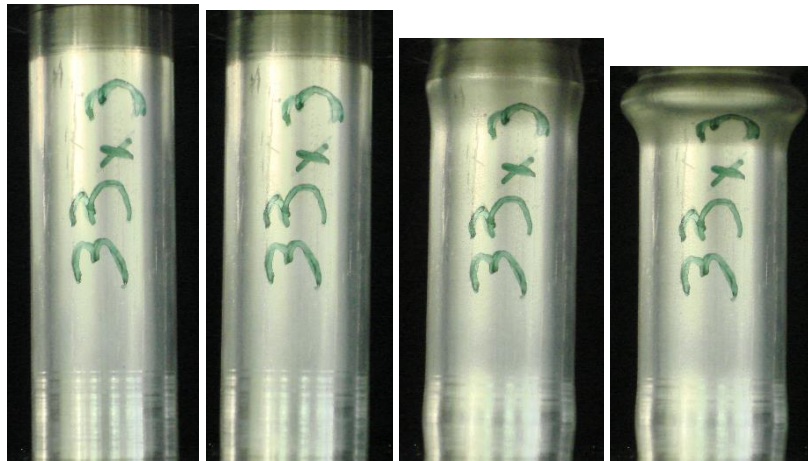




(28x3) Y1 και (28x3) Y1n



(33x3) Y1 και(33x3) Y1n

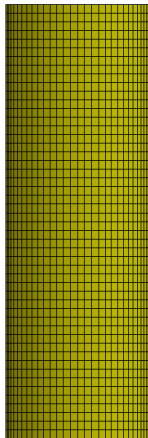


$\delta_1=0.0\text{mm}$

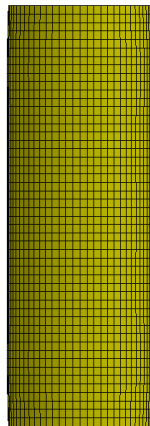
$\delta_2=3.1\text{mm}$

$\delta_3=8.6\text{mm}$

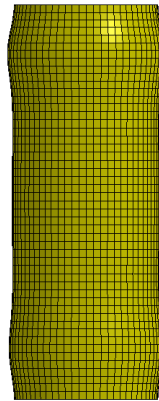
$\delta_4=14.5\text{mm}$



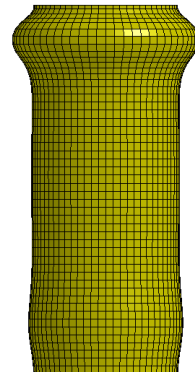
$\delta_1=0\text{mm}$



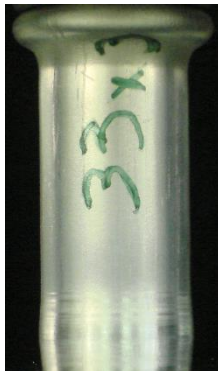
$\delta_2=3\text{mm}$



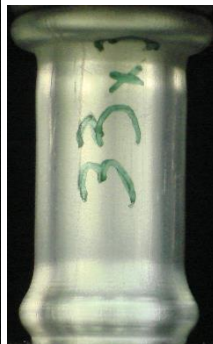
$\delta_3=9\text{mm}$



$\delta_4=15\text{mm}$



$\delta_5=20\text{mm}$



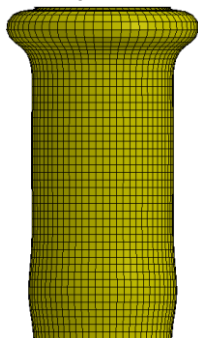
$\delta_6=26.8\text{mm}$



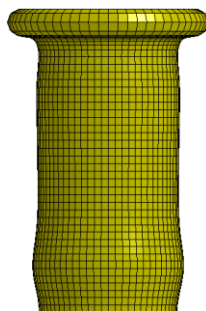
$\delta_7=36.6\text{mm}$



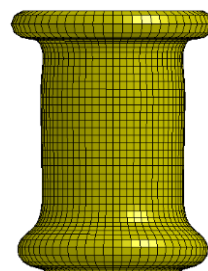
$\delta_8=46.2\text{mm}$



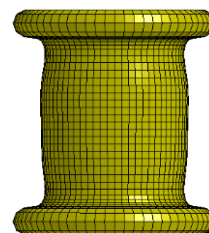
$\delta_5=20\text{mm}$



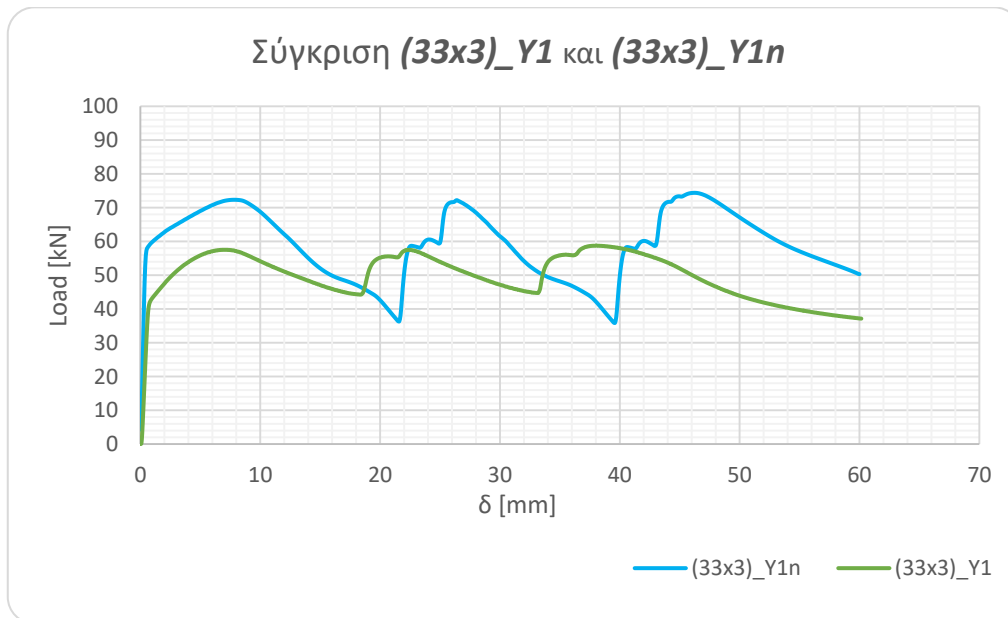
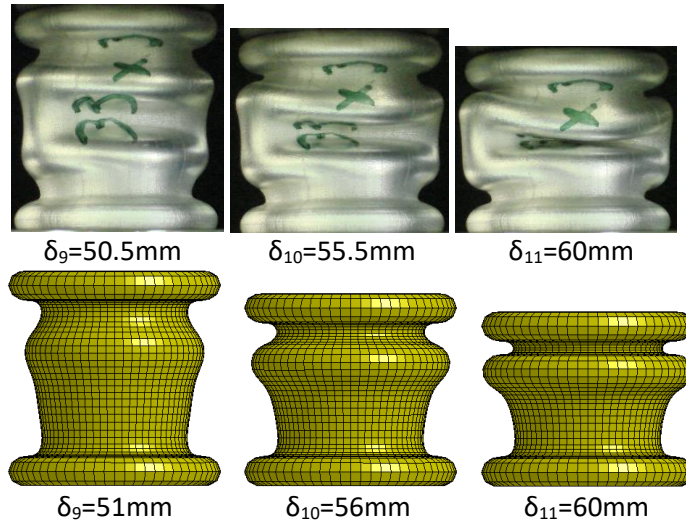
$\delta_6=27\text{mm}$



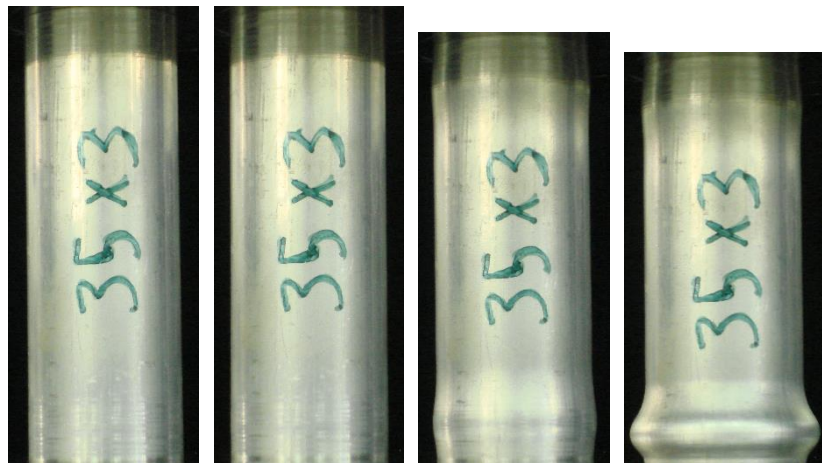
$\delta_7=37\text{mm}$



$\delta_8=46\text{mm}$



(35x3) Y1 και (35x3) Y1n

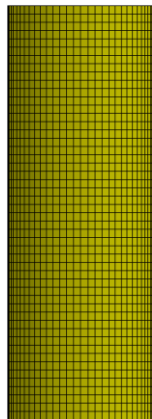


$\delta_1=0.0\text{mm}$

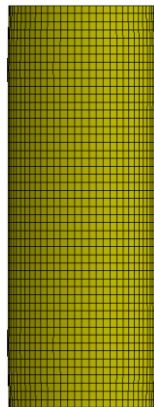
$\delta_2=2.5\text{mm}$

$\delta_3=6.8\text{mm}$

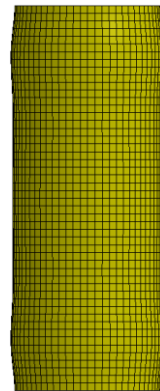
$\delta_4=10.4\text{mm}$



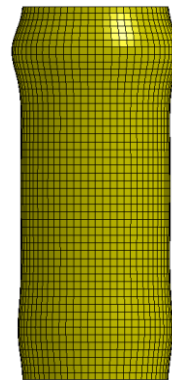
$\delta_1=0\text{mm}$



$\delta_2=3\text{mm}$



$\delta_3=7\text{mm}$



$\delta_4=10\text{mm}$



$\delta_5=20.7\text{mm}$



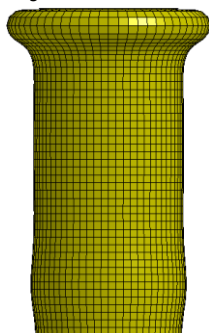
$\delta_6=28.2\text{mm}$



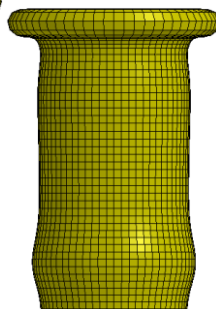
$\delta_7=34.4\text{mm}$



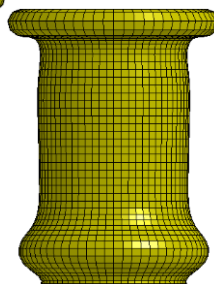
$\delta_8=40.2\text{mm}$



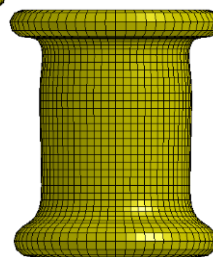
$\delta_5=21\text{mm}$



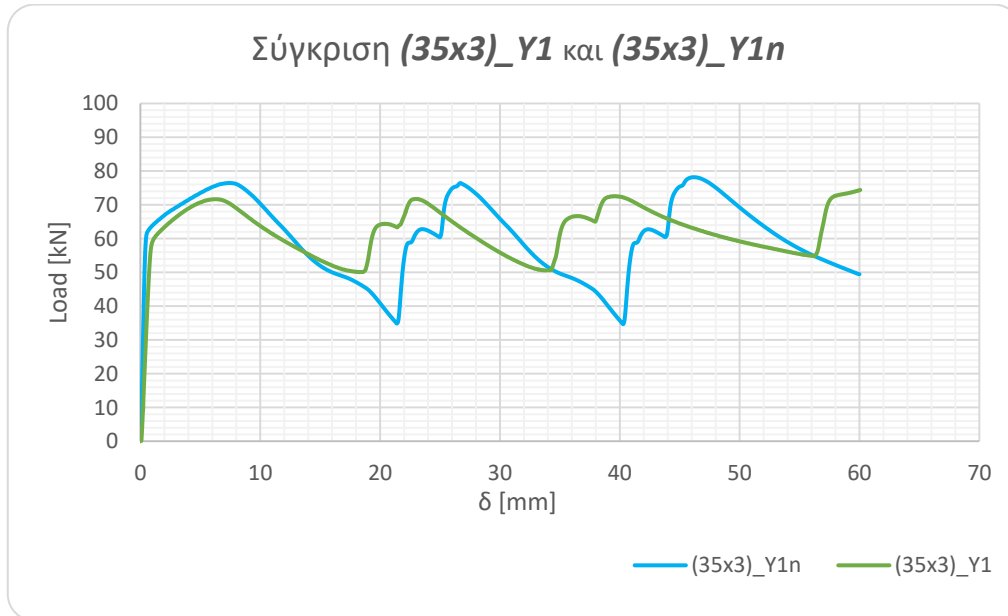
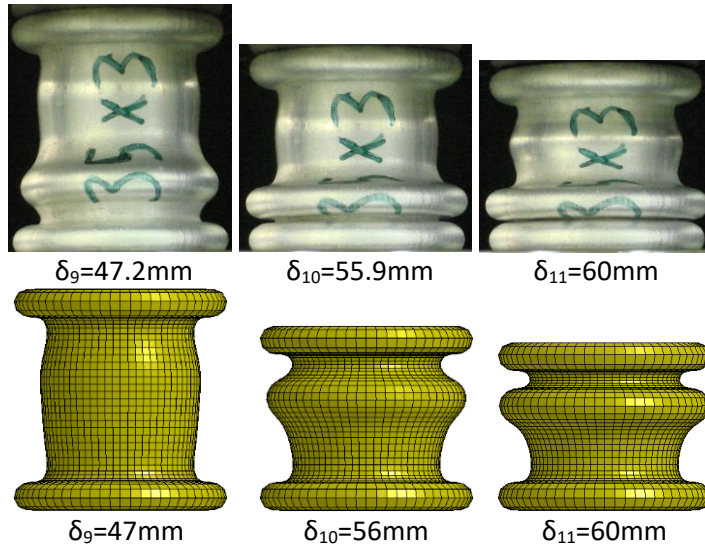
$\delta_6=28\text{mm}$



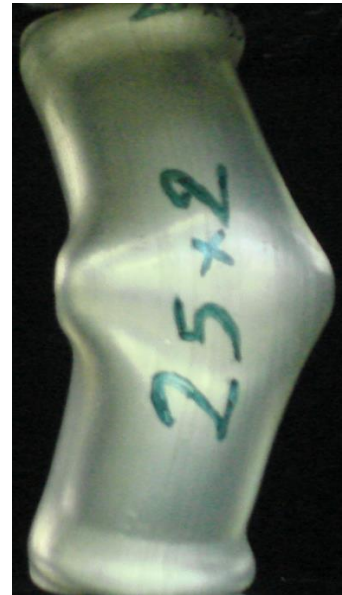
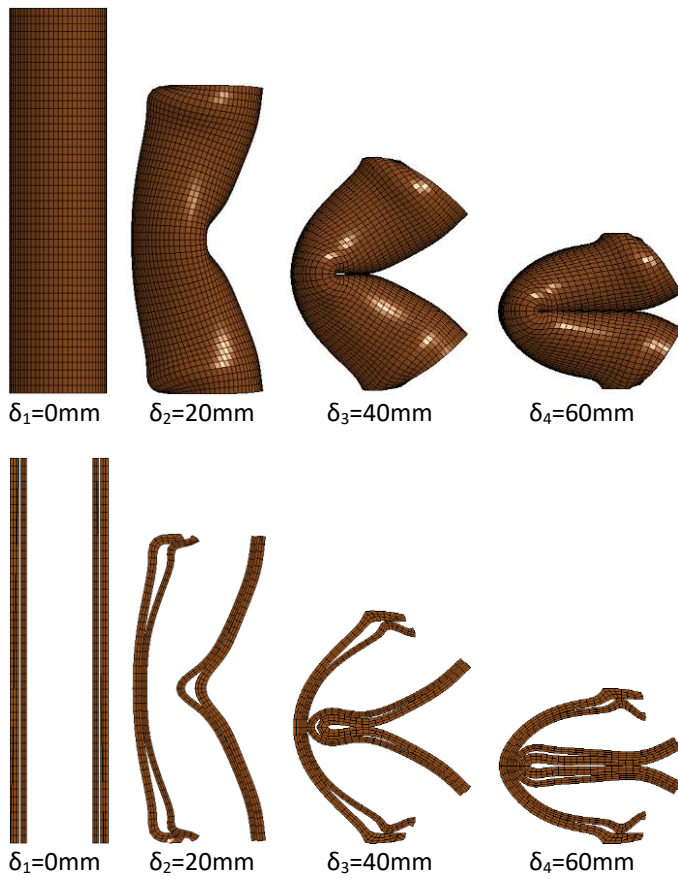
$\delta_7=34\text{mm}$



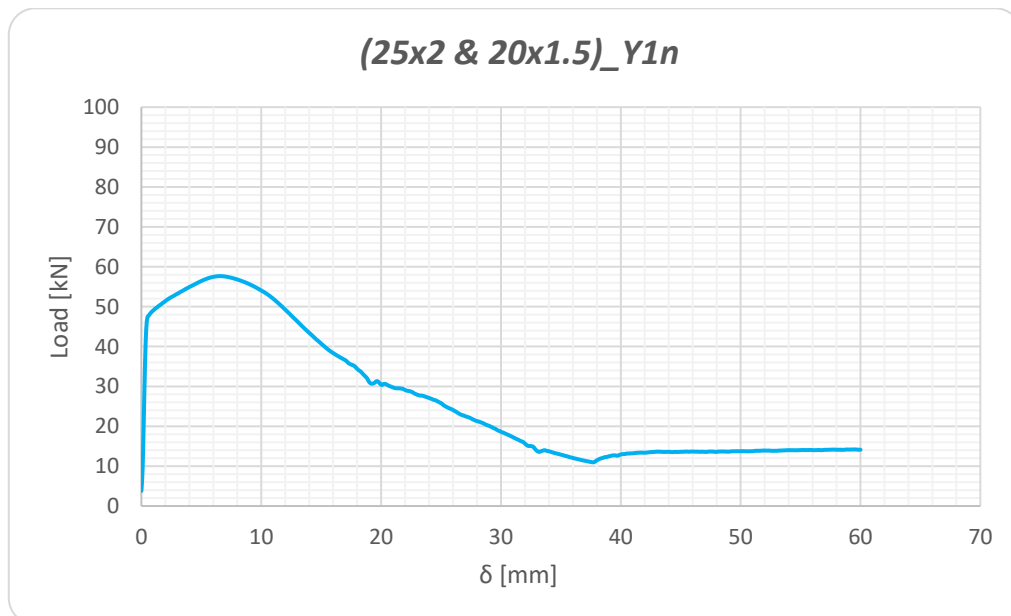
$\delta_8=40\text{mm}$



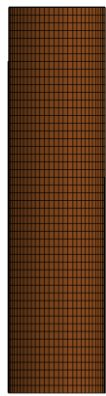
(25x2 & 20x1.5) Y1n



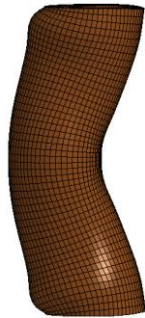
Τελική όψη του (25x2 & 20x1.5)_Y1 (η μετατόπιση δεν είναι 60mm, αλλά λιγότερα γιατί δεν μας εξυπηρετούσε στην εργασία. Η κοινή κατεύθυνση του λυγισμού είναι ορατή).



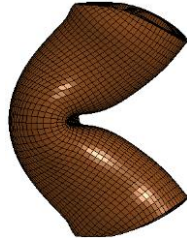
(25x3 & 18x1.5) Y1n



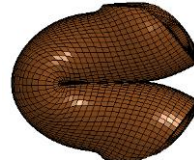
$\delta_1=0\text{mm}$



$\delta_2=20\text{mm}$



$\delta_3=40\text{mm}$



$\delta_4=60\text{mm}$



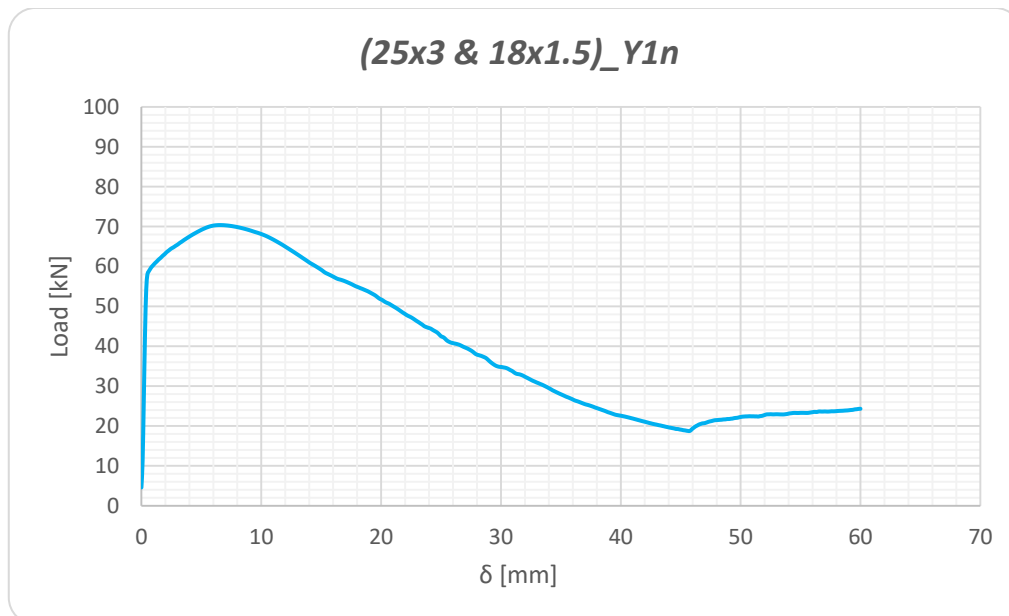
Τελική όψη του
(25x3 &
18x1.5)_Y1

$\delta_1=0\text{mm}$

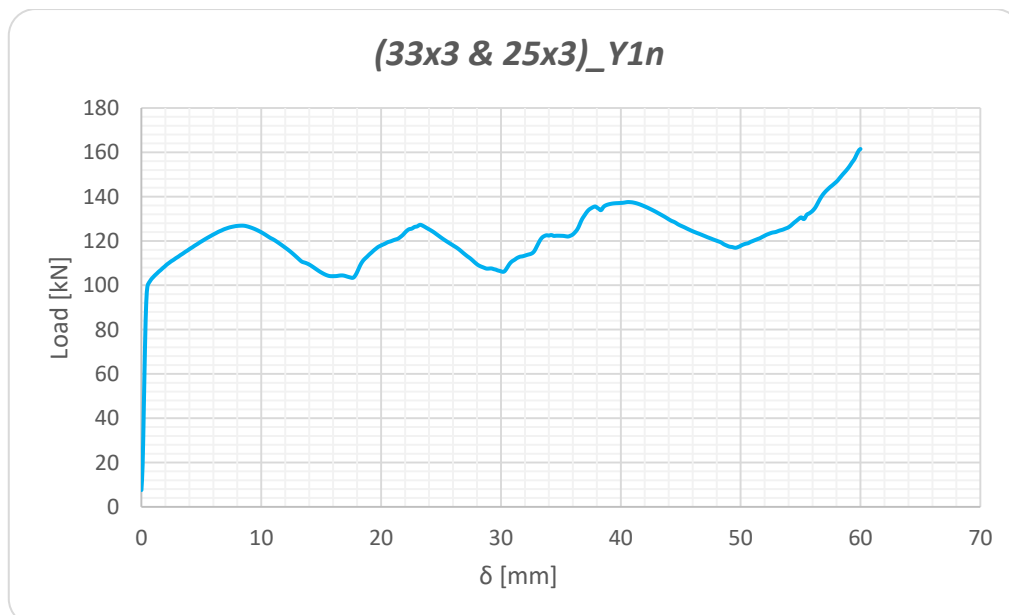
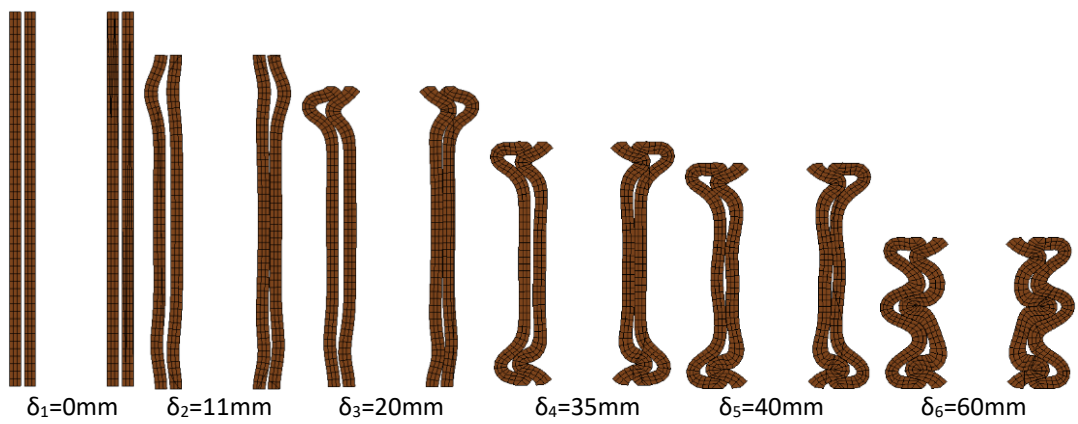
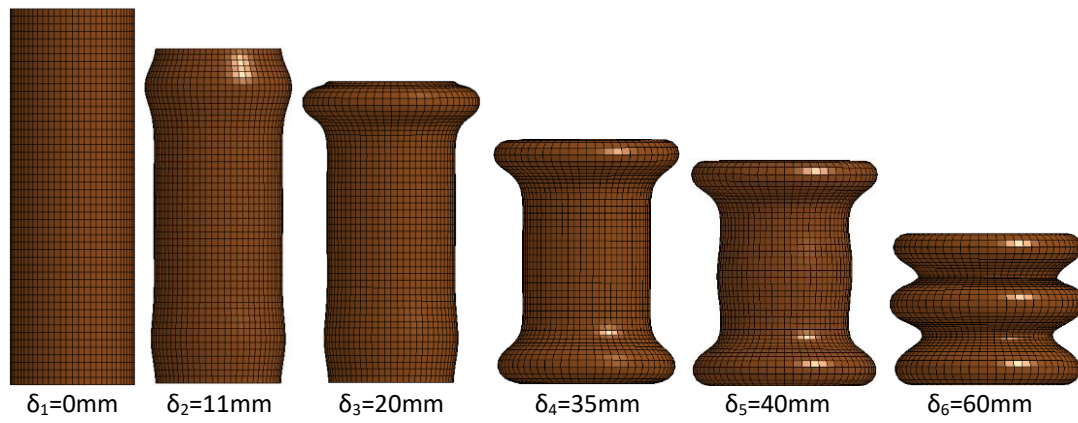
$\delta_2=20\text{mm}$

$\delta_3=40\text{mm}$

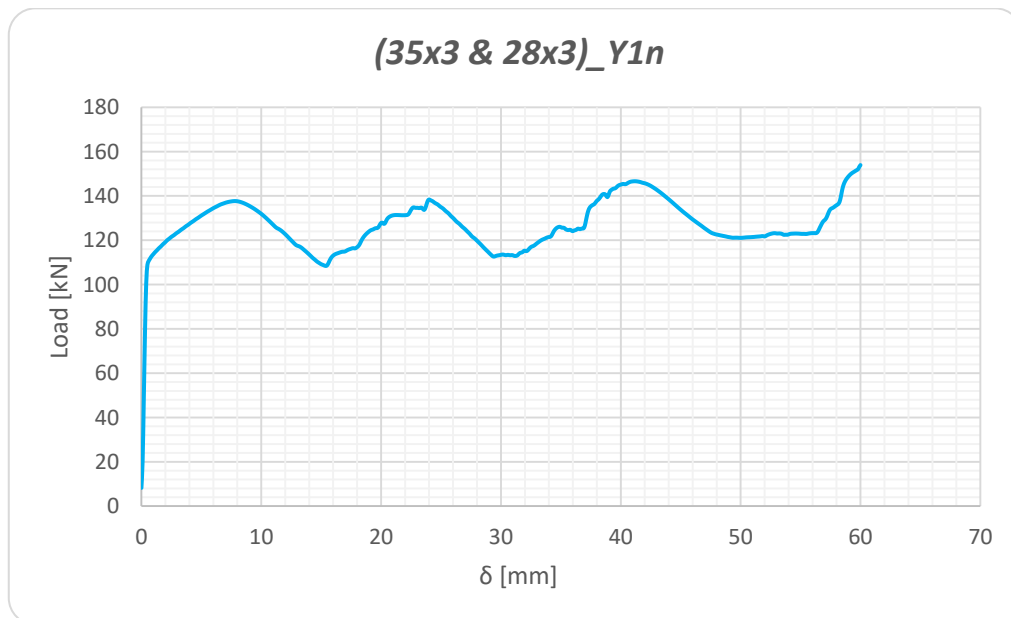
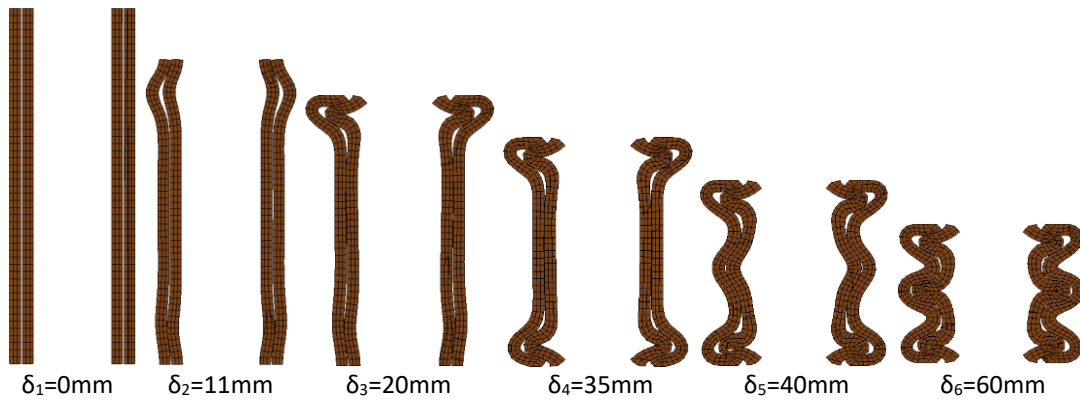
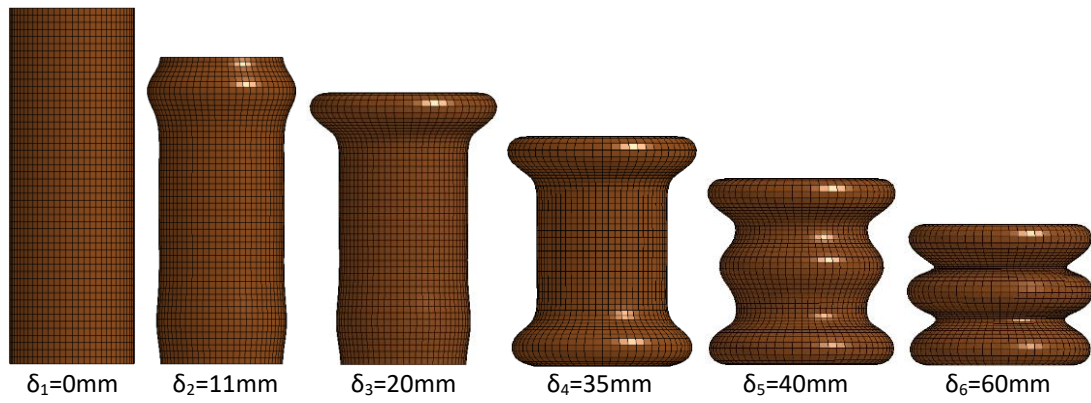
$\delta_4=60\text{mm}$



(33x3 & 25x3) Y1n



(35x3 & 28x3) Y1n



(40x1.5 & 33x3) Y1n

