



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΤΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΚΕΛΥΦΩΝ
ΛΕΠΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΜΕ ΕΙΔΙΚΗ
ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΚΡΟΥ ΣΕ
ΑΞΟΝΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ**

ΗΛΙΑΣ ΚΑΝΤΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Μάρτιος 2015

Στη μνήμη της μητέρας μου

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία, εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στα πλαίσια των προπτυχιακών σπουδών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η πειραματική μελέτη και η αριθμητική προσομοίωση της κατάρρευσης κελυφών λεπτού πάχους, που έχουν υποστεί ειδική διαμόρφωση άκρου, υπό αξονική συμπίεση. Στόχος είναι να μελετηθεί η επίδραση της ειδικής γεωμετρίας (triggering) στον τρόπο κατάρρευσης δοκιμίων αλουμινίου που ακολουθούν τη συγκεκριμένη διαμόρφωση. Στα πλαίσια της εργασίας μελετάται η επίδραση της διαμόρφωσης άκρου σε δοκίμια με διαφορετικές διατομές και γωνίες, στο φορτίο, στον τρόπο παραμόρφωσης και την ενεργειακή απορρόφηση.

Σκοπός της επιλογής του συγκεκριμένου μηχανισμού triggering, είναι η μελέτη της συμπεριφοράς δοκιμίων με διαμόρφωση άκρου, με τη διαφορά ότι δεν έχουμε επίπεδη πλάκα συμπίεσης, αλλά ειδικά διαμορφωμένη μήτρα που παρακολουθεί τη γεωμετρία των δοκιμίων. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η συγκεκριμένη διαμόρφωση, είναι το γεγονός ότι τα κελύφη, ως επί το πλείστον, αποτελούν μέρη μιας κατασκευής και πολλές φορές πρέπει να έχουν συγκεκριμένες διαμορφώσεις (πέραν της ιδανικής των επιπέδων άκρων) ώστε να μπορούν να ενταχθούν σε αυτήν. Επίσης, αποκτά αρκετό ενδιαφέρον η σύγκριση του τρόπου κατάρρευσης για δεδομένη γεωμετρία trigger αλλά σε διαφορετικές γωνίες, κάτι για το οποίο δεν υπάρχουν εκτενείς αναφορές στη βιβλιογραφία.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, όλους όσοι βοήθησαν στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ξεκινώντας από τον επιβλέποντα Καθηγητή κύριο Δημήτριο Μανωλάκο, τον οποίο κι ευχαριστώ ιδιαίτερα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος καθώς επίσης και για την καθοδήγηση του καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Πρωτεσίλαο Κωστάζο, Διδάκτορα μηχανολόγο μηχανικό και μέλος Ε.ΔΙ.Π., η συμβολή του οποίου υπήρξε καθοριστική τόσο στην κατασκευή των δοκιμίων και τη διεξαγωγή των πειραμάτων, όσο και στην υπολογιστική προσομοίωση και χωρίς τη συνεισφορά του οποίου δε θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του εργαστηρίου του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών και συγκεκριμένα τον κύριο Κωνσταντίνο Κερασιώτη, μέλος Ε.Τ.Ε.Π. , για τη συμβολή του στη διεξαγωγή των πειραμάτων και τον κύριο Νικόλαο Μελισσά, μέλος Ι.Δ.Α.Χ., για τη συμβολή του στη διαμόρφωση των δοκιμίων αλλά και σε επιμέρους κατεργασίες, όπου χρειάστηκαν.

Περίληψη

Μια από τις βασικότερες παραμέτρους που λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό των μηχανολογικών κατασκευών, είναι η ασφάλεια των χρηστών της υπό σχεδιασμού διάταξης. Ειδικότερα, σε ότι αφορά την ασφάλεια έναντι συγκρούσεων, ο κλάδος του crashworthiness μελετά την κατάρρευση ειδικά διαμορφωμένων μεταλλικών σωλήνων (ενεργειακών απορροφητών), ώστε αυτοί μέσω της παραμόρφωσης και του πλαστικού έργου να απορροφούν την ενέργεια της κρούσης και να προστατεύουν την υπόλοιπη κατασκευή και τους χρήστες της. Στην προσπάθεια βελτίωσης της ικανότητας ενεργειακής απορρόφησης και των χαρακτηριστικών της κατάρρευσης, εισήχθησαν μηχανισμοί ελέγχου του φορτίου που παραλαμβάνεται από τους ενεργειακούς απορροφητές. Η διαμόρφωση άκρου των ενεργειακών απορροφητών, αποτελεί έναν από αυτούς τους μηχανισμούς (μηχανισμός triggering), ειδική περίπτωση του οποίου παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία.

Έτσι, κατασκευάστηκαν δοκίμια από αλουμίνιο με ειδική διαμόρφωση άκρου, τα οποία τοποθετήθηκαν σε ειδικά διαμορφωμένες βάσεις που παρακολουθούν τη συγκεκριμένη γεωμετρία. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν δοκίμια με τρεις διαφορετικές γωνίες κορυφής σε τρεις διαφορετικές διατομές και συμπίεστηκαν αξονικά στη μηχανή Inston. Ακόμα, δημιουργήθηκαν δοκίμια χωρίς διαμόρφωση άκρου με τις ίδιες διαστάσεις και διατομές προκειμένου να συγκριθούν με τα προηγούμενα και να διαπιστωθεί η επίδραση του triggering. Όλες οι πειραματικές δοκιμές εκτελέστηκαν εις διπλούν προκειμένου να διαπιστωθεί η επαναληψιμότητα της συμπεριφοράς κατάρρευσης ομοίων δοκιμίων. Στη συνέχεια, αφού παρουσιάστηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα και έγιναν όλες οι πιθανές συγκρίσεις μεταξύ των δοκιμίων, εξήχθησαν συμπεράσματα ως προς τη συμπεριφορά κατάρρευσης, ενώ παρουσιάστηκαν και τα δοκίμια που έχουν τις βέλτιστες συμπεριφορές κατάρρευσης.

Τέλος, ακολούθησε υπολογιστική προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Is – dyna. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά και εξετάστηκε κατά πόσο συγκλίνουν. Επίσης, εξαιτίας της έντονης θραύσης που παρουσίασαν ορισμένα δοκίμια, εισήχθη προσομοίωση της θραύσης στα αντίστοιχα μοντέλα. Μάλιστα χρησιμοποιήθηκαν δυο μέθοδοι προσομοίωσης της θραύσης, τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίθηκαν τόσο με τα αντίστοιχα πειραματικά, όσο και μεταξύ τους προκειμένου να διαπιστωθεί ποια μέθοδος προσεγγίζει καλύτερα την πειραματική συμπεριφορά.

ABSTRACT

Safety is an important factor which plays a crucial role at the design of mechanical structures. The domain of crashworthiness deals with specific structures called energy absorbers, which are used to protect the whole structure and users in case of impact. Energy absorbers are metallic tubes which absorb impact energy by converting it to plastic energy via deformation in an irreversible manner. Many mechanisms are introduced in order to control the absorbed energy and the deformation mode of the energy absorbers, one of which is the triggering mechanism.

In the present study, a special case of triggering mechanism is used and is related to a specific formation of the one end of the energy absorber (aluminum tube). So, special specimens of rectangular and circular cross - sections with three different angular formations at their ends were produced. These specimens were axially compressed, in order to investigate the crushing behavior and the deformation modes of aluminum tubes with such geometry. All experiments were conducted twice with a view to determine the repeatability of the results. Specimens of rectangular and circular cross – sections with typical ends were also produced to see the effect of triggering mechanism on the collapse behavior of such tubes. The results of these experiments, such as the compressive load – displacement curve, the maximum load, the average load and the energy absorption for each specimen are presented in this study. The appropriate comparisons between the specimens lead us to some conclusions about the crushing behavior of the tubes and indicate us which of the specimens exhibit the optimum deformation mode.

Finally, the deformation process of the tubes has been studied using the finite element code LS – DYNA. Experimental and computed results are compared. Also, it has to be mentioned that cause of the fact that some specimens displayed intensive fracture, it is important to include fracture calculations in the corresponding computational models in order to improve simulation. Two simulation methods of fracture were introduced in computational models and the results were compared with the corresponding experimental results and with themselves in order to define which method simulates better the experimental results.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	15
Εισαγωγή	15
1.1 Ασφάλεια στις μηχανολογικές κατασκευές	15
1.2 Εισαγωγή στο Crashworthiness	15
1.3 Μορφές ενεργειακών απορροφητών.....	16
1.4 Τρόποι φόρτισης	17
1.5 Περιγραφή τρόπων κατάρρευσης στην αξονική σύνθλιψη – Διαδικασία δημιουργίας λοβών	18
1.6 Θεωρητική προσέγγιση διαδικασίας λυγισμού – Διαμόρφωση πλαστικών αρμών.....	19
1.7 Κατάρρευση με μη εκτατούς λοβούς.....	19
1.8 Κατάρρευση με εκτατούς λοβούς.....	20
1.9 Κατάρρευση με λοβούς ανάμικτου τύπου	20
1.10 Δείκτες ενεργειακής απορρόφησης	21
1.11 Προσπάθειες ελέγχου του τρόπου κατάρρευσης και βελτίωσης της ενεργειακής απορρόφησης των δοκιμίων	23
1.12 Μηχανισμός triggering	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	27
Πειραματικές Δοκιμές.....	27
2.1 Εισαγωγή	27
2.2 Πειραματική διάταξη	28
2.3 Πειραματικά Δοκίμια.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	39
Παρουσίαση και επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων	39
3.1 Εισαγωγή	39
3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών.....	40
3.2.1 Κυλινδρικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°	40
3.2.2 Λοξό Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°	48
3.2.3 Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°	56
3.2.4 Κυλινδρικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 60°	64
3.2.5 Λοξό Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 60°	73
3.2.6 Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 60°	81
3.2.7 Κυλινδρικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 120°	89
3.2.8 Λοξό Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 120°	96
3.2.9 Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 120°	104

3.2.10 Τετραγωνικό Δοκίμιο χωρίς διαμόρφωση άκρου (απλό τετραγωνικό δοκίμιο).....	111
3.2.11 Κυλινδρικό Δοκίμιο χωρίς διαμόρφωση άκρου (απλό κυλινδρικό δοκίμιο).....	119
3.3 Σύγκριση Δοκιμίων με την ίδια γωνία κορυφής.....	126
3.3.1 Δοκίμια με γωνία κορυφής 90 μοιρών.....	126
3.3.2 Δοκίμια με γωνία κορυφής 60 μοιρών.....	128
3.3.3 Δοκίμια με γωνία κορυφής 120 μοιρών.....	131
3.4 Σύγκριση Δοκιμίων με την ίδια διατομή	133
3.4.1 Σύγκριση Κυλινδρικών Δοκιμίων με διαφορετικές γωνίες κορυφής	133
3.4.2 Σύγκριση Λοξών Τετραγωνικών Δοκιμίων με διαφορετικές γωνίες κορυφής.....	135
3.4.3 Σύγκριση Τετραγωνικών Δοκιμίων με διαφορετικές γωνίες κορυφής.....	137
3.5 Σύγκριση Δοκιμίων με διαμόρφωση και χωρίς διαμόρφωση άκρου.....	140
3.5.1 Σύγκριση Κυλινδρικών Δοκιμίων με διαμόρφωση άκρου με το δοκίμιο που έχει επίπεδα άκρα.....	140
3.5.2 Σύγκριση Λοξών Τετραγωνικών Δοκιμίων με διαμόρφωση άκρου με το Απλό Τετραγωνικό Δοκίμιο που έχει επίπεδα άκρα.....	142
3.5.3 Σύγκριση Κανονικών Τετραγωνικών Δοκιμίων με διαμόρφωση άκρου με το Απλό Τετραγωνικό Δοκίμιο που έχει επίπεδα άκρα	144
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	147
Υπολογιστική προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS –DYNA.....	147
4.1 Εισαγωγή	147
4.2 Κατασκευή του μοντέλου στον pre –processor της ETA	147
4.3 Επίλυση μοντέλου και επεξεργασία αποτελεσμάτων	150
4.4 Συγκριτική παρουσίαση υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων ..	151
4.4.1 Κυλινδρικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°	151
4.4.2 Λοξό Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°	153
4.4.3 Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°	155
4.4.4 Κυλινδρικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 60°	157
4.4.5 Λοξό Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 60°	159
4.4.6 Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 60°	162
4.4.7 Κυλινδρικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 120°	164
4.4.8 Λοξό Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 120°	166
4.4.9 Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 120°	168
4.4.10 Γενικά συμπεράσματα	170
4.5 Προσομοίωση θραύσης στα υπολογιστικά μοντέλα.....	171

4.5.1 Προσομοίωση θραύσης με τη μέθοδο εξάλειψης – διαγραφής πεπερασμένων στοιχείων	171
4.5.2 Προσομοίωση θραύσης με τη μέθοδο διαίρεσης κόμβων – διαχωρισμός των πεπερασμένων στοιχείων	178
4.5.3 Σύγκριση των μεθόδων προσομοίωσης θραύσης	185
4.5.4 Γενικά συμπεράσματα ως προς την προσομοίωση θραύσης στη μοντελοποίηση	190
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	191
Γενικά Συμπεράσματα	191
5.1 Συμπεράσματα από τις πειραματικές δοκιμές	191
5.2 Συμπεράσματα από την υπολογιστική προσομοίωση.....	193
Βιβλιογραφία	195

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Ασφάλεια στις μηχανολογικές κατασκευές

Στο σχεδιασμό μηχανολογικών κατασκευών, ο μελετητής, προκειμένου να προχωρήσει στη σχεδίαση ενός νέου προϊόντος, λαμβάνει υπόψην του ένα σύνολο κριτηρίων, όπως το χαμηλό κόστος κατασκευής, τη λειτουργικότητα, την ελαχιστοποίηση του βάρους και άλλα. Η σημαντικότερη όμως παράμετρος, στην οποία δίνεται ιδιαίτερη έμφαση, είναι αυτή της ασφάλειας των χρηστών. Για το λόγο αυτό, μεγάλες βιομηχανίες πραγματοποιούν έρευνες προκειμένου να βελτιώσουν την ασφάλεια των κατασκευών τους. Ένας κλάδος της βιομηχανίας που ασχολείται ιδιαίτερος με τον τομέα της ασφάλειας, είναι αυτός των μεταφορών και ιδίως της αυτοκινητοβιομηχανίας. Έτσι παρατηρείται να εκτελούνται αλληπάλλληλα crash tests προκειμένου να δοθεί στην κυκλοφορία ένα νέο μοντέλο αυτοκινήτου. Η τάση αυτή, εξηγείται από το γεγονός ότι τα τροχαία δυστυχήματα, αποτελούν μία από τις κύριες αιτίες θανάτων στο σύγχρονο κόσμο. Ιδίως στη χώρα μας, η οποία κατέχει ένα από τα υψηλότερα ποσοστά στην Ε.Ε., καταδεικνύεται η αναγκαιότητα ενός σχεδιασμού που θα έχει ως στόχο του, την προστασία ανθρώπινων ζωών. Η φιλοσοφία αυτού του τρόπου σχεδίασης, έγκειται στη χρήση διατάξεων που απορροφούν την ενέργεια της κρούσης μέσω της πλαστικής τους παραμόρφωσης, προστατεύοντας την υπόλοιπη κατασκευή (crashworthiness) αλλά και τους επιβαίνοντες από τα υψηλά φορτία που αναπτύσσονται κατά τη σύγκρουση.

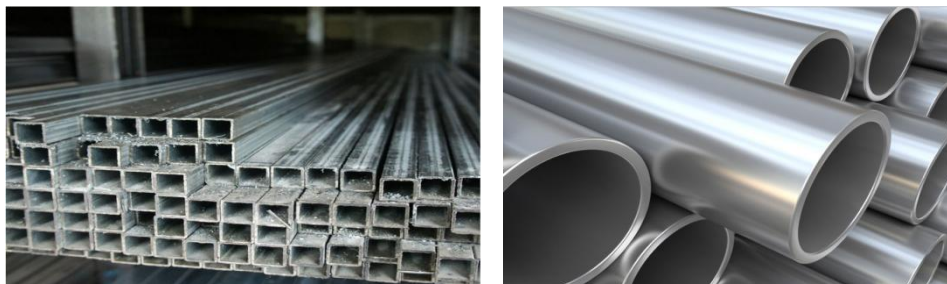
1.2 Εισαγωγή στο Crashworthiness

Με τον όρο Crashworthiness, περιγράφουμε τη μελέτη διατάξεων οι οποίες χρησιμοποιούνται ώστε, μέσω της κατάρρευσής τους, να απορροφούν την ενέργεια που προέρχεται από σύγκρουση και να προστατεύουν την υπόλοιπη κατασκευή στην οποία έχουν εφαρμοσθεί. Ουσιαστικά, το crashworthiness, ασχολείται με τη συμπεριφορά κατάρρευσης διατάξεων (κυρίως κελυφών), οι οποίες διαχέουν την κινητική ενέργεια που παραλαμβάνουν από την κρούση, μετατρέποντάς την σε πλαστικό έργο.

Οι διατάξεις που μελετώνται για αυτό το σκοπό, ονομάζονται ενεργειακοί απορροφητές [15]. Σκοπός των ενεργειακών απορροφητών είναι η (όσο το δυνατόν) μεγαλύτερη απορρόφηση κινητικής ενέργειας κατά την κρούση και η μετατροπή της σε μη αναστρέψιμη μορφή (πλαστικό έργο), με απώτερο στόχο την προστασία της κατασκευής στην οποία εμπεριέχονται.

1.3 Μορφές ενεργειακών απορροφητών

Οι ενεργειακοί απορροφητές είναι στη πλειονότητά τους, λεπτότοιχοι σωλήνες από μαλακό χάλυβα ή αλουμίνιο που προέρχονται είτε από διέλαση (extrusion) είτε από στραντζαριστά ελάσματα με ραφή συγκόλλησης.



Εικόνα 1.1 Στραντζαριστά ελάσματα με ραφή συγκόλλησης (αριστερά) και δοκίμια αλουμινίου από διέλαση (δεξιά).

Οι επικρατούσες διατομές τους είναι: η κυκλική, η τετραγωνική και η ορθογωνική διατομή, ενώ οι συνήθεις γεωμετρικές μορφές είναι: ο ορθογωνικός σωλήνας τετραγωνικής διατομής, ο ευθύς κυλινδρικός σωλήνας και οι κωνικοί σωλήνες με σχήμα κόλουρης πυραμίδας (frusta).

Σύμφωνα με μελέτες, έχει αποδειχθεί ότι η γεωμετρική μορφή του ενεργειακού απορροφητή είναι καθοριστικής σημασίας για τον τρόπο κατάρρευσης και την ενέργεια που απορροφάται [5]. Είναι χαρακτηριστικό ότι το μέσο (θεωρητικό) φορτίο, στους κωνικούς σωλήνες, αυξάνεται με την εξέλιξη της παραμόρφωσης, ενώ στους ευθείς σωλήνες παραμένει σταθερό [1]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στους κωνικούς σωλήνες έχουμε αύξηση του πλάτους κατά μήκος του σωλήνα, άρα και αύξηση του υλικού προς παραμόρφωση και απορρόφηση ενέργειας.

Ακόμα, το μήκος του δοκιμίου, το πάχος του τοιχώματος και η διατομή επηρεάζουν σημαντικά την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του σωλήνα [3]. Για παράδειγμα, η αύξηση του πάχους του τοιχώματος οδηγεί σε αύξηση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας.

1.4 Τρόποι φόρτισης

Στη βιβλιογραφία, παρουσιάζονται αρκετές αναφορές που αφορούν τους τρόπους επιβολής φορτίου κατά τη μελέτη της συμπεριφοράς των ενεργειακών απορροφητών. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι: η αξονική σύνθλιψη, η πλευρική συμπίεση, η λοξή φόρτιση, η πλευρική διάτρηση, η διάσπαση και η αντιστροφή [5,15]. Σύμφωνα όμως με εκτενείς μελέτες, ο εν γένει πιο αποτελεσματικός τρόπος επιβολής φορτίου είναι η αξονική σύνθλιψη. Χαρακτηριστικό είναι ότι σε σύγκριση μεταξύ αξονικής και πλευρικής συμπίεσης, προέκυψε ότι κατά την αξονική συμπίεση παρουσιάστηκε περίπου 10 φορές μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας από την πλευρική [16]. Έτσι, παρατηρείται ότι ο επικρατέστερος τρόπος επιβολής φορτίου είναι η αξονική σύνθλιψη.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχει και άλλη μια σημαντική διάκριση του τρόπου επιβολής του φορτίου στα δοκίμια. Συγκεκριμένα εδώ κυριαρχούν ο δυναμικός και ο ημι-στατικός τρόπος φόρτισης. Ο δυναμικός τρόπος φόρτισης λαμβάνει υπόψη τις αδρανειακές δυνάμεις που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις μεγάλες ταχύτητες σύγκρουσης, ενώ ο ημι-στατικός τρόπος φόρτισης που αφορά χαμηλές ταχύτητες πρόσκρουσης, αγνοεί τις αδρανειακές δυνάμεις και ομοιάζει με το στατικό [18]. Ο επικρατέστερος είναι ο ημι-στατικός τρόπος φόρτισης, καθώς εμπεριέχει τα πλεονεκτήματα του στατικού και προσομοιάζει ικανοποιητικά αρκετές περιπτώσεις συγκρούσεων που εμφανίζονται στην πράξη.

1.5 Περιγραφή τρόπων κατάρρευσης στην αξονική σύνθλιψη – Διαδικασία δημιουργίας λοβών

Σε αυτό το σημείο, κρίνεται σκόπιμο να περιγραφεί ο τρόπος κατάρρευσης δοκιμίων που υπόκεινται σε αξονική σύνθλιψη. Ο συνήθης τρόπος κατάρρευσης των δοκιμίων που υπόκεινται σε αξονική συμπίεση, είναι αυτός που εμπεριέχει το σχηματισμό λοβών.

Αρχικά, το δοκίμιο που υφίσταται αξονική σύνθλιψη παραμορφώνεται ελαστικά. Όταν το φορτίο φτάσει σε τέτοια τιμή ώστε να ξεπεραστεί το όριο δαρροής του υλικού, τότε αρχίζει η δημιουργία του πρώτου λοβού, κατά την οποία παρατηρείται και το πρώτο τοπικό μέγιστο στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης εμβόλου (σχηματισμός 1^{ης} πτύχωσης εξωτερικά). Από εκείνη τη στιγμή και μέχρι να σταθεροποιηθεί ο σχηματισμός του λοβού και το υλικό να ξαναγίνει στιβαρό, παρατηρούμε πτώση του φορτίου (σχηματισμός 2^{ης} πτύχωσης εσωτερικά) και τοπικό ελάχιστο στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης [16]. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου το δοκίμιο να μη μπορεί να παραλάβει περαιτέρω φορτία και να αστοχήσει ολικά.

Ανάλογα τώρα με τη μορφή που λαμβάνουν τα δοκίμια κατά την παραμόρφωση, προκύπτουν οι αντίστοιχοι τρόποι κατάρρευσης. Συγκεκριμένα για τις περιπτώσεις όπου έχουμε σχηματισμό λοβών, υπάρχουν 3 είδη κατάρρευσης: με μη εκτατούς λοβούς, με εκτατούς λοβούς και τέλος με λοβούς ανάμικτου τύπου. Τα είδη κατάρρευσης και ο μηχανισμός τους θα παρουσιασθούν αναλυτικότερα στη συνέχεια, όπου θα εισαχθεί και η έννοια του πλαστικού αρμού στην περιγραφή των μοντέλων λυγισμού.

Επιστρέφοντας στους τρόπους κατάρρευσης, αξίζει να αναφερθεί η περίπτωση όπου παρουσιάζεται λυγισμός κατά Euler (global buckling), όπου το δοκίμιο δε σχηματίζει λοβούς αλλά κάμπτεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μη μπορεί να παραλάβει επιπλέον φορτία και να παραμορφωθεί περαιτέρω. Πρόκειται για τον πλέον ανεπιθύμητο τρόπο κατάρρευσης, γιατί δεν επιτρέπει στο δοκίμιο την απορρόφηση υψηλού ποσού ενέργειας κατά την κρούση. Για το λόγο αυτό επιλέγονται τρόποι για τη αποφυγή εμφάνισής του, όπως μικρός λογός μήκους σωλήνα προς διατομή (L/D) [15] και δημιουργία γεωμετρικών ατελειών για πρόκληση συγκέντρωσης τάσης (triggering) [10 – 13].

1.6 Θεωρητική προσέγγιση διαδικασίας λυγισμού – Διαμόρφωση πλαστικών αρμών

Οι μελετητές, προκειμένου να προσεγγίσουν θεωρητικά τη διαδικασία με την οποία καταρρέει ένας λεπτότοιχος σωλήνας υπό αξονική θλιπτική φόρτιση, εισήγαγαν την έννοια του πλαστικού αρμού.

Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, ένα δοκίμιο που υφίσταται αξονική σύνθλιψη, κατά την κατάρρευσή του εμφανίζει πλαστικούς αρμούς και συνδετικούς βραχίονες. Το δοκίμιο αρχικά, καθώς μεταβαίνει από την ελαστική στην πλαστική περιοχή εμφανίζει στο μέσον των ακμών πλαστικούς αρμούς [3]. Στη συνέχεια και όσο εξελίσσεται η φόρτιση, εμφανίζονται νέοι πλαστικοί αρμοί. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, οι πλαστικοί αρμοί μετακινούνται έτσι ώστε να ακολουθήσουν τη μορφή που λαμβάνει το δοκίμιο κατά το σχηματισμό των λοβών. Για την περιγραφή του σχηματισμού λοβών, χρησιμοποιούνται οριζόντιοι και κεκλιμένοι πλαστικοί αρμοί.

Η χρήση πλαστικών αρμών ήταν το εργαλείο που βοήθησε τους μελετητές στην κατασκευή θεωρητικών μοντέλων πρόβλεψης της πλαστικά διαχεόμενης ενέργειας. Έτσι σε ένα θεωρητικό μοντέλο, το πλαστικό έργο διαχέεται στους πλαστικούς αρμούς και στον εφελκυσμό των μεταξύ τους υλικών, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδρασή τους [15].

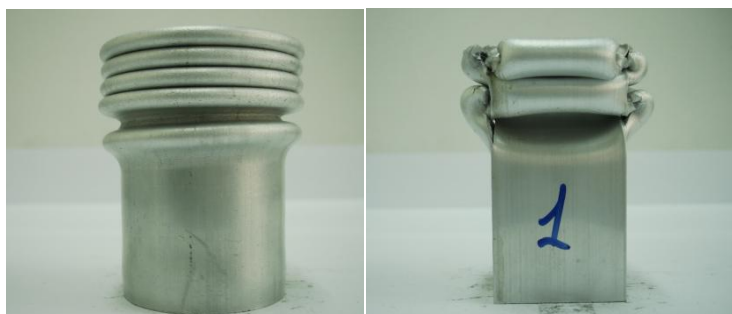
1.7 Κατάρρευση με μη εκτατούς λοβούς

Επιστρέφοντας τώρα στους τρόπους κατάρρευσης, ο τρόπος παραμόρφωσης δοκιμίου με μη εκτατούς λοβούς, μπορεί να περιγραφεί με οριζόντιους και κεκλιμένους πλαστικούς αρμούς. Δοκίμιο που καταρρέει σχηματίζοντας μη εκτατούς λοβούς, παρουσιάζει σταθερούς οριζόντιους και μετατοπισμένους κεκλιμένους πλαστικούς αρμούς. Κατά το σχηματισμό λοβού, οι οριζόντιοι πλαστικοί αρμοί που βρίσκονται στις δυο απέναντι πλευρές κινούνται προς τα έξω, μειώνοντας το αρχικό τους μήκος ενώ οι άλλοι πλαστικοί αρμοί που βρίσκονται στις παράπλευρες έδρες κινούνται προς τα μέσα αυξάνοντας το αρχικό μήκος τους. Κατά αυτόν τον τρόπο διαμορφώνονται όμοιοι λοβοί, ανά επίπεδο, ο καθένας στραμμένος κατά γωνία 90 μοιρών σε σχέση με τον προηγούμενο.

Σε ό,τι αφορά τους κεκλιμένους πλαστικούς αρμούς, αυτοί ξεκινούν από τις γωνίες του δοκιμίου και καταλήγουν σε γωνία $\pm 45^\circ$ ως προς τους οριζόντιους. Στη βιβλιογραφία, ο τρόπος κατάρρευσης με μη εκτατούς λοβούς, συναντάται με τον αγγλικό όρο **diamond mode** [20]. Χαρακτηριστικό αυτού του τύπου κατάρρευσης, είναι το γεγονός ότι η διατομή πριν και μετά την κατάρρευση έχει την ίδια περίμετρο.

1.8 Κατάρρευση με εκτατούς λοβούς

Για την κατάρρευση δοκιμίων με εκτατούς λοβούς είναι γνωστό ότι στη γενική περίπτωση χαρακτηρίζεται ως αξονοσυμμετρική κατάρρευση. Χαρακτηριστική μορφή κατάρρευσης με εκτατούς λοβούς, είναι αυτή των κυλινδρικών σωλήνων, όπου περιγράφεται στη βιβλιογραφία με τον όρο **concertina mode**. Αντίστοιχα με την εκτατή κατάρρευση των κυλινδρικών δοκιμίων (concertina mode) όπου έχουμε το σχηματισμό κυλινδρικών δακτυλίων, σε τετραγωνική διατομή αυτό το είδος παραμόρφωσης χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό τετραγωνικού τύπου αναδίπλωσης, συμμετρικό ως προς κάθετο άξονα συμμετρίας – περιστροφής του δοκιμίου. Σε αυτήν την περίπτωση, η περίμετρος του δοκιμίου αυξάνεται μετά την κατάρρευση.



Εικόνα 1.2 Αριστερά concertina mode και δεξιά diamond mode.

1.9 Κατάρρευση με λοβούς ανάμικτου τύπου

Ο τρόπος κατάρρευσης δοκιμίων με λοβούς ανάμικτου τύπου, αποτελεί ένα συνδυασμό των δυο προηγούμενων τρόπων κατάρρευσης. Ουσιαστικά, σε αυτήν την περίπτωση, έχουμε ένα συνδυασμό ενός ή περισσότερων αρχικά σχηματισμένων αξονοσυμμετρικών λοβών, οι οποίοι ακολουθούνται από μη εκτατούς λοβούς καθώς προχωράει η κατάρρευση του δοκιμίου.

1.10 Δείκτες ενεργειακής απορρόφησης

Όπως επισημάνθηκε προηγουμένως, το crashworthiness μελετά την ικανότητα απορρόφησης της κινητικής ενέργειας κατά την κρούση και μετατροπής της σε πλαστικό έργο από τους ενεργειακούς απορροφητές. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητο να περιγραφούν οι τρόποι με τους οποίους μετράται η απορρόφηση ενέργειας από τις συγκεκριμένες διατάξεις.

Το βασικότερο εργαλείο, από το οποίο προκύπτουν όλοι οι δείκτες ενεργειακής απορρόφησης, είναι η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης. Μετρώντας ταυτόχρονα το φορτίο που ασκεί το έμβολο στο δοκίμιο και τη μετατόπισή του, προκύπτουν τα σημεία τα οποία σχηματίζουν την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης. Προφανώς, το φορτίο που ασκεί το έμβολο στο δοκίμιο, είναι και η δύναμη που δέχεται το δοκίμιο (Νόμος Newton δράσης – αντίδρασης) και η μετατόπιση του εμβόλου αποτελεί αντίστοιχα τη βράχυνση του δοκιμίου. Συνεπώς, η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης του εμβόλου αποτελεί ταυτόχρονα και καμπύλη φορτίου – βράχυνσης του δοκιμίου.

Ένα από τα μεγέθη που προκύπτουν από την καμπύλη και είναι ενδεικτικό για τη μελέτη της ενεργειακής απορρόφησης, είναι το μέγιστο φορτίο F_{max} . Στις περισσότερες περιπτώσεις κατάρρευσης το αρχικό τοπικό μέγιστο αποτελεί και το ολικό μέγιστο στην καμπύλη. Για το λόγο αυτό, το αρχικό μέγιστο (**peak**) φορτίο, αποτελεί ένδειξη του τρόπου απορρόφησης ενέργειας και του ποσού που μπορεί να παραλάβει το δοκίμιο.

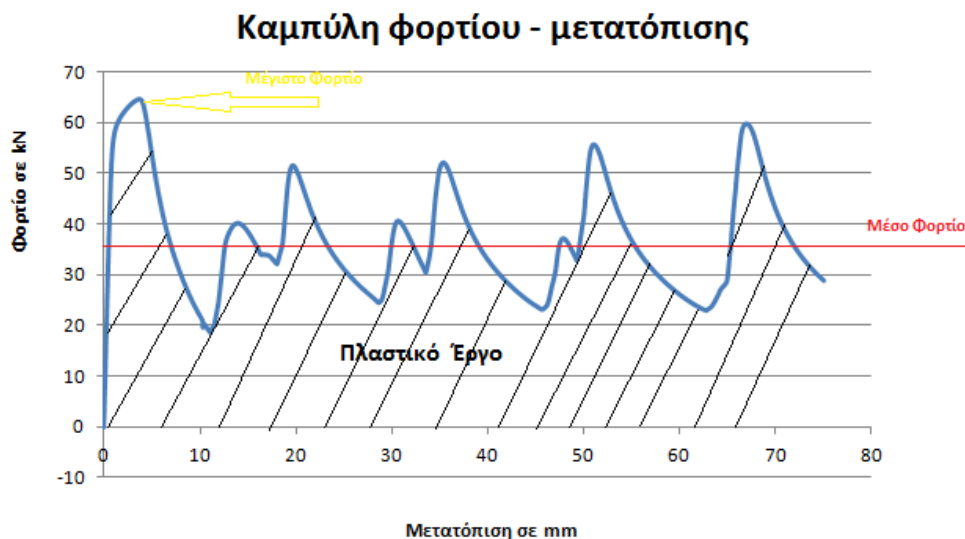
Ένα εξίσου σημαντικό μέγεθος που προκύπτει από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, είναι το μέσο φορτίο F_m . Το μέσο φορτίο είναι ένα θεωρητικό μέγεθος, που μας επιτρέπει να έχουμε μια εικόνα για το πόσο φορτίο κατά μέσο όρο μπορεί να παραλάβει το δοκίμιο κατά την κατάρρευση.

Το σημαντικότερο μέγεθος που προκύπτει από την καμπύλη είναι το πλαστικό έργο. Έτσι, υπολογίζοντας το εμβαδό του χωρίου που εμπεριέχεται κάτω από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, υπολογίζουμε την απορροφούμενη ενέργεια, δηλαδή το πλαστικό έργο W .

Ο πιο εύκολος τρόπος υπολογισμού του W είναι με το μέσο φορτίο και τη μετατόπιση. Έτσι με χρήση της σχέσης $W = F_m \times l$, όπου l : βράχυνση δοκιμίου, υπολογίζουμε την ενέργεια που απορροφάται από το δοκίμιο. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να επισημανθεί ότι εξαιτίας της επιλογής να έχουμε σταθερή μετατόπιση του εμβόλου ($l = 75 \text{ mm}$), η σύγκριση των δοκιμίων ως προς την ενεργειακή απορρόφηση, μπορεί να αναχθεί σε σύγκριση των μέσων φορτίων τους F_m . Το γεγονός αυτό απλοποιεί τη διαδικασία σύγκρισης των δοκιμίων και καταδεικνύει τη χρησιμότητα του μεγέθους του μέσου φορτίου.

Μελετώντας την κατάρρευση των ενεργειακών απορροφητών, μας ενδιαφέρει να επιτυγχάνουμε ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου. Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου, που εμφανίζεται στη βιβλιογραφία ως *crush force efficiency*, ορίζεται ως ο λόγος του αρχικού μέγιστου φορτίου προς το μέσο φορτίο (*c.f.e. = initial peak load / mean load*) [1]. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, θέλουμε να έχουμε όσο το δυνατό μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου, συνεπώς επιδιώκουμε ο λόγος αυτός να είναι κοντά στη μονάδα 1. Εξασφαλίζοντας ομοιομορφία στην κατανομή φορτίου, προσπαθούμε να επιτύχουμε προοδευτική κατάρρευση του δοκιμίου, κάτι που είναι πολύ σημαντικό στην απορρόφηση κρουστικών φορτίων.

Τέλος, προκειμένου να συγκρίνουμε δοκίμια με διαφορετικές γεωμετρίες, αλλά με την ίδια μάζα, ορίζουμε το δείκτη της ειδικής ενέργειας απορρόφησης W_s . Η ειδική ενέργεια απορρόφησης ορίζεται ως το πηλίκο της απορροφούμενης ενέργειας (πλαστικό έργο W) προς τη μάζα m του υλικού που έχει αστοχήσει. Η μάζα του υλικού που έχει αστοχήσει υπολογίζεται από τον αντίστοιχο όγκο και την πυκνότητα του υλικού. Ο δείκτης αυτός, αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμος στην προσπάθεια για μείωση του βάρους των κατασκευών.



Διάγραμμα 1.1 Παρουσίαση χαρακτηριστικών μεγεθών στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης.

1.11 Προσπάθειες ελέγχου του τρόπου κατάρρευσης και βελτίωσης της ενεργειακής απορρόφησης των δοκιμίων

Οι ερευνητές, προχώρησαν στην εφαρμογή νέων τεχνικών προκειμένου να βελτιωθεί η ενεργειακή απορρόφηση των δοκιμίων και να ελεγχθεί ο τρόπος κατάρρευσης τους, ώστε να ικανοποιούνται ορισμένα κριτήρια ανάλογα με την εκάστοτε κατασκευή.

Για το λόγο αυτό προσπάθησαν να ελέγξουν κάποιες παραμέτρους όπως το πάχος, τη γεωμετρία αλλά και τη μορφή των δοκιμίων για να δουν τη συμπεριφορά τους ως προς τον τρόπο κατάρρευσης και την ενεργειακή απορρόφηση [3,5,9]. Έτσι εκτός από τις μελέτες κυλινδρικών σωλήνων, σωλήνων ορθογωνικής και τετραγωνικής διατομής, παρουσιάστηκαν και μελέτες για κωνικούς σωλήνες στις οποίες μάλιστα διαπιστωνόταν η επιρροή της κωνικότητας, των κωνικών πλευρών και της εν γένει διαμόρφωσης στην αξονική κατάρρευση των δοκιμίων [1,7,18].

Εκτός όμως από τη μελέτη διαφορετικών διατομών, ιδιαίτερο βάρος έχει δοθεί και στον πειραματισμό με υλικά πέραν των συνηθισμένων. Έτσι, παρατηρείται, η χρήση σύνθετων υλικών [8,14,17] και μεταλλικών υλικών με προσθήκη διαφόρων τύπων αφρών [19] ως ενεργειακών απορροφητών και η μελέτη τους ως προς τα χαρακτηριστικά κατάρρευσης.

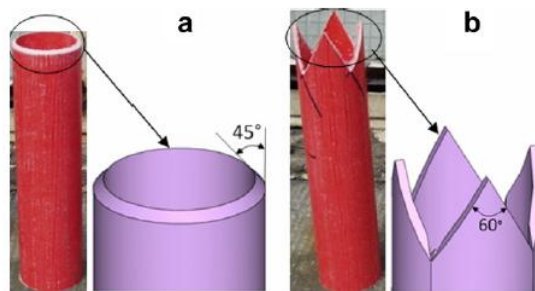
Τέλος, αρκετοί μελετητές ασχολήθηκαν με τη βελτίωση του τρόπου κατάρρευσης των πλέον διαδεδομένων ενεργειακών απορροφητών. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν έρευνες στη συμπεριφορά κατάρρευσης εμφωλευμένων κυλινδρικών σωλήνων, σωλήνων τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής, είτε με ύπαρξη οπών είτε με ύπαρξη αυλακώσεων και τέλος σωλήνων που παρουσιάζουν διαμόρφωση άκρου [4,10-14,17]. Η τελευταία περίπτωση, δηλαδή ο μηχανισμός triggering, είναι το θέμα που θα μας απασχολήσει στην επόμενη παράγραφο .

1.12 Μηχανισμός triggering

Στην προσπάθεια ελέγχου του τρόπου κατάρρευσης και αποφυγής του καταστροφικού τρόπου κατάρρευσης κατά Euler, στην αξονική συμπίεση, εισήχθη από τους ερευνητές ο μηχανισμός triggering.

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, ο μηχανισμός triggering αποτελείται από κατεργασία ειδικής γεωμετρίας σε ένα από τα άκρα του δοκιμίου. Η φιλοσοφία του μηχανισμού είναι, μέσω τις συγκεκριμένης γεωμετρίας να προκληθεί μια τοπική περιοχή αστοχίας σαν αποτέλεσμα συγκέντρωσης τάσης [10]. Έπειτα η τοπική περιοχή αστοχίας επεκτείνεται προοδευτικά και εξελίσσεται η κατάρρευση του δοκιμίου. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο έλεγχος της αρχικής δύναμης σχηματισμού λοβών, που τις περισσότερες φορές είναι και το μέγιστο φορτίο που παρουσιάζεται κατά την κατάρρευση. Επίσης, αποτελεί και τον τρόπο για να επιτύχουμε υψηλό επίπεδο απορρόφησης ενέργειας, αφού μέσω του μηχανισμού αυτού έχουμε προοδευτικό τρόπο κατάρρευσης, λόγω του σχετικά σταθερού φορτίου κάτω από το οποίο εξελίσσεται η αστοχία.

Οι βασικότερες μορφές trigger γεωμετριών σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [8,10-14,17], είναι οι ακόλουθες: το chamfering με συγκεκριμένη γωνία, η δημιουργία tulip pattern με συγκεκριμένη γωνία ανάμεσα στις πλευρές και τέλος η εισαγωγή γεωμετρικών ατελειών (αυλακώσεων, οπών) στις πλευρές των δοκιμίων. Οι γεωμετρίες που εμπίπτουν στο αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι αυτές του tulip pattern και του chamfering και για το σκοπό αυτό θα αναλυθούν εν συντομία στη συνέχεια.



Εικόνα 1.3 Αριστερά chamfering και δεξιά tulip pattern [14].

Για τη κατασκευή της trigger γεωμετρίας tulip pattern, δημιουργούμε αιχμηρές ακμές στην πλευρά του δοκιμίου που θα έρθει σε επαφή με το επίπεδο έμβολο, το οποίο ασκεί την αξονική συμπίεση. Με αυτόν τον τρόπο η επαφή θα γίνει στις αιχμηρές ακμές του δοκιμίου όπου και θα εμφανιστούν οι αρχικές παραμορφώσεις.

Για την κατασκευή της trigger γεωμετρίας του chamfering, ουσιαστικά αποκόπτεται λοξά και με συγκεκριμένη γωνία (συνήθως 45 ή 60 μοιρών) ένα πολύ μικρό τμήμα στην πλευρά του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με το επίπεδο έμβολο που ασκεί τη φόρτιση. Το τμήμα αυτό, ξεκινά από την εσωτερική διατομή και καταλήγει στη εξωτερική διατομή ακολουθώντας τη γωνία που έχει οριστεί κατά το πάχος του δοκιμίου. Με αυτόν τον τρόπο, η αρχική επαφή του εμβόλου είναι ομοιόμορφη κατά την περιφέρεια του σωλήνα τη στιγμή της πρόσκρουσης.

Στα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν στη βιβλιογραφία [8], παρατηρήθηκε ότι τα χαρακτηριστικά της κρούσης και η ενεργειακή απορρόφηση των δοκιμίων με ειδική trigger γεωμετρία, είναι καλύτερα από τα κλασικά γεωμετρικά σχήματα χωρίς τη διαμόρφωση, όπως τετραγωνικής και εξαγωνικής διατομής. Κατά τη σύγκριση των μηχανισμών του chamfering και του tulip pattern, προέκυψε ότι στο μηχανισμό tulip pattern έχουμε χαμηλότερο peak φορτίο κρούσης και σχετικά σταθερό μέσο φορτίο. Αντίθετα με το chamfering εξασφαλίζεται υψηλότερη ενεργειακή απορρόφηση σε σχέση με το tulip pattern [14].

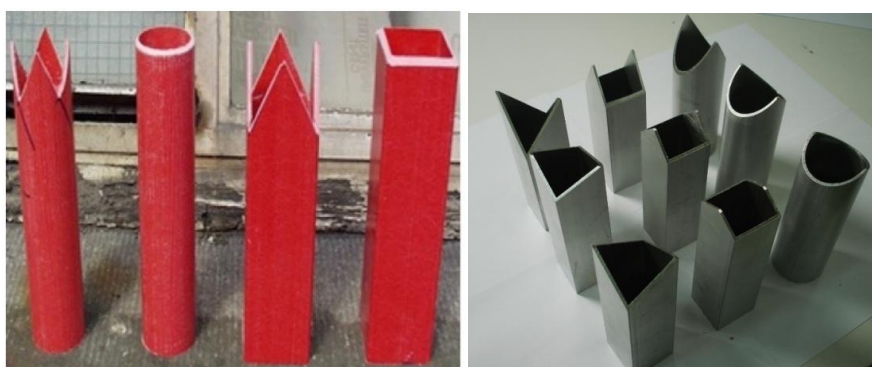
Σε αυτό το σημείο, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι τα συμπεράσματα που προέκυψαν για τους μηχανισμούς triggering, αφορούν την κατάρρευση σύνθετων υλικών. Ως εκ τούτου δεν είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με αυτά της παρούσας εργασίας.

Τέλος, η μελέτη [2] μπορεί να μας παρέχει συγκρίσιμα αποτελέσματα, καθώς μελετά αριθμητικά τη συμπεριφορά έναντι αξονικής ημι-στατικής συμπίεσης τετραγωνικών σωλήνων από αλουμίνιο με μηχανισμούς triggering, δίνοντας έμφαση στο chamfering.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη μελέτη, δείχνουν ότι τόσο η απόκριση φορτίου – μετατόπισης όσο και η διαδικασία σχηματισμού λοβών επηρεάζονται από τους μηχανισμούς triggering. Ακόμα, έδειξαν ότι ο μηχανισμός triggering μπορεί να ελέγξει σημαντικά το φορτίο έναρξης σχηματισμού λοβών, αλλά η επίδρασή του στο μέσο φορτίο κρούσης είναι σχετικά μικρή.

Ο μηχανισμός triggering που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία περιλαμβάνει στοιχεία και από τους δυο μηχανισμούς που έχουν περιγραφεί. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η διαμόρφωση του ενός άκρου των δοκιμίων έτσι ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν σε μήτρα που παρακολουθεί τη συγκεκριμένη γεωμετρία. Η βασική διαφορά σε σχέση με το μηχανισμό tulip pattern, έγκειται στο γεγονός ότι σε αυτήν την περίπτωση δεν έχουμε επίπεδο έμβολο – βάση, αλλά έχουμε κατάλληλα διαμορφωμένη βάση που ασκεί τη φόρτιση σε όλο το μήκος της διατομής που έρχεται σε επαφή (σε αντίθεση με την επαφή αιχμηρών άκρων – επίπεδου εμβόλου). Η παραπάνω διαφορά, είναι και η βασική διαφορά του triggering που χρησιμοποιήσαμε με το chamfering, συν το γεγονός ότι η λοξή αφαίρεση υλικού περιφερειακά της διατομής, γίνεται σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα στην περίπτωση του triggering που χρησιμοποιήσαμε.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σκοπός της επιλογής του συγκεκριμένου μηχανισμού triggering, είναι η μελέτη της συμπεριφοράς δοκιμίων που λόγω συγκεκριμένων χρήσεων πρέπει να έχουν τη συγκεκριμένη γεωμετρική μορφή. Τέτοια δοκίμια είναι οι διαφόρου είδους σύνδεσμοι που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές (π.χ. πλαίσια αυτοκινήτων). Ακόμα, σκοπός ήταν να μελετηθεί η επίδραση μιας τέτοιας γεωμετρίας στη συμπεριφορά κατάρρευσης δοκιμίων από αλουμίνιο και το κατά πόσο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια τέτοια μορφή triggering στον έλεγχο του μέγιστου φορτίου και την προοδευτική κατάρρευση των δοκιμίων, ώστε να χρησιμοποιηθούν ως ενεργειακοί απορροφητές σε ειδικές εφαρμογές.



Εικόνα 1.4 Αριστερά tulip pattern και chamfering [14] και δεξιά το triggering που χρησιμοποιήσαμε εμείς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Πειραματικές Δοκιμές

2.1 Εισαγωγή

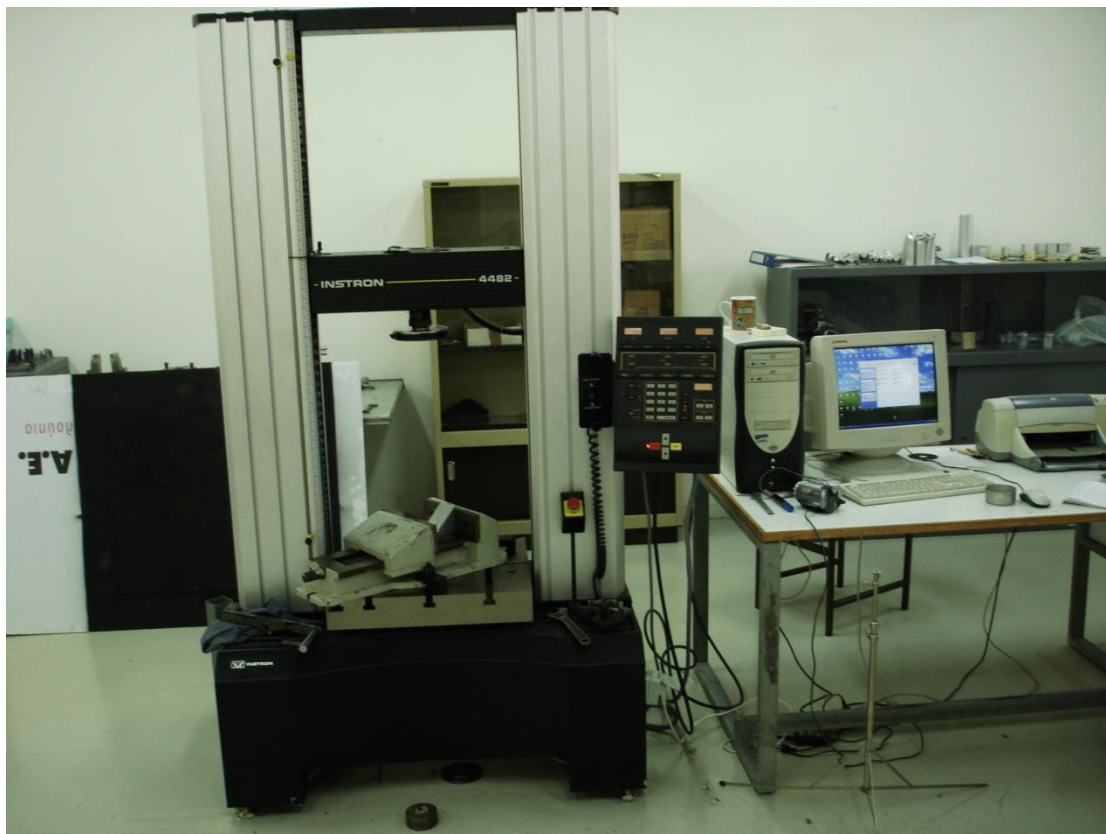
Για την πειραματική μελέτη επιλέξαμε να εξετάσουμε το μηχανισμό triggering για τρεις γωνίες κορυφής (60, 90, 120 μοίρες) σε τρία γεωμετρικά σχήματα. Τα τρία γεωμετρικά σχήματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα ακόλουθα: ορθογωνικός σωλήνας τετραγωνικής διατομής (απλός τετραγωνικός), κυλινδρικός σωλήνας κυκλικής διατομής (κυλινδρικός), ορθογωνικός σωλήνας τετραγωνικής διατομής στραμμένος κατά γωνία 45 μοιρών (τοποθετήθηκε σε βάση γωνίας 90 μοιρών) για τη διαμόρφωση του άκρου του (λοξός τετραγωνικός). Επίσης χρησιμοποιήθηκαν τετραγωνικοί και κυλινδρικοί σωλήνες χωρίς διαμόρφωση άκρου, ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα των δοκιμών με triggering, με αυτά που δεν έχουν. Για να διαπιστώσουμε την επαναληψιμότητα των πειραματικών δοκιμών, αποφασίστηκε να κατασκευασθούν για κάθε περίπτωση δύο δοκίμια. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 22 δοκιμές (18 με triggering , 4 απλές), των οποίων τα αποτελέσματα θα παρουσιασθούν στη συνέχεια.



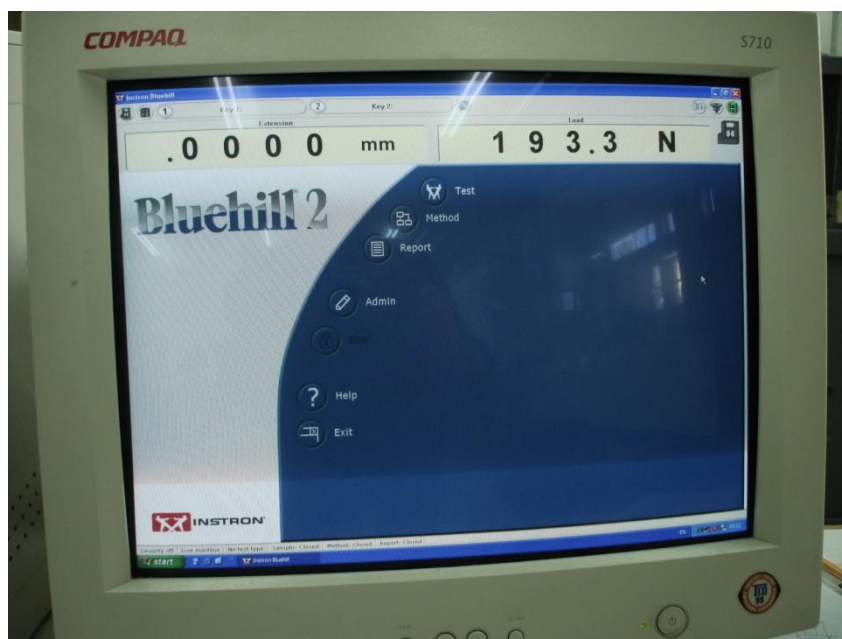
Εικόνα 2.1 Αριστερά λοξός τετραγωνικός, στο κέντρο απλός τετραγωνικός και δεξιά κυλινδρικός σωλήνας .

2.2 Πειραματική διάταξη

Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στη μηχανή INSTRON 4482 του εργαστηρίου. Για την εισαγωγή των πειραματικών συνθηκών στην πρέσσα αλλά και την καταγραφή των δεδομένων που προκύπτουν από το πείραμα (καμπύλη φορτίου – μετατόπισης), η μηχανή συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου είναι εγκατεστημένο το λογισμικό Bluehill. Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με ταχύτητα φόρτισης 20 mm/min και μετατόπιση εμβόλου 75 mm. Από τις πειραματικές συνθήκες που επιλέχθηκαν είναι φανερό ότι στις δοκιμές έχουμε στατική φόρτιση.



Εικόνα 2.2 Μηχανή INSTRON 4482 του εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών Ε.Μ.Π.



Εικόνα 2.3 Πρόγραμμα Bluehill

Προχωρώντας στην περιγραφή των υπόλοιπων στοιχείων της πειραματικής διάταξης, πρέπει να αναφερθούμε στις ειδικές βάσεις τοποθέτησης των δοκιμίων. Έτσι, έπειτα από δοκιμές, προκρίθηκε η λύση των γωνιών έδρασης (σφηνών) ως ο καταλληλότερος τρόπος στήριξης του λοξού μετώπου των δοκιμίων. Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε η κατασκευή των παραπάνω βάσεων, οι οποίες συγκρατούνται από μία μέγγενη, που στερεώνεται στην τράπεζα της μηχανής INSTRON. Έτσι για τις τρεις γωνίες κορυφής, κατασκευάστηκαν οι αντίστοιχες γωνίες έδρασης.

Διαδικασία κατασκευής εδράσεων

Για τη κατασκευή των εδράσεων, χρησιμοποιήθηκαν δύο συμπαγείς πλάκες χάλυβα διαστάσεων $l = 155 \text{ mm}$ και $l = 200 \text{ mm}$ αντίστοιχα. Αρχικά, με τη χρήση λειαντικού τροχού, λειάναμε τις έδρες των πλακών που θα χρησιμοποιηθούν στις εδράσεις και θα έρθουν σε επαφή με τη μέγγενη. Ακόμα, λειάνθηκαν οι έδρες που κατά τη χρήση τους, θα έρθουν σε επαφή μεταξύ τους για τη δημιουργία της βάσης της αντίστοιχης γωνίας.



Εικόνα 2.4 Λειαντικός τροχός

Στη συνέχεια και με τη χρήση κατάλληλου μηχανήματος για κοπή μετάλλων υπό γωνία, προχωρήσαμε στην κοπή των εδράσεων που θα αποτελέσουν τη βάση για τα δοκίμια με συγκεκριμένη γωνία κορυφής. Θα περιγραφεί η διαδικασία κοπής των εδράσεων για το σχηματισμό της βάσης με γωνία δοκιμίου 90 μοιρών. Με αντίστοιχη διαδικασία προέκυψαν και οι βάσεις για τις γωνίες των 60 και 120 μοιρών.

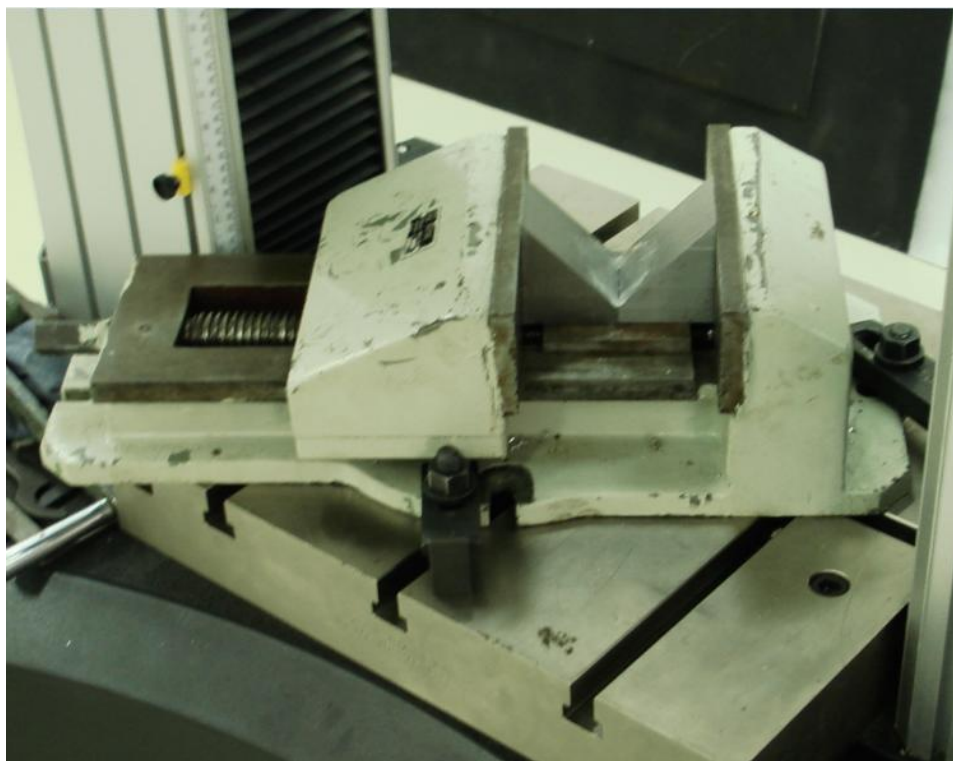
Αρχικά, ρυθμίσαμε την πριονοκορδέλα στις 45 μοίρες. Στη συνέχεια τοποθετήσαμε την πλάκα στη μέγγενη, αφήνοντας περίπου 10 mm της πλάκας να προεξέχουν από την πριονοκορδέλα (τα 10 mm που αφήνουμε, θα αποτελέσουν την πλευρά που θα έρθει σε επαφή με την αντίστοιχη πλευρά της άλλης έδρασης, για το σχηματισμό της βάσης). Ρυθμίζουμε το μετρητή της απόστασης να ακουμπά στο άκρο της πλάκας, έτσι ώστε να διατηρήσουμε τη απόσταση των περίπου 10 mm και για την άλλη έδραση. Στη συνέχεια συσφίγγουμε την πλάκα και προχωρούμε στην κοπή. Αφαιρούμε το κομμένο τεμάχιο και ρυθμίζουμε την πριονοκορδέλα στις 0 μοίρες. Έπειτα, μετακινούμε το τεμάχιο ώστε να ακουμπήσει στο μετρητή. Τέλος, προχωρούμε στην κοπή και έχουμε τις 2 εδράσεις που θα αποτελέσουν τη βάση των 90 μοιρών. Αντίστοιχα δημιουργήθηκαν οι βάσεις των 60 και 120 μοιρών.

Στο σημείο αυτό κι επειδή διαπιστώθηκε ότι η βάση των 60 μοιρών έχει αρκετά μεγάλο πλάτος, το οποίο δεν επιτρέπει στο υλικό να διαφύγει από τη βάση, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η ίδια και ως βάση των 120 μοιρών με διαφορετικό όμως προσανατολισμό. Για να έχουμε όμως, καλύτερη επαφή των εδράσεων για τις 120 μοίρες, προχωρήσαμε σε κατάλληλη κοπή τους, όπως προηγουμένως, ώστε να έχουμε ικανοποιητικό μέτωπο επαφής.

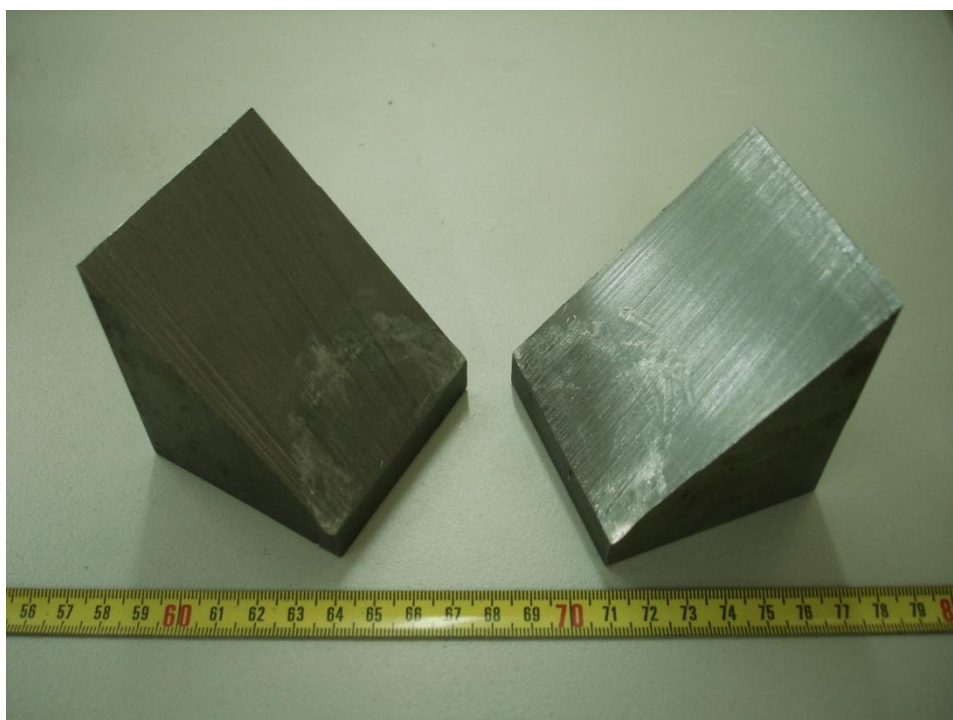


Εικόνα 2.5 Μηχανή κοπής κατά τη διάρκεια της κατεργασίας για τη δημιουργία των εδράσεων.

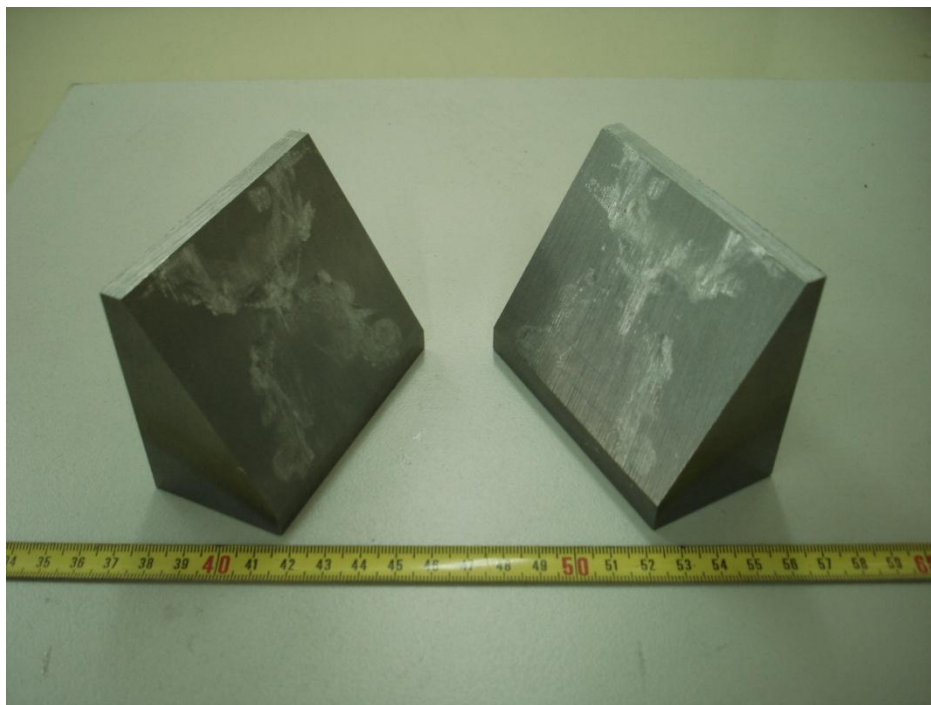
Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες των βάσεων και τις μέγγενης που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών και την εφαρμογή του μηχανισμού triggering που επιλέξαμε.



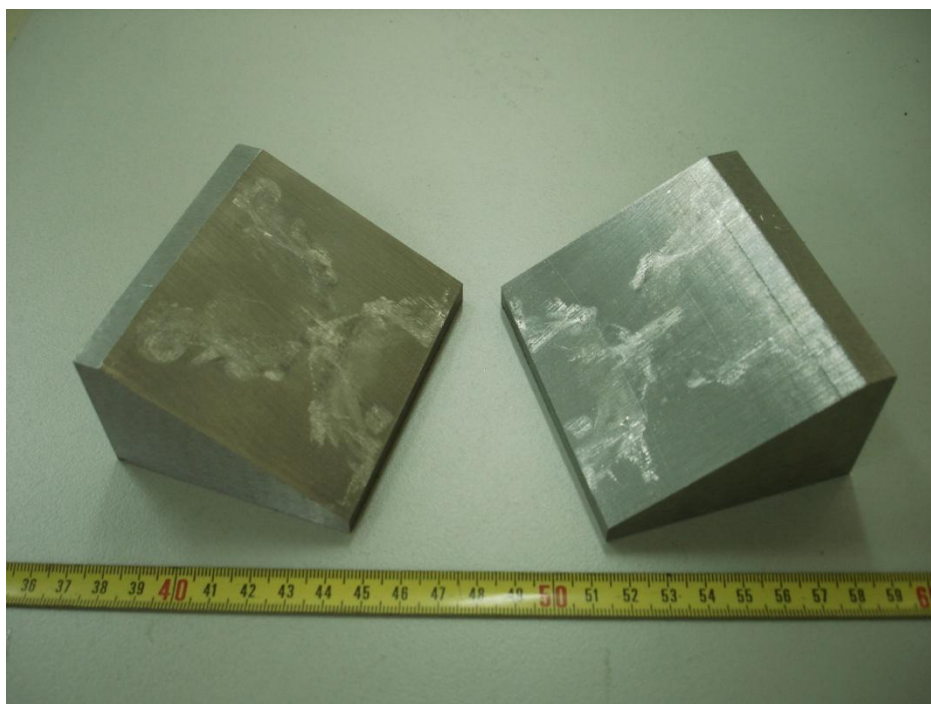
Εικόνα 2.6 Μέγγηση προσδεδεμένη στη μηχανή INSTRON.



Εικόνα 2.7 Βάση 90° με διαστάσεις έδρασης: μήκος = 64 mm, ύψος = 77 mm , πλάτος = 65 mm.



Εικόνα 2.8 Βάση 60° με διαστάσεις έδρασης: μήκος = 45 mm , ύψος = 75 mm, πλάτος = 92 mm.



Εικόνα 2.9 Βάση 120° με διαστάσεις έδρασης: μήκος = 75 mm, ύψος = 45 mm, πλάτος = 92 mm.

Τέλος , πρέπει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιήθηκε μια χαλύβδινη πλάκα διαστάσεων: μήκος 153 mm, πλάτος 79 mm και ύψος 11 mm, η οποία τοποθετήθηκε πάνω στη μέγγενη, έτσι ώστε οι βάσεις να εδράζονται σωστά εντός της μέγγενης.



Εικόνα 2.10 Βάση τοποθετημένη πάνω στην πλάκα εντός της μέγγενης.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημανθεί ότι χρησιμοποιήθηκε φωτογραφική μηχανή, για τη λήψη φωτογραφιών που απεικονίζουν την κατάρρευση των δοκιμίων σε στάδια, οι οποίες θα παρουσιασθούν στη συνέχεια.

2.3 Πειραματικά Δοκίμια

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική μελέτη είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο. Ελήφθησαν από ράβδους υλικού μήκους 6 μέτρων που προήλθαν από διέλαση (extrusion). Όλα τα δοκίμια έχουν μήκος $L = 150$ mm και πάχος $t = 2$ mm. Τα κυλινδρικά δοκίμια έχουν όλα διάμετρο 50 mm. Τέλος, τα τετραγωνικά δοκίμια έχουν διατομή 40 mm x 40 mm.

Διαδικασία κατασκευής δοκιμίων

Κυλινδρικά δοκίμια

Από την κυλινδρική ράβδο μήκους 6 m, κόπηκαν 6 δοκίμια μήκους 170 mm στη μηχανή κοπής. Στη συνέχεια, για τη διαμόρφωση γωνίας κορυφής 90 μοιρών, για δύο από αυτά, ρυθμίσαμε την προνοκορδέλα σε γωνία 45 μοιρών και τοποθετήσαμε το δοκίμιο. Αρχικά, κόπηκε η μία πλευρά της γωνίας κορυφής του κυλινδρικού σωλήνα και στη συνέχεια με κατάλληλη τοποθέτηση, ώστε να έχουμε συμμετρική κοπή, διαμορφώθηκε και η άλλη.

Τέλος, για την επίτευξη του επιθυμητού μήκους των 150 mm, το δοκίμιο τοποθετήθηκε στον τόρνο για την αφαίρεση των επιπλέον χιλιοστών. Με αντίστοιχη διαδικασία προέκυψαν και τα υπόλοιπα κυλινδρικά τεμάχια με τη διαφορά όμως, ότι το πριόνι ρυθμίζονταν κάθε φορά, στο ήμισυ της γωνίας κορυφής που θέλαμε να δημιουργήσουμε. Επιπλέον, κόπηκαν δύο ακόμα κυλινδρικά δοκίμια μήκους 150 mm, χωρίς διαμόρφωση άκρου.



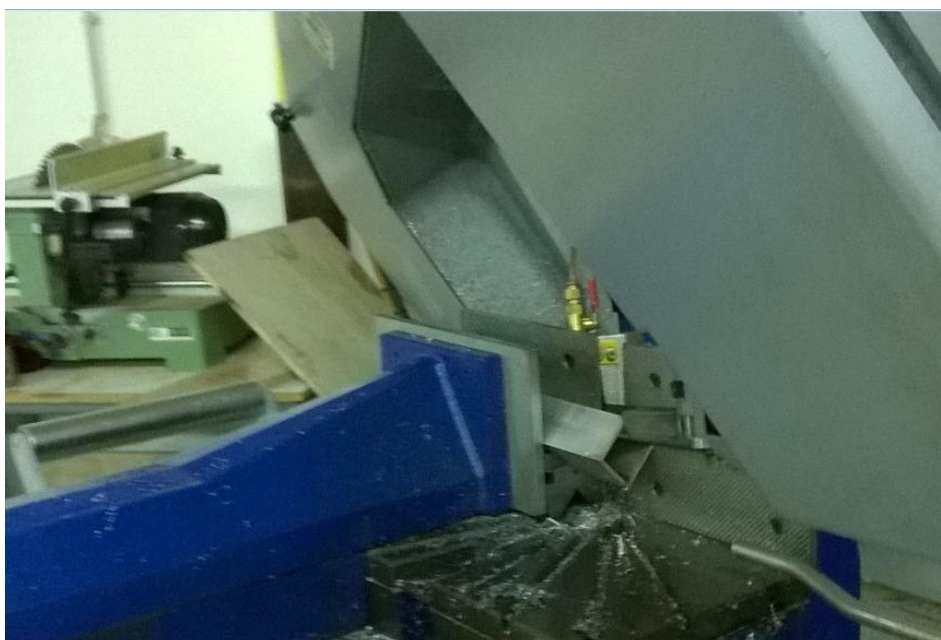
Εικόνα 2.11 Τοποθέτηση κυλινδρικού δοκιμίου στη μηχανή κοπής και χρήση αποστατήρα για τη συμμετρική διαμόρφωση της γωνίας κορυφής του.

Τετραγωνικά δοκίμια

Για τη δημιουργία των τετραγωνικών δοκιμίων, από ορθογωνική ράβδο τετραγωνικής διατομής μήκους 6 μέτρων, κόπηκαν 8 δοκίμια στη μηχανή κοπής. Τα έξι από αυτά κόπηκαν σε μήκος περίπου 170 mm, ενώ τα υπόλοιπα δύο κόπηκαν σε μήκος 150 mm, αφού δε θα διαμορφωθούν τα άκρα τους. Για τη διαμόρφωση γωνίας κορυφής 60° , ρυθμίστηκε η πριονοκορδέλα σε γωνία 30° , ενώ το δοκίμιο τοποθετήθηκε στη μηχανή κοπής με τέτοιο τρόπο, ώστε η κοπή να ξεκινήσει από το μέσον του. Στη συνέχεια και για τη διαμόρφωση της άλλης πλευράς της γωνίας κορυφής, το δοκίμιο τοποθετήθηκε στην ίδια απόσταση (χρήση αποστατήρα), ώστε η κοπή να ξεκινήσει από το ίδιο ακριβώς σημείο. Τέλος, για την επίτευξη του επιθυμητού μήκους των 150 mm, μετρήθηκε το αντίστοιχο μήκος από την κορυφή της γωνίας και χαράχθηκε ώστε να αφαιρεθούν τα επιπλέον χιλιοστά, στη μηχανή κοπής. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για τη διαμόρφωση των υπολοίπων γωνιών κορυφής στην τετραγωνική διατομή.

Λοξά τετραγωνικά δοκίμια

Με τον όρο αυτό, αναφερόμαστε σε τετραγωνικής διατομής δοκίμια, τα οποία έχουν στραφεί κατά γωνία 45° από το οριζόντιο επίπεδο για τη διαμόρφωση των γωνιών κορυφής τους. Για την κατασκευή των δοκιμίων κόπηκαν 6 τεμάχια από τη ράβδο αρχικού μήκους 6 m. Τα δοκίμια είχαν αρχική διάσταση περίπου 170 mm και μετά τη διαδικασία διαμόρφωσης της γωνίας κορυφής, κόπηκαν στα 150 mm. Για τη διαμόρφωση της γωνίας κορυφής των δοκιμίων, ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με τις προηγούμενες, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιήθηκε βάση γωνίας 90° για τη συγκράτηση του τεμαχίου υπό γωνία 45° κατά την κοπή.



Εικόνα 2.12 Κοπή λοξού τετραγωνικού δοκιμίου με τη χρήση βάσης γωνίας 90° .

Περιγραφή πειραματικών δοκιμίων

Για συντομία, τα δοκίμια θα περιγράφονται από το σχήμα της διατομής και τη γωνία κορυφής. Το μήκος τους είναι σταθερό στα 150 mm, το πάχος τους επίσης στα 2 mm, τα μέν κυλινδρικά έχουν διάμετρο 50 mm, τα δε τετραγωνικά έχουν διατομή 40mm x 40 mm. Έτσι έχουμε ενδεικτικά:

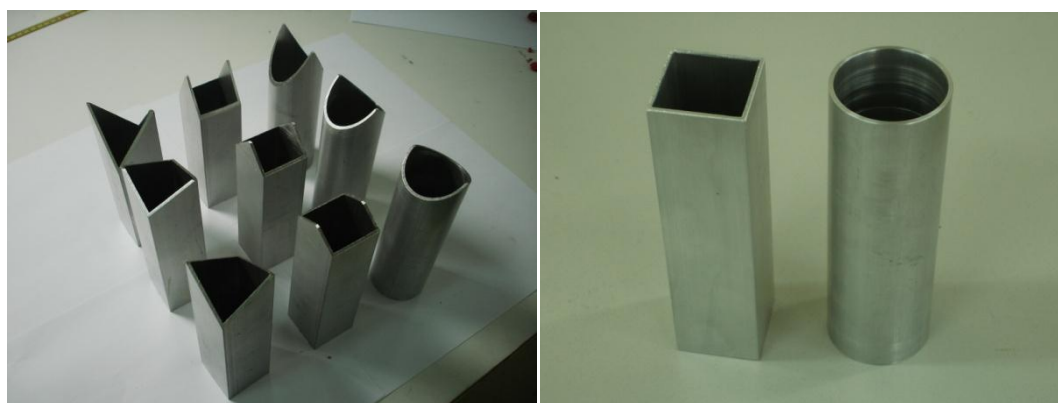
- 1^{ος} τετραγωνικός 60° (40x40x2 - 60 _1)
- 2^{ος} κυλινδρικός 60° (Φ50x2 -90 _2)
- 1^{ος} λοξός τετραγωνικός 90° (40x40x2-90_1oxos_1)

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών.

Πίνακας 2.1 Συνοπτική παρουσίαση των δοκιμών.

Αριθμός Δοκιμίου	Ταυτότητα Δοκιμίου	Γεωμετρία	Διατομή	Γωνία Κορυφής	Μήκος (mm)	Πάχος (mm)
1	Φ50x2-90_1	κυλινδρικός	κυκλική	90°	150	2
2	Φ50x2-90_2	κυλινδρικός	κυκλική	90°	150	2
3	40x40x2-90_loxos_1	ορθογωνικός	Λοξή Τετραγωνική	90°	150	2
4	40x40x2-90_loxos_2	ορθογωνικός	Λοξή Τετραγωνική	90°	150	2
5	40x40x2- 90_1	ορθογωνικός	τετραγωνική	90°	150	2
6	40x40x2- 90_2	ορθογωνικός	τετραγωνική	90°	150	2
7	Φ50x2 -60_1	κυλινδρικός	κυκλική	60°	150	2
8	Φ50x2 -60_2	κυλινδρικός	κυκλική	60°	150	2
9	40x40x2-60_loxos_1	ορθογωνικός	Λοξή Τετραγωνική	60°	150	2
10	40x40x2-60_loxos_2	ορθογωνικός	Λοξή Τετραγωνική	60°	150	2
11	40x40x2-60_1	ορθογωνικός	τετραγωνική	60°	150	2
12	40x40x2- 60_2	ορθογωνικός	τετραγωνική	60°	150	2
13	Φ50x2-120_1	κυλινδρικός	κυκλική	120°	150	2
14	Φ50x2-120_2	κυλινδρικός	κυκλική	120°	150	2
15	40x40x2-120_loxos_1	ορθογωνικός	Λοξή Τετραγωνική	120°	150	2
16	40x40x2-120_loxos_2	ορθογωνικός	Λοξή Τετραγωνική	120°	150	2
17	40x40x2-120_1	ορθογωνικός	τετραγωνική	120°	150	2

18	40x40x2-120_2	ορθογωνικός	τετραγωνική	120°	150	2
19	Φ50x2_1	κυλινδρικός	κυκλική	-	150	2
20	Φ50x2_2	κυλινδρικός	κυκλική	-	150	2
21	40x40x2_1	ορθογωνικός	τετραγωνική	-	150	2
22	40x40x2_2	ορθογωνικός	τετραγωνική	-	150	2



Εικόνα 2.13 Δοκίμια με διαμόρφωση άκρου αριστερά και χωρίς διαμόρφωση δεξιά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Παρουσίαση και επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, αρχικά, θα παρουσιαστούν οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης, το μέσο και μέγιστο φορτίο, η ενεργειακή απορρόφηση και ο τρόπος κατάρρευσης των δοκιμίων. Στη συνέχεια, θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Έπειτα, θα διαπιστωθεί η επαναληψιμότητα των πειραματικών δοκιμών, καθώς θα συγκριθούν δοκίμια με την ίδια ακριβώς γεωμετρία, τις ίδιες διαστάσεις και τις ίδιες γωνίες κορυφής. Επίσης, θα γίνει σύγκριση των δοκιμίων που έχουν την ίδια γωνία κορυφής, αλλά διαφορετική διατομή (για παράδειγμα σύγκριση κυλινδρικού, τετραγωνικού και λοξού τετραγωνικού δοκιμίου στις 90 μοίρες). Ακόμα, θα συγκριθούν δοκίμια με την ίδια διατομή, αλλά με διαφορετικές γωνίες κορυφής (για παράδειγμα: τετραγωνικός 60°, 90°, 120°). Τέλος, θα συγκρίνουμε τα δοκίμια χωρίς διαμόρφωση, με αυτά με την αντίστοιχη διατομή με διαμόρφωση άκρου, ώστε να παρατηρήσουμε την επίδραση της συγκεκριμένης γεωμετρίας triggering στον τρόπο κατάρρευσης, την ενεργειακή απορρόφηση αλλά και το μέσο και μέγιστο φορτίο.

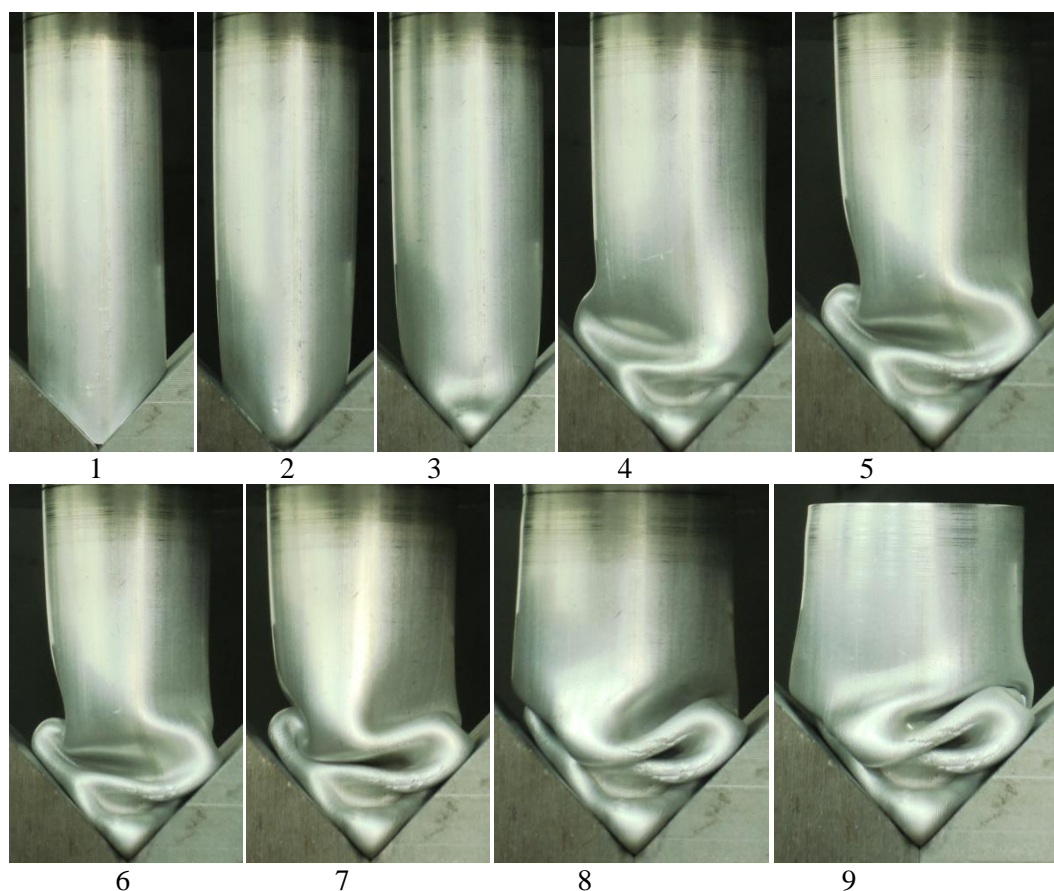
Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημανθεί ότι για την καλύτερη εποπτεία του τρόπου κατάρρευσης, ελήφθησαν φωτογραφίες των δοκιμίων τη στιγμή της φόρτισης, ενώ παράλληλα καταγράφονταν η μετατόπιση του εμβόλου. Με τον τρόπο αυτό, συνδέονται τα στιγμιότυπα του πειράματος (διαδοχικές φωτογραφίες του δοκιμίου κατά τη φόρτιση) με τα αντίστοιχα σημεία της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης.

3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών

3.2.1 Κυλινδρικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°

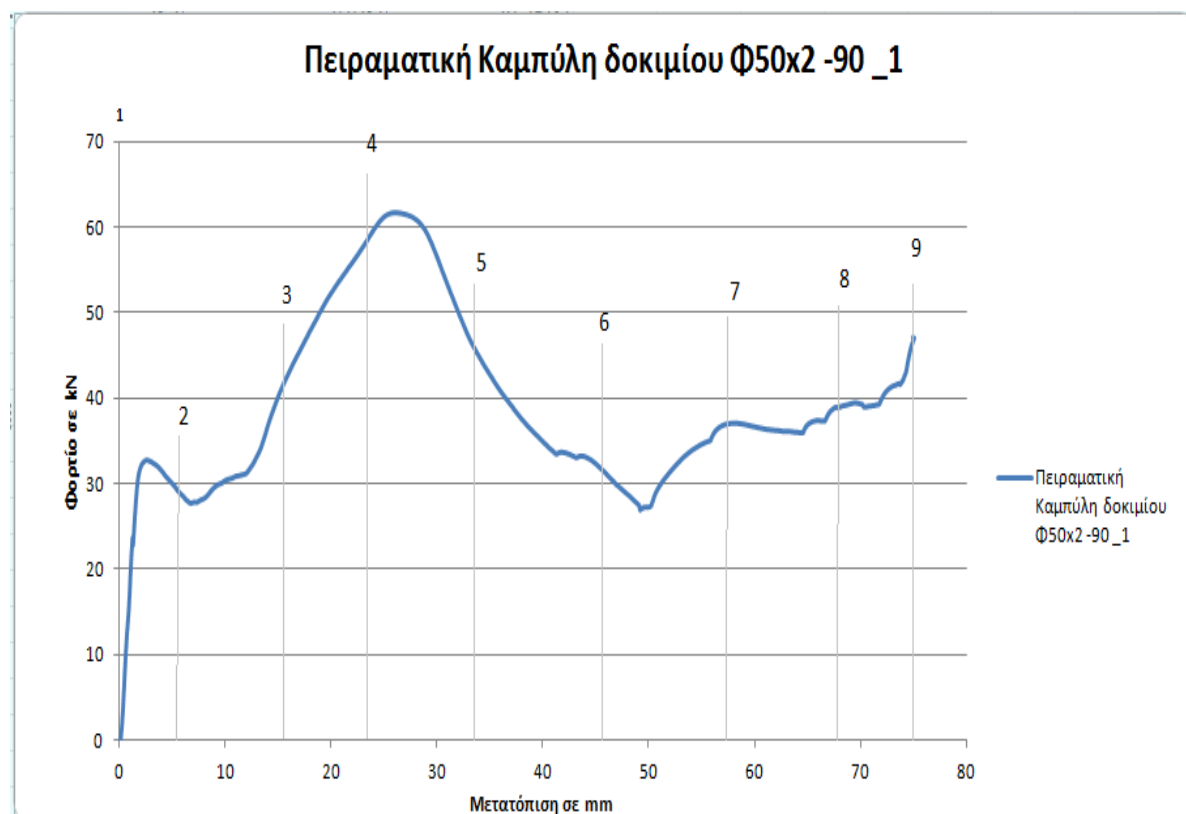
3.2.1.1 1^ο κυλινδρικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 90° (Φ50x2 -90 _1)

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα από τη φόρτιση του πρώτου κυλινδρικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 90°.



Εικόνα 3.1 Κατάρρευση του δοκιμίου Φ50x2 -90 _1 σε 9 στιγμιότυπα, από την αρχή της παραμόρφωσης (εικόνα 1 πάνω αριστερά) έως το τέλος (εικόνα 9 κάτω δεξιά) σε 75 mm μετατόπισης εμβόλου.

Με την εισαγωγή στο Excel των πειραματικών δεδομένων για το φορτίο και τη μετατόπιση που προήλθαν από το πρόγραμμα Bluehill, προέκυψε η ακόλουθη καμπύλη φορτίου – μετατόπισης.



Διάγραμμα 3.1 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 1^ο κυλινδρικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 90°.

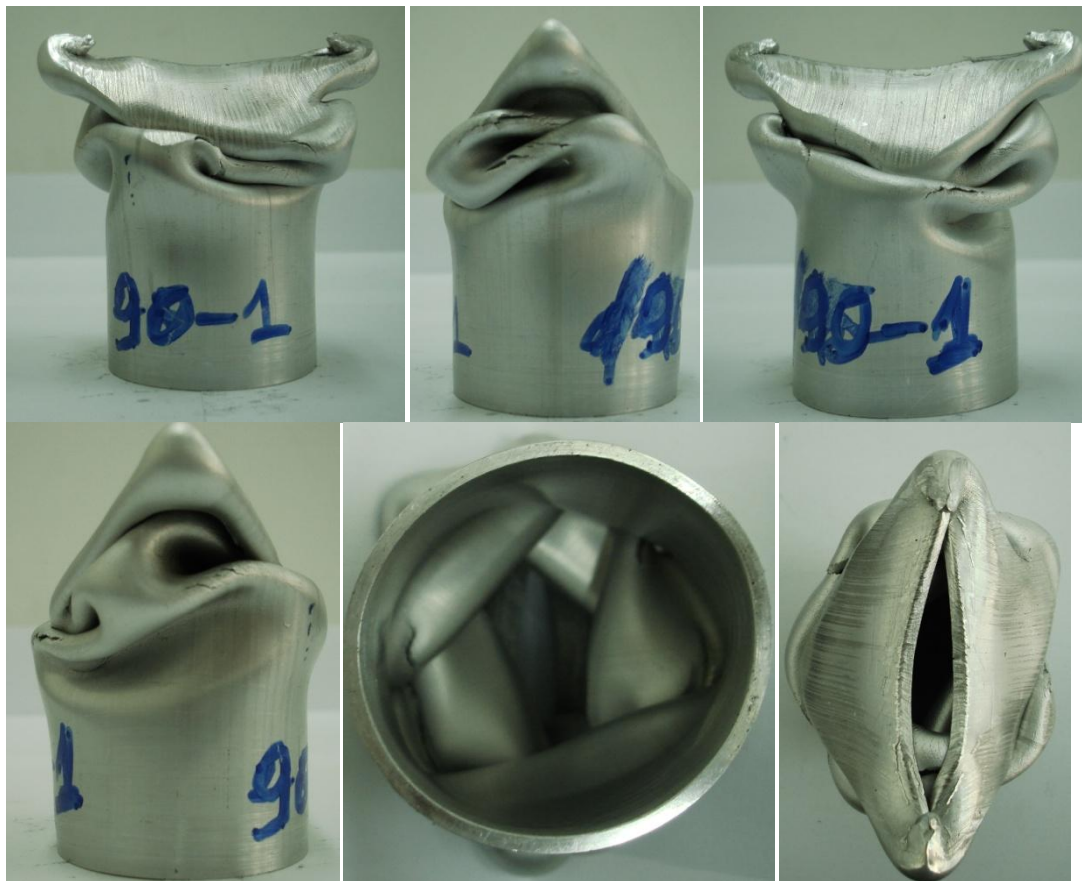
Στο παραπάνω διάγραμμα, οι αριθμημένες γραμμές που τέμνουν κάθετα την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, αντιστοιχούν στα αριθμημένα στιγμιότυπα της προηγούμενης εικόνας. Έτσι, μπορούμε να παρατηρήσουμε κάθε φορά την εξέλιξη της κατάρρευσης με την πορεία της καμπύλης.

Το μέσο και το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης crush force efficiency c.f.e. παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου Φ50x2 -90 _1.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
Φ50x2 -90 _1	39,2155	61,79787	2,941168	1,57585

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες διαφόρων όψεων του δοκιμίου μετά την κατάρρευση ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τον τρόπο κατάρρευσης.



Εικόνα 3.2 Τελικές όψεις του δοκίμιου Φ50x2 -90_1.

Συγγραμμισμός Αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Από τις παραπάνω εικόνες, παρατηρούμε ότι το δοκίμιο κατάρρει σχηματίζοντας μη εκτατούς λοβούς, δηλαδή σύμφωνα με τη μορφή κατάρρευσης diamond mode. Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην κάτωψη, οι λοβοί που σχηματίζονται έχουν ελλειψοειδή μορφή και βρίσκονται σε διαδοχικά επίπεδα, ο καθένας στραμμένος κατά 90° σε σχέση με τον προηγούμενο, πράγμα που αποτελεί χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου τρόπου κατάρρευσης. Σε ότι αφορά επιμέρους χαρακτηριστικά της κατάρρευσης, παρατηρούμε ότι σε κάποια σημεία παρουσιάζεται θραύση, πράγμα το οποίο επιβεβαιώνεται από την πειραματική καμπύλη, αφού βλέπουμε μικρές στιγμιαίες πτώσεις του φορτίου που οφείλονται σε αυτήν.

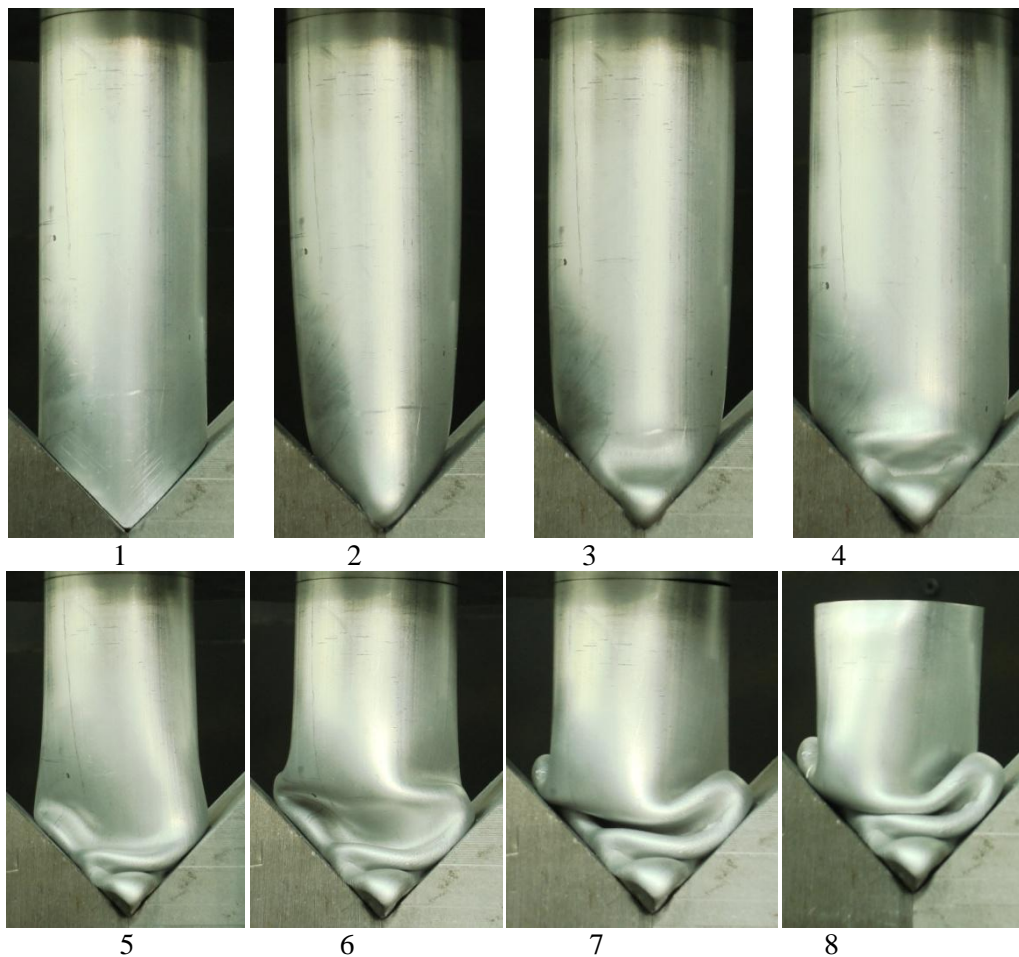
Εξετάζοντας τώρα, την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης που προέκυψε από το πείραμα, παρατηρούμε ότι το μέγιστο φορτίο δεν είναι ταυτόχρονα και το πρώτο τοπικό μέγιστο της καμπύλης, όπως συμβαίνει συνήθως. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι λόγω της ειδικής διαμόρφωσης του δοκιμίου, παρουσιάζεται συγκέντρωση τάσης και η κατάρρευση ξεκινά από την ειδικά διαμορφωμένη γεωμετρία. Έτσι η αρχική παραμόρφωση και ο σχηματισμός του πρώτου λοβού, ξεκινά από την περιοχή όπου έχει αφαιρεθεί υλικό και κατά συνέπεια το δοκίμιο δε μπορεί να παραλάβει μεγάλα φορτία κατά την κατάρρευση. Επίσης, παρατηρούμε ότι το πρώτο peak του φορτίου εμφανίζεται σε σχετικά μικρή μετατόπιση του εμβόλου. Αυτό αποτελεί μια επιπρόσθετη εξήγηση για το γεγονός ότι δεν έχουμε σε αυτήν την περιοχή το ολικό μέγιστο του φορτίου, αφού δε συμπεριλαμβάνεται αρκετά μεγάλη περιοχή του δοκιμίου (περισσότερο υλικό) ώστε να παραλάβει μεγάλα φορτία.

Στη συνέχεια, βλέπουμε ότι το μέγιστο φορτίο των 62 kN περίπου, παρουσιάζεται σε μετατόπιση περίπου 26 mm. Έτσι, μπορεί να διαπιστωθεί ότι αμέσως μετά την κατάρρευση της περιοχής που βρίσκεται εντός της βάσης και το σχηματισμό λοβών, το υλικό γίνεται πιο στιβαρό, αφού πλέον εμπεριέχεται στην κατάρρευση και την απορρόφηση ενέργειας μεγαλύτερο μέρος του υλικού του δοκιμίου. Επίσης, παρατηρούμε ότι τα επόμενα (τοπικά) μέγιστα είναι αρκετά μικρότερα, πράγμα αναμενόμενο κατά την πρόοδο της φόρτισης, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι προς το τέλος της φόρτισης παρατηρείται μια σημαντική αύξηση του φορτίου. Τέλος, οι θραύσεις που παρατηρούνται στις τελικές όψεις του δοκιμίου, εμφανίζονται στην καμπύλη φορτίου – θραύσης μετά το ολικό μέγιστο.

Για να διαπιστωθεί η επαναληψιμότητα της συμπεριφοράς των κυλινδρικών δοκιμίων με αντίστοιχη διαμόρφωση γωνίας 90° , πραγματοποιήθηκε και άλλη δοκιμή με τις ίδιες πειραματικές συνθήκες, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στη συνέχεια.

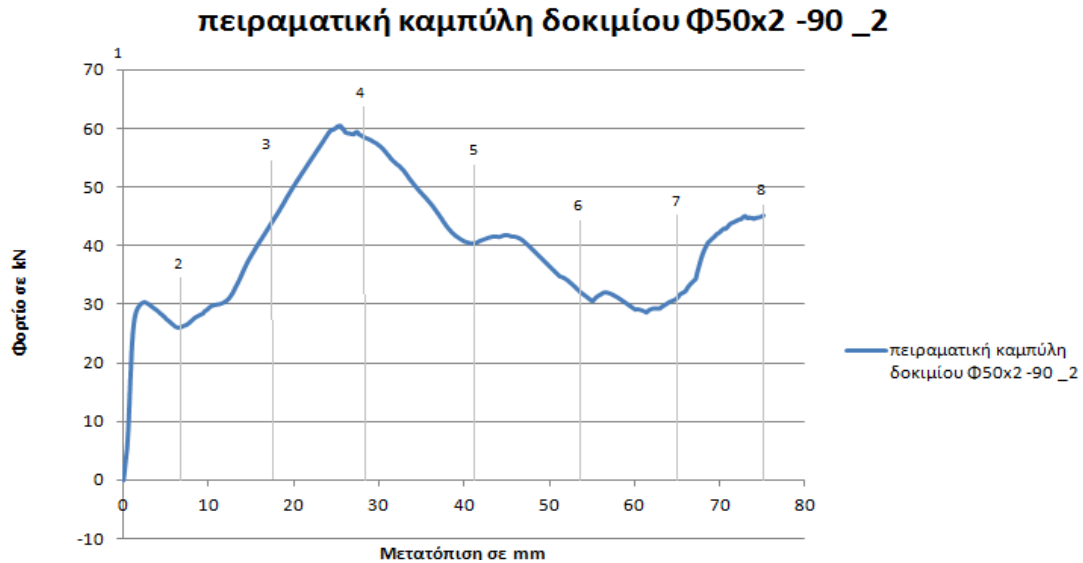
3.2.1.2 2^ο κυλινδρικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 90° (Φ50x2 -90 _2)

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα από τη φόρτιση του δευτέρου κυλινδρικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 90°.



Εικόνα 3.3 Κατάρρευση του δοκιμίου Φ50x2 -90 _2 σε 8 στιγμιότυπα, από την αρχή της παραμόρφωσης (εικόνα 1) έως το τέλος (εικόνα 8) σε 75 mm μετατόπισης εμβόλου.

Στη συνέχεια, παρατίθεται η πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το δοκίμιο στην οποία έχουν σημειωθεί τα αντίστοιχα σημεία από τα παραπάνω στιγμιότυπα.



Διάγραμμα 3.2 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 2^ο κυλινδρικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 90°.

Το μέσο και το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης crush force efficiency c.f.e. παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου Φ50x2 -90 _2

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
Φ50x2 -90 _2	39,698647	60,34823	2,9773	1,52015

Ακολουθεί η παρουσίαση όψεων του δοκιμίου μετά το πέρας της κατάρρευσης.



Εικόνα 3.4 Τελικές όψεις του δοκιμίου Φ50x2 -90 _2, μετά την κατάρρευση.

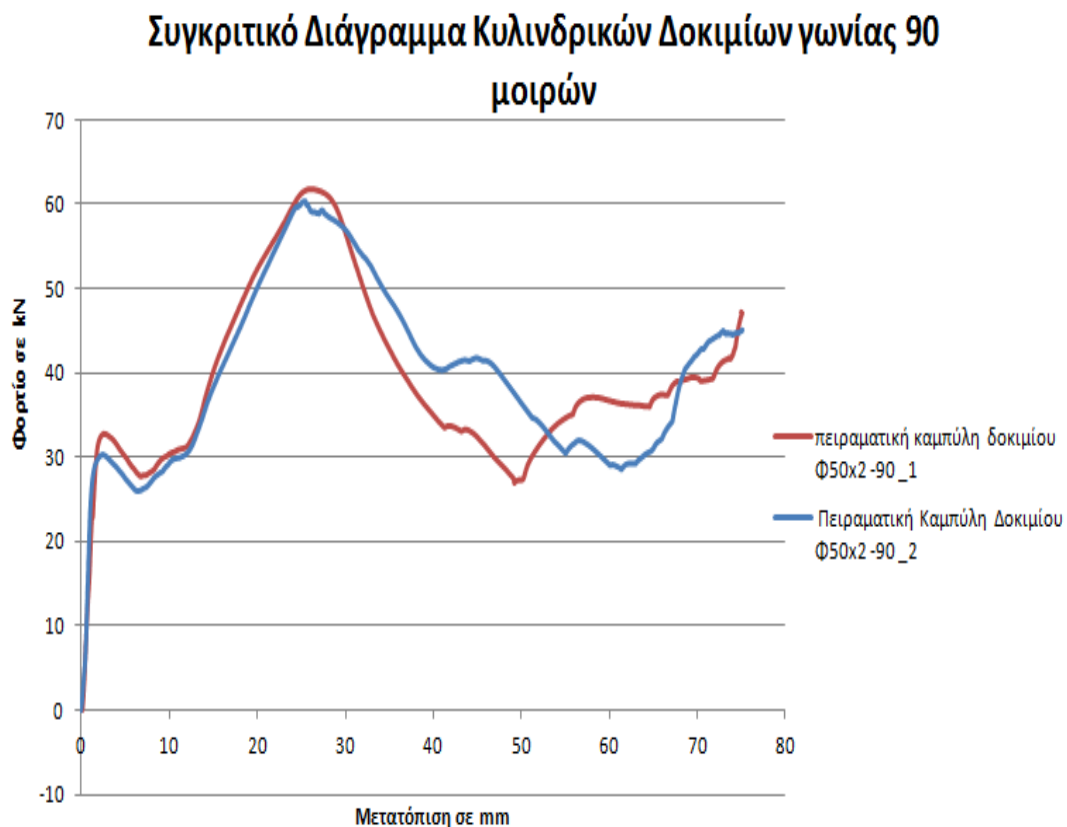
Συμπεράσματα – Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, παρατηρούμε ότι και το συγκεκριμένο δοκίμιο καταρρέει σχηματίζοντας μη εκτατούς ελλειψοειδείς λοβούς. Ακόμα, η μορφή της καμπύλης μας οδηγεί στο να εξάγουμε παρόμοια συμπεράσματα με αυτά του προηγούμενου δοκιμίου.

Έτσι, για να διαπιστώσουμε το κατά πόσο συμπίπτουν τα αποτελέσματα των πειραμάτων για τα δυο δοκίμια θα παρουσιάσουμε συγκριτικά τις 2 πειραματικές καμπύλες και τους πίνακες με τα βασικά μεγέθη .

3.2.1.3 Σύγκριση των 2 κυλινδρικών δοκιμίων με γωνία κορυφής 90° (Φ50x2 -90 _1 , Φ50x2 -90 _2)

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμίων στο ίδιο διάγραμμα .



Διάγραμμα 3.3 Συγκριτική παρουσίαση πειραματικών καμπυλών των κυλινδρικών δοκιμίων, με γωνία κορυφής 90°.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των 2 κυλινδρικών δοκιμίων .

Πίνακας 3.3 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των κυλινδρικών δοκιμίων, με γωνία κορυφής 90°.

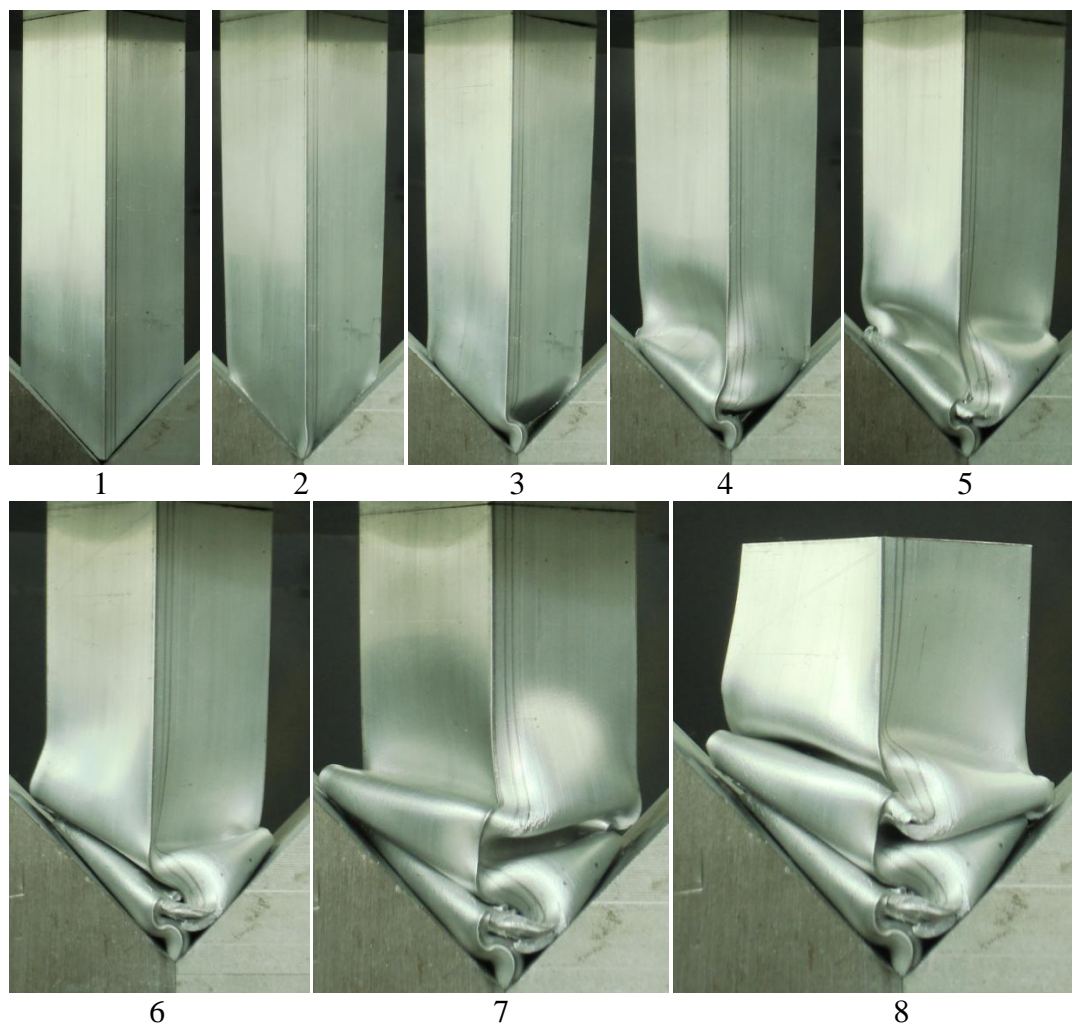
Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
Φ50x2 -90 _1	39,2155	61,79787	2,941168	1,57585
Φ50x2 -90 _2	39,698647	60,34823	2,9773	1,52015
Διαφορά (%)	1,23 %	2,34 %	1,23 %	3,53 %

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, διαπιστώνουμε ότι υπάρχει μικρή διαφορά τόσο στα μεγέθη όσο και στην ίδια τη μορφή των καμπυλών των δυο δοκιμίων. Έτσι παρατηρείται σχετική ταύτιση της συμπεριφοράς των δοκιμίων κατά την κατάρρευση αφού, βλέπουμε ότι τα μέγιστα παρουσιάζονται στις ίδιες περίπου μετατοπίσεις, ενώ το πλαστικό έργο και το μέσο φορτίο παρουσιάζουν πολύ μικρές διαφορές στις τιμές που λαμβάνουν για τα 2 δοκίμια. Επίσης, πρέπει να επισημανθεί ότι στην καμπύλη του δευτέρου δοκιμίου παρουσιάζονται εντονότερες θραύσεις, πράγμα που επιβεβαιώνεται και από τις φωτογραφίες της εικόνας 3.4. Οι εντονότερες θραύσεις του δευτέρου δοκιμίου, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δε μπορεί να επιτευχθεί ομοιογένεια και ισοτροπία στο υλικό των δοκιμίων, μπορούν να ερμηνεύσουν τη διαφορά που υπάρχει στις καμπύλες των δοκιμίων για μετατόπιση μεγαλύτερη των 40 mm. Κατόπιν τούτων, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι εξασφαλίζεται η αναγκαία επαναληψιμότητα που μας επιτρέπει τη γενίκευση των συμπερασμάτων που αφορούν το κυλινδρικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°. Τέλος, το δοκίμιο **Φ50x2 -90 _1**, θα αποτελεί το δοκίμιο αναφοράς για τον κυλινδρικό σωλήνα με γωνία κορυφής 90 μοίρες και θα χρησιμοποιείται στις επόμενες συγκρίσεις .

3.2.2 Λοξό Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°

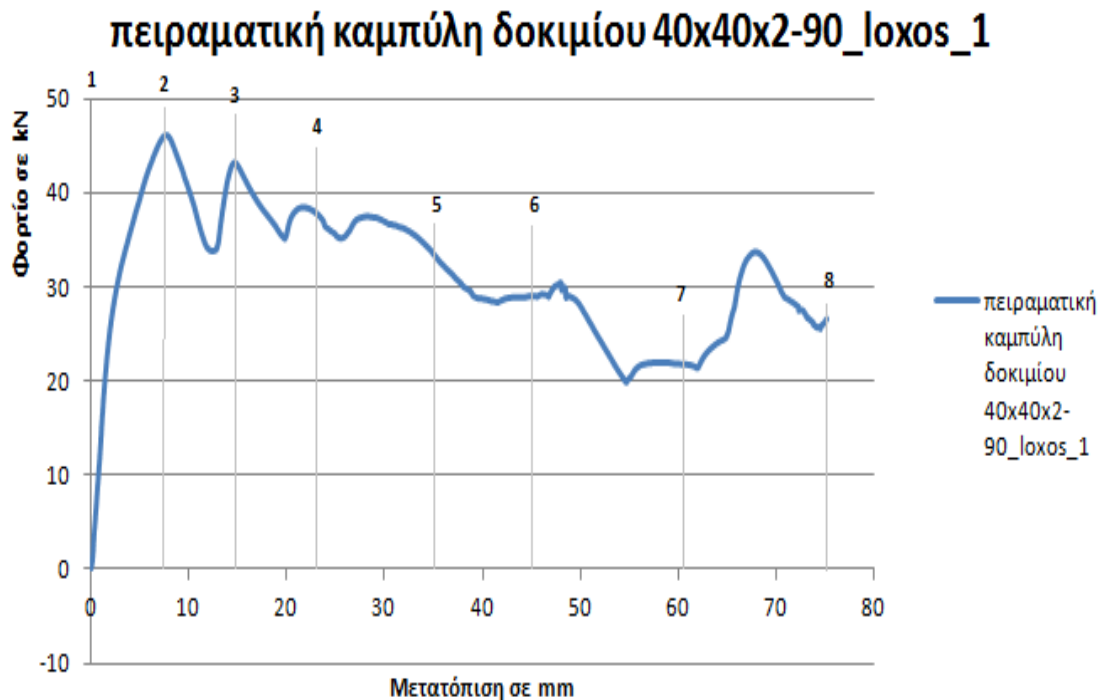
3.2.2.1 1° λοξό τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 90° (40x40x2-90_loxos_1)

Στην εικόνα που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα από τη φόρτιση του πρώτου λοξού τετραγωνικού δοκιμίου, με γωνία κορυφής 90°.



Εικόνα 3.5 Κατάρρευση του δοκιμίου 40x40x2-90_loxos_1 σε 8 στιγμιότυπα, από την αρχή της παραμόρφωσης (εικόνα 1 πάνω αριστερά) έως το τέλος (εικόνα 8 κάτω δεξιά) σε 75 mm μετατόπισης εμβόλου .

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το δοκίμιο στην οποία έχουν σημειωθεί τα αντίστοιχα σημεία από τα παραπάνω στιγμιότυπα .



Διάγραμμα 3.4 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 1^ο λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 90°.

Το μέσο και το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης crush force efficiency c.f.e. παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα .

Πίνακας 3.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου 40x40x2-90_loxos_1.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-90_loxos_1	31,33184643	46,1068	2,349888482	1,471563449

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες των όψεων του δοκιμίου μετά την κατάρρευση, ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τον τρόπο κατάρρευσης.



Εικόνα 3.6 Τελικές όψεις του δοκιμίου 40x40x2-90_1oxos_1, μετά την κατάρρευση.

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

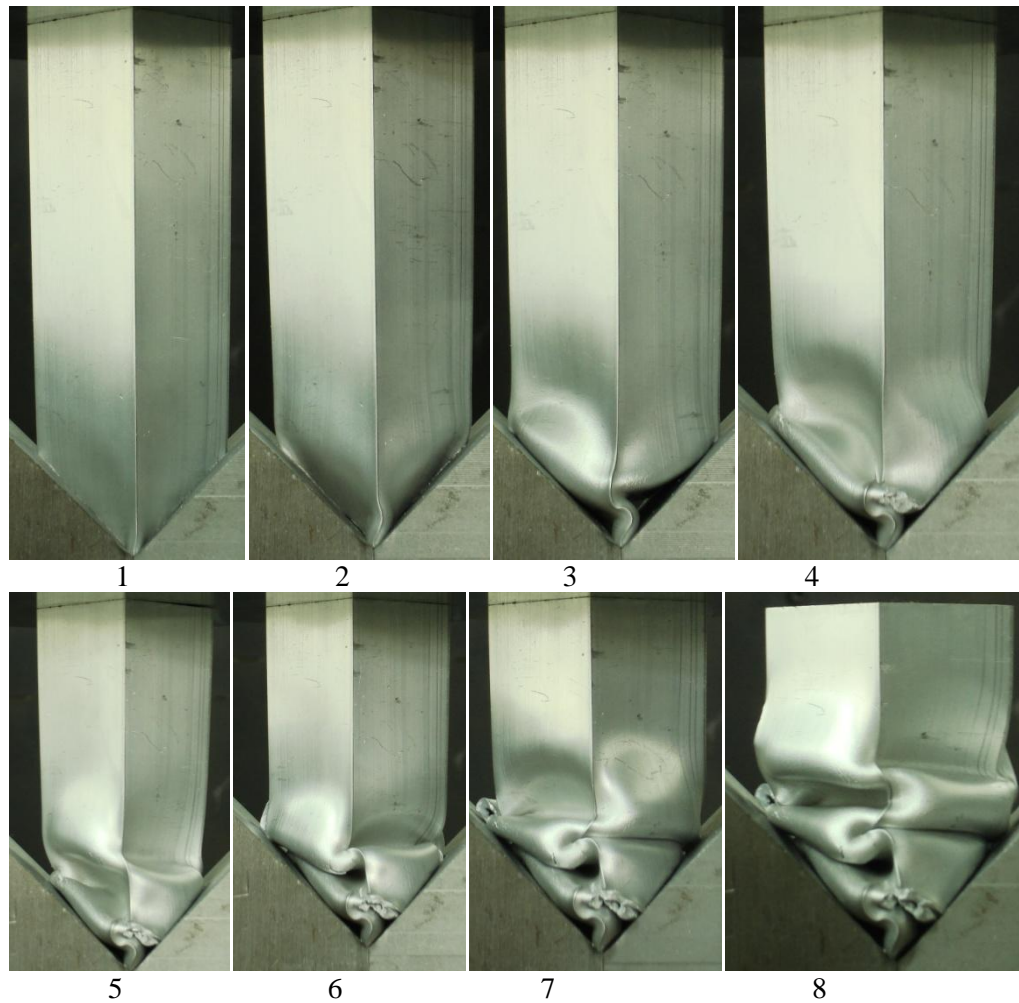
Από τις παραπάνω φωτογραφίες και ιδιαίτερα από την κάτοψη, προκύπτει ότι το δοκίμιο καταρρέει σχηματίζοντας μη εκτατούς λοβούς. Πρόκειται για κατάρρευση σε μορφή 2D - diamond mode, όπου οι λοβοί σχηματίζουν ορθογώνια παραλληλόγραμμα τοποθετημένα διαδοχικά, το ένα πάνω στο άλλο και στραμμένα οριζόντια κατά 90° το καθένα σε σχέση με το προηγούμενό του. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να επισημανθεί η έντονη θραύση που παρουσιάζεται στις ακμές του δοκιμίου. Η θραύση αυτή, μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι εξαιτίας της κατεργασίας της διέλασης από την οποία προήλθε το δοκίμιο, έχουμε αρκετά απόλυτες ακμές, χωρίς την απαραίτητη γωνία καμπυλότητας με αποτέλεσμα να έχουμε υψηλή συγκέντρωση τάσης, η οποία οδηγεί σε θραύση. Πιθανή αντιμετώπισή της, θα μπορούσε να γίνει με ανόπτηση του δοκιμίου (θερμική κατεργασία του αλουμινίου ώστε να αυξηθεί η ολκιμότητα του δοκιμίου).

Εξετάζοντας τώρα την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης που προέκυψε από το πείραμα, παρατηρούμε ότι το ολικό μέγιστο είναι και το πρώτο τοπικό μέγιστο. Όμως, είναι χαρακτηριστικό ότι το 1^ο μέγιστο δεν είναι πολύ υψηλότερο από τα υπόλοιπα τοπικά μέγιστα. Μάλιστα, το 2^ο peak του φορτίου πλησιάζει σημαντικά το ολικό μέγιστο, ενώ και τα άλλα peak δεν έχουν σημαντικές αποκλίσεις. Η συγκεκριμένη μορφή της πειραματικής καμπύλης, οφείλεται στην ειδική διαμόρφωση άκρου (triggering) με την οποία αποφεύγεται η εμφάνιση ενός μεγάλου peak του φορτίου στην αρχή, με αποτέλεσμα να έχουμε μια ομοιόμορφη κατανομή της απορρόφησης ενέργειας κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης του δοκιμίου. Αυτό, επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι δεν έχουμε μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των μεγίστων και ελαχίστων του φορτίου, κάτι που είναι επιθυμητό για την εξασφάλιση ομαλής και όσο το δυνατό μεγαλύτερης απορρόφησης ενέργειας. Τέλος, παρατηρούμε ότι το μέγιστο φορτίο των 46 kN, παρατηρείται σε μετατόπιση μικρότερη των 10 mm, κάτι το οποίο σημαίνει ότι το μέγιστο εμφανίζεται εντός της περιοχής όπου έχουμε την ειδικά διαμορφωμένη γεωμετρία.

Προκειμένου να εξακριβωθεί η επαναληψιμότητα της συμπεριφοράς των λοξών τετραγωνικών δοκιμίων με αντίστοιχη διαμόρφωση γωνίας 90°, πραγματοποιήθηκε και άλλη δοκιμή με τις ίδιες πειραματικές συνθήκες, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στη συνέχεια.

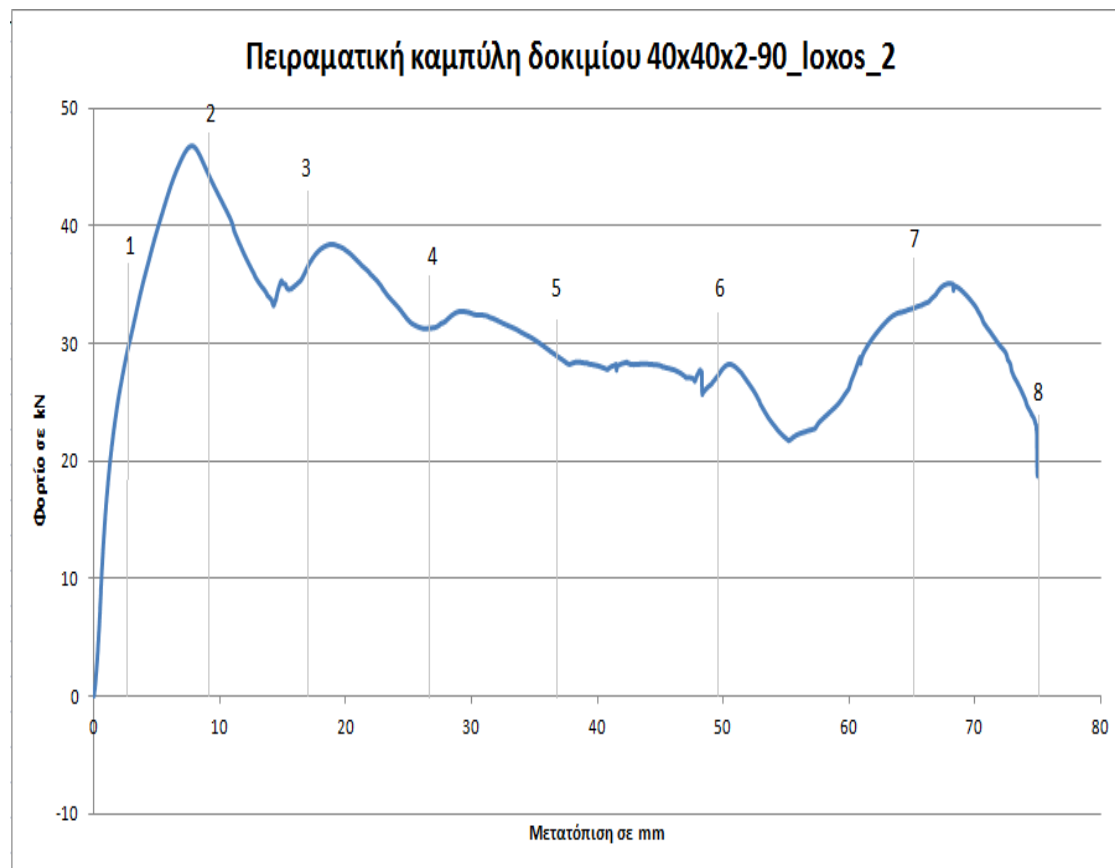
3.2.2.2 2^ο λοξό τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 90° (40x40x2-90_loxos_2)

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα από τη φόρτιση του δευτέρου λοξού τετραγωνικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 90°.



Εικόνα 3.7 Κατάρρευση του δοκίμιου 40x40x2-90_Ioxos_2 σε 8 στιγμιότυπα, από την αρχή της παραμόρφωσης (εικόνα 1) έως το τέλος (εικόνα 8) σε 75 mm μετατόπισης εμβόλου.

Στη συνέχεια, παρατίθεται η πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το δοκίμιο, στην οποία έχουν σημειωθεί τα αντίστοιχα σημεία από τα παραπάνω στιγμιότυπα .



Διάγραμμα 3.5 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 2° λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 90°.

Το μέσο και το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης crush force efficiency c.f.e. παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα .

Πίνακας 3.5 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου 40x40x2-90_Ιoxos_2.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-90_Ιoxos_2	31,28320699	46,83162	2,346240524	1,49702107

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες των όψεων του δοκιμίου μετά την κατάρρευση, ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τον τρόπο κατάρρευσης.



Εικόνα 3.8 Τελικές όψεις του δοκιμίου 40x40x2-90_loxos_2, μετά την κατάρρευση.

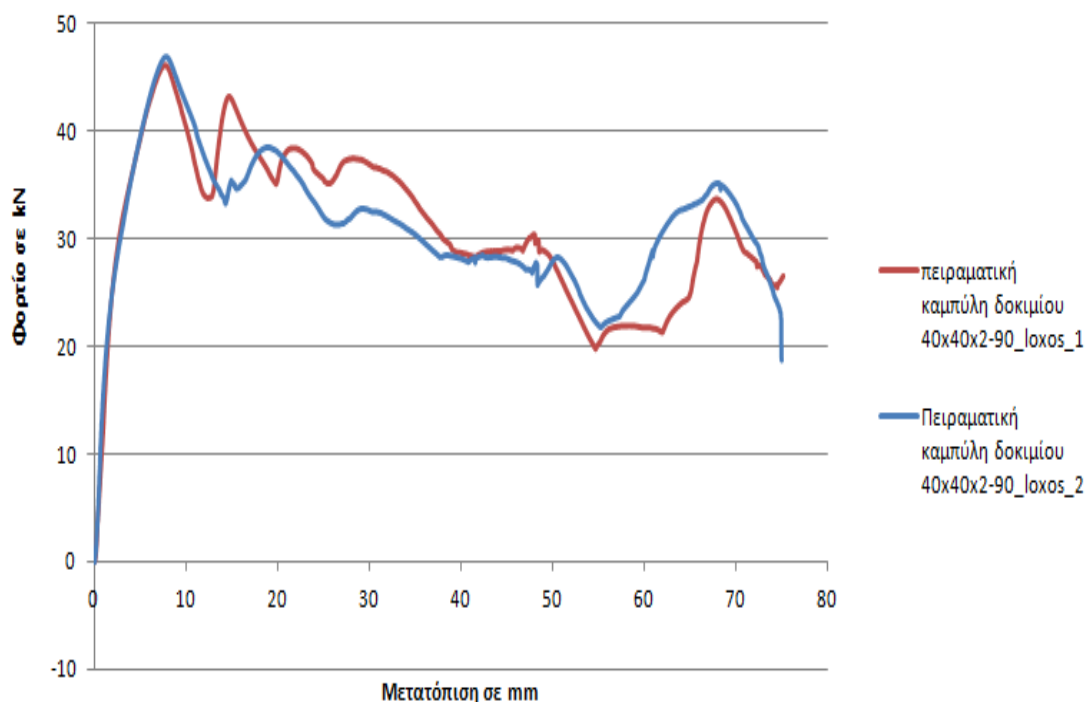
Συμπεράσματα – Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Και το δεύτερο δοκίμιο καταρρέει σχηματίζοντας μη εκτατούς λοβούς όπως ακριβώς και το 1^ο. Επίσης, και αυτό το δοκίμιο παρουσιάζει σε έντονο βαθμό θραύσεις, κάτι που επιβεβαιώνεται και από την πειραματική καμπύλη, όπου εμφανίζονται απότομες μικρές πτώσεις του φορτίου. Τέλος, παρατηρείται ότι τα τοπικά μέγιστα διαφοροποιούνται σημαντικά από το ολικό μέγιστο, σε αντίθεση με το 1^ο δοκίμιο. Το γεγονός αυτό, καθώς και άλλες διαφορές και ομοιότητες θα παρουσιασθούν στη συνέχεια στη σύγκριση που θα πραγματοποιηθεί .

3.2.2.3 Σύγκριση των 2 λοξών τετραγωνικών δοκιμίων με γωνία κορυφής 90° (40x40x2-90_loxos_1 , 40x40x2-90_loxos_2)

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμίων στο ίδιο διάγραμμα.

Συγκριτικό Διάγραμμα Λοξών Τετραγωνικών Δοκιμίων με γωνία κορυφής 90 μοίρες



Διάγραμμα 3.6 Συγκριτική παρουσίαση πειραματικών καμπυλών των λοξών τετραγωνικών δοκιμίων, με γωνία κορυφής 90°.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των 2 λοξών τετραγωνικών δοκιμίων .

Πίνακας 3.6 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των 2 λοξών τετραγωνικών δοκιμίων με γωνία κορυφής 90°.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-90_Ιoxos_1	31,33184643	46,1068	2,349888482	1,471563449
40x40x2-90_Ιoxos_2	31,28320699	46,83162	2,346240524	1,49702107
Διαφορά (%)	0,16 %	1,57 %	0,16 %	1,73 %

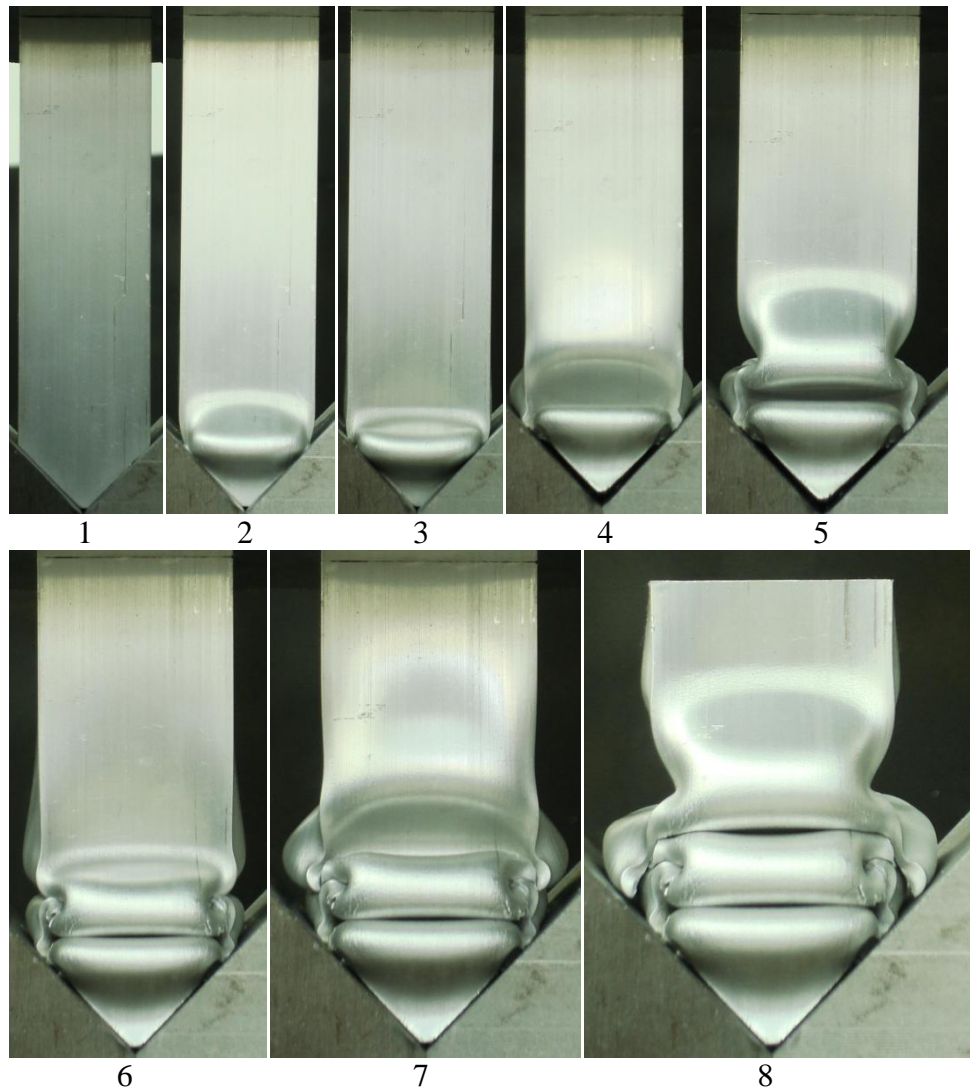
Από τον πίνακα αλλά και το διάγραμμα, προκύπτει ότι υπάρχει ταύτιση τόσο των μεγεθών όσο και της πειραματικής καμπύλης των δοκιμίων. Σχετικά μεγαλύτερη ομοιομορφία στην απορρόφηση ενέργειας παρουσιάζει το πρώτο δοκίμιο, πράγμα που επιβεβαιώνεται από την καμπύλη.

Τώρα, σε ότι αφορά τη διαφορά που υπάρχει μεταξύ των τοπικών μεγίστων, όπου στο δεύτερο δοκίμιο παρουσιάζονται αισθητά χαμηλότερα από το ολικό μέγιστο, οφείλεται στις τοπικές θραύσεις που εμφανίζονται. Έτσι για το 2^ο τοπικό μέγιστο παρατηρείται ότι αμέσως μετά το τοπικό ελάχιστο και την τάση για αύξηση του φορτίου για το σχηματισμό του επόμενου λοβού, έχουμε τοπική θραύση και απότομη μείωση του φορτίου. Η θραύση αυτή μειώνει την ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί από το υλικό, με αποτέλεσμα το μέγιστο φορτίο σε εκείνη την περιοχή, να είναι μικρότερο από το αναμενόμενο. Αυτές οι διαφορές, εντάσσονται στα πλαίσια των αναμενόμενων μικροδιαφορών και μας επιτρέπουν με βάση και τα προηγούμενα στοιχεία να οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι τα 2 δοκίμια παρουσιάζουν ομοιότητες στον τρόπο κατάρρευσης, επομένως διασφαλίζεται η απαραίτητη επαναληψιμότητα, ώστε τα συμπεράσματα να είναι αντιπροσωπευτικά. Κατόπιν τούτων, επιλέγουμε το 1^ο δοκίμιο (40x40x2-90_Ioxos_1) για τις μετέπειτα συγκρίσεις, αλλά και για τα συμπεράσματα που προέκυψαν για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 90°, ως ενδεικτικό της συγκεκριμένης κατηγορίας .

3.2.3 Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°

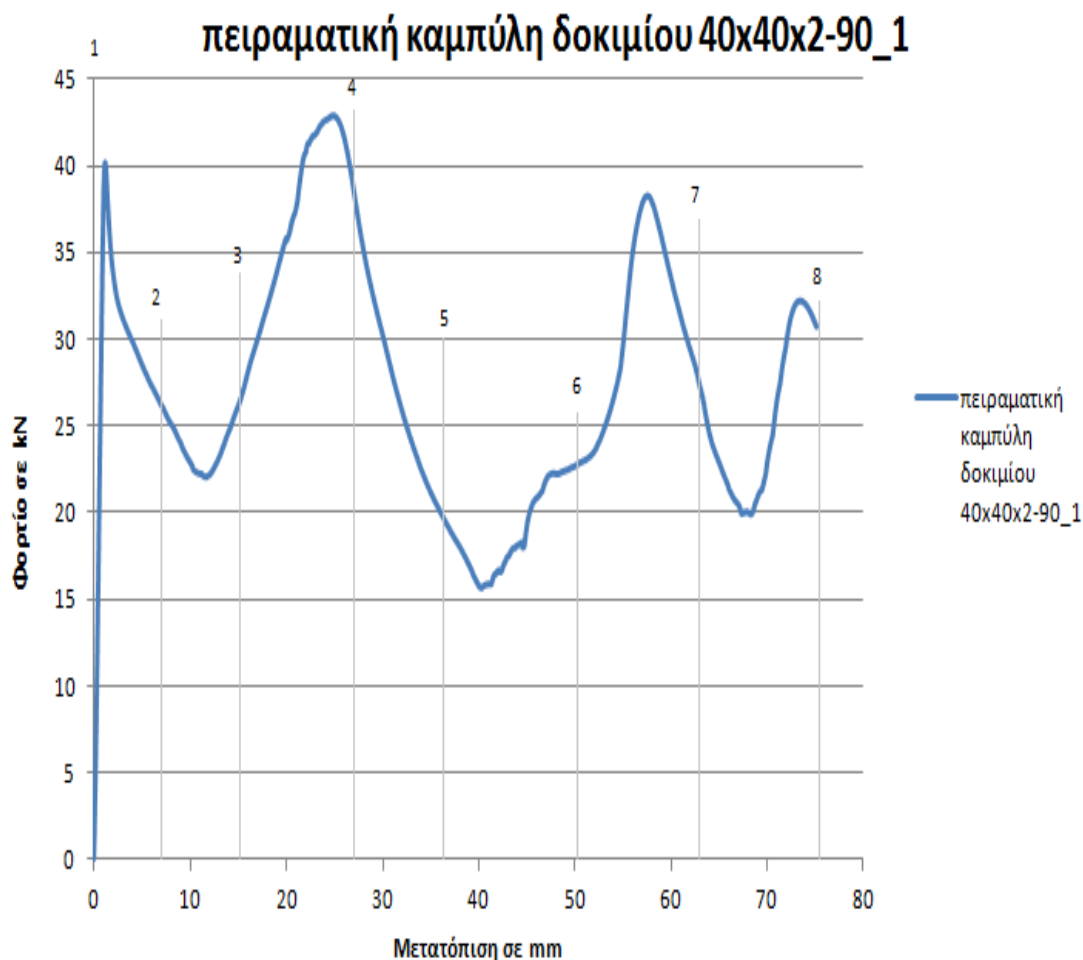
3.2.3.1 1ο τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 90ο (40x40x2-90_1)

Στην εικόνα που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα από τη φόρτιση του πρώτου τετραγωνικού δοκιμίου, με γωνία κορυφής 90°.



Εικόνα 3.9 Κατάρρευση του δοκιμίου 40x40x2-90_1 σε 8 στιγμιότυπα, από την αρχή της παραμόρφωσης (εικόνα 1 πάνω αριστερά) έως το τέλος (εικόνα 8 κάτω δεξιά) σε 75 mm μετατόπισης εμβόλου.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το συγκεκριμένο δοκίμιο, πάνω στην οποία εμφανίζονται τα σημεία που αντιστοιχούν στα παραπάνω στιγμιότυπα .



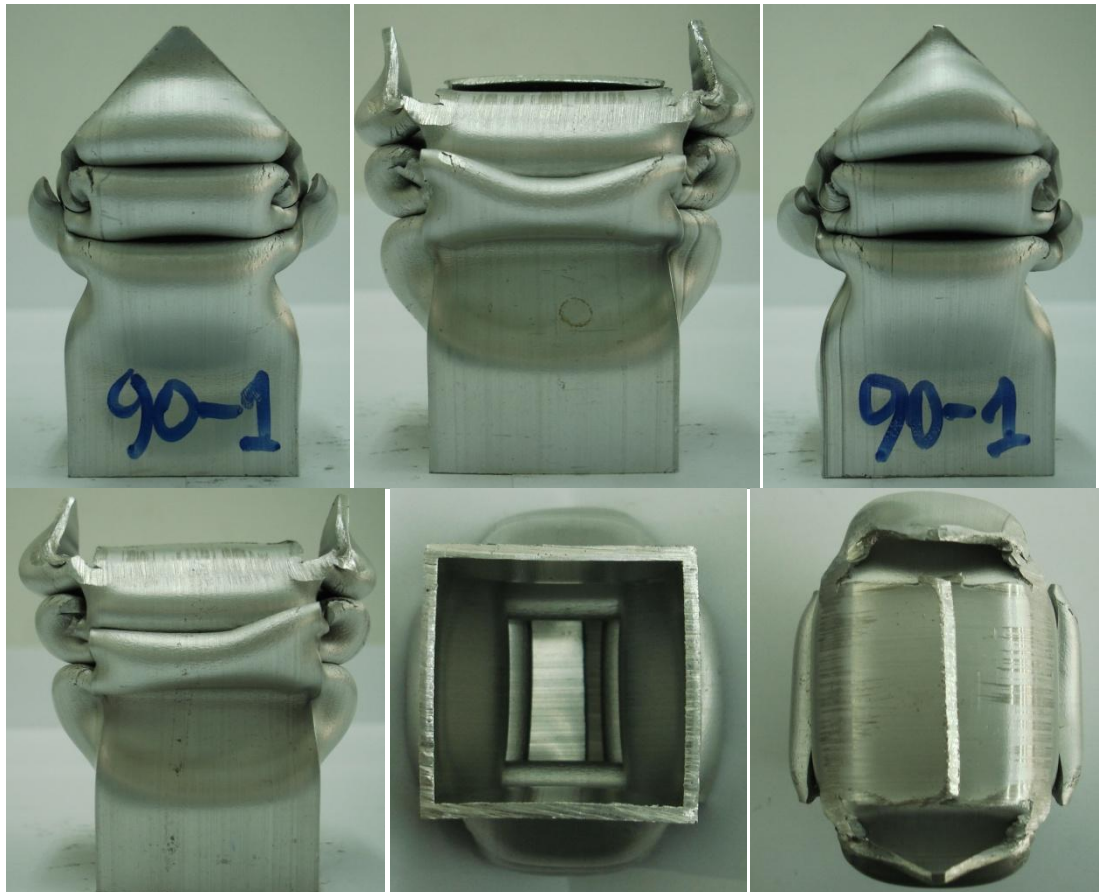
Διάγραμμα 3.7 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 1^ο τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 90°.

Το μέσο και το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης crush force efficiency c.f.e. παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα .

Πίνακας 3.7 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου 40x40x2-90_1.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-90_1	27,17131416	42,83167	2,037848562	1,576356217

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες διαφόρων όψεων του δοκιμίου μετά την κατάρρευση, ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τον τρόπο κατάρρευσης .



Εικόνα 3.10 Τελικές όψεις του δοκιμίου 40x40x2-90_1, μετά την κατάρρευση.

Συμπεράσματα – Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

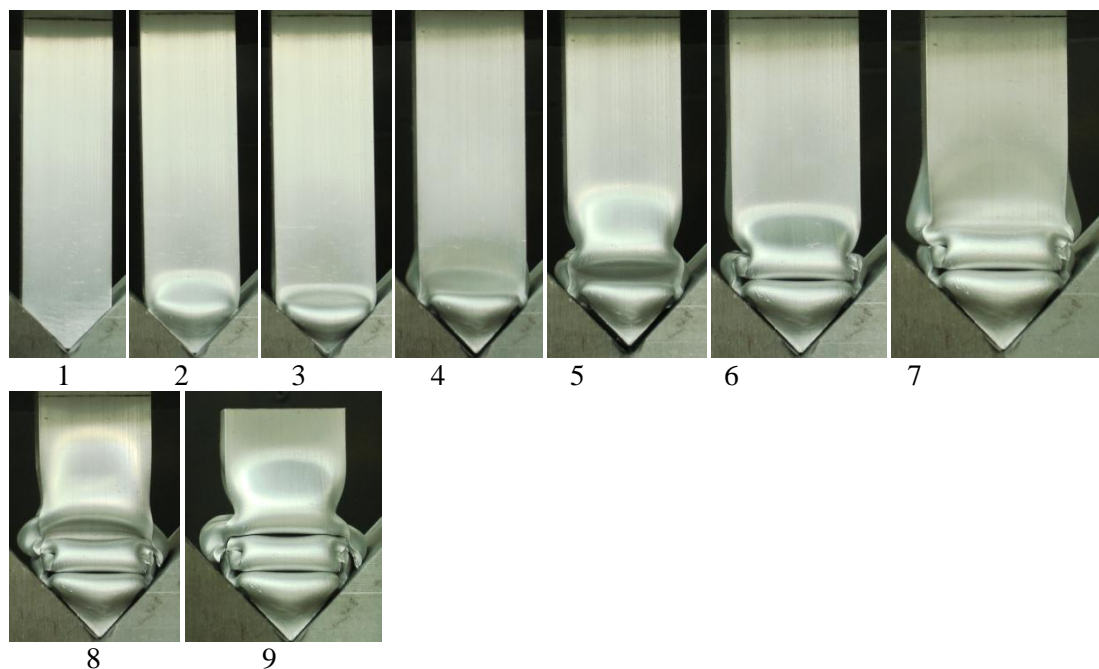
Σύμφωνα με τις παραπάνω φωτογραφίες, το δοκίμιο καταρρέει σχηματίζοντας μη εκτατούς λοβούς. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι οι λοβοί λαμβάνουν το σχήμα ορθογωνίων, διαδοχικά στραμμένων κατά 90° το ένα με το άλλο, πράγμα που αποτελεί χαρακτηριστικό στη diamond mode κατάρρευση. Όπως παρατηρούμε, ο σχηματισμός των λοβών ξεκινά από τα τριγωνικά τμήματα του δοκιμίου, οι ακμές των οποίων ακουμπούν στη βάση. Στη συνέχεια και αφού παραμορφωθούν τα τριγωνικά τμήματα, έχουμε θραύση των ακμών και στρέβλωση προς τα μέσα των πλευρών από τις οποίες είχε αφαιρεθεί υλικό για να εδράζεται το δοκίμιο στη βάση. Αφού αυτές συναντηθούν στο εσωτερικό του δοκιμίου, το υλικό γίνεται πιο στιβαρό και η κατάρρευση συνεχίζεται, με το δοκίμιο να στηρίζεται πλέον σε ορθογωνική διατομή. Έτσι, η εξέλιξη της κατάρρευσης μετά το στάδιο αυτό, είναι αυτή που αναμένεται σε τετραγωνικής διατομής δοκίμια, χωρίς triggering.

Η πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, μπορεί να επιβεβαιώσει τα προηγούμενα. Πράγματι, παρατηρούμε το αρχικό μέγιστο να μη συμπίπτει με το ολικό μέγιστο, αφού το τμήμα που καταρρέει πρώτο λόγω της διαμόρφωσης δε μπορεί να παραλάβει το μεγαλύτερο φορτίο. Στη συνέχεια, παρατηρούμε να εμφανίζεται το ολικό μέγιστο του φορτίου και η καμπύλη να ακολουθεί την αναμενόμενη μορφή για κατάρρευση τετραγωνικής διατομής σωλήνων υπό αξονική συμπίεση. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα τοπικά μέγιστα έχουν τιμές που δεν απέχουν πολύ από το ολικό μέγιστο.

Στη συνέχεια θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα του δεύτερου δοκιμίου, προκειμένου να διαπιστωθεί η απαιτούμενη επαναληψιμότητα των πειραματικών δοκιμών και να μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

3.2.3.2 2^ο τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 90° (40x40x2-90_2)

Ακολουθούν στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δοκιμίου 40x40x2-90_2.



εικόνα 3.11 Κατάρρευση του δοκιμίου 40x40x2-90_2 σε 9 στιγμιότυπα, από την αρχή της παραμόρφωσης (εικόνα 1) έως το τέλος (εικόνα 9) σε 75 mm μετατόπισης εμβόλου .

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το συγκεκριμένο δοκίμιο, πάνω στην οποία αποτυπώνονται τα σημεία που αντιστοιχούν στα παραπάνω στιγμιότυπα.



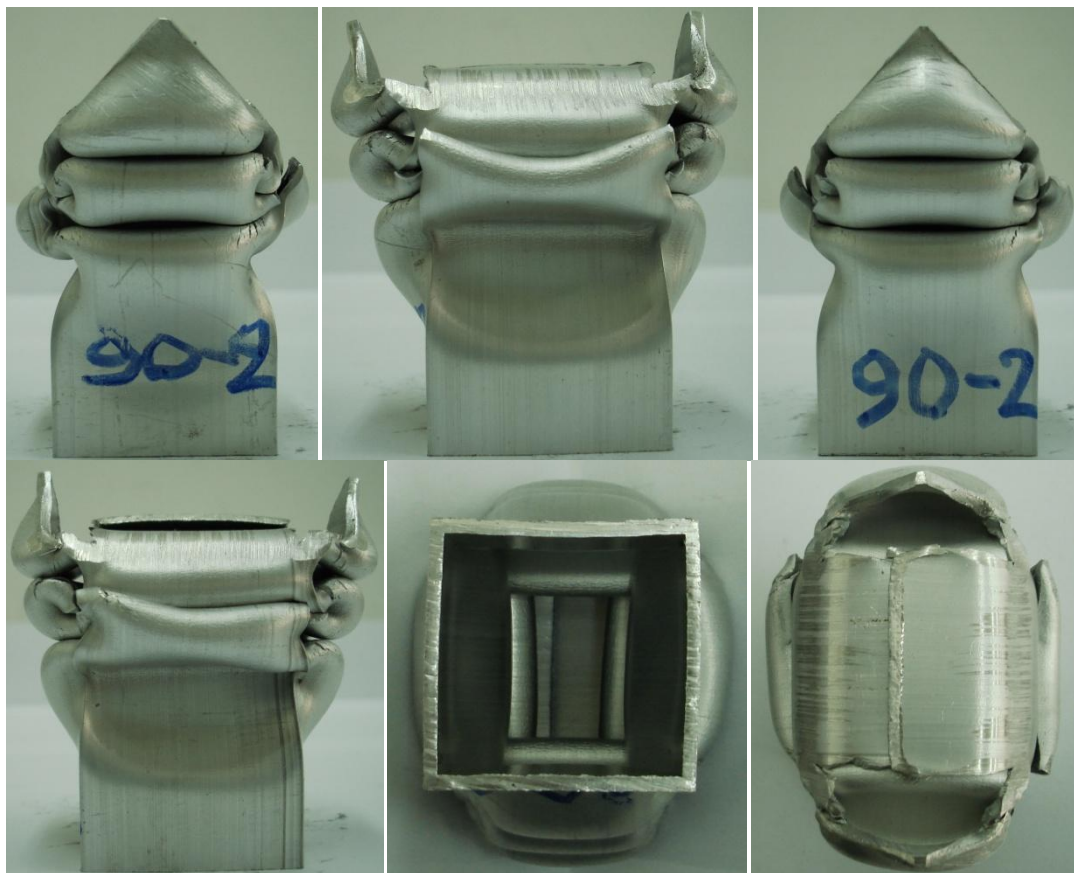
Διάγραμμα 3.8 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 2° τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 90° .

Το μέσο και το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης crush force efficiency c.f.e. παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 3.8 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου 40x40x2-90_2.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-90_2	27,84341976	43,65045	2,088256482	1,567711523

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες των τελικών όψεων του δοκιμίου (μετά την κατάρρευση), ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τον τρόπο κατάρρευσης.



Εικόνα 3.12 Τελικές όψεις του δοκιμίου 40x40x2-90_2, μετά την κατάρρευση.

Συμπεράσματα

Από τις παραπάνω φωτογραφίες, προκύπτει ότι και αυτό το δοκίμιο καταρρέει σχηματίζοντας μη εκτατούς λοβούς, ακριβώς όπως και το 1^ο. Σε ό,τι αφορά την πειραματική καμπύλη, η μορφή της είναι ίδια με αυτή που περιγράφηκε προηγουμένως. Για καλύτερη εποπτεία, θα παρουσιασθούν στη συνέχεια συγκριτικά οι πειραματικές καμπύλες και τα βασικά μεγέθη των δύο δοκιμίων, ώστε να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα των πειραματικών δοκιμών.

3.2.3.3 Σύγκριση των 2 τετραγωνικών δοκιμών με γωνία κορυφής 90° (40x40x2-90_1 , 40x40x2-90_2)

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα που εμπεριέχει τις δύο πειραματικές καμπύλες για τα τετραγωνικά δοκίμια, με γωνία κορυφής 90°.



Διάγραμμα 3.9 Συγκριτική παρουσίαση πειραματικών καμπυλών των τετραγωνικών δοκιμών, με γωνία κορυφής 90°.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των 2 τετραγωνικών δοκιμών .

Πίνακας 3.9 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των 2 τετραγωνικών δοκιμών με γωνία κορυφής 90°.

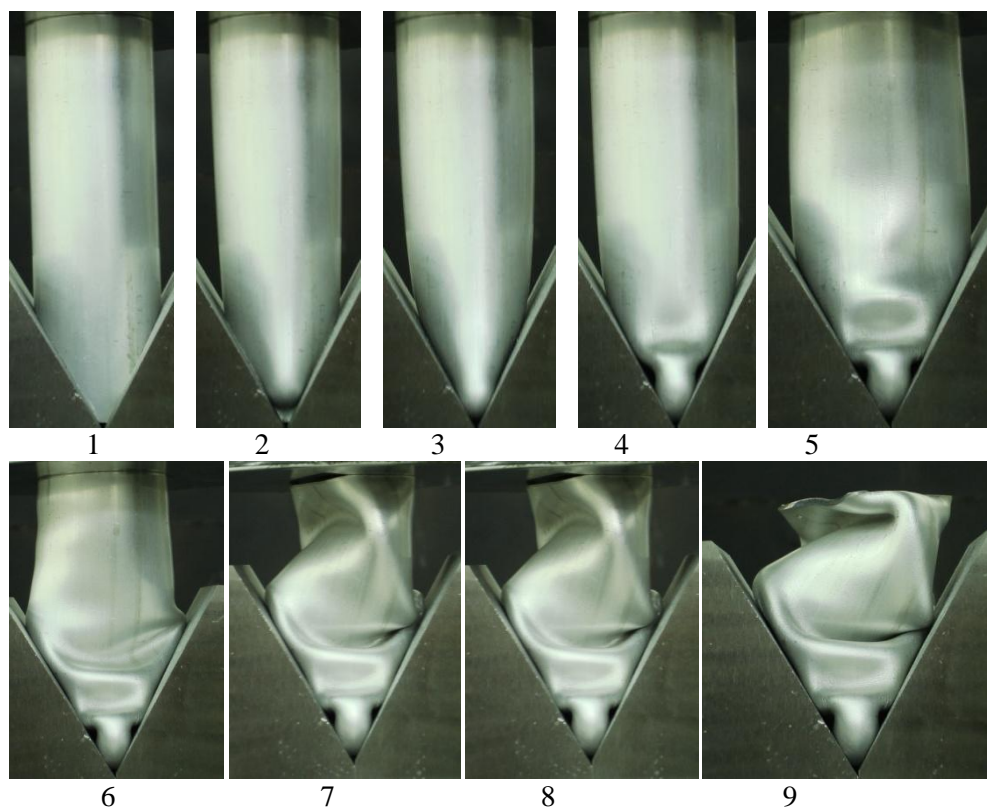
Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-90_1	27,17131416	42,83167	2,037848562	1,576356217
40x40x2-90_2	27,84341976	43,65045	2,088256482	1,567711523
Διαφορά (%)	2,47 %	1,91 %	2,47 %	0,55 %

Τόσο από τις καμπύλες όσο και από τα χαρακτηριστικά μεγέθη, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι υπάρχει ταύτιση στη συμπεριφορά κατάρρευσης των δοκιμών. Έτσι, εξασφαλίζεται η αναγκαία επαναληψιμότητα. Δοκίμιο αναφοράς το: **40x40x2-90_1**.

3.2.4 Κυλινδρικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 60°

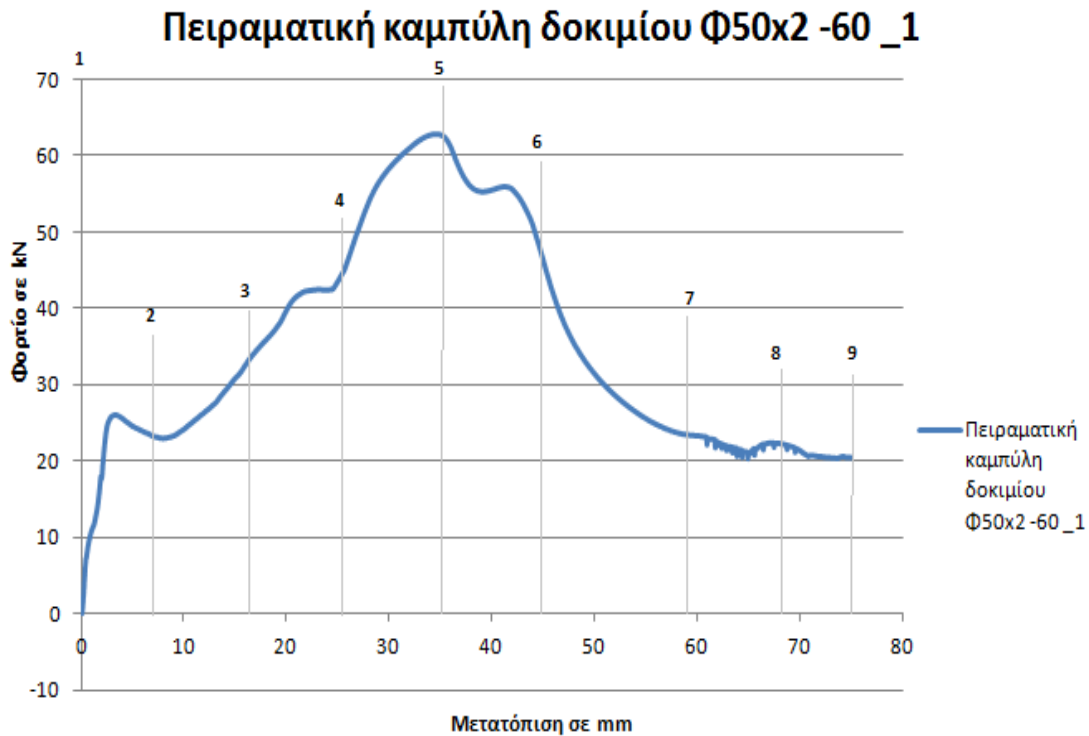
3.2.4.1 1^ο κυλινδρικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 60° (Φ50x2 -60 _1)

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται στιγμιότυπα από τη φόρτιση του πρώτου κυλινδρικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 60°.



Εικόνα 3.13 Κατάρρευση του δοκιμίου Φ50x2 -60 _1 σε 9 στιγμιότυπα, από την αρχή της παραμόρφωσης (εικόνα 1 πάνω αριστερά) έως το τέλος (εικόνα 9 κάτω δεξιά) σε 75 mm μετατόπισης εμβόλου.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το συγκεκριμένο δοκίμιο, πάνω στην οποία αποτυπώνονται τα σημεία που αντιστοιχούν στα παραπάνω στιγμιότυπα.



Διάγραμμα 3.10 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 1^ο κυλινδρικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 60°.

Το μέσο και το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης crush force efficiency c.f.e. παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 3.10 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου Φ50x2 -60 _1.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
Φ50x2 -60 _1	35,07874287	62,92537	2,630905716	1,793831958

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες των όψεων του δοκιμίου μετά την κατάρρευση, ώστε να μας βοηθήσουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον τρόπο κατάρρευσης.



Εικόνα 3.14 Τελικές όψεις του δοκιμίου Φ50x2 -60 _1, μετά την κατάρρευση.

Συμπεράσματα – Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Το δοκίμιο καταρρέει σύμφωνα με τη diamond mode, δηλαδή τη μορφή κατάρρευσης με μη εκτατούς λοβούς. Όμως, στη συγκεκριμένη περίπτωση, παρουσιάζεται μια ιδιαιτερότητα που σχετίζεται με τη γωνία της βάσης και το μήκος του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με αυτήν. Έτσι, λόγω του μεγάλου μετώπου επαφής που οφείλεται στη γωνία των 60° , το δοκίμιο έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα της βάσης σχεδόν καθόλη τη διάρκεια της φόρτισης και για μεγάλο μήκος κατάρρευσης, περίπου τα $2/3$ του ολικού. Αποτέλεσμα είναι, τα τοιχώματα της βάσης να μην επιτρέπουν στο δοκίμιο να παραμορφωθεί ελεύθερα και έτσι να εμποδίζεται η πλήρης διαμόρφωση των λοβών. Συγκεκριμένα, καθώς αρχίζει η διαμόρφωση του λοβού προς τις περιορισμένες πλευρές, τα τοιχώματα της βάσης εμποδίζουν περαιτέρω παραμόρφωση, με αποτέλεσμα το υλικό να ξαναγίνεται στιβαρό και να ξεκινά η δημιουργία νέου λοβού προς τις ελεύθερες πλευρές του δοκιμίου.

Από την πειραματική καμπύλη, παρατηρούμε ότι επιβεβαιώνεται η παραπάνω ανάλυση, καθώς παρατηρούμε ότι αμέσως μετά την εμφάνιση μεγίστων έχουμε μικρές, σχεδόν αμελητέες πτώσεις φορτίου και τοπικά ελάχιστα. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι η βάση δεν επιτρέπει την ελεύθερη παραμόρφωση του δοκιμίου και συγκεκριμένα τη φάση όπου έχουμε πτώση του φορτίου από το σχηματισμό της εσωτερικής αναδίπλωσης στο τελικό στάδιο διαμόρφωσης του λοβού. Έτσι, στο σημείο όπου το φορτίο έχει την τάση να μειωθεί για το σχηματισμό της εσωτερικής πτύχωσης, αυτή περιορίζεται σημαντικά λόγω των τοιχωμάτων και το υλικό γίνεται πάλι στιβαρό και ετοιμάζεται να παραλάβει μεγαλύτερο φορτίο, με το σχηματισμό του επόμενου λοβού.

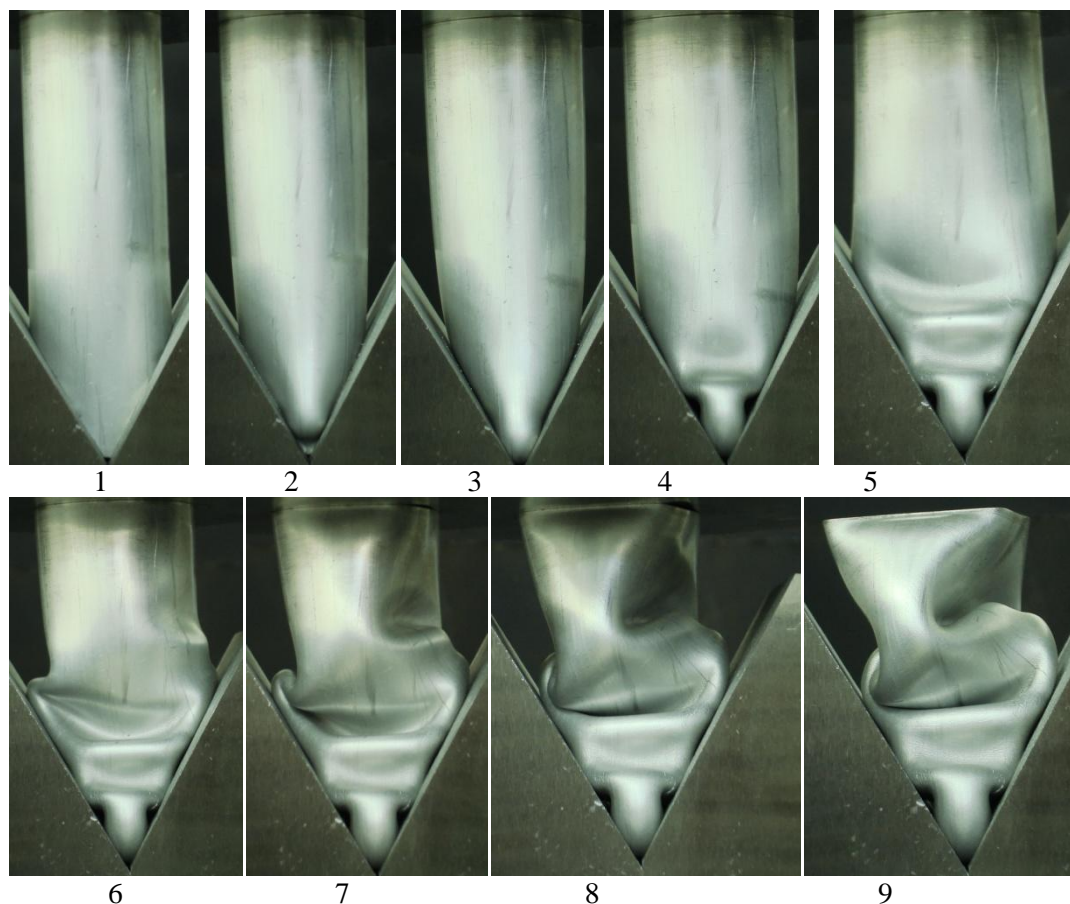
Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά τα 42 mm παραμόρφωσης, το φορτίο παρουσιάζει συνεχή πτώση. Αυτό συμβαίνει διότι το δοκίμιο υφίσταται ολικό λυγισμό (global buckling) και δε μπορεί να παραλάβει περαιτέρω φορτία. Οι τελικές φωτογραφίες, επιβεβαιώνουν ότι έχουμε λυγισμό κατά Euler μετά τα 42 mm, αφού παρατηρούμε ότι το δοκίμιο κοντά στο άκρο της φόρτισης έχει στρεβλώσει.

Τέλος, στην πειραματική καμπύλη και καθώς πλησιάζουμε στην ολοκλήρωση της φόρτισης, παρατηρείται μια “πριονωτή” μορφή του φορτίου. Αυτή οφείλεται σε πιθανή ολίσθηση του δοκιμίου στη βάση που αποτυπώνεται πάνω στην καμπύλη. Η ολίσθηση διαπιστώνεται και στις τελικές φωτογραφίες του δοκιμίου, όπου διαπιστώνουμε χαραγές στις πλευρές που έρχονται σε επαφή με τη βάση.

Προκειμένου να διαπιστώσουμε αν τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι γενικεύσιμα, αλλά και για τη διακρίβωση της επαναληψιμότητας της συμπεριφοράς δοκιμίων με τα ίδια χαρακτηριστικά και την ίδια διαμόρφωση, προχωρήσαμε σε 2^η πειραματική δοκιμή, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στη συνέχεια.

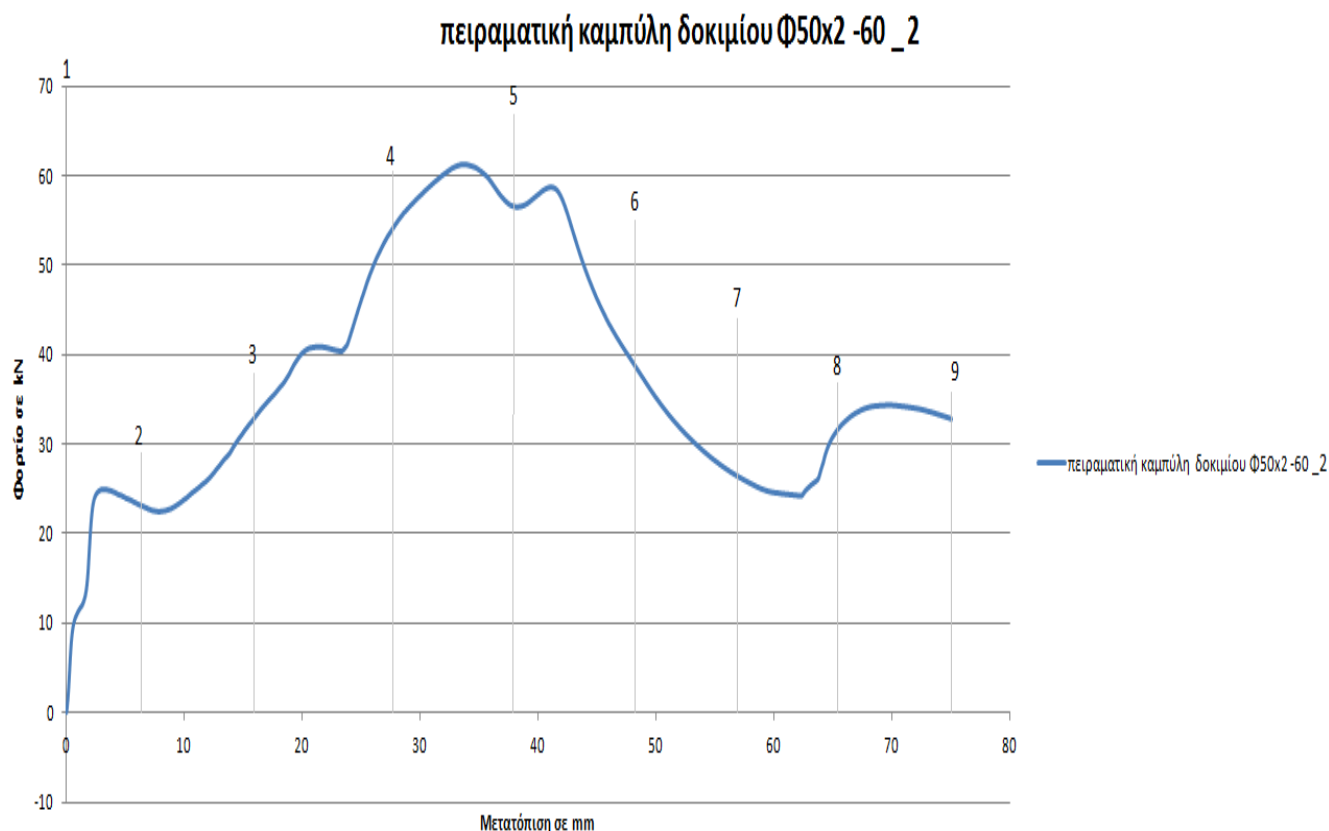
3.2.4.2 2^ο κυλινδρικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 60^ο (Φ50x2 -60 _2)

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται στιγμιότυπα από τη φόρτιση του δευτέρου κυλινδρικού δοκιμίου, με γωνία κορυφής 60^ο.



Εικόνα 3.15 Παρουσίαση 9 διαδοχικών στιγμιότυπων της κατάρρευσης του δοκιμίου Φ50x2 -60 _2 , από την αρχή (εικόνα 1) έως και το τέλος (εικόνα 9).

Ακολουθεί η παρουσίαση της πειραματικής καμπύλης φορτίου – μετατόπισης. Πάνω στην καμπύλη έχουν σημειωθεί οι θέσεις των παραπάνω στιγμιότυπων που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια της φόρτισης.



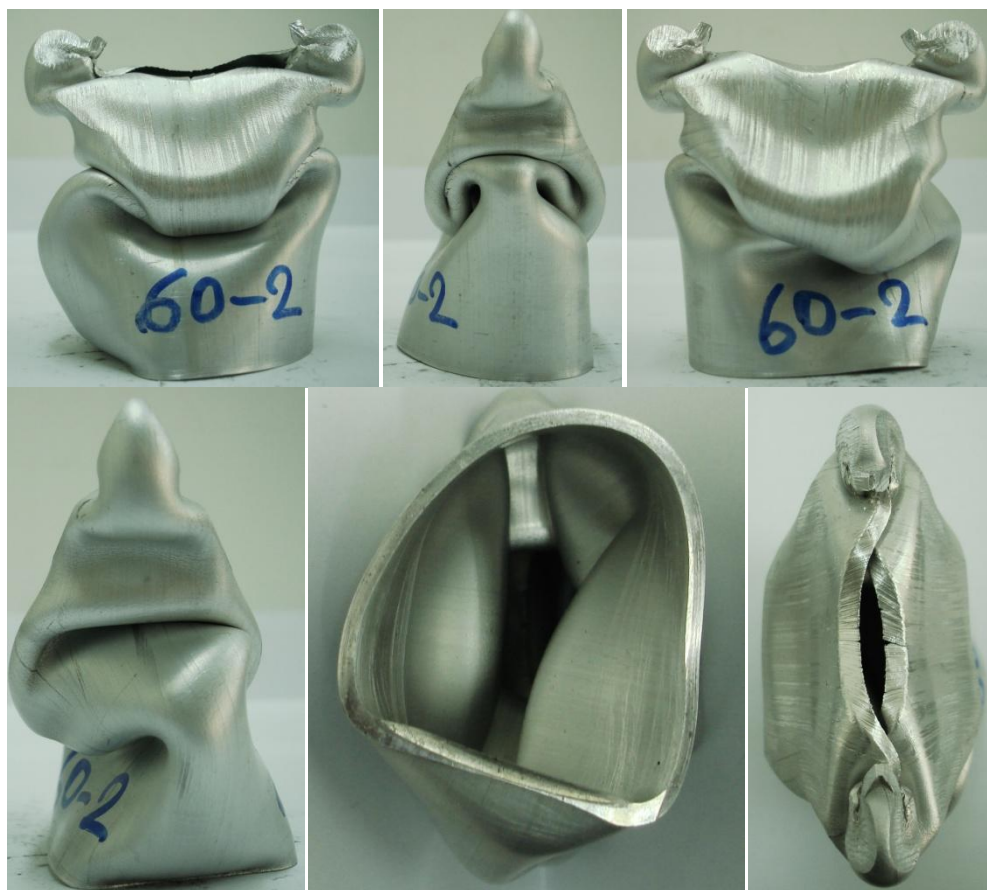
Διάγραμμα 3.11 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 2^ο κυλινδρικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης του δοκιμίου που προκύπτουν από την πειραματική καμπύλη. Ακολουθεί πίνακας που εμπεριέχει τα δεδομένα αυτά.

Πίνακας 3.11 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου Φ50x2 -60 _2.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
Φ50x2 -60 _2	37,45303451	61,28781	2,808977588	1,636391037

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες των τελικών όψεων του δοκιμίου μετά την κατάρρευση, ώστε να μας βοηθήσουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον τρόπο κατάρρευσης.



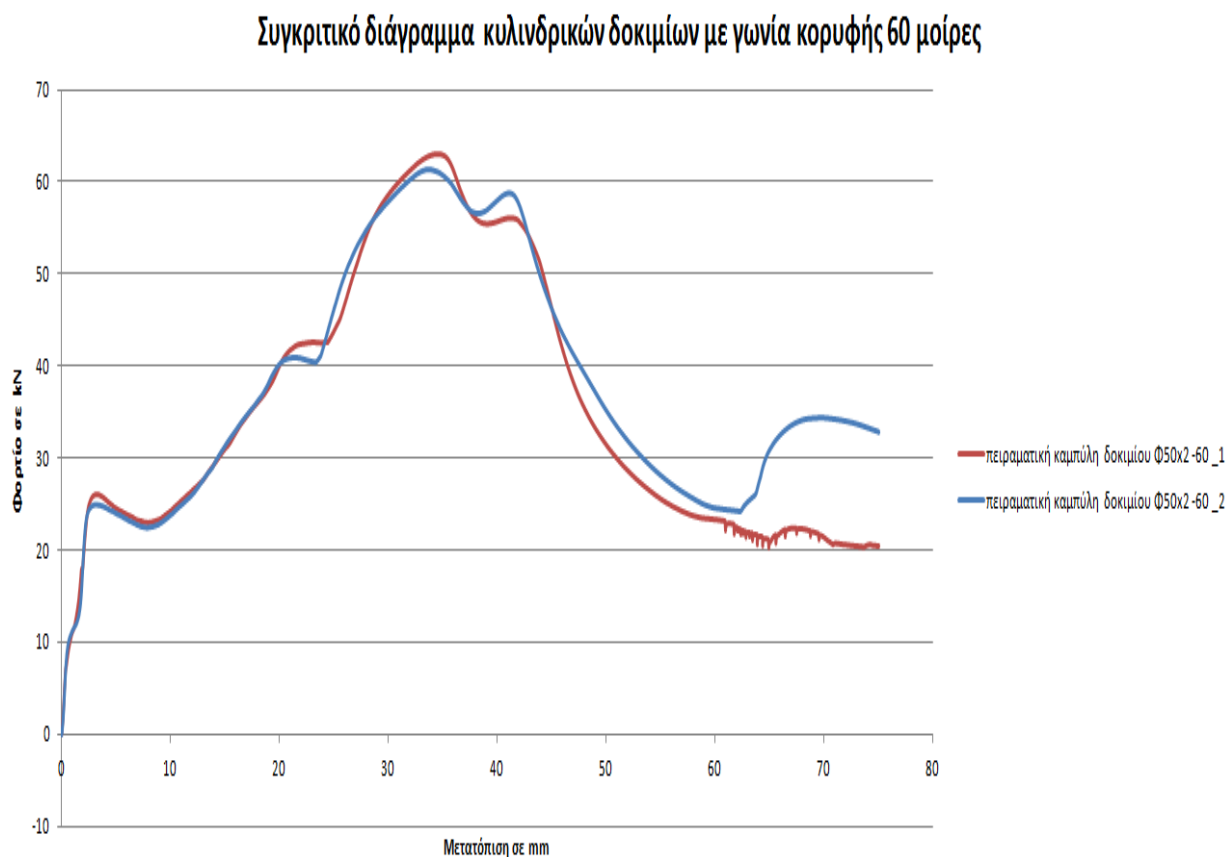
Εικόνα 3.16 Τελικές όψεις του δοκιμίου $\Phi 50 \times 2 - 60_2$, μετά την κατάρρευση.

Συμπεράσματα – Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Το δοκίμιο καταρρέει ακολουθώντας μη συμμετρική diamond mode κατάρρευση. Χαρακτηριστικά, σχηματίζονται διαδοχικές ελλείψεις, η καθεμία στραμμένη κατά 90° σε σχέση με την προηγούμενη. Και αυτό το δοκίμιο εμφανίζει τον τρόπο κατάρρευσης που περιγράφηκε προηγουμένως και αφορά τη μικρή πτώση του φορτίου μετά τα μέγιστα, που όπως εξηγήθηκε, οφείλεται στον περιορισμό της παραμόρφωσης από τη βάση. Σε αυτό το δοκίμιο, όμως δεν παρατηρούμε λυγισμό κατά Euler στο τέλος της παραμόρφωσης, αλλά τη δημιουργία λοβού, κάτι που επιβεβαιώνεται τόσο από τις φωτογραφίες (δημιουργία προεξοχών κοντά στο φορτιζόμενο άκρο) όσο και από την πειραματική καμπύλη (παρουσία τοπικού μεγίστου στα 68 mm μετατόπισης). Τέλος, σε αυτό το δοκίμιο δεν εμφανίζεται η πριονωτή μορφή της καμπύλης του φορτίου, που οφείλονταν στην ολίσθηση του δοκιμίου στα τοιχώματα της βάσης.

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση των δύο κυλινδρικών δοκιμίων, με γωνία κορυφής 60° .

3.2.4.3 Σύγκριση των 2 κυλινδρικών δοκιμίων με γωνία κορυφής 60° (Φ50x2 -60 _1 , Φ50x2 -60 _2)



Διάγραμμα 3.12 Συγκριτική παρουσίαση πειραματικών καμπυλών των κυλινδρικών δοκιμίων, με γωνία κορυφής 60°.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των δύο κυλινδρικών δοκιμίων .

Πίνακας 3.12 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των 2 κυλινδρικών δοκιμίων, με γωνία κορυφής 60°.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
Φ50x2 -60 _1	35,07874287	62,92537	2,630905716	1,793831958
Φ50x2 -60 _2	37,45303451	61,28781	2,808977588	1,636391037
Διαφορά (%)	6,76%	2,6 %	6,76%	8,77 %

Συμπεράσματα

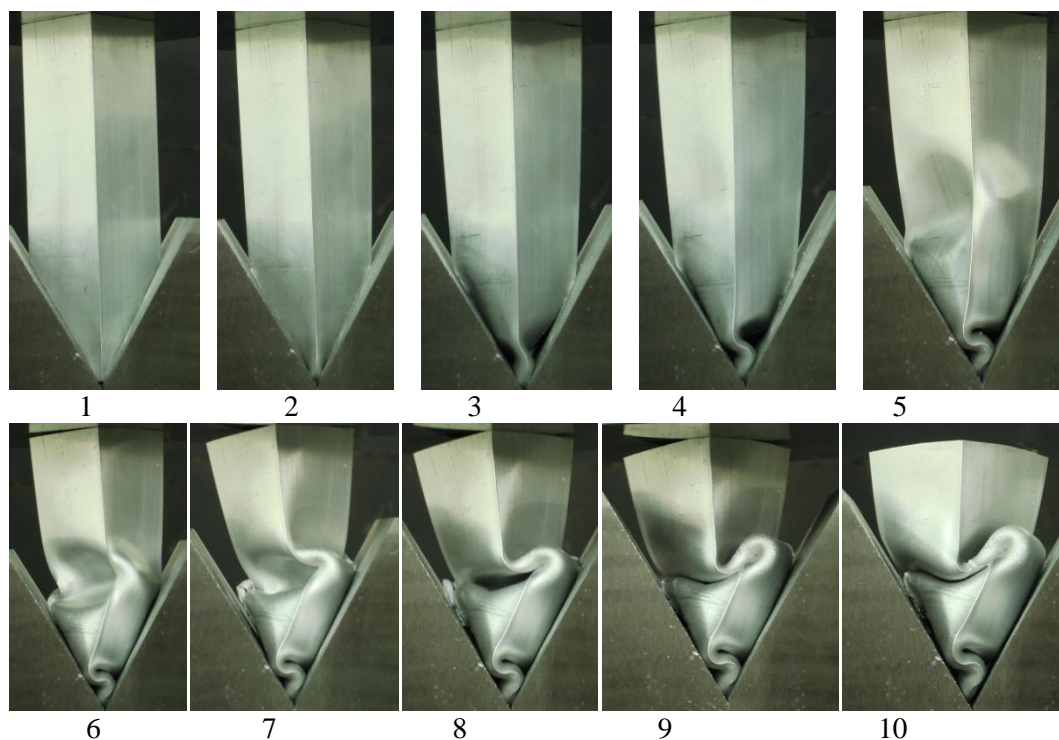
Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι οι καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται, εκτός από το τελευταίο τμήμα (από τα 60 mm και μετά). Εκεί η διαφοροποίηση είναι αρκετά μεγάλη, αφού το φορτίο στο 1^ο δοκίμιο βαίνει μειούμενο, ενώ αντίθετα στο 2^ο δοκίμιο αυξάνεται, μέχρις ότου να δημιουργήσει τοπικό μέγιστο και να αρχίσει να ελαττώνεται. Η διαφορά αυτή, οφείλεται στο γεγονός ότι το 1^ο δοκίμιο υφίσταται λυγισμό κατά Euler και καταρρέει χωρίς να μπορεί να παραλάβει περαιτέρω φορτία, ενώ το 2^ο δοκίμιο σχηματίζει λοβό, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το φορτίο. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την προιονωτή μορφή του φορτίου του 1^{ου} δοκιμίου, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αυτό (1^ο δοκίμιο) ολίσθαινε στη βάση, με αποτέλεσμα να διαταραχθεί η επαφή του εμβόλου με την επιφάνεια όπου φορτίζεται το δοκίμιο και αυτό να καταρρεύσει κατά Euler. Αυτή η διαφορά, οδήγησε και σε σημαντική διαφοροποίηση του μέσου φορτίου, του πλαστικού έργου, αλλά και του δείκτη ομοιομορφίας φορτίου μεταξύ των δύο δοκιμίων (πιν.3.12). Αυτό καταδεικνύει το πόσο σημαντικό είναι να αποφεύγεται ο ολικός λυγισμός (global bending) ή λυγισμός κατά Euler, αφού έτσι μειώνεται η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των δοκιμίων.

Η διαφοροποίηση που περιγράφηκε προηγουμένως δε συνεπάγεται ότι δεν εξασφαλίζεται η απαιτούμενη επαναληψιμότητα των πειραματικών δοκιμών. Τόσο η ταύτιση των 2 καμπυλών μέχρι ενός σημείου όσο και η μικρή διαφοροποίηση του μέγιστου φορτίου της τάξης του 3% (πίνακας 3.12), καταδεικνύουν ότι υπάρχει μια επανάληψη της συμπεριφοράς δοκιμίων με τα ίδια χαρακτηριστικά υπό την ίδια φόρτιση, ανεξάρτητα από το εάν υπήρξε μια τυχαία παράμετρος η οποία άλλαξε τη μορφή προς το τέλος της κατάρρευσης. Συνεπώς, καταληγουμε στο συμπέρασμα ότι οι παραδοχές για την κατάρρευση δοκιμίων τέτοιου τύπου είναι γενικεύσιμες και ότι ο καλύτερος αντιπρόσωπος για αυτήν την κατηγορία είναι το 2^ο δοκίμιο, δηλαδή το **Φ50x2 -60 _2**.

3.2.5 Λοξό Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 60°

3.2.5.1 1° λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60° (40x40x2-60_loxos_1)

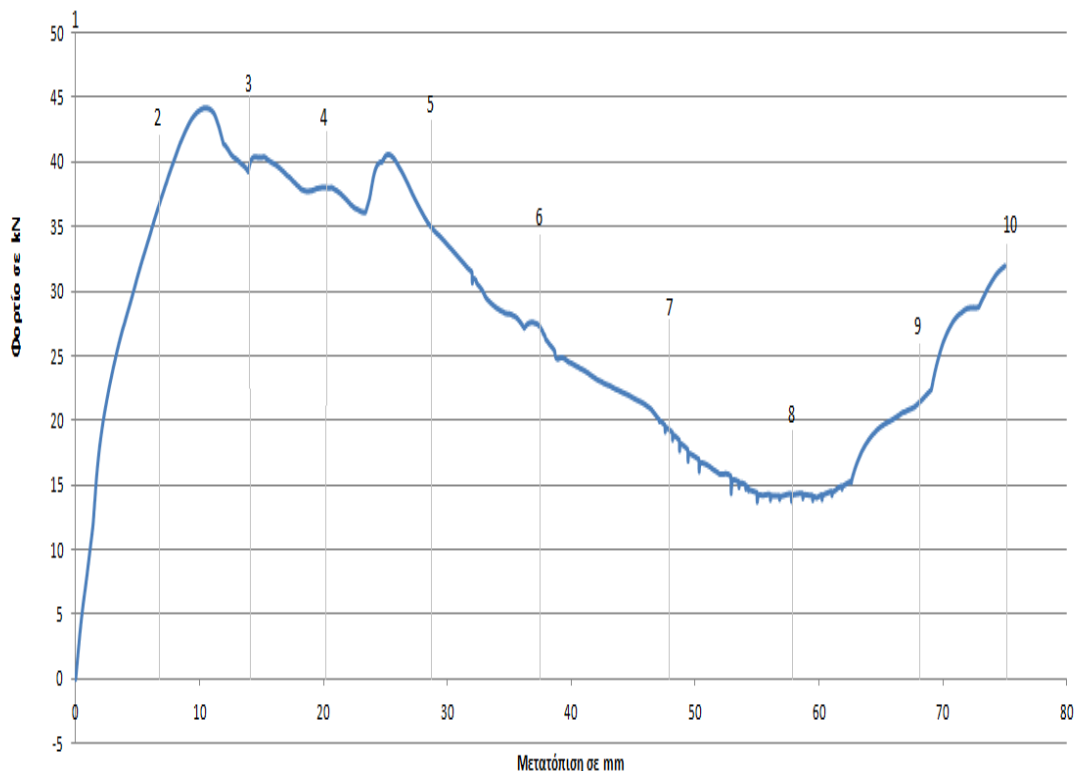
Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται στιγμιότυπα από τη φόρτιση του πρώτου λοξού τετραγωνικού δοκιμίου, με γωνία κορυφής 60°.



Εικόνα 3.17 Προοδευτικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δοκιμίου 40x40x2-60_loxos_1, από την αρχή (εικόνα 1) έως και το τέλος (εικόνα 10).

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το συγκεκριμένο δοκίμιο, πάνω στην οποία αποτυπώνονται τα σημεία που αντιστοιχούν στα παραπάνω στιγμιότυπα .

πειραματική καμπύλη δοκιμίου 40x40x2-60_loxos_1



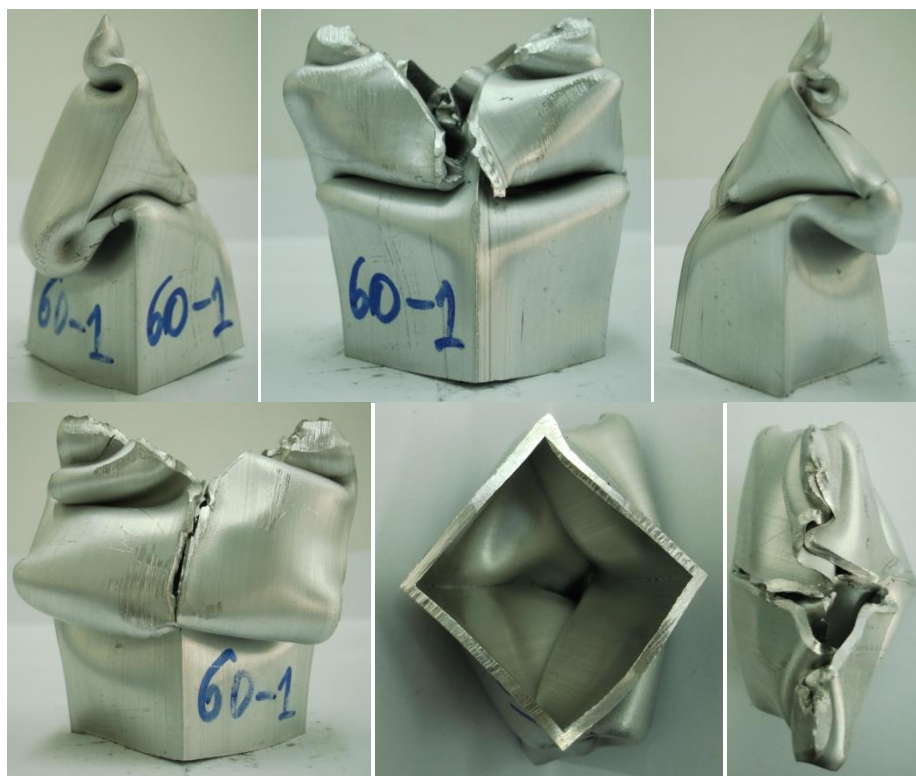
Διάγραμμα 3.13 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 1^ο λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

Το μέσο και το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης crush force efficiency c.f.e. παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 3.13 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου 40x40x2-60_loxos_1

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-60_loxos_1	27,23585809	44,13367	2,042689357	1,620425171

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες των όψεων του δοκιμίου μετά την κατάρρευση, ώστε να μας βοηθήσουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον τρόπο κατάρρευσης.



Εικόνα 3.18 Τελικές όψεις του δοκιμίου 40x40x2-60_Ioxos_1, μετά την κατάρρευση.

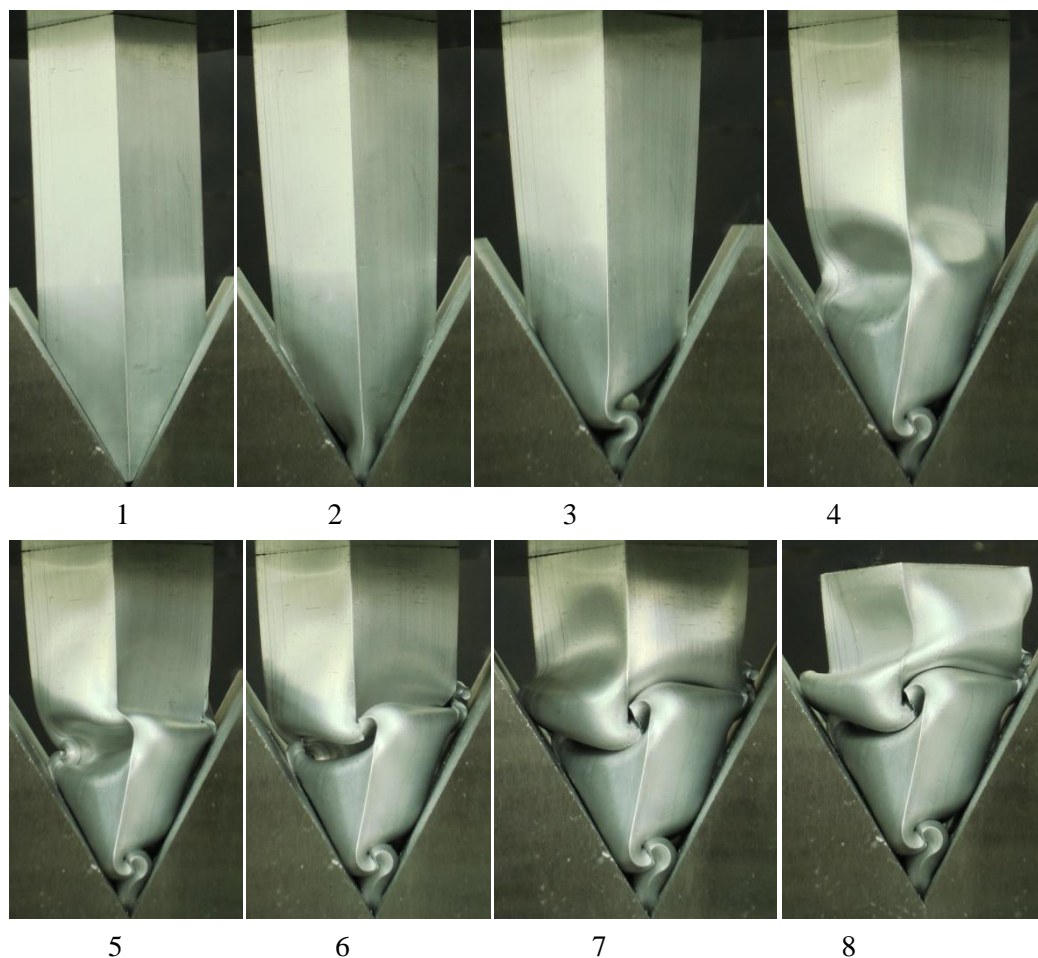
Συμπεράσματα – Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Από τις παραπάνω φωτογραφίες προκύπτει ότι το δοκίμιο καταρρέει σχηματίζοντας μη εκτατούς λοβούς. Ακόμα, βλέπουμε να παρουσιάζονται θραύσεις στις ακμές του δοκιμίου σαν αποτέλεσμα της υψηλής συγκέντρωσης τάσεων. Οι θραύσεις αποτυπώνονται και στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, όπου παρουσιάζονται απότομες και μικρές πτώσεις του φορτίου. Ακόμα, παρατηρούμε ότι για όσο διάστημα η βάση ‘ελέγχει’ την παραμόρφωση του δοκιμίου, το φορτίο δε μειώνεται σημαντικά. Έπειτα, για παραμόρφωση μεγαλύτερη των 30 mm, όπως φαίνεται από το στιγμιότυπο 5 και μετά, παρατηρούμε μια στρέβλωση του δοκιμίου, με αποτέλεσμα το έμβολο να χάνει την επαφή του με τις 2 από τις 4 πλευρές της τετραγωνικής διατομής και το φορτίο να ασκείται μέσω των υπολοίπων 2. Η αλλαγή στη διεπιφάνεια, είναι πιθανό να οφείλεται σε ολίσθηση του δοκιμίου πάνω στα τοιχώματα της βάσης (πριονωτή μορφή της καμπύλης), η οποία προκλήθηκε από τις θραύσεις. Έτσι το δοκίμιο ολισθαίνει, με αποτέλεσμα να μη μπορεί να παραλάβει φορτία μέχρις ότου να σταθεροποιηθεί και να γίνει στιβαρό. Αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση του φορτίου μέχρι να σταθεροποιηθεί το δοκίμιο για το σχηματισμό του επόμενου λοβού, μετά τα 62 mm.

Προκειμένου να διαπιστώσουμε αν τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι γενικεύσιμα, αλλά και για τη διακρίβωση της επαναληψιμότητας της συμπεριφοράς δοκιμίων με τα ίδια χαρακτηριστικά και την ίδια διαμόρφωση, προχωρήσαμε σε 2^η πειραματική δοκιμή, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στη συνέχεια.

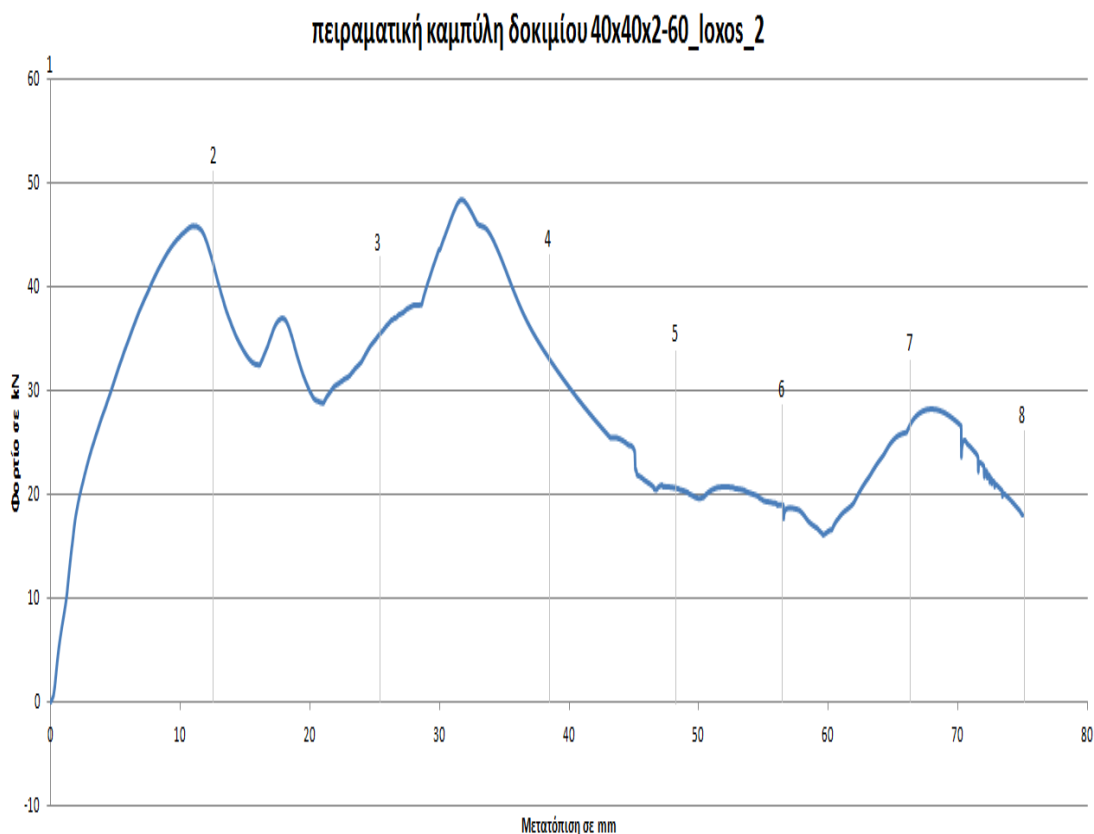
3.2.5.2 2^ο λοξό τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 60° (40x40x2-60_loxos_2)

Ακολουθούν στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δοκιμίου 40x40x2-60_loxos_2.



Εικόνα 3.19 Προοδευτικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δοκιμίου 40x40x2-60_loxos_2, από την αρχή (εικόνα 1) έως και το τέλος (εικόνα 8).

Ακολουθεί η παρουσίαση της πειραματικής καμπύλης φορτίου – μετατόπισης. Πάνω στην καμπύλη έχουν σημειωθεί οι θέσεις των παραπάνω στιγμιότυπων που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια της φόρτισης .



Διάγραμμα 3.14 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 2^ο λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης του δοκιμίου που προκύπτουν από την πειραματική καμπύλη. Ακολουθεί πίνακας που εμπεριέχει τα δεδομένα αυτά.

Πίνακας 3.14 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου 40x40x2-60_Ιoxos_2.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-60_Ιoxos_2	29,28613114	48,40207	2,196459835	1,652730085

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες διαφόρων όψεων του δοκιμίου μετά την κατάρρευση, που θα μας βοηθήσουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον τρόπο κατάρρευσης.



εικόνα 3.20 Τελικές όψεις του δοκιμίου 40x40x2-60_Ioxos_2, μετά την κατάρρευση.

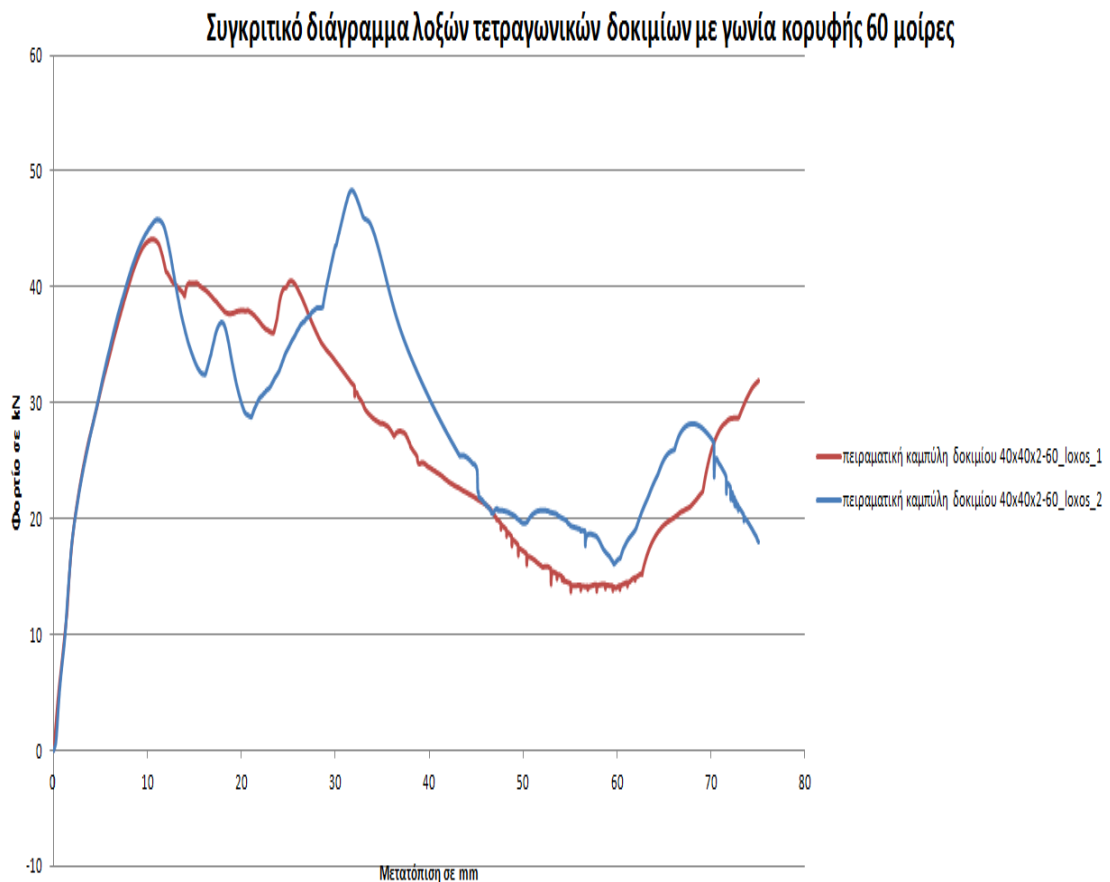
Συμπεράσματα – Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Το δοκίμιο καταρρέει σχηματίζοντας μη εκτατούς λοβούς κατά τη μορφή 2D diamond mode. Και αυτό το δοκίμιο παρουσιάζει θραύσεις που είναι εντονότερες προς το τέλος της φόρτισης. Όμως, σε αυτό το δοκίμιο δεν παρουσιάζεται ολίσθηση στα τοιχώματα της βάσης, με αποτέλεσμα η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης να ακολουθεί μια πιο αναμενόμενη μορφή. Είναι φανερό και από τα προοδευτικά στιγμιότυπα (εικόνα 3.19) ότι δεν έχουμε ολίσθηση του δοκιμίου με αποτέλεσμα να μη διαταράσσεται η διεπιφάνεια εμβόλου συμπίεσης – τεμαχίου και να έχουμε ομαλότητα στην επιβολή φορτίου. Στα χαρακτηριστικά της κατάρρευσης αυτού του δοκιμίου, παρατηρούμε ότι το μέγιστο φορτίο δε συμπίπτει με το πρώτο τοπικό μέγιστο, ενώ τέλος μετά τα 70 mm βλέπουμε έντονη θραύση, κάτι που επιβεβαιώνεται από την εισχώρηση της μίας πλευράς στο εσωτερικό του δοκιμίου (εικόνα 3.20).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκριτικά τα πειραματικά αποτελέσματα και για τα δύο δοκίμια.

3.2.5.3 Σύγκριση των 2 λοξών τετραγωνικών δοκιμών με γωνία κορυφής 60° (40x40x2-60_loxos_1 , 40x40x2-60_loxos_2)

Ακολουθεί το διάγραμμα που εμπεριέχει τις δύο πειραματικές καμπύλες των παραπάνω δοκιμών.



Διάγραμμα 3.15 Συγκριτική παρουσίαση πειραματικών καμπυλών των λοξών τετραγωνικών δοκιμών, με γωνία κορυφής 60°.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των δύο λοξών τετραγωνικών δοκιμών.

Πίνακας 3.15 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των 2 λοξών τετραγωνικών δοκιμίων, με γωνία κορυφής 60°.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-60_loxos_1	27,23585809	44,13367	2,042689357	1,620425171
40x40x2-60_loxos_2	29,28613114	48,40207	2,196459835	1,652730085
Διαφορά (%)	7,53 %	9,67 %	7,53 %	1,99 %

Συμπεράσματα

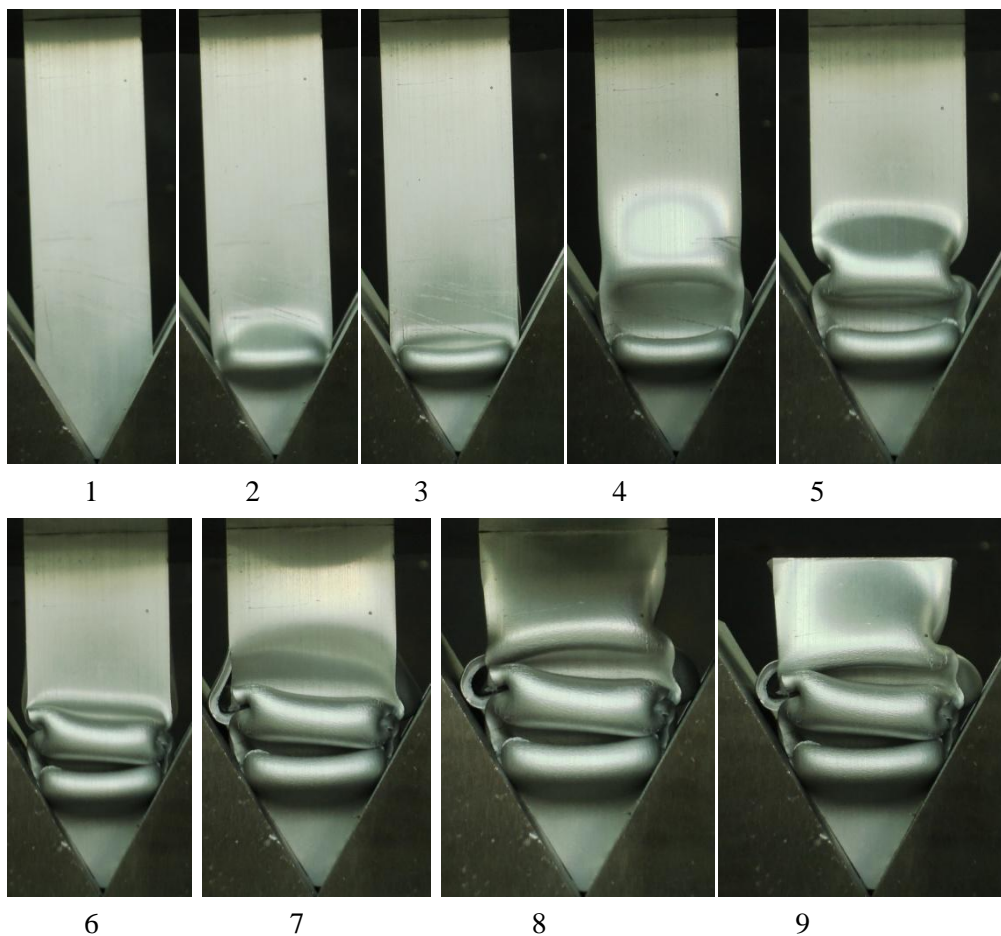
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, παρατηρούμε ότι υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση τόσο μεταξύ των πειραματικών καμπυλών όσο και στα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης. Η διαφορά στο μέγιστο φορτίο πλησιάζει το 10 %, ενώ για το πλαστικό έργο και το μέσο φορτίο, η διαφορά αγγίζει το 7,5 %. Οι διαφορές αυτές είναι αρκετά σημαντικές και οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι το 1^ο δοκίμιο ολίσθαινε στα τοιχώματα της βάσης, με αποτέλεσμα την αδυναμία να παραλάβει μεγάλα φορτία. Είναι χαρακτηριστικό ότι στο σημείο όπου το 2^ο δοκίμιο παρουσιάζει το ολικό μέγιστο, η καμπύλη φορτίου του 1^{ου} δοκιμίου βαίνει συνεχώς μειούμενη. Συνεπώς, η ολίσθηση του 1^{ου} δοκιμίου δεν του επέτρεψε το σχηματισμό του ολικού μεγίστου που θα προκαλούσε αύξηση τόσο του μέσου φορτίου, όσο και της απορρόφησης ενέργειας που εκφράζεται από το πλαστικό έργο.

Λαμβάνοντας υπόψη τα όσα παρουσιάστηκαν, είναι δύσκολο να καταλήξουμε σε συμπεράσματα ως προς την επαναληψιμότητα των συγκεκριμένων πειραματικών δοκιμών. Θεωρώντας όμως ότι εάν δεν υπήρχε η ολίσθηση για το 1^ο δοκίμιο, αυτό θα συμπεριφέρονταν περίπου όπως το δεύτερο, μπορούμε να επιλέξουμε το 2^ο δοκίμιο ως δείγμα της συμπεριφοράς των δοκιμίων με τη συγκεκριμένη διαμόρφωση. Συνεπώς για τις συγκρίσεις που θα ακολουθήσουν θα χρησιμοποιήσουμε το δοκίμιο: **40x40x2-60_loxos_2**.

3.2.6 Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 60°

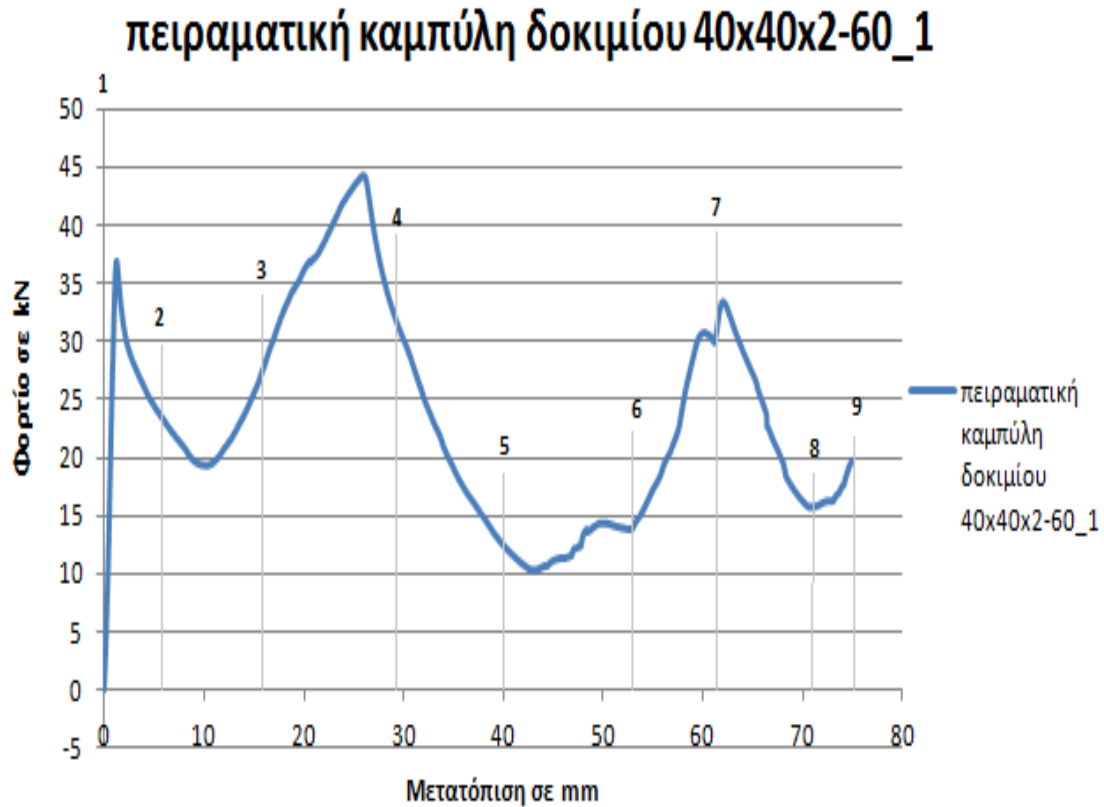
3.2.6.1 1^ο τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 60° (40x40x2-60_1)

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα από τη φόρτιση του πρώτου τετραγωνικού δοκίμιου με γωνία κορυφής 60°.



Εικόνα 3.20 Προοδευτικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δοκίμιου 40x40x2-60_1, από την αρχή (εικόνα 1) έως και το τέλος (εικόνα 9).

Ακολουθεί η παρουσίαση της πειραματικής καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, πάνω στην οποία έχουν σημειωθεί οι θέσεις των παραπάνω στιγμιότυπων που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια της φόρτισης.



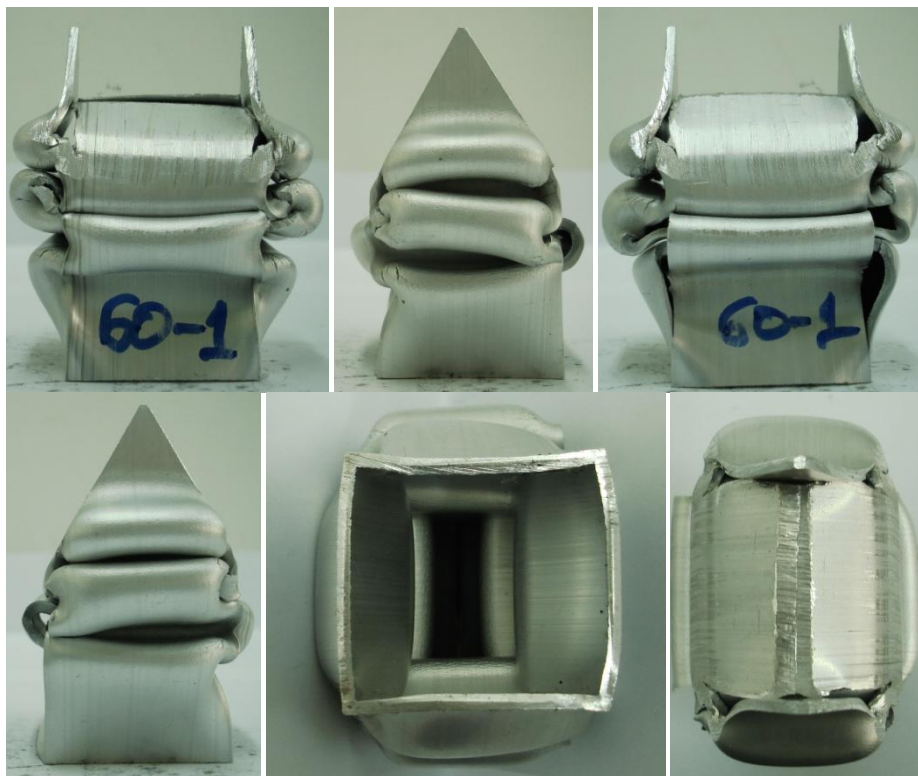
Διάγραμμα 3.16 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 1^ο τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

Το μέσο και το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου, crush force efficiency c.f.e. παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 3.16 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου 40x40x2-60_1.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-60_1	23,19972951	44,34843	1,739979713	1,911592546

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες των όψεων του δοκιμίου μετά την κατάρρευση, που θα μας βοηθήσουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον τρόπο κατάρρευσης.



Εικόνα 3.22 Τελικές όψεις του δοκιμίου 40x40x2-60_1, μετά την κατάρρευση.

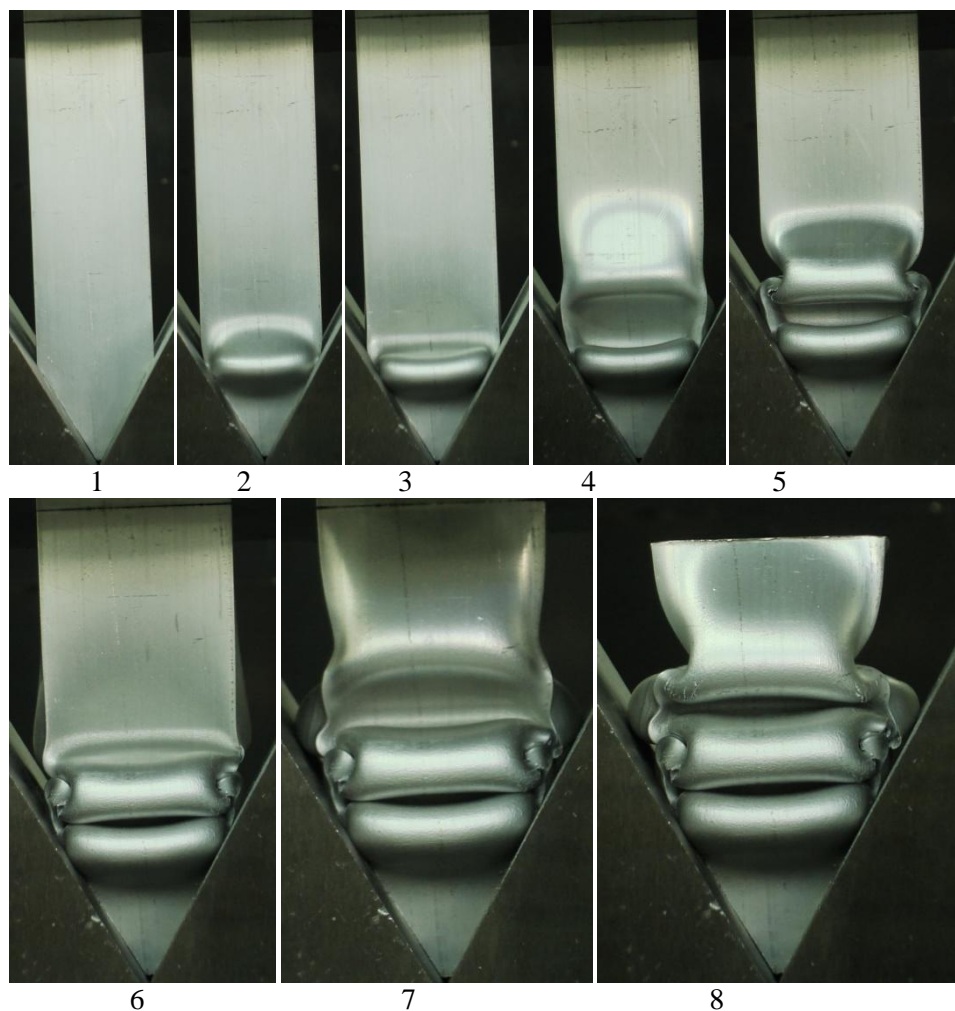
Συμπεράσματα – Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Παρατηρούμε ότι το δοκίμιο καταρρέει εμφανίζοντας την αναμενόμενη μορφή κατάρρευσης για τετραγωνικές διατομές, δηλαδή την 2D – diamond mode με μη εκτατούς λοβούς. Όπως φαίνεται ξεκάθαρα από την κάτοψη (εικόνα 3.22), παρατηρούμε να σχηματίζονται ορθογώνια τοποθετημένα διαδοχικά το ένα στο άλλο και στραμμένα κατά 90° το καθένα από το προηγούμενο. Σε ότι αφορά τα επιμέρους χαρακτηριστικά της κατάρρευσης, παρατηρούμε ότι τα τριγωνικά άκρα παραμένουν απαραμόρφωτα. Η κατάρρευση ουσιαστικά ξεκινά με τη θραύση των ακμών και τη στρέβλωση των παράπλευρων επιφανειών που οδηγούνται (από τη βάση) στο εσωτερικό του δοκιμίου. Εκεί έχουμε την εμφάνιση του 1^{ου} τοπικού μεγίστου και στη συνέχεια την πτώση του φορτίου, μέχρις ότου να έρθουν σε επαφή οι στρεβλές πλέον παράπλευρες επιφάνειες του δοκιμίου. Αμέσως μετά, το υλικό γίνεται πλέον στιβαρό και η κατάρρευση ακολουθεί τη μορφή που έχει για τετραγωνικής διατομής δοκίμια χωρίς διαμόρφωση άκρου, δηλαδή το σχηματισμό λοβών και την αναμενόμενη αυξομείωση του φορτίου. Τέλος, παρατηρούνται θραύσεις καθόλη τη διάρκεια της κατάρρευσης που είναι εμφανείς και στη καμπύλη του φορτίου (απότομες μικρές μειώσεις).

Για να διαπιστωθεί η επαναληψιμότητα της συμπεριφοράς τετραγωνικών δοκιμίων με αντίστοιχη διαμόρφωση γωνίας 60° , πραγματοποιήθηκε και άλλη δοκιμή με τις ίδιες πειραματικές συνθήκες, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στη συνέχεια.

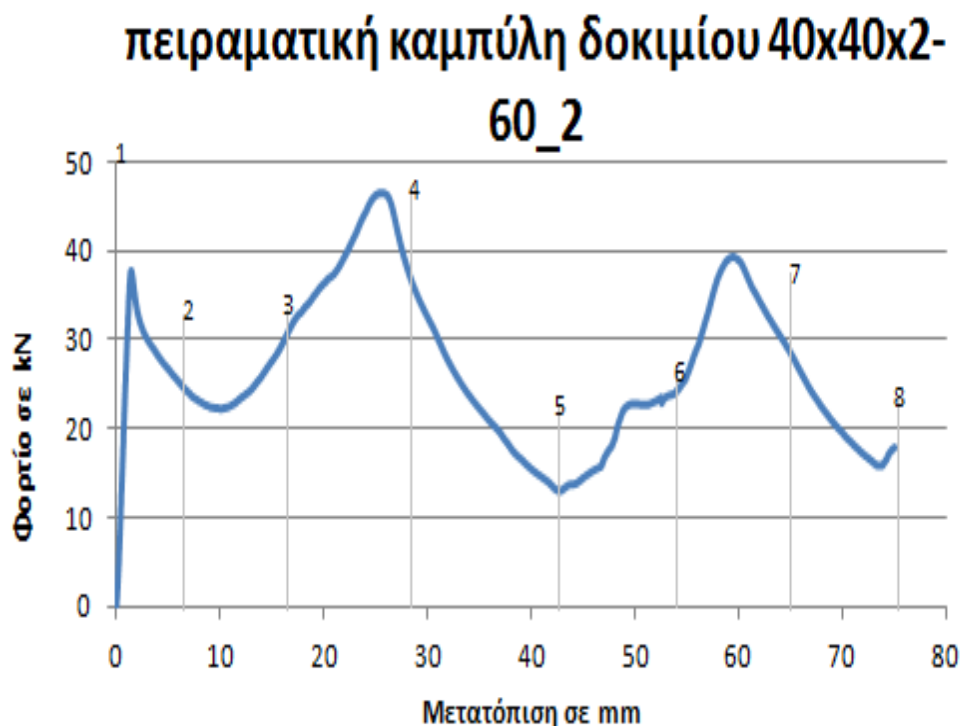
3.2.6.2 2^ο τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 60° (40x40x2-60_2)

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα από τη φόρτιση του δευτέρου τετραγωνικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 60° .



Εικόνα 3.23 Προοδευτικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δοκιμίου 40x40x2-60_2, από την αρχή (εικόνα 1) έως και το τέλος (εικόνα 8).

Ακολουθεί η παρουσίαση της πειραματικής καμπύλης φορτίου – μετατόπισης . Πάνω στην καμπύλη έχουν σημειωθεί οι θέσεις των παραπάνω στιγμιότυπων που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια της φόρτισης .



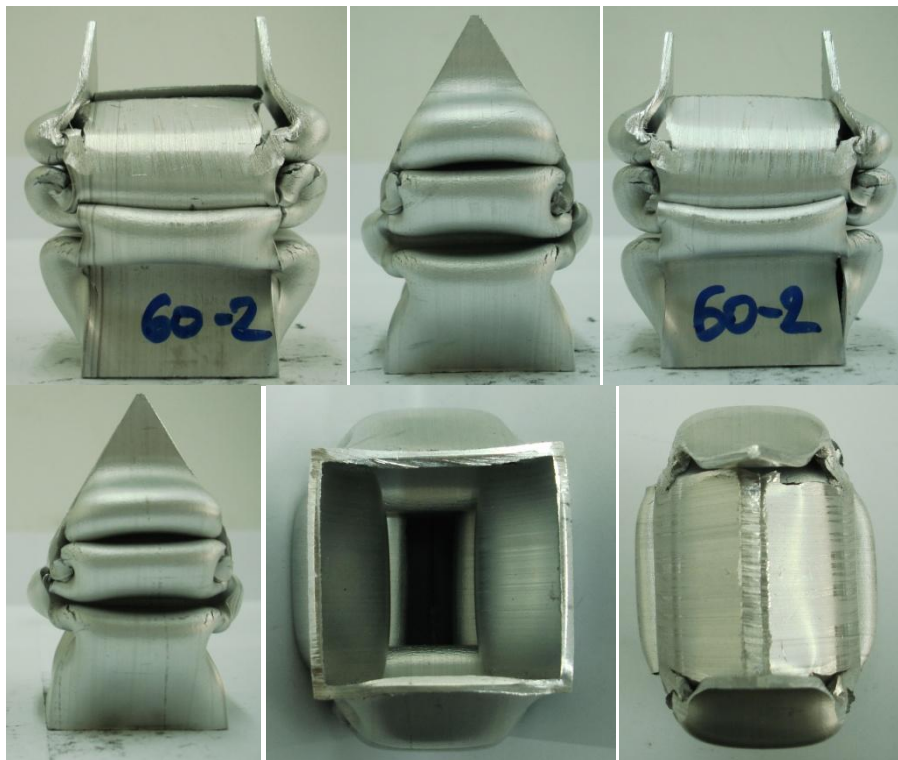
Διάγραμμα 3.17 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 2^ο τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται το μέσο, το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου, crush force efficiency c.f.e. σε μορφή πίνακα.

Πίνακας 3.17 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου 40x40x2-60_2.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-60_2	26,55745737	46,41552	1,991809303	1,747739603

Τέλος, παρουσιάζονται όψεις του δοκιμίου μετά τη φόρτιση, οι οποίες βοηθούν στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την κατάρρευση.



Εικόνα 3.24 Τελικές όψεις του δοκιμίου 40x40x2-60_2, μετά την κατάρρευση.

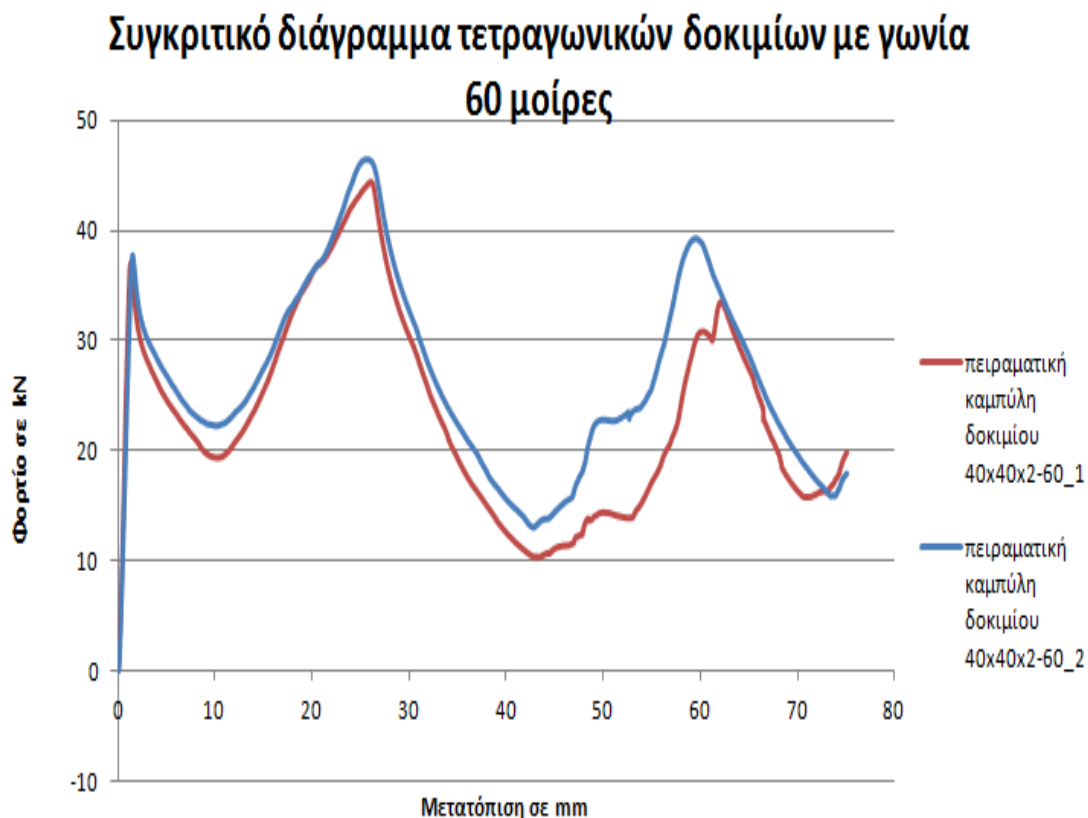
Συμπεράσματα – Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Παρατηρούμε ότι το δοκίμιο καταρρέει ακριβώς με τον ίδιο τρόπο με το προηγούμενο τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία 60° . Έτσι, βλέπουμε να σχηματίζονται μη εκτατοί λοβοί και το υλικό να καταρρέει διαμορφώνοντας διαδοχικά ορθογώνια στραμμένα κατά 90° . Αντίστοιχα, το ολικό μέγιστο δε συμπίπτει με το 1° τοπικό μέγιστο, ενώ εδώ παρουσιάζεται μεν θραύση, αλλά δεν είναι τόσο έντονη. Τέλος και σε αυτό το δοκίμιο παρουσιάζεται σχετικά μεγάλη απόκλιση μεταξύ του μεγίστου και του μέσου φορτίου (μεγάλη τιμή c.f.e.).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα από τα 2 τετραγωνικά δοκίμια, έτσι ώστε να διαπιστωθεί εάν εξασφαλίζεται η αναγκαία επαναληψιμότητα των πειραματικών δοκιμών.

3.2.6.3 Σύγκριση των 2 τετραγωνικών δοκιμίων με γωνία κορυφής 60° (40x40x2-60_1 , 40x40x2-60_2)

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται συγκριτικά οι πειραματικές καμπύλες των δύο δοκιμίων .



Διάγραμμα 3.18 Συγκριτική παρουσίαση πειραματικών καμπυλών των τετραγωνικών δοκιμίων, με γωνία κορυφής 60°.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των 2 τετραγωνικών δοκιμίων .

Πίνακας 3.18 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των 2 τετραγωνικών δοκιμίων, με γωνία κορυφής 60°.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-60_1	23,19972951	44,34843	1,739979713	1,911592546
40x40x2-60_2	26,55745737	46,41552	1,991809303	1,747739603
Διαφορά (%)	14,47 %	4,66 %	14,47 %	8,57 %

Συμπεράσματα

Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα 3.18, οι μορφές των πειραματικών καμπυλών για τα 2 δοκίμια είναι ίδιες. Επίσης παρατηρούμε ότι η καμπύλη του 1^{ου} δοκιμίου υστερεί σε σχέση με αυτή του 2^{ου}. Αυτή η διαφοροποίηση, είναι πιθανό να οφείλεται είτε στην αρχική διαμόρφωση των τεμαχίων (αδυναμία επίτευξης απόλυτης ομοιότητας των δοκιμίων) είτε στη στήριξη στη βάση.

Επίσης, παρατηρούμε ότι ενώ η διαφορά μεταξύ των μεγίστων φορτίων δεν είναι μεγάλη, η διαφορά στο μέσο φορτίο και κατ' επέκταση στο πλαστικό έργο είναι ασυνήθιστα μεγάλη (αγγίζει το 15 %). Εάν εστιάσουμε στην περιοχή του διαγράμματος μετά τα 40 mm, θα παρατηρήσουμε ότι η απόκλιση μεταξύ των καμπυλών μεγαλώνει. Αυτό μπορεί να δικαιολογήσει τη σημαντική διαφοροποίηση του μέσου φορτίου και του πλαστικού έργου. Η υστέρηση της καμπύλης φορτίου του 1^{ου} δοκιμίου οφείλεται στο γεγονός ότι έχουμε έντονες θραύσεις. Οι θραύσεις αυτές, μειώνουν τη στιβαρότητα του υλικού με αποτέλεσμα, το δοκίμιο να μη μπορεί να παραλάβει μεγάλα φορτία. Έτσι, κατά τη διαμόρφωση των λοβών προς το τέλος της φόρτισης, οι θραύσεις δεν επιτρέπουν να αυξηθεί το φορτίο που μπορεί να παραλάβει το δοκίμιο.

Τέλος, διαπιστώνουμε ότι καλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου έχει το 2^ο δοκίμιο, κάτι αναμενόμενο αφού το φορτίο του 1^{ου} δοκιμίου επηρεάζεται έντονα από τις θραύσεις.

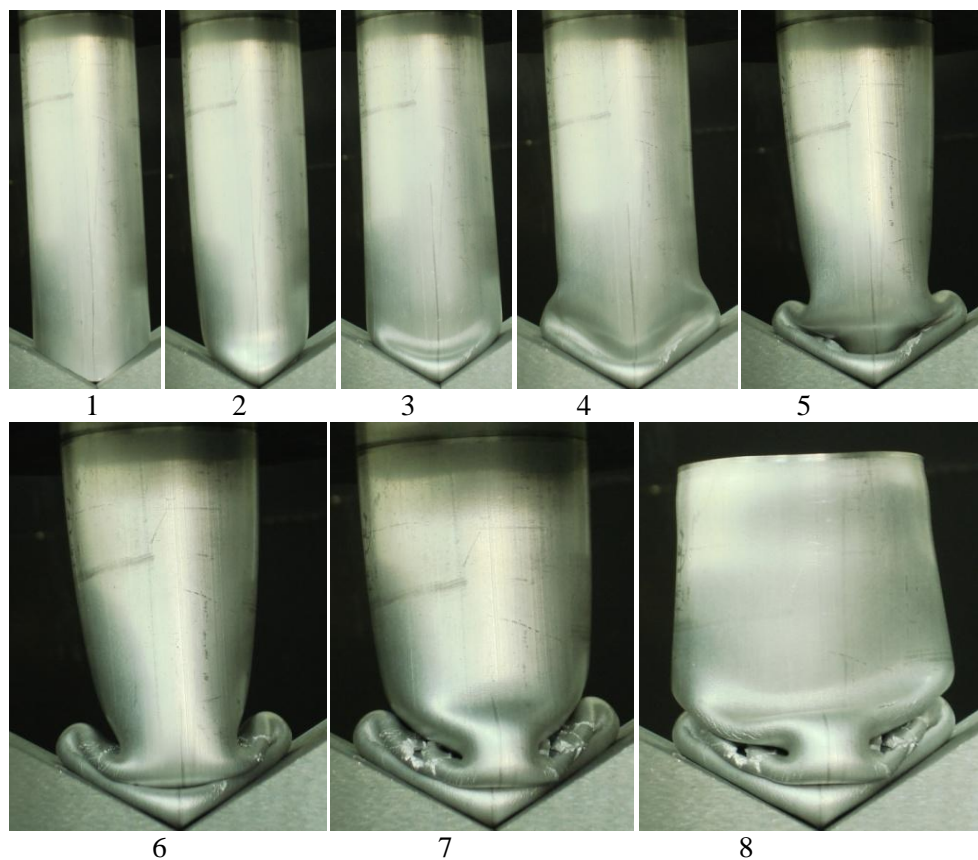
Παρά την έντονη διαφοροποίηση στο πλαστικό έργο και το μέσο φορτίο, το γεγονός ότι η μορφή των πειραματικών καμπυλών είναι ίδια και για τα 2 δοκίμια, μας επιτρέπει να θεωρήσουμε ότι εξασφαλίζεται η αναγκαία επαναληψιμότητα των πειραματικών δοκιμών.

Από τα όσα παρουσιάστηκαν προηγουμένως, το 2^ο δοκίμιο είναι καταλληλότερο για να χρησιμοποιηθεί ως αντιπροσωπευτικό για τα τετραγωνικά δοκίμια με γωνία κορυφής 60°, αφού παρουσιάζει πιο ομαλή συμπεριφορά κατάρρευσης από το πρώτο. Συνεπώς, το δοκίμιο που θα χρησιμοποιηθεί στις συγκρίσεις που θα ακολουθήσουν είναι το: **40x40x2-60_2**.

3.2.7 Κυλινδρικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 120°

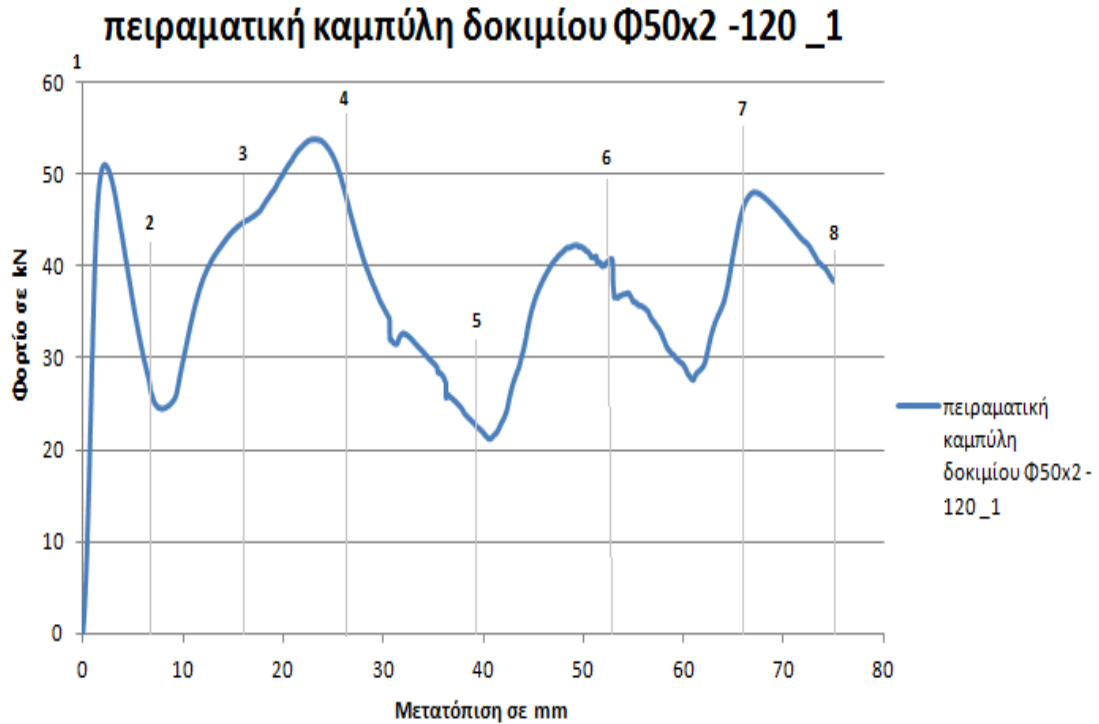
3.2.7.1 1ο κυλινδρικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 120° (Φ50x2 -120 _1)

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται στιγμιότυπα από τη φόρτιση του πρώτου κυλινδρικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 120° .



Εικόνα 3.25 Προοδευτικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δοκιμίου Φ50x2 -120 _1 από την αρχή (εικόνα 1) έως και το τέλος (εικόνα 8).

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, πάνω στην οποία έχουν σημειωθεί οι θέσεις των παραπάνω στιγμιότυπων .



Διάγραμμα 3.19 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 1^ο κυλινδρικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 120^ο.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται το μέσο και το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου, crush force efficiency c.f.e. σε μορφή πίνακα.

Πίνακας 3.19 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου Φ50x2 -120 _1.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
Φ50x2 -120 _1	37,56764743	53,77113	2,817573557	1,431314806

Τέλος, ακολουθεί η παρουσίαση των τελικών όψεων του δοκιμίου, που προέκυψαν μετά την παραμόρφωση και μας βοηθούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον τρόπο κατάρρευσης.



Εικόνα 3.26 Τελικές όψεις του δοκιμίου Φ50x2 -120 _1, μετά την κατάρρευση.

Συμπεράσματα – Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

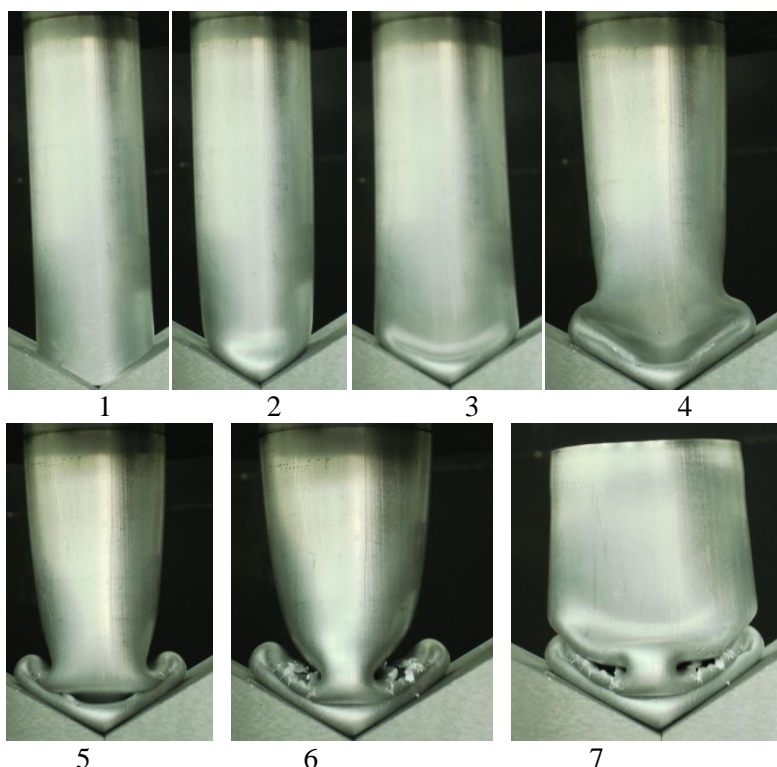
Παρατηρούμε, ιδιαίτερα από την κάτωση, ότι το δοκίμιο καταρρέει ακολουθώντας την diamond mode μορφή κατάρρευσης, σχηματίζοντας ελλειψοειδείς λοβούς. Παρατηρώντας την άνοψη, βλέπουμε ότι τα κάτω άκρα του δοκιμίου δεν ενώνονται όπως συνέβαινε στις προηγούμενες περιπτώσεις. Έτσι, αντί για την αρχική στρέβλωση των παράπλευρων επιφανειών, παρατηρούμε την έναρξη σχηματισμού λοβών στο τριγωνικό τμήμα του δοκιμίου που βρίσκεται στη βάση. Αυτό συμβαίνει, διότι η γωνία κορυφής των 120° είναι μεγάλη (σχεδόν πλησιάζει το επίπεδο άκρο), με αποτέλεσμα η ενέργεια που απαιτείται για τη στρέβλωση του υλικού να είναι μεγαλύτερη από αυτή που χρειάζεται για το σχηματισμό λοβού. Ο σχηματισμός λοβού αντί της στρέβλωσης, παρατηρείται και στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, όπου βλέπουμε ένα αρκετά υψηλό 1° peak του φορτίου. Λόγω της επίδρασης της γεωμετρίας triggering, το 1° peak του φορτίου δεν είναι και το ολικό μέγιστο, αφού λόγω του διαμορφωμένου άκρου, το υλικό είναι λιγότερο στιβαρό και καταρρέει απορροφώντας λιγότερη ενέργεια. Στη συνέχεια της κατάρρευσης όπου το υλικό γίνεται πιο στιβαρό, ο σχηματισμός του επόμενου λοβού οδηγεί στο ολικό μέγιστο του φορτίου.

Τέλος, όπως αποτυπώνεται τόσο στις φωτογραφίες της εικόνας 3.26 όσο και από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης (διαγρ. 3.19), μετά τα 30 mm παρουσιάζονται έντονες θραύσεις στο δοκίμιο. Οι θραύσεις αυτές, αποτυπώνονται στις απότομες και σχετικά μικρές πτώσεις του φορτίου στην πειραματική καμπύλη.

Στη συνέχεια και προκειμένου να διαπιστωθεί η επαναληψιμότητα της συμπεριφοράς κυλινδρικών δοκιμίων με αντίστοιχη διαμόρφωση γωνίας 120° υπό αξονική συμπίεση, πραγματοποιήθηκε και άλλη δοκιμή με τις ίδιες πειραματικές συνθήκες, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στη συνέχεια.

3.2.7.2 2^ο κυλινδρικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 120° (Φ50x2 -120 _2)

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται στιγμιότυπα από τη φόρτιση του δευτέρου κυλινδρικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 120° .



Εικόνα 3.27 Προοδευτικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δοκιμίου Φ50x2 -120 _2 από την αρχή (εικόνα 1) έως και το τέλος (εικόνα 7).

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, πάνω στην οποία έχουν σημειωθεί οι θέσεις των παραπάνω στιγμιοτύπων .



Διάγραμμα 3.20 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 2^ο κυλινδρικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 120°.

Στον επόμενο πίνακα, παρουσιάζονται το μέσο και το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου, crush force efficiency c.f.e..

Πίνακας 3.20 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου Φ50x2 -120 _2.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
Φ50x2 -120 _2	37,20065238	54,41542	2,790048929	1,462754455

Τέλος, ακολουθεί η παρουσίαση των τελικών όψεων του δοκιμίου, που προέκυψαν μετά την παραμόρφωση και μας βοηθούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον τρόπο κατάρρευσης.



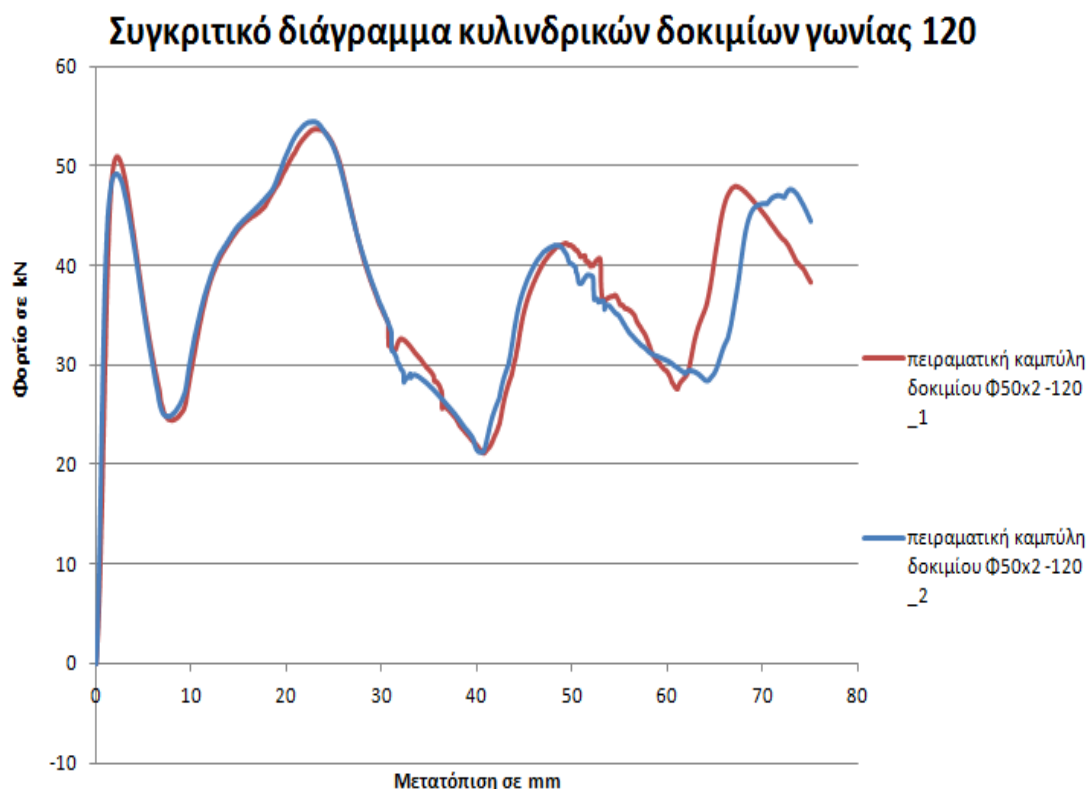
Εικόνα 3.28 Τελικές όψεις του δοκιμίου Φ50x2 -120_2, μετά την κατάρρευση.

Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι και το συγκεκριμένο δοκίμιο καταρρέει σχηματίζοντας ελλειψοειδείς λοβούς σύμφωνα με την diamond mode μορφή κατάρρευσης. Και σε αυτήν την περίπτωση το ολικό μέγιστο παρουσιάζεται στο 2^ο peak του φορτίου για τους λόγους που εξηγήθηκαν προηγουμένως. Τέλος, προχωρούμε στη σύγκριση των δύο δοκιμίων, για να διαπιστώσουμε κατά πόσον εξασφαλίζεται η επαναληψιμότητα των πειραματικών δοκιμών .

3.2.7.3 Σύγκριση των 2 κυλινδρικών δοκιμίων με γωνία κορυφής 120° (Φ50x2 -120_1 , Φ50x2 -120_2)

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται συγκριτικά οι πειραματικές καμπύλες των δύο δοκιμίων .



Διάγραμμα 3.21 Συγκριτική παρουσίαση πειραματικών καμπυλών των κυλινδρικών δοκιμών, με γωνία κορυφής 120°.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των δύο κυλινδρικών δοκιμών.

Πίνακας 3.21 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των δύο κυλινδρικών δοκιμών, με γωνία κορυφής 120°.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
Φ50x2 -120 _1	37,56764743	53,77113	2,817573557	1,431314806
Φ50x2 -120 _2	37,20065238	54,41542	2,790048929	1,462754455
Διαφορά (%)	0,98 %	1,19 %	0,98 %	2,19 %

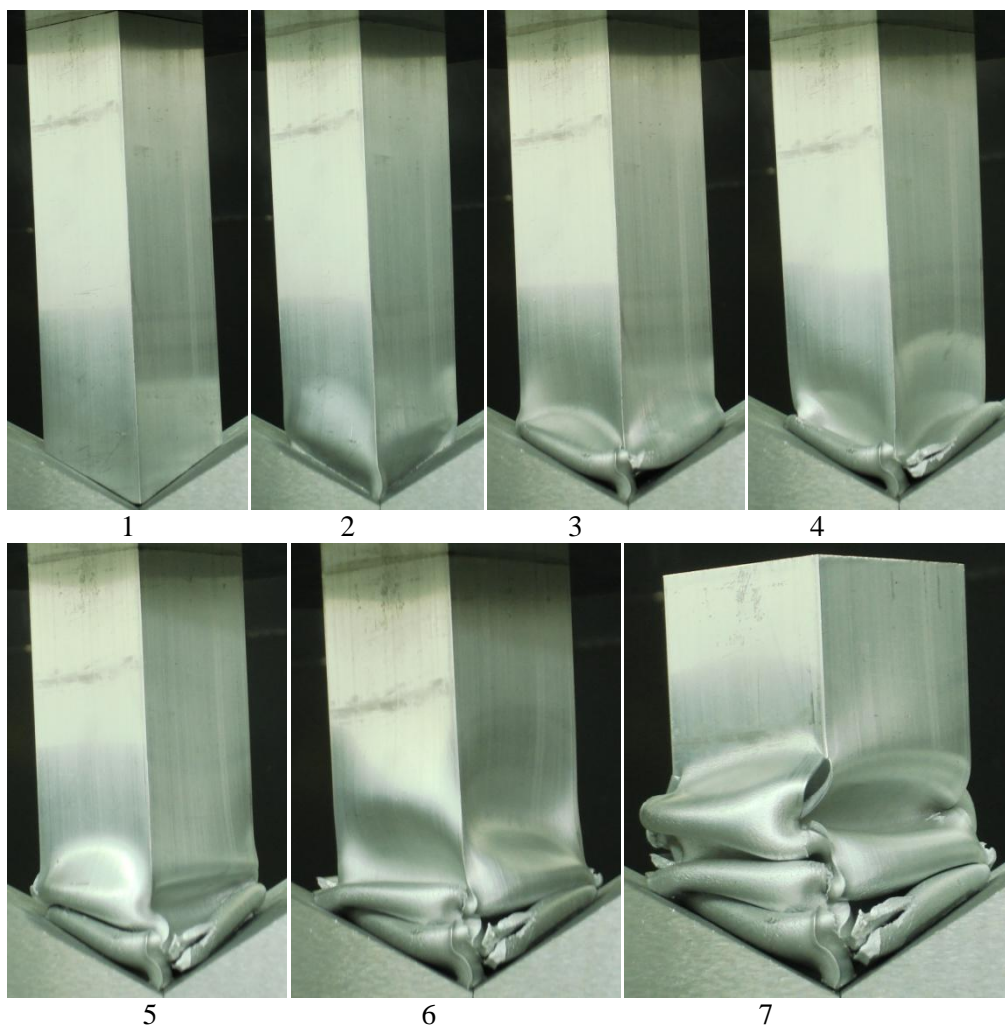
Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι οι πειραματικές καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται, ενώ οι αποκλίσεις στα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης είναι πολύ μικρές. Συνεπώς, εξασφαλίζεται η απαραίτητη επαναληψιμότητα. Τέλος, το δοκίμιο **Φ50x2 -120 _1** θα αντιπροσωπεύει αυτήν την κατηγορία δοκιμών στις συγκρίσεις που θα ακολουθήσουν.

3.2.8 Λοξό Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 120°

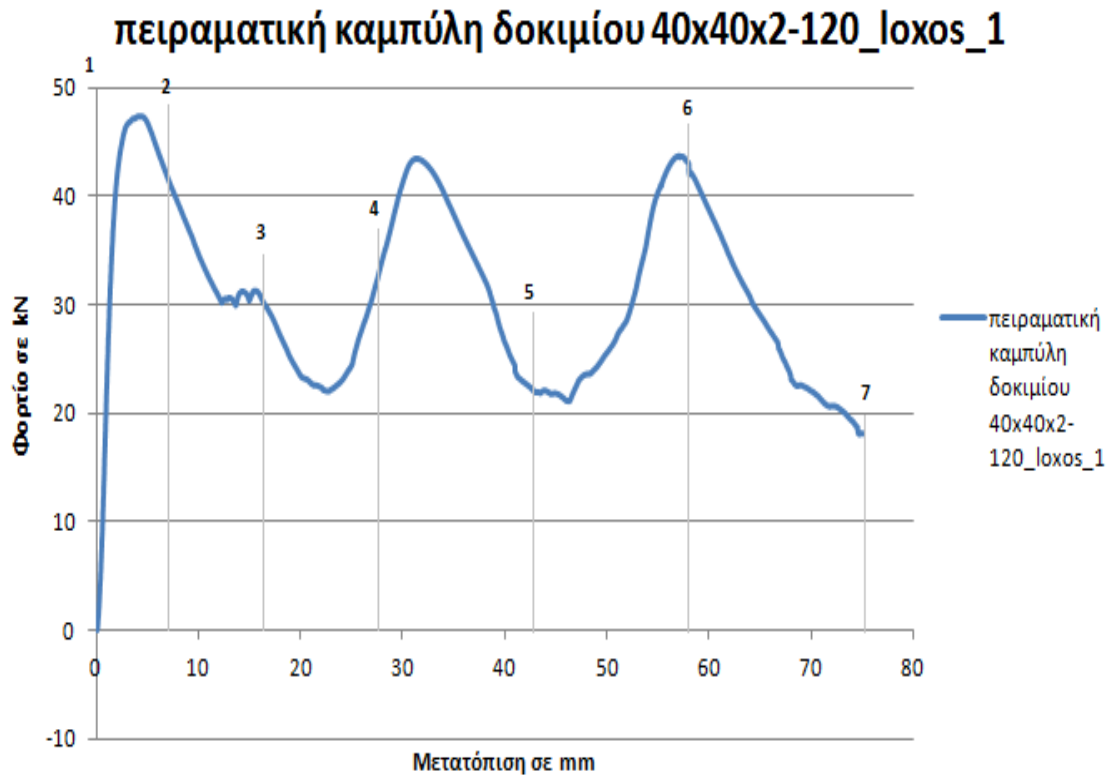
3.2.8.1 1° λοξό τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 120° (40x40x2-120_loxos_1)

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται στιγμιότυπα από τη φόρτιση του πρώτου λοξού τετραγωνικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 120°.



Εικόνα 3.29 Προοδευτικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δοκιμίου 40x40x2-120_loxos_1 από την αρχή (εικόνα 1) έως και το τέλος (εικόνα 7).

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, πάνω στην οποία έχουν σημειωθεί οι θέσεις των παραπάνω στιγμιότυπων.



Διάγραμμα 3.22 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 1^ο λοξό τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 120°.

Το μέσο, το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης crush force efficiency c.f.e. παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 3.22 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου 40x40x2-120_Ιoxos_1.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-120_Ιoxos_1	30,96742391	47,3551	2,322556793	1,529190808

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες διαφόρων όψεων του δοκιμίου μετά την κατάρρευση, ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τον τρόπο κατάρρευσης.



Εικόνα 3.30 Τελικές όψεις του δοκιμίου 40x40x2-120_1oxos_1, μετά την κατάρρευση.

Συμπεράσματα – Σχολιασμός αποτελεσμάτων

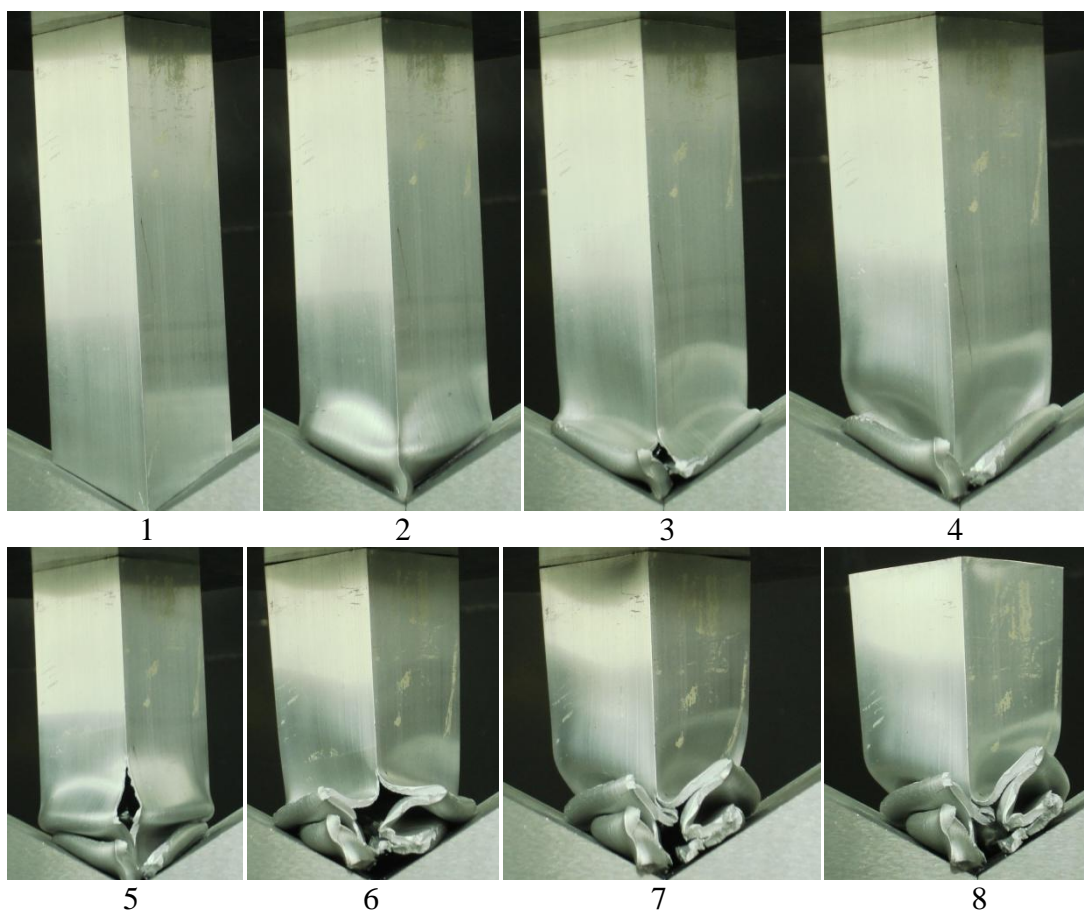
Το δοκίμιο καταρρέει σχηματίζοντας ορθογωνικούς λοβούς τοποθετημένους διαδοχικά ο ένας πάνω στον άλλο και στραμμένους κατά 90° ο καθένας από τον προηγούμενό του. Η μορφή κατάρρευσης είναι η diamond mode. Παρατηρούμε ότι και σε αυτήν την περίπτωση τα κάτω άκρα του δοκιμίου δε ενώνονται, όπως και στο κυλινδρικό δοκίμιο. Έτσι έχουμε το σχηματισμό λοβού στο τριγωνικό τμήμα του δοκιμίου.

Από την καμπύλη φορτίου, παρατηρούμε ότι τα μέγιστα ‘peak’ του φορτίου βρίσκονται σχεδόν στο ίδιο ύψος. Παρόλο που το 1^ο peak είναι και το ολικό μέγιστο (λόγω της μεγάλης γωνίας κορυφής δεν έχουμε σφοδρή μείωση του 1^{ου} μεγίστου), η γεωμετρία triggering το μειώνει αρκετά και το διαμορφώνει να είναι κοντά στα άλλα peak του φορτίου. Τέλος, οι θραύσεις που παρατηρούνται στις όψεις του δοκιμίου (εικ. 3.30) αποτυπώνονται και στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης (διαγρ.3.22) μέσω των μικρών και απότομων πτώσεων του φορτίου.

Για τη διακρίβωση της επαναληψιμότητας των πειραματικών δοκιμών, παρατίθενται τα αποτελέσματα από την εκτέλεση 2^{ης} δοκιμής για το συγκεκριμένο τύπο δοκιμίου .

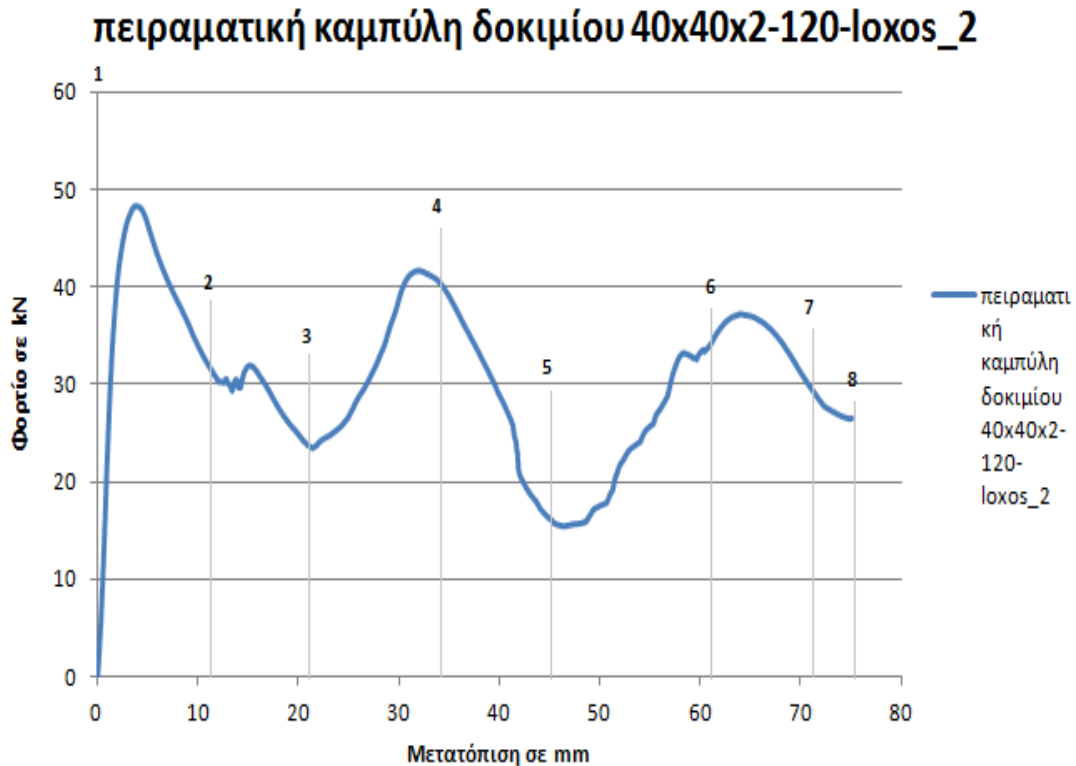
3.2.8.2 2^ο λοξό τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 120° (40x40x2-120_loxos_2)

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται στιγμιότυπα από τη φόρτιση του δευτέρου λοξού τετραγωνικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 120°.



Εικόνα 3.31 Προοδευτικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δοκιμίου 40x40x2-120_loxos_2 από την αρχή (εικόνα 1) έως και το τέλος (εικόνα 8).

Στη συνέχεια, παρατίθεται η πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το δοκίμιο στην οποία έχουν σημειωθεί τα αντίστοιχα σημεία από τα παραπάνω στιγμιότυπα .



Διάγραμμα 3.23 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 2^ο λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 120°.

Το μέσο και το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης crush force efficiency c.f.e. παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα .

Πίνακας 3.23 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου 40x40x2-120_loxos_2

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-120_loxos_2	30,40624171	48,32153	2,280468129	1,58919772

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες των τελικών όψεων του δοκιμίου μετά τη φόρτιση , που μας δίνουν στοιχεία για την κατάρρευση .



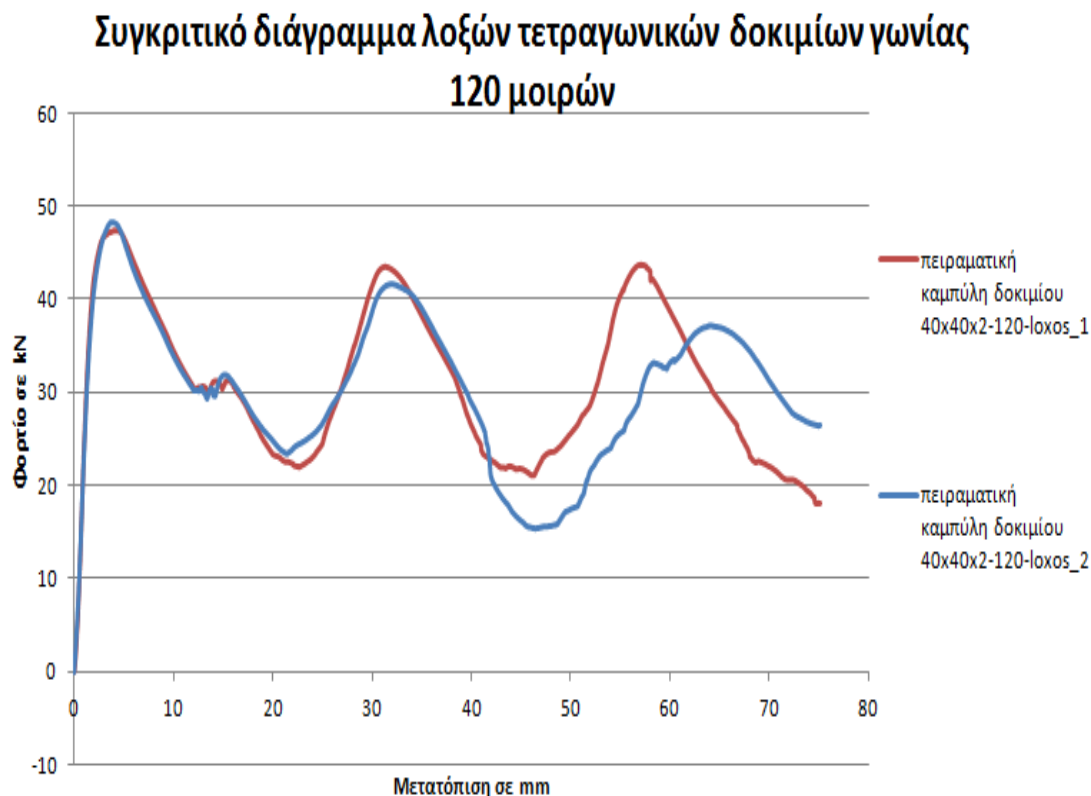
Εικόνα 3.32 Τελικές όψεις του δοκιμίου 40x40x2-120_1oxos_2, μετά την κατάρρευση.

Συμπεράσματα – Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Παρατηρούμε ότι το δοκίμιο καταρρέει σχηματίζοντας λοβούς σύμφωνα με την 2D – diamond mode μορφή κατάρρευσης. Αυτό που διαφοροποιεί το συγκεκριμένο δοκίμιο, είναι οι έντονες θραύσεις που παρατηρούνται κατά την κατάρρευση. Πράγματι, όπως παρατηρούμε στις παραπάνω φωτογραφίες, αλλά και στα προοδευτικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης (εικ. 3.31), εμφανίζεται σχίσσιμο των ακμών του δοκιμίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την πτώση του φορτίου που πλέον δε μπορεί να πλησιάσει τα επίπεδα του 1^{ου} peak και ολικού μεγίστου. Στη συγκριτική παρουσίαση που θα ακολουθήσει στη συνέχεια, θα εξετάσουμε κατά πόσο το σχίσσιμο των ακμών επηρεάζει την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης σε σχέση με το 1^ο δοκίμιο.

3.2.8.3 Σύγκριση των 2 λοξών τετραγωνικών δοκιμίων με γωνία κορυφής 120° (40x40x2-120_loxos_1 , 40x40x2-120_loxos_2)

Ακολουθεί το διάγραμμα που εμπεριέχει τις 2 πειραματικές καμπύλες των παραπάνω δοκιμίων .



Διάγραμμα 3.24 Συγκριτική παρουσίαση πειραματικών καμπυλών των λοξών τετραγωνικών δοκιμίων, με γωνία κορυφής 120°.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των δύο λοξών τετραγωνικών δοκιμίων.

Πίνακας 3.24 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των 2 λοξών τετραγωνικών δοκιμίων, με γωνία κορυφής 120°.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-120_loxos_1	30,96742391	47,3551	2,322556793	1,529190808
40x40x2-120_loxos_2	30,40624171	48,32153	2,280468129	1,58919772
Διαφορά (%)	1,81 %	2,04 %	1,81 %	3,92 %

Συμπεράσματα

Από το διάγραμμα 3.24, παρατηρούμε ότι οι καμπύλες μέχρι τα 40 mm περίπου, ταυτίζονται. Από τα 40 mm και έπειτα, βλέπουμε ότι το φορτίο του 2^{ου} δοκιμίου υστερεί από του 1^{ου} κατά σταθερή απόσταση. Ουσιαστικά, παρατηρούμε μια μετατόπιση της καμπύλης του 2^{ου} δοκιμίου κατάτι κάτω από του 1^{ου}. Αυτή η μετατόπιση οφείλεται στη θραύση των ακμών του 2^{ου} δοκιμίου, όπως περιγράφηκε προηγουμένως.

Ακόμη, παρατηρούμε τη μετατόπιση της θέσης του τελευταίου peak του φορτίου. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού εξαιτίας των θραύσεων το υλικό έχανε τη στιβαρότητά του, με αποτέλεσμα να εξελίσσεται η φόρτιση και να καθυστερεί ο σχηματισμός του λοβού.

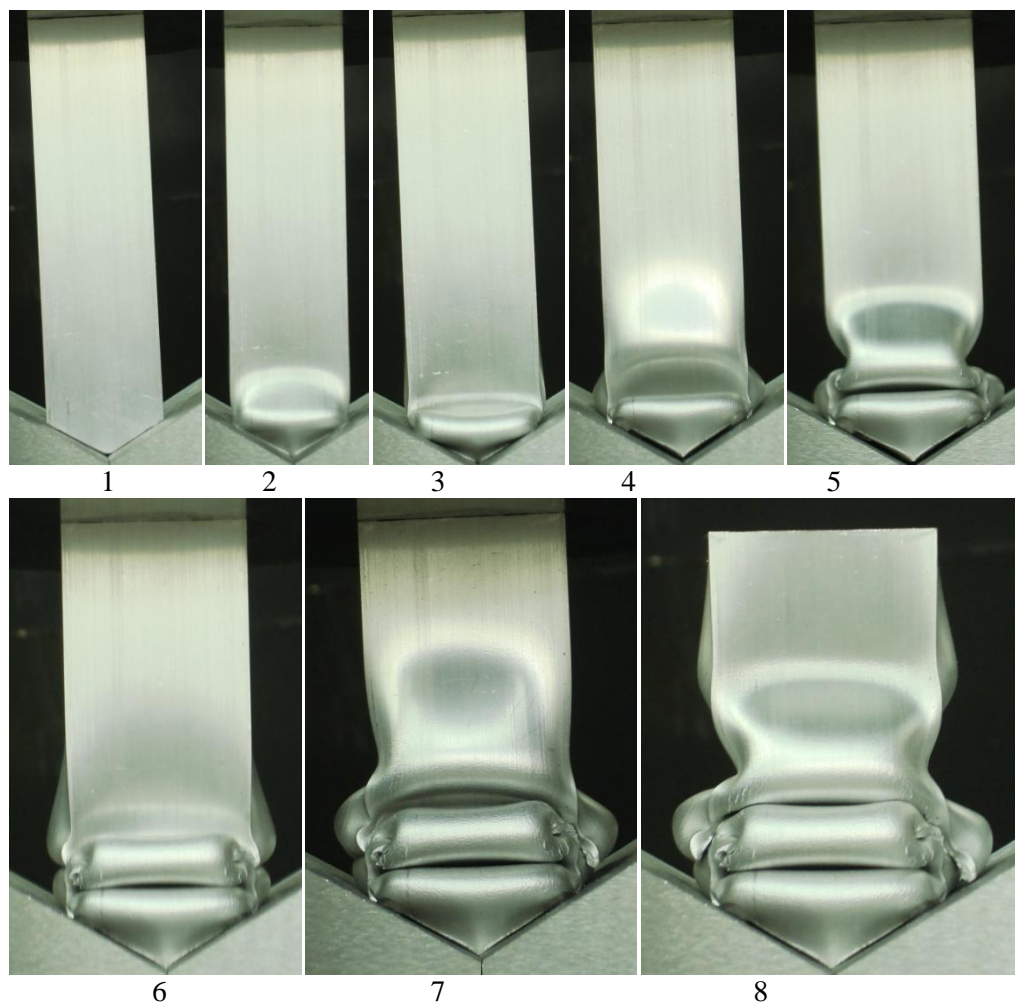
Παρά τις διαφοροποιήσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως, παρατηρούμε ότι οι διαφορές στα χαρακτηριστικά μεγέθη των 2 δοκιμίων διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Επίσης, η μορφή των καμπυλών είναι ίδια και για τα δύο δοκίμια. Συνεπώς, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι εάν δεν υπήρχε το φαινόμενο της θραύσης των ακμών του 2^{ου} δοκιμίου, θα επιτυγχάνονταν ουσιαστική σύγκλιση στον τρόπο κατάρρευσης των δύο δοκιμίων. Συνεπώς, καταλήγουμε στο ότι επιτυγχάνεται η αναγκαία επαναληψιμότητα των πειραματικών δοκιμών.

Τέλος, θα επιλέξουμε το 1^ο δοκίμιο για τις μετέπειτα συγκρίσεις, αλλά και για τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει, αφού τα αποτελέσματα που έχουμε δεν εμπεριέχουν την έντονη θραύση που παρουσιάζεται στο δεύτερο δοκίμιο, που σε καμία περίπτωση δε μπορεί να γενικευθεί ως συμπεριφορά της γενικότερης κατηγορίας των δοκιμίων. Συνεπώς, το δοκίμιο αναφοράς για τους λοξούς τετραγωνικούς σωλήνες, με γωνία κορυφής 120° είναι το: **40x40x2-120_loxos_1**.

3.2.9 Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 120°

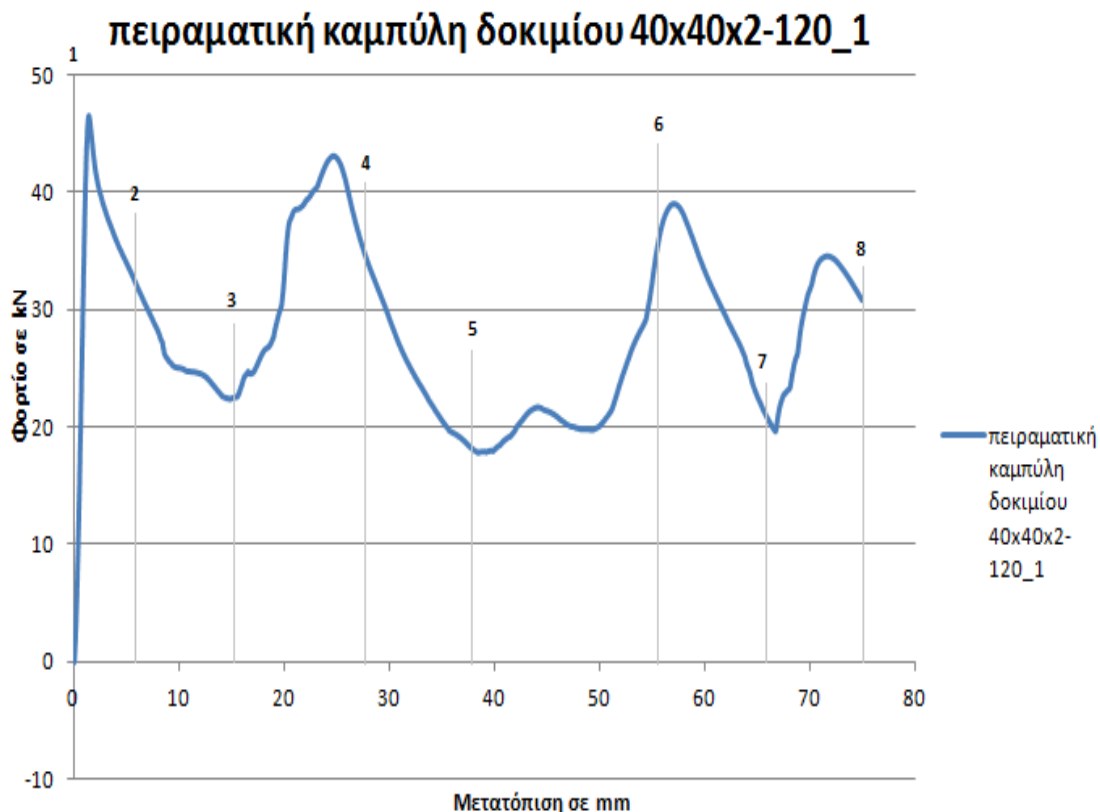
3.2.9.1 1^ο τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 120° (40x40x2-120_1)

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα από τη φόρτιση του πρώτου τετραγωνικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 120°.



Εικόνα 3.33 Προοδευτικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δοκιμίου 40x40x2-120_1, από την αρχή (εικόνα 1) έως και το τέλος (εικόνα 8).

Ακολουθεί η παρουσίαση της πειραματικής καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, πάνω στην οποία έχουν σημειωθεί οι θέσεις των παραπάνω στιγμιοτύπων που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια της φόρτισης.



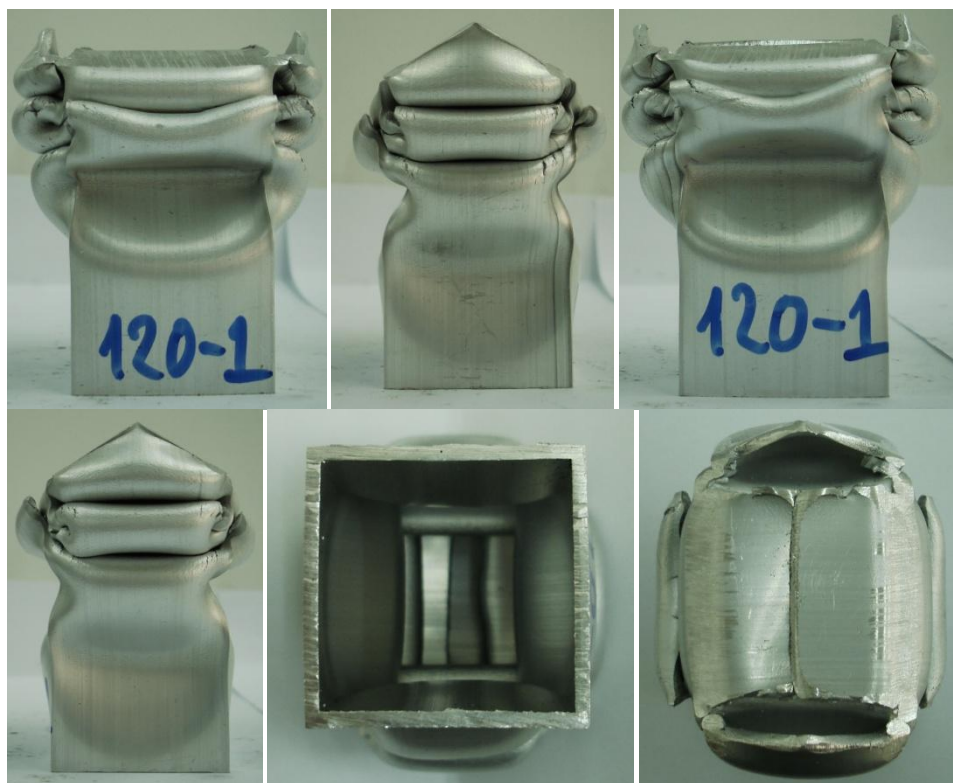
Διάγραμμα 3.25 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 1^ο τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 120°.

Το μέσο και το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης crush force efficiency c.f.e. παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 3.25 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου 40x40x2-120_1.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-120_1	28,01495133	46,53632	2,10112135	1,661124428

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες διαφόρων όψεων του δοκιμίου μετά την κατάρρευση, ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τον τρόπο κατάρρευσης.



Εικόνα 3.34 Τελικές όψεις του δοκιμίου 40x40x2-120_1, μετά την κατάρρευση.

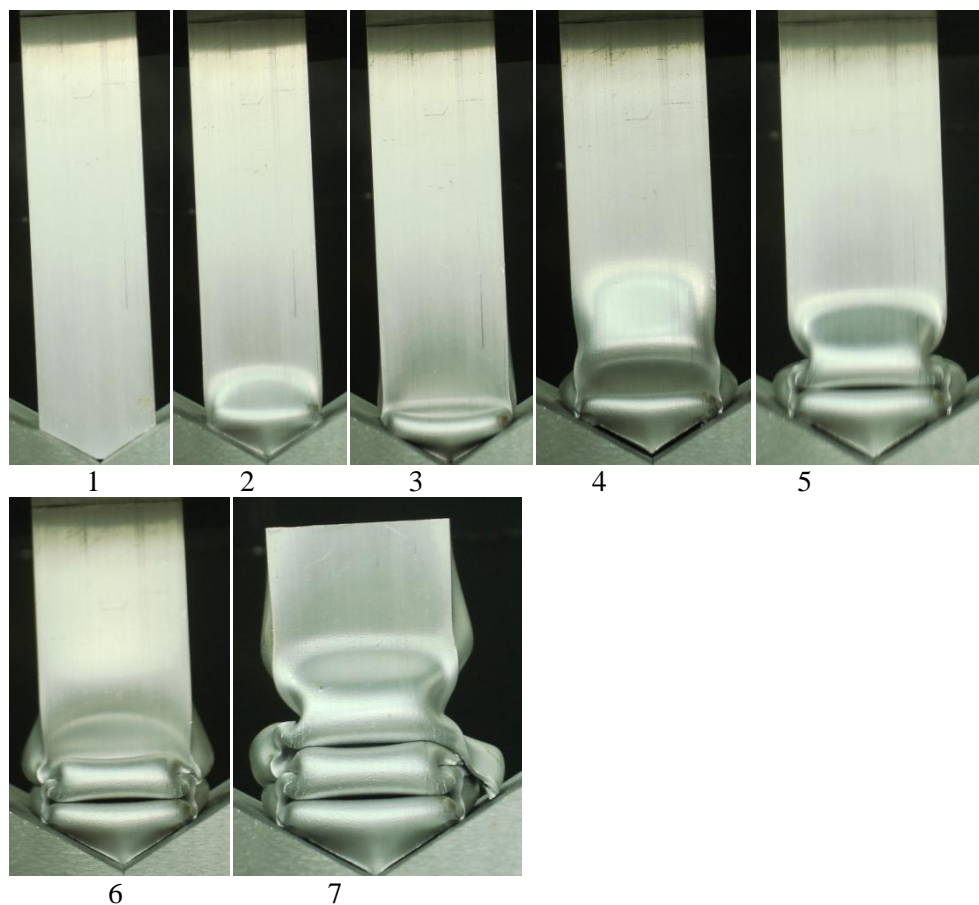
Συμπεράσματα – Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από την κάτοψη του δοκιμίου, βλέπουμε ότι αυτό καταρρέει σύμφωνα με τη diamond μορφή κατάρρευσης, σχηματίζοντας λοβούς ορθογώνιου σχήματος διαδοχικά τοποθετημένους και στραμμένους κατά 90° ο ένας με τον άλλο. Σε ότι αφορά την έναρξη της κατάρρευσης, τόσο από τα προοδευτικά στιγμιότυπα (εικ. 3.33) όσο και από τις τελικές όψεις, παρατηρούμε το σχηματισμό λοβού στο τριγωνικό τμήμα του δοκιμίου. Μάλιστα, κατά το σχηματισμό του λοβού στα πρώτα στάδια της φόρτισης, παρουσιάζεται και το ολικό μέγιστο του φορτίου, μιας και η επίδραση της triggering γεωμετρίας είναι σχετικά μικρή (μεγάλη γωνία κορυφής) και δε μπορεί να μειώσει δραστικά το αρχικό μέγιστο φορτίο. Παρόλα αυτά, η θραύση των ακμών και η στρέβλωση των παράπλευρων επιφανειών που ενώθηκαν στο εσωτερικό του δοκιμίου (εικ.3.34), οδήγησαν σε απομείωση του αρχικού μεγίστου φορτίου και το έφεραν κοντά στα υπόλοιπα peak του φορτίου. Έτσι, παρατηρούμε να σχηματίζονται περίπου ισοϋψή μέγιστα και να αποφεύγεται μεγάλη απόκλιση μεταξύ του ολικού μεγίστου και των υπολοίπων peak του φορτίου. Τέλος, στο συγκεκριμένο δοκίμιο δεν παρατηρούνται έντονες θραύσεις κατά την εξέλιξη της φόρτισης, κάτι που επιβεβαιώνεται τόσο από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης όσο και από τις τελικές όψεις του δοκιμίου.

Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν η συμπεριφορά κατάρρευσης που παρουσιάστηκε, χαρακτηρίζει όλα τα δοκίμια με αντίστοιχη διαμόρφωση και ίδιες πειραματικές συνθήκες, επαναλάβαμε την πειραματική δοκιμή και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

3.2.9.2 2^ο τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 120° (40x40x2-120_2)

Ακολουθούν προοδευτικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δευτέρου δοκιμίου .



Εικόνα 3.35 Προοδευτικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δοκιμίου 40x40x2-120_2, από την αρχή (εικόνα 1) έως και το τέλος (εικόνα 7).

Ακολουθεί η παρουσίαση της πειραματικής καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, πάνω στην οποία έχουν σημειωθεί οι θέσεις των παραπάνω στιγμιοτύπων που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια της φόρτισης.



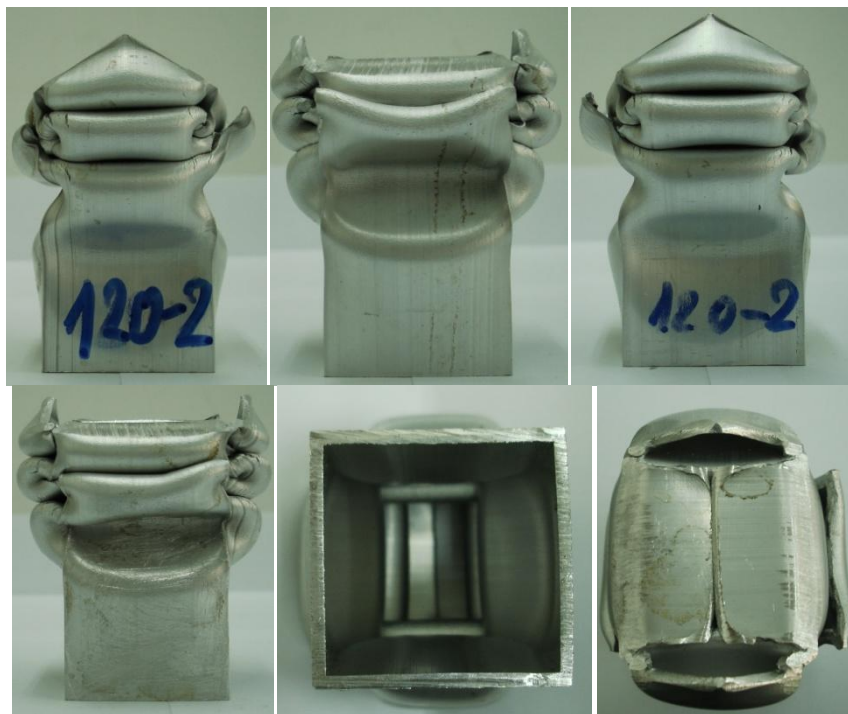
Διάγραμμα 3.26 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 2^ο τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 120°.

Το μέσο και το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης crush force efficiency c.f.e. παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα .

Πίνακας 3.26 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου 40x40x2-120_2.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-120_2	27,5880463	46,03968	2,069103472	1,668827126

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες διαφόρων όψεων του δοκιμίου μετά την κατάρρευση, που βοηθούν στη μελέτη του τρόπου κατάρρευσης .



Εικόνα 3.36 Τελικές όψεις του δοκιμίου 40x40x2-120_2, μετά την κατάρρευση.

Συμπεράσματα – Σχολιασμός αποτελεσμάτων

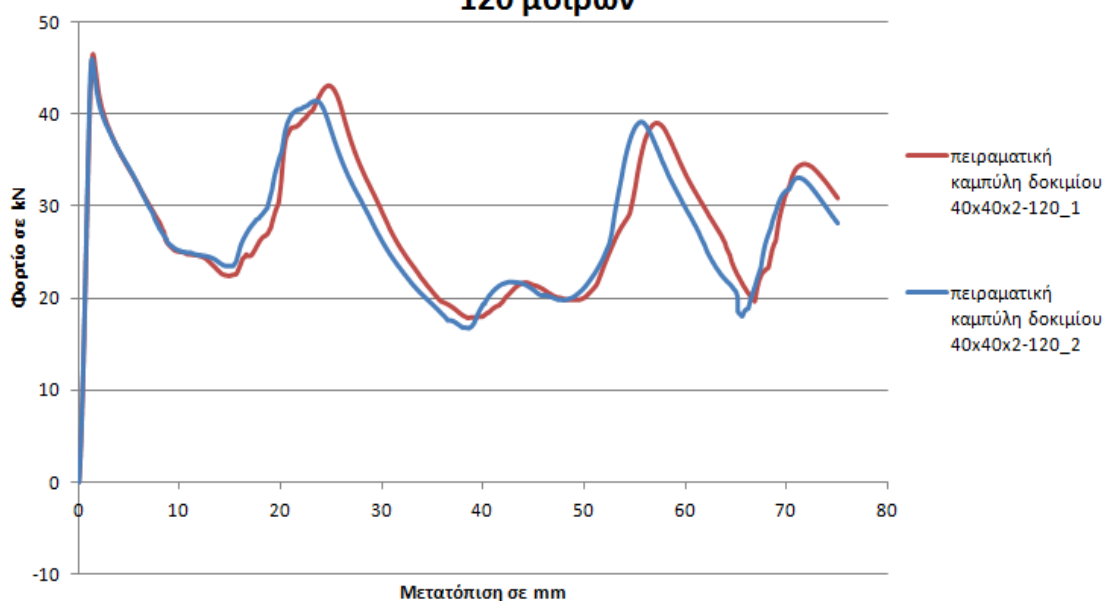
Από τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν, παρατηρούμε ότι το δοκίμιο καταρρέει με τον ίδιο ακριβώς τρόπο με το προηγούμενο δηλαδή σύμφωνα με τη diamond mode κατάρρευση, ενώ και εδώ το 1^ο peak του φορτίου αποτελεί και το ολικό μέγιστο. Τέλος, παρατηρούμε ότι τα peak του φορτίου είναι σχεδόν ισοϋψή, ενώ δεν παρατηρούνται έντονες θραύσεις, όπως ακριβώς συμβαίνει και με το 1^ο δοκίμιο.

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε συγκριτικά τα δεδομένα και των 2 δοκιμίων, ώστε να διαπιστώσουμε κατά πόσο συγκλίνουν οι συμπεριφορές κατάρρευσης και κατά πόσο εξασφαλίζεται η αναγκαία επαναληψιμότητα των πειραματικών δοκιμών.

3.2.9.3 Σύγκριση των 2 τετραγωνικών δοκιμίων με γωνία κορυφής 120° (40x40x2-120_1, 40x40x2-120_2)

Ακολουθεί το διάγραμμα που εμπεριέχει τις δύο πειραματικές καμπύλες των παραπάνω δοκιμίων.

Συγκριτικό διάγραμμα τετραγωνικών δοκιμών γωνίας 120 μοιρών



Διάγραμμα 3.27 Συγκριτική παρουσίαση πειραματικών καμπυλών των τετραγωνικών δοκιμών, με γωνία κορυφής 120°.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των δύο τετραγωνικών δοκιμών .

Πίνακας 3.24 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των δύο τετραγωνικών δοκιμών, με γωνία κορυφής 120°.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-120_1	28,01495133	46,53632	2,10112135	1,661124428
40x40x2-120_2	27,5880463	46,03968	2,069103472	1,668827126
Διαφορά (%)	1,52 %	1,07 %	1,52 %	0,46 %

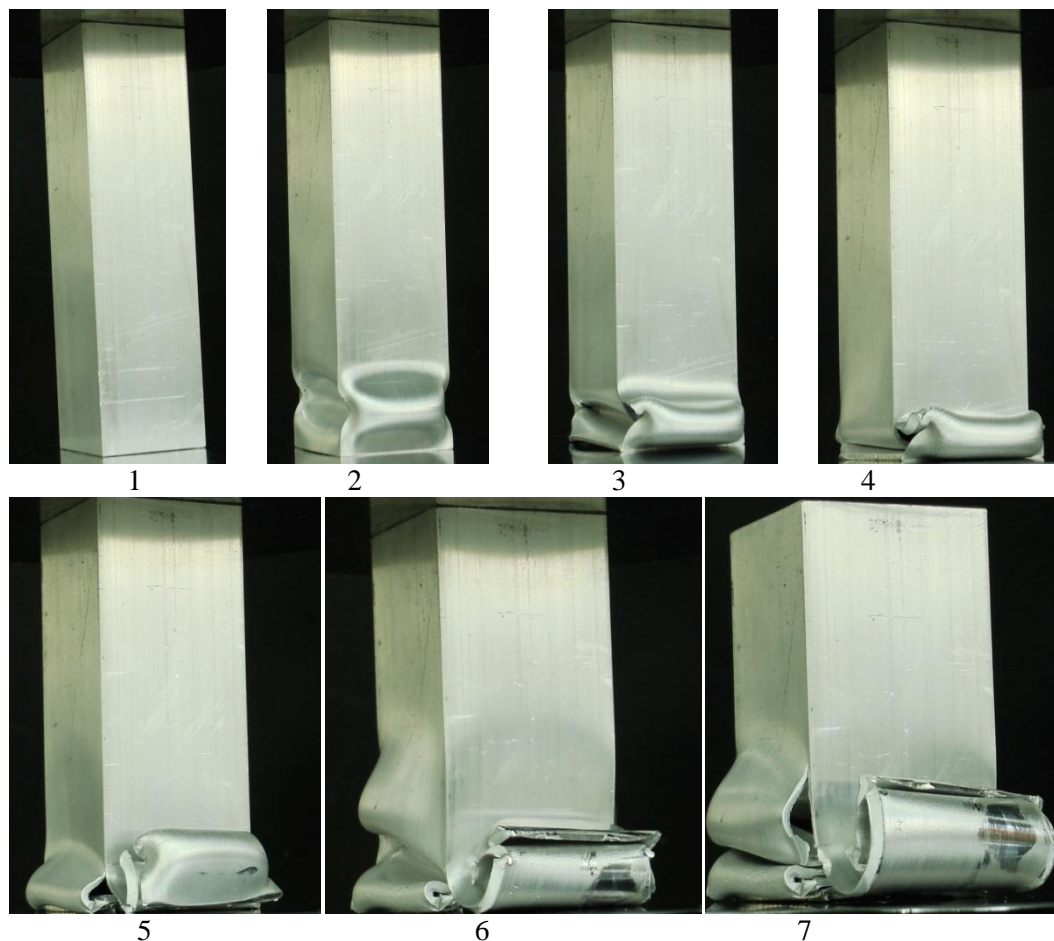
Με βάση τα παραπάνω, βλέπουμε ότι υπάρχει σχεδόν απόλυτη ταύτιση στις πειραματικές καμπύλες των δυο δοκιμών. Επίσης, οι διαφορές μεταξύ των χαρακτηριστικών μεγεθών των δοκιμών είναι πολύ μικρές. Συνεπώς, παρατηρούμε ότι εξασφαλίζεται η αναγκαία επαναληψιμότητα των πειραματικών δοκιμών, άρα και τα συμπεράσματα που προκύπτουν μπορούν να γενικευτούν για τα τετραγωνικά δοκίμια με γωνία κορυφής 120° στις ίδιες πειραματικές συνθήκες. Το δοκίμιο που επιλέγουμε για τις μετέπειτα συγκρίσεις είναι το 1°. Δοκίμιο αναφοράς: **40x40x2-120_1**.

Αφού μελετήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα για δοκίμια με διαμόρφωση άκρου, στη συνέχεια και προκειμένου να μπορούμε να μελετήσουμε την επίδραση του triggering σε δοκίμια κυκλικής και τετραγωνικής διατομής και να κάνουμε τις απαραίτητες συγκρίσεις, προχωρήσαμε σε πειράματα με δοκίμια χωρίς διαμόρφωση άκρου, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

3.2.10 Τετραγωνικό Δοκίμιο χωρίς διαμόρφωση άκρου (απλό τετραγωνικό δοκίμιο)

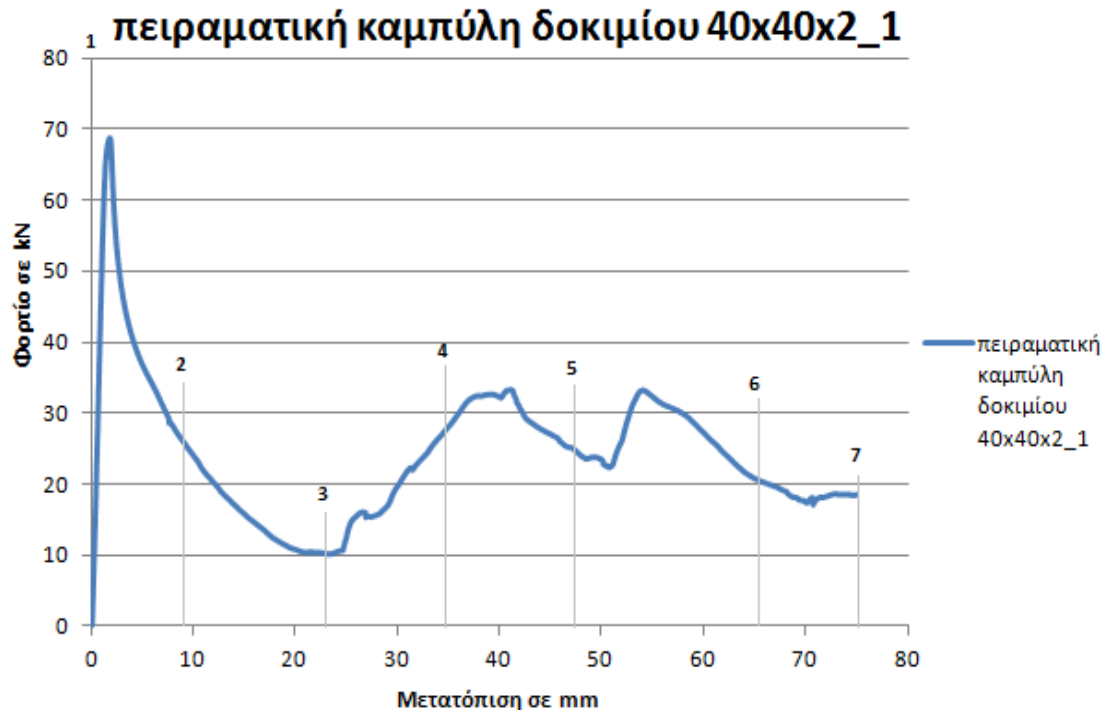
3.2.10.1 1^ο απλό τετραγωνικό δοκίμιο (40x40x2-1)

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται στιγμιότυπα από τη φόρτιση του 1^{ου} απλού τετραγωνικού δοκιμίου .



Εικόνα 3.37 Προοδευτικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δοκιμίου 40x40x2-1, από την αρχή (εικόνα 1) έως και το τέλος (εικόνα 7).

Ακολουθεί η παρουσίαση της πειραματικής καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, πάνω στην οποία έχουν σημειωθεί οι θέσεις των παραπάνω στιγμιοτύπων που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια της φόρτισης .



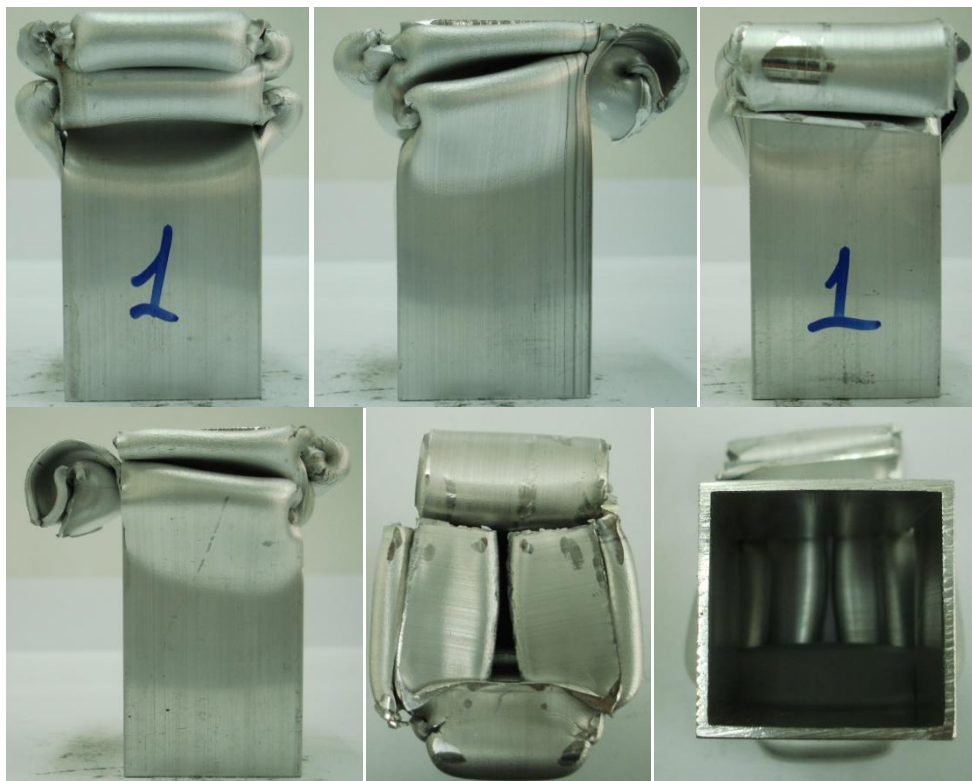
Διάγραμμα 3.28 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 1^ο απλό τετραγωνικό δοκίμιο.

Το μέσο και το μέγιστο φορτίο, το πλαστικό έργο και ο δείκτης crush force efficiency c.f.e. παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα .

Πίνακας 3.28 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου 40x40x2_1.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2_1	24,16652782	68,80449	1,812489587	2,847098702

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες διαφόρων όψεων του δοκιμίου μετά την κατάρρευση, που βοηθούν στη μελέτη του τρόπου κατάρρευσης.



Εικόνα 3.38 Τελικές όψεις του δοκιμίου 40x40x2_1, μετά την κατάρρευση.

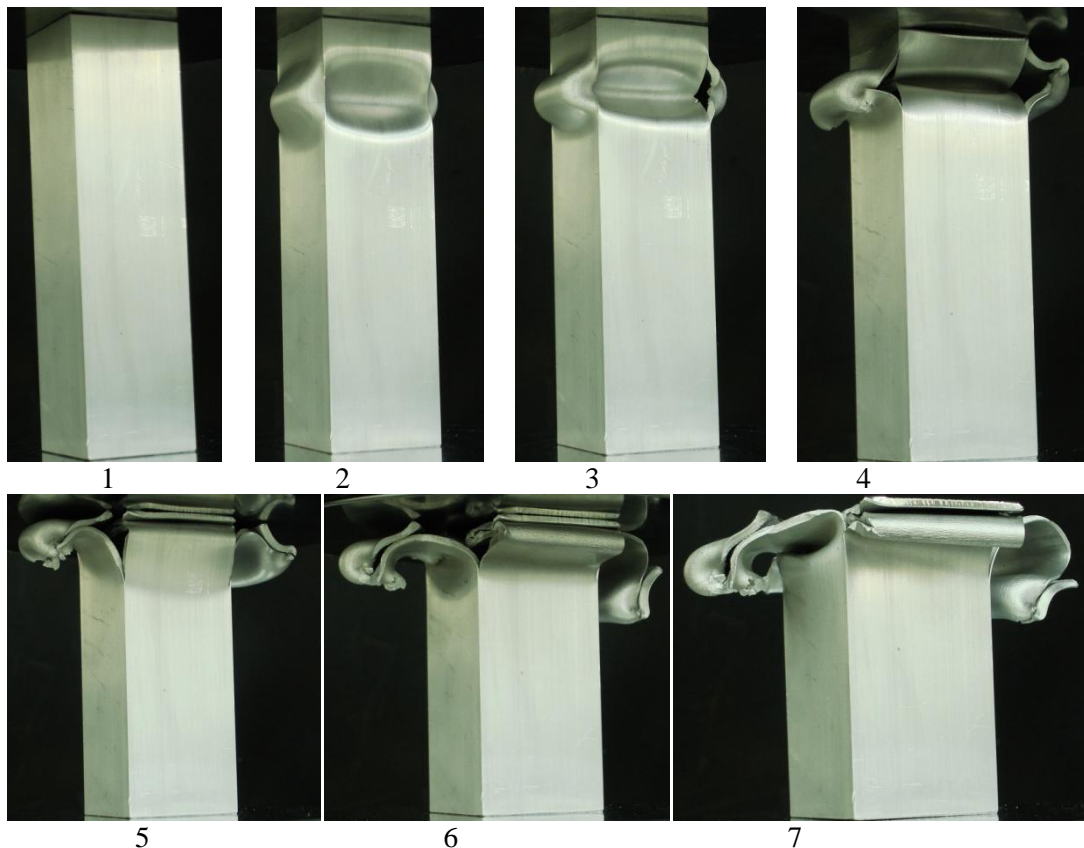
Συμπεράσματα – Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Παρατηρούμε ότι το δοκίμιο καταρρέει με τον αναμενόμενο τρόπο κατάρρευσης των δοκιμίων με ορθογωνική διατομή. Έτσι βλέπουμε το σχηματισμό λοβών ορθογώνιας μορφής, τα επίπεδα των οποίων περιστρέφονται ανά 90° , σύμφωνα με τη diamond mode. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται από τα στιγμιότυπα (εικ. 3.37), 2 απέναντι πλευρές κινούνται προς τα μέσα και οι άλλες 2 κινούνται προς τα έξω για το σχηματισμό των λοβών. Είναι χαρακτηριστικό ότι στα δοκίμια χωρίς διαμόρφωση άκρου, δε γνωρίζουμε από ποιο άκρο του δοκιμίου θα ξεκινήσει η κατάρρευση, σε αντίθεση με τα διαμορφωμένα, όπου είναι βέβαιο ότι θα εκκινήσει από το διαμορφωμένο άκρο. Ακόμα, παρατηρούμε το 1° peak του φορτίου, που είναι και το ολικό μέγιστο, να είναι πολύ υψηλό τόσο ως προς τα υπόλοιπα τοπικά μέγιστα όσο και ως προς το μέσο φορτίο. Είναι χαρακτηριστικό ότι το φορτίο παρουσιάζει μεγάλη ανομοιομορφία ως προς την κατανομή του, κάτι που αποδεικνύεται από τη μεγάλη τιμή του δείκτη c.f.e.. Τέλος, παρουσιάζεται έντονη θραύση, εξαιτίας της οποίας η μια έδρα του δοκιμίου εκτείνεται προς τα έξω περισσότερο από το αναμενόμενο.

Έπειτα πραγματοποιήθηκε και δεύτερη πειραματική δοκιμή, με αντίστοιχο δοκίμιο (διαστάσεις, διατομή, κλπ) και τις ίδιες πειραματικές συνθήκες, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στη συνέχεια.

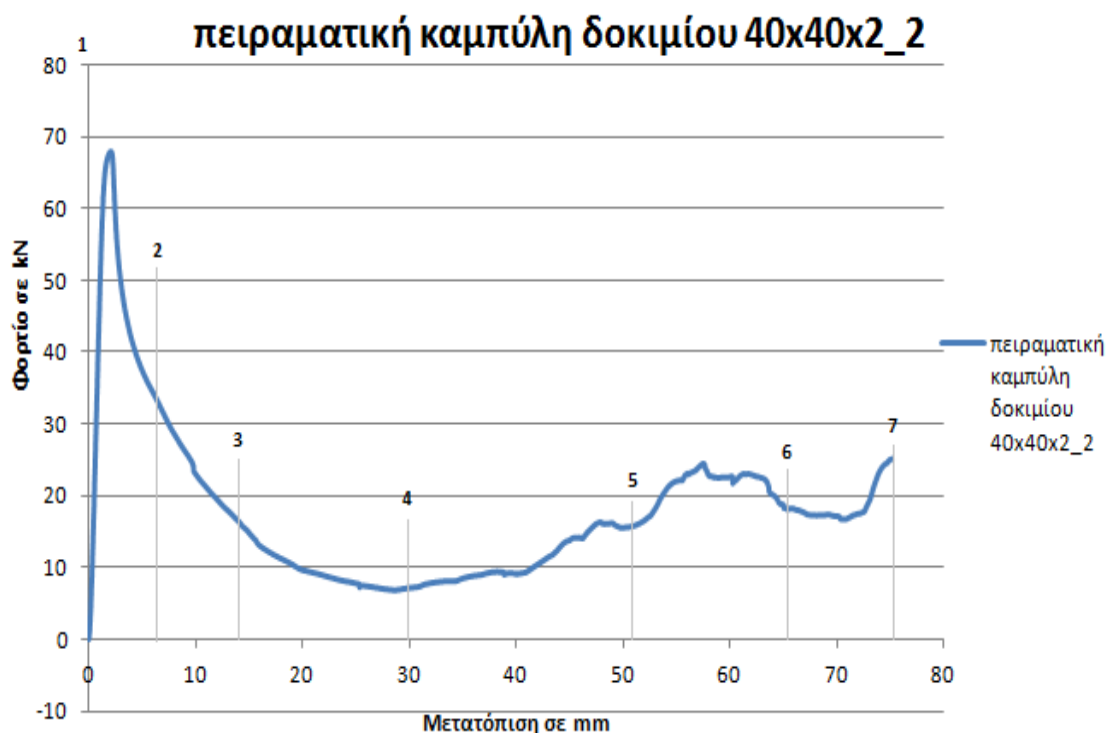
3.2.10.2 2^ο απλό τετραγωνικό δοκίμιο (40x40x2-2)

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται στιγμιότυπα από τη φόρτιση του 2^{ου} απλού τετραγωνικού δοκιμίου .



Εικόνα 3.39 Προοδευτικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δοκιμίου 40x40x2-2, από την αρχή (εικόνα 1) έως και το τέλος (εικόνα 7).

Ακολουθεί η πειραματική καμπύλη που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο δοκίμιο, καθώς επίσης και τα σημεία που αντιστοιχούν στα παραπάνω στιγμιότυπα .



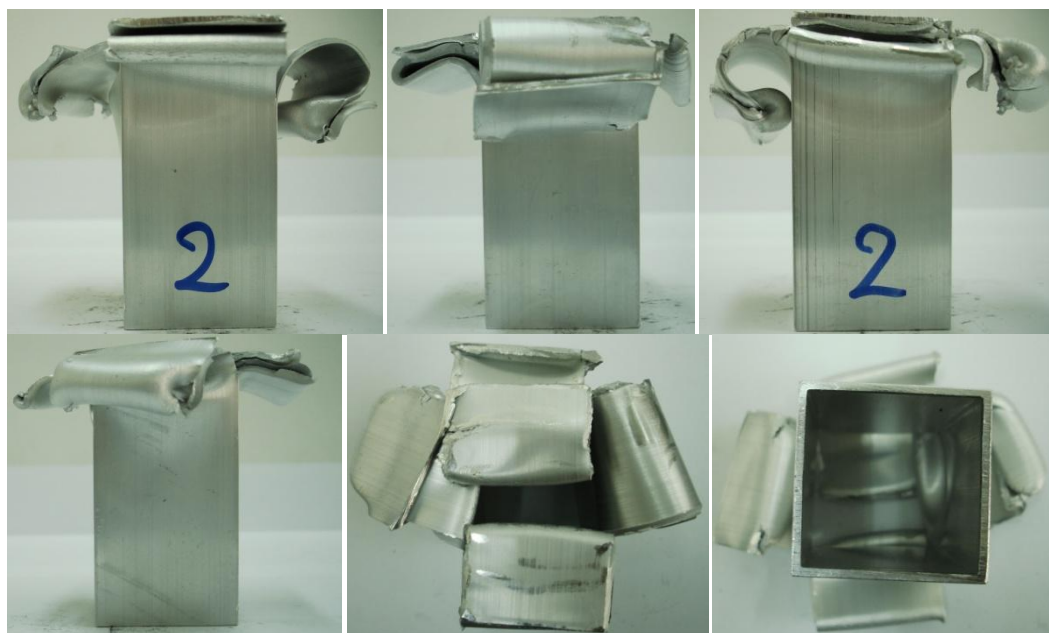
Διάγραμμα 3.29 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 2^ο απλό τετραγωνικό δοκίμιο.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης του δοκιμίου που προκύπτουν από την πειραματική καμπύλη. Ακολουθεί πίνακας που εμπεριέχει τα δεδομένα αυτά.

Πίνακας 3.29 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου 40x40x2-2.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-2	17,66056015	67,81122	1,324542011	3,839698143

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες διαφόρων όψεων του δοκιμίου μετά την κατάρρευση, που βοηθούν στη μελέτη του τρόπου κατάρρευσης .



Εικόνα 3.40 Τελικές όψεις του δοκιμίου 40x40x2_2, μετά την κατάρρευση.

Συμπεράσματα – Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στην κατάρρευση του συγκεκριμένου δοκιμίου, παρατηρείται μια ιδιομορφία. Ενώ, αρχικά έχουμε το σχηματισμό του 1^{ου} λοβού σύμφωνα με την αναμενόμενη μορφή κατάρρευσης (diamond mode), στη συνέχεια θραύονται όλες οι ακμές του δοκιμίου με αποτέλεσμα η κατάρρευση να ομοιάζει με το tube splitting, όπου έχουμε διάρρηξη του δοκιμίου και διαχωρισμό των εδρών του. Λόγω της θράυσης των ακμών, το υλικό του δοκιμίου χάνει τη στιβαρότητά του με αποτέλεσμα να μη μπορεί να παραλάβει μεγάλα φορτία. Έτσι, εξαιτίας αυτής της διαφοροποίησης στον τρόπο κατάρρευσης, το δοκίμιο εμφανίζει μία φορά μέγιστο φορτίο και στη συνέχεια διατηρείται περίπου σταθερό (κάτι που επιδιώκει το tube splitting). Αυτή η αλλαγή στον τρόπο κατάρρευσης, έχει σαν αποτέλεσμα το φορτίο να παρουσιάζει μεγάλη ανομοιομορφία και το πλαστικό έργο (δηλαδή η απορροφούμενη ενέργεια) να είναι εξαιρετικά χαμηλό όπως και το μέσο φορτίο.

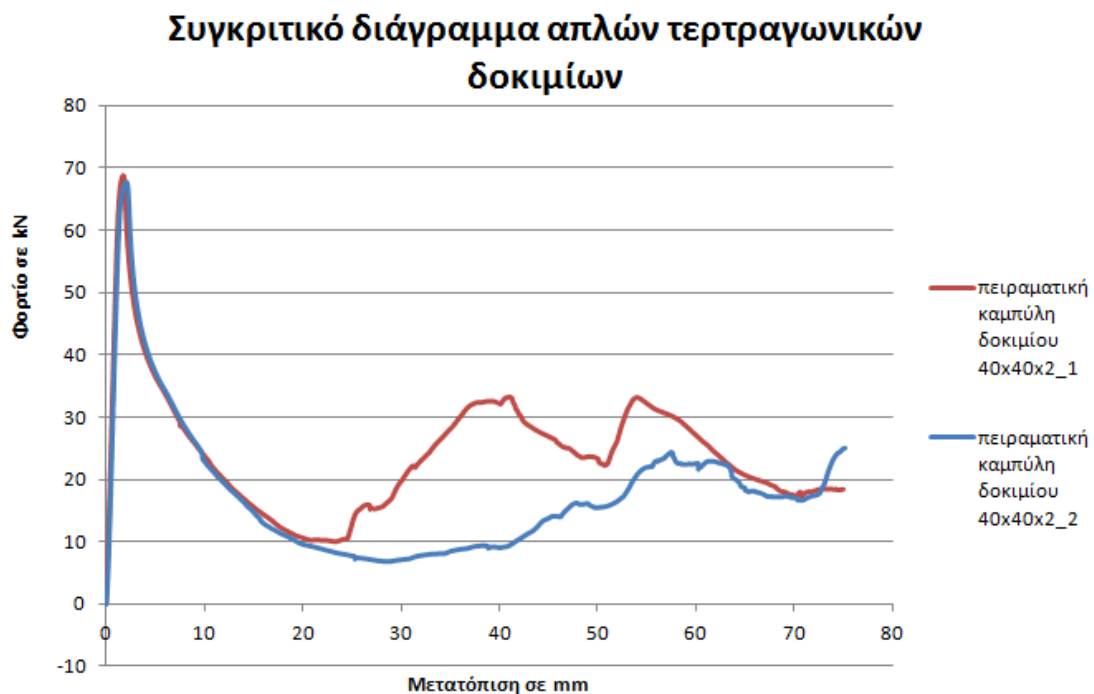
Χρήζει ιδιαίτερης αναφοράς το γεγονός ότι τα 2 δοκίμια ελήφθησαν από την ίδια ράβδο, το ένα διαδοχικά με το άλλο. Συνεπώς, μειώνονται οι πιθανότητες η διαφορά στον τρόπο κατάρρευσης να οφείλεται σε διαφορετική ποιότητα υλικού. Αν και ακόμα και στην ίδια ράβδο δε μπορεί να επιτευχθεί η απόλυτη ομοιογένεια στο υλικό, είναι δύσκολο να ερμηνευθεί με αυτό τέτοια διαφοροποίηση στην κατάρρευση.

Έτσι το πιο πιθανό είναι ότι μετά το σχηματισμό του 1^{ου} λοβού, το υλικό στη συγκεκριμένη διατομή να παρουσιάζει μια ατέλεια η οποία να έδρασε καταλυτικά και να οδήγησε στο να καταρρεύσει με αυτόν τον τρόπο το δοκίμιο στη συνέχεια της φόρτισης. Επίσης, το πρόβλημα εντάθηκε από το γεγονός ότι το υλικό προήλθε από extrusion, το οποίο σημαίνει ότι έχουμε απόλυτες ακμές, οι οποίες οδηγούν σε συγκέντρωση τάσης και κατά συνέπεια διευκολύνουν τη θραύση.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η παραμόρφωση ξεκίνησε από το άνω άκρο του δοκιμίου (σε αντίθεση με το 1^ο δοκίμιο), κάτι που επιβεβαιώνει τον ισχυρισμό ότι χωρίς διαμόρφωση άκρου δε μπορούμε να ελέγξουμε από πού θα ξεκινήσει η κατάρρευση.

3.2.10.3 Σύγκριση των 2 τετραγωνικών δοκιμίων χωρίς διαμόρφωση άκρου (40x40x2_1 , 40x40x2_2)

Είναι προφανές ότι δε μπορεί να εξασφαλισθεί η επαναληψιμότητα των πειραματικών δοκιμών, αφού τα 2 δοκίμια παρουσιάζουν εντελώς διαφορετική συμπεριφορά κατά την κατάρρευση. Για να επιβεβαιωθεί η παραπάνω διαπίστωση, παρατίθενται συγκριτικά τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών για τα δύο απλά τετραγωνικά δοκίμια.



Διάγραμμα 3.30 Συγκριτική παρουσίαση πειραματικών καμπυλών των τετραγωνικών δοκιμίων χωρίς διαμόρφωση άκρου.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των δύο τετραγωνικών δοκιμίων.

Πίνακας 3.30 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των 2 τετραγωνικών δοκιμίων χωρίς διαμόρφωση άκρου.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2_1	24,16652782	68,80449	1,812489587	2,847098702
40x40x2_2	17,66056015	67,81122	1,324542011	3,839698143
Διαφορά (%)	26,92 %	1,44 %	26,92 %	34,86 %

Όπως ήταν αναμενόμενο, τα 2 δοκίμια παρουσιάζουν πολύ μεγάλες αποκλίσεις τόσο στις πειραματικές καμπύλες όσο και στα χαρακτηριστικά μεγέθη. Μοναδικό σημείο ομοιότητας, αποτελεί το ολικό μέγιστο και η αντίστοιχη μορφή των καμπυλών όπου παρουσιάζεται αυτό. Έτσι, βλέπουμε απόλυτη ταύτιση των καμπυλών στα πρώτα στάδια της παραμόρφωσης, κάτι αναμενόμενο αφού και το 2^ο δοκίμιο αρχικά σχηματίζει λοβό κατά την κατάρρευση. Κατά τα άλλα, διαφορές που αγγίζουν το 30% είναι προφανές ότι αποδεικνύουν αναντιστοιχία μεταξύ των δοκιμίων.

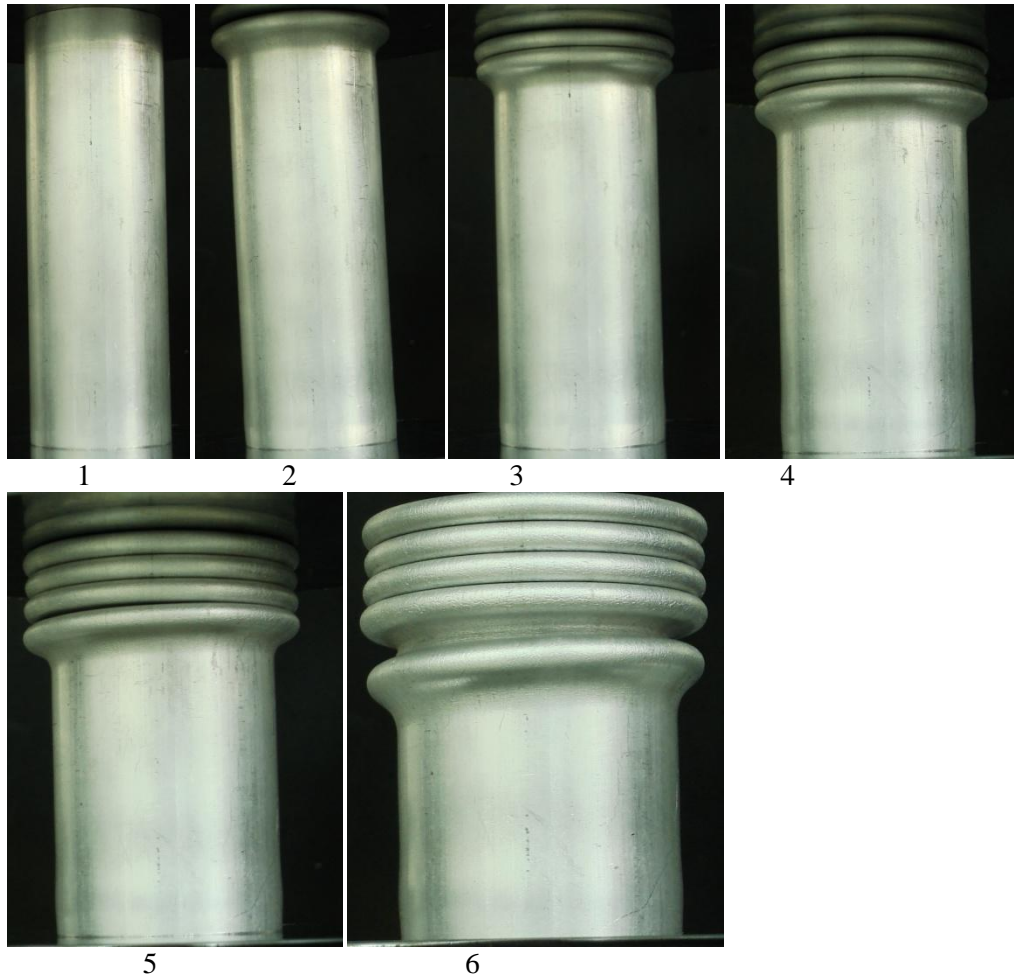
Από τη βιβλιογραφία, γνωρίζουμε ότι η αναμενόμενη μορφή κατάρρευσης ορθογωνικών δοκιμίων τετραγωνικής διατομής προσεγγίζει τη μορφή κατάρρευσης του 1^{ου} δοκιμίου. Συνεπώς, αυτό μας επιτρέπει να μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε σε συγκρίσεις που θα ακολουθήσουν στη συνέχεια ως ενδεικτικό τρόπο κατάρρευσης των αντίστοιχων δοκιμίων. Άρα στα επόμενα το δοκίμιο: **40x40x2_1**, αποτελεί το δοκίμιο αναφοράς των τετραγωνικών δοκιμίων χωρίς διαμόρφωση άκρου.

Τέλος, αξίζει να επισημανθεί ότι το τετραγωνικό δοκίμιο χωρίς διαμόρφωση άκρου παρουσιάζει μεγάλη ανομοιομορφία φορτίου, κάτι που εξηγείται από την εμφάνιση ολικού μεγίστου κατά πολύ μεγαλύτερου από τα υπόλοιπα peak του φορτίου. Η ομοιομορφία του φορτίου σε σχέση με το triggering, θα μας απασχολήσουν σε επόμενη ενότητα όπου θα γίνουν και οι απαραίτητες συγκρίσεις μεταξύ των δοκιμίων.

3.2.11 Κυλινδρικό Δοκίμιο χωρίς διαμόρφωση άκρου (απλό κυλινδρικό δοκίμιο)

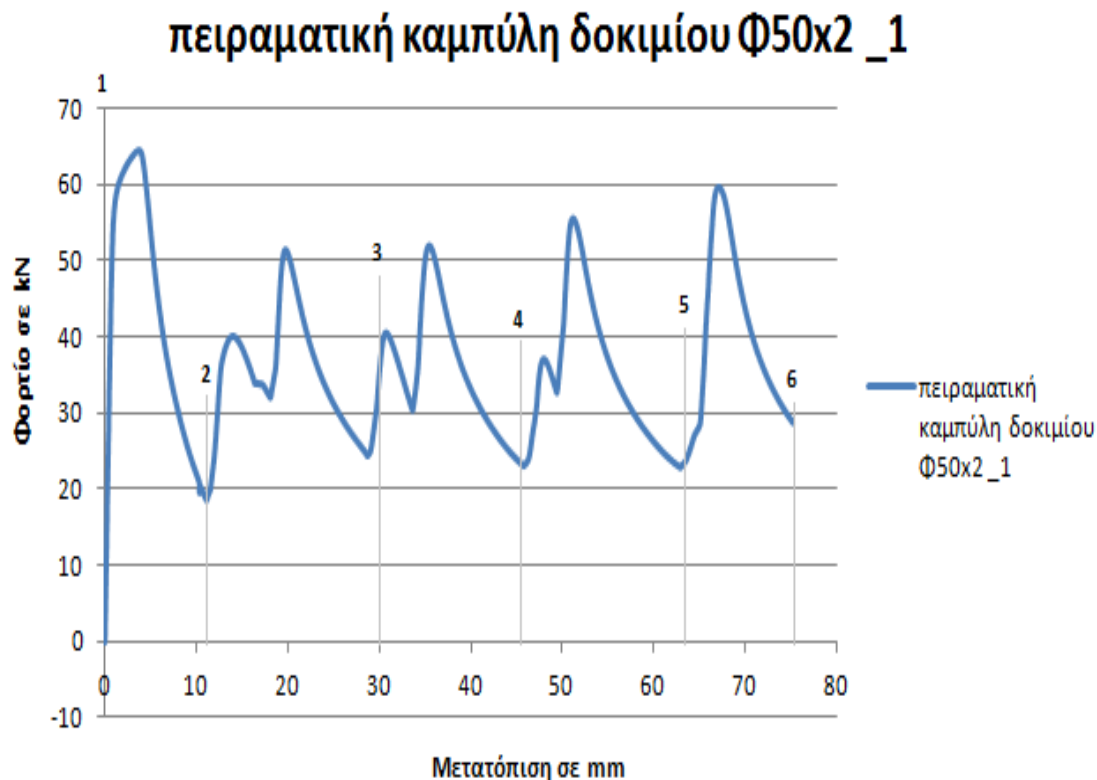
3.2.11.1 1^ο απλό κυλινδρικό δοκίμιο (Φ50x2 _1)

Ακολουθεί παρουσίαση των προοδευτικών στιγμιότυπων κατάρρευσης του δοκιμίου .



Εικόνα 3.41 Προοδευτικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δοκιμίου Φ50x2 _1 από την αρχή (εικόνα 1) έως και το τέλος (εικόνα 6).

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, πάνω στην οποία έχουν σημειωθεί οι θέσεις των παραπάνω στιγμιότυπων .



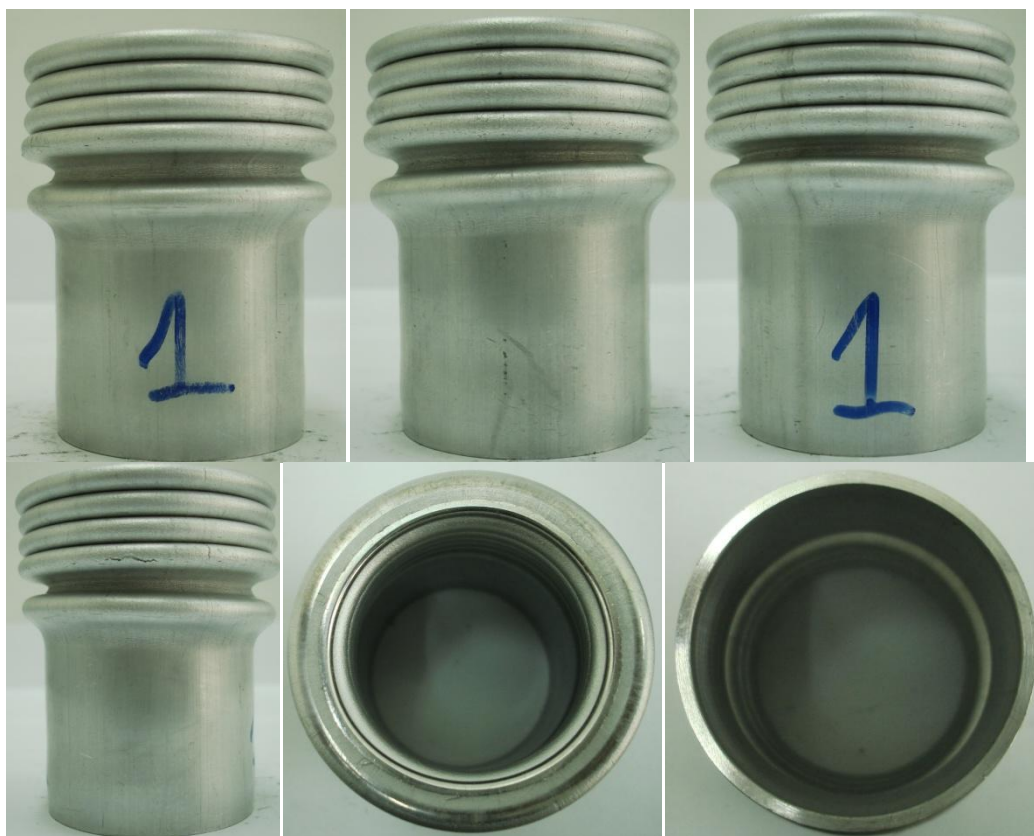
Διάγραμμα 3.31 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 1^ο απλό κυλινδρικό δοκίμιο.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης του δοκιμίου που προκύπτουν από την πειραματική καμπύλη. Ακολουθεί πίνακας που εμπεριέχει τα δεδομένα αυτά.

Πίνακας 3.31 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου Φ50x2 _1.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
Φ50x2 _1	36,87570314	64,53609	2,765677735	1,750097883

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες διαφόρων όψεων του δοκιμίου μετά την κατάρρευση, που βοηθούν στη μελέτη του τρόπου κατάρρευσης.



Εικόνα 3.42 Τελικές όψεις του δοκιμίου Φ50x2_1 , μετά την κατάρρευση.

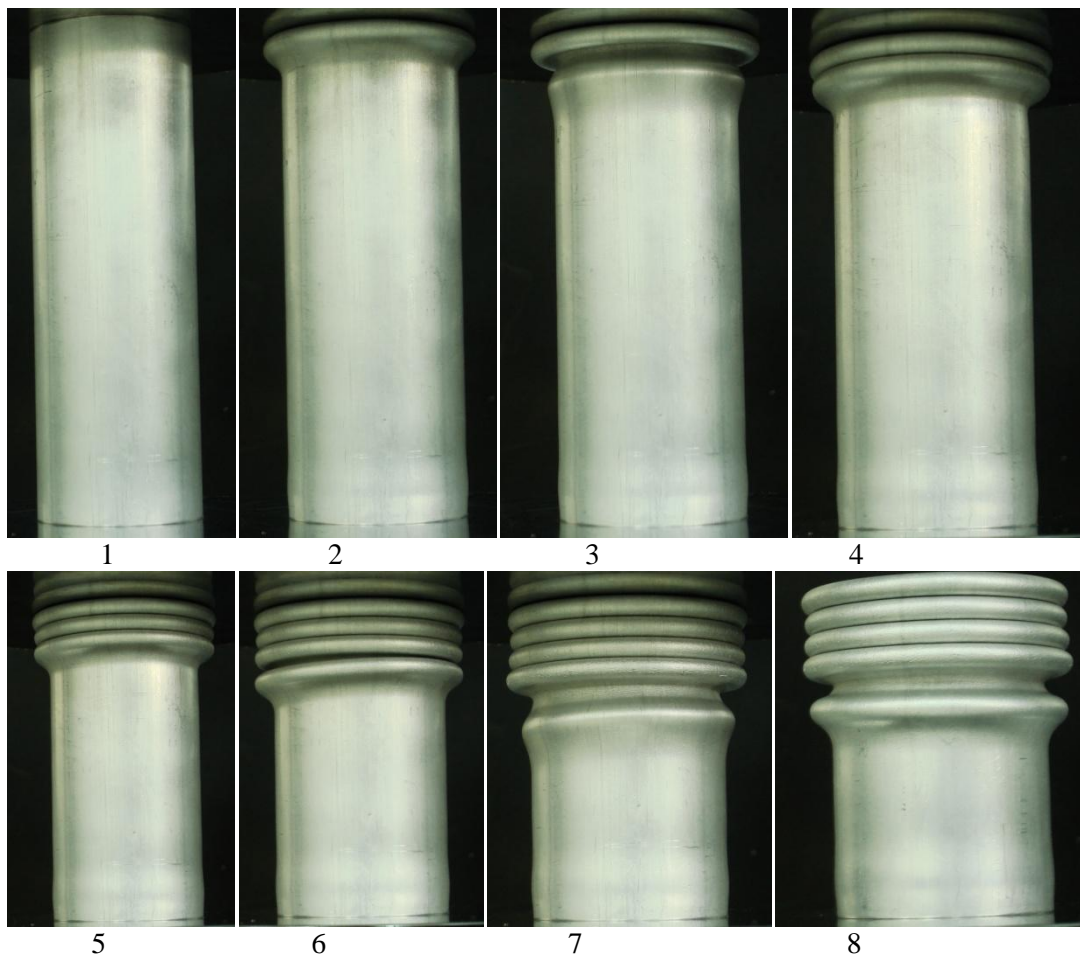
Συμπεράσματα –Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η μορφή κατάρρευσης του δοκιμίου είναι αυτή που παρουσιάζει η πλειονότητα των κυλινδρικών δοκιμίων που υπόκεινται σε αξονική συμπίεση δηλαδή η αξονοσυμμετρική κατάρρευση με το σχηματισμό εκτατών λοβών (concertina mode). Από τη μορφή της καμπύλης , παρατηρούμε ότι το ολικό μέγιστο είναι το αρχικό peak του φορτίου. Επίσης παρατηρούμε , μετά το σχηματισμό του 1^{ου} λοβού και την εμφάνιση του ολικού μεγίστου, να επαναλαμβάνεται σταθερά το ίδιο μοτίβο στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης , κατά το σχηματισμό των επόμενων λοβών. Ακόμα παρατηρούμε τα peak του φορτίου να είναι σχεδόν ισοϋψή. Τέλος, το γεγονός ότι σταμάτησε η φόρτιση πριν έρθουν σε επαφή ο τελευταίος με τον προτελευταίο λοβό, αποτυπώνεται στην πειραματική καμπύλη μέσω του φορτίου το οποίο δε φτάνει στο ελάχιστο διότι το δοκίμιο μπορεί να παραμορφωθεί περαιτέρω, μέχρις ότου να ξαναγίνει στιβαρό και να ξεκινήσει ο σχηματισμός του επόμενου λοβού.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της 2^{ης} πειραματικής δοκιμής που αφορά κυλινδρικό δοκίμιο χωρίς διαμόρφωση άκρων και η οποία πραγματοποιήθηκε, προκειμένου να διαπιστωθεί αν εξασφαλίζεται η αναγκαία επαναληψιμότητα στη συμπεριφορά κατάρρευσης αυτών των δοκιμίων .

3.2.11.2 2^ο απλό κυλινδρικό δοκίμιο (Φ50x2 _2)

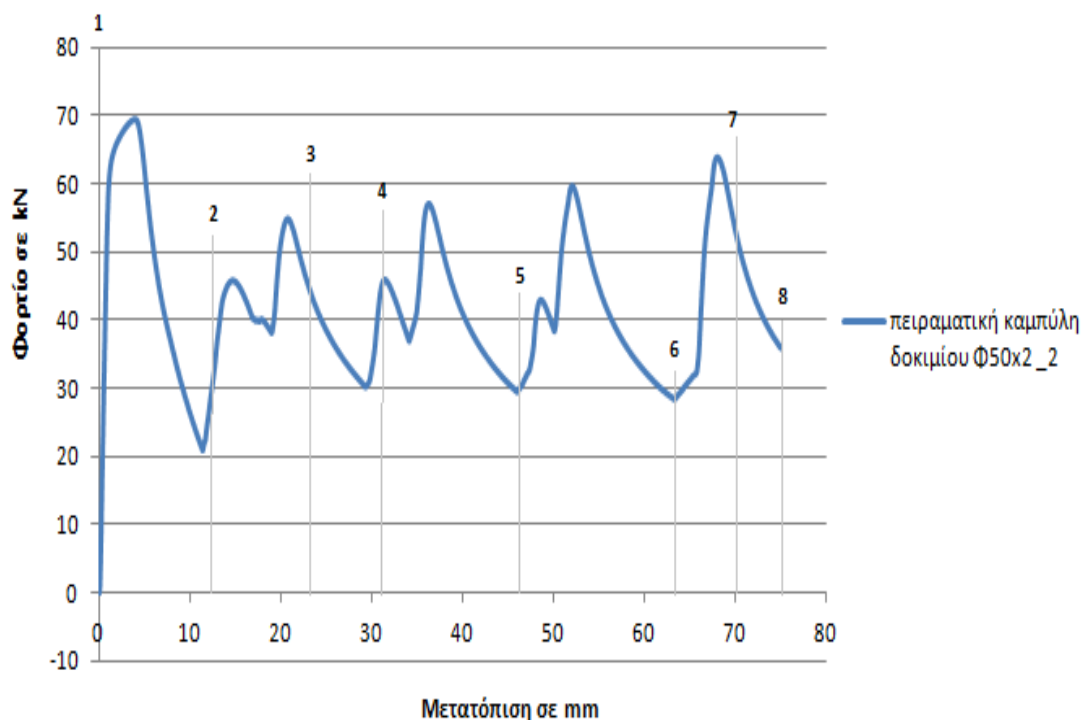
Ακολουθεί παρουσίαση των προοδευτικών στιγμιότυπων κατάρρευσης του δοκιμίου.



Εικόνα 3.43 Προοδευτικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης του δοκιμίου Φ50x2 _2 από την αρχή (εικόνα 1) έως και το τέλος (εικόνα 8).

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, πάνω στην οποία έχουν σημειωθεί οι θέσεις των παραπάνω στιγμιότυπων .

πειραματική καμπύλη δοκιμίου Φ50x2 _2



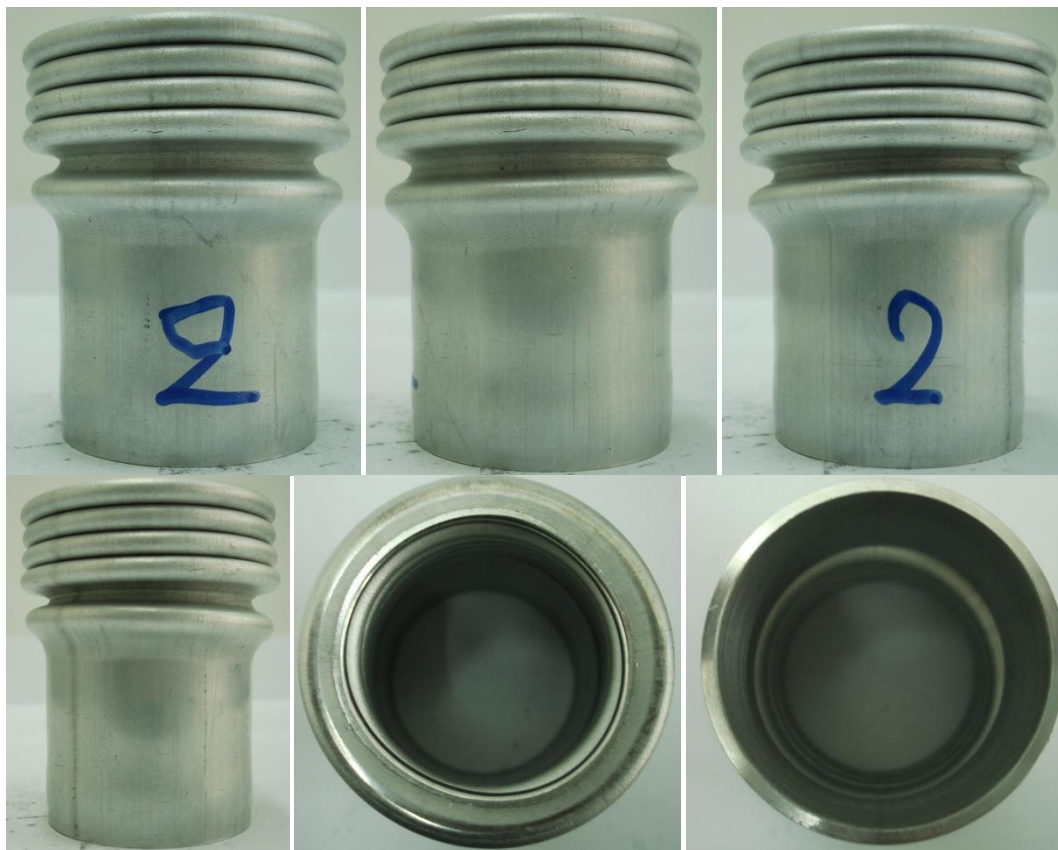
Διάγραμμα 3.32 Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για το 2^ο απλό κυλινδρικό δοκίμιο.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης του δοκιμίου που προκύπτουν από την πειραματική καμπύλη. Ακολουθεί πίνακας που εμπεριέχει τα δεδομένα αυτά.

Πίνακας 3.32 Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμίου Φ50x2 _2.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
Φ50x2 _2	42,1051201	69,52932	3,157884007	1,651326961

Τέλος, παρουσιάζονται φωτογραφίες διαφόρων όψεων του δοκιμίου μετά την κατάρρευση, ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τον τρόπο κατάρρευσης.



Εικόνα 3.44 Τελικές όψεις του δοκιμίου $\Phi 50 \times 2_2$, μετά την κατάρρευση.

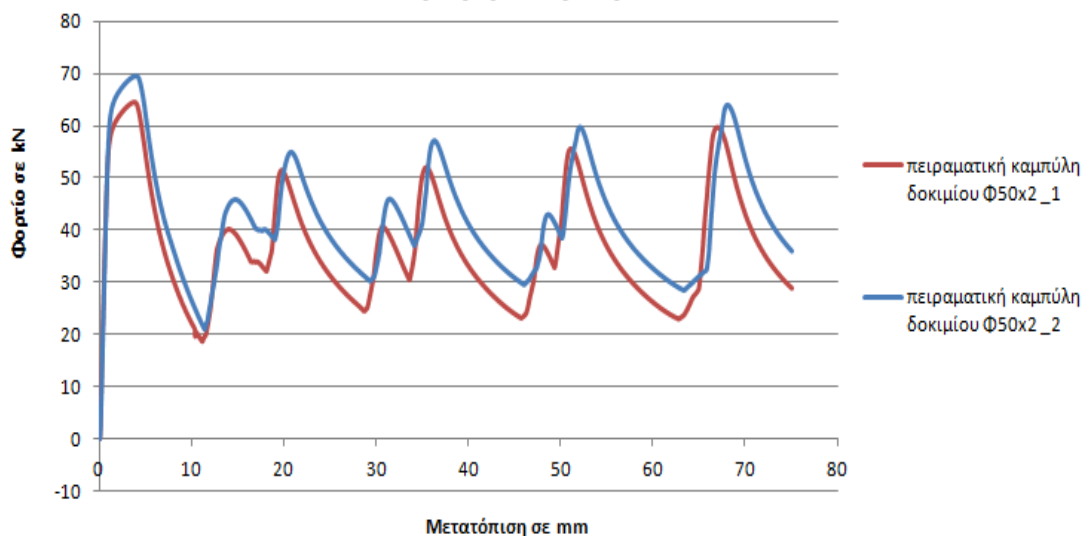
Παρατηρούμε ότι και αυτό το δοκίμιο καταρρέει αξονοσυμμετρικά σχηματίζοντας εκτατούς λοβούς (concertina mode). Επίσης, παρατηρούμε ότι η μορφή της πειραματικής καμπύλης είναι ίδια με αυτήν του 1^{ου} δοκιμίου.

Τέλος, προκειμένου να διαπιστώσουμε κατά πόσο συμπίπτουν οι συμπεριφορές κατάρρευσης των 2 δοκιμίων, προχωρούμε στη συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

3.2.11.3 Σύγκριση των 2 κυλινδρικών δοκιμίων χωρίς διαμόρφωση άκρου ($\Phi 50 \times 2_1$, $\Phi 50 \times 2_2$)

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμίων στο ίδιο διάγραμμα .

Συγκριτικό διάγραμμα κυλινδρικών δοκιμών χωρίς διαμόρφωση άκρου



Διάγραμμα 3.33 Συγκριτική παρουσίαση πειραματικών καμπυλών των κυλινδρικών δοκιμών χωρίς διαμόρφωση άκρου.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των δύο κυλινδρικών δοκιμών.

Πίνακας 3.33 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των 2 κυλινδρικών δοκιμών χωρίς διαμόρφωση άκρου.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
Φ50x2_1	36,87570314	64,53609	2,765677735	1,750097883
Φ50x2_2	42,1051201	69,52932	3,157884007	1,651326961
Διαφορά (%)	14,18 %	7,74 %	14,18 %	5,64 %

Παρατηρούμε ότι η καμπύλη του 2^{ου} δοκιμίου είναι μετατοπισμένη προς τα πάνω σε σύγκριση με αυτήν του 1^{ου} δοκιμίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όλα τα μεγέθη του 2^{ου} δοκιμίου να παρουσιάζονται αυξημένα. Αυτή η διαφοροποίηση πιθανό να οφείλεται στην αρχική σύσφιξη του 2^{ου} τεμαχίου και τη μετέπειτα βαθμονόμηση. Έτσι, η αυξημένη σύσφιξη του τεμαχίου πιθανό να οδήγησε σε ολική μετατόπιση της καμπύλης κατά το ποσό αυτό. Αυτό δε διαφοροποιεί τον τρόπο κατάρρευσης, συνεπώς εξασφαλίζεται η αναγκαία επαναληψιμότητα των πειραματικών δοκιμών. Δοκίμιο αναφοράς το: **Φ50x2_1**.

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας με τα δοκίμια αναφοράς που θα χρησιμοποιηθούν στις επόμενες ενότητες .

Πίνακας 3.34 Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμίων αναφοράς.

Κατηγορία Δοκιμίου	Γωνία κορυφής	Δοκίμιο αναφοράς
κυλινδρικός	90°	Φ50x2 -90 _1
λοξός τετραγωνικός	90°	40x40x2-90_Ιoxos_1
τετραγωνικός	90°	40x40x2- 90 _1
κυλινδρικός	60°	Φ50x2 -60 _2
λοξός τετραγωνικός	60°	40x40x2-60_Ιoxos_2
τετραγωνικός	60°	40x40x2- 60 _2
κυλινδρικός	120°	Φ50x2-120 _1
λοξός τετραγωνικός	120°	40x40x2-120_Ιoxos_1
τετραγωνικός	120°	40x40x2- 120 _1
κυλινδρικός	-	Φ50x2 _1
τετραγωνικός	-	40x40x2_1

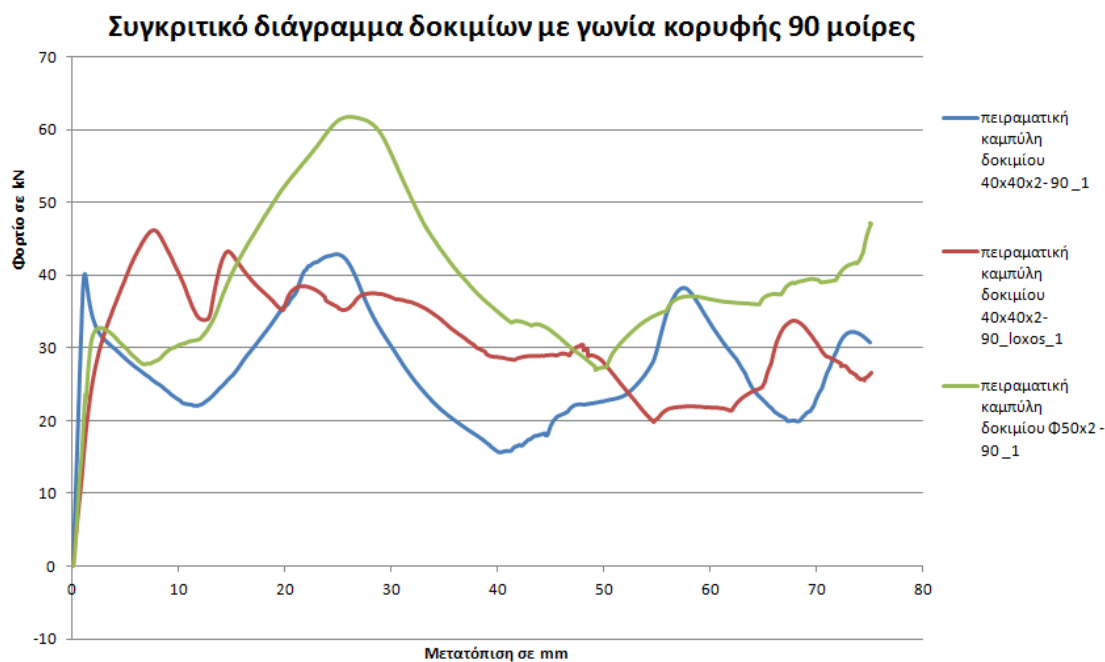
Έτσι, αφού παρουσιάστηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα από όλες τις πειραματικές δοκιμές που εκτελέστηκαν, διαπιστώθηκε η επαναληψιμότητα στη συμπεροφορά κατάρρευσης της πλειονότητας των δοκιμίων και τέλος επιλέχθηκαν τα δοκίμια αναφοράς για την κάθε κατηγορία, μπορούμε να προχωρήσουμε στις συγκρίσεις των δοκιμίων και στην εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων .

3.3 Σύγκριση Δοκιμίων με την ίδια γωνία κορυφής

Στην ενότητα αυτή, θα συγκριθούν δοκίμια με διαφορετικές διατομές, αλλά με την ίδια γωνία κορυφής. Έτσι θα εξαχθούν συμπεράσματα για το πώς επηρεάζει η διατομή τα χαρακτηριστικά κατάρρευσης στην ίδια γεωμετρική διαμόρφωση και τις ίδιες πειραματικές συνθήκες .

3.3.1 Δοκίμια με γωνία κορυφής 90 μοιρών

Εδώ θα παρουσιασθούν όλα τα δοκίμια που έχουν γωνία κορυφής 90°, δηλαδή το κυλινδρικό δοκίμιο, το τετραγωνικό και το λοξό τετραγωνικό (Φ50x2-90_1, 40x40x2-90 _1, 40x40x2-90_Ιoxos_1). Ακολουθεί η συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμίων σε ένα διάγραμμα και ο συγκριτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης.



Διάγραμμα 3.34 Συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμίων, με γωνία κορυφής 90°.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των δοκιμίων, με γωνία κορυφής 90°.

Πίνακας 3.35 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των δοκιμίων, με γωνία κορυφής 90°.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-90_1	27,17131416	42,83167	2,037848562	1,576356217
40x40x2-90_Ιοχος_1	31,33184643	46,1068	2,349888482	1,471563449
Φ50x2-90_1	39,21557175	61,79787	2,941167881	1,575850287

Συμπεράσματα

Από το διάγραμμα, παρατηρούμε ότι το κυλινδρικό δοκίμιο απορροφά περισσότερη ενέργεια από τα υπόλοιπα δοκίμια, αφού το εμβαδό του χωρίου που περιλαμβάνεται κάτω από την καμπύλη του φορτίου είναι μεγαλύτερο από των υπολοίπων. Αυτό επιβεβαιώνεται τόσο από το μέσο φορτίο όσο και από το πλαστικό έργο, το οποίο είναι σχεδόν κατά 1 kJ μεγαλύτερο από αυτά των τετραγωνικών δοκιμίων.

Το αποτέλεσμα αυτό, οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι παρουσιάζονται εντονότερες θραύσεις στα τετραγωνικά δοκίμια εξαιτίας των ακμών τους, κάτι που δεν επιτρέπει την παραλαβή μεγάλων φορτίων από το υλικό. Αυτό που οδήγησε στην αύξηση τόσο του μέσου φορτίου όσο και της ενεργειακής απορρόφησης, είναι το γεγονός ότι το κυλινδρικό δοκίμιο παρουσιάζει αυξημένο μέγιστο φορτίο σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια.

Ακόμα, σε σύγκριση των τετραγωνικών δοκιμίων ως προς την ενεργειακή απορρόφηση, το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο απορροφά περισσότερη ενέργεια από το κανονικό τετραγωνικό, ενώ τόσο το μέγιστο όσο και το μέσο φορτίο είναι σαφώς μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα του κανονικού.

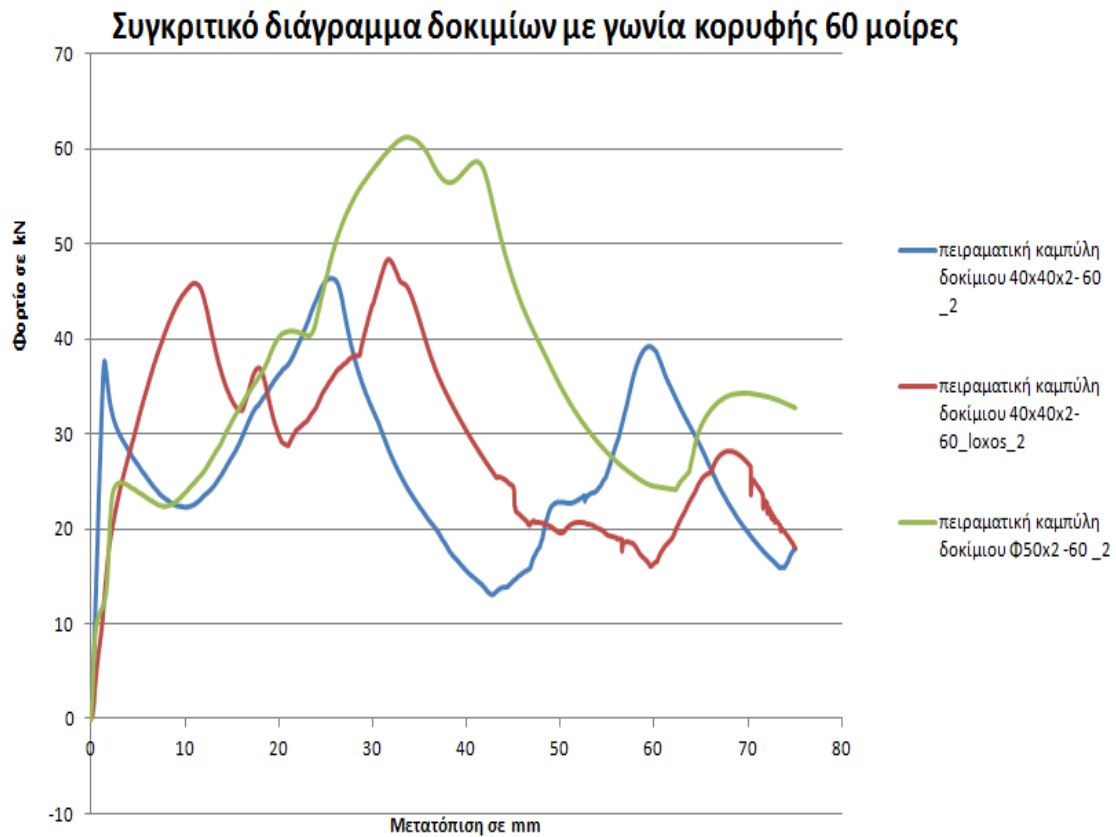
Τέλος, σε ότι αφορά την ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου, παρατηρούμε ότι το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο παρουσιάζει την καλύτερη ομοιομορφία, μιας και έχει το χαμηλότερο δείκτη c.f.e.. Τα άλλα δυο δοκίμια παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια ομοιομορφία, κάτι που για το μεν κυλινδρικό δοκίμιο δικαιολογείται από το γεγονός ότι δεν παρουσιάζει μεγάλες πτώσεις του φορτίου και διατηρείται η καμπύλη σχετικά κοντά στο 'υψηλό' μέγιστο, για το δε κανονικό τετραγωνικό δοκίμιο, δικαιολογείται από το γεγονός ότι δεν παρουσιάζει τόσο υψηλό ολικό μέγιστο και τα υπόλοιπα peak του φορτίου βρίσκονται σχεδόν στο ίδιο ύψος.

Συνεπώς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το κυλινδρικό δοκίμιο είναι το καταλληλότερο ως προς την ενεργειακή απορρόφηση, μιας και απορροφά περισσότερη ενέργεια από τα άλλα δύο, ενώ το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο είναι το καταλληλότερο για μικρές διακυμάνσεις στο φορτίο, μιας και εξασφαλίζει μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του.

3.3.2 Δοκίμια με γωνία κορυφής 60 μοιρών

Εδώ θα παρουσιασθούν όλα τα δοκίμια που έχουν γωνία κορυφής 60°, δηλαδή το κυλινδρικό δοκίμιο, το τετραγωνικό και το λοξό τετραγωνικό (Φ50x2 -60 _2, 40x40x2- 60 _2, 40x40x2-60_loxos_2).

Ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμίων σε ένα διάγραμμα και συγκριτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης .



Διάγραμμα 3.35 Συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμών, με γωνία κορυφής 60°.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των δοκιμών, με γωνία κορυφής 60°.

Πίνακας 3.36 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των δοκιμών, με γωνία κορυφής 60°.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-60_2	26,55745737	46,41552	1,991809303	1,747739603
40x40x2-60_loxos_2	29,28613114	48,40207	2,196459835	1,652730085
Φ50x2-60_2	37,45303451	61,28781	2,808977588	1,636391037

Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι και σε αυτήν την περίπτωση, το κυλινδρικό δοκίμιο παρουσιάζει τη μέγιστη ενεργειακή απορρόφηση, αφού παρουσιάζει το μεγαλύτερο μέσο αλλά και μέγιστο φορτίο. Επίσης, όπως βλέπουμε από την πειραματική καμπύλη, το φορτίο του κυλινδρικού δοκιμίου δεν παρουσιάζει μεγάλες πτώσεις, κάτι που αυξάνει τόσο το μέσο φορτίο όσο και το χωρίο κάτω από την καμπύλη, το εμβαδό του οποίου εκφράζει την ενεργειακή απορρόφηση. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κυλινδρικό δοκίμιο παρουσιάζει χαμηλότερο δείκτη c.f.e., κάτι το οποίο σημαίνει ότι το μέσο φορτίο διατηρείται κοντά στο μέγιστο και εξασφαλίζεται σχετικά ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου.

Από το συγκριτικό διάγραμμα (διαγρ. 3.35), παρατηρούμε ότι το κυλινδρικό και το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο παρουσιάζουν το ολικό μέγιστο φορτίο σχεδόν στην ίδια μετατόπιση. Ακόμα, παρατηρούμε ότι τα ολικά μέγιστα των τετραγωνικών δοκιμίων παρουσιάζονται σχεδόν στο ίδιο ύψος. Επίσης τα peak του φορτίου, τόσο στο λοξό τετραγωνικό όσο και στο κανονικό τετραγωνικό δοκίμιο, παραμένουν σχεδόν στο ίδιο ύψος, αλλά το γεγονός ότι ακολουθούνται από σχετικά μεγάλες πτώσεις του φορτίου (ιδιαίτερα στο κανονικό τετραγωνικό δοκίμιο), δεν επιτρέπει στο μέσο φορτίο να παραμείνει σε υψηλά επίπεδα, κάτι που οδηγεί σε μείωση της ενεργειακής απορρόφησης και χαμηλή ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου. Τέλος, οι θραύσεις που παρουσιάζονται στα τετραγωνικά δοκίμια αποτελούν παράγοντα μείωσης της ενεργειακής απορρόφησης, αφού το υλικό χάνει τη στιβαρότητά του με αποτέλεσμα να μη μπορεί να παραλάβει μεγάλα φορτία.

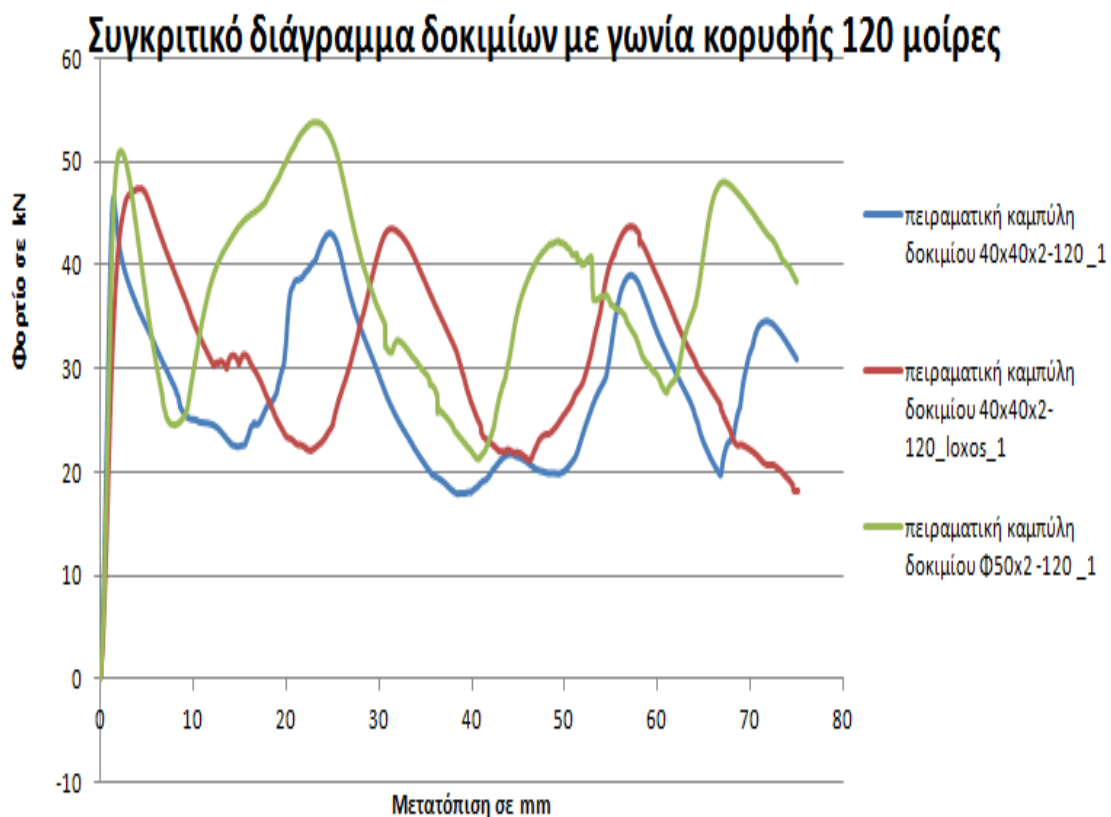
Αρκετό ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι τα δύο τετραγωνικά δοκίμια παρουσιάζουν διαφορές στη συμπεριφορά κατάρρευσης. Έτσι, παρά το γεγονός ότι έχουν την ίδια διατομή και ίδια γωνία διαμορφωμένου άκρου, η διαφορετική τοποθέτηση του δοκιμίου στη βάση και η διαφορετική γεωμετρική διαμόρφωση, οδηγούν σε σημαντικά διαφοροποιημένη συμπεριφορά κατάρρευσης. Έτσι, το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά κατάρρευσης από το κανονικό, αφού έχει αυξημένο μέγιστο και μέσο φορτίο, μεγαλύτερη ενεργειακή απορρόφηση και καλύτερη ομοιομορφία ως προς την κατανομή του φορτίου.

Από τα όσα παρουσιάστηκαν, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι με γωνία κορυφής 60° , το κυλινδρικό δοκίμιο έχει την καλύτερη συμπεριφορά κατάρρευσης, αφού παρουσιάζει μεγάλη ενεργειακή απορρόφηση και καλύτερη ομοιορφία στην κατανομή του φορτίου. Μεταξύ των τετραγωνικών δοκιμίων, καλύτερη συμπεριφορά κατάρρευσης παρουσιάζει το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, αφού εξασφαλίζει καλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου, ενώ έχει και μεγαλύτερη ενεργειακή απορρόφηση.

3.3.3 Δοκίμια με γωνία κορυφής 120 μοιρών

Εδώ θα παρουσιασθούν όλα τα δοκίμια που έχουν γωνία κορυφής 120° , δηλαδή το κυλινδρικό δοκίμιο, το τετραγωνικό και το λοξό τετραγωνικό (Φ50x2-120_1, 40x40x2-120_1, 40x40x2-120_loxos_1).

Ακολουθεί η συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμίων σε ένα διάγραμμα και ο συγκριτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης.



Διάγραμμα 3.36 Συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμίων, με γωνία κορυφής 120° .

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των δοκιμίων, με γωνία κορυφής 120°.

Πίνακας 3.37 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των δοκιμίων, με γωνία κορυφής 120°.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-120_1	28,01495133	46,53632	2,10112135	1,661124428
40x40x2-120_Ιoxos_1	30,96742391	47,3551	2,322556793	1,529190808
Φ50x2 -120 _1	37,56764743	53,77113	2,817573557	1,431314806

Συμπεράσματα

Και σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρούμε ότι το κυλινδρικό δοκίμιο παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά κατάρρευσης, αφού έχει το μεγαλύτερο μέσο φορτίο, τη μεγαλύτερη ενεργειακή απορρόφηση και την καλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου (μικρός c.f.e.) από όλα τα δοκίμια. Επίσης και σε αυτήν την περίπτωση το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά κατάρρευσης από το κανονικό τετραγωνικό, αφού εξασφαλίζει μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου αλλά και μεγαλύτερη ενεργειακή απορρόφηση. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα peak του φορτίου και για τα τρία δοκίμια βρίσκονται σχεδόν στο ίδιο ύψος, ενώ τα ολικά μέγιστα των τετραγωνικών δοκιμίων, αφενός εμφανίζονται και τα δύο στην αρχή της φόρτισης, αφετέρου διαφέρουν ελάχιστα ως προς την τιμή τους.

Γενικά συμπεράσματα

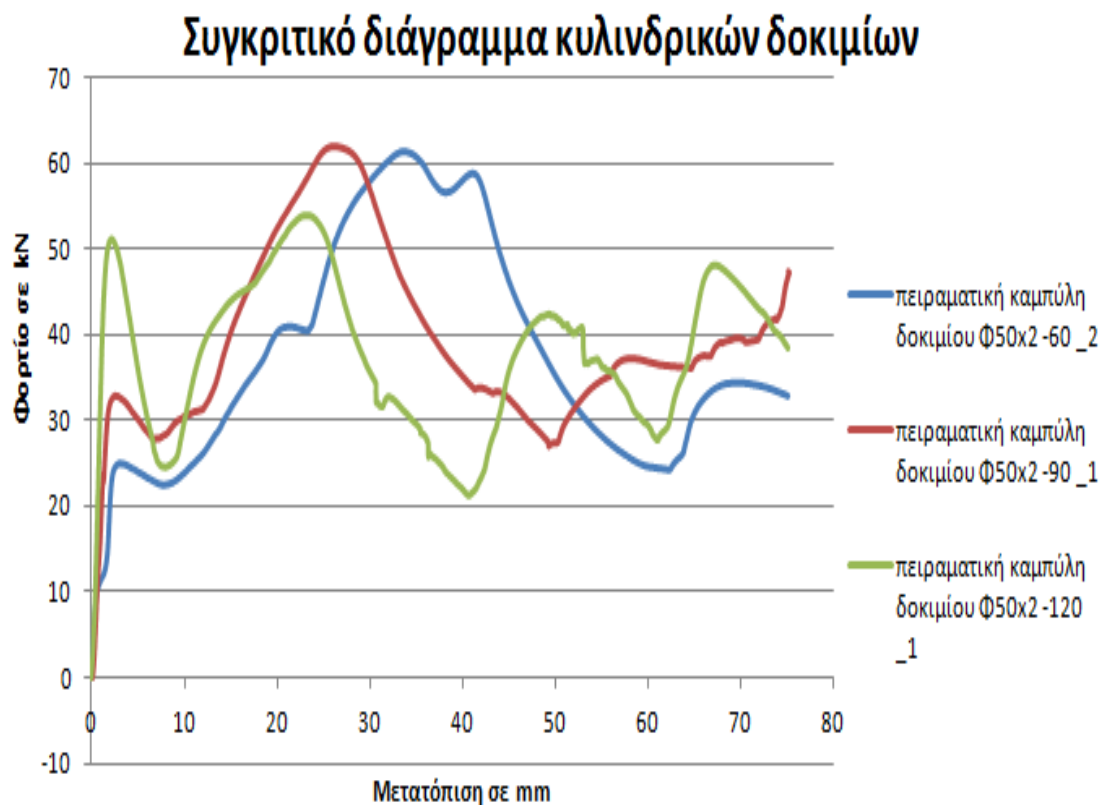
Αυτό που προκύπτει από τη σύγκριση των τριών δοκιμίων με ίδια γωνία κορυφής αλλά διαφορετικές διατομές, είναι ότι και για τις τρεις περιπτώσεις γωνιών, το κυλινδρικό δοκίμιο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ενεργειακή απορρόφηση και στην πλειονότητα των περιπτώσεων και την καλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου. Σε ότι αφορά τα τετραγωνικά δοκίμια, το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά κατάρρευσης, αφού έχει τη μεγαλύτερη ενεργειακή απορρόφηση και την καλύτερη κατανομή φορτίου από τα δύο.

3.4 Σύγκριση Δοκιμών με την ίδια διατομή

Στην ενότητα αυτή, θα συγκριθούν δοκίμια με την ίδια διατομή, αλλά με διαφορετικές γωνίες κορυφής. Έτσι, θα εξαχθούν συμπεράσματα για το πώς επηρεάζει τα χαρακτηριστικά κατάρρευσης η διαφορετική γεωμετρική διαμόρφωση στην ίδια διατομή και τις ίδιες πειραματικές συνθήκες.

3.4.1 Σύγκριση Κυλινδρικών Δοκιμών με διαφορετικές γωνίες κορυφής

Εδώ θα παρουσιασθούν όλα τα κυλινδρικά δοκίμια που έχουν διαφορετική γωνία κορυφής (Φ50x2-60_2, Φ50x2-90_1, Φ50x2-120_1). Ακολουθεί η συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμών σε ένα διάγραμμα και ο συγκριτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης.



Διάγραμμα 3.37 Συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των κυλινδρικών δοκιμών με διαφορετικές γωνίες κορυφής.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των κυλινδρικών δοκιμών με διαφορετικές γωνίες κορυφής.

Πίνακας 3.38 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των κυλινδρικών δοκιμίων.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
Φ50x2 -60 _2	37,45303451	61,28781	2,808977588	1,636391037
Φ50x2 -90 _1	39,21557175	61,79787	2,941167881	1,575850287
Φ50x2 -120 _1	37,56764743	53,77113	2,817573557	1,431314806

Συμπεράσματα

Αρχικά, παρατηρούμε ότι τόσο η απορροφούμενη ενέργεια όσο και το μέσο φορτίο κυμαίνονται στην ίδια περίπου τιμή και για τα τρία δοκίμια. Εντούτοις το κυλινδρικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°, παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερη ενεργειακή απορρόφηση και υψηλότερο μέσο φορτίο.

Σημαντική διαφοροποίηση παρουσιάζεται τόσο ως προς το μέγιστο φορτίο, όσο και ως προς την ομοιομορφία του φορτίου. Έτσι, χαμηλότερο μέγιστο φορτίο και καλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου, παρουσιάζει το κυλινδρικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 120°. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί από το γεγονός ότι, εξαιτίας της μικρής κλίσης των τοιχωμάτων της βάσης των 120°, το υλικό του δοκιμίου δε μπορεί να οδηγηθεί από τα τοιχώματα που θα το κρατήσουν στιβαρό, ώστε να παραλάβει μεγαλύτερα φορτία, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των άλλων δυο δοκιμίων. Ακόμα, αξίζει να αναφερθεί η ομοιότητα που παρατηρείται στις μορφές των καμπυλών των δοκιμίων των 60° και 90° η οποία αποτυπώνεται και στη μικρή διαφορά των χαρακτηριστικών μεγεθών.

Τέλος, παρατηρείται η έντονη επίδραση των τοιχωμάτων της βάσης των 60° στη διαμόρφωση του μέγιστου φορτίου, καθώς η μεγάλη κλίση της βάσης και το γεγονός ότι το δοκίμιο έρχεται σε επαφή σε μεγάλο μήκος του με τα τοιχώματά της, οδηγεί στην καθυστέρηση εμφάνισης του μέγιστου.

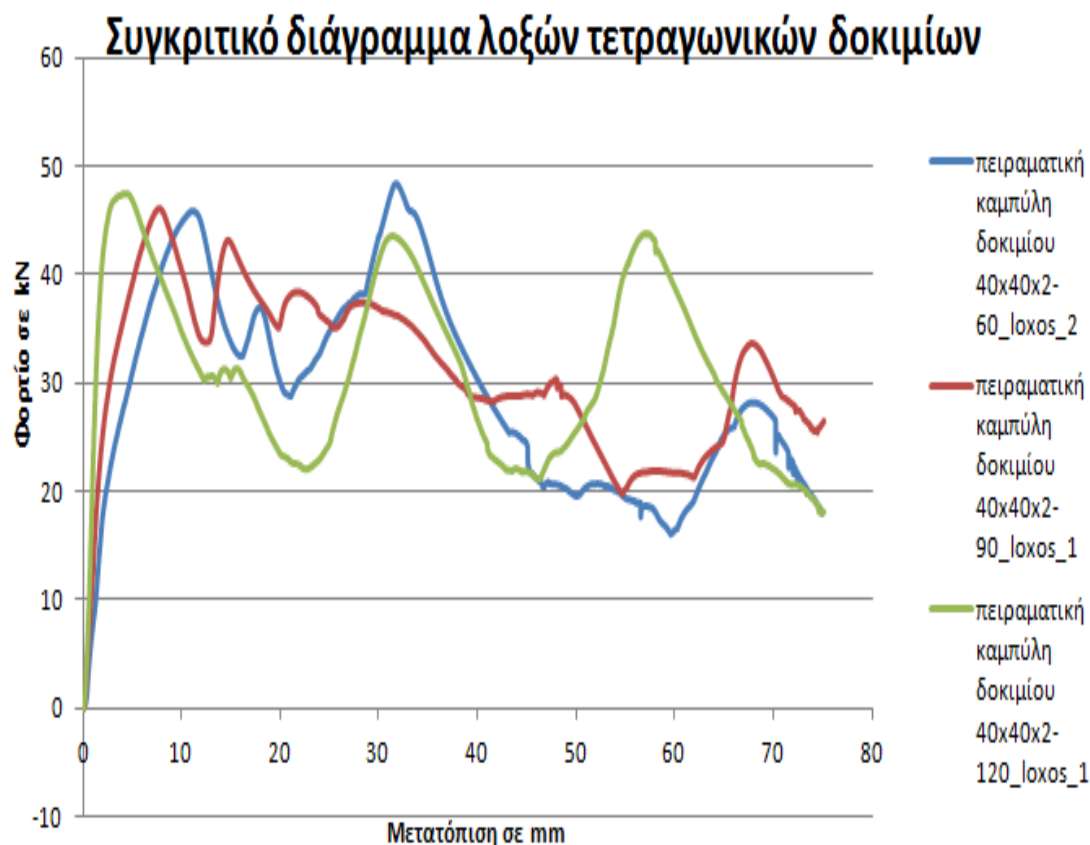
Έτσι, παρατηρείται ότι το δοκίμιο των 120° που έχει τη μεγαλύτερη γωνία κορυφής και τη μικρότερη επαφή υλικού – βάσης, παρουσιάζει πρώτο το ολικό μέγιστο και έπονται κατά σειρά το δοκίμιο των 90° και των 60° . Αυτό καταδεικνύει τη σημαντική επίδραση της βάσης στην εμφάνιση του μεγίστου κατά την εξέλιξη της φόρτισης.

Προχωρώντας σε μια πρώτη ερμηνεία των αποτελεσμάτων, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι μειώνοντας τη γωνία κορυφής επιτυγχάνουμε την υστέρηση εμφάνισης του ολικού μεγίστου. Ακόμα, επιτυγχάνεται αύξηση της ενεργειακής απορρόφησης όμως μέχρι ενός σημείου, καθώς περαιτέρω μείωση της γωνίας οδηγεί σε μείωση της απορρόφησης ενέργειας ($60^\circ \rightarrow$ πτώση μέσου φορτίου και πλαστικού έργου). Επίσης είναι εμφανές ότι όσο μειώνεται η γωνία κορυφής τόσο μειώνεται η ομοιομορφία κατανομής του φορτίου. Έτσι, ως βέλτιστη λύση για σχετικά καλή ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου και υψηλή ενεργειακή απορρόφηση προκρίνεται το κυλινδρικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 90° . Τέλος, οφείλουμε να επισημάνουμε ότι για να είναι γενικεύσιμα τα παραπάνω συμπεράσματα, πρέπει να επιβεβαιωθούν και από τα δοκίμια των άλλων διατομών.

3.4.2 Σύγκριση Λοξών Τετραγωνικών Δοκιμίων με διαφορετικές γωνίες κορυφής

Εδώ θα παρουσιασθούν όλα τα λοξά τετραγωνικά δοκίμια που έχουν διαφορετική γωνία κορυφής (40x40x2-60_loxos_2, 40x40x2-90_loxos_1, 40x40x2-120_loxos_1).

Ακολουθεί η συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμίων σε ένα διάγραμμα και στη συνέχεια ο συγκριτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης .



Διάγραμμα 3.38 Συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των λοξών τετραγωνικών δοκιμίων με διαφορετικές γωνίες κορυφής.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των λοξών τετραγωνικών δοκιμίων με διαφορετικές γωνίες κορυφής.

Πίνακας 3.39 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των λοξών τετραγωνικών δοκιμίων.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-60_Ιoxos_2	29,28613114	48,40207	2,196459835	1,652730085
40x40x2-90_Ιoxos_1	31,33184643	46,1068	2,349888482	1,471563449
40x40x2-120_Ιoxos_1	30,96742391	47,3551	2,322556793	1,529190808

Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι οι πειραματικές καμπύλες των δοκιμίων δε διαφέρουν κατά πολύ μεταξύ τους. Η βασικότερη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι τα δοκίμια των 90° και των 120° παρουσιάζουν στην αρχή της παραμόρφωσης το μέγιστο φορτίο. Και σε αυτήν την περίπτωση βλέπουμε ότι η θέση εμφάνισης του ολικού μεγίστου εξαρτάται από τη γωνία κορυφής. Ακόμα, παρατηρούμε ότι τα δοκίμια των 90° και 60° παρουσιάζουν εντονότερες θραύσεις με αποτέλεσμα ο σχηματισμός του τελευταίου λοβού να μην απορροφά τόση ενέργεια όσο των 120° και να εμφανίζουν κατά πολύ μικρότερα τοπικά μέγιστα.

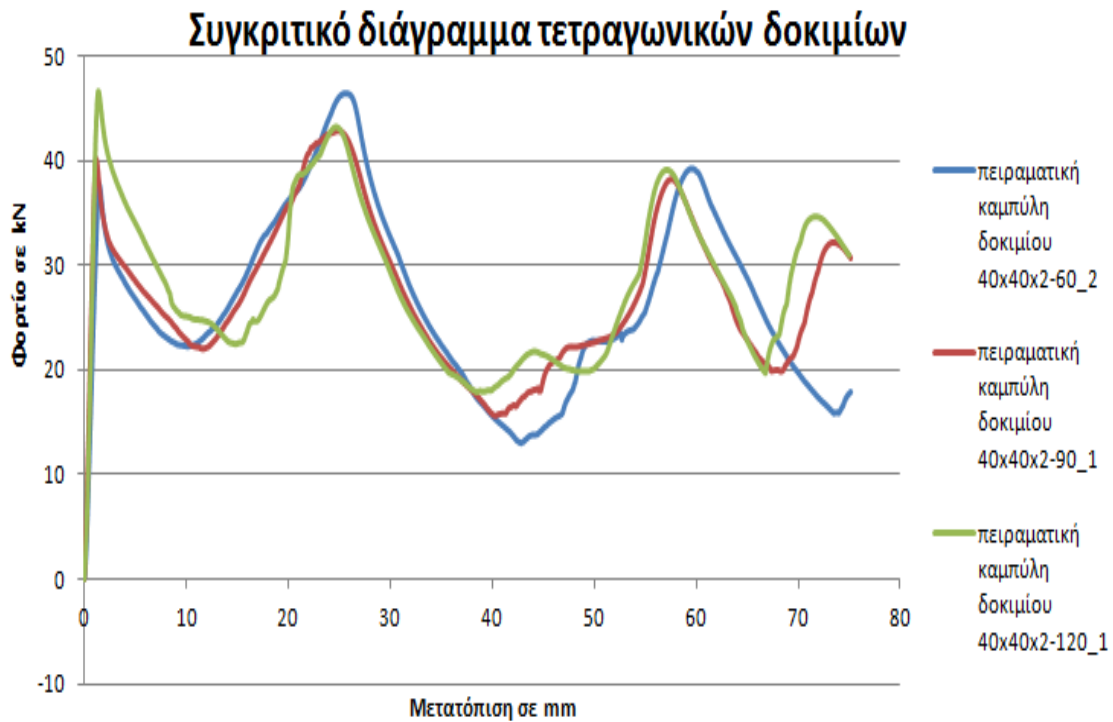
Σε ότι αφορά την απορρόφηση ενέργειας και το μέσο φορτίο, παρατηρούμε ότι τα δοκίμια των 90 και 120 μοιρών έχουν παραπλήσιες τιμές των μεγεθών αυτών, με το δοκίμιο των 90° να εξασφαλίζει καλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου. Το δοκίμιο των 60° έχει το υψηλότερο ολικό μέγιστο, ενώ αντίθετα παρουσιάζει τη χαμηλότερη ενεργειακή απορρόφηση και το χαμηλότερο μέσο φορτίο.

Από τα παραπάνω επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι μειώνοντας τη γωνία κορυφής αυξάνεται και η ενεργειακή απορρόφηση, αλλά περεταίρω μείωση οδηγεί σε μείωσή της. Ακόμα, παρατηρούμε ότι και σε αυτά τα δοκίμια η γωνία κορυφής επιδρά στη θέση εμφάνισης του μεγίστου φορτίου. Ακόμα, η μικρή γωνία κορυφής οδηγεί σε ανομοιόμορφη κατανομή του φορτίου. Τέλος, η βέλτιστη επιλογή τόσο ως προς την ενεργειακή απορρόφηση όσο και ως προς την ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου είναι το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°, αφού παρουσιάζει το μέγιστο πλαστικό έργο και το μικρότερο δείκτη c.f.e..

3.4.3 Σύγκριση Τετραγωνικών Δοκιμίων με διαφορετικές γωνίες κορυφής

Εδώ θα παρουσιασθούν όλα τα κανονικά τετραγωνικά δοκίμια που έχουν διαφορετική γωνία κορυφής (40x40x2-60_2, 40x40x2-90_1, 40x40x2-120_1).

Ακολουθεί η συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμίων σε ένα διάγραμμα και στη συνέχεια ο συγκριτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης .



Διάγραμμα 3.39 Συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των τετραγωνικών δοκιμίων με διαφορετικές γωνίες κορυφής.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των τετραγωνικών δοκιμίων με διαφορετικές γωνίες κορυφής.

Πίνακας 3.40 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των τετραγωνικών δοκιμίων.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2-60_2	26,55745737	46,41552	1,991809303	1,747739603
40x40x2-90_1	27,17131416	42,83167	2,037848562	1,576356217
40x40x2-120_1	28,01495133	46,53632	2,10112135	1,661124428

Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες και των τριών δοκιμίων σχεδόν ταυτίζονται. Ακόμα, παρατηρείται ταύτιση και στις θέσεις εμφάνισης των μεγίστων του φορτίου των δοκιμίων, με το δοκίμιο των 60° να παρουσιάζει μια μικρή υστέρηση. Το δοκίμιο των 120° παρουσιάζει το μέγιστο φορτίο στο 1° peak της καμπύλης, κάτι που δε συμβαίνει και με τα υπόλοιπα δοκίμια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η γωνία κορυφής είναι αρκετά μεγάλη, με αποτέλεσμα η ειδική διαμόρφωση να μη μπορεί να μειώσει το αρχικώς παραλαμβανόμενο φορτίο και να έχουμε την εμφάνιση ολικού μεγίστου στην αρχή της φόρτισης.

Τα δοκίμια των 60° και των 120° εμφανίζουν σχεδόν την ίδια αριθμητική τιμή μεγίστου φορτίου και σίγουρα υψηλότερη από αυτήν του δοκιμίου των 90° . Όμως σε ότι αφορά το μέσο φορτίο και κατεπέκταση την ενεργειακή απορρόφηση το δοκίμιο των 120° παρουσιάζει μεγαλύτερο μέσο φορτίο και υψηλότερη ενεργειακή απορρόφηση από αυτό των 60° , με το δοκίμιο των 90° να διαφέρει ελάχιστα τόσο στο μέσο φορτίο όσο και στο πλαστικό έργο.

Είναι φανερό ότι το δοκίμιο των 90° παρουσιάζει την καλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου, ενώ το δοκίμιο των 60° τη χειρότερη, όπως συνέβαινε και σε όλες τις περιπτώσεις.

Στην περίπτωση των κανονικών τετραγωνικών δοκιμίων δε μπορεί να διαπιστωθεί συσχέτιση της γωνίας κορυφής με την ενεργειακή απορρόφηση. Επίσης, αν και υπάρχει μια μικρή υστέρηση ως προς την εμφάνιση του ολικού μεγίστου όσο μειώνεται η γωνία κορυφής, εντούτοις δε μας επιτρέπει να εξάγουμε συμπέρασμα ως προς τη συσχέτισή τους. Ακόμα, επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι με μεγάλη μείωση της γωνίας κορυφής, μειώνεται και η ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου. Τέλος, η βέλτιστη επιλογή παραμένει το δοκίμιο των 90° , αφού εξασφαλίζει ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου και υψηλή ενεργειακή απορρόφηση.

Γενικά συμπεράσματα

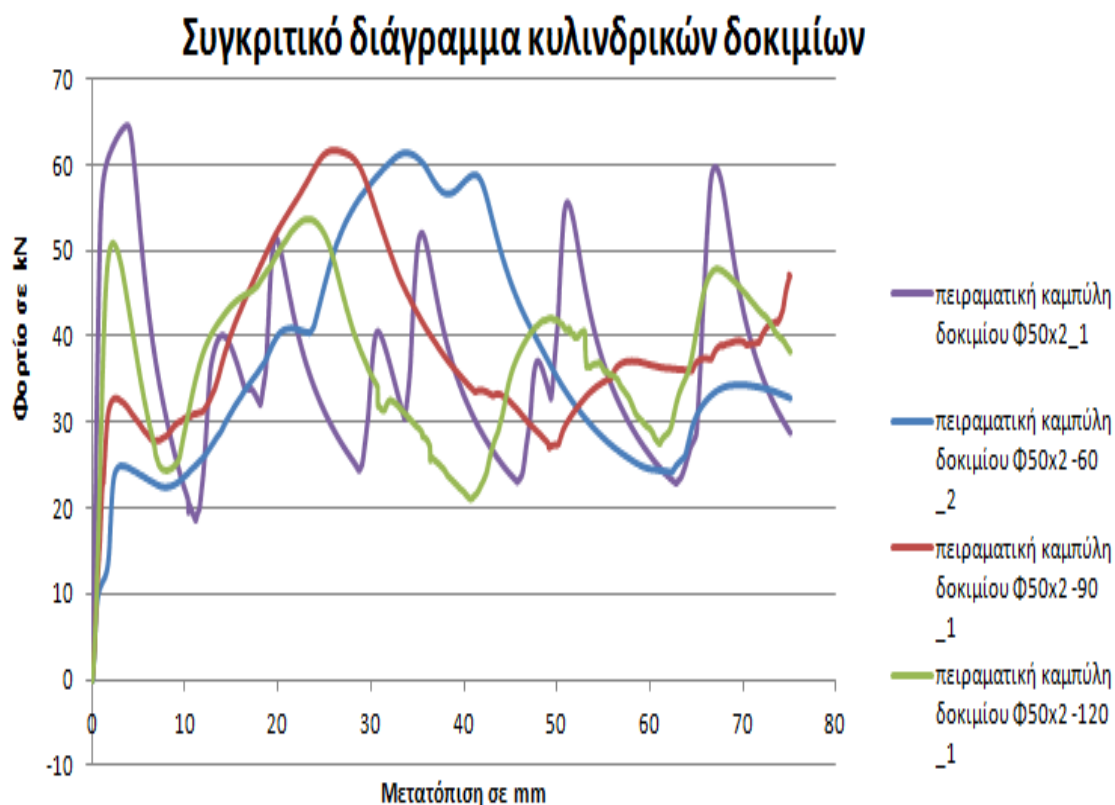
Αυτό που προκύπτει από τη σύγκριση των τριών δοκιμίων και στις 3 περιπτώσεις είναι ότι η βέλτιστη συμπεριφορά κατάρρευσης παρουσιάζεται στα δοκίμια των 90°, ενώ θα μπορούσαμε να πούμε ότι η γωνία κορυφής επηρεάζει σημαντικά τη θέση εμφάνισης του ολικού μεγίστου, αφού όσο μειώνεται η γωνία τόσο καθυστερεί η εμφάνιση του μεγίστου φορτίου. Τέλος, σημαντική μείωση της γωνίας κορυφής οδηγεί σε πιο ανομοιόμορφη κατανομή του φορτίου, ενώ αυξάνει το μέγιστο φορτίο. Επίσης, δε μπορούσε να διαπιστωθεί συσχέτιση μεταξύ της γωνίας κορυφής και της ενεργειακής απορρόφησης καθώς οι διαφορές είναι μικρές και δεν ακολουθείται ένα μοτίβο που να επαναλαμβάνεται για όλες τις περιπτώσεις.

3.5 Σύγκριση Δοκιμίων με διαμόρφωση και χωρίς διαμόρφωση άκρου

Στην ενότητα αυτή, θα συγκριθούν δοκίμια με διαμόρφωση και χωρίς διαμόρφωση άκρου. Τα δοκίμια που θα συγκριθούν θα πρέπει να έχουν την ίδια διατομή ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί η σύγκριση. Έτσι θα εξαχθούν συμπεράσματα για το πόσο επηρεάζει τα χαρακτηριστικά κατάρρευσης η εφαρμογή της ειδικής γεωμετρικής διαμόρφωσης (triggering) στην ίδια διατομή με τις ίδιες πειραματικές συνθήκες.

3.5.1 Σύγκριση Κυλινδρικών Δοκιμίων με διαμόρφωση άκρου με το δοκίμιο που έχει επίπεδα άκρα

Εδώ όλα τα κυλινδρικά δοκίμια που έχουν γωνία κορυφής (Φ50x2-60_2, Φ50x2-90_1, Φ50x2 -120_1) θα συγκριθούν με το κυλινδρικό δοκίμιο (Φ50x2_1) που δεν έχει διαμόρφωση άκρου. Ακολουθεί η συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμίων σε ένα διάγραμμα και ο συγκριτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης.



Διάγραμμα 3.40 Συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των κυλινδρικών δοκιμών με γωνίες κορυφής και χωρίς γωνία κορυφής.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των κυλινδρικών δοκιμών με γωνία κορυφής και χωρίς γωνία κορυφής.

Πίνακας 3.41 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των κυλινδρικών δοκιμών με γωνία κορυφής και χωρίς γωνία κορυφής.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
Φ50x2_1	36,87570314	64,53609	2,765677735	1,750097883
Φ50x2-60_2	37,45303451	61,28781	2,808977588	1,636391037
Φ50x2-90_1	39,21557175	61,79787	2,941167881	1,575850287
Φ50x2-120_1	37,56764743	53,77113	2,817573557	1,431314806

Συμπεράσματα

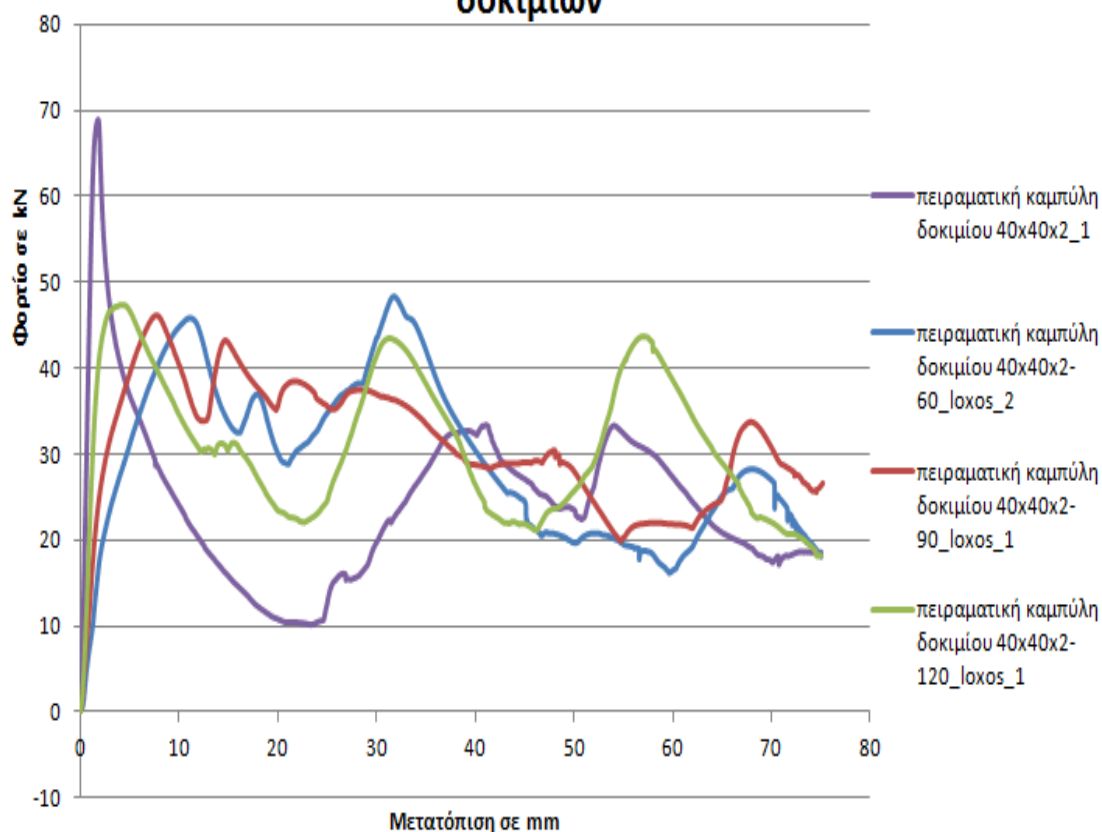
Παρατηρούμε ότι η διαμόρφωση άκρου με τη δημιουργία γωνίας κορυφής διαφοροποιεί σημαντικά τη συμπεριφορά κατάρρευσης των κυλινδρικών δοκιμίων. Έτσι, βλέπουμε ότι ο μηχανισμός triggering που επιλέχθηκε, μειώνει το αρχικό μέγιστο φορτίο που δέχεται ένα κυλινδρικό δοκίμιο χωρίς διαμόρφωση άκρου. Ακόμα, αυξάνει το μέσο φορτίο και την ενεργειακή απορρόφηση, ενώ τέλος εξασφαλίζει και μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η βελτιωμένη συμπεριφορά κατάρρευσης σε σχέση με το κυλινδρικό δοκίμιο χωρίς διαμόρφωση, αφορά και τα τρία δοκίμια με τις τρεις γωνίες κορυφής, με το δοκίμιο των 90° να παρουσιάζει τη βέλτιστη συμπεριφορά. Συνεπώς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι εφαρμόζοντας ειδική διαμόρφωση άκρου σε κυλινδρικό δοκίμιο, μπορεί να επιτευχθεί μείωση του αρχικού μεγίστου φορτίου, αύξηση του μέσου φορτίου και της ενεργειακής απορρόφησης, ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται και μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου.

3.5.2 Σύγκριση Λοξών Τετραγωνικών Δοκιμίων με διαμόρφωση άκρου με το Απλό Τετραγωνικό Δοκίμιο που έχει επίπεδα άκρα

Εδώ όλα τα λοξά τετραγωνικά δοκίμια που έχουν γωνία κορυφής (40x40x2-60_loxos_2, 40x40x2-90_loxos_1, 40x40x2-120_loxos_1) θα συγκριθούν με το απλό τετραγωνικό δοκίμιο (40x40x2_1) που δεν έχει διαμόρφωση άκρου. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκε το απλό τετραγωνικό δοκίμιο, αφού είναι το δοκίμιο με την αντίστοιχη διατομή και προφανώς δε μπορούσε να επιτευχθεί ο τρόπος φόρτισης του λοξού τετραγωνικού δοκιμίου, γιατί αυτό απαιτεί ειδική γεωμετρική διαμόρφωση που θα αλλοίωνε τα χαρακτηριστικά του δοκιμίου.

Ακολουθεί η συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμίων σε ένα διάγραμμα και ο συγκριτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης.

Συγκριτικό διάγραμμα λοξών και απλού τετραγωνικών δοκιμίων



Διάγραμμα 3.41 Συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των λοξών τετραγωνικών δοκιμίων με γωνίες κορυφής και του απλού τετραγωνικού χωρίς γωνία κορυφής.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των λοξών τετραγωνικών δοκιμίων και του απλού τετραγωνικού δοκιμίου χωρίς διαμόρφωση άκρου.

Πίνακας 3.42 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των λοξών και του απλού τετραγωνικών δοκιμίων.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2_1	24,16652782	68,80449	1,812489587	2,847098702
40x40x2-60_loxos_2	29,28613114	48,40207	2,196459835	1,652730085
40x40x2-90_loxos_1	31,33184643	46,1068	2,349888482	1,471563449
40x40x2-120_loxos_1	30,96742391	47,3551	2,322556793	1,529190808

Συμπεράσματα

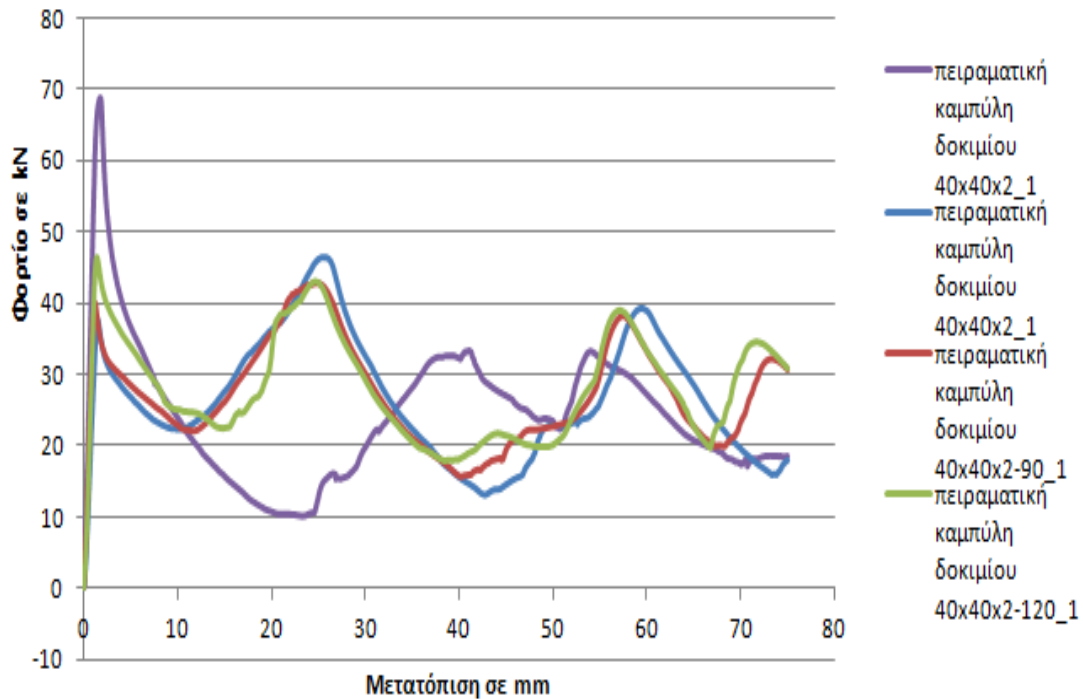
Παρατηρούμε ότι και σε αυτήν την περίπτωση τα δοκίμια με διαμόρφωση άκρου παρουσιάζουν αυξημένο μέσο φορτίο και μεγαλύτερη ενεργειακή απορρόφηση, ενώ εμφανίζουν μειωμένο τόσο αρχικό όσο και ολικό μέγιστο φορτίο, αλλά και καλύτερη ομοιομορφία φορτίου σε σχέση με το απλό τετραγωνικό δοκίμιο χωρίς διαμόρφωση άκρου. Έτσι ο μηχανισμός triggering που επιλέχθηκε και η συγκεκριμένη διαμόρφωση (λοξή τοποθέτηση) βελτίωσε τη συμπεριφορά κατάρρευσης του δοκιμίου τετραγωνικής διατομής, με το δοκίμιο των 90° να παρουσιάζει τη βέλτιστη συμπεριφορά. Συνεπώς καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι εφαρμόζοντας ειδική διαμόρφωση άκρου σε τετραγωνικό δοκίμιο λοξά τοποθετημένο, μπορεί να επιτευχθεί μείωση του αρχικού μεγίστου φορτίου, αύξηση του μέσου φορτίου και της ενεργειακής απορρόφησης, ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται και μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου.

3.5.3 Σύγκριση Κανονικών Τετραγωνικών Δοκιμίων με διαμόρφωση άκρου με το Απλό Τετραγωνικό Δοκίμιο που έχει επίπεδα άκρα

Εδώ όλα τα κανονικά τετραγωνικά δοκίμια που έχουν γωνία κορυφής (40x40x2-60_2, 40x40x2-90_1, 40x40x2-120_1), θα συγκριθούν με το απλό τετραγωνικό δοκίμιο (40x40x2_1) που δεν έχει διαμόρφωση άκρου.

Ακολουθεί η συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμίων σε ένα διάγραμμα και ο συγκριτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης.

Συγκριτικό διάγραμμα τετραγωνικών δοκιμών



Διάγραμμα 3.42 Συγκριτική παρουσίαση των πειραματικών καμπυλών των κανονικών τετραγωνικών δοκιμών με γωνίες κορυφής και του απλού τετραγωνικού χωρίς γωνία κορυφής.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση των κανονικών τετραγωνικών δοκιμών και του απλού τετραγωνικού δοκιμίου χωρίς διαμόρφωση άκρου.

Πίνακας 3.43 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των τετραγωνικών δοκιμών.

Δοκίμιο	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
40x40x2_1	24,16652782	68,80449	1,812489587	2,847098702
40x40x2-60_2	26,55745737	46,41552	1,991809303	1,747739603
40x40x2-90_1	27,17131416	42,83167	2,037848562	1,576356217
40x40x2-120_1	28,01495133	46,53632	2,10112135	1,661124428

Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι και σε αυτήν την περίπτωση τα δοκίμια με τη διαμόρφωση άκρου παρουσιάζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά κατάρρευσης σε σύγκριση με το τετραγωνικό δοκίμιο με επίπεδα άκρα. Έτσι, βλέπουμε τα δοκίμια με γωνία κορυφής να παρουσιάζουν κατά πολύ χαμηλότερο αρχικό, αλλά και ολικό μέγιστο φορτίο από αυτό του απλού δοκιμίου. Ακόμα, το μέσο φορτίο και η ενεργειακή απορρόφηση είναι αυξημένα και στις τρεις περιπτώσεις γωνιών κορυφής σε σχέση με το δοκίμιο με επίπεδα άκρα, ενώ παρουσιάζουν και μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου. Και σε αυτήν την περίπτωση, τη βέλτιστη συμπεριφορά κατάρρευσης, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους, παρουσιάζει το δοκίμιο των 90°. Συνεπώς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι εφαρμόζοντας ειδική διαμόρφωση άκρου σε τετραγωνικό δοκίμιο, μπορεί να επιτευχθεί μείωση του αρχικού μεγίστου φορτίου, αύξηση του μέσου φορτίου και της ενεργειακής απορρόφησης, ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται και μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου.

Γενικά συμπεράσματα

Από τις συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν προηγουμένως προκύπτει ότι και στις 3 περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν τα δοκίμια με διαμόρφωση άκρου παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά κατάρρευσης σε σύγκριση με αυτά που έχουν επίπεδα άκρα. Έτσι οδηγούμαστε με ασφάλεια στο συμπέρασμα ότι εφαρμόζοντας το μηχανισμό triggering που επιλέχθηκε, επιτυγχάνεται καλύτερη ενεργειακή απορρόφηση, μείωση του αρχικού μεγίστου φορτίου που συνεπάγεται και ομαλότερη παραλαβή φορτίων σε περίπτωση σύγκρουσης, ενώ εξασφαλίζεται μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου κατά την εξέλιξη της φόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι το δοκίμιο καταρρέει ομαλά, παραλαμβάνοντας καθόλη τη διάρκεια της κατάρρευσης την ενέργεια που δύναται να απορροφήσει. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο μηχανισμό triggering επιτυγχάνουμε τη βελτίωση των βασικών χαρακτηριστικών που μας ενδιαφέρουν στο crashworthiness, δηλαδή την ενεργειακή απορρόφηση και την ομοιομορφία στην παραλαβή του φορτίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Υπολογιστική προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS –DYNA

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται προσπάθεια προσομοίωσης των πειραματικών δοκιμών που εκτελέστηκαν στη μηχανή Instron και παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Is – dyna επιχειρήθηκε η προσομοίωση της συμπεριφοράς κατάρρευσης των δοκιμών, τα αποτελέσματα της οποίας θα παρουσιασθούν συγκριτικά με τα πειραματικά αποτελέσματα. Έπειτα, θα διαπιστωθεί κατά πόσο συγκλίνουν τα θεωρητικά με τα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ θα ερμηνευθούν οι όποιες διαφορές υπάρχουν.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημανθεί ότι για την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών ακολουθήθηκε η διαδικασία που θα περιγραφεί στη συνέχεια. Αρχικά, έγινε η δόμηση του μοντέλου στον pre-processor της εταιρείας ETA. Όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη δόμηση του μοντέλου, θα περιγραφούν στην επόμενη ενότητα. Στη συνέχεια, τα δεδομένα από την κατασκευή του μοντέλου εισήχθησαν προς επίλυση στο solver του Is – dyna μέσω ενός αρχείου dyn. Τέλος, τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την επίλυση, εισήχθησαν για επεξεργασία στον post – processor της εταιρείας ETA, από τον οποίο λάβαμε τη θεωρητική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης και την προσομοίωση της κατάρρευσης μέσω διαδοχικών στιγμιότυπων. Η θεωρητική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης καθώς και ορισμένα από τα στιγμιότυπα της κατάρρευσης θα παρουσιασθούν στις επόμενες ενότητες και θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα πειραματικά.

4.2 Κατασκευή του μοντέλου στον pre –processor της ETA

Η δόμηση του μοντέλου ξεκινά με την κατασκευή της γεωμετρίας. Αρχικά κατασκευάζουμε το μοντέλο του δοκιμίου. Το δοκίμιο, κατασκευάζεται με τη μέση διάσταση και στη συνέχεια ορίσαμε πάχος τοιχώματος 2 mm που τοποθετείται εκκατέρωθεν της μέσης διάστασης. Έτσι, χρησιμοποιώντας τη μέση διάσταση και με τη συμπλήρωση του πάχους, η τελική διάσταση του μοντέλου του δοκιμίου είναι ίδια με αυτή των πειραμάτων. Στη συνέχεια, κατασκευάστηκε το μοντέλο της βάσης και του εμβόλου. Με τη βοήθεια της γεωμετρίας της βάσης, κατασκευάστηκε τέλος η γωνία στο κάτω άκρο του δοκιμίου.

Μετά την κατασκευή της γεωμετρίας, προχωρήσαμε στη δόμηση του πλέγματος. Για το δοκίμιο, επιλέχθηκε η χρήση πεπερασμένων στοιχείων κελύφους (shell elements). Το πάχος των πεπερασμένων στοιχείων, ορίστηκε στα 2 mm, ενώ για μεγαλύτερη ακρίβεια επιλέχθηκε η μέθοδος ολοκλήρωσης fully integrated shell element και 5 σημεία ολοκλήρωσης (number of integration points = 5). Για τη βάση χρησιμοποιήθηκαν και εδώ shell elements με πάχος 2 mm, μέθοδο ολοκλήρωσης κατά Belytscko – Tsay και 3 σημεία ολοκλήρωσης. Τέλος, για το έμβολο χρησιμοποιήσαμε solid elements.

Σε ότι αφορά την πυκνότητα διακριτοποίησης, είναι γεγονός ότι όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα τόσο καλύτερη προσομοίωση του σχηματισμού λοβών επιτυγχάνεται. Όμως, αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος, οδηγεί σε αύξηση του υπολογιστικού χρόνου. Για το λόγο αυτό, μετά από δοκιμές και προκειμένου να αποφύγουμε τη στρέβλωση των πεπερασμένων στοιχείων ιδιαίτερα στις οξείες γωνίες κορυφής, αλλά και να αποφύγουμε μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους, επιλέχθηκε η διακριτοποίηση να γίνει ανά 3 mm της κάθε πλευράς του δοκιμίου. Τέλος, για το έμβολο και τη βάση, εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν παραμορφώνονται, δε μας ενδιαφέρει να έχουμε μεγάλη πυκνότητα πλέγματος και για αυτό επιλέχθηκε μικρότερη διακριτοποίηση, ανά 5 mm της κάθε πλευράς.

Έπειτα, επιλέχθηκε το υλικό για το δοκίμιο, το έμβολο και τη βάση. Το υλικό του δοκιμίου μοντελοποιήθηκε με τον τύπο MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY, που υπάρχει στο αρχείο υλικών του κώδικα. Στη συνέχεια εισήχθησαν τα χαρακτηριστικά του αλουμινίου και χαρακτηριστικά σημεία από την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (σ-ε) από πείραμα εφέλκυσμού για το συγκεκριμένο δοκίμιο, τα οποία παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα.

Πίνακας 4.1 Ιδιότητες αλουμινίου

	Πυκνότητα (gr / mm ³)	Μέτρο Ελαστικότητας (Mpa)	Λόγος Poisson	Όριο Διαρροής (Mpa)
Αλουμίνιο (Al)	0,0027	69000	0,33	220

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικές τιμές από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης.

σ (Mpa)	ϵ
220	0
230	0,011
250	0,042
260	0,071

Το υλικό που επιλέχθηκε τόσο για τη βάση, όσο και για το έμβολο είναι το MAT_RIGID στο οποίο εισήχθησαν τα χαρακτηριστικά του χάλυβα που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.3 Ιδιότητες χάλυβα

	Πυκνότητα (gr / mm ³)	Μέτρο Ελαστικότητας (Mpa)	Λόγος Poisson	Όριο Διαρροής (Mpa)
Χάλυβας (St)	0,00783	207000	0,30	-

Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημάνουμε ότι επιλέχθηκε να περιορίσουμε τόσο τη μετατόπιση όσο και την περιστροφή προς όλες τις κατευθύνσεις για τη βάση, ενώ για το έμβολο επιτρέψαμε μόνο τη μετατόπιση κατά τον άξονα των Z.

Αφού ορίσαμε τα υλικά του δοκιμίου, της βάσης και του εμβόλου, προχωρούμε στην εισαγωγή των διεπιφανειών στον κώδικα. Για να προσομοιάσουμε τις πειραματικές δοκιμές, ορίζουμε 3 διεπιφάνειες. Η πρώτη διεπιφάνεια αφορά την επαφή του δοκιμίου με τη βάση. Η δεύτερη διεπιφάνεια αφορά την επαφή του δοκιμίου με το έμβολο και η τρίτη αφορά την επαφή των στοιχείων του δοκιμίου μεταξύ τους κατά την κατάρρευση.

Αρχικά, για να ορίσουμε τη διεπιφάνεια δοκιμίου – βάσης, μετατοπίσαμε τη βάση του δοκιμίου αντίστοιχα προς τα κάτω, ώστε να έχουμε 2 mm πλευρικά για τη δημιουργία offset, λόγω του γεγονότος ότι τόσο το δοκίμιο όσο και η βάση (shell elements) χτίζουν το πάχος εκατέρωθεν της μέσης διάστασης, συνεπώς θα πρέπει να αφαιρεθεί 1 mm για το δοκίμιο και 1 mm για τη βάση. Στη συνέχεια επιλέξαμε την επαφή AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE, στην οποία ορίσαμε ως master τη βάση και ως slave το δοκίμιο. Στους συντελεστές τριβής, χρησιμοποιήσαμε τυπικές τιμές για επαφή μετάλλου με μέταλλο, δηλαδή για το συντελεστή στατικής τριβής $f_s = 0,2$ και για το συντελεστή δυναμικής τριβής $f_d = 0,15$.

Έπειτα δημιουργήσαμε τη διεπιφάνεια δοκιμίου – εμβόλου, επιλέγοντας την επαφή AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE, στην οποία ορίσαμε ως master το έμβολο και ως slave το δοκίμιο. Οι συντελεστές τριβής λαμβάνουν τις ανωτέρω τιμές, δηλαδή $f_s = 0,2$ και $f_d = 0,15$.

Τέλος, δημιουργήσαμε τη διεπιφάνεια του δοκιμίου με τον εαυτό του, καθώς πεπερασμένα στοιχεία του δοκιμίου έρχονται σε επαφή μεταξύ τους κατά την κατάρρευση. Για τη δημιουργία, επιλέξαμε την επαφή AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE στην οποία ενεργοποιήσαμε την επιλογή soft constraint option, προκειμένου να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα που παρουσιάζονταν κατά την κατάρρευση δοκιμίων με οξείες γωνίες κορυφής, όπου τα πεπερασμένα στοιχεία, ιδιαίτερα στο τριγωνικό τμήμα υφίστανται μεγάλες διατμητικές τάσεις που τα παραμορφώνουν με αποτέλεσμα να σταματά η εξέλιξη της κατάρρευσης. Οι συντελεστές τριβής λαμβάνουν και σε αυτήν την περίπτωση τις τυπικές τιμές $f_s = 0,2$ και $f_d = 0,15$.

Τέλος, για την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης, εισάγουμε στον κώδικα τις οριακές συνθήκες. Έτσι, επιλέγουμε μετατόπιση του εμβόλου κατά 75 mm προς τα κάτω (αξονική συμπίεση) με ταχύτητα 1 mm / msec (ημι –στατική φόρτιση). Σε αυτό το σημείο, πρέπει να επισημάνουμε ότι επιλέχθηκε μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτή του πειράματος, προκειμένου να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος. Πάντως, η συγκεκριμένη ταχύτητα που επιλέχθηκε είναι εντός των ορίων που μας επιτρέπουν αξιόπιστα αποτελέσματα σε σχέση με το πείραμα.

Η συγκεκριμένη διαδικασία ακολουθήθηκε για την κατασκευή όλων των μοντέλων που αντιστοιχούν στα πειραματικά δοκίμια .

4.3 Επίλυση μοντέλου και επεξεργασία αποτελεσμάτων

Αφού ολοκληρώθηκε η δόμηση του μοντέλου, μέσω ενός αρχείου dyn, εισάγουμε τα δεδομένα στο solver του Is-dyna, προκειμένου να πάρουμε τα αποτελέσματα. Στη συνέχεια επεξεργαζόμαστε τα αποτελέσματα μέσω του περιβάλλοντος του post – processing της ETA, όπου βλέπουμε τα στιγμιότυπα της κατάρρευσης ενώ λαμβάνουμε και την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης καθώς επίσης και τα σημεία από τα οποία προέρχεται. Τέλος, εισάγοντας τα σημεία στο Excel, υπολογίζουμε το μέσο και μέγιστο φορτίο για το μοντέλο, ενώ μπορούμε να παρουσιάσουμε συγκριτικά την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης του μοντέλου και του πειράματος για το συγκεκριμένο δοκίμιο. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για όλα τα πειραματικά δοκίμια που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία .

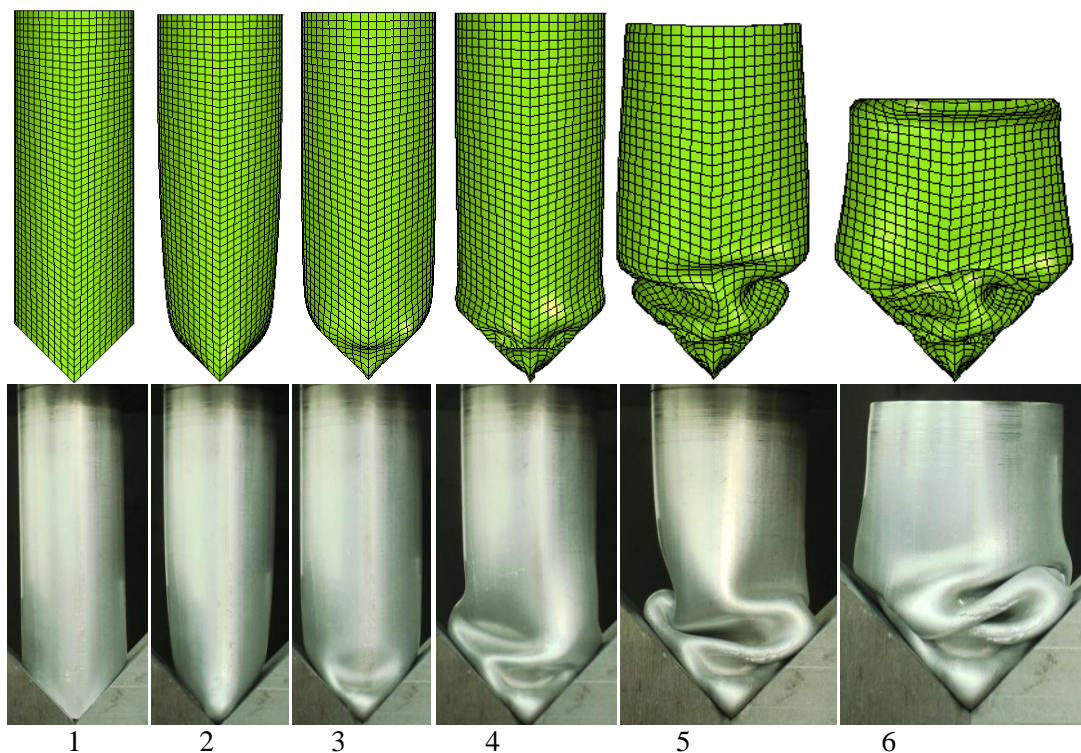
4.4 Συγκριτική παρουσίαση υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα από τη μοντελοποίηση που περιγράφηκε και θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα πειραματικά. Συγκεκριμένα, θα παρουσιασθούν στιγμιότυπα της κατάρρευσης σε αντιπαραβολή με τα πειραματικά, συγκριτικά διαγράμματα των πειραματικών και υπολογιστικών καμπυλών, ενώ θα παρουσιασθούν συγκριτικά τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης και θα υπολογιστούν οι διαφορές του μοντέλου με το πείραμα. Τέλος, θα γίνει μια προσπάθεια να ερμηνευθούν πιθανές αποκλίσεις των θεωρητικών (υπολογιστικών) αποτελεσμάτων από τα αντίστοιχα πειραματικά.

4.4.1 Κυλινδρικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°

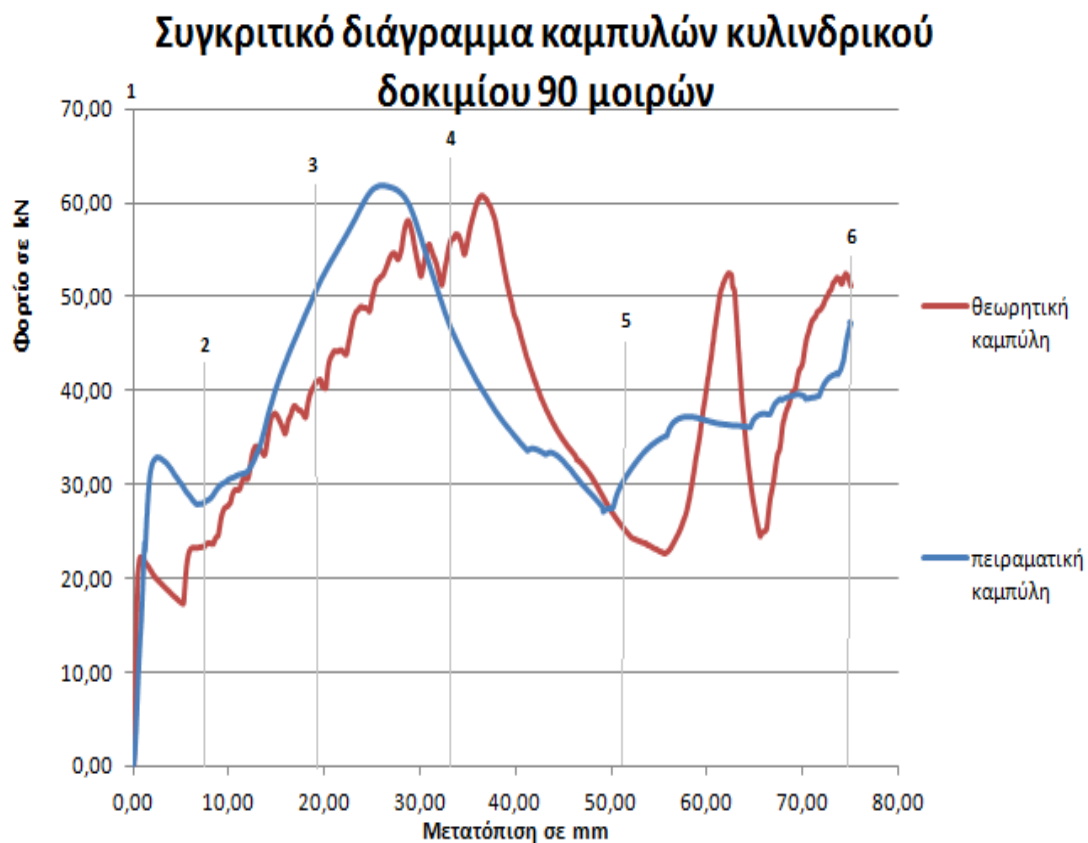
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιασθούν τα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του κυλινδρικού δοκιμίου και θα συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα του δοκιμίου Φ50x2-90_1.

Αρχικά, παρουσιάζονται στιγμιότυπα τόσο από τη μοντελοποίηση της κατάρρευσης, όσο και από την πειραματική δοκιμή για το αντίστοιχο δοκίμιο.



Εικόνα 4.1 Συγκριτική παρουσίαση 6 στιγμιότυπων από την προσομοίωση της κατάρρευσης και το πείραμα (1^ο στιγμιότυπο → αρχή της κατάρρευσης, 6^ο στιγμιότυπο → πέρας).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται σε ένα διάγραμμα η θεωρητική καμπύλη που προέκυψε από τη μοντελοποίηση και η πειραματική καμπύλη του κυλινδρικού δοκιμίου, ενώ έχουν σημειωθεί και οι αντίστοιχες θέσεις των παραπάνω στιγμιοτύπων.



Διάγραμμα 4.1 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών για το κυλινδρικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση του κυλινδρικού δοκιμίου τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά .

Πίνακας 4.4 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών που προκύπτουν από το πείραμα και την προσομοίωση για το κυλινδρικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 90°.

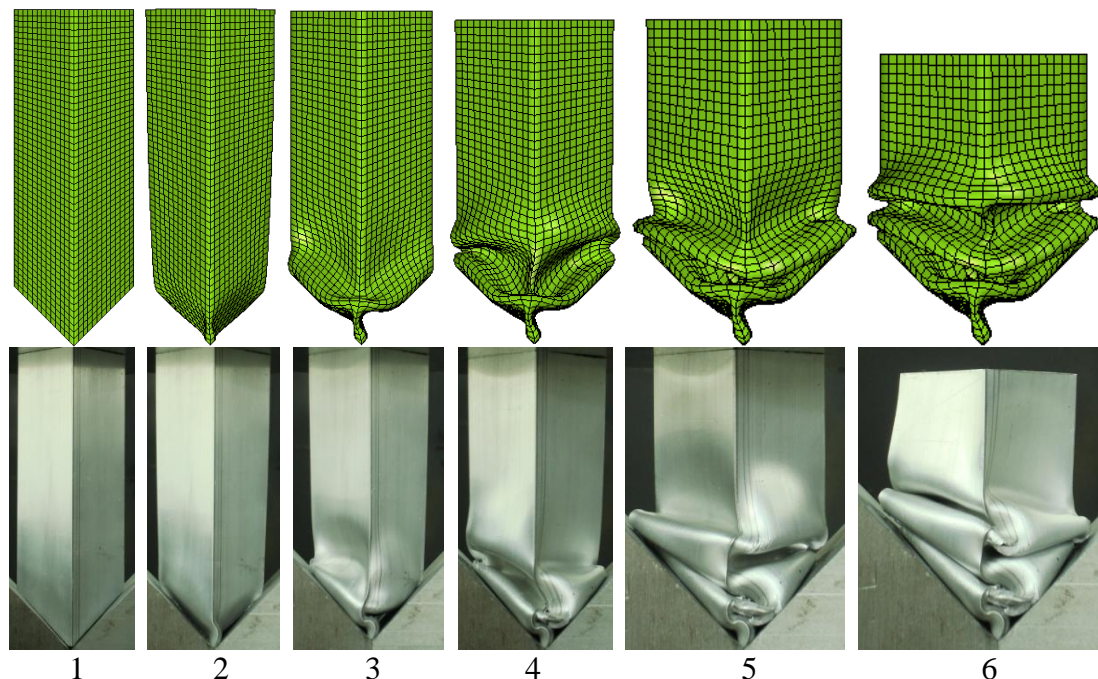
Δοκίμιο Φ50x2-90	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	39,2155	61,79787	2,941168	1,57585
θεωρητικά	38,36902525	60,7838	2,877676893	1,58418932
Διαφορά (%)	2,16 %	1,64 %	2,16 %	0,52 %

Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι η μορφή της θεωρητικής καμπύλης προσεγγίζει αρκετά τη μορφή της πειραματικής καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, με τη σημαντική διαφορά ότι προς το τέλος της φόρτισης, η θεωρητική καμπύλη παρουσιάζει αύξηση του φορτίου και δημιουργία 2 τοπικών μεγίστων. Αυτό παρατηρείται και στα στιγμιότυπα κατάρρευσης, όπου προς το τέλος της φόρτισης, έχουμε το σχηματισμό λοβού στο άνω άκρο του δοκιμίου. Αυτή είναι και η βασική διαφορά που παρατηρείται στα στιγμιότυπα από το πείραμα και το μοντέλο. Σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης, τα θεωρητικά παρουσιάζουν πολύ μικρές αποκλίσεις από τα πειραματικά (πιν. 4.4) κάτι που μας επιτρέπει να θεωρήσουμε ότι υπάρχει πολύ καλή προσέγγιση του πειράματος από το μοντέλο. Οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν είναι εντός φυσιολογικών ορίων, συνεπώς καταλήγουμε στο ότι το μοντέλο αποτελεί μια πολύ καλή προσομοίωση της πειραματικής δοκιμής για το κυλινδρικό δοκίμιο των 90 μοιρών.

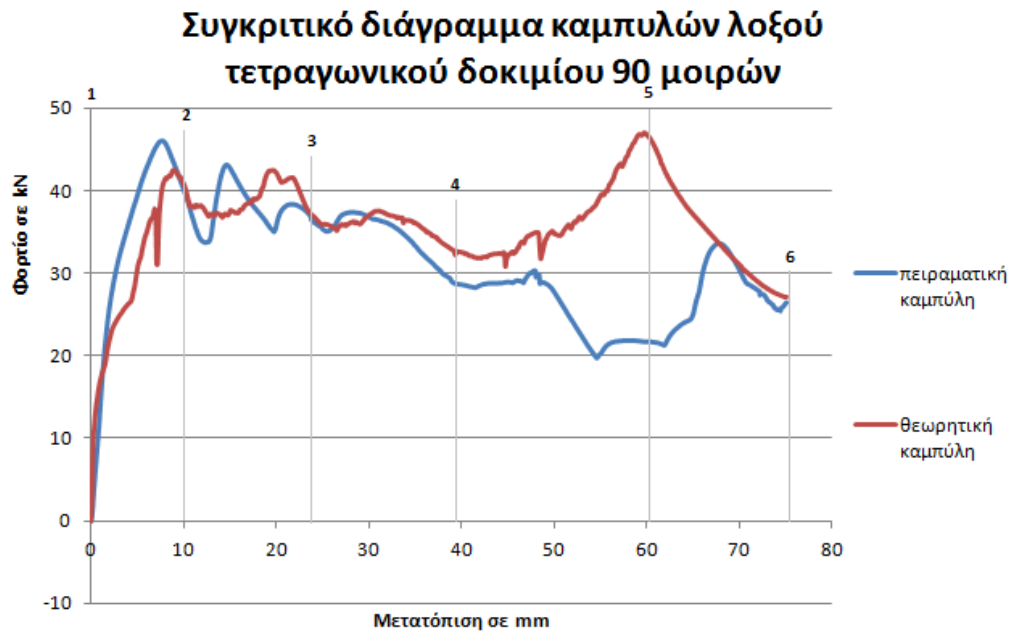
4.4.2 Λοξό Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιασθούν τα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του λοξού τετραγωνικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 90° και θα συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα του δοκιμίου 40x40x2-90_Ιοχος_1 . Αρχικά, παρουσιάζονται στιγμιότυπα τόσο από τη μοντελοποίηση της κατάρρευσης, όσο και από την πειραματική δοκιμή για το αντίστοιχο δοκίμιο.



Εικόνα 4.2 Συγκριτική παρουσίαση 6 στιγμιότυπων από την προσομοίωση της κατάρρευσης και το πείραμα (1^ο στιγμιότυπο → αρχή της κατάρρευσης, 6^ο στιγμιότυπο → πέρας).

Ακολουθεί διάγραμμα με τη θεωρητική καμπύλη και την πειραματική καμπύλη του λοξού τετραγωνικού δοκιμίου, ενώ έχουν σημειωθεί και οι αντίστοιχες θέσεις των παραπάνω στιγμιοτύπων.



Διάγραμμα 4.2 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση του λοξού τετραγωνικού δοκιμίου τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά.

Πίνακας 4.4 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών που προκύπτουν από το πείραμα και την προσομοίωση για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 90°.

Δοκίμιο 40x40x2- 90_loxos_1	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	31,33184643	46,1068	2,349888482	1,471563449
θεωρητικά	35,49158454	46,9436	2,661868841	1,322668475
Διαφορά (%)	13,28 %	1,81 %	13,28 %	10,12 %

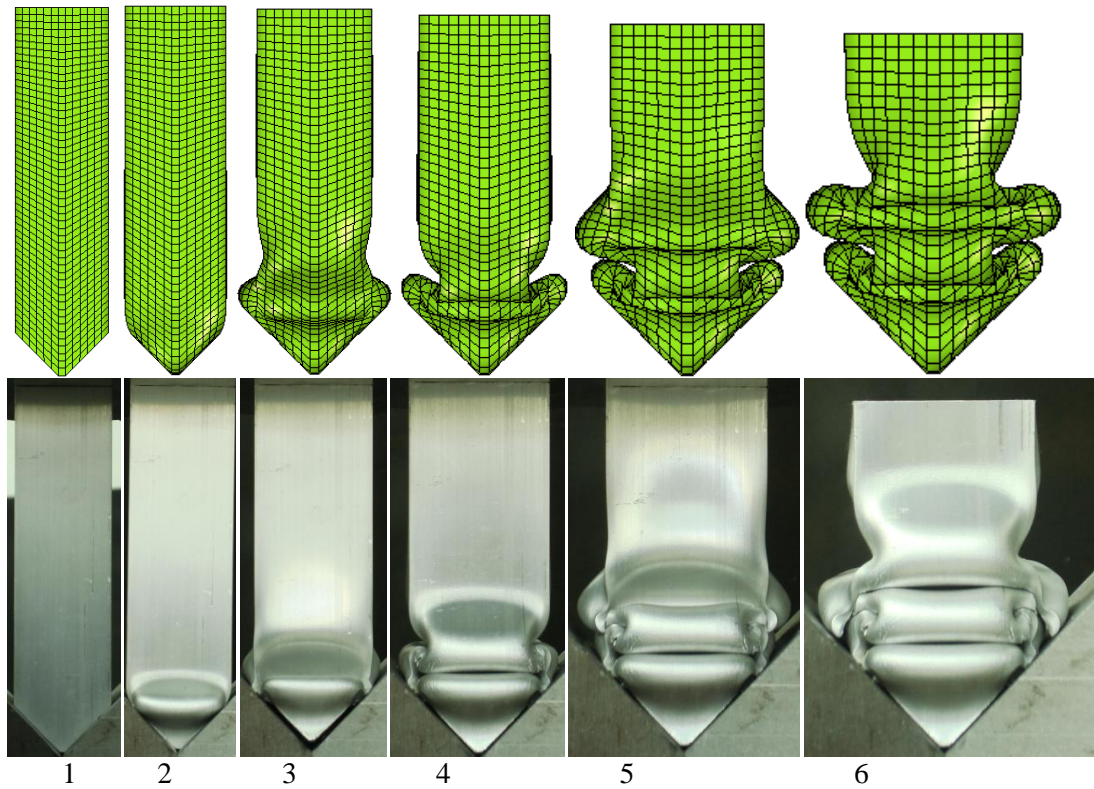
Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι υπάρχει σημαντική απόκλιση στη μορφή των καμπυλών, καθώς η πειραματική παρουσιάζει το μέγιστο φορτίο στην αρχή της παραμόρφωσης και στη συνέχεια το φορτίο εμφανίζει πτωτική τάση, ενώ στη θεωρητική το μέγιστο εμφανίζεται προς το τέλος της φόρτισης και παρατηρείται σταθερή σχεδόν αυξητική τάση του φορτίου κατά την εξέλιξη της κατάρρευσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση σημαντικών αποκλίσεων στο μέσο φορτίο και το πλαστικό έργο, παρόλο που το μέγιστο φορτίο έχει σχεδόν την ίδια τιμή. Οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν είναι αρκετά έντονες. Αυτό πιθανό να οφείλεται τόσο στις θραύσεις που παρατηρούνται στο πείραμα και μειώνουν το φορτίο προς το τέλος της φόρτισης, όσο και από το γεγονός ότι στο πείραμα δεν έχουμε ομογενές και ισότροπο υλικό, ομοιόμορφη κατανομή του πάχους του υλικού στις πλευρές του δοκιμίου, γεωμετρική ακρίβεια στη διαμόρφωση της γωνίας κορυφής, στοιχεία που υπάρχουν στις εξιδανικευμένες συνθήκες του μοντέλου. Έτσι οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται δε μας επιτρέπουν να πούμε ότι η προσομοίωση του πειράματος από το μοντέλο είναι αρκετά ακριβής, αλλά είναι εντός αποδεκτών πλαισίων.

4.4.3 Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 90°

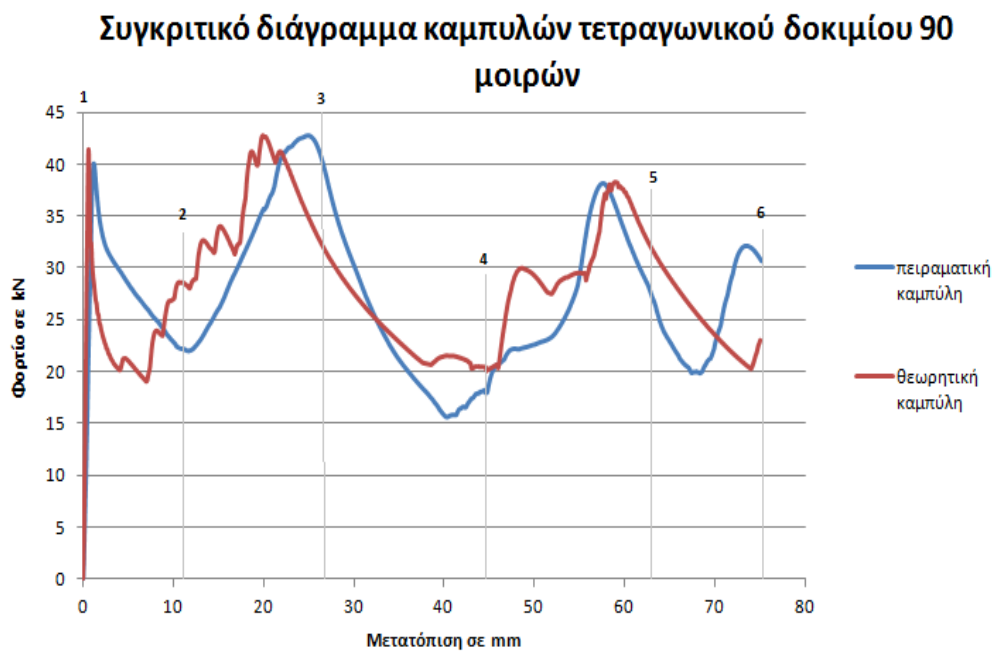
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιασθούν τα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του τετραγωνικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 90° και θα συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα του δοκιμίου 40x40x2-90_1 .

Αρχικά, παρουσιάζονται στιγμιότυπα τόσο από τη μοντελοποίηση της κατάρρευσης, όσο και από την πειραματική δοκιμή για το αντίστοιχο δοκίμιο .



Εικόνα 4.3 Συγκριτική παρουσίαση 6 στιγμιότυπων από την προσομοίωση της κατάρρευσης και το πείραμα (1^ο στιγμιότυπο → αρχή της κατάρρευσης, 6^ο στιγμιότυπο → πέρας).

Ακολουθεί διάγραμμα με τη θεωρητική και την πειραματική καμπύλη του τετραγωνικού δοκιμίου, ενώ έχουν σημειωθεί και οι αντίστοιχες θέσεις των παραπάνω στιγμιότυπων .



Διάγραμμα 4.3 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών για το τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 90°.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση του τετραγωνικού δοκίμιου τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά .

Πίνακας 4.5 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών που προκύπτουν από το πείραμα και την προσομοίωση για το τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 90°.

Δοκίμιο 40x40x2-90_1	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	27,17131416	42,83167	2,037848562	1,576356217
θεωρητικά	27,99482389	42,822	2,099611792	1,529639914
Διαφορά (%)	3,03 %	0,02 %	3,03 %	2,96 %

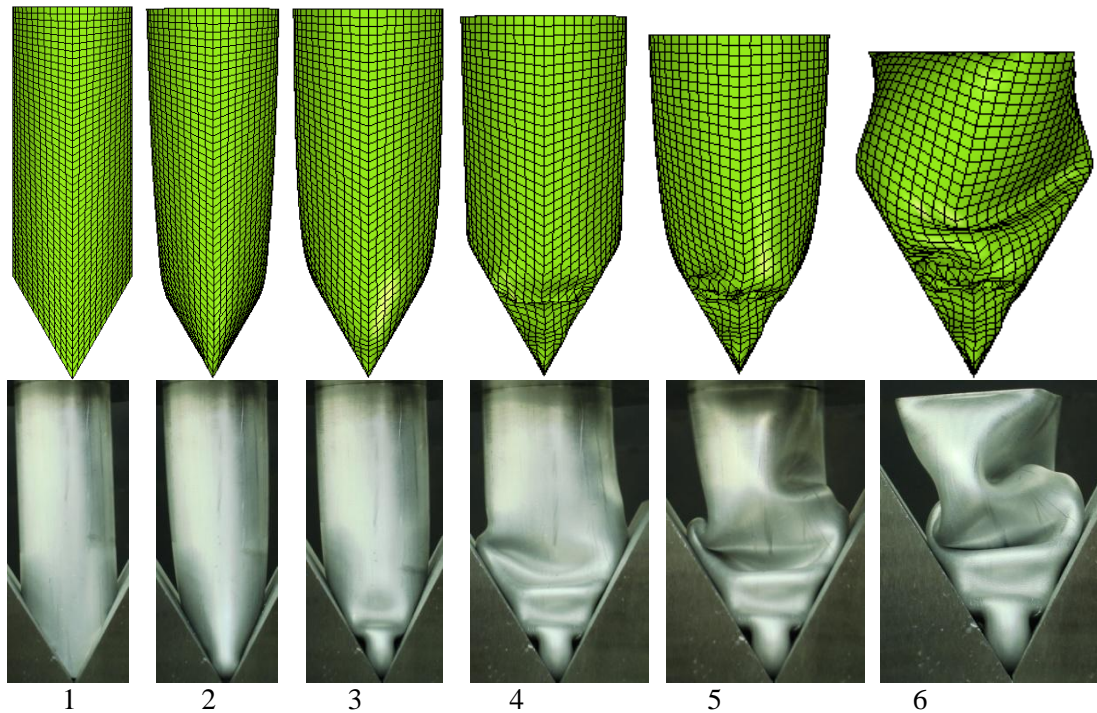
Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι υπάρχει σχεδόν απόλυτη ταύτιση μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων. Έτσι, τόσο οι μορφές των καμπυλών όσο και τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης, παρουσιάζουν ελάχιστες αποκλίσεις. Συνεπώς, το μοντέλο προσομοιάζει με μεγάλη ακρίβεια το πείραμα για το συγκεκριμένο δοκίμιο.

4.4.4 Κυλινδρικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 60°

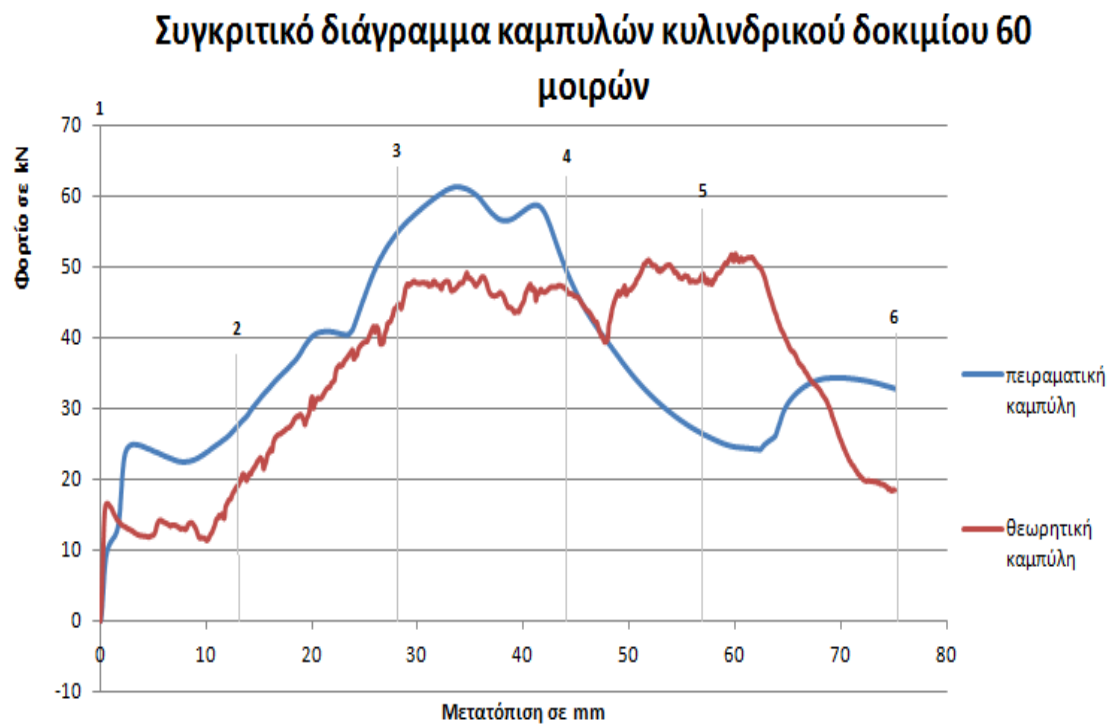
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιασθούν τα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του κυλινδρικού δοκίμιου και θα συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα του δοκίμιου Φ50x2-60_2.

Αρχικά, παρουσιάζονται στιγμιότυπα τόσο από τη μοντελοποίηση της κατάρρευσης, όσο και από την πειραματική δοκιμή για το αντίστοιχο δοκίμιο.



Εικόνα 4.4 Συγκριτική παρουσίαση 6 στιγμιότυπων από την προσομοίωση της κατάρρευσης και το πείραμα (1^ο στιγμιότυπο → αρχή της κατάρρευσης, 6^ο στιγμιότυπο → πέρας).

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα με τη θεωρητική και την πειραματική καμπύλη του κυλινδρικού δοκιμίου, στο οποίο έχουν σημειωθεί και οι αντίστοιχες θέσεις των παραπάνω στιγμιότυπων .



Διάγραμμα 4.4 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών για το κυλινδρικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση του κυλινδρικού δοκιμίου τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά .

Πίνακας 4.7 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών που προκύπτουν από το πείραμα και την προσομοίωση για το κυλινδρικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

Δοκίμιο Φ50x2-60	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	37,45303451	61,28781	2,808977588	1,636391037
θεωρητικά	35,40487991	51,729	2,655365993	1,461069777
Διαφορά (%)	5,47 %	15,6 %	5,47 %	10,71 %

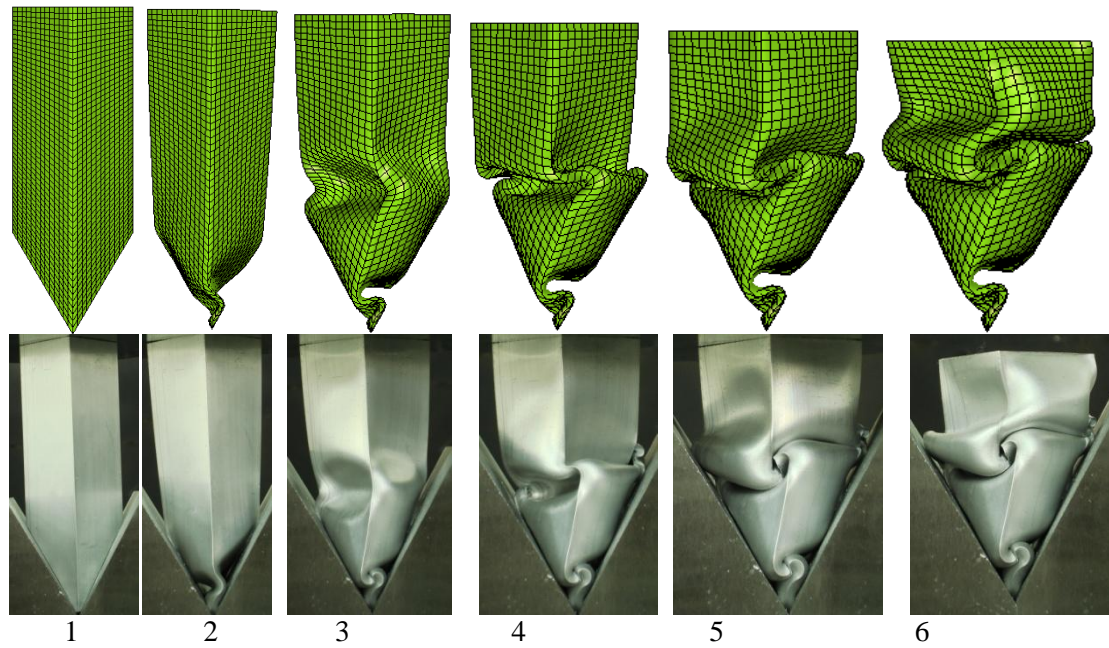
Συμπεράσματα

Αν και στα στιγμιότυπα υπάρχει μια σχετική ομοιότητα μεταξύ μοντέλου και πειράματος, ωστόσο από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι παρουσιάζεται σημαντική υστέρηση της θεωρητικής από την πειραματική καμπύλη. Αυτό αποτυπώνεται έντονα στο μέγιστο φορτίο, ενώ επηρεάζει και τα υπόλοιπα μεγέθη της κατάρρευσης. Επίσης, το μοντέλο παρουσιάζει μέγιστο φορτίο προς το τέλος της παραμόρφωσης, τη στιγμή που αντίστοιχα στην πειραματική καμπύλη το φορτίο μειώνεται. Συνεπώς, ενώ μεν στην αρχή της παραμόρφωσης υπάρχει μια καλή προσέγγιση στη μορφή της πειραματικής καμπύλης, από τη θεωρητική, στην πορεία και ιδιαίτερα προς το τέλος της φόρτισης, παρουσιάζονται σημαντικές αποκλίσεις. Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η προσομοίωση του συγκεκριμένου δοκιμίου δεν είναι αρκετά ακριβής, παρόλα αυτά είναι εντός αποδεκτών πλαισίων.

4.4.5 Λοξό Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 60°

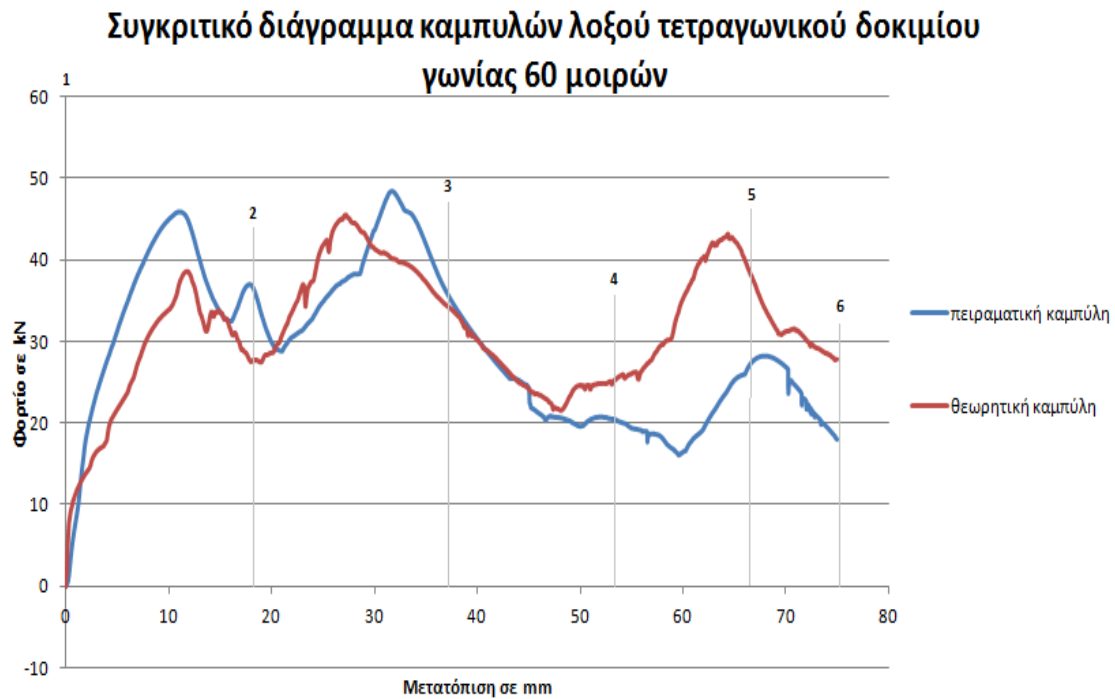
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιασθούν τα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του λοξού τετραγωνικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 60° και θα συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα του δοκιμίου 40x40x2-60_Ιοχος_2.

Αρχικά, παρουσιάζονται στιγμιότυπα τόσο από τη μοντελοποίηση της κατάρρευσης, όσο και από την πειραματική δοκιμή για το αντίστοιχο δοκίμιο.



Εικόνα 4.5 Συγκριτική παρουσίαση 6 στιγμιότυπων από την προσομοίωση της κατάρρευσης και το πείραμα (1^ο στιγμιότυπο → αρχή της κατάρρευσης, 6^ο στιγμιότυπο → πέρας).

Ακολουθεί διάγραμμα με τη θεωρητική και την πειραματική καμπύλη του λοξού τετραγωνικού δοκιμίου, ενώ έχουν σημειωθεί και οι αντίστοιχες θέσεις των παραπάνω στιγμιότυπων.



Διάγραμμα 4.5 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση του λοξού τετραγωνικού δοκιμίου τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά.

Πίνακας 4.8 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών που προκύπτουν από το πείραμα και την προσομοίωση για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

Δοκίμιο 40x40x2- 60_loxos_2	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	29,28613114	48,40207	2,196459835	1,652730085
θεωρητικά	31,24671257	45,4457	2,343503443	1,454415401
Διαφορά (%)	6,69 %	6,11 %	6,69 %	11,99 %

Συμπεράσματα

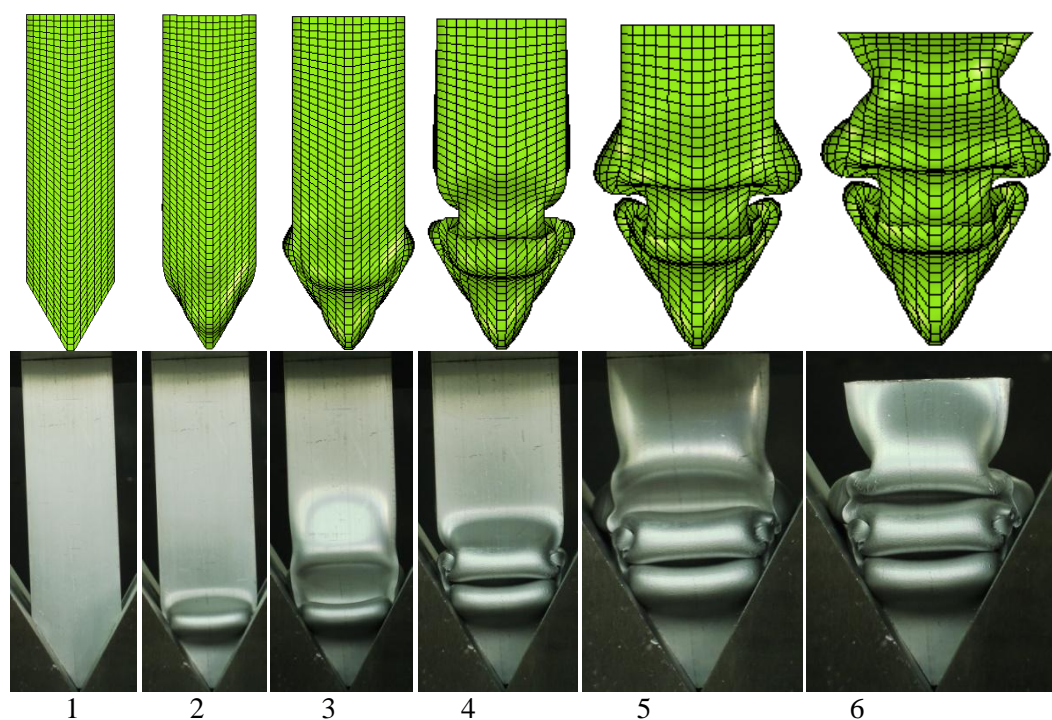
Παρατηρούμε ότι υπάρχουν ομοιότητες στη μορφή της θεωρητικής και της πειραματικής καμπύλης. Μοναδική διαφοροποίηση αποτελεί η εμφάνιση υψηλότερου τοπικού μεγίστου στη θεωρητική καμπύλη, προς το τέλος της παραμόρφωσης, για το λόγο αυτό παρατηρούνται αυξημένα τα θεωρητικά χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης (μέσο φορτίο, ενεργειακή απορρόφηση και ομοιομορφία κατανομής φορτίου), παρόλο που εμφανίζεται μικρότερο μέγιστο (θεωρητικό) φορτίο. Ακόμα από τα στιγμιότυπα, παρατηρούμε ότι το μοντέλο προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια τον τρόπο κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου. Κατόπιν τούτου και με δεδομένο ότι τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης, δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις, μπορούμε να πούμε ότι το μοντέλο προσομοιάζει ικανοποιητικά την πειραματική δοκιμή.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να επισημανθεί ότι τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης που προκύπτουν από την υπολογιστική προσομοίωση στην πλειονότητα των περιπτώσεων, παρουσιάζονται αυξημένα σε σχέση με τα αντίστοιχα πειραματικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη μοντελοποίηση, γίνονται παραδοχές που δεν είναι δυνατό να υπάρξουν στην πραγματικότητα και βελτιώνουν τη συμπεριφορά κατάρρευσης, όπως ομογενές και ισότροπο υλικό, ομοιόμορφη κατανομή του πάχους κατά μήκος και διατομή του δοκιμίου και άλλες.

4.4.6 Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 60°

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιασθούν τα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του τετραγωνικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 60° και θα συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα του δοκιμίου 40x40x2-60_2.

Ακολουθεί παρουσίαση των στιγμιότυπων τόσο από τη μοντελοποίηση της κατάρρευσης, όσο και από την πειραματική δοκιμή για το τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 60°.



Εικόνα 4.6 Συγκριτική παρουσίαση 6 στιγμιότυπων από την προσομοίωση της κατάρρευσης και το πείραμα (1^ο στιγμιότυπο → αρχή της κατάρρευσης, 6^ο στιγμιότυπο → πέρας).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται η θεωρητική καμπύλη που προέκυψε από τη μοντελοποίηση και η πειραματική καμπύλη του τετραγωνικού δοκιμίου, ενώ έχουν σημειωθεί οι θέσεις των παραπάνω στιγμιότυπων.



Διάγραμμα 4.6 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών για το τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

Τέλος, στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση του τετραγωνικού δοκιμίου τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά .

Πίνακας 4.9 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών που προκύπτουν από το πείραμα και την προσομοίωση για το τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

Δοκίμιο 40x40x2-60_2	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	26,55745737	46,41552	1,991809303	1,747739603
θεωρητικά	28,6357761	47,9261	2,147683207	1,67364418
Διαφορά (%)	7,83 %	3,25 %	7,83 %	4,24 %

Συμπεράσματα

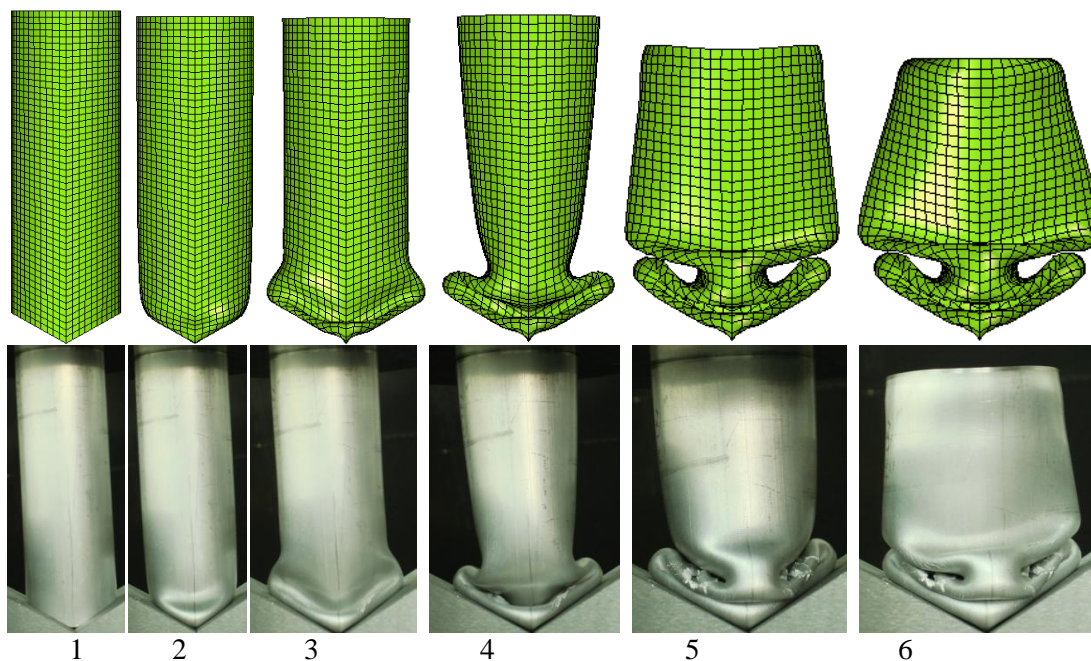
Και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούμε ότι υπάρχουν αρκετές ομοιότητες τόσο στη μορφή της πειραματικής και της θεωρητικής καμπύλης, όσο και στον τρόπο κατάρρευσης, όπως φαίνεται από τα στιγμιότυπα. Αυτό που παρουσιάζεται τόσο στις καμπύλες, όσο και στα στιγμιότυπα είναι η υστέρηση του μοντέλου στο σχηματισμό των λοβών. Έτσι, παρατηρούμε οι λοβοί να σχηματίζονται νωρίτερα στο πείραμα από ότι στο μοντέλο, κάτι που επιβεβαιώνεται και από την καθυστέρηση εμφάνισης των μεγίστων στη θεωρητική καμπύλη.

Τέλος, παρατηρούμε ότι οι διαφορές μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών μεγεθών κυμαίνονται εντός αποδεκτών ορίων, κάτι που μας επιτρέπει να θεωρήσουμε ότι υπάρχει σύγκλιση μεταξύ του πειράματος και της προσομοίωσής του.

4.4.7 Κυλινδρικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 120°

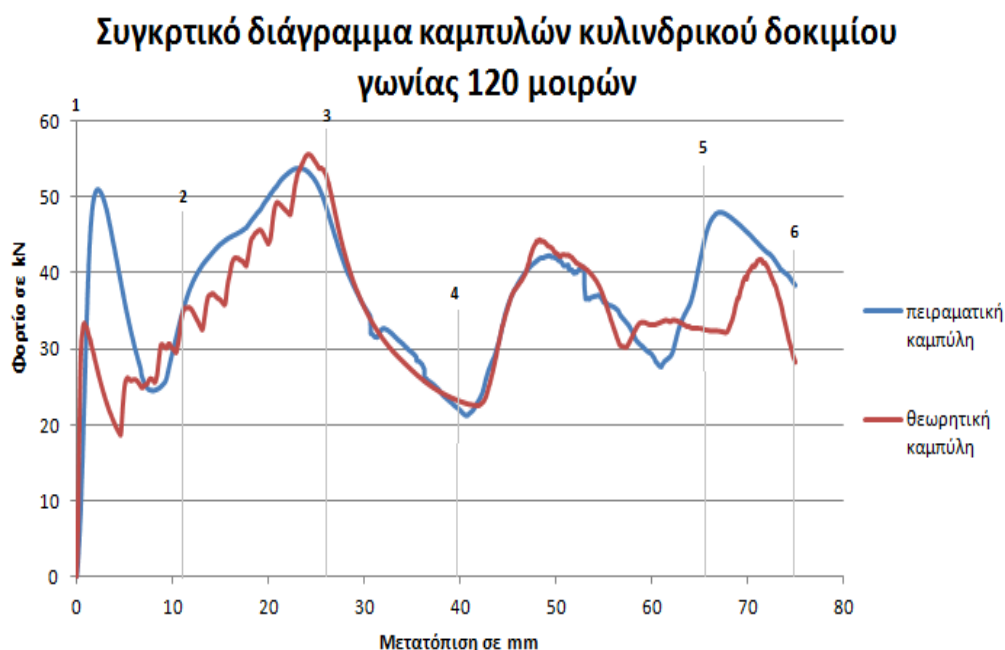
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιασθούν τα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του κυλινδρικού δοκιμίου και θα συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα του δοκιμίου Φ50x2-120_2.

Αρχικά, παρουσιάζονται στιγμιότυπα τόσο από τη μοντελοποίηση της κατάρρευσης, όσο και από την πειραματική δοκιμή για το κυλινδρικό δοκίμιο.



Εικόνα 4.7 Συγκριτική παρουσίαση 6 στιγμιότυπων από την προσομοίωση της κατάρρευσης και το πείραμα (1^ο στιγμιότυπο → αρχή της κατάρρευσης, 6^ο στιγμιότυπο → πέρας).

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα με τη θεωρητική και την πειραματική καμπύλη του κυλινδρικού δοκιμίου, στο οποίο έχουν σημειωθεί και οι αντίστοιχες θέσεις των παραπάνω στιγμιότυπων.



Διάγραμμα 4.7 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών για το κυλινδρικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 120°.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση του κυλινδρικού δοκιμίου τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά.

Πίνακας 4.10 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών που προκύπτουν από το πείραμα και την προσομοίωση για το κυλινδρικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 120°.

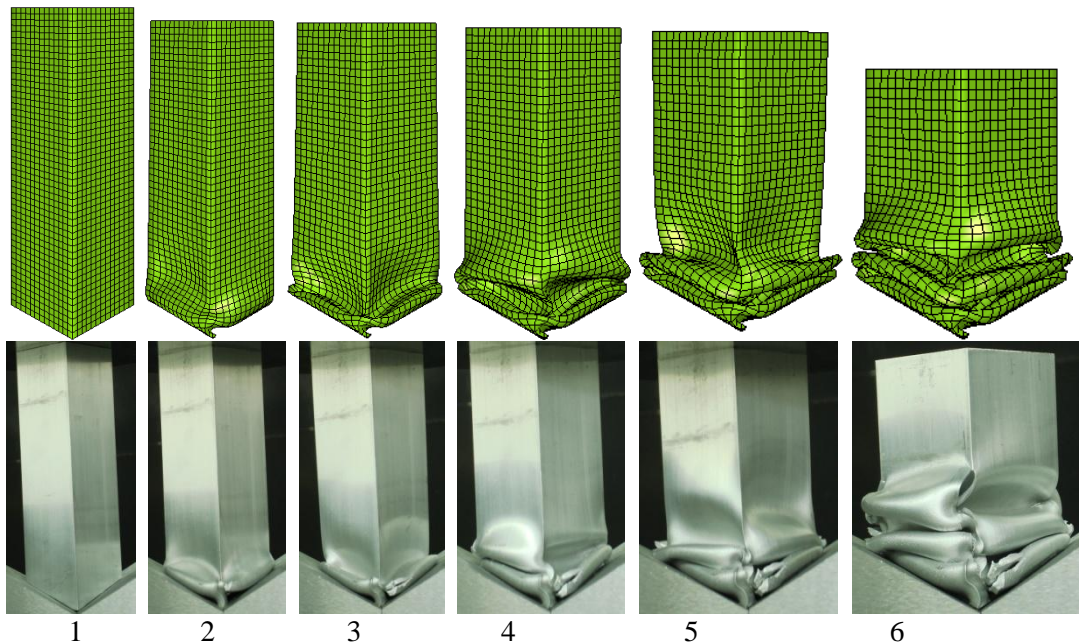
Δοκίμιο Φ50x2-120	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	37,56764743	53,77113	2,817573557	1,431314806
θεωρητικά	34,94551366	55,5538	2,620913525	1,589726239
Διαφορά (%)	6,98 %	3,32 %	6,98 %	11,07 %

Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι τόσο ο τρόπος κατάρρευσης (από τα στιγμιότυπα) όσο και οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης σχεδόν συμπίπτουν για το μοντέλο και το πείραμα. Εξάλλου, η διαφορά στα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης είναι σχετικά μικρή, με μοναδική εξαίρεση το δείκτη ομοιομορφίας φορτίου. Συνεπώς, η υπολογιστική προσομοίωση, προσεγγίζει με αρκετή ακρίβεια τις πειραματικές συνθήκες.

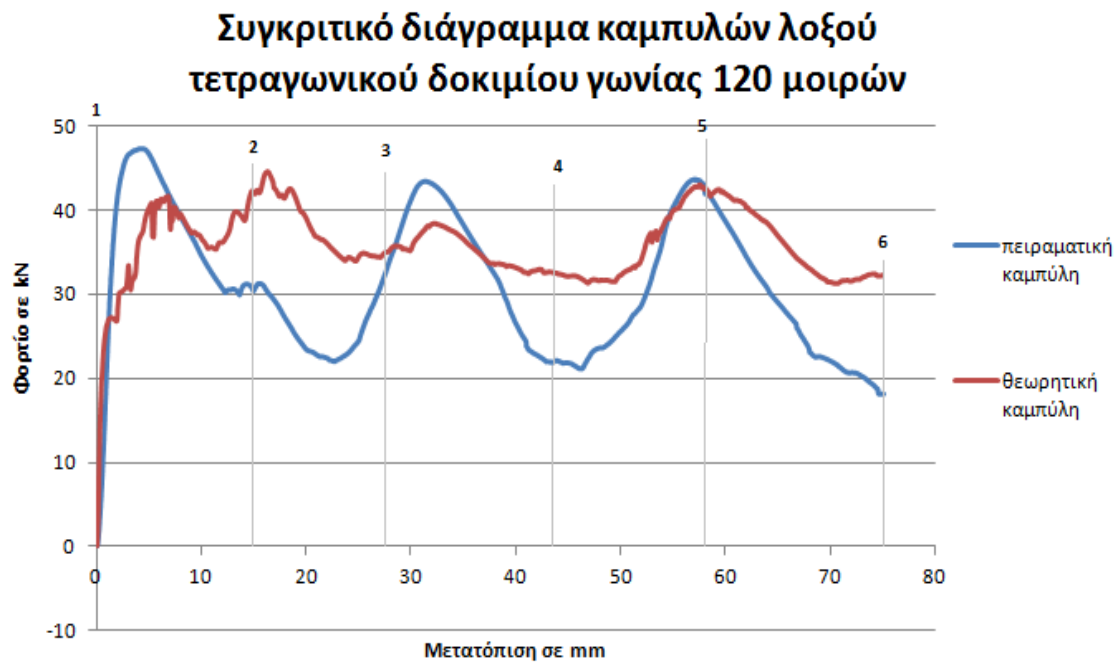
4.4.8 Λοξό Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 120°

Εδώ θα παρουσιασθούν τα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του λοξού τετραγωνικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 120° και θα συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα του δοκιμίου 40x40x2-120_loxos_1. Αρχικά, παρουσιάζονται στιγμιότυπα τόσο από τη μοντελοποίηση της κατάρρευσης, όσο και από την πειραματική δοκιμή για το αντίστοιχο δοκίμιο.



εικόνα 4.8 Συγκριτική παρουσίαση 6 στιγμιότυπων από την προσομοίωση της κατάρρευσης και το πείραμα (1^ο στιγμιότυπο → αρχή της κατάρρευσης, 6^ο στιγμιότυπο → πέρας).

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα με τη θεωρητική και την πειραματική καμπύλη του λοξού τετραγωνικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 120°, στο οποίο έχουν σημειωθεί και οι αντίστοιχες θέσεις των παραπάνω στιγμιότυπων.



Διάγραμμα 4.8 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 120°.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση του λοξού τετραγωνικού δοκιμίου τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά.

Πίνακας 4.11 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών που προκύπτουν από το πείραμα και την προσομοίωση για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 120°.

Δοκίμιο 40x40x2- 120_Ioxos_1	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	30,96742391	47,3551	2,322556793	1,529190808
θεωρητικά	35,78664904	44,4932	2,683998678	1,243290478
Διαφορά (%)	15,56 %	6,04 %	15,56 %	18,69 %

Συμπεράσματα

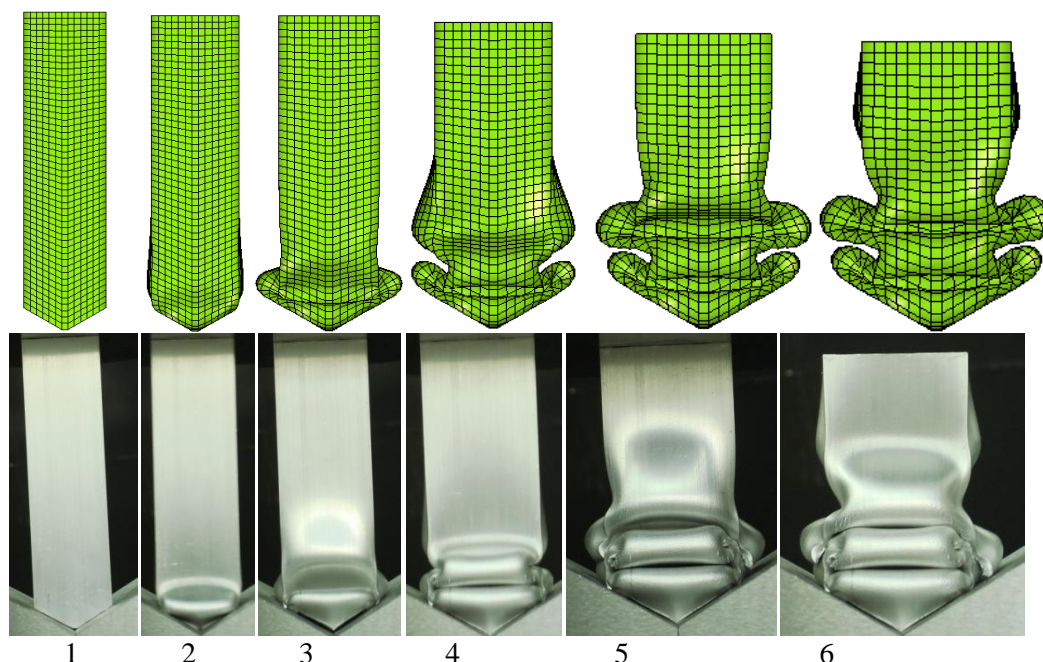
Παρατηρούμε ότι παρουσιάζεται σημαντική απόκλιση της θεωρητικής από την πειραματική καμπύλη καθώς στη μοντελοποίηση το φορτίο παρουσιάζει μικρή διακύμανση κάτι που δε συμβαίνει στην πραγματικότητα. Η μικρή διακύμανση του φορτίου (μικρός c.f.e) στο μοντέλο, έχει σαν αποτέλεσμα να παρουσιάζεται αυξημένο μέσο φορτίο και ενεργειακή απορρόφηση.

Οι διαφοροποιήσεις αυτές, οφείλονται στις εξιδανικευμένες συνθήκες της μοντελοποίησης που οδηγούν σε πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά από την πραγματικότητα. Έτσι, βλέπουμε αυξημένη ενεργειακή απορρόφηση και μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου στο μοντέλο, κάτι που είναι επιθυμητό στις περισσότερες εφαρμογές, αλλά δεν εξασφαλίζεται στην πραγματικότητα. Συνεπώς, καταλήγουμε στο ότι το μοντέλο δεν αναπαριστά επαρκώς την πειραματική διαδικασία καθώς παρουσιάζονται σχετικά μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των μεγεθών.

4.4.9 Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 120°

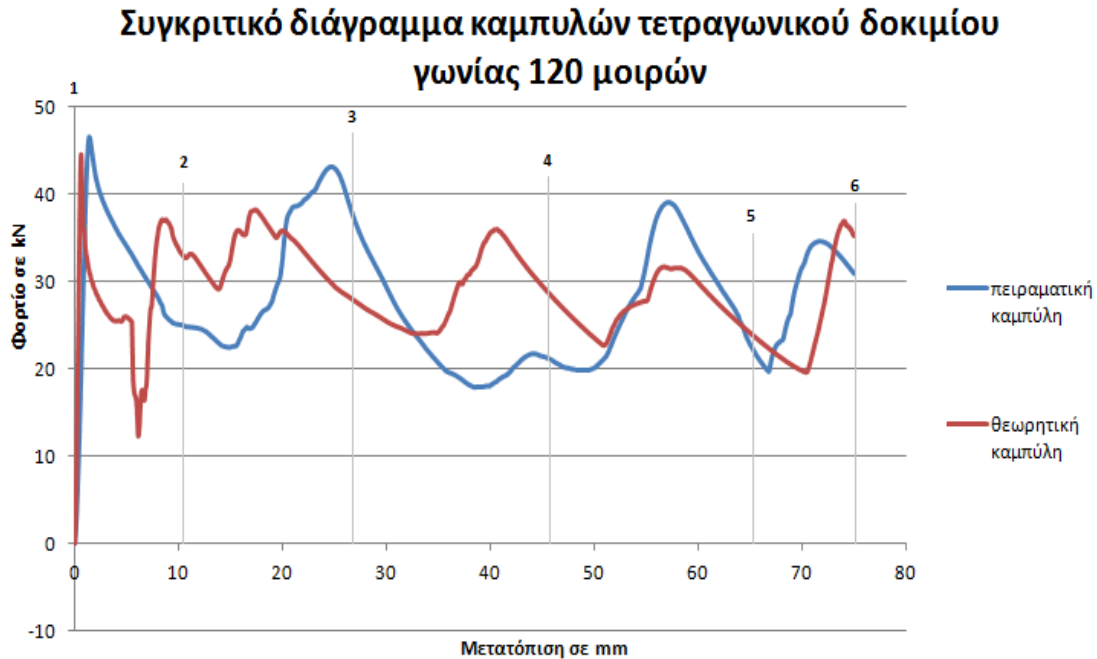
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιασθούν τα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του τετραγωνικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 120° και θα συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα του δοκιμίου 40x40x2-120_1.

Ακολουθεί παρουσίαση των στιγμιότυπων τόσο από τη μοντελοποίηση της κατάρρευσης, όσο και από την πειραματική δοκιμή για το τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 120° .



Εικόνα 4.9 Συγκριτική παρουσίαση 6 στιγμιότυπων από την προσομοίωση της κατάρρευσης και το πείραμα (1^ο στιγμιότυπο → αρχή της κατάρρευσης, 6^ο στιγμιότυπο → πέρας).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα με τη θεωρητική και την πειραματική καμπύλη του τετραγωνικού δοκιμίου με γωνία κορυφής 120° , στο οποίο έχουν σημειωθεί και οι αντίστοιχες θέσεις των παραπάνω στιγμιοτύπων.



Διάγραμμα 4.9 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών για το τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 120° .

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη που αφορούν την κατάρρευση του τετραγωνικού δοκιμίου τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά .

Πίνακας 4.12 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών που προκύπτουν από το πείραμα και την προσομοίωση για το τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 120° .

Δοκίμιο 40x40x2- 120_1	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	28,01495133	46,53632	2,10112135	1,661124428
θεωρητικά	28,77535192	44,5828	2,158151394	1,54933987
Διαφορά (%)	2,71 %	4,19 %	2,71 %	6,73 %

Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα στιγμιότυπα της κατάρρευσης (εικ. 4.10), βλέπουμε ότι το μοντέλο προσομοιάζει με αρκετή ακρίβεια την κατάρρευση του πειραματικού δοκιμίου. Μια σημαντική διαφορά που παρουσιάζεται έχει να κάνει με το γεγονός ότι στο μοντέλο οι λοβοί δεν έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, κάτι που δε συμβαίνει στην πραγματικότητα. Αυτό, εξηγεί το ότι στη θεωρητική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης τα μέγιστα φορτία εμφανίζονται νωρίτερα σε σχέση με την πειραματική καμπύλη. Αυτό συμβαίνει γιατί στο μοντέλο, δεν έχουμε περαιτέρω παραμόρφωση μέχρις ότου έρθουν σε επαφή οι λοβοί, άρα δεν έχουμε και την προβλεπόμενη μείωση του φορτίου. Σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά της κατάρρευσης βλέπουμε ότι οι διαφορές πειραματικών και θεωρητικών τιμών είναι μικρές. Έτσι, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το μοντέλο προσομοιάζει ικανοποιητικά την πειραματική δοκιμή για το τετραγωνικό δοκίμιο των 120°.

4.4.10 Γενικά συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων τα υπολογιστικά μοντέλα που κατασκευάστηκαν στον κώδικα Is –dyna προσομοιάζουν ικανοποιητικά τη συμπεριφορά κατάρρευσης των πειραματικών δοκιμών, ενώ παρατηρείται μικρή απόκλιση μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για τα χαρακτηριστικά μεγέθη.

Επίσης σε ότι αφορά τον τρόπο κατάρρευσης, τα υπολογιστικά μοντέλα σε όλες τις περιπτώσεις, καταρρέουν σχηματίζοντας τον ίδιο τύπο λοβών με αυτούς του πειράματος. Τέλος, οι όποιες διαφοροποιήσεις υπάρχουν, στην πλειονότητα των μοντέλων, παρουσιάζονται εξαιτίας των σχετικά βελτιωμένων χαρακτηριστικών κατάρρευσης τα οποία οφείλονται στις παραδοχές που έχουν γίνει κατά τη μοντελοποίηση που αποτελούν εξιδανίκευση των πραγματικών συνθηκών. Συνεπώς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η μοντελοποίηση είναι επιτυχής, αφού επιτυγχάνεται προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών με σχετικά μικρές αποκλίσεις.

Στην προσπάθεια για περαιτέρω βελτίωση του μοντέλου και προκειμένου να εξασφαλίσουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στην απεικόνιση του τρόπου κατάρρευσης των δοκιμών που παρουσιάζουν έντονη θραύση, προχωρήσαμε στην εισαγωγή προσομοίωσης θραύσης κατά τη μοντελοποίηση η οποία παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

4.5 Προσομοίωση θραύσης στα υπολογιστικά μοντέλα

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα από την υπολογιστική προσομοίωση στον κώδικα Is –dyna όπου εισήχθει και η παράμετρος της θραύσης των δοκιμίων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι η προσομοίωση της θραύσης έγινε ενδεικτικά, για ορισμένα από τα δοκίμια που παρουσιάζουν εντονότερο πρόβλημα στις πειραματικές δοκιμές δηλαδή για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 60° , το τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 60° , και τέλος το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 120° . Η προσομοίωση της θραύσης έγινε με 2 τρόπους, οι οποίοι θα παρουσιασθούν στη συνέχεια μαζί με τα αποτελέσματα για τα δοκίμια.

4.5.1 Προσομοίωση θραύσης με τη μέθοδο εξάλειψης – διαγραφής πεπερασμένων στοιχείων

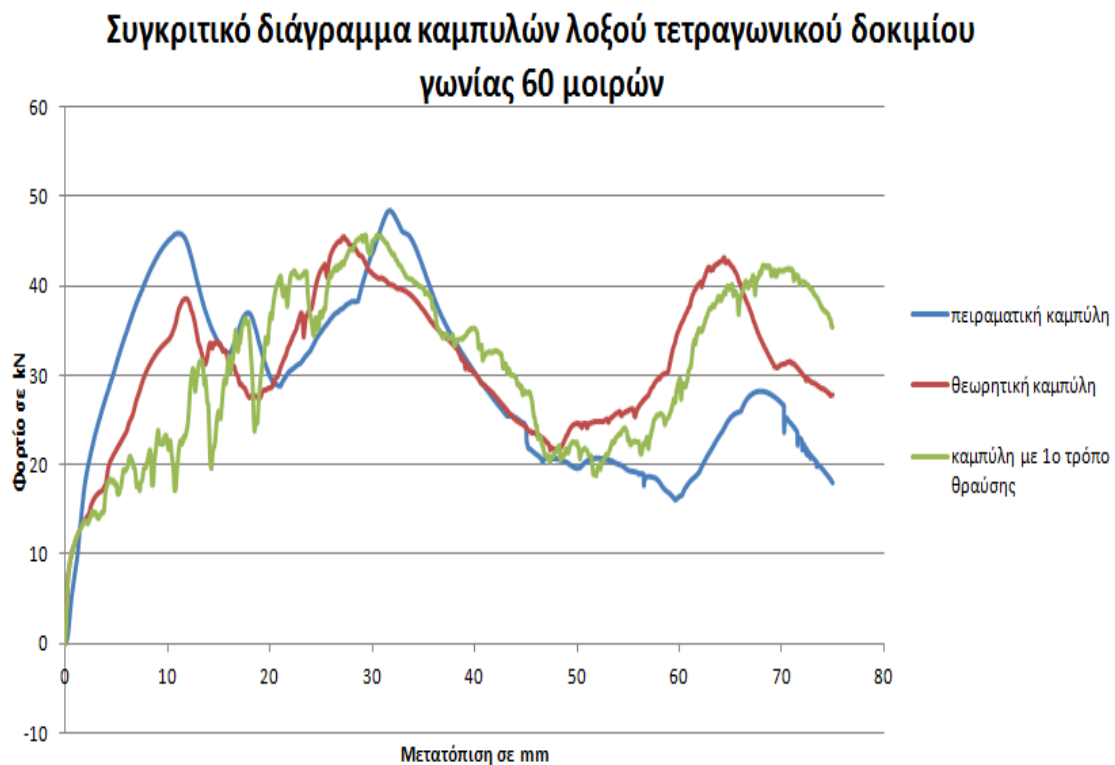
Ο πρώτος τρόπος προσομοίωσης της θραύσης, γίνεται με τη μέθοδο εξάλειψης – διαγραφής των πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα, εισάγοντας ένα κριτήριο πλαστικής παραμόρφωσης μέσα από τη φόρμα του υλικού, επιβάλλουμε την εξάλειψη των πεπερασμένων στοιχείων που ικανοποίησαν το κριτήριο και αστόχησαν. Έτσι, ο κώδικας βρίσκει τα πεπρασμένα στοιχεία που αστοχούν (θραύονται) και διαγράφει τους αντίστοιχους κόμβους από το πλέγμα.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το κριτήριο αστοχίας είναι ημι-εμπειρικό. Έτσι, προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη τιμή του, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για διάφορες τιμές από το 0.5 μέχρι και το 1, εξετάζοντας κάθε φορά το κατά πόσο προσεγγίζει η θεωρητική, την πειραματική καμπύλη. Η βέλτιστη τιμή, η οποία και χρησιμοποιήθηκε είναι το 0.65. Αυτό έγινε πρακτικά εισάγοντας στο αρχείο dyn των μοντέλων στην καρτέλα του υλικού του δοκιμίου (MAT _PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY) την τιμή 0.65 στον παράγοντα FAIL (PLASTIC FAILURE STRAIN).

Στη συνέχεια, ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση της θραύσης με τη μέθοδο εξάλειψης – διαγραφής των πεπερασμένων στοιχείων για τα τρία δοκίμια .

4.5.1.1 Λοξό Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 60° με προσομοίωση θραύσης 1

Ακολουθεί η παρουσίαση διαγράμματος που εμπεριέχει την πειραματική καμπύλη, τη θεωρητική καμπύλη χωρίς προσομοίωση θραύσης και την καμπύλη με τον 1^ο τρόπο προσομοίωσης θραύσης.



Διάγραμμα 4.10 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών με αυτήν του 1^{ου} τρόπου προσομοίωσης θραύσης για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

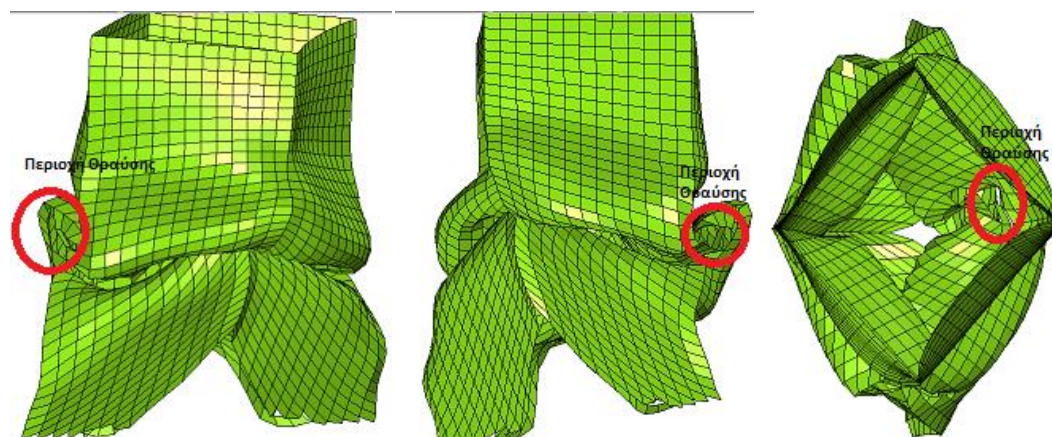
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης για το πείραμα, τη μοντελοποίηση χωρίς θραύση και τη μοντελοποίηση με τον 1^ο τρόπο θραύσης καθώς επίσης και οι διαφορές τους .

Πίνακας 4.13 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών που προκύπτουν από το πείραμα, την προσομοίωση χωρίς θραύση και του 1^{ου} τρόπου προσομοίωσης θραύσης για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

Δοκίμιο 40x40x2- 60_Ioxos_2	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	29,28613114	48,40207	2,196459835	1,652730085
Θεωρητικά χωρίς θραύση	31,24671257	45,4457	2,343503443	1,454415401
Διαφορά (%)	6,69 %	6,11 %	6,69 %	11,99 %
πειραματικά	29,28613114	48,40207	2,196459835	1,652730085
1 ^{ος} τρόπος θραύσης	31,05762184	45,7188	2,329321638	1,472063774
Διαφορά (%)	6,05 %	5,54 %	6,05 %	10,93 %

Συμπεράσματα

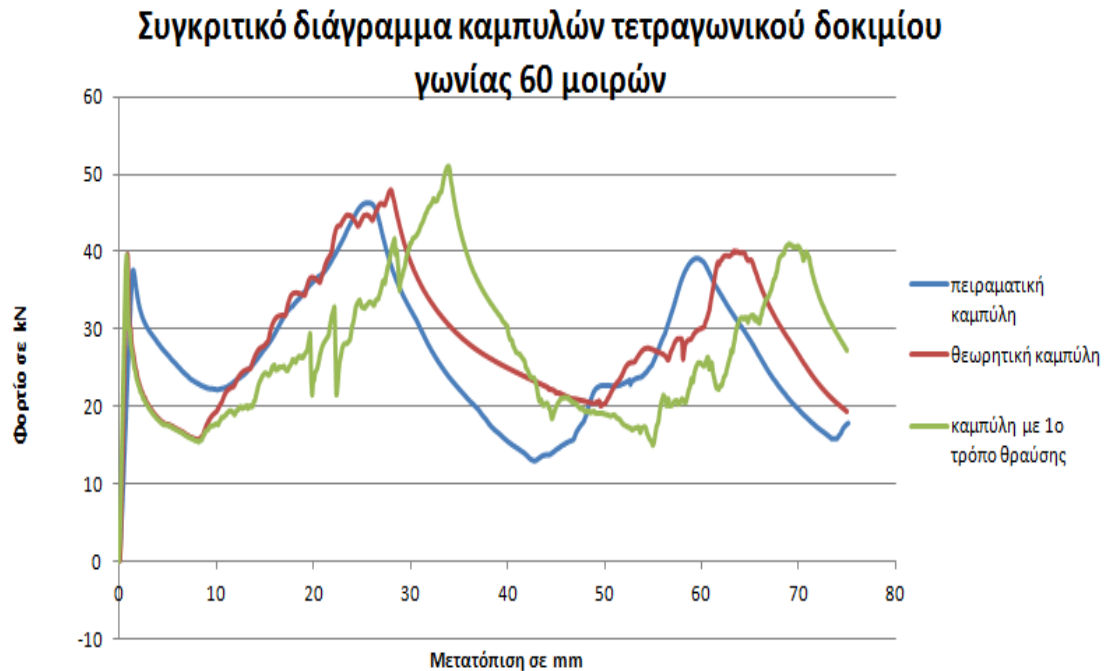
Παρατηρούμε ότι με τη χρήση της 1^{ης} μεθόδου προσομοίωσης αλλάζει σημαντικά η μορφή της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης καθώς μειώνονται σχετικά, τα τοπικά μέγιστα, λόγω θραύσης. Ακόμα, παρατηρούμε ότι η διαφορά μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων με προσομοίωση θραύσης, μειώνεται αισθητά σε σχέση με τα αντίστοιχα θεωρητικά χωρίς προσομοίωση θραύσης. Έτσι επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι η θραύση που παρουσιάζει το πειραματικό δοκίμιο, είναι ένας από τους παράγοντες που συντελούν στη διαφοροποίηση μεταξύ πειράματος και υπολογιστικής προσομοίωσης.



Εικόνα 4.10 Χαρακτηριστικές όψεις μοντέλου με την 1^η μέθοδο προσομοίωσης θραύσης.

4.5.1.2 Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 60° με προσομοίωση θραύσης 1

Ακολουθεί η παρουσίαση διαγράμματος που εμπεριέχει την πειραματική καμπύλη, τη θεωρητική καμπύλη χωρίς προσομοίωση θραύσης και την καμπύλη με τον 1^ο τρόπο προσομοίωσης θραύσης.



Διάγραμμα 4.11 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών με αυτήν του 1^{ου} τρόπου προσομοίωσης θραύσης για το τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

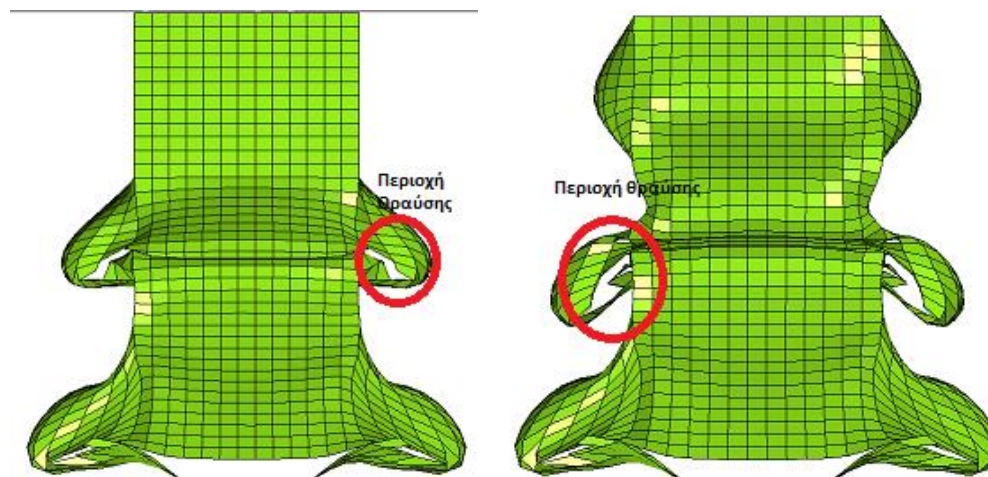
Ακολουθεί πίνακας με τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης.

Πίνακας 4.14 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών που προκύπτουν από το πείραμα, την προσομοίωση χωρίς θραύση και του 1^{ου} τρόπου προσομοίωσης θραύσης για το τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

Δοκίμιο 40x40x2-60_2	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	26,55745737	46,41552	1,991809303	1,747739603
Θεωρητικά χωρίς θραύση	28,6357761	47,9261	2,147683207	1,67364418
Διαφορά (%)	7,83 %	3,25 %	7,83 %	4,24 %
πειραματικά	26,55745737	46,41552	1,991809303	1,747739603
1 ^{ος} τρόπος θραύσης	27,30221278	51,0556	2,047665959	1,870016925
Διαφορά (%)	2,80 %	9,99 %	2,80 %	6,99 %

Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι, με την προσομοίωση της θραύσης η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης αντί να συγκλίνει με την πειραματική, αποκλίνει, ενώ η καμπύλη χωρίς θραύση προσεγγίζει καλύτερα την πειραματική. Αντίθετα, βλέπουμε μείωση της διαφοράς στο μέσο φορτίο, την ενεργειακή απορρόφηση και το δείκτη ομοιομορφίας φορτίου, ενώ αυξήθηκε η διαφορά στο μέγιστο φορτίο σε σύγκριση πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα από τη μοντελοποίηση με θραύση.

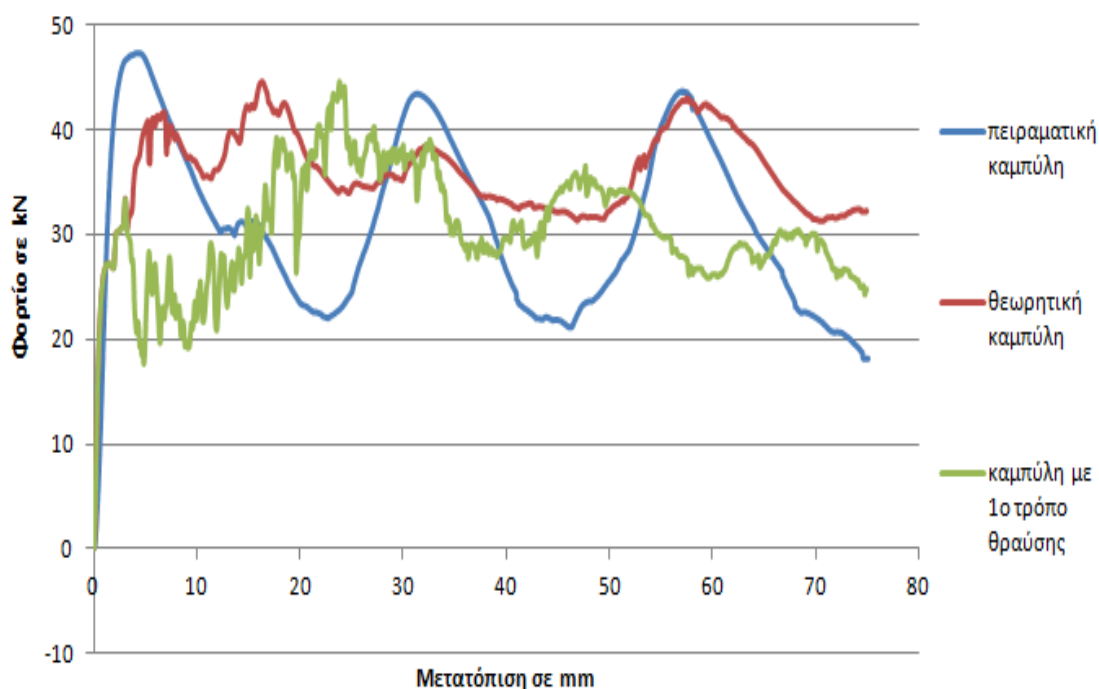


Εικόνα 4.11 Χαρακτηριστικές όψεις μοντέλου με την 1^η μέθοδο προσομοίωσης θραύσης.

4.5.1.3 Λοξό Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 120° με προσομοίωση θραύσης 1

Ακολουθεί η παρουσίαση διαγράμματος που εμπεριέχει την πειραματική καμπύλη, τη θεωρητική καμπύλη χωρίς προσομοίωση θραύσης και την καμπύλη με τον 1^ο τρόπο προσομοίωσης θραύσης .

Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών λοξού τετραγωνικού δοκιμίου γωνίας 120 μοιρών



Διάγραμμα 4.12 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών με αυτήν του 1^{ου} τρόπου προσομοίωσης θραύσης για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 120°.

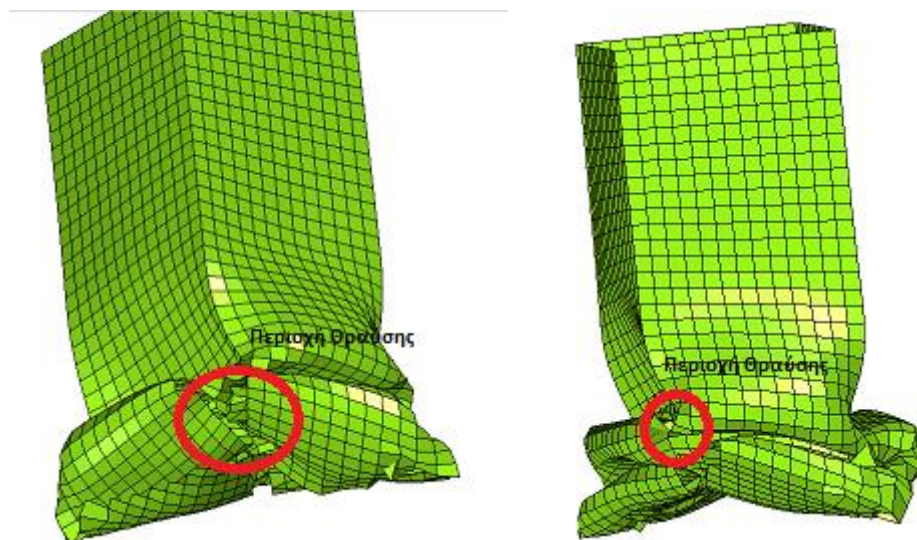
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης για το πείραμα, τη μοντελοποίηση χωρίς θραύση και τη μοντελοποίηση με τον 1^ο τρόπο θραύσης καθώς επίσης και οι διαφορές τους.

Πίνακας 4.15 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών που προκύπτουν από το πείραμα, την προσομοίωση χωρίς θραύση και του 1^{ου} τρόπου προσομοίωσης θραύσης για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 120°.

Δοκίμιο 40x40x2- 120_Ioxos_1	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	30,96742391	47,3551	2,322556793	1,529190808
Θεωρητικά χωρίς θραύση	35,78664904	44,4932	2,683998678	1,243290478
Διαφορά (%)	15,56 %	6,04 %	15,56 %	18,69 %
πειραματικά	30,96742391	47,3551	2,322556793	1,529190808
1 ^{ος} τρόπος θραύσης	30,48364184	44,4772	2,286273138	1,45905139
Διαφορά (%)	1,56 %	6,08 %	1,56 %	4,59 %

Συμπεράσματα

Αν και παρατηρούμε ότι η θεωρητική καμπύλη που εμπεριέχει μοντελοποίηση της θραύσης, δεν έχει την ίδια μορφή με την πειραματική, μειώνει όμως σημαντικά τα μέγιστα της θεωρητικής καμπύλης χωρίς θραύση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δραστική μείωση του θεωρητικά προβλεπόμενου μέσου φορτίου και πλαστικού έργου, ενώ αυξάνει την ανομοιομορφία του φορτίου, άρα και το δείκτη c.f.e.. Συνεπώς, η εισαγωγή μοντελοποίησης για τη θραύση βελτιώνει σημαντικά την αρχική προσομοίωση και καθιστά το υπολογιστικό μοντέλο πιο ακριβές ως προς τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης. Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η θραύση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, τόσο ώστε εάν δε συμπεριληφθεί στη μοντελοποίηση, οδηγούμαστε σε σημαντική απόκλιση από τη συμπεριφορά του δοκιμίου στο πείραμα.



Εικόνα 4.12 Χαρακτηριστικές όψεις μοντέλου με την 1^η μέθοδο προσομοίωσης θραύσης.

4.5.2 Προσομοίωση θραύσης με τη μέθοδο διαίρεσης κόμβων – διαχωρισμός των πεπερασμένων στοιχείων

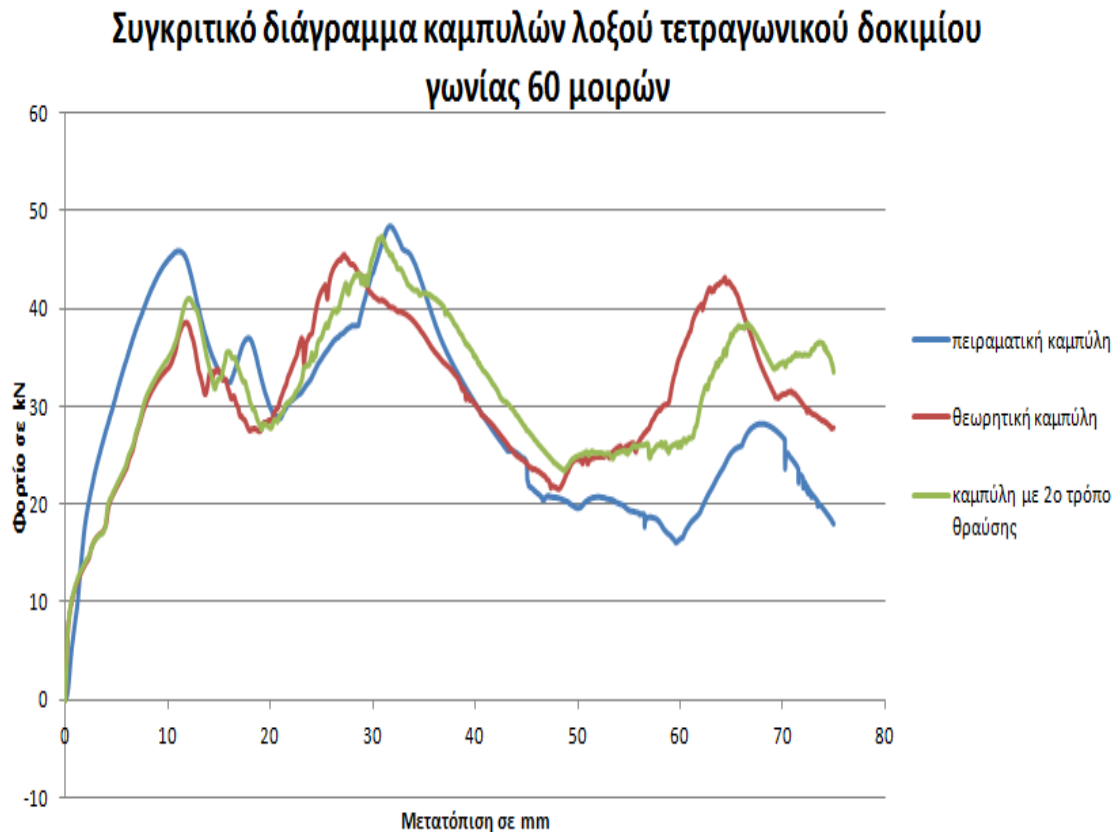
Ο δεύτερος τρόπος προσομοίωσης της θραύσης, γίνεται με τη μέθοδο διαίρεσης κόμβων. Έτσι, θεωρώντας μια προδιαγεγραμμένη τροχιά εμφάνισης θραύσης ορίζουμε μια περιοχή όπου οι κόμβοι, εν δυνάμει θα αποχωριστούν. Συγκεκριμένα για το τετραγωνικό δοκίμιο, του οποίου τη θραύση επιθυμούμε να προσομοιάσουμε, θεωρούμε ότι αρχικά, οι κόμβοι των ακμών είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι, σε μια ακμή του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου (σχήμα δοκιμίου) παρουσιάζεται μια σειρά από διπλούς κόμβους που συμπίπτουν, οι οποίοι προέρχονται από τις δυο αντίστοιχες έδρες του δοκιμίου. Οι αρχικώς άρρηκτα συνδεδεμένοι κόμβοι, μόλις ικανοποιηθεί το κριτήριο πλαστικής παραμόρφωσης που έχει ορισθεί, διαιρούνται με αποτέλεσμα να έχουμε το διαχωρισμό των πεπερασμένων στοιχείων και με αυτόν τον τρόπο την προσομοίωση της θραύσης.

Πρακτικά, η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου έγινε όπως περιγράφεται παρακάτω. Αρχικά, δημιουργήσαμε 8 ομάδες από κόμβους (8 Set Nodes), η καθεμία εκ των οποίων περιέχει τους κόμβους μιας ακμής μια φορά. Έτσι, κάθε ακμή έχει 2 set κόμβων το ένα εκ των οποίων ορίζεται ως master, ενώ το άλλο ως slave. Στη συνέχεια από το μενού που ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες στον κώδικα, χρησιμοποιήσαμε την επιλογή `CONSTRAINED_TIE_BREAK`, μέσω της οποίας ορίσαμε τα set των κόμβων που είναι master και slave καθώς επίσης και το κριτήριο πλαστικής παραμόρφωσης, μέσω της τιμής του `EPPF (PLASTIC STRAIN AT FAILURE)`. Και εδώ, το κριτήριο πλαστικής παραμόρφωσης είναι ημι-εμπειρικό. Για το λόγο αυτό και προκειμένου να καταλήξουμε στη βέλτιστη τιμή του `EPPF` πραγματοποιήσαμε δοκιμές μέχρις ότου να βρούμε την τιμή για την οποία έχουμε την καλύτερη προσομοίωση της καμπύλης του πειράματος. Η βέλτιστη τιμή, η οποία και χρησιμοποιείται στις μοντελοποιήσεις είναι η $EPPF = 0.7$.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση της θραύσης με τη μέθοδο διαίρεσης κόμβων, για τα τρία δοκίμια.

4.5.2.1 Λοξό Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 60° με προσομοίωση θραύσης 2

Ακολουθεί η παρουσίαση διαγράμματος που εμπεριέχει την πειραματική καμπύλη, τη θεωρητική καμπύλη χωρίς προσομοίωση θραύσης και την καμπύλη με τον 2^ο τρόπο προσομοίωσης θραύσης.



Διάγραμμα 4.13 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών με αυτήν του 2^{ου} τρόπου προσομοίωσης θραύσης για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

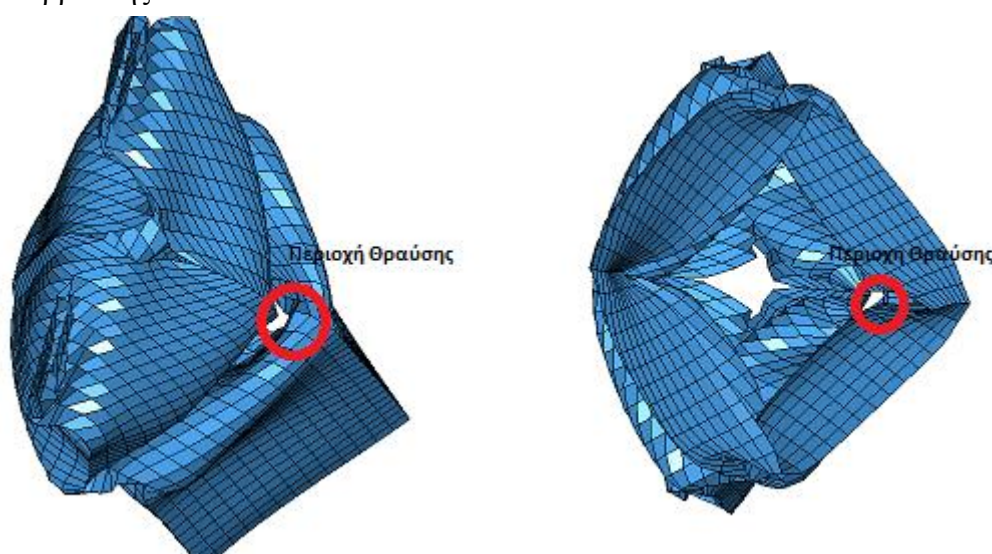
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης για το πείραμα, τη μοντελοποίηση χωρίς θραύση και τη μοντελοποίηση με τον 2^ο τρόπο θραύσης καθώς επίσης και οι διαφορές τους.

Πίνακας 4.16 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών που προκύπτουν από το πείραμα, την προσομοίωση χωρίς θραύση και του 2^{ου} τρόπου προσομοίωσης θραύσης για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

Δοκίμιο 40x40x2- 60_loxos_2	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	29,28613114	48,40207	2,196459835	1,652730085
Θεωρητικά χωρίς θραύση	31,24671257	45,4457	2,343503443	1,454415401
Διαφορά (%)	6,69 %	6,11 %	6,69 %	11,99 %
πειραματικά	29,28613114	48,40207	2,196459835	1,652730085
2 ^{ος} τρόπος θραύσης	31,92435057	47,3076	2,394326293	1,481865697
Διαφορά (%)	9,01 %	2,26 %	9,01 %	10,34 %

Συμπεράσματα

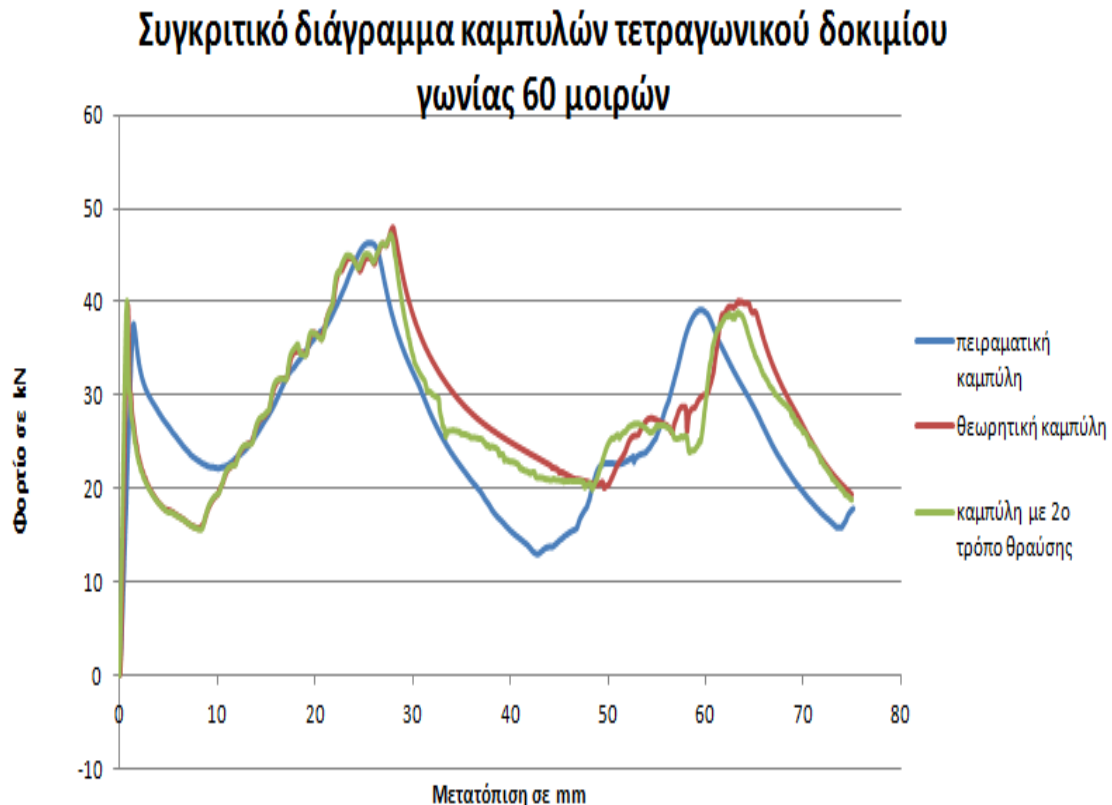
Παρατηρούμε ότι η καμπύλη με το 2^ο τρόπο προσομοίωσης της θραύσης προσεγγίζει την πειραματική καμπύλη σε μεγαλύτερο βαθμό από την απλή μοντελοποίηση χωρίς θραύση. Όμως, η διαφορά στα χαρακτηριστικά μεγέθη αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με την απλή μοντελοποίηση. Η μοναδική παράμετρος που βελτιώθηκε σε σχέση με τη μοντελοποίηση χωρίς θραύση, είναι αυτή του δείκτη ομοιομορφίας φορτίου, αφού με την εισαγωγή θραύσης διαταράσσεται η σχετικά ομοιόμορφη κατανομή φορτίου που παρουσιάζει η εξιδανικευμένη απλή μοντελοποίηση. Συνεπώς, η εισαγωγή της θραύσης δε βελτίωσε τα αποτελέσματα του μοντέλου για τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης.



Εικόνα 4.13 Χαρακτηριστικές όψεις μοντέλου με την 2^η μέθοδο προσομοίωσης θραύσης.

4.5.2.2 Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 60° με προσομοίωση θραύσης 2

Ακολουθεί η παρουσίαση διαγράμματος που εμπεριέχει την πειραματική καμπύλη, τη θεωρητική καμπύλη χωρίς προσομοίωση θραύσης και την καμπύλη με τον 2^ο τρόπο προσομοίωσης θραύσης.



Διάγραμμα 4.14 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών με αυτήν του 2^{ου} τρόπου προσομοίωσης θραύσης για το τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

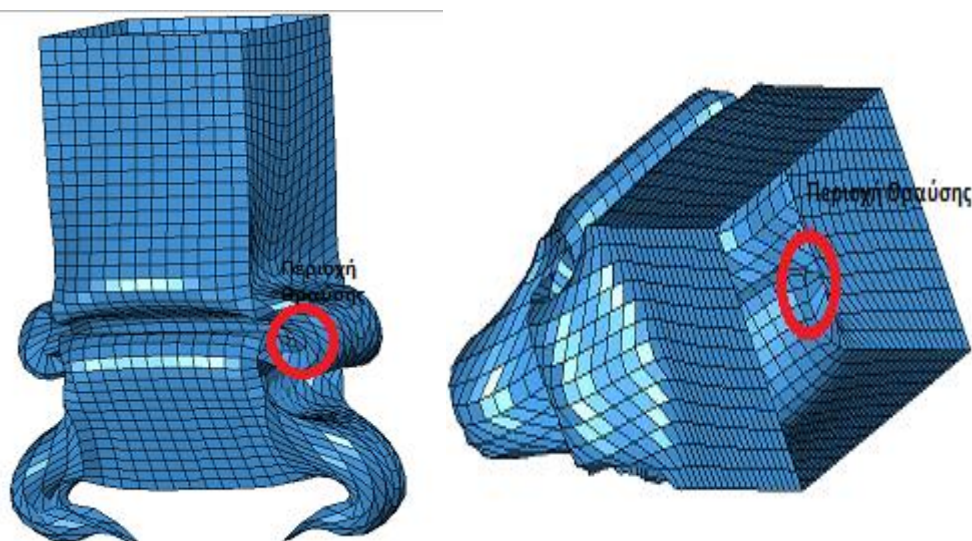
Ακολουθεί παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών της κατάρρευσης για το πείραμα, τη μοντελοποίηση χωρίς θραύση και τη μοντελοποίηση με τον 2^ο τρόπο θραύσης καθώς επίσης και οι διαφορές τους.

Πίνακας 4.17 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών που προκύπτουν από το πείραμα, την προσομοίωση χωρίς θραύση και του 2^{ου} τρόπου προσομοίωσης θραύσης για το τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 60°.

Δοκίμιο 40x40x2-60_2	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	26,55745737	46,41552	1,991809303	1,747739603
Θεωρητικά χωρίς θραύση	28,6357761	47,9261	2,147683207	1,67364418
Διαφορά (%)	7,83 %	3,25 %	7,83 %	4,24 %
πειραματικά	26,55745737	46,41552	1,991809303	1,747739603
2 ^{ος} τρόπος θραύσης	27,8167963	47,1974	2,086259722	1,69672307
Διαφορά (%)	4,74 %	1,68 %	4,74 %	2,92 %

Συμπεράσματα

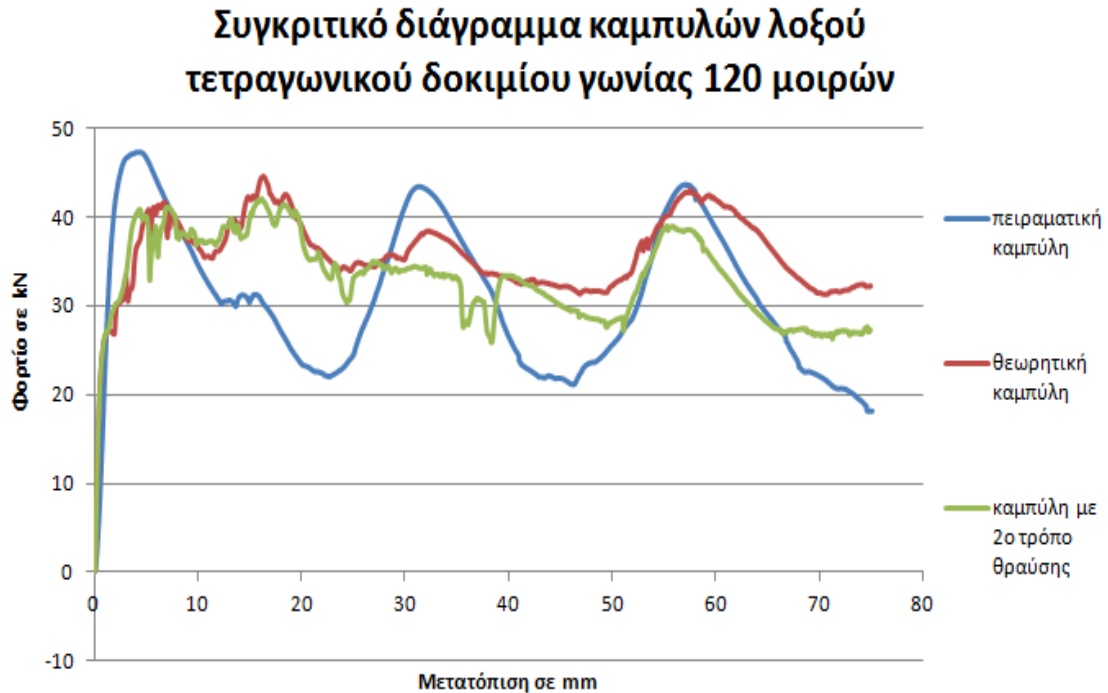
Παρατηρούμε ότι, η εισαγωγή του 2^{ου} τρόπου θραύσης βελτιώνει τη μοντελοποίηση, καθώς τόσο η καμπύλη όσο και τα χαρακτηριστικά της κατάρρευσης προσεγγίζουν καλύτερα τα αντίστοιχα πειραματικά. Έτσι βλέπουμε ότι το μοντέλο με θραύση μειώνει τη διαφορά μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων σε σχέση με το απλό μοντέλο. Αυτό συμβαίνει διότι εισάγει την ατέλεια της θραύσης που μειώνει τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προκύπτουν από τις εξιδανικευμένες συνθήκες του απλού μοντέλου, χωρίς θραύση.



Εικόνα 4.14 Χαρακτηριστικές όψεις μοντέλου με την 2^η μέθοδο προσομοίωσης θραύσης.

4.5.2.3 Λοξό Τετραγωνικό Δοκίμιο με γωνία κορυφής 120° με προσομοίωση θραύσης 2

Ακολουθεί η παρουσίαση διαγράμματος που εμπεριέχει την πειραματική καμπύλη, τη θεωρητική καμπύλη χωρίς προσομοίωση θραύσης και την καμπύλη με τον 2^ο τρόπο προσομοίωσης θραύσης.



Διάγραμμα 4.15 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών με αυτήν του 2^{ου} τρόπου προσομοίωσης θραύσης για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 120°.

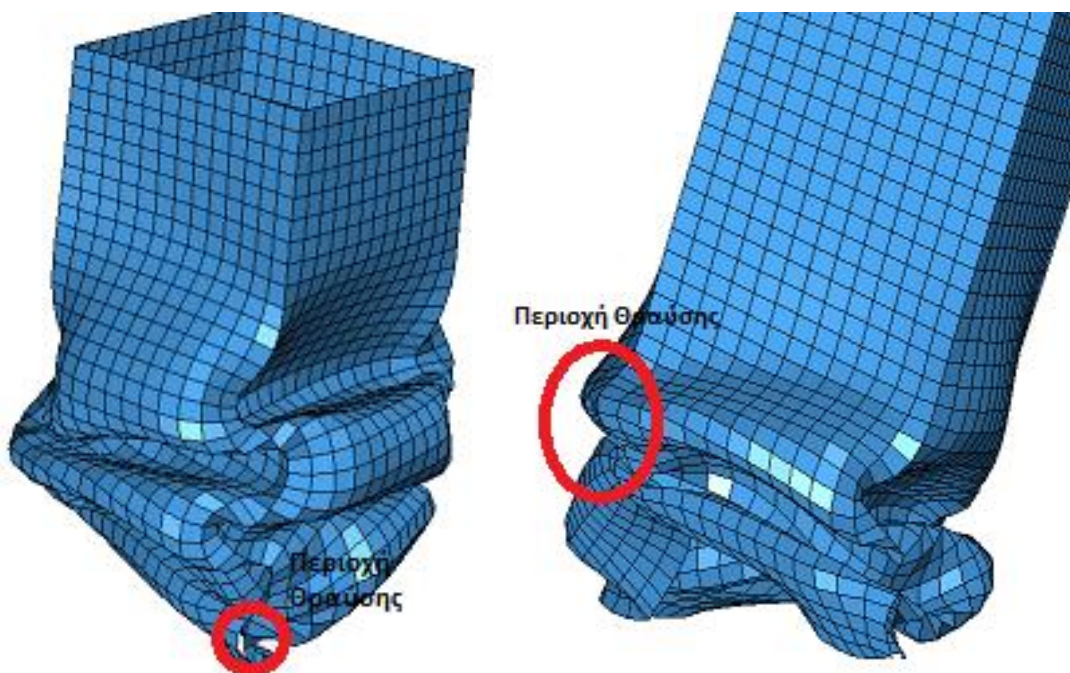
Ακολουθεί πίνακας με τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης.

Πίνακας 4.18 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών που προκύπτουν από το πείραμα, την προσομοίωση χωρίς θραύση και του 2^{ου} τρόπου προσομοίωσης θραύσης για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο, με γωνία κορυφής 120°.

Δοκίμιο 40x40x2- 120_Ιοχος_1	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	30,96742391	47,3551	2,322556793	1,529190808
Θεωρητικά χωρίς θραύση	35,78664904	44,4932	2,683998678	1,243290478
Διαφορά (%)	15,56 %	6,04 %	15,56 %	18,69 %
πειραματικά	30,96742391	47,3551	2,322556793	1,529190808
2 ^{ος} τρόπος θραύσης	33,06280656	42,0703	2,479710492	1,272435839
Διαφορά (%)	6,77 %	11,16 %	6,77 %	16,79 %

Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι, η μορφή της καμπύλης φορτίου – παραμόρφωσης του μοντέλου με θραύση δεν προσεγγίζει ικανοποιητικά τη θεωρητική καμπύλη. Όμως βλέπουμε ότι η προσομοίωση της θραύσης βελτίωσε την προσέγγιση του μοντέλου στα χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης που προκύπτουν από το πείραμα καθώς μείωσε σημαντικά τις διαφορές ιδιαίτερα στο μέσο φορτίο και την ενεργειακή απορρόφηση μεταξύ μοντέλου και πειράματος. Αυτό συμβαίνει διότι η εισαγωγή της θραύσης, εισάγει ατέλειες στις εξιδανικευμένες συνθήκες του αρχικού μοντέλου με αποτέλεσμα να μειώνει τα αρχικώς προβλεπόμενα χαρακτηριστικά μεγέθη. Συνεπώς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι με την εισαγωγή θραύσης βελτιώθηκε το υπολογιστικό μοντέλο καθώς μειώθηκε η διαφορά μεταξύ των χαρακτηριστικών μεγεθών πειράματος και προσομοίωσης.



Εικόνα 4.15 Χαρακτηριστικές όψεις μοντέλου με την 2^η μέθοδο προσομοίωσης θραύσης.

4.5.3 Σύγκριση των μεθόδων προσομοίωσης θραύσης

Στην ενότητα αυτή, θα συγκριθούν οι δυο μέθοδοι με τις οποίες προσομοιάσαμε τη θραύση των δοκιμίων και θα διαπιστωθεί ποια προσεγγίζει καλύτερα την πειραματική συμπεριφορά για κάθε δοκίμιο.

4.5.3.1 Σύγκριση των μεθόδων θραύσης για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 60°

Ακολουθεί διάγραμμα που παρουσιάζει συγκριτικά της καμπύλες των δυο μεθόδων θραύσης, με την αντίστοιχη πειραματική του δοκιμίου 40x40x2-60_loxos_2 .



Διάγραμμα 4.16 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών των μοντέλων με θραύση με την πειραματική καμπύλη του δοκιμίου 40x40x2-60_loxos_2.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης που προκύπτουν από τα δυο μοντέλα με θραύση, σε σχέση με τα αντίστοιχα πειραματικά. Η Διαφορά 1, αφορά τη διαφορά των αποτελεσμάτων του μοντέλου του 1^{ου} τρόπου θραύσης με το πείραμα, ενώ η Διαφορά 2 αφορά τη διαφορά του 2^{ου} τρόπου με το πείραμα.

Πίνακας 4.19 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών κατάρρευσης για τα δυο μοντέλα με θραύση και το πειραματικό δοκίμιο.

Δοκίμιο 40x40x2- 60_1oxos_2	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	29,28613114	48,40207	2,196459835	1,652730085
Θραύση 1	31,05762184	45,7188	2,329321638	1,472063774
Θραύση 2	31,92435057	47,3076	2,394326293	1,481865697
Διαφορά 1	6,05 %	5,54 %	6,05 %	10,93 %
Διαφορά 2	9,01 %	2,26 %	9,01 %	10,34 %

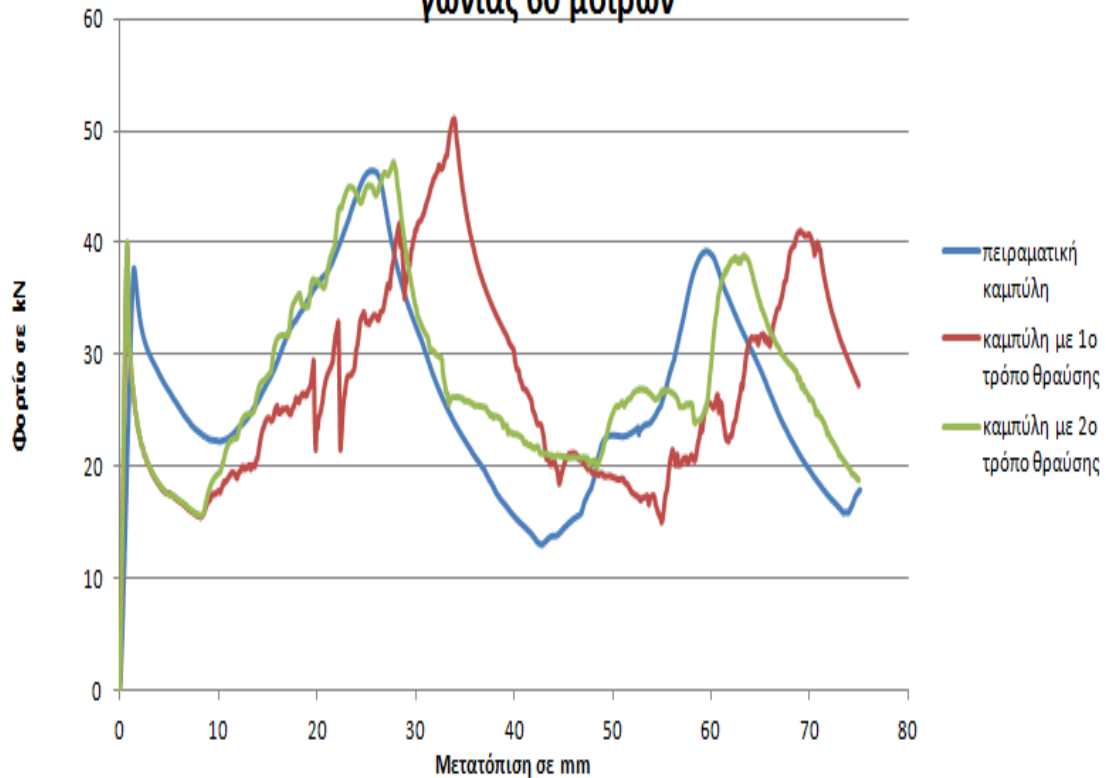
Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι, στα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης η 1^η μέθοδος παρουσιάζει μεγαλύτερη προσέγγιση στο μέσο φορτίο και την ενεργειακή απορρόφηση. Όμως, στο μέγιστο φορτίο και το δείκτη c.f.e., η 2^η μέθοδος προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα. Ακόμα, παρατηρούμε ότι πιο κοντά στη μορφή της πειραματικής καμπύλης βρίσκεται η καμπύλη της 2^{ης} μεθόδου. Επειδή η 2^η μέθοδος συγκεντρώνει περισσότερα χαρακτηριστικά που προσεγγίζουν τα πειραματικά, ενώ και το μέσο φορτίο και πλαστικό έργο, παρουσιάζουν αποδεκτή απόκλιση, επιλέγουμε ως βέλτιστη μέθοδο θραύσης την 2^η ως προς την προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

4.5.3.2 Σύγκριση των μεθόδων θραύσης για το τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 60°

Αρχικά παρατίθεται διάγραμμα που παρουσιάζει συγκριτικά τις καμπύλες των δυο μεθόδων θραύσης με την αντίστοιχη πειραματική του δοκιμίου 40x40x2-60_2, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί πίνακας όπου παρουσιάζονται συγκριτικά τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης που προκύπτουν από τα 2 μοντέλα με θραύση σε σχέση με τα αντίστοιχα πειραματικά. Η Διαφορά 1, αφορά τη διαφορά των αποτελεσμάτων του μοντέλου του 1^{ου} τρόπου θραύσης με το πείραμα, ενώ η Διαφορά 2 αφορά τη διαφορά του 2^{ου} τρόπου με το πείραμα.

Σύγκριση μεθόδων θραύσης για το τετραγωνικό δοκίμιο γωνίας 60 μοιρών



Διάγραμμα 4.17 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών των μοντέλων με θραύση με την πειραματική καμπύλη του δοκιμίου 40x40x2-60_2.

Πίνακας 4.20 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών κατάρρευσης για τα δυο μοντέλα με θραύση και το πειραματικό δοκίμιο.

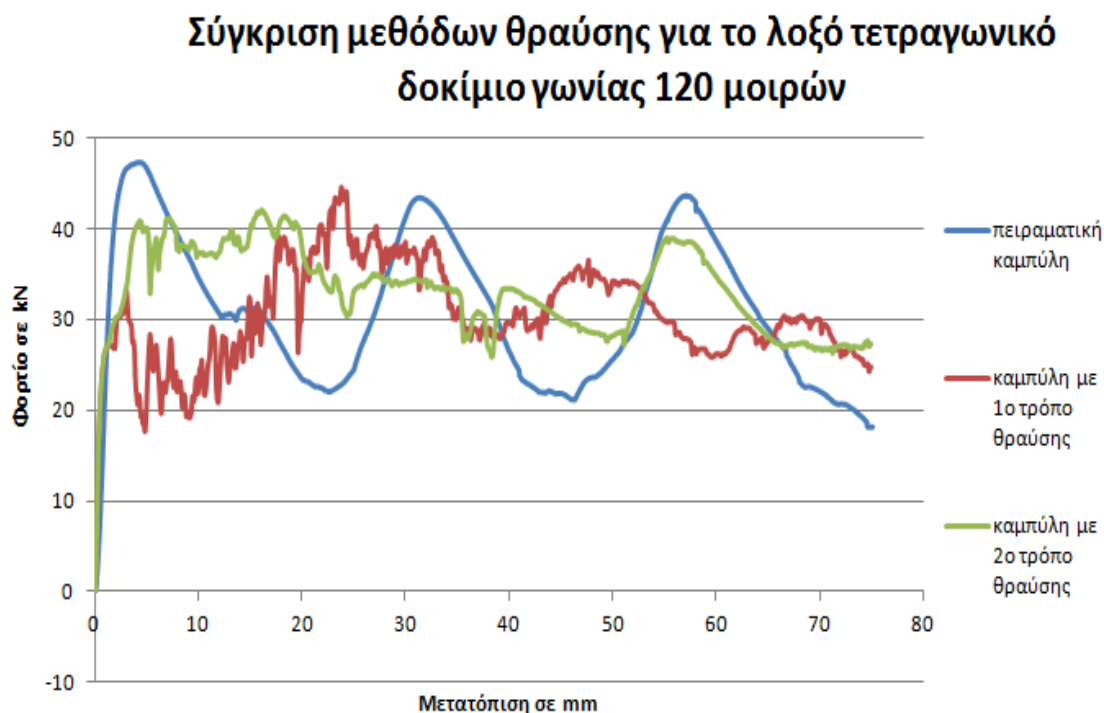
Δοκίμιο 40x40x2-60_2	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	26,55745737	46,41552	1,991809303	1,747739603
Θραύση 1	27,30221278	51,0556	2,047665959	1,870016925
Θραύση 2	27,8167963	47,1974	2,086259722	1,69672307
Διαφορά 1	2,80 %	9,99 %	2,80 %	6,99 %
Διαφορά 2	4,74 %	1,68 %	4,74 %	2,92 %

Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι και στις δυο μεθόδους οι διαφορές των μοντέλων από το πείραμα για τα χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης είναι πολύ μικρές. Όμως, σε ότι αφορά την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, η 2^η μέθοδος θραύσης έχει μορφή που προσεγγίζει καλύτερα την πειραματική. Συνεπώς η 2^η μέθοδος συνδυάζει καλά χαρακτηριστικά μεγέθη και μορφή καμπύλης, για αυτό αποτελεί τη βέλτιστη προσομοίωση της συμπεριφοράς κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου.

4.5.3.2 Σύγκριση των μεθόδων θραύσης για το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο με γωνία κορυφής 120°

Ακολουθεί διάγραμμα που παρουσιάζει συγκριτικά της καμπύλες των δυο μεθόδων θραύσης με την αντίστοιχη πειραματική του δοκιμίου 40x40x2-120_1oxos_1.



Διάγραμμα 4.18 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών των μοντέλων με θραύση με την πειραματική καμπύλη του δοκιμίου 40x40x2-120_1oxos_1.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκριτικά τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης που προκύπτουν από τα δυο μοντέλα με θραύση σε σχέση με τα αντίστοιχα πειραματικά. Η Διαφορά 1, αφορά τη διαφορά των αποτελεσμάτων του μοντέλου του 1^{ου} τρόπου θραύσης με το πείραμα, ενώ η Διαφορά 2 αφορά τη διαφορά του 2^{ου} τρόπου με το πείραμα.

Πίνακας 4.21 Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών κατάρρευσης για τα δυο μοντέλα με θραύση και το πειραματικό δοκίμιο.

Δοκίμιο 40x40x2- 120_Ιοχος_1	Μέσο φορτίο (kN)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Πλαστικό έργο (kJ)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου c.f.e.
πειραματικά	30,96742391	47,3551	2,322556793	1,529190808
Θραύση 1	30,48364184	44,4772	2,286273138	1,45905139
Θραύση 2	33,06280656	42,0703	2,479710492	1,272435839
Διαφορά 1	1,56 %	6,08 %	1,56 %	4,59 %
Διαφορά 2	6,77 %	11,16 %	6,77 %	16,79 %

Συμπεράσματα

Αρχικά, παρατηρούμε ότι οι μορφές των καμπυλών και για της δυο μεθόδους προσομοίωσης θραύσης, αποκλίνουν από τη μορφή της πειραματικής καμπύλης. Συνεπώς, κριτήριο για την επιλογή της βέλτιστης προσομοίωσης αποτελούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης. Έτσι, βλέπουμε ότι ο 1^{ος} τρόπος θραύσης αποτελεί καλύτερη προσέγγιση της συμπεριφοράς κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου, μιας και η διαφορά που παρουσιάζεται μεταξύ των πειραματικών μεγεθών και των προβλεπόμενων χαρακτηριστικών από το μοντέλο είναι η μικρότερη δυνατή σε σχέση με τις 2 μεθόδους θραύσης .

4.5.4 Γενικά συμπεράσματα ως προς την προσομοίωση θραύσης στη μοντελοποίηση

Αρχικά, πρέπει να επισημάνουμε ότι η εισαγωγή προσομοίωσης θραύσης στα μοντέλα, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, βελτίωσε τα προβλεπόμενα χαρακτηριστικά της κατάρρευσης, αφού μείωσε σημαντικά τη διαφορά τους με τα αντίστοιχα πειραματικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θραύση διόρθωσε τις αρχικά προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου που εμπειρείχε εξιδανικευμένες συνθήκες και παρουσίαζε βελτιωμένα τα χαρακτηριστικά της κατάρρευσης σε σχέση με την πραγματικότητα. Φυσικά, δεν επιτυγχάνεται απόλυτη σύγκλιση και αυτό φαίνεται κυρίως στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, καθώς δεν εξαλείφονται οι υπόλοιπες συνθήκες του μοντέλου που απέχουν από την πραγματικότητα και αφορούν το υλικό και άλλες παραμέτρους, που παρουσιάζουν εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά στο πείραμα.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι από τη σύγκριση μεταξύ των μεθόδων προσομοίωσης της θραύσης προέκυψε ότι, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η μέθοδος διαίρεσης των κόμβων και διαχωρισμού των πεπερασμένων στοιχείων, εμφανίζει τη βέλτιστη συμπεριφορά καθώς προσομοιάζει με αρκετή ακρίβεια τόσο την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης όσο και τα χαρακτηριστικά της κατάρρευσης, μειώνοντας τη διαφορά του αρχικού μοντέλου από την πειραματική δοκιμή. Αντίθετα, η προσομοίωση θραύσης με τη μέθοδο εξάλειψης – διαγραφής πεπερασμένων στοιχείων, μπορεί να εμφάνιζε καλύτερα τα βασικά χαρακτηριστικά της κατάρρευσης (μέσο φορτίο και ενεργειακή απορρόφηση), υστερούσε όμως σημαντικά στην προβλεπόμενη καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, καθώς σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις απέκλινε σημαντικά από την αντίστοιχη πειραματική, ενώ μάλιστα πολλές φορές αλλοίωνε σημαντικά τη μορφή της καμπύλης του μοντέλου χωρίς θραύση, που πλησίαζε ικανοποιητικά την πειραματική καμπύλη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Γενικά Συμπεράσματα

5.1 Συμπεράσματα από τις πειραματικές δοκιμές

Αρχικά, από την παράθεση και σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων για δοκίμια που έχουν ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά, διαπιστώθηκε ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων, εξασφαλίζεται η αναγκαία επαναληψιμότητα, καθώς τα όμοια δοκίμια παρουσιάζουν ίδια συμπεριφορά κατάρρευσης. Οι όποιες μικροδιαφορές υπήρξαν, βρίσκονται εντός φυσιολογικών πλαισίων και δικαιολογούνται από το γεγονός ότι δε μπορεί να επιτευχθεί απόλυτη ομοιότητα, τόσο στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (γωνία κορυφής, διατομή, μήκος δοκιμίου) όσο και στα χαρακτηριστικά του υλικού. Συνεπώς, τα συμπεράσματα που προέκυψαν για τον τρόπο κατάρρευσης των ομοίων δοκιμίων μπορούν να γενικευθούν και να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύουν τη συγκεκριμένη κατηγορία με τα ίδια χαρακτηριστικά (γωνία κορυφής και διατομή).

Σε ότι αφορά τον τρόπο κατάρρευσης των δοκιμίων, σε όλες τις περιπτώσεις όπου είχαμε διαμόρφωση άκρου, παρουσιάζονταν κατάρρευση με το σχηματισμό μη εκτατών λοβών (diamond mode). Έτσι οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι ο μηχανισμός triggering, δύναται να επηρεάσει τον τρόπο κατάρρευσης, καθώς ιδίως στα κυλινδρικά δοκίμια, όπου στις συνήθεις περιπτώσεις χαρακτηρίζονται από αξονοσυμμετρική μορφή κατάρρευσης με εκτατούς λοβούς (concertina mode), με τη διαμόρφωση άκρου καταρρέουν σχηματίζοντας μη εκτατούς λοβούς.

Κατόπιν συγκρίσεως, μεταξύ των δοκιμίων με την ίδια γωνία κορυφής, αλλά με διαφορετική διατομή, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το κυλινδρικό δοκίμιο παρουσιάζει τη βέλτιστη συμπεριφορά κατάρρευσης αφού και για τις τρεις περιπτώσεις γωνιών, το κυλινδρικό δοκίμιο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ενεργειακή απορρόφηση και στην πλειονότητα των περιπτώσεων και την καλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου. Τέλος, σε ότι αφορά τα τετραγωνικά δοκίμια, το λοξό τετραγωνικό δοκίμιο παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά κατάρρευσης, αφού έχει τη μεγαλύτερη ενεργειακή απορρόφηση και την καλύτερη κατανομή φορτίου από τα δυο. Συνεπώς, επιβεβαιώνεται η διαπίστωση από τη βιβλιογραφία ότι η διατομή του δοκιμίου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στα χαρακτηριστικά της κατάρρευσης.

Σε σύγκριση των δοκιμίων με την ίδια διατομή, αλλά διαφορετική γωνία κορυφής, προέκυψε ότι η βέλτιστη συμπεριφορά κατάρρευσης παρουσιάζεται στα δοκίμια των 90° καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις παρουσιάζεται μεγαλύτερη (ή παραπλήσια με τη μεγαλύτερη) ενεργειακή απορρόφηση, ενώ εξασφαλίζεται και μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου εμφανίζοντας το χαμηλότερο δείκτη c.f.e..

Προχωρώντας σε γενικά συμπεράσματα ως προς τη συσχέτιση της γωνίας κορυφής με τα χαρακτηριστικά της κατάρρευσης, διαπιστώνουμε ότι η γωνία κορυφής επηρεάζει σημαντικά τη θέση εμφάνισης του ολικού μεγίστου, αφού όσο μειώνεται η γωνία τόσο καθυστερεί η εμφάνιση του μεγίστου φορτίου. Ακόμα, σημαντική μείωση της γωνίας κορυφής οδηγεί σε πιο ανομοιόμορφη κατανομή του φορτίου, ενώ αυξάνει το μέγιστο φορτίο. Τέλος, δε μπορούσε να διαπιστωθεί συσχέτιση μεταξύ της γωνίας κορυφής και της ενεργειακής απορρόφησης καθώς οι διαφορές είναι μικρές και δεν ακολουθείται ένα μοτίβο που να επαναλαμβάνεται για όλες τις περιπτώσεις.

Έπειτα από τη σύγκριση των δοκιμίων με διαμόρφωση άκρου με τα αντίστοιχα που δεν είχαν, (προκειμένου να ερευνηθεί η επίδραση του μηχανισμού triggering) διαπιστώθηκε ότι τα δοκίμια με διαμόρφωση άκρου παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά κατάρρευσης σε σύγκριση με αυτά που έχουν επίπεδα άκρα. Έτσι εφαρμόζοντας το μηχανισμό triggering που επιλέχθηκε, επιτυγχάνεται καλύτερη ενεργειακή απορρόφηση, μείωση του αρχικού μεγίστου φορτίου που συνεπάγεται και ομαλότερη παραλαβή φορτίων σε περίπτωση σύγκρουσης, ενώ εξασφαλίζεται μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου κατά την εξέλιξη της φόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι το δοκίμιο καταρρέει ομαλά, παραλαμβάνοντας καθόλη τη διάρκεια της κατάρρευσης την ενέργεια που δύναται να απορροφήσει. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο μηχανισμό triggering επιτυγχάνουμε τη βελτίωση των βασικών χαρακτηριστικών που μας ενδιαφέρουν στο crashworthiness, δηλαδή την ενεργειακή απορρόφηση και την ομοιομορφία στην παραλαβή του φορτίου.

Τέλος, επιχειρώντας σύγκριση μεταξύ των μηχανισμών triggering που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία [2], όπου μπορεί να υπάρξει συσχέτιση των αποτελεσμάτων, παρατηρείται ότι και με το μηχανισμό triggering της παρούσας εργασίας, επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι τόσο η απόκριση φορτίου – μετατόπισης όσο και η διαδικασία σχηματισμού λοβών επηρεάζονται από τους μηχανισμούς triggering. Ακόμα επιβεβαιώνεται ότι, ο μηχανισμός triggering μπορεί να ελέγξει σημαντικά το φορτίο έναρξης σχηματισμού λοβών.

Όμως, υπάρχει διαφοροποίηση σε ότι αφορά το μέσο φορτίο, καθώς στην παρούσα εργασία ο μηχανισμός triggering επηρεάζει σημαντικά το μέσο φορτίο, αφού το αυξάνει, σε αντίθεση με την παραπάνω μελέτη [2] όπου διαπιστώνεται ότι η επίδραση των άλλων μηχανισμών triggering στο μέσο φορτίο κρούσης είναι σχετικά μικρή.

5.2 Συμπεράσματα από την υπολογιστική προσομοίωση

Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα υπολογιστικά μοντέλα που κατασκευάστηκαν στον κώδικα Is -dyna προσομοιάζουν ικανοποιητικά τη συμπεριφορά κατάρρευσης των πειραματικών δοκιμίων, ενώ ακόμα παρατηρείται μικρή απόκλιση μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για τα χαρακτηριστικά μεγέθη. Επίσης, σε ότι αφορά τον τρόπο κατάρρευσης, τα υπολογιστικά μοντέλα σε όλες τις περιπτώσεις, καταρρέουν σχηματίζοντας ίδιο τύπο λοβών με αυτόν του πειράματος.

Τώρα, οι όποιες διαφοροποιήσεις υπάρχουν, στην πλειοψηφία των μοντέλων, παρουσιάζονται εξαιτίας των σχετικά βελτιωμένων χαρακτηριστικών κατάρρευσης, τα οποία οφείλονται στις παραδοχές που έχουν γίνει κατά τη μοντελοποίηση, που αποτελούν εξιδανίκευση των πραγματικών συνθηκών. Σημειωτέον ότι, στα μοντέλα δεν εμπεριέχεται προσομοίωση θραύσης, η οποία είναι αρκετά έντονη σε ορισμένα πειραματικά δοκίμια. Συνεπώς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η μοντελοποίηση είναι επιτυχής, αφού επιτυγχάνεται προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών με σχετικά μικρές αποκλίσεις.

Παρόλα αυτά, θέλοντας να βελτιώσουμε τα υπολογιστικά μοντέλα των πειραματικών δοκιμίων που παρουσιάζουν εντονότερη θραύση, προχωρήσαμε στην προσομοίωσή της κατά τη μοντελοποίηση. Η εισαγωγή προσομοίωσης θραύσης στα μοντέλα, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, βελτίωσε τα προβλεπόμενα χαρακτηριστικά της κατάρρευσης, αφού μείωσε σημαντικά τη διαφορά τους με τα αντίστοιχα πειραματικά. Αυτό συνέβη γιατί η θραύση, διόρθωσε τις αρχικά προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου που εμπεριείχε εξιδανικευμένες συνθήκες και παρουσίαζε βελτιωμένα τα χαρακτηριστικά της κατάρρευσης σε σχέση με την πραγματικότητα. Βέβαια, αυτό δεν οδήγησε στην απόλυτη σύγκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων, καθώς η θραύση είναι μια μόνο από τις ατέλειες που παρουσιάζουν τα δοκίμια και δεν υπάρχουν στο εξιδανικευμένο μοντέλο.

Τέλος, από τη σύγκριση των δυο μεθόδων θραύσης που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση, προέκυψε ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων η μέθοδος διαίρεσης των κόμβων και διαχωρισμού των πεπερασμένων στοιχείων, εμφανίζει τη βέλτιστη συμπεριφορά καθώς προσομοιάζει με αρκετή ακρίβεια τόσο την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης όσο και τα χαρακτηριστικά της κατάρρευσης, μειώνοντας τη διαφορά του αρχικού μοντέλου από την πειραματική δοκιμή. Αντίθετα, η προσομοίωση θραύσης με τη μέθοδο εξάλειψης – διαγραφής πεπερασμένων στοιχείων, μπορεί να εμφανίζει καλύτερα τα βασικά χαρακτηριστικά της κατάρρευσης (μέσο φορτίο και ενεργειακή απορρόφηση), υστερούσε όμως σημαντικά στην προβλεπόμενη καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, καθώς σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις απέκλινε σημαντικά από την αντίστοιχη πειραματική, ενώ μάλιστα πολλές φορές αλλοίωνε σημαντικά τη μορφή της καμπύλης του μοντέλου χωρίς θραύση που πλησίαζε ικανοποιητικά την πειραματική καμπύλη.

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Όπως παρατηρήθηκε, στη βιβλιογραφία, η πλειονότητα των ερευνών στους μηχανισμούς triggering αφορά κυρίως σύνθετα υλικά. Συνεπώς, αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον η εφαρμογή του μηχανισμού triggering που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία, να μελετηθεί για σύνθετα υλικά και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να συγκριθούν με τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας.

Εναλλακτικά, θα μπορούσε να μελετηθεί η συμπεριφορά του μηχανισμού triggering της παρούσας εργασίας είτε με εφαρμογή διαφορετικού τρόπου φόρτισης, δηλαδή με δυναμική κρουστική καταπόνηση, είτε με χρήση διαφορετικού υλικού (για παράδειγμα δοκίμια από χάλυβα).

Τέλος, θα μπορούσε να μελετηθεί η συμπεριφορά κατάρρευσης δοκιμίων με τη γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, αλλά η φόρτιση να επιβάλλεται μέσω επίπεδων πλακών. Τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να συγκριθούν με τα αντίστοιχα των μηχανισμών triggering μέσω chamfering και tulip pattern, αφού και αυτοί επιβάλλονται μέσω επίπεδων πλακών.

Βιβλιογραφία

1. 'A numerical study on the impact response and energy absorption of tapered thin-walled tubes'. G.M. Nagel, D.P. Thambiratnam. (2004). International Journal of Mechanical Sciences **46**, pp. 201–216.
2. 'A numerical study on the quasi-static axial crush characteristics of square aluminum tubes with chamfering and other triggering mechanisms'. H. El-Hage, P.K. Mallick, N. Zamani. (2005). Int J Crashworthiness **10**, pp. 183–195.
3. 'A study of lateral collapse of square and rectangular metallic tubes'. N.K. Gupta, G.S. Sekhon, P.K. Gupta. (2001). Thin-Walled Structures **39**, pp.745–772.
4. 'Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading'. S. Salehghaffari, M.Tajdari, M.Panahi, F.Mokhtarnezhad. (2010). Thin-Walled Structures **48**, pp. 379–390.
5. 'Collapsible impact energy absorbers : an overview'. A.A.A. Alghamdi. (2001). Thin-Walled Structures **39**, pp. 189–213.
6. 'Comparative large deformations studies on circular tubes'. Ram Ranjan Sahu, Pramod Gupta. (2012). International Journal of Civil and Structural Engineering **3(2)**, pp. 367-379.
7. 'Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes' - G.M. Nagel, D.P. Thambiratnam. (2005). Thin-Walled Structures **43**, pp. 1225–1242.
8. 'Crushing and energy absorption performance of different geometrical shapes of small-scale glass/polyester composite tubes under quasi-static loading conditions' Sivakumar Palanivelu, Wim Van Paepegem, Joris Degrieck, John Vantomme, Dimitrios Kakogiannis, Johan Van Ackeren, Danny Van Hemelrijck, Jan Wastiels. (2011). Composite Structures **93**, pp. 992–1007.
9. 'Dynamic simulation and energy absorption of tapered thin-walled tubes under oblique impact loading'. G.M. Nagel, D.P. Thambiratnam. (2006). International Journal of Impact Engineering **32**, pp. 1595–1620.
10. 'Effect of trigger geometry on energy absorption in composite profiles'. M.A. Jimenez, A. Miravete, E. Larrod, D. Revuelta. (2000). Composite Structures **48**, pp. 107–111.
11. 'Effect of triggering on the energy absorption capacity of axially compressed aluminum tubes'. Sunghak Leea U, Changsu Hahn, Meungho Rheec, Jae-Eung Ohd. (1999). Materials and Design **20**, pp. 31–40.

12. 'Energy absorption of axially compressed thin-walled square tubes with patterns'. Xiong Zhang, Gengdong Cheng, Zhong You, Hui Zhang. (2007). Thin-Walled Structures **45**, pp. 737–746.
13. 'Energy absorption of longitudinally grooved square tubes under axial compression'. Xiong Zhang, Hoon Huh. (2009). Thin-Walled Structures **47**, pp. 1469–1477.
14. 'Experimental study on the axial crushing behaviour of pultruded composite tubes'. Sivakumar Palanivelu, Wim Van Paepegem, Joris Degrieck, Johan Van Ackeren, Dimitrios Kakogiannis, Danny Van Hemelrijck, Jan Wastiels, John Vantomme. (2010). Polymer Testing **29**, pp. 224–234.
15. 'Metallic tube type energy absorbers: A synopsis'. A.G. Olabi , Edmund Morris , M.S.J. Hashmi. (2007). Thin-Walled Structures **45**, pp. 706–726.
16. 'Numerical Simulation of Axial Crushing of Circular Tubes'. A. A. N. ALJAWI. (2002). JKAU: Eng. Sci. **14(2)**, pp. 3-17.
17. 'Parametric study of crushing parameters and failure patterns of pultruded composite tubes using cohesive elements and seam, Part I: Central delamination and triggering modeling'. Sivakumar Palanivelu, Wim Van Paepegem, Joris Degrieck, Dimitrios Kakogiannis, Johan Van Ackeren, Danny Van Hemelrijck, Jan Wastiels, John Vantomme. (2010). Polymer Testing **29**, pp. 729–741.
18. 'Static and dynamic crushing of tapered sheet metal tubes of rectangular cross section'. S.R .Reid, T.Y.Reddy. (1986). International Journal of Mechanical Sciences **28(9)**, pp. 623–637.
19. 'Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler'. Hanssen AC, Langseth M, Hopperstad OS. (2000). Int J Impact Eng **24(5)**, pp. 75–507.
20. 'Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes'. S.R. Guillowa, G. Lua, R.H. Grzebietab. (2001). International Journal of Mechanical Sciences **43**, pp. 2103–2123.

