



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ.Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ TRIGGERING ΣΤΗΝ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ
ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ

The effect of trigger mechanisms on the collapse behavior of metallic shells



ΤΑΤΣΙΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα να εκφράσω ιδιαίτερες ευχαριστίες στον καθηγητή και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα και τον Δρ.Μηχ.Μηχ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο (ΕΔΙΠ) για την άριστη συνεργασία που είχαμε και την πολύτιμη βοήθειά του. Επίσης οφείλω να δώσω πολλές ευχαριστίες στους τεχνικούς του Εργαστηρίου του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, κ. Κερασιώτη Κωνσταντίνο (ΕΤΕΠ) και κ. Μελισσά Νικόλαο για τη βοήθεια που παρείχαν στην διεξαγωγή των πειραμάτων και στην κατασκευή των δοκιμίων, η οποία υπήρξε καθοριστική για την διεκπεραίωση της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ	
1.1:Εισαγωγή.....	7
1.2:Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης.....	8
1.2.α: Μοντέλο του Alexander.....	8
1.2.β:Μοντέλο των Abramowicz και Jones.....	9
1.2.γ:Μοντέλο των Gupta και Velmurugan.....	10
1.2.δ:Μοντέλο των Gupta και Abbas.....	10
1.2.ε :Μοντέλο των Abbas, Gupta, Tyagi και Arif.....	12
1.3: Μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης.....	15
1.3.α: Μοντέλο των Pugsley και Macaulay.....	16
1.3.β: Μοντέλο των Johnson, Soden και Al-Hassani.....	16
1.3.γ:Μοντέλο των Abramowicz και Jones.....	16
1.3.δ: Μοντέλο του Wierzbicki.....	16
1.4:Μικτός τρόπος κατάρρευσης.....	16
1.5 :Λυγισμός(Euler buckling).....	17
Κεφάλαιο 2:ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	
2.1:Εισαγωγή.....	19
2.2: Συνθήκες πειραμάτων.....	19
2.3: Πειραματικά δοκίμια.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	
3.1:Εισαγωγή.....	25
3.2:Μεγέθη κατάρρευσης.....	25
3.3: Πειραματικά αποτελέσματα.....	26
3.3.α:Πείραμα 1.....	27
3.3.β:Πείραμα 2-1.....	29
3.3.γ:Πείραμα 2-2.....	32
3.3.δ:Πείραμα 2-3.....	34
3.3.ε:Πείραμα 2-4.....	36
3.3.ζ:Πείραμα 3-1.....	39
3.3.η:Πείραμα 3-2.....	42

3.3.θ:Πείραμα 4.....	45
3.3.ι:Πείραμα 4-1-α.....	47
3.3.κ:Πείραμα 4-2-α.....	49
3.3.λ:Πείραμα 4-2.....	51
3.3.μ:Πείραμα 4-3-α.....	53
3.3.ν:Πείραμα 5.....	55
3.3.ξ:Πείραμα 5-1.....	57
3.3.ο:Πείραμα 5-2.....	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1: Εισαγωγή	61
4.2: 1 ^η ομάδα συγκρίσεων.....	62
4.2.α: Μέσο φορτίο κατάρρευσης.....	63
4.2.β: Συνολική απορροφούμενη ενέργεια.....	63
4.2.γ:Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης.....	64
4.2.δ: Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου(CFE).....	64
4.3:2 ^η ομάδα συγκρίσεων.....	65
4.3.α: Δοκίμιο A1.....	66
4.3.β: Δοκίμιο A2.....	68
4.3.γ: Δοκίμιο A3.....	70
4.3.δ: Μηχανισμοί triggering T1 και T2.....	73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....79

5.1:Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων	79
5.2:Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	81

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....82

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών (Εργαστήριο Κατεργασιών των Υλικών) του ΕΜΠ και αντικείμενό της είναι η μελέτη υλικών και διατάξεων απορρόφησης ενέργειας (crashworthiness, energy absorption system).

Η ανάγκη σχεδιασμού και κατασκευής τέτοιων συστημάτων και διατάξεων είναι επιτακτική, καθώς με τη ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη η σύγχρονη κοινωνία χρησιμοποιεί σε τεράστιο βαθμό μεταφορικά μέσα, εναέρια, επίγεια και θαλάσσια. Αποτέλεσμα αυτού είναι και η μεγάλη αύξηση των ατυχημάτων που σχετίζονται με τα μέσα μεταφοράς, που αφενός οδηγούν σε σοβαρούς τραυματισμούς και θανάτους, και αφετέρου σε σημαντικές οικονομικές απώλειες και καταστροφές στο περιβάλλον.

Άλλο πεδίο εφαρμογής διατάξεων απορρόφησης ενέργειας για την προστασία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος, είναι η προστασία έναντι βιομηχανικών και εργατικών ατυχημάτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η χρήση προστατευτικών δικτύων σε βραχώδεις περιοχές όπου εκτελούνται έργα.

Πολλοί μηχανισμοί προστασίας χρησιμοποιούνται και για προσωπική ασφάλεια, όπως λόγου χάρη το κράνος μοτοσικλετιστών, το οποίο προστατεύει το κεφάλι σε περίπτωση ατυχήματος, και οι απαιτήσεις του στην απορρόφηση της ενέργειας της σύγκρουσης είναι μεγαλύτερες και από αυτές του κράνους που χρησιμοποιείται σε εργοτάξια.

Ο ρόλος μιας διάταξης απορρόφησης ενέργειας είναι να παραλάβει την κινητική ενέργεια της σύγκρουσης σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό και να την μετατρέψει σε άλλη μορφή (πλαστικό έργο, ενέργεια θραύσης), αποτρέποντάς την από το να διοχετευθεί στον άνθρωπο ή στο αντικείμενο που έχει σκοπό να προστατεύσει. Η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται από τη γεωμετρία της διάταξης, αλλά και από τα υλικά που χρησιμοποιούνται, και έχει διεξαχθεί μεγάλο πλήθος πειραμάτων με πολλές διαφορετικές γεωμετρίες, καθώς και υλικά.

Από πολλά πειράματα το συμπέρασμα είναι πως καλύτερη απόκριση σε θλιπτικά φορτία έχουν κυλινδρικής γεωμετρίας δοκίμια κατασκευασμένα από όλκιμα υλικά, κυρίως από χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και αλουμίνιο, ή και κράματα αυτών των δύο. Σε εφαρμογές με αυστηρά όρια στο βάρος, μπορεί να χρησιμοποιηθούν και άλλα υλικά, όπως πολυμερή ή σύνθετα. Το αλουμίνιο προτιμάται για διάφορους λόγους, όπως το χαμηλό ειδικό βάρος του σε συνδυασμό με ανθεκτικότητα και αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα του, το χαμηλό κόστος, η δυνατότητα ανακύκλωσης και το ότι η αντοχή του σε δυσθραυστότητα δεν μεταβάλλεται σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Η μελέτη της συμπεριφοράς των διατάξεων και συστημάτων απορρόφησης ενέργειας διεξάγεται τις περισσότερες φορές σε στατικές συνθήκες, παρότι οι πραγματικές συγκρούσεις γίνονται σε δυναμικές, και αυτό διότι έτσι είναι πιο

εύκολη η παρατήρηση του φαινομένου και η εξαγωγή αποτελεσμάτων και μεγεθών προς ανάλυση.

Σε γενικές γραμμές, ο σχεδιασμός της διάταξης απορρόφησης ενέργειας και η επιλογή των υλικών από τα οποία θα αποτελείται, γίνεται ώστε να τηρεί τα κριτήρια της εκάστοτε περίπτωσης και να μπορεί να ανταποκριθεί στις συνθήκες όπου θα λειτουργήσει. Ενώ κάθε εφαρμογή έχει τις δικές της ιδιαιτερότητες και δυσκολίες, σε όλες τις περιπτώσεις ο σκοπός είναι η απορρόφηση της κινητικής ενέργειας ελεγχόμενα. Ως εκ τούτου, κάποιες θεμελιώδεις αρχές θα πρέπει να ακολουθούνται από όλες τις εφαρμογές, οι οποίες είναι:

α) Μη αναστρέψιμη μετατροπή ενέργειας

Οι διατάξεις θα πρέπει να μετατρέπουν το μεγαλύτερο μέρος της αρχικής κινητικής ενέργειας σε ανελαστική μέσω πλαστικής παραμόρφωσης ή άλλων διαδικασιών διάχυσης και όχι να την αποθηκεύουν ελαστικά.

β) Περιορισμένη δύναμη αντίδρασης

Η δύναμη αντίδρασης δεν πρέπει να υπερβαίνει ένα όριο και πρέπει να διατηρείται όσο το δυνατόν γίνεται σταθερή κατά τη διάρκεια απορρόφησης ενέργειας.

γ) Δυνατότητα της διάταξης για επαρκώς μεγάλη παραμόρφωση

Είναι αναγκαία έτσι ώστε να απορροφηθεί μεγάλο μέρος κινητικής ενέργειας.

δ) Σταθερός και επαναλήψιμος τρόπος παραμόρφωσης (κατάρρευσης)

Ο σταθερός και επαναλήψιμος τρόπος παραμόρφωσης διασφαλίζει την αξιοπιστία της κατασκευής, καθώς από τα εξωτερικά δυναμικά φορτία αναμένονται αβεβαιότητες όσο αφορά το μέγεθος, την κατεύθυνση και την κατανομή τους.

ε) Ελαφρές κατασκευές με μεγάλη ειδική απορρόφηση ενέργειας.

Εφαρμογές που αφορούν μέσα μεταφοράς και προσωπική ασφάλεια έχουν ως προαπαιτούμενο να απαρτίζονται από ελαφρά εξαρτήματα, με μεγάλη ειδική απορρόφηση ενέργειας.

ζ) Χαμηλό κόστος και εύκολη εγκατάσταση

Ο υψηλός ανταγωνισμός επιβάλλει και χαμηλά κόστη, και οι διατάξεις δεν γίνεται να υπερβαίνουν το όριο που θέτει ο προϋπολογισμός. Και πρέπει να αναφερθεί πως ένας ακόμη λόγος είναι ότι οι διατάξεις αυτές συνήθως είναι μιας χρήσης, και μετά από αυτή πρέπει να αντικατασταθούν (καταστροφική καταπόνηση).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, τα πειράματα που διεξήχθησαν αποσκοπούν στη μελέτη της επίδρασης εξωτερικών μηχανισμών triggering (μηχανισμοί διέγερσης/πρόκλησης κατάρρευσης) στη συμπεριφορά κατάρρευσης μεταλλικών κελυφών (επίδραση στο ένα άκρο του κελύφους). Οι μηχανισμοί triggering κατασκευάστηκαν από χάλυβα στο Εργαστήριο Κατεργασιών των Υλικών σε διάφορες γεωμετρίες των οποίων η περιγραφή γίνεται στο 2^ο κεφάλαιο. Έγιναν συνολικά 15 πειράματα, τα τρία εκ των οποίων αφορούν την κατάρρευση των κελυφών χωρίς triggering, ώστε τα αποτελέσματα να συγκριθούν μετά με αυτά στα

οποία χρησιμοποιήθηκαν οι μηχανισμοί. Οι χαλύβδινοι μηχανισμοί triggering, λόγω υλικού και κατασκευής, είναι πολύ στιβαρότεροι των κελυφών αλουμινίου, με αποτέλεσμα να παραμένουν απαραμόρφωτοι (rigid body). Μελετήθηκαν οι φάσεις της κατάρρευσης και ελήφθησαν φωτογραφίες κατά τη διάρκειά της αλλά και μετά. Επίσης υπολογίσθηκαν τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης από όλα τα πειράματα και συγκρίθηκαν μεταξύ τους για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

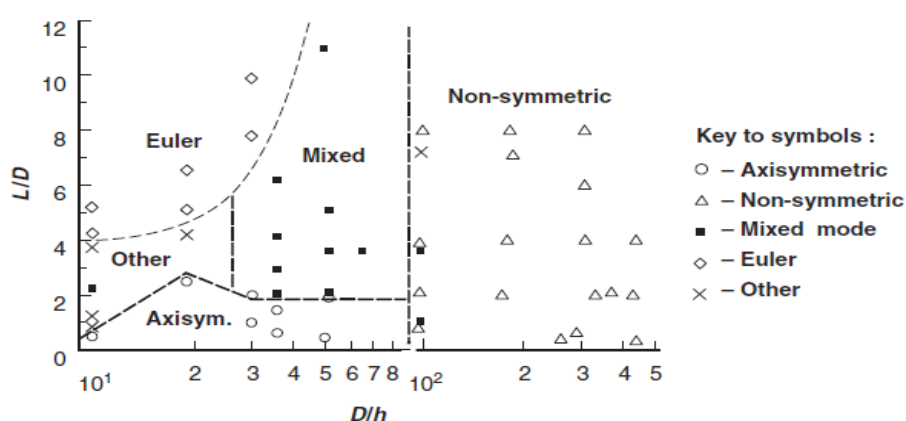
Ως εκ τούτου η μελέτη αφορά την επίδραση του εξωτερικού triggering στον τρόπο κατάρρευσης και απορρόφησης ενέργειας μεταλλικών κελυφών, που αφορά λόγους ένταξης του μεμονωμένου δομικού στοιχείου σε μια ευρύτερη προστατευτική κατασκευή. Δεν μας απασχολεί δηλαδή το εσωτερικό, το οποίο μπορεί για παράδειγμα να αποτελέσει μια διαμόρφωση άκρων στο δοκίμιο ή μια ασυνέχεια στην γεωμετρία του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ

1.1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάλυση της αξονικής κατάρρευσης κυλινδρικών κελυφών αφορά διάφορα μαθηματικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για να περιγράψουν το φαινόμενο, τα αποτελέσματα των οποίων έχουν συγκριθεί με αυτά των πειραμάτων, και φυσικά παρουσιάζουν κάποιες διαφορές, αφού δεν ανταποκρίνονται πλήρως στην πραγματικότητα και εμπεριέχουν διάφορες παραδοχές. Ερευνητές που έχουν κάνει σημαντική δουλειά και έχουν αναπτύξει τέτοια μοντέλα είναι οι Alexander, Abramowicz, Jones, Gupta, Velmurugan, Abbas, Johnson, Gzercieta, Tyagi, Arif, Wierzbicki, Pugsley, Macaulay, Mamalis, Manolakos.

Από το πλήθος πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί, έχουν παρατηρηθεί τέσσερις κύριοι τρόποι κατάρρευσης κυλινδρικών σωλήνων, όταν αυτοί υπόκεινται σε αξονικά θλιπτικά φορτία: ο αξονοσυμμετρικός τρόπος (ring/concertina mode), ο μη αξονοσυμμετρικός (diamond mode), ο μικτός (mixed mode) και ο λυγισμός (Euler buckling mode). Ο τρόπος κατάρρευσης που θα ακολουθήσει ο κυλινδρικός σωλήνας επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από το μέγεθος D/t , δηλαδή από τον λόγο της διαμέτρου προς το πάχος του τοιχώματος, αλλά και από τον λόγο του μήκους προς τη διάμετρο (L/D). Για σωλήνες με μεγάλο πάχος (λόγο D/t μικρότερο από 50) παρατηρείται κατάρρευση με τον αξονοσυμμετρικό τρόπο, ενώ οι λεπτοί καταρρέουν με τον μη αξονοσυμμετρικό, ενώ ένας μεγάλος λόγος μήκους προς διάμετρο θα οδηγήσει σε λυγισμό, που είναι μη επιθυμητός στις προστατευτικές κατασκευές. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε ένα διάγραμμα ταξινόμησης των τρόπων κατάρρευσης κυλινδρικών σωλήνων από αλουμίνιο βάσει των διαστάσεών του:



Σχήμα 1: Διάγραμμα ταξινόμησης τρόπων κατάρρευσης κυλινδρικών

1.2: ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟΣ ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ



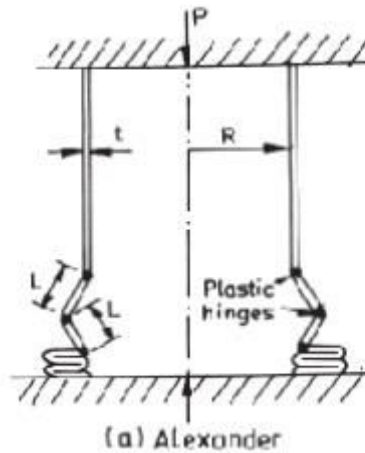
Σχήμα 2: Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης

Χαρακτηριστικά του αξονοσυμμετρικού τρόπου κατάρρευσης είναι ο σχηματισμός λοβών με εκτατό τρόπο, δηλαδή η αύξηση της περιμέτρου του σωλήνα και το ότι η διατομή παραμένει κυκλική. Είναι επιθυμητός τρόπος κατάρρευσης, μιας και οδηγεί σε μεγαλύτερη ενέργεια απορρόφησης έναντι των υπόλοιπων. Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, η δημιουργία των συμμετρικών λοβών παρατηρείται στα σημεία του διαγράμματος φορτίου παραμόρφωσης όπου υπάρχουν αυξομειώσεις.

1.2.α: Μοντέλο του Alexander

Η παλαιότερη θεωρητική ανάλυση που έγινε όσο αφορά τον αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης κυλινδρικών σωλήνων χρονολογείται το 1960 και ο ερευνητής που δημιούργησε το πρώτο μοντέλο ονομάζεται Alexander. Ο Alexander θεώρησε τρεις πλαστικούς αρμούς κατά την δημιουργία ενός λοβού και προέβλεψε το μέσο φορτίο της συμπίεσης με τον παρακάτω τύπο:

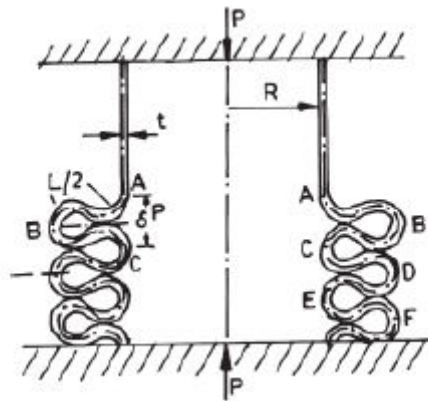
$$\frac{P_m}{P_o} = \frac{t}{4\pi R\sqrt{3}} \left[20,73 \left(2 \frac{R}{t} \right)^{0.5} + 6.283 \right]$$



Σχήμα 3: Μοντέλο του Alexander

Εκτός από τον Alexander, και άλλοι ερευνητές με τις δικές τους θεωρίες και παραδοχές κατέληξαν σε διαφορετικές προβλέψεις του μέσου φορτίου κατάρρευσης. Τα μοντέλα τους παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

1.2.β: Μοντέλο των Abramowicz και Jones

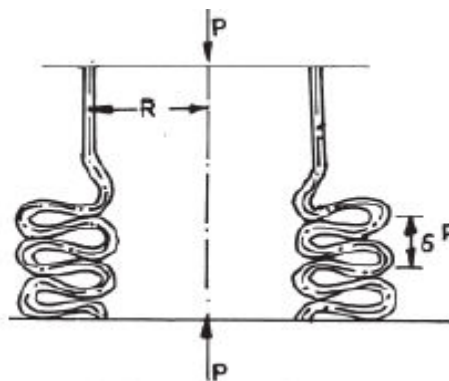


Σχήμα 4: Μοντέλο των Abramowicz και Jones

Σύμφωνα με τον Abramowicz και τον Jones, το μέσο φορτίο δίνεται από την εξίσωση :

$$\frac{P_m}{P_o} = \frac{t}{4\pi R\sqrt{3}} \left[20,79 \left(2 \frac{R}{t} \right)^{0.5} + 11.9 \right]$$

1.2.γ: Μοντέλο των Gurta και Velmurugan



Σχήμα 5: Μοντέλο Gurta και Velmurugan

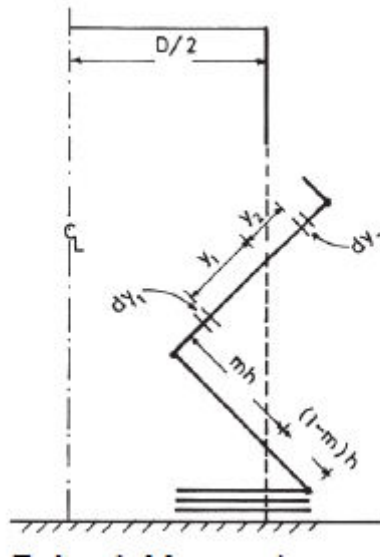
Το μέσο φορτίο κατάρρευσης δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{P_m}{P_0} = \frac{1}{R \left[2L - t - \frac{2L}{3a} \right]} \left\{ \frac{L^2}{3} \sin a + \frac{t}{\sqrt{3}} \left[2Ra + \frac{L}{3} (1 - \cos a) \right] \right\}$$

με $L = 1.347\sqrt{Rt}$ και ο υπολογισμός του a γίνεται λύνοντας την εξίσωση

$$L - 2L \sin a - L \sin a - \frac{3at}{2} = 0$$

1.2.δ: Μοντέλο των Gurta και Abbas



Σχήμα 6: Μοντέλο των Gurta και Abbas

Οι παραπάνω ερευνητές θεώρησαν την κίνηση του υλικού κατά την κατάρρευση και προς τα μέσα και προς τα έξω, και κατέληξαν στην παρακάτω σχέση, που δίνει το μέσο φορτίο κατάρρευσης:

$$\begin{aligned}
 P_m = & 2k\pi f_{yt} D^2 t_o^2 \frac{D^2 - 2m^2 h^2}{hA^{2/3}} \left[\tan^{-1} \left(\frac{D - mh}{\sqrt{A}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{-mh}{\sqrt{A}} \right) \right] + \\
 & + 2k\pi f_{yt} D^2 t_o^2 \frac{(D^2 - (1 - m)^2 h^2)}{hB^{2/3}} \left[\tan^{-1} \left(\frac{D + (1 - m)h}{\sqrt{B}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{(1 - m)h}{\sqrt{B}} \right) \right] + \\
 & + \pi f_{yt} D^2 t_o^2 \left[\frac{(-m)}{A} + \frac{(1 - m)}{B} \right] + \frac{\pi}{3} f_{yt} t_o h \left[4rh^2 + \frac{rmD}{h} \ln \left(\frac{1 - mh}{D} \right) + 4(1 - m)^2 - \right. \\
 & \left. - \frac{(1 - m)D}{h} \ln \left(1 + \frac{(1 - m)h}{D} \right) \right]
 \end{aligned}$$

Μεγέθη εξίσωσης (και μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν για να προκύψει):

D: Αρχική μέση διάμετρος του σωλήνα

ϵ_1, ϵ_2 : Τάσεις

f_{yc} : Όριο αντοχής του υλικού σε θλίψη

f_{yt} : Όριο αντοχής του υλικού σε εφελκυσμό

h: Μέγεθος του λοβού

k: Μια παράμετρος

m: Παράμετρος του λοβού(αναλογία του μέρους του λοβού που βρίσκεται εσωτερικά στο σωλήνα προς το ολικό μήκος του)

M_p : Πλαστική ροπή ανά μονάδα μήκους

P_m : Μέσο φορτίο παραμόρφωσης

P_θ : Φορτίο παραμόρφωσης σε γωνία θ

r: Λόγος του f_{yc} προς το f_{yt}

t: Χρόνος

t_0 : Αρχικό πάχος σωλήνα

t_1, t_2 : Πάχη του σωλήνα στο εσωτερικό και στο εξωτερικό μέρος του λοβού αντίστοιχα

W_b : Έργο σε λυγισμό για πλήρη λοβό

$W_{b\theta}$: Έργο σε λυγισμό για περιστροφή κατά γωνία θ

W_c : Έργο περιφερειακής παραμόρφωσης

$W_{c\theta}$: Έργο περιφερειακής παραμόρφωσης μέχρι γωνία θ

W: Ολικό έργο

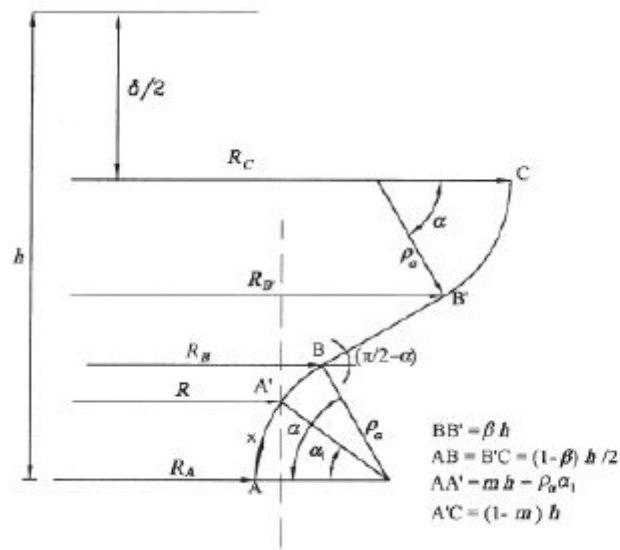
γ_1, γ_2 : Αποστάσεις

1.2.ε :Μοντέλο των Abbas, Gupta, Tyagi και Arif

Κατά τον σχηματισμό λοβών, η περιφερειακή τάση μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται ο προσανατολισμός των λοβών, και οι περισσότερες αναλύσεις δεν το λαμβάνουν αυτό υπόψιν. Έτσι, οι παραπάνω ερευνητές ανέπτυξαν ένα μοντέλο με μεταβλητό μήκος που δεν αγνοεί τη μεταβλητότητα της περιφερειακής τάσης στην εξέλιξη του φαινομένου. Σε ένα σωλήνα κυκλικής διατομής που υφίσταται αξονική συμπίεση, μέσης ακτίνας R και αρχικού πάχους t_0 , αν h είναι το μήκος του λοβού, τότε mh θα είναι το εσωτερικό τμήμα του και $(1-m)h$ το εξωτερικό. Η ανάλυση αφορά μόνο το μισό του λοβού, μιας και οπ σχηματισμός τους είναι συμμετρικός γύρω από τη μέση της άρθρωσης. Οι γωνίες των αρθρώσεων στους αρμούς A και C θεωρούνται ίσες. Ονομάζουμε β τον λόγο του ευθύ μήκους του λοβού προς το μισό

μήκος του και δ την κατακόρυφη συμπίεση σε γωνία άρθρωσης α , ενώ το σημείο A' αντιστοιχεί στη μέση ακτίνα R . Το τμήμα AA' καταρρέει εσωτερικά, ενώ το $A'C$ εξωτερικά, και υπάρχουν τρεις περιπτώσεις :

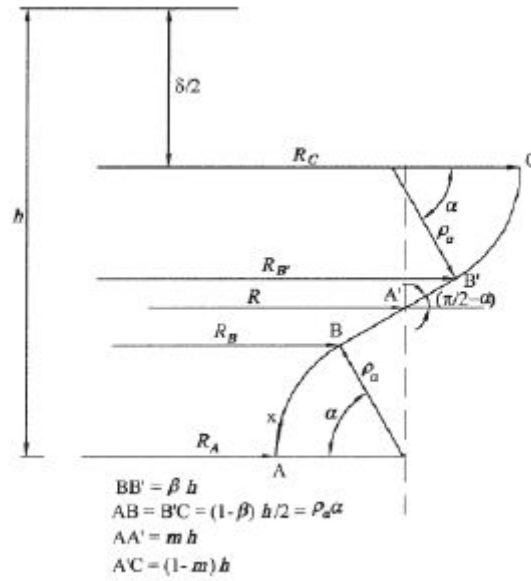
1) Το σημείο A' βρίσκεται εντός του τόξου AB $\left(m < \left(\frac{1-\beta}{2}\right)\right)$



Σχήμα 7: Περίπτωση 1

2) Το σημείο A' βρίσκεται εντός της ευθείας BB'

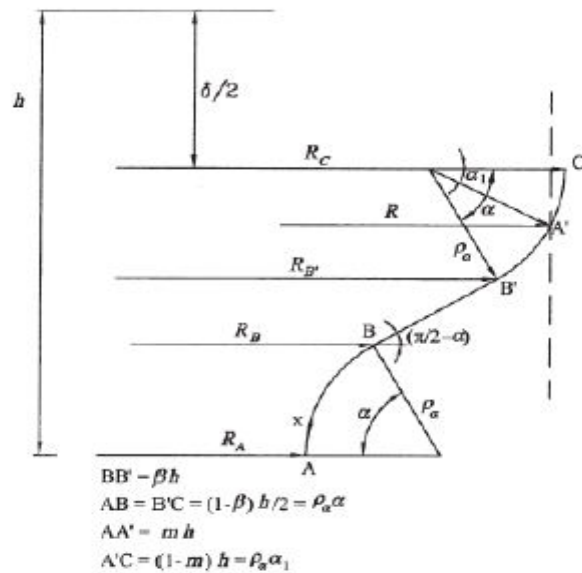
$$\left(\left(\frac{1-\beta}{2}\right) < m < \left(\frac{1+\beta}{2}\right)\right)$$



Σχήμα 8: Περίπτωση 2

3) Το σημείο A' βρίσκεται εντός του τόξου $B'C$

$$\left(\frac{1 + \beta}{2} \right) < m < 1$$



Σχήμα 9: Περίπτωση 3

Το μοντέλο αυτό υπολογίζει το μέσο φορτίο κατάρρευσης με την εξίσωση $P_m=W_T/\delta_T$, όπου W_T είναι η ολική ενέργεια που απορροφάται σε κάμψη και περιφερειακή παραμόρφωση μέχρι τη μέγιστη γωνία και δ_T η ολική ενεργή μετατόπιση κατάρρευσης για το σχηματισμό ενός λοβού.

1.3: Μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης

Ο μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από τον σχηματισμό λοβών με μη εκτατό τρόπο, το οποίο σημαίνει πως η περίμετρος της διατομής δεν θα αυξηθεί, αλλά θα μεταβληθεί η γεωμετρία της.



Σχήμα 10: Μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης

Οι λοβοί που σχηματίζονται έχουν όπως βλέπουμε στο σχήμα 10 ίδια γεωμετρία, και επειδή η διατομή έχει πάρει τριγωνική μορφή ονομάζεται 3D diamond. Για διατομή με δύο ακμές θα ονομαζόταν 2D diamond, για τέσσερις 4D και ούτω καθεξής. Σε αντίθεση με τον αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης, ο κάθε λοβός έχει περιστραφεί σε σχέση με τον προηγούμενο κατά κάποια γωνία, που υπολογίζεται έτσι: αν οι ακμές της διατομής είναι γ , τότε ο κάθε λοβός θα είναι περιστραμμένος σε σχέση με τους γειτονικούς του κατά γ/π rad. Η απορροφούμενη ενέργεια κατασκευής που υπόκειται στον συγκεκριμένο τρόπο κατάρρευσης είναι γενικά μικρότερη από εκείνη αν ακολουθούσε τον αξονοσυμμετρικό τρόπο.

Τα θεωρητικά μοντέλα σε αυτή την περίπτωση είναι λιγότερο επιτυχημένα και ακριβή από αυτά που αναπτύχθηκαν για τον αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης, και παρουσιάζονται μερικά στην συνέχεια:

1.3.α: Μοντέλο των Pugsley και Macaulay

Μέσο φορτίο κατάρρευσης:

$$\frac{P_m}{P_0} = 1.6 \frac{t}{R} + 0.12$$

1.3.β: Μοντέλο των Johnson, Soden και Al-Hassani

$$P_m = 2\pi M_p \left(1 + n \cos \frac{n}{2\pi} + \frac{m-1}{m} n \cot \frac{\pi}{2n} \right)$$

Με M_p =Ολική πλαστική ροπή ανά μονάδα μήκους, n ο αριθμός των σχηματιζόμενων τριγώνων ανά λοβό και m ο συνολικός αριθμός των λοβών.

1.3.γ: Μοντέλο των Abramowicz και Jones

$$\frac{P_m}{M_0} = 86.14 \left(\frac{2R}{t} \right)^{1/3}$$

1.3.δ: Μοντέλο του Wierzbicki

$$\frac{P_m}{M_0} = 62.88 \left(\frac{2R}{h} \right)^{1/3}$$

1.4: Μικτός τρόπος κατάρρευσης

Όπως υποδηλώνει και το όνομά του, ο παρών τρόπος κατάρρευσης είναι ένας συνδυασμός των δύο προηγούμενων. Αρχικά παρατηρείται ο αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης, και κατόπιν ενός σημείου, το δοκίμιο ακολουθεί τον μη αξονοσυμμετρικό, σχηματίζοντας λοβούς με μη εκτατό τρόπο. Στη συνέχεια, ένα δοκίμιο είναι δυνατό να οδηγηθεί σε λυγισμό.

Οι λόγοι που μπορεί να οδηγήσουν το δοκίμιο να καταρρεύσει με τον μικτό τρόπο είναι μεγάλες ατέλειες που μπορεί να παρουσιάζει στην δομή και τη γεωμετρία του, αλλά και όταν οι διαστάσεις του φθάσουν σε οριακές τιμές. Επειδή οι ατέλειες είναι δύσκολο να εντοπιστούν, πολλές φορές απαιτείται επανάληψη του πειράματος, ώστε να διαπιστωθεί αν θα έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα.

Μέχρι στιγμής δεν έχουν υπάρξει ολοκληρωμένα μαθηματικά μοντέλα που να περιγράφουν τον μικτό τρόπο κατάρρευσης, και για αυτό η ανάλυση γίνεται σε δύο σκέλη, μιας και για τους δύο τρόπους υπάρχει πληθώρα προσεγγίσεων και μαθηματικών σχέσεων.



Σχήμα 11: Μικτός τρόπος κατάρρευσης

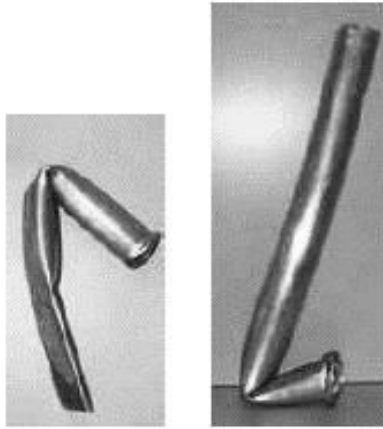
1.5 :Λυγισμός (Euler buckling)

Σε δοκίμια με μεγάλο λόγο μήκους προς τη διάμετρο (L/D), παρατηρείται ένας ξεχωριστός τρόπος κατάρρευσης, που χαρακτηρίζεται από ξαφνική αστοχία του υλικού, χωρίς όμως να έχει γίνει υπέρβαση του ορίου αντοχής. Αφού η κατασκευή υποστεί λυγισμό, δεν καθίσταται ικανή να απορροφήσει μεγάλα ποσά ενέργειας, και για αυτό είναι ένας τρόπος κατάρρευσης μη επιθυμητός.

Ο Euler το 1757 μελέτησε πρώτος το φαινόμενο και ανέπτυξε μια μαθηματική σχέση που το διέπει:

$$P = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$$

Όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, I η ροπή αδράνειας της διατομής, KL το ενεργό μήκος και P το κρίσιμο φορτίο λυγισμού.



Σχήμα 12:Λυγισμός Euler

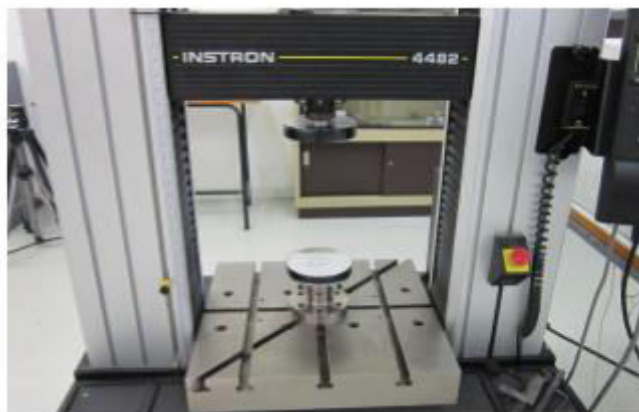
Κεφάλαιο 2: Πειραματική διαδικασία

2.1: Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής περιγραφή των κατασκευών που αποτελούν τους μηχανισμούς triggering, των κελυφών που συμπίεστηκαν, καθώς και της πειραματικής διάταξης και των συνθηκών κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα. Τους μηχανισμούς triggering τους αποτέλεσαν χαλύβδινες ράβδοι συγκολλημένες μεταξύ τους σε κατάλληλες διατάξεις διαφορετικών διαστάσεων και γεωμετρίας, ενώ τα δοκίμια που συμπίεστηκαν ήταν κυλινδρικοί σωλήνες από αλουμίνιο, που τοποθετήθηκαν πάνω από τους μηχανισμούς triggering. Επίσης, οι κυλινδρικοί σωλήνες συμπίεστηκαν και χωρίς τους μηχανισμούς triggering, ώστε να γίνουν εκτενέστερες συγκρίσεις.

2.2: Συνθήκες πειραμάτων

Τα πειράματα αξονικής συμπίεσης πραγματοποιήθηκαν στη μηχανική πρέσα INSTRON 4482, που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του Τομέα Κατεργασιών των Υλικών. Η κεφαλή της πρέσας ασκεί φορτία κινούμενη με μηχανισμό κοχλία-περικοχλίου. Εκτός από δοκιμές θλίψης, μπορεί να εκτελέσει και δοκιμές εφελκυσμού και κάμψης, με κατάλληλες διατάξεις που περιλαμβάνει.



Σχήμα 1: Μηχανική πρέσα INSTRON 4482

Τα βασικά χαρακτηριστικά της πρέσας είναι:

- α) Ονομαστικό φορτίο 10 KN
- β) Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής: 500mm/min
- γ) Ταχύτητα επιστροφής της κεφαλής: 600mm/min
- δ) Μέγιστο φορτίο στην μέγιστη ταχύτητα: 7,5KN
- ε) Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο: 250mm/min

Τα τμήματα που απαρτίζουν την πρέσα είναι το κυρίως σώμα, που περιλαμβάνει την τράπεζα και την κινητή κεφαλή, στην οποία είναι προσαρμοσμένο το δυναμόμετρο, και τον πίνακα ελέγχου, που διαθέτει θύρα επικοινωνίας συμβατή με το πρωτόκολλο IEEE, η οποία είναι με τη σειρά της συνδεδεμένη σε Η/Υ. Με τον πίνακα ελέγχου έχουμε την δυνατότητα να ορίσουμε τις συνθήκες των δοκιμών, και η σύνδεση με Η/Υ μας επιτρέπει να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα των πειραμάτων για περαιτέρω επεξεργασία.

Η ταχύτητα της κινητής κεφαλής ήταν 20mm/min, δηλαδή τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε στατικές συνθήκες.

2.3: Πειραματικά δοκίμια

Για την πραγματοποίηση της μελέτης που έχει σκοπό η παρούσα εργασία, συμπίεστηκαν διάφορα δοκίμια από το Εργαστήριο του Τομέα Κατεργασιών των Υλικών. Συμπιέστηκαν λεπτόπαχοι κυλινδρικοί σωλήνες από κράμα αλουμινίου 6063-F25, τριών διαφορετικών διαστάσεων, που είχαν κατασκευαστεί με την μέθοδο της θερμής διέλασης. Κατά την κατεργασία αυτή, το μέταλλο συμπιέζεται μέσω ενός εμβόλου και αναγκάζεται να περάσει παραμορφωμένο πλαστικά μέσα από μια κατάλληλα διαμορφωμένη μήτρα για να σχηματίσει ένα προϊόν με ελαττωμένη διατομή. Πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες για να μειωθεί η τάση ροής του υλικού και συνεπώς το φορτίο διέλασης, και για να αυξηθεί η ολκιμότητά του. Το αλουμίνιο και τα κράματά του διελάσσονται σε θερμοκρασίες της τάξης των 470° C. Ο μεταλλικός θάλαμος είναι ένας δακτύλιος μεγάλου πάχους στο εσωτερικό του οποίου τοποθετείται το προς διέλαση τεμάχιο, το οποίο υπόκειται σε μεγάλες εσωτερικές πιέσεις που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία με κίνδυνο τη θραύση του σε περίπτωση υπερφόρτισης. Απλοί μεταλλικοί δακτύλιοι κατασκευάζονται από χάλυβες υψηλής αντοχής και αντέχουν σε πιέσεις μέχρι και 1000 MPa. Για μεγαλύτερες πιέσεις, μέχρι και 1700 MPa, οι θάλαμοι αυτοί κατασκευάζονται από δύο ομόκεντρους δακτύλιους που ο ένας τοποθετείται μέσα στον άλλο με συναρμογή σύσφιξης.

Τα δοκίμια από κράμα αλουμινίου κόπηκαν στην αυτόματη προιονοκορδέλα στο επιθυμητό μήκος, μετά έγινε φινίρισμα των επιφανειών των τοιχωμάτων στον τόρνο και στο τέλος για τη λείανση των άκρων τους (αφαίρεση προεξοχών κοπής) χρησιμοποιήθηκε γυαλόχαρτο.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι σωλήνες με την κωδική ονομασία που τους δώσαμε και τις διαστάσεις τους (σε mm):

δοκίμια	εξωτερική διάμετρος	εσωτερική διάμετρος	Πάχος τοιχώματος	ύψος
A1	30mm	28mm	1mm	100mm
A2	50mm	48mm	1mm	100mm
A3	60mm	56mm	2mm	120mm

Και τα τρία δοκίμια συμπίεστηκαν στο 30% του αρχικού ύψους τους, δηλαδή το τελικό ύψος των A1 και A2 είναι 30 mm, ενώ του A3 36 mm.



Σχήμα 2: Το δοκίμιο A2 σε δύο διαφορετικές όψεις



Σχήμα 3: Πρώτο από αριστερά το δοκίμιο A3 και δεύτερο το A1

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι μηχανισμοί triggering, πάνω στους οποίους στηρίχθηκαν, προκειμένου να συμπιεστούν, τα παραπάνω δοκίμια αλουμινίου. Πρόκειται για εννιά χαλύβδινες ραβδωτές κατασκευές, έξι από τις οποίες έχουν αστεροειδή μορφή (τρεις ακτίνες), δύο μορφή σταυρού (τέσσερις ακτίνες) και η τελευταία κυλινδρική γεωμετρία, ενώ η διατομή των ράβδων ήταν ορθογωνική, ημικυκλική και κυκλική ανά περίπτωση. Παρακάτω γίνεται αναλυτική περιγραφή των μηχανισμών, με την κωδική ονομασία που τους δόθηκε, καθώς και με επεξηγηματικό φωτογραφικό υλικό.

- **S1,S2,S3,S4**

Τα πρώτα τέσσερα δοκίμια είναι κατασκευές από τρεις ορθογωνικές ράβδους, οι οποίες συγκολλήθηκαν στο εργαστήριο σε συνδεσμολογία αστέρα. Οι παρακάτω διαστάσεις αφορούν την κάθεμία από τις ράβδους που αποτελούν τις κατασκευές.

	ύψος	πλάτος	μήκος
S1	19,6mm	1.9mm	50mm
S2	19,6mm	4,7mm	50mm
S3	20,3mm	7,2mm	50mm
S4	19,7mm	10,4mm	50mm



Σχήμα 4: Οι μηχανισμοί triggering S1,S2,S3,S4 από αριστερά προς δεξιά



Σχήμα 5: Οι μηχανισμοί triggering S1,S2,S3,S4 από αριστερά προς δεξιά.

● T1,T2

Η επόμενη σειρά μηχανισμών triggering περιλαμβάνει δύο κατασκευές, η πρώτη σε αστεροειδή μορφή και η δεύτερη σε σταυροειδή. Στην πρώτη περίπτωση συγκολλήθηκαν τρεις ράβδοι σε συνδεσμολογία αστέρα, και στη δεύτερη τέσσερις ώστε να σχηματίσουν ένα σταυρό. Οι ράβδοι είναι ίδιας γεωμετρίας και διαστάσεων και στις δύο περιπτώσεις, η διατομή τους προσεγγίζει ένα ημικύκλιο. Όπως και πριν, ο πίνακας με τις διαστάσεις αφορά τη μία ράβδο:

	σχήμα	μήκος	ύψος	πλάτος
T1	αστέρας	42mm	4,5mm	7mm
T2	σταυρός	42mm	4,5mm	7mm



Σχήμα 6: Οι μηχανισμοί triggering T1,T2 από αριστερά προς δεξιά, σε δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες.

● V1,V2

Όπως και η προηγούμενη ομάδα μηχανισμών, ο V1 κατασκευάστηκε με συγκόλληση τριών ράβδων σε αστεροειδή μορφή, και ο V2 με τέσσερις σε σταυροειδής. Οι ράβδοι που αποτελούν τους V1 και V2 έχουν κυκλική διατομή, και οι διαστάσεις τους είναι:

	διάμετρος	μήκος
V1	10mm	70mm
V2	10mm	70mm



Σχήμα 7: Οι μηχανισμοί triggering από αριστερά προς δεξιά: V2 και V1

● U1

Η τελευταία σειρά μηχανισμών αποτελείται από μια ράβδο κυλινδρικής γεωμετρίας, όμοια με αυτά που συγκολλήθηκαν για να δημιουργήσουν τους δύο προηγούμενους μηχανισμούς, με διάμετρο 10mm.



Σχήμα 8:Ο μηχανισμός U1

Έγιναν συνολικά δεκαπέντε πειράματα, τα οποία παρουσιάζονται σε πίνακα με τις ονομασίες που τους δώσαμε και τον συνδυασμό μηχανισμού triggering και σωλήνα από αλουμίνιο που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε πείραμα.

ονομασία πειράματος	κυλινδρικό δοκίμιο αλουμινίου	μηχανισμός triggering
1	A2	-
2-1	A2	S1
2-2	A2	S2
2-3	A2	S3
2-4	A2	S4
3-1	A2	T1
3-2	A2	T2
4	A3	-
4-1-α	A3	V1
4-2	A3	T2
4-2-α	A3	V2
4-3-α	A3	U1
5	A1	-
5-1	A1	T1
5-2	A1	T2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

3.1: Εισαγωγή

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται εκτενώς τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων των πειραμάτων.

Η ταχύτητα της κινητής κεφαλής ήταν 20mm/min ,και αυτό σημαίνει πως για να ολοκληρωθεί ένα πείραμα συμπίεσης των δοκιμίων A1 και A2 χρειάστηκαν τρία λεπτά και 30 δευτερόλεπτα, ενώ για την συμπίεση του A3 τέσσερα λεπτά και 12 δευτερόλεπτα. Ο Η/Υ επεξεργάζεται τα δεδομένα της κάθε συμπίεσης, και μας παρέχει το πολύ χρήσιμο διάγραμμα φορτίου μετατόπισης (Load-Displacement), από το οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε όλα τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν. Τα διαγράμματα που προκύπτουν είναι εξαιρετικά ακριβή, λόγω του τεράστιου εύρους δεδομένων (χιλιάδες χρονικές στιγμές της εξέλιξης του πειράματος).

Για την οπτικοποίηση του κάθε πειράματος, ελήφθησαν αρκετές φωτογραφίες ανά τακτά χρονικά διαστήματα, και στα σημεία του διαγράμματος όπου αντιστοιχεί κάθε φωτογραφία έχει τοποθετηθεί αντίστοιχος αριθμός.

3.2: Μεγέθη κατάρρευσης

● Συνολική ενέργεια παραμόρφωσης (E_{abs})

Η συνολική ενέργεια παραμόρφωσης είναι η συνολική ενέργεια που απορροφάει το δοκίμιο σε όλη την διάρκεια της συμπίεσής του, και βρίσκεται υπολογίζοντας το εμβαδό του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο του τραπεζίου της αριθμητικής ολοκλήρωσης :

$$E_{abs} = \sum_2^n (P_i + P_{i-1}) \frac{(\delta_i - \delta_{i-1})}{2}$$

Η συνολική ενέργεια παραμόρφωσης είναι ίσως το πιο σημαντικό μέγεθος της κατάρρευσης, και μας ενδιαφέρει η μεγιστοποίησή του.

● Μέγιστο φορτίο (P_{max})

Το μέγιστο φορτίο που αναπτύσσεται κατά την κατάρρευση υπολογίζεται από το διάγραμμα, και είναι αρκετά σημαντικό μέγεθος για την αξιολόγηση της διάταξης. Είναι επιθυμητό να μην υπερβαίνει κάποια όρια, και εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής/δοκιμίου, αλλά και από το υλικό που χρησιμοποιείται.

● Μέσο φορτίο (P_m)

Το μέσο φορτίο μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$P_m = \frac{E_{abs}}{\delta}$$

Όπου δ η συνολική συμπίεση του δοκιμίου.

● Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (Crush force efficiency ή CFE)

Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου ορίζεται ως ο λόγος του μέσου φορτίου προς το μέγιστο (P_m/P_{max}) και αποτελεί μια ένδειξη για το πόσο σταθερή είναι η καμπύλη στο διάγραμμα φορτίου- μετατόπισης. Η ιδανική τιμή του προσεγγίζει τη μονάδα.

● Ειδική απορρόφηση ενέργειας (Specific energy absorption ή SEA)

Το μέγεθος αυτό αποτελεί τον λόγο της συνολικής ενέργειας απορρόφησης προς τη μάζα του δοκιμίου που συμπίεστηκε (E_{abs}/m). Αυτός ο δείκτης είναι πολύ χρήσιμος για σύγκριση και αξιολόγηση κατασκευών με διαφορετική μάζα και μορφή. Τη μάζα των δοκιμίων την υπολογίσαμε ως εξής:

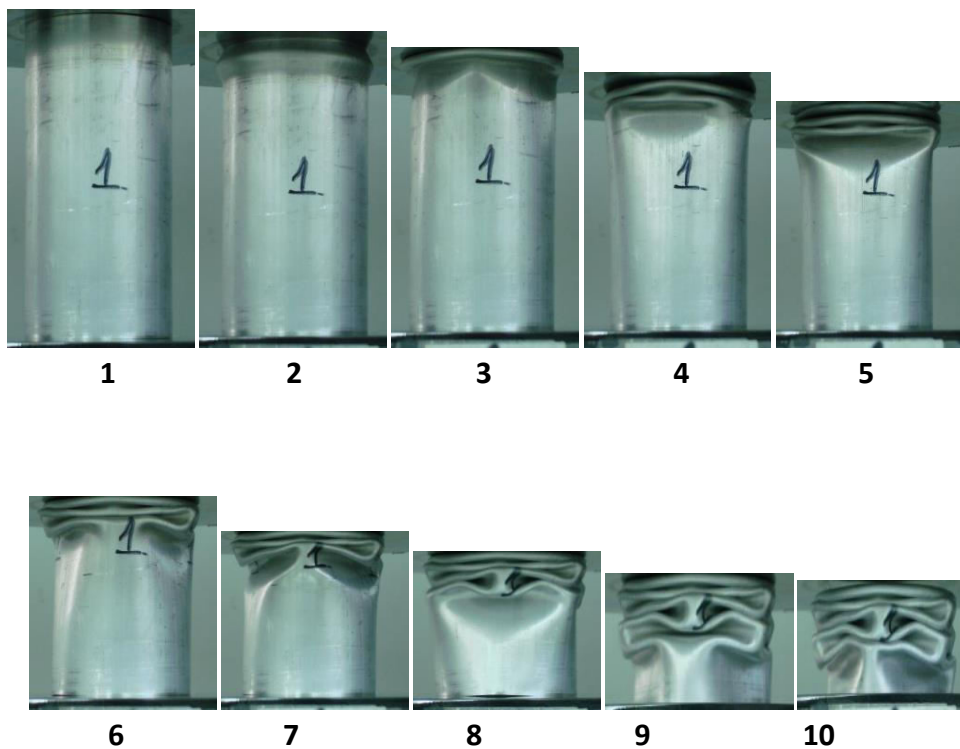
$$m = \rho V = \rho \left(\frac{\pi D_{\varepsilon\xi}^2}{4} - \frac{\pi D_{\varepsilon\sigma}^2}{4} \right) h$$

Με $\rho=2700 \text{ kg/m}^3$ (πυκνότητα αλουμινίου).

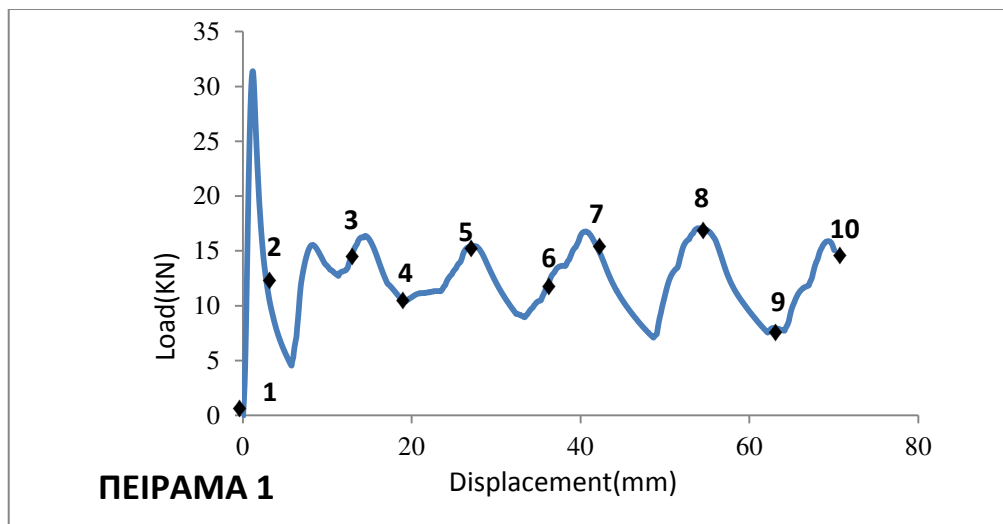
3.3: Πειραματικά αποτελέσματα

Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας. Αυτά περιλαμβάνουν τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης, τα μεγέθη της κατάρρευσης, φωτογραφικό υλικό ανά τακτά χρονικά διαστήματα και των τελικών όψεων των δοκιμίων, καθώς και παρατηρήσεις στον τρόπο κατάρρευσης και πως οι μηχανισμοί triggering τον επηρέασαν.

3.3.α) Πείραμα 1



Εικ. 3.3.α 1: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Εικ. 3.3.α 2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Πρόοψη

Κάτοψη

Άνοψη

Εικ. 3.3.α 3: Τελικές όψεις

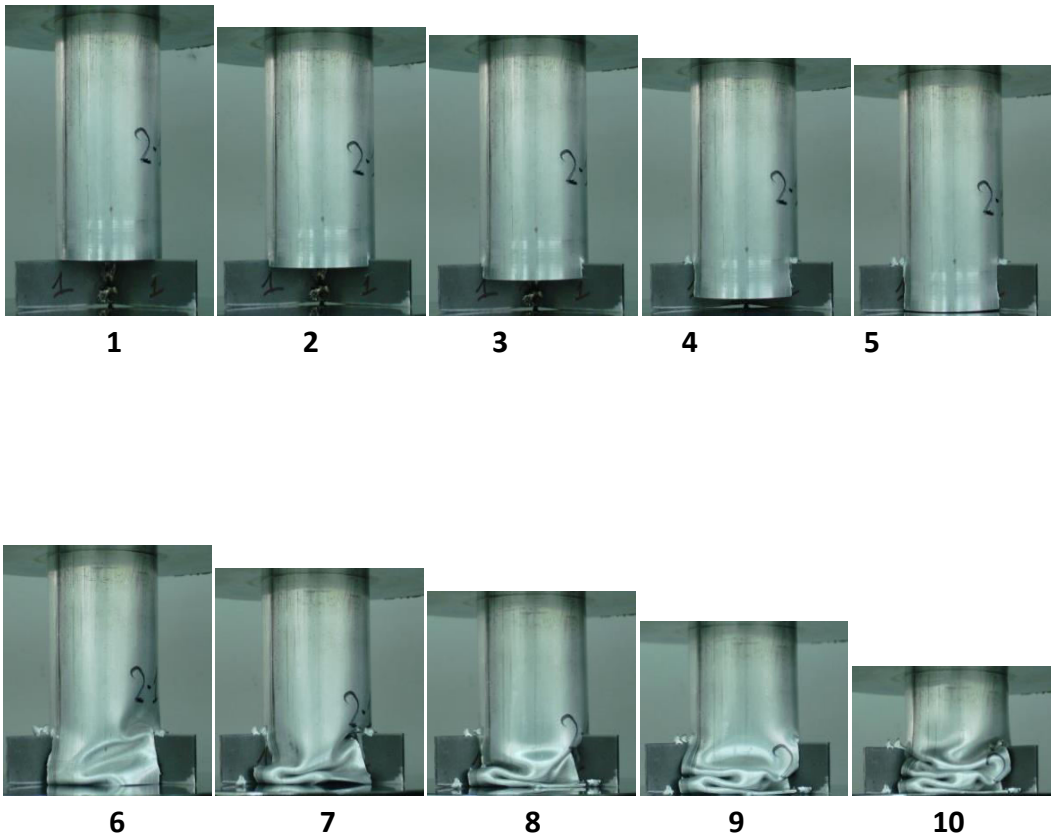
H_{tot}	30 mm
P_{max}	31,39 KN
E_{abs}	0,87 KJ
P_m	12,42 KN
CFE	0,39
SEA	30 KJ/kg

Πίνακας 3.3.α 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης

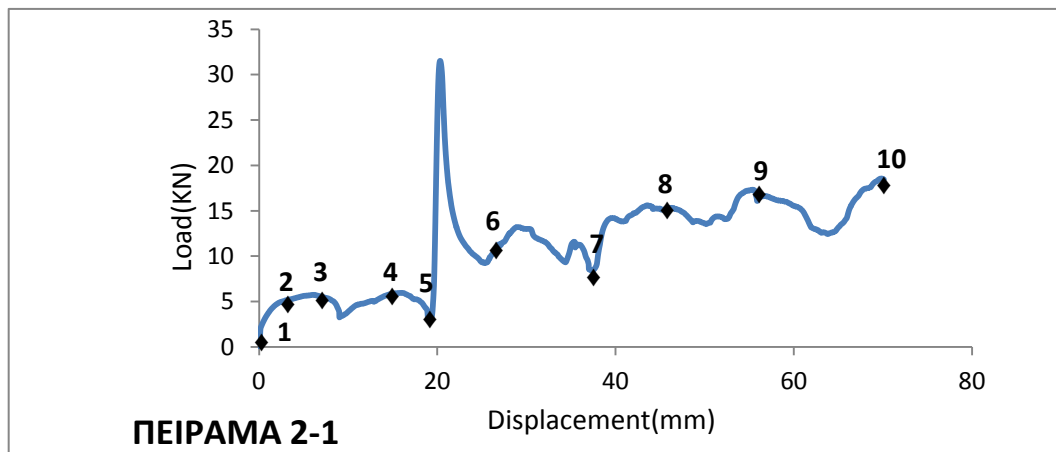
Τρόπος κατάρρευσης

Το δοκίμιο A2, με ύψος 100 mm, διάμετρο 50mm και πάχος 1mm παρουσίασε έναν μη εκτατό τρόπο κατάρρευσης, που χαρακτηρίζεται από πέντε μη εκτατούς 3D diamond λοβούς. Το αποτέλεσμα δεν ήταν απροσδόκητο, μιας και οι διαστάσεις βρίσκονται στο οριακό σημείο μεταξύ αξονοσυμμετρικής και μη κατάρρευσης ($D/t=50$). Η κατάρρευση ξεκινάει από το πάνω τμήμα, και στο σημείο δύο βλέπουμε το σχηματισμό του πρώτου λοβού. Στο σημείο τέσσερα σηματοδοτείται η ολοκλήρωση του δεύτερου, ενώ στο εννιά έχει σχηματιστεί και ο τελευταίος. Ο πρώτος σχηματίζεται με το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης, μιας και το υλικό βρίσκεται στην ελαστική περιοχή. Αφού το υλικό διαρρέυσει, απαιτείται όλο και μεγαλύτερο φορτίο για το σχηματισμό λοβών, διότι όσο συμπιέζεται τόσο μεγαλύτερη αντίδραση παρουσιάζει στην περαιτέρω παραμόρφωσή του. Στο διάγραμμα μπορούμε να δούμε πως μετά την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου, ο δεύτερος λοβός αντιστοιχεί στην περιοχή μεταξύ τεσσάρων τοπικών ακροτάτων, ενώ οι υπόλοιποι στην περιοχή μεταξύ δύο.

3.3.β) Πείραμα 2-1



Εικ. 3.3.β 1: Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης



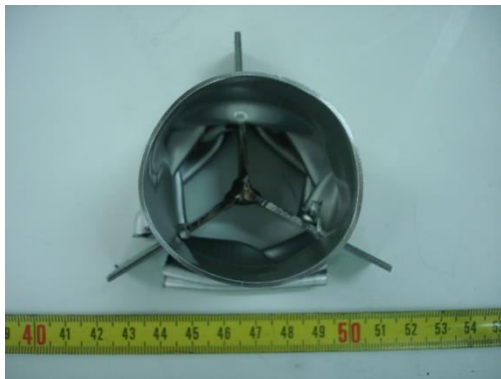
Εικ. 3.3.β 2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Πρόοψη



Πίσω όψη



Κάτοψη



Άνοψη

Εικ. 3.3.β 3: Τελικές όψεις

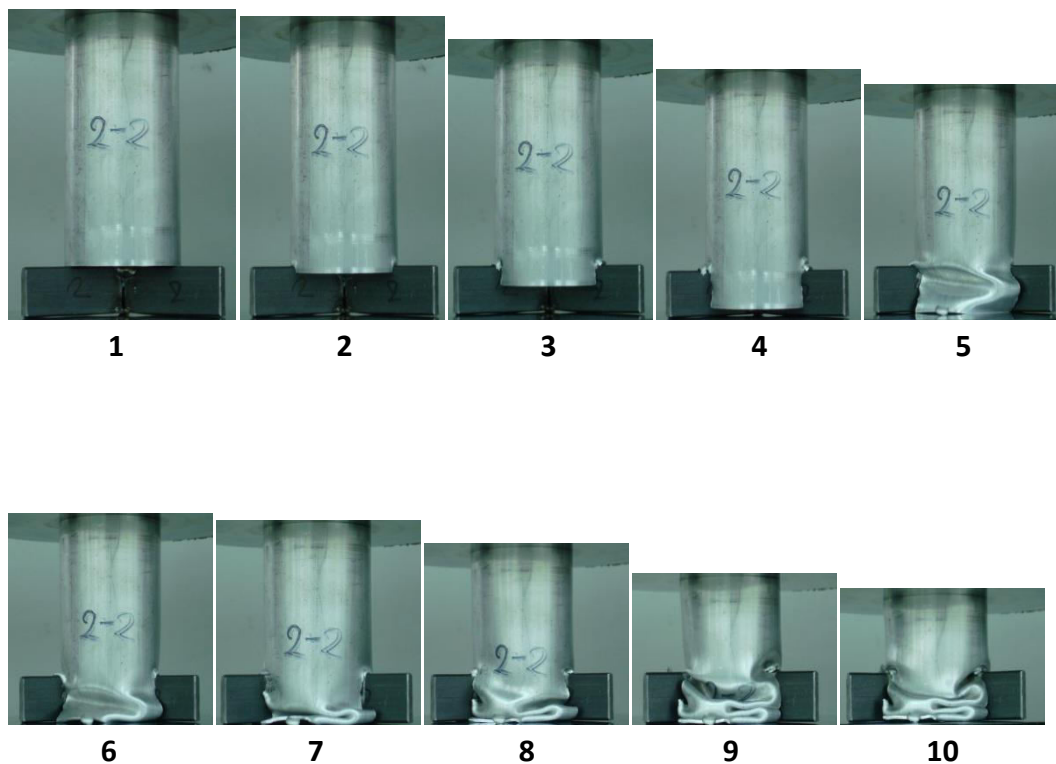
H_{tot}	30 mm
P_{max}	31,51 KN
E_{abs}	0,81 KJ
P_m	11,5 KN
CFE	0,36
SEA	27,77 KJ/kg

Πίνακας 3.3.β 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης

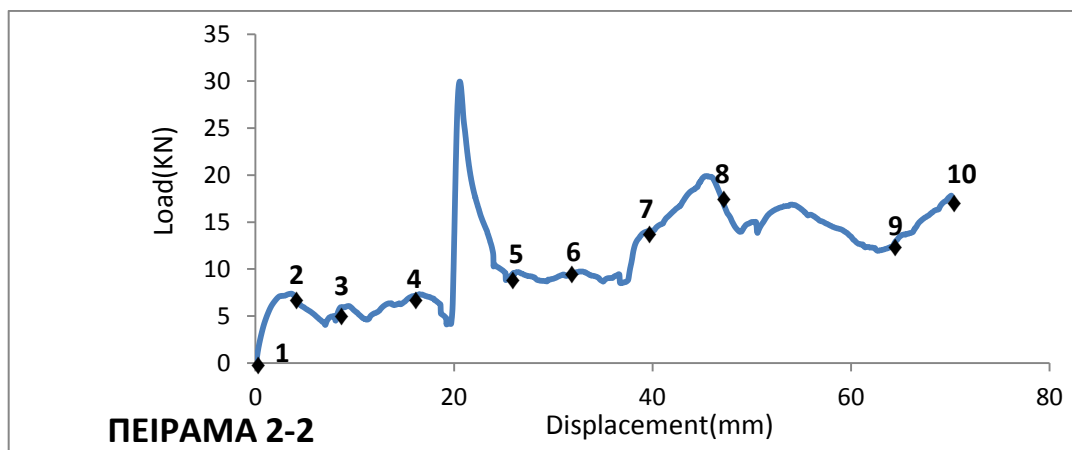
Τρόπος κατάρρευσης

Η κατάρρευση του δοκιμίου A2 έχοντας το S1 μηχανισμό triggering, χαρακτηρίζεται ως ακανόνιστη, όπως θα αναλυθεί εκτενέστερα και στα συμπεράσματα. Η αιχμηρή γεωμετρία των ορθογωνικών ελασμάτων που αποτέλεσαν τον μηχανισμό, καθώς και το αρκετά μεγάλο ύψος τους συντέλεσαν στο να ρηγματωθεί το δοκίμιο στο μέτωπο επαφής με τον μηχανισμό triggering. Το σχίσμο διαρκεί θεωρητικά έως ότου να συσσωρευθεί στο σκέλος του μηχανισμού αρκετό παραμορφωμένο υλικό ώστε να συμπεριφέρεται ως συμπαγές, και με αποτέλεσμα να μην ρηγματώνεται άλλο και η διαδικασία να συνεχιστεί με την πλαστική παραμόρφωση στο υλικό που βρίσκεται πάνω από τον μηχανισμό. Όπως βλέπουμε και στο διάγραμμα, όταν η παραμόρφωση γίνει περίπου ίση με το ύψος του μηχανισμού, τότε παρατηρείται ραγδαία αύξηση του φορτίου έως το μέγιστο, και αυτό οφείλεται στο ότι σε εκείνο το σημείο το υλικό συσσωρεύθηκε κάτω από το σκέλος του μηχανισμού, με αποτέλεσμα να ακουμπάει στο κάτω μέρος, δέχοντας μεγάλη αντίσταση. Η συσσώρευση έχει σχεδόν ολοκληρωθεί στο σημείο πέντε του διαγράμματος, όπου η παραμόρφωση είναι περίπου ίση με το ύψος του μηχανισμού.

3.3.γ) Πείραμα 2-2



Εικ. 3.3.γ 1: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



ΠΕΙΡΑΜΑ 2-2

Εικ. 3.3.γ 2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Πρόοψη

Κάτοψη

Άνοψη

Εικ. 3.3.γ 3: Τελικές όψεις

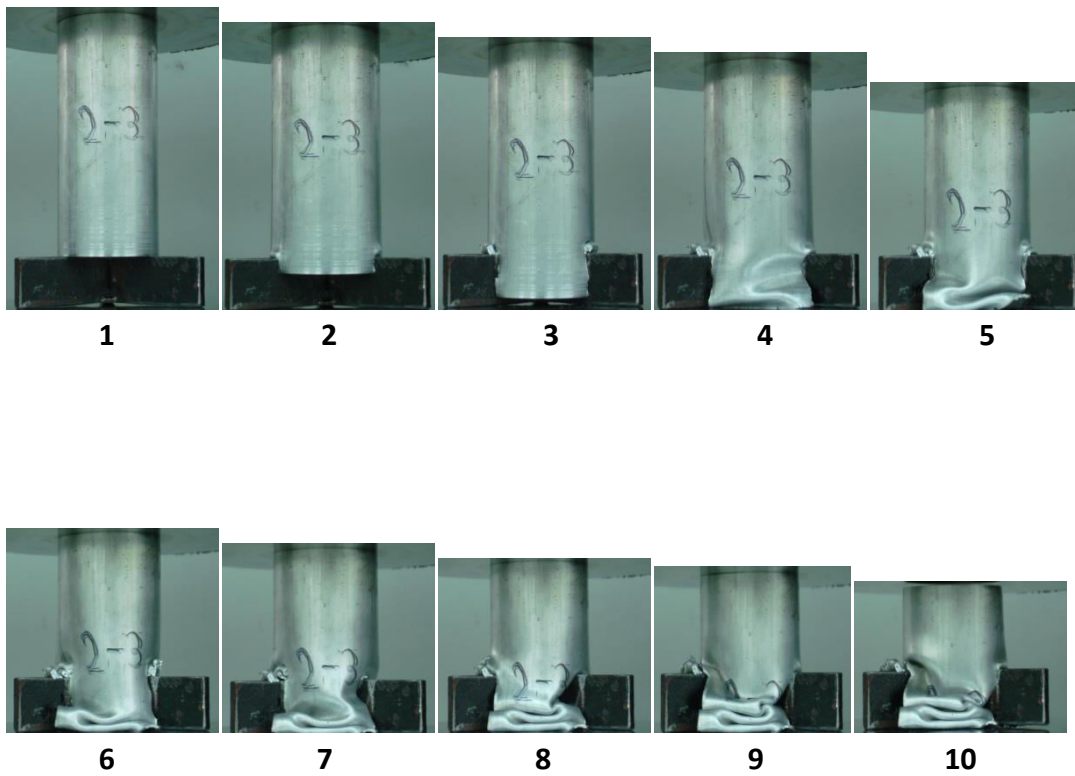
H_{tot}	30 mm
P_{max}	29,95 kN
E_{abs}	0,812 kJ
P_m	11,6 kN
CFE	0,387
SEA	28,02 kJ/kg

Πίνακας 3.3.γ 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης

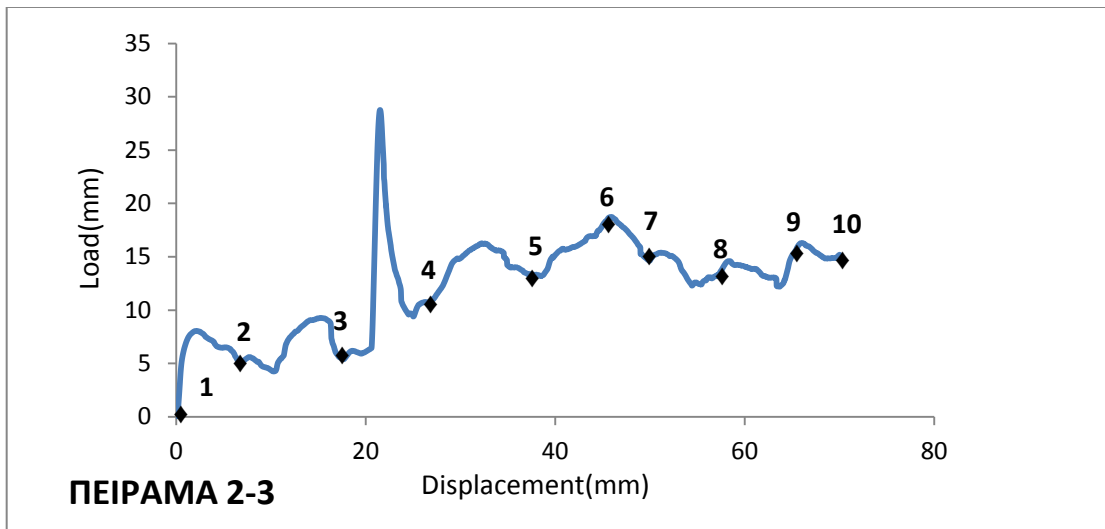
Τρόπος κατάρρευσης

Όπως ακριβώς και πριν, έχουμε έναν ακανόνιστο τρόπο κατάρρευσης που συνοδεύεται από την απώλεια της συνέχειας του δοκιμίου στο σημείο αλληλεπίδρασης με το μηχανισμό triggering. Λόγω μεγαλύτερου πλάτους των ορθογωνικών ελασμάτων, παρατηρείται ρηγμάτωση σε μεγαλύτερη επιφάνεια υλικού, πράγμα που σημαίνει πως θα συσσωρευθεί λιγότερο στο σκέλος του μηχανισμού, με αποτέλεσμα η αντίσταση που θα δεχθεί από το κάτω μέρος της διάταξης να είναι μικρότερη από ότι με τον προηγούμενο, και αυτό αποτυπώνεται στην μείωση του μέγιστου φορτίου. Επίσης η απορροφούμενη ενέργεια έχει αυξηθεί κατά ένα μικρό μέρος.

3.3.δ) Πείραμα 2-3



Εικ. 3.3.δ 1: Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Εικ. 3.3.δ 2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Πρόοψη

Πίσω Όψη



Κάτοψη

Άνοψη

Εικ. 3.3.δ 3: Τελικές όψεις

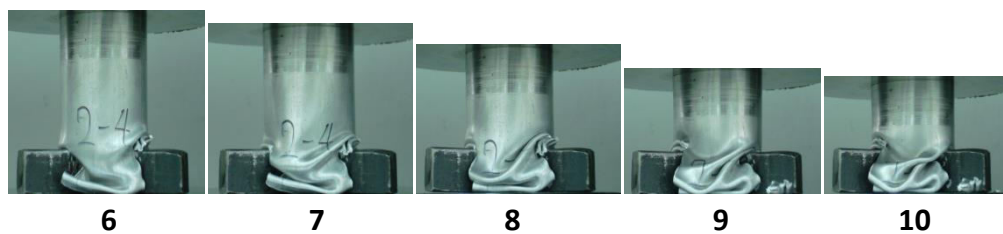
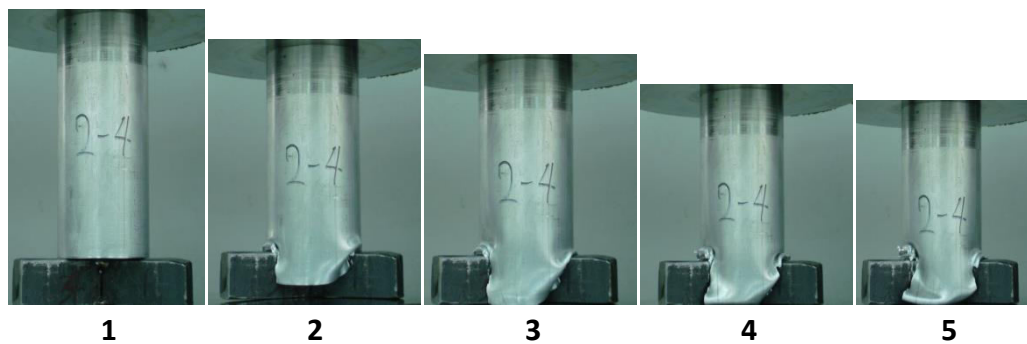
H_{tot}	30 mm
P_{max}	28,76 KN
E_{abs}	0,862 KJ
P_m	12,32 KN
CFE	0,43
SEA	29,75 KJ/kg

Πίνακας 3.3.δ 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης

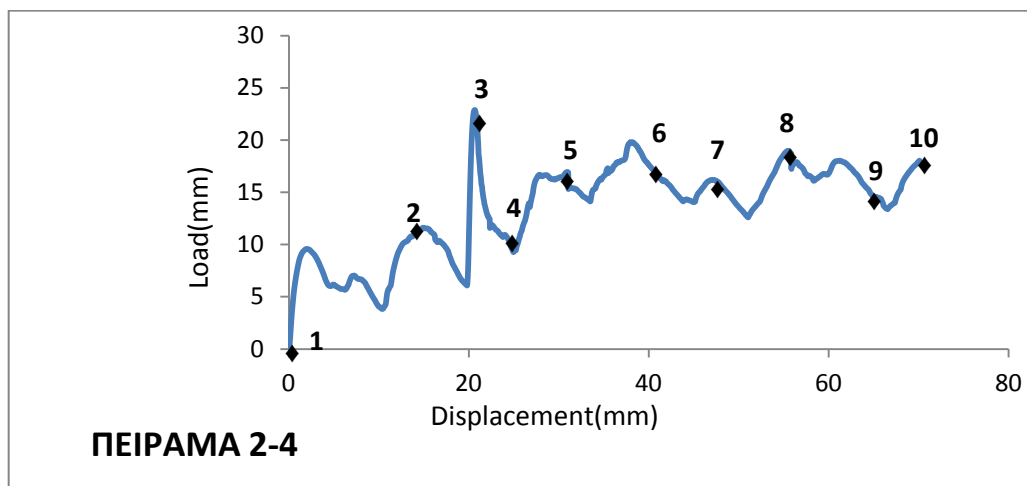
Τρόπος κατάρρευσης

Ο τρίτος μηχανισμός triggering έχει ακόμα μεγαλύτερο πλάτος, χωρίς να μεταβάλλονται τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του, όπως το ύψος και η αιχμηρή γεωμετρία, οπότε δεν αποτελεί έκπληξη πως και εδώ έχουμε βίαιη και ακανόνιστη κατάρρευση. Το αυξημένο πλάτος οδηγεί σε αστοχία περισσότερου υλικού, με το μέγιστο φορτίο να συναντάται μεταξύ των σημείων τρία και τέσσερα στο διάγραμμα. Ακριβώς για αυτό τον λόγο παρατηρείται μείωση του μέγιστου φορτίου σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα.

3.3.ε) Πείραμα 2-4



Εικ. 3.3.ε 1: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Εικ.3.3.ε 2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Πρόοψη

Πίσω Όψη



Κάτοψη

Άνοψη

Εικ. 3.3.ε 3: Τελικές όψεις

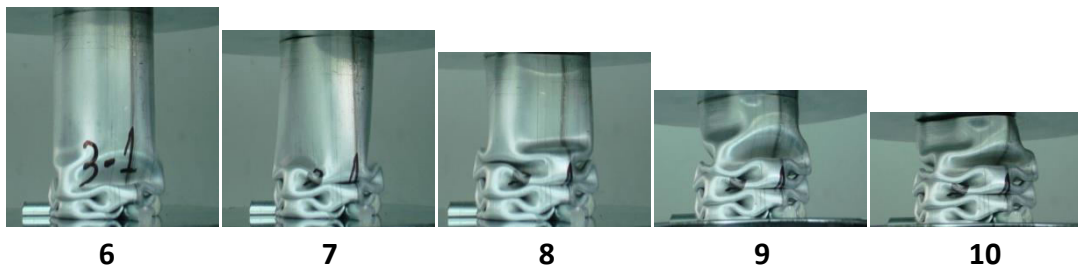
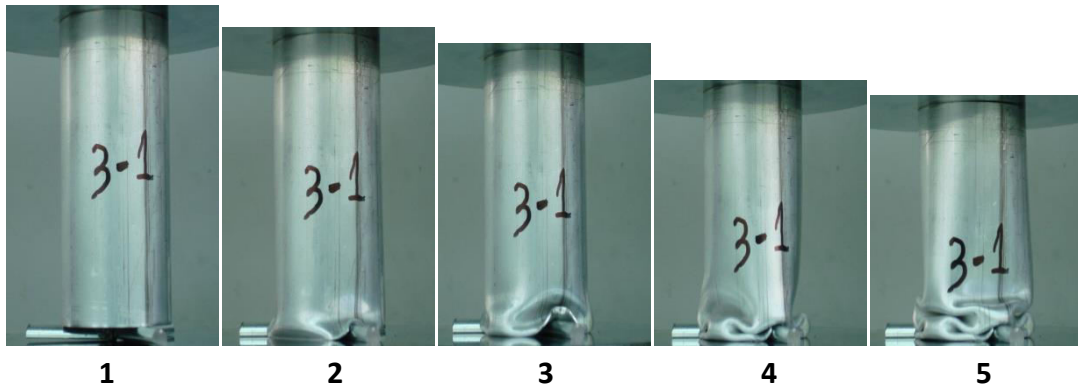
H_{tot}	30 mm
P_{max}	22,88 KN
E_{abs}	0,942 KJ
P_m	13,46 KN
CFE	0,59
SEA	32,51 KJ/kg

Πίνακας 3.3.ε 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης

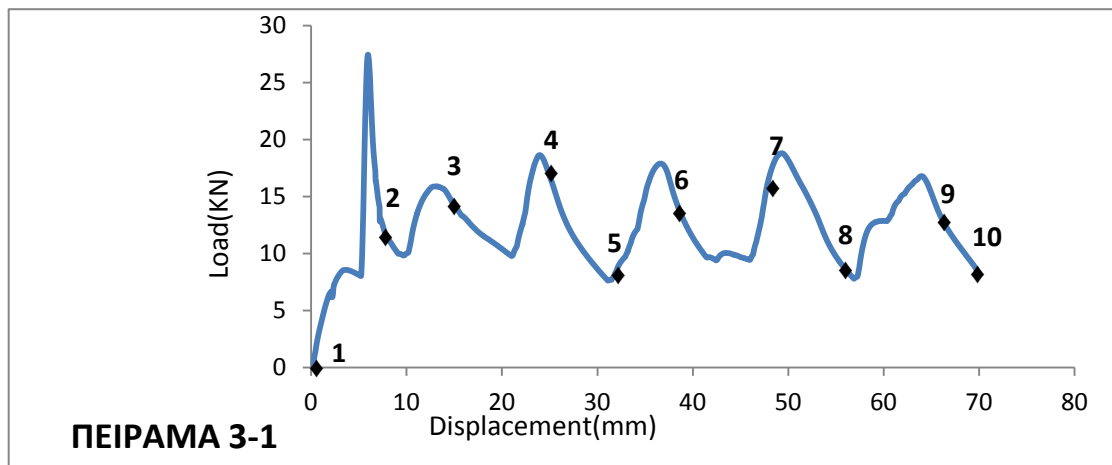
Τρόπος κατάρρευσης

Ο τέταρτος μηχανισμός triggering της σειράς, ο S4, έχει το μεγαλύτερο πλάτος, και αξιοποιώντας την πείρα και τα συμπεράσματα από τα προηγούμενα πειράματα μπορούμε να προβλέψουμε με ευκολία τον τρόπο μεταβολής των μεγεθών της κατάρρευσης και τον τρόπο της. Ακόμα μεγαλύτερο πλάτος οδηγεί σε πιο βίαιη κατάρρευση, με σημαντικότερη μείωση του μέγιστου φορτίου από τις προηγούμενες περιπτώσεις, αφού η αντίσταση του υλικού είναι αρκετά μικρότερη καθώς σημειώνεται μεγαλύτερη αστοχία στο μέτωπο αλληλεπίδρασης με τον μηχανισμό triggering. Στο σημείο τρια αντιστοιχεί η φωτογραφία που απεικονίζει το δοκίμιο πολύ μικρό χρονικό διάστημα αφού έφθασε στο μέγιστο φορτίο, και στα επόμενα η ρηγμάτωση έχει ολοκληρωθεί και παρατηρούμε την πλαστική παραμόρφωση του υλικού που βρίσκεται πάνω από τον μηχανισμό.

3.3.ζ) Πείραμα 3-1



Εικ. 3.3.ζ 1: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Εικ. 3.3.ζ 2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Πρόοψη

Πίσω Όψη



Κάτοψη

Άνοψη

Εικ. 3.3.ζ 3: Τελικές όψεις

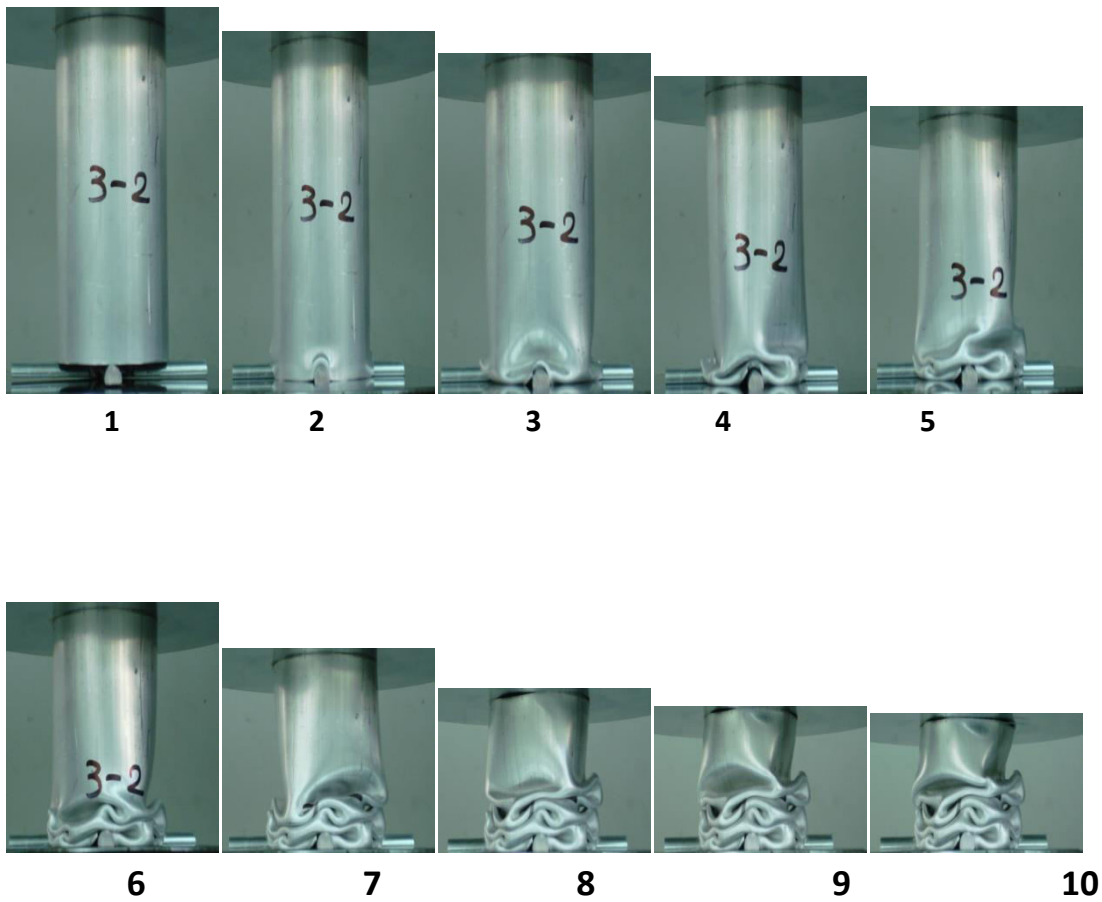
H_{tot}	30 mm
P_{max}	27,44 KN
E_{abs}	0,866 KJ
P_m	12,4 KN
CFE	0,45
SEA	29,88 KJ/kg

Πίνακας 3.3.ζ 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης

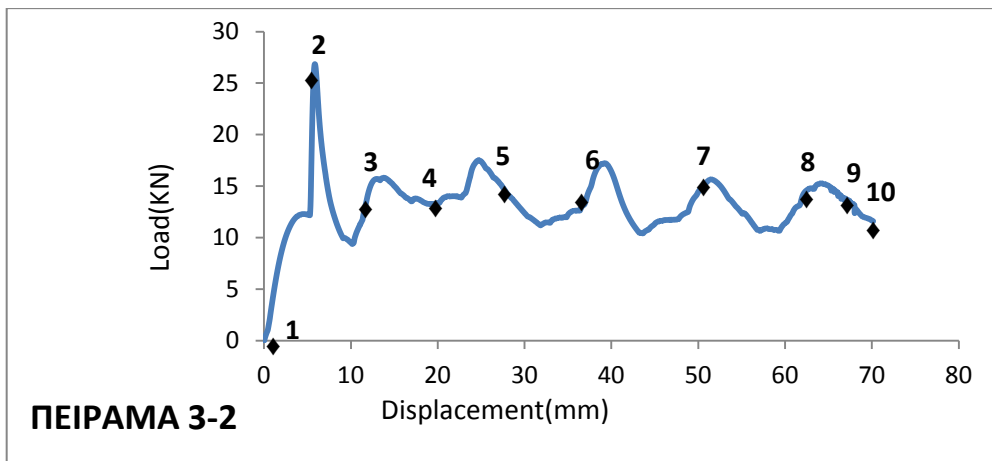
Τρόπος κατάρρευσης

Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου με την επιβολή τριπλού triggering ήταν μη αξονοσυμμετρικός, και σχηματίστηκαν έξι 3D diamond λοβοί. Στο σημείο ένα βλέπουμε την ολοκλήρωση του πρώτου λοβού, στο πέντε του τρίτου και στο οκτώ του πέμπτου. Κάθε λοβός είναι μετατοπισμένος σε σχέση με τον προηγούμενο κατά 60 μοίρες, και η ολοκλήρωσή του ταυτίζεται με τα τοπικά ελάχιστα του διαγράμματος. Στα τοπικά μέγιστα η διατομή του λοβού έχει διαμορφωθεί, και έτσι το υλικό δεν παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση, με συνέπεια το φορτίο να μειώνεται μέχρι το εκάστοτε τοπικό ελάχιστο, όπου και ο λοβός έχει ολοκληρωθεί. Περίπου στα 5mm παρατηρείται ραγδαία άνοδος στο φορτίο μέχρι να φτάσει στο μέγιστο, διότι σε εκείνο το σημείο το δοκίμιο έχει διαπεράσει τον μηχανισμό και συναντάει αντίσταση από την κάτω πλάκα.

3.3.η) Πείραμα 3-2



Εικ. 3.3.η 1: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Εικ. 3.3.η 2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Πρόψη



Πίσω Όψη



Κάτοψη



Άνοψη

Εικ. 3.3.η 3: Τελικές όψεις

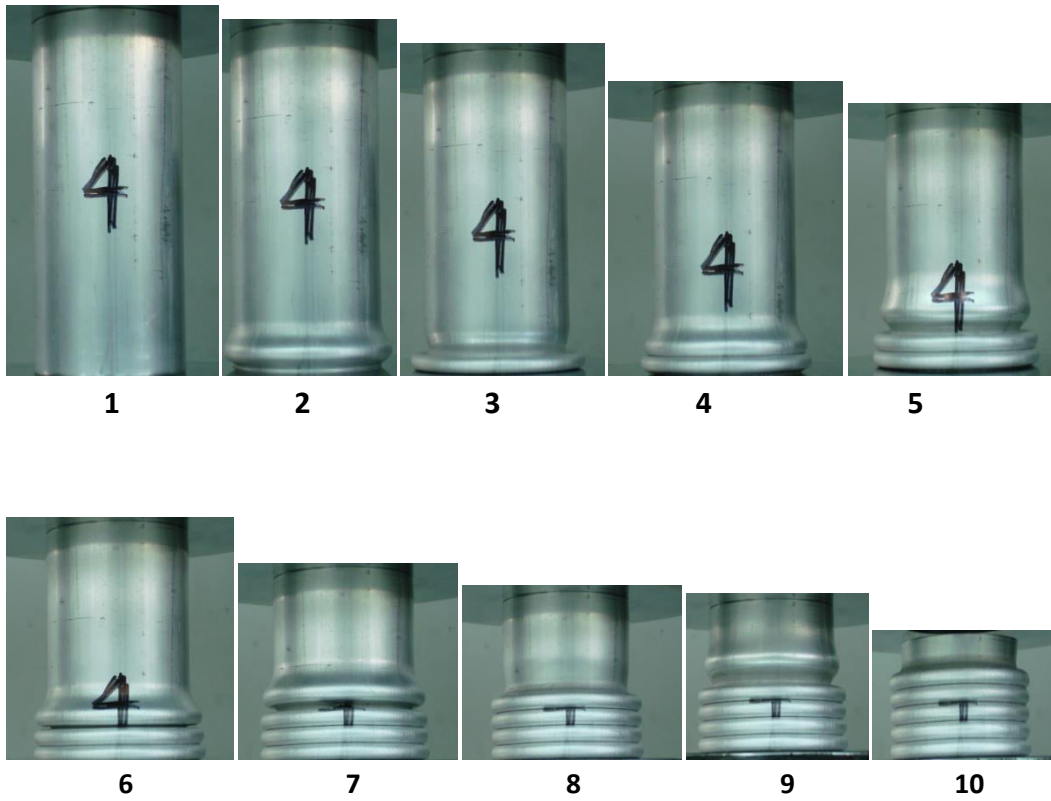
H_{tot}	30 mm
P_{max}	26,84 KN
E_{abs}	0,923 KJ
P_m	13,19 KN
CFE	0,491
SEA	31,86 KJ/kg

Πίνακας 3.3.η 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης

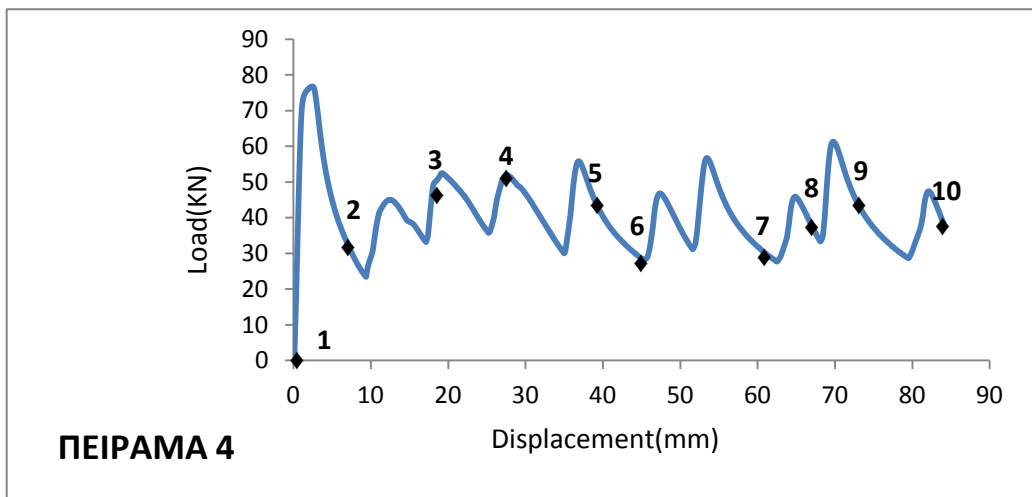
Τρόπος κατάρρευσης

Το δοκίμιο παρουσίασε έναν τρόπο κατάρρευσης μη εκτατό, με τον σχηματισμό έξι λοβών 3D diamond. Το τετραπλό triggering προσπάθησε να επιβάλει στο δοκίμιο να σχηματίσει 2D diamond λοβούς ελλειπτικού σχήματος, δεν τα κατάφερε όμως. Για ολοκλήρωση του κάθε λοβού αντιστοιχούν στο διάγραμμα δύο τοπικά ακρότατα, στο τοπικό μέγιστο γίνεται η διαμόρφωση της μορφής του και στο μετέπειτα ελάχιστο η ολοκλήρωση. Το σημείο δύο αντιστοιχεί σε ένα μικρό χρονικό διάστημα πριν την επίτευξη του μέγιστου φορτίου, με το υλικό να βρίσκεται στην ελαστική περιοχή, το τρια στο σημείο όπου διαμορφώνεται ο δεύτερος λοβός και το τέσσερα στην ολοκλήρωσή του. Για τον μετέπειτα σχηματισμό λοβών απαιτείται μικρότερο φορτίο, μιας και το υλικό αντιστέκεται λιγότερο, λόγω του τραυματισμού του.

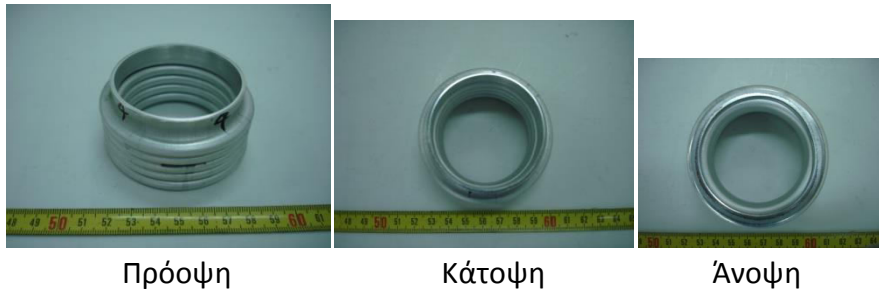
3.3.θ) Πείραμα 4



Εικ. 3.3.θ 1: Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Εικ. 3.3.θ 2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Εικ. 3.3.θ 3: Τελικές όψεις

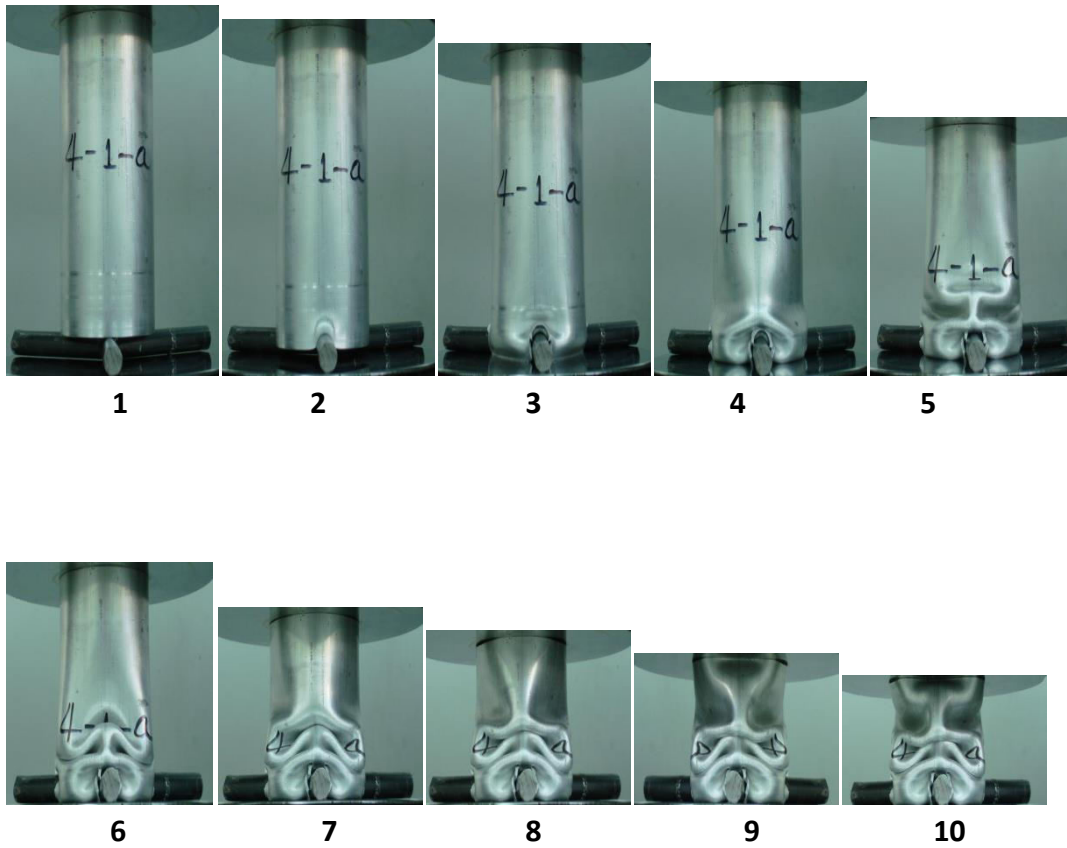
H_{tot}	36 mm
P_{max}	76,77 KN
E_{abs}	3,47 KJ
P_m	41,31 KN
CFE	0,538
SEA	42 KJ/kg

Πίνακας 3.3.θ 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης

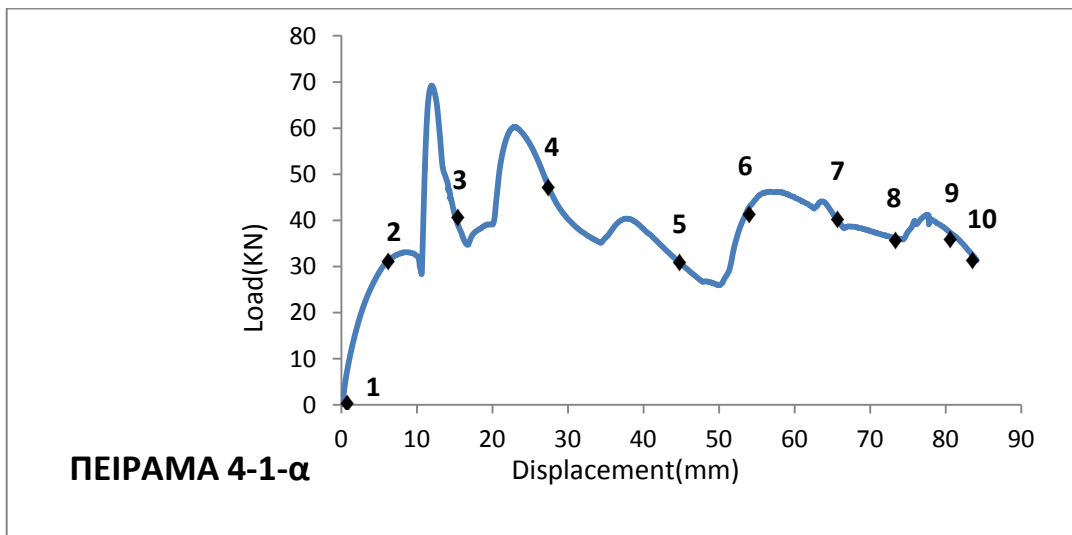
Τρόπος κατάρρευσης

Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου A3 ήταν αξονοσυμμετρικός, με τον σχηματισμό πέντε λοβών. Βάσει της πειραματικής εμπειρίας, αυτό ήταν αναμενόμενο, μιας και ο λόγος της διαμέτρου προς του πάχους του είναι 60. Ο πρώτος λοβός σχηματίζεται με το μέγιστο φορτίο, και στο διάγραμμα οι επόμενοι τέσσερις αντιστοιχούν σε τέσσερα τοπικά ακρότατα, κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί σε σχηματισμό μιας πλαστικής άρθρωσης και κάθε λοβός αποτελείται από τέσσερις. Το φορτίο που απαιτείται για τον σχηματισμό των αξονοσυμμετρικών λοβών διαρκώς αυξάνεται λόγω της περαιτέρω συμπίεσης του υλικού. Στο τελευταίο σημείο του διαγράμματος βλέπουμε πως ξεκινάει η διαμόρφωση έκτου λοβού, που δεν προλαβαίνει όμως να ολοκληρωθεί, μιας και στα 84mm έχουμε επιβάλει τερματισμό της συμπίεσης. Στο σημείο έξι βλέπουμε την ολοκλήρωση του τρίτου λοβού και στο σημείο επτά του τέταρτου.

3.3.ι) Πείραμα 4-1-α



Εικ. 3.3.ι 1: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Εικ. 3.3.ι 2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Πρόοψη



Πίσω Όψη



Κάτοψη



Άνοψη

Εικ. 3.3.ι 3: Τελικές όψεις

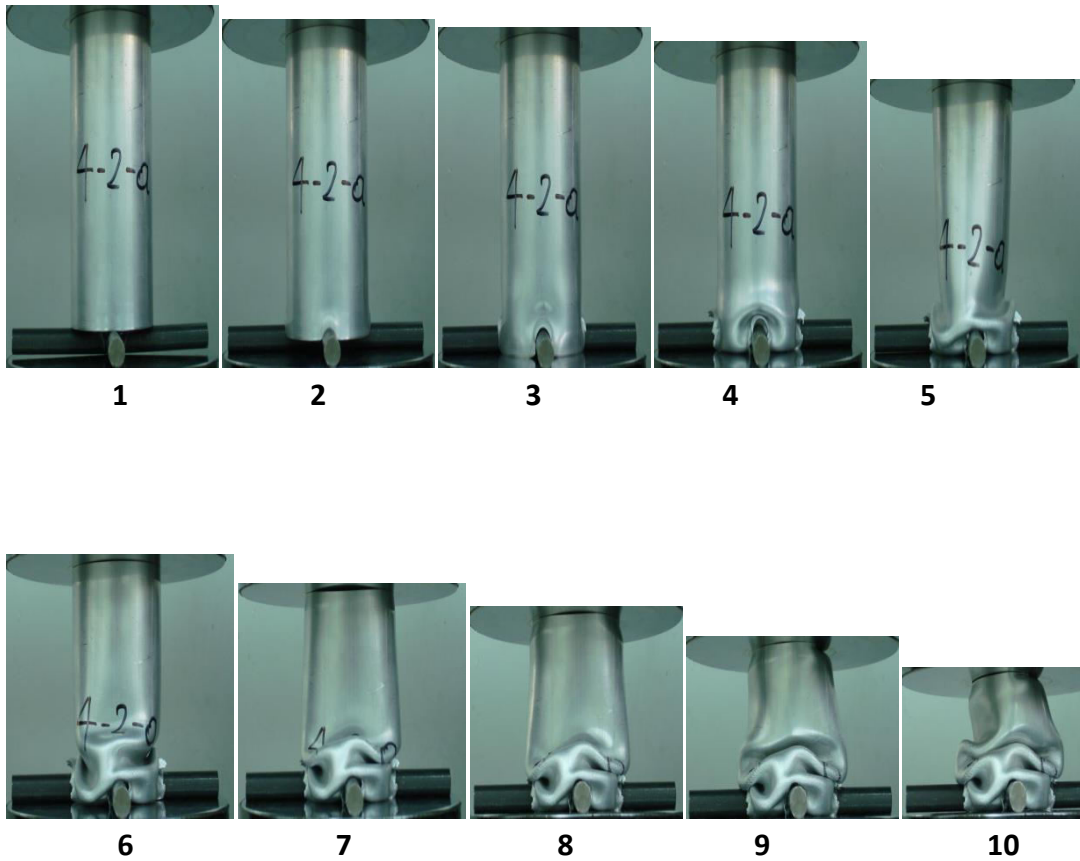
H_{tot}	36 mm
P_{max}	69,18 KN
E_{abs}	3,248 KJ
P_m	38,66 KN
CFE	0,558
SEA	39,32 KJ/kg

Πίνακας 3.3.ι 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης

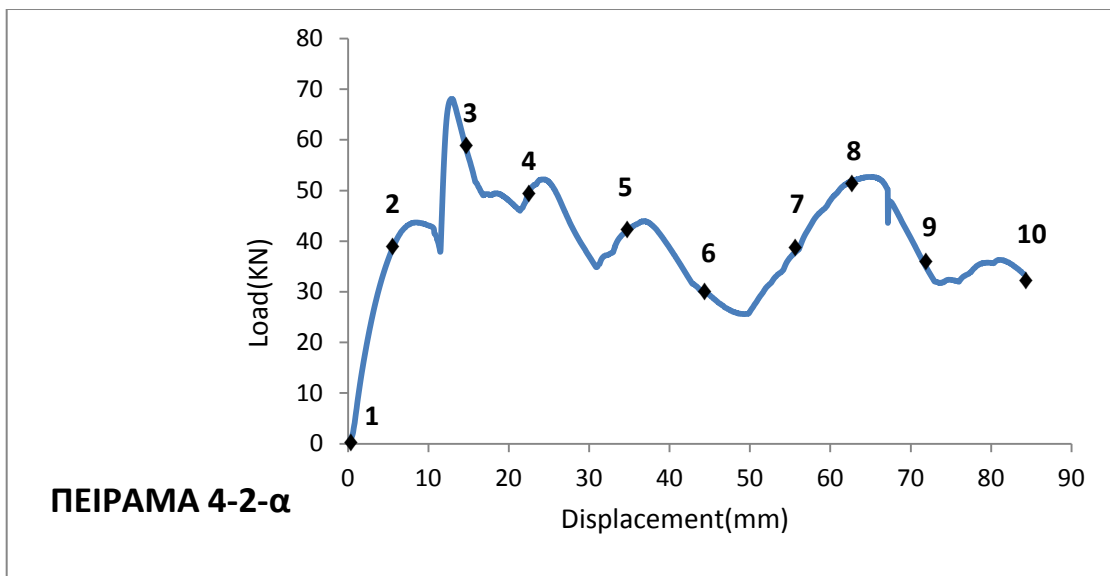
Τρόπος κατάρρευσης

Το δοκίμιο με την επιβολή τριπλού triggering παρουσίασε μη εκτατό τρόπο κατάρρευσης, σχηματίζοντας τέσσερις 3D diamond λοβούς. Λόγω του αρκετά μικρότερου ύψους από τους τριπλούς μηχανισμούς triggering της πρώτης σειράς αλλά και της μη αιχμηρής γεωμετρίας, η ρηγμάτωση ελαχιστοποιήθηκε και κύριος παράγοντας απορρόφησης ενέργειας είναι η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου.

3.3.κ) Πείραμα 4-2-α



Εικ. 3.3.λ 1: Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Εικ. 3.3.λ 2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Πρόοψη

Πίσω Όψη

Πλάγια όψη από δεξιά



Πλάγια όψη από αριστερά

Κάτοψη

Άνοψη

Εικ. 3.3.λ 3: Τελικές όψεις

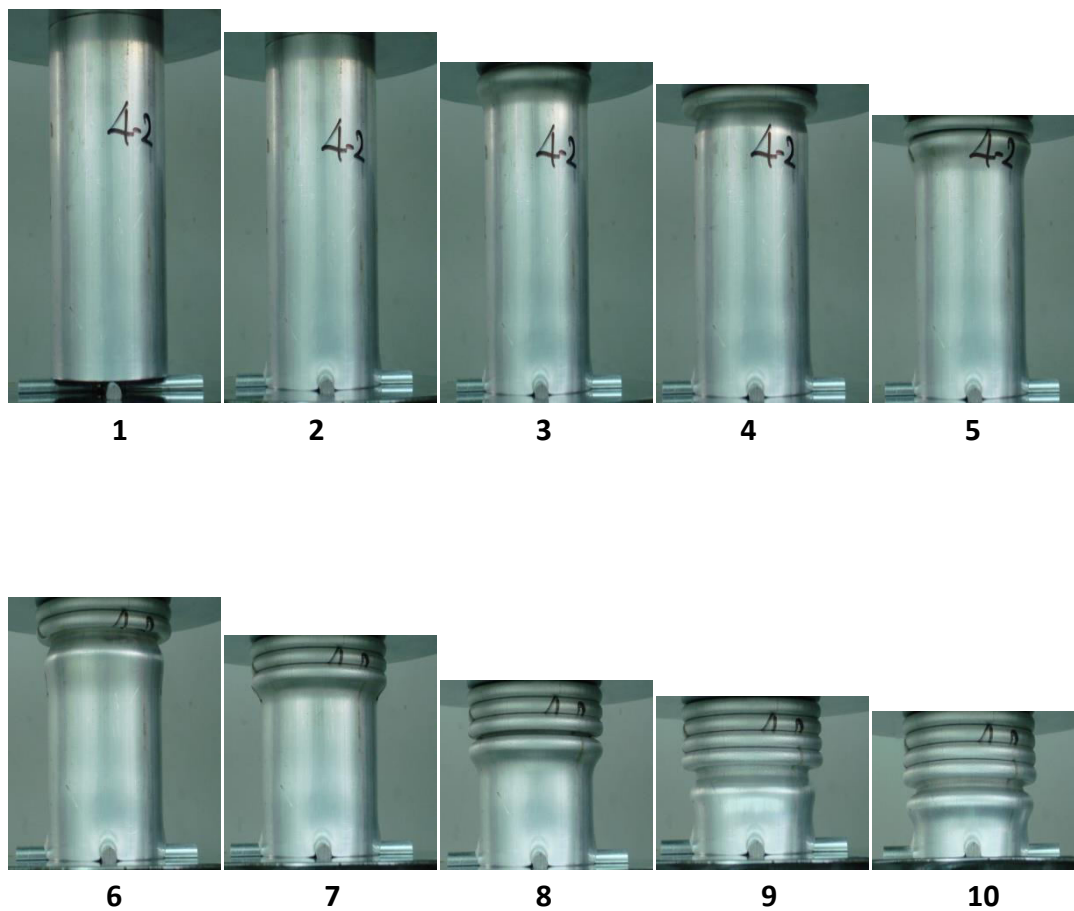
H_{tot}	36 mm
P_{max}	68,07 KN
E_{abs}	3,36 KJ
P_m	40 KN
CFE	0,587
SEA	40,66 KJ/kg

Πίνακας 3.3.λ 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης

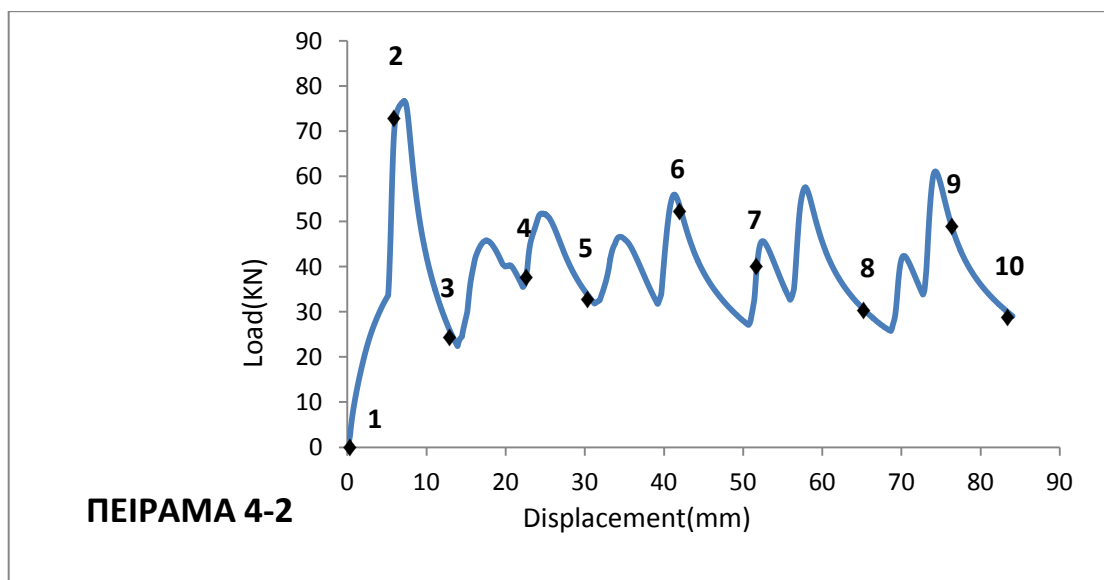
Τρόπος κατάρρευσης

Το συγκεκριμένο πείραμα αξονικής συμπίεσης παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς βλέπουμε πως ο μηχανισμός triggering επέβαλε στο δοκίμιο μη αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης σχηματίζοντας 2D diamond λοβούς, σε αντίθεση με την περίπτωση του τριπλού triggering. Οι λοβοί που σχηματίστηκαν είναι τρεις, ελλειπτικής γεωμετρίας, και ο καθένας απέχει από τον προηγούμενο 90 μοίρες.

3.3.λ) Πείραμα 4-2



Εικ. 3.3.κ 1: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Εικ. 3.3.κ 2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Πρόοψη

Κάτοψη

Άνοψη

Εικ. 3.3.κ 3: Τελικές όψεις

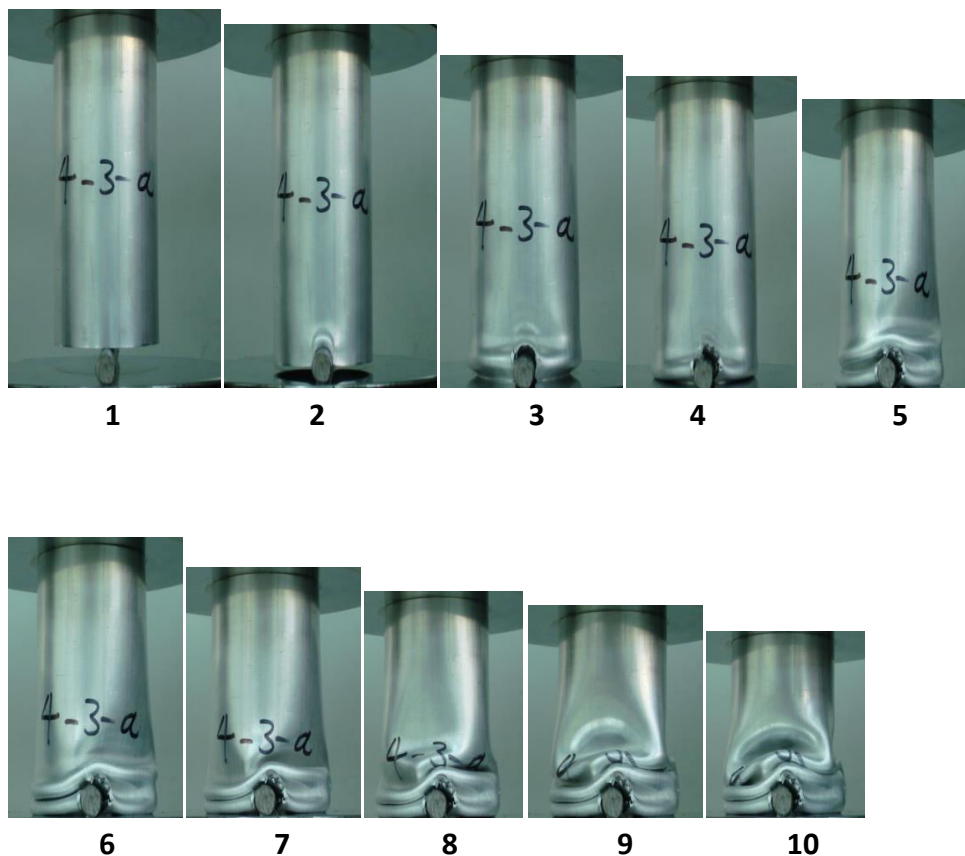
H_{tot}	36 mm
P_{max}	76,41 KN
E_{abs}	3,31 KJ
P_m	39,43 KN
CFE	0,516
SEA	40,1 KJ/kg

Πίνακας 3.3.κ 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης

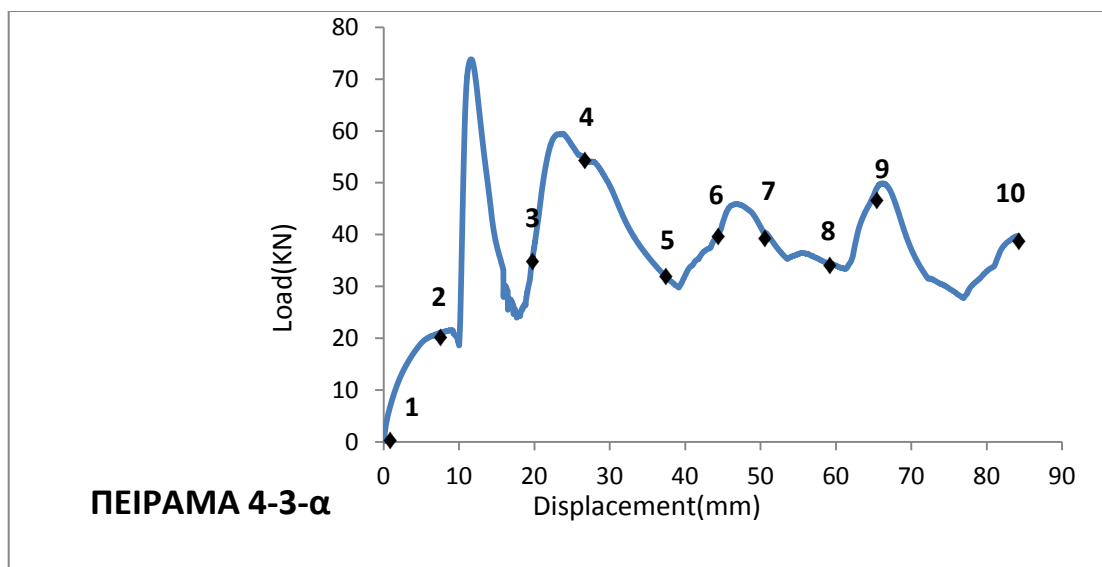
Τρόπος κατάρρευσης

Το δοκίμιο A3 κατέρρευσε παρουσιάζοντας αξονοσυμμετρικό τρόπο, σχηματίζοντας πέντε εκατούς λοβούς, όπως ακριβώς και στο πείραμα χωρίς triggering. Η μεγάλη διαφορά διαστάσεων του δοκιμίου και του μηχανισμού (η διάμετρος του A3 είναι 60mm ενώ το πλάτος του T2 7mm και το ύψος του μόλις 4,5mm) συντέλεσαν στο να μην μεταβληθεί ο τρόπος κατάρρευσης και το συμπέρασμα αυτό μας οδήγησε στην κατασκευή των υπόλοιπων μηχανισμών για περαιτέρω διερεύνηση.

3.3.μ) Πείραμα 4-3-α



Εικ. 3.3.μ 1: Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Εικ. 3.3.μ 2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Πρόοψη

Πίσω όψη

Πλάγια όψη από δεξιά



Πλάγια όψη από αριστερά



Κάτοψη



Άνοψη

Εικ. 3.3.μ 3: Τελικές όψεις

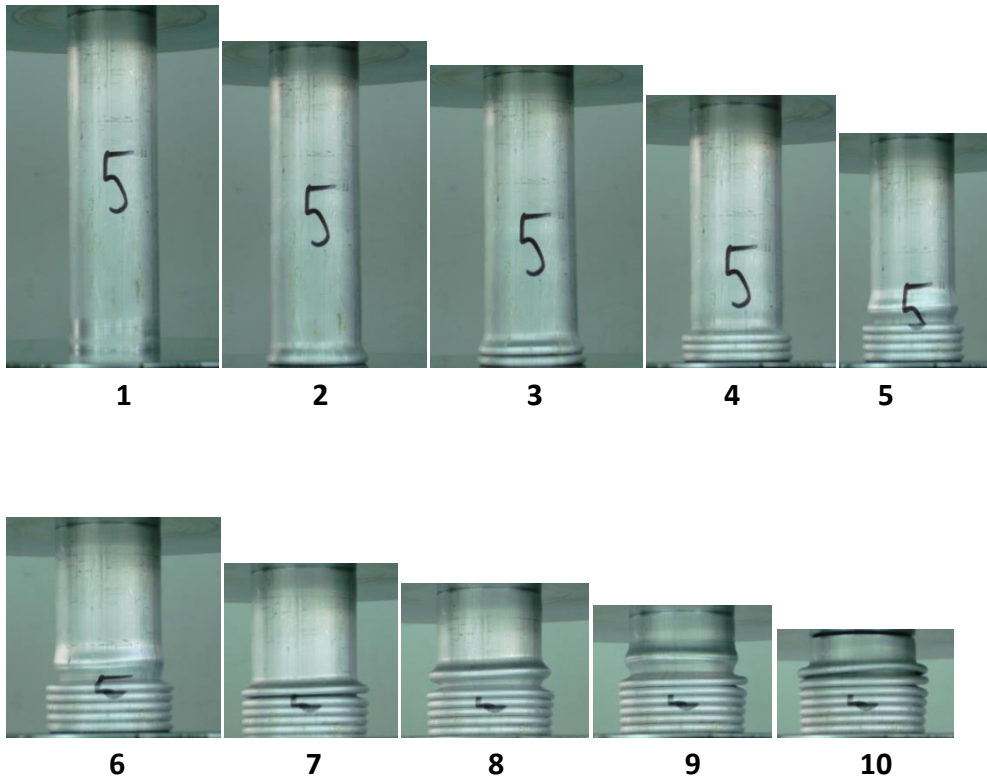
H_{tot}	36 mm
P_{max}	73,82 KN
E_{abs}	3,16 KJ
P_m	37,62 KN
CFE	0,509
SEA	38,26 KJ/kg

Πίνακας 3.3.μ 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης

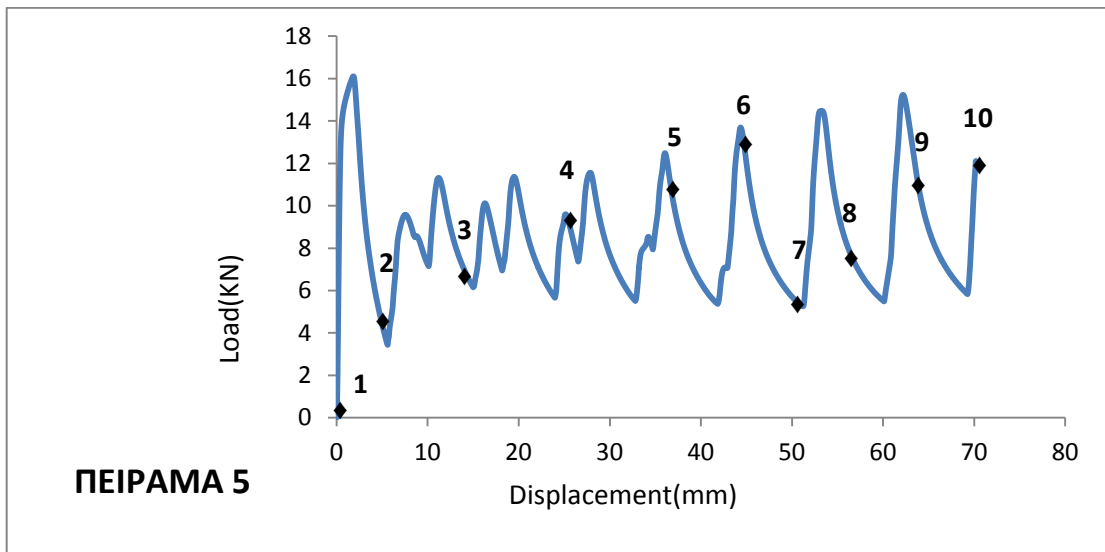
Τρόπος κατάρρευσης

Το δοκίμιο A3 παρουσίασε έναν μη αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης με την παρουσία του διπλού triggering του μηχανισμού U1. Παρατηρώντας την άνοψη των τελικών φωτογραφιών βλέπουμε πως ο μηχανισμός προσπάθησε να του επιβάλλει τον σχηματισμό 2D diamond λοβών, όμως στη συνέχεια διαμορφώθηκαν 3D diamond, και τέσσερις στον αριθμό. Αυτό φαίνεται και από την κάτοψη του παραμορφωμένου δοκιμίου, όπου παρατηρούμε μια διατομή ελλειπτικού σχήματος. Ο πρώτος λοβός διαμορφώνεται με το μέγιστο φορτίο στο διάστημα μεταξύ των σημείων δύο και τρία. Στο διάστημα μεταξύ των σημείων τρία και πέντε σχηματίζεται ο δεύτερος. Για τον τρίτο απαιτείται λιγότερο φορτίο από τους προηγούμενους λόγω του τραυματισμένου υλικού, ενώ στη διαμόρφωση του τέταρτου το φορτίο αυξάνεται λόγω της συμπίεσής του.

3.3.v) Πείραμα 5



Εικ. 3.3.v 1: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Εικ. 3.3.v 2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Πρόοψη

Κάτοψη

Άνοψη

Εικ. 3.3.v 3: Τελικές όψεις

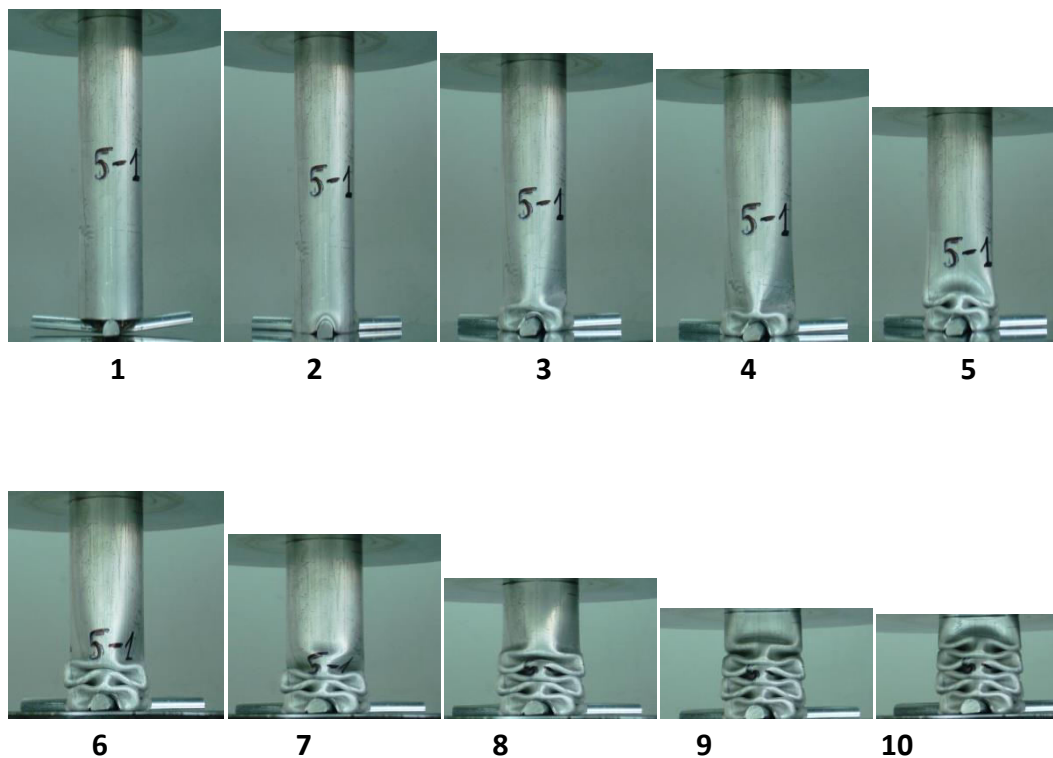
H_{tot}	30 mm
P_{max}	16,1 kN
E_{abs}	0,6 kJ
P_m	8,58 kN
CFE	0,532
SEA	34,92 kJ/kg

Πίνακας 3.3.v 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης

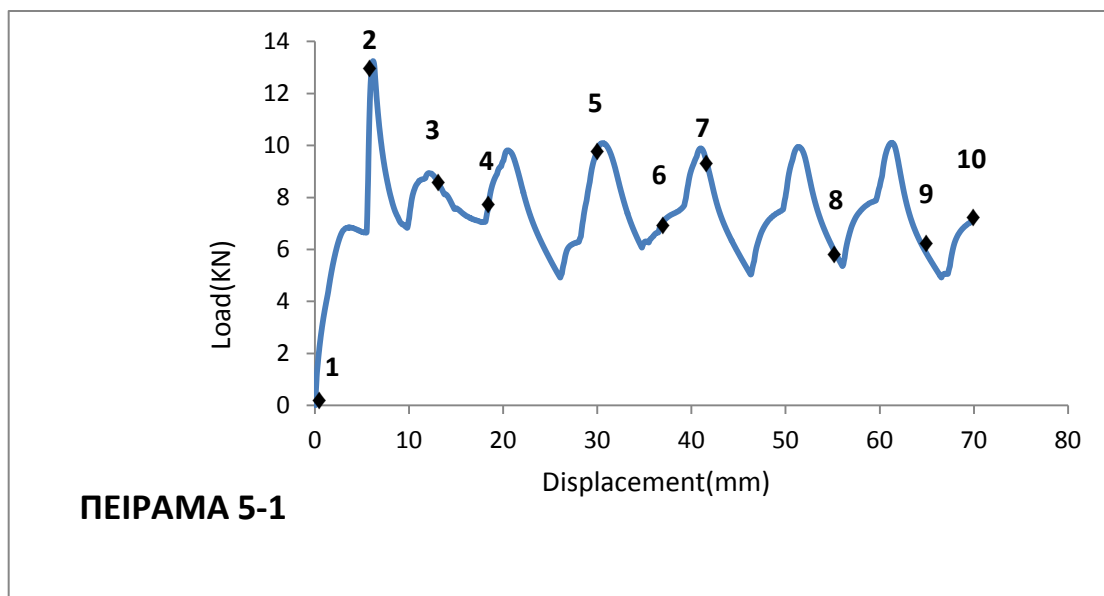
Τρόπος κατάρρευσης

Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου A1 ήταν αξονοσυμμετρικός, με σχηματισμό οκτώ εκατών λοβών. Στο σημείο δύο του διαγράμματος βλέπουμε την ολοκλήρωση του πρώτου λοβού, του οποίου η μορφή σχηματίζεται πριν το υλικό εξέλθει από την πλαστική περιοχή. Όσο αφορά τους υπόλοιπους τέσσερις, για την ολοκλήρωσή τους αντιστοιχούν τέσσερα τοπικά ακρότατα, ενώ για τους τελευταίους τρεις δύο. Το φορτίο που απαιτείται για την ολοκλήρωση των λοβών όλο και αυξάνεται καθώς το υλικό παραμορφώνεται πλαστικά και παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση. Οι δύο τελευταίοι λοβοί παρουσιάζουν μια μικρή ασυμμετρία που οφείλεται σε κάποιες ατέλειες της γεωμετρίας του δοκιμίου

3.3.ξ) Πείραμα 5-1



Εικ. 3.3.ξ 1: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



ΠΕΙΡΑΜΑ 5-1

Εικ. 3.3.ξ 2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Πρόοψη

Πίσω όψη



Κάτοψη

Άνοψη

Εικ. 3.3.ξ 3: Τελικές όψεις

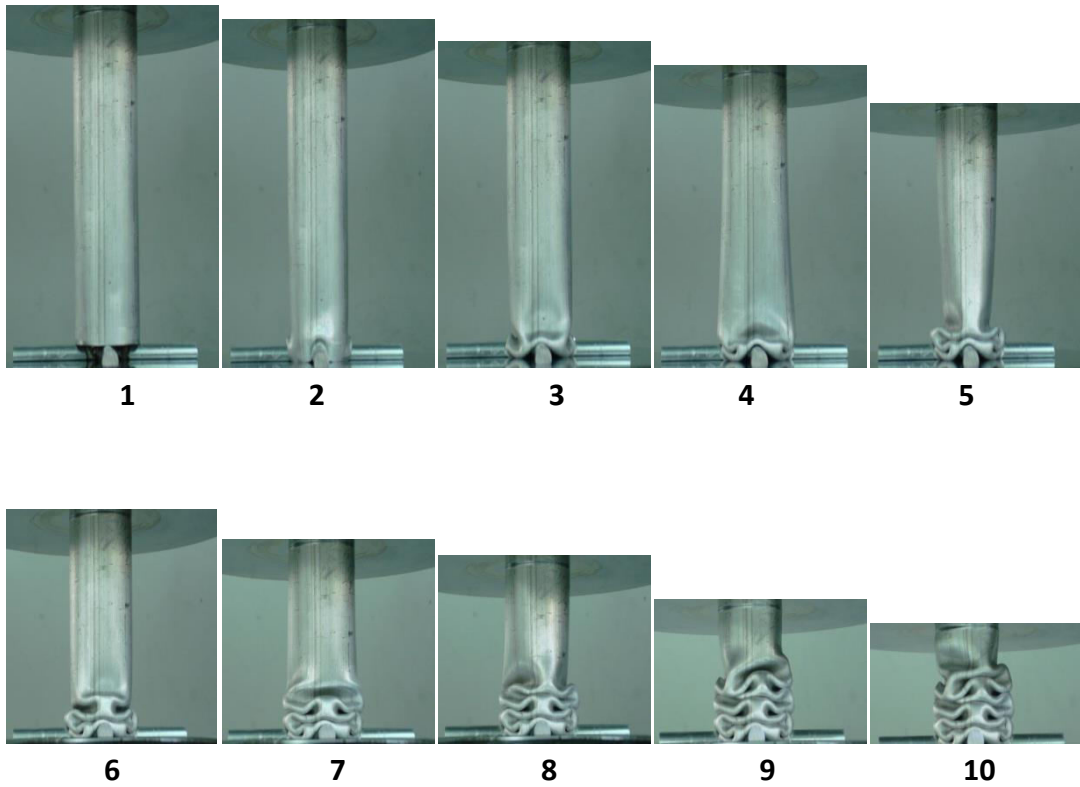
H_{tot}	30 mm
P_{max}	13,24 KN
E_{abs}	0,52 KJ
P_m	7,44 KN
CFE	0,56
SEA	30,3 KJ/kg

Πίνακας 3.3.ξ 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης

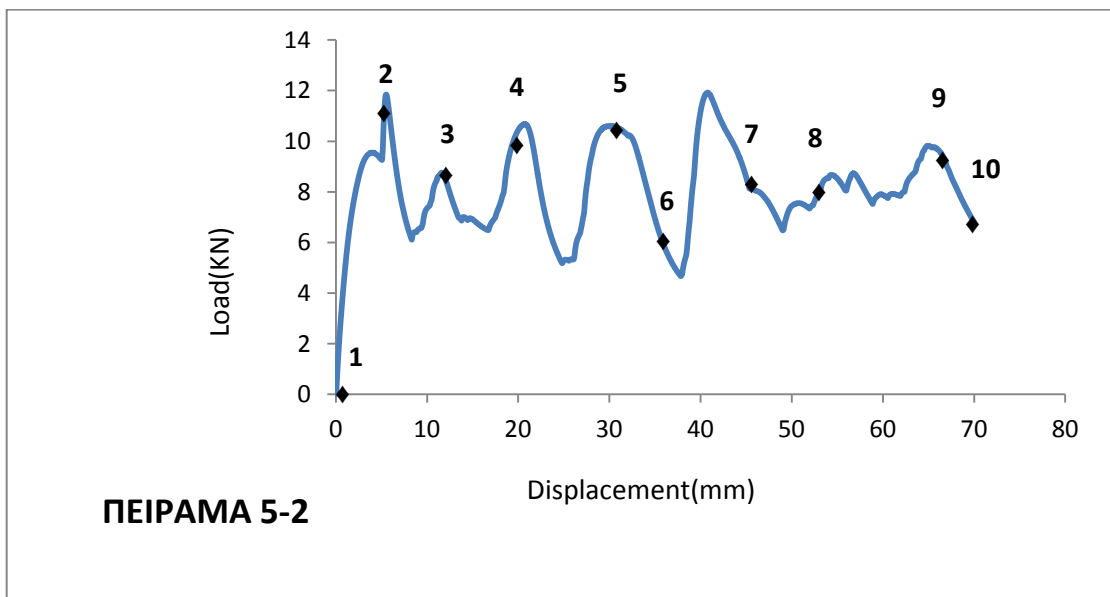
Τρόπος κατάρρευσης

Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου A1 υπό τριπλό triggering ήταν μη αξονοσυμμετρικός, με σχηματισμό επτά 3D diamond λοβών. Το τριπλό triggering συντέλεσε στο να μην υπάρχει καμία ασυμμετρία στην τελική μορφή του δοκιμίου. Στο σημείο δύο του διαγράμματος βλέπουμε τη στιγμή που το δοκίμιο έχει διαπεράσει το μηχανισμό και δέχεται το μέγιστο φορτίο και κάθε σχηματισμός μη εκατού λοβού αντιστοιχεί στο διάγραμμα στο διάστημα μεταξύ δύο τοπικών ακρότατων. Στο σημείο οκτώ για παράδειγμα βλέπουμε την ολοκλήρωση του έκτου λοβού και μετέπειτα το φορτίο αυξάνεται πάλι για την διαμόρφωση της διατομής του τελευταίου.

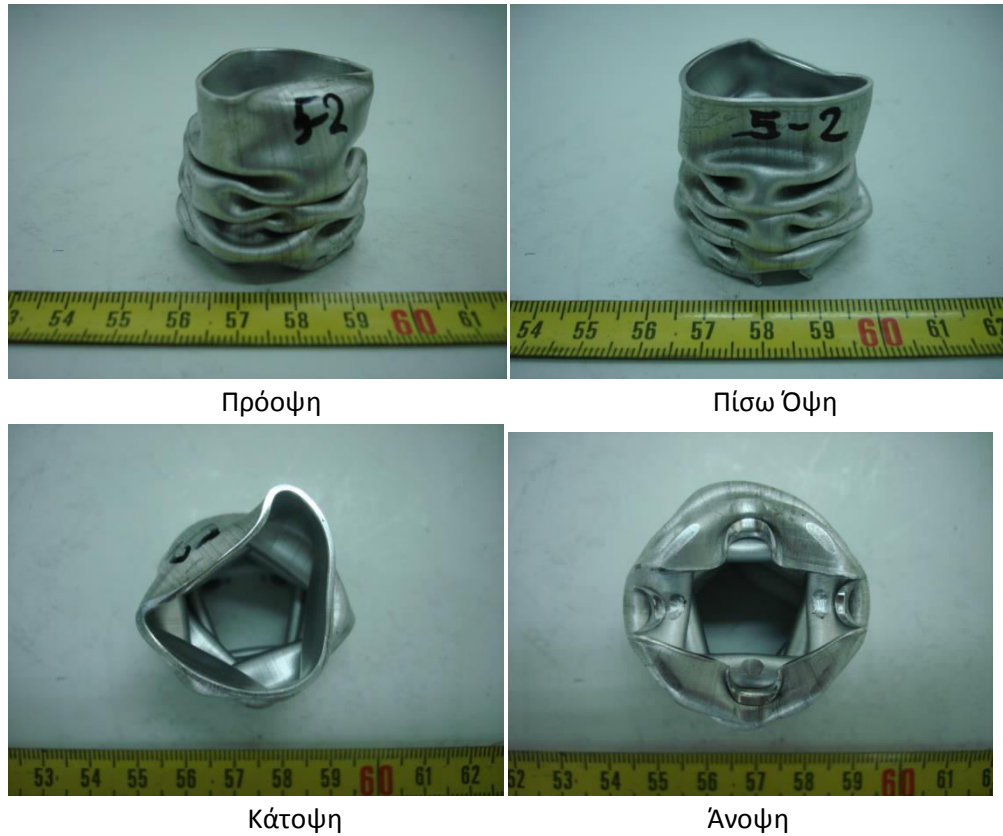
3.3.ο) Πείραμα 5-2



Εικ. 3.3.ο 1: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Εικ. 3.3.ο 2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Εικ. 3.3.ο 3: Τελικές όψεις

H_{tot}	30 mm
P_{max}	11,84 KN
E_{abs}	0,57 KJ
P_m	8,15 KN
CFE	0,688
SEA	33,17 KJ/kg

Πίνακας 3.3.ο 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης

Τρόπος κατάρρευσης

Ο τρόπος κατάρρευσης του A1 με την επιβολή τετραπλού triggering ήταν μη αξονοσυμμετρικός, που χαρακτηρίζεται από τον σχηματισμό επτά 3D diamond λοβών. Από την άνοψη του δοκιμίου μετά το τέλος του πειράματος βλέπουμε πως ο μηχανισμός triggering προσπάθησε να εξωθήσει το δοκίμιο να καταρρεύσει διαμορφώνοντας 2D diamond, όμως δεν τα κατάφερε. Το τετραπλό triggering οδήγησε σε μικρές διακυμάνσεις φορτίου. Μόλις η αξονική συμπίεση φτάνει στα 50mm παρατηρείται πτώση του φορτίου που σηματοδοτεί την έναρξη σχηματισμού των δύο τελευταίων λοβών. Σε αυτό το σημείο το υλικό έχει τραυματιστεί αρκετά και δεν φέρει ιδιαίτερη αντίσταση στην περαιτέρω πλαστική παραμόρφωσή του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1: Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνονται οι απαραίτητες συγκρίσεις των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα πειράματα, ώστε να γίνει ορθή εξαγωγή συμπερασμάτων όσο αφορά την επίδραση των μηχανισμών triggering στην αξονική κατάρρευση των λεπτότοιχων κελυφών.

Τα βασικά μεγέθη της κατάρρευσης έχουν υπολογισθεί για κάθε πείραμα καθώς είναι απαραίτητα για τις συγκρίσεις. Οι συγκρίσεις που θα γίνουν κατηγοριοποιούνται σε δύο ομάδες. Η πρώτη αφορά τους μηχανισμούς triggering S1, S2, S3 και S4, και πώς επηρέασαν την κατάρρευση του δοκιμίου A2. Τα μεγέθη κατάρρευσης που θα συγκριθούν περιλαμβάνουν το μέσο φορτίο, το μέγιστο φορτίο, την απορροφούμενη ενέργεια και τον δείκτη CFE, ενώ εξαιρείται ο δείκτης SEA, καθώς πρόκειται για το ίδιο υλικό (αλουμίνιο) και έτσι μας αρκεί η σύγκριση της εκάστοτε απορροφούμενης ενέργειας για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Η δεύτερη ομάδα πρόκειται για τους μηχανισμούς triggering T1, T2, V1, V2 και U2, και διερευνάται η επίδρασή τους στην κατάρρευση των δοκιμίων με τα οποία συμμετείχαν στα πειράματα. Συγκρίνονται ξεχωριστά τα αποτελέσματα κάθε πειράματος που αφορά σκέτο το κάθε δοκίμιο με εκείνα που αφορούν το ίδιο δοκίμιο την συμμετοχή των παραπάνω μηχανισμών, αλλά και κάθε μηχανισμός που συμμετείχε σε τουλάχιστον 2 πειράματα με 2 διαφορετικά δοκίμια. Και επειδή τα δοκίμια A1,A2 και A3 έχουν διαφορετικές διαστάσεις (οπότε και μάζα), είναι επιτακτική η χρήση της ειδικής απορρόφησης ενέργειας (SEA). Για λόγους πληρότητας θα παρουσιάσουμε έναν πίνακα με συγκεντρωμένα όλα τα μεγέθη για κάθε πείραμα:

	P_m(KN)	E_{abs}(KJ)	P_{max}(KN)	CFE	SEA(KJ/KG)
1	12,42	0,87	31,39	0,39	30
2-1	11,5	0,81	31,51	0,36	27,77
2-2	11,6	0,812	29,95	0,387	28,02
2-3	12,32	0,862	28,76	0,43	29,75
2-4	13,46	0,942	22,88	0,59	32,51
3-1	12,4	0,866	27,44	0,45	29,88
3-2	13,19	0,923	26,84	0,491	31,86
4	41,31	3,47	76,77	0,538	42
4-1-α	38,66	3,248	69,18	0,558	39,32
4-2-α	40	3,36	68,07	0,587	40,66
4-2	39,43	3,31	76,41	0,516	40,1
4-3-α	37,62	3,16	73,82	0,509	38,26
5	8,58	0,6	16,1	0,532	34,92
5-1	7,44	0,52	13,24	0,56	30,3
5-2	8,15	0,57	11,84	0,688	33,17

Πιν. 4.1: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

4.2: 1^η ομάδα συγκρίσεων

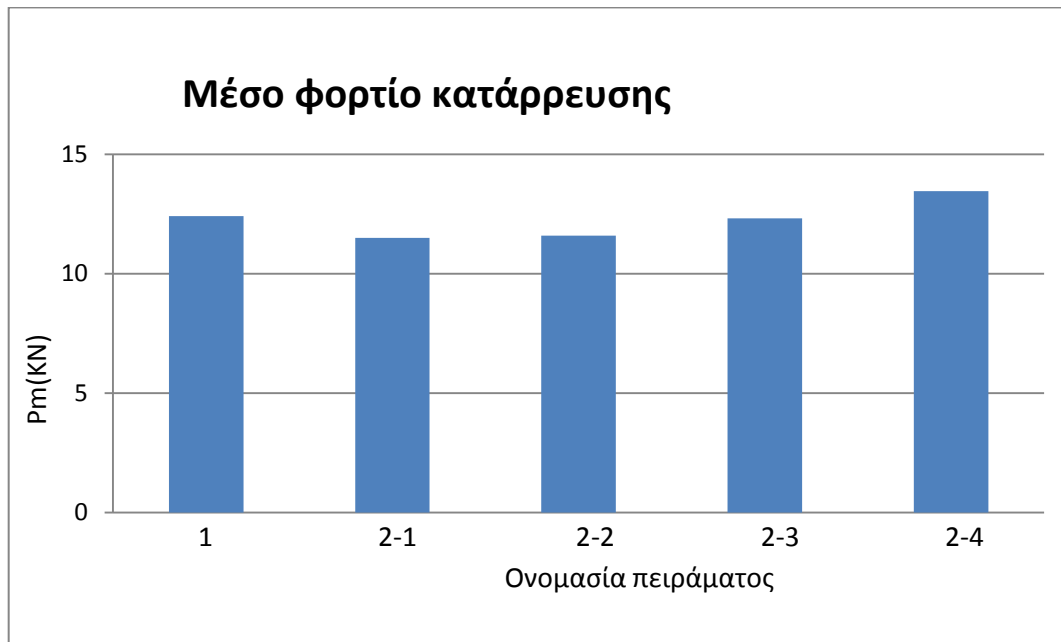
A2	χωρίς triggering	S1	S2	S3	S4
P_m(KN)	12,42	11,5	11,6	12,32	13,46
E_{abs}(KJ)	0,87	0,81	0,812	0,862	0,942
P_{max}(KN)	31,39	31,51	29,95	28,76	22,88
CFE	0,39	0,36	0,387	0,43	0,59

Πιν 4.2 : 1^η ομάδα συγκρίσεων

Οι τέσσερις μηχανισμοί triggering της πρώτης ομάδας αποτελούνται από τρεις χαλύβδινες ράβδους που έχουν συγκολληθεί σε μορφή αστέρα. Η γεωμετρία της κάθε ράβδου είναι ορθογωνική με αιχμηρές γωνίες, και ύψος αρκετά μεγαλύτερο από το πλάτος του. Το ύψος της κάθε ράβδου αποτελεί και την χαρακτηριστική παράμετρο της ομάδας, καθώς είναι το μόνο που μεταβάλεται ανά μηχανισμό. Και οι 4 μηχανισμοί οδήγησαν σε ακανόνιστη και βίαιη κατάρρευση μέσω του τριπλού triggering που επέβαλαν στο κυλινδρικό δοκίμιο ύψους 100mm, πάχους 1mm και διαμέτρου 50mm. Η αιχμηρή γεωμετρία των μηχανισμών καθώς και το αρκετά μεγάλο ύψος τους δημιουργεί ρήγματα στα δοκίμια στο μέτωπο αλληλεπίδρασής τους με αυτούς, που οδηγούν σε αστοχία και απώλεια της συνέχειάς τους. Η ρηγμάτωση διαρκεί περίπου μέχρι να συσσωρευθεί παραμορφωμένο υλικό στο σκέλος του μηχανισμού triggering σε τέτοια ποσότητα

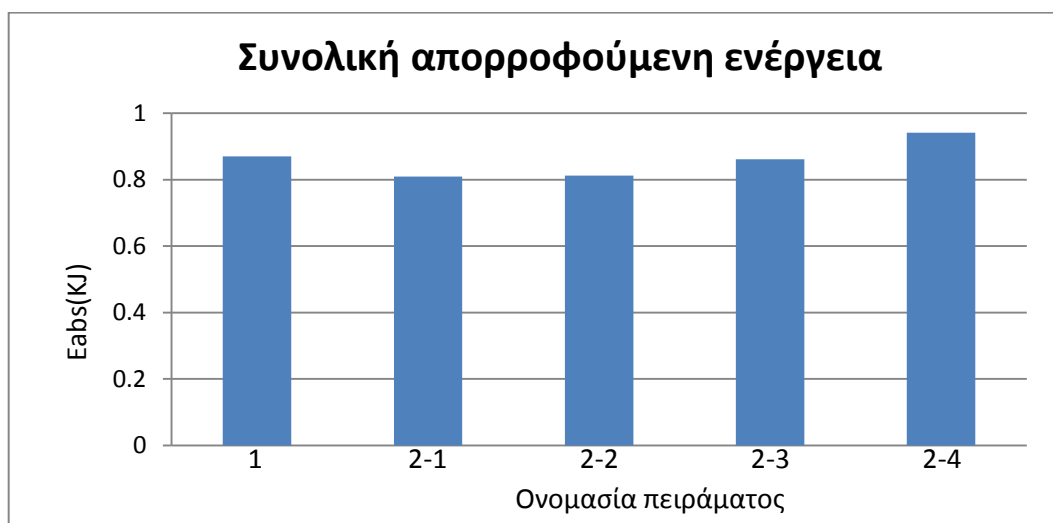
ώστε να συμπεριφέρεται σαν συμπαγές, και στη συνέχεια όσο υλικό βρίσκεται πάνω από τον μηχανισμό παραμορφώνεται πλαστικά. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν το κοινό ότι σε παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο ύψος του σκέλους του μηχανισμού παρατηρείται απότομη αύξηση του φορτίου στο μέγιστο, διότι εκεί το δοκίμιο έρχεται σε επαφή με την κάτω απαραμόρφωτη πλάκα και δέχεται την μεγαλύτερη αντίδραση. Παρακάτω παρατίθενται επιπλέον διαγράμματα για το κάθε μέγεθος κατάρρευσης:

4.2.α: Μέσο φορτίο κατάρρευσης



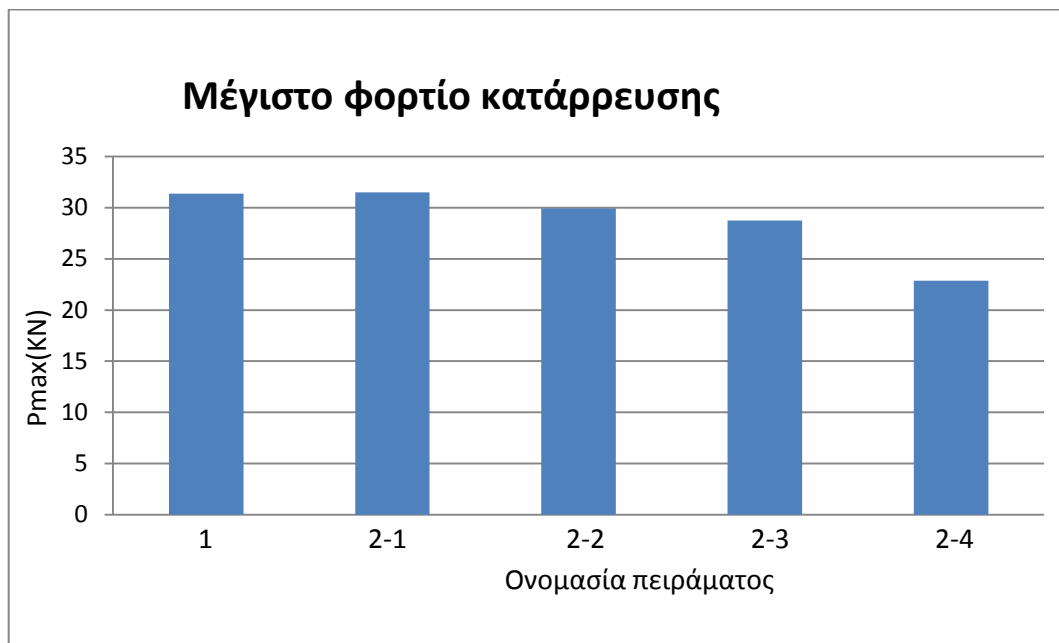
Σχήμα 4.2.α: Μέσο φορτίο κατάρρευσης

4.2.β: Συνολική απορροφούμενη ενέργεια



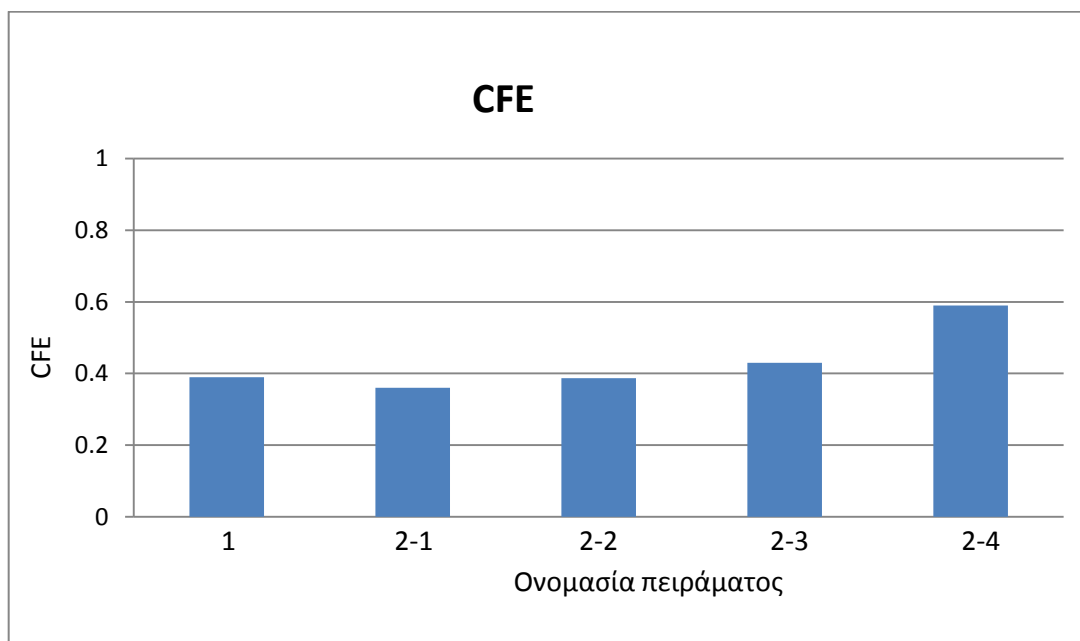
Σχήμα 4.2 β: Συνολική απορροφούμενη ενέργεια

4.2.γ:Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης



Σχήμα 4.2 γ: Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης

4.2.δ: Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου(CFE)



Σχήμα 4.2 δ: CFE

Τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης που προκύπτουν από τα πειράματα όπου έγινε χρήση των μηχανισμών triggering παρουσιάζουν μεγάλες ομοιότητες, με αξιοσημείωτο το ότι και τα τέσσερα εμφανίζουν το μέγιστο φορτίο στην ίδια περίπτωση μετατόπιση. Στον μηχανισμό με το μικρότερο πλάτος παρατηρείται μικρότερο μέσο φορτίο και συνεπώς απορροφούμενη ενέργεια από όταν το δοκίμιο καταρρέει χωρίς triggering, αυξάνοντας το όμως οδηγεί σε διαρκώς αυξανόμενο μέσο φορτίο, με τον τελευταίο μηχανισμό να ξεπερνάει αυτό της πρώτης δοκιμής. Και ενώ το μέσο φορτίο και η ενέργεια αυξάνονται καθώς χρησιμοποιούμε μηχανισμούς με μεγαλύτερο πλάτος, το αντίθετο συμβαίνει με το μέγιστο φορτίο της κατάρρευσης, καθώς αυτό όπως βλέπουμε βαίνει μειούμενο, με την μείωση αυτή να είναι μεγαλύτερη από την αύξηση του μέσου. Επακόλουθο αυτού είναι σε κάθε δοκιμή ο CFE να αυξάνεται όλο και περισσότερο. Η μείωση του μέγιστου φορτίου που παρατηρείται σε κάθε μηχανισμό με μεγαλύτερο πλάτος από τον προηγούμενο οφείλεται στην ρηγμάτωση όλο και περισσότερου υλικού από την διαρκώς μεγαλύτερη επιφάνεια του μετώπου επαφής.

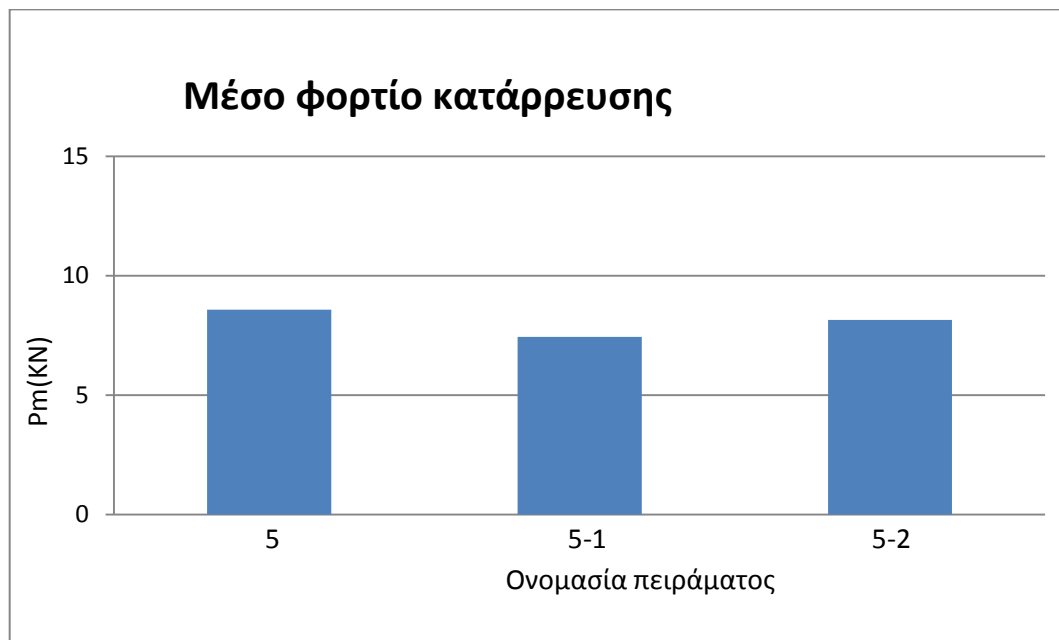
4.3: 2^η ομάδα συγκρίσεων

Η αιχμηρή γεωμετρία της προηγούμενης ομάδας μηχανισμών triggering οδήγησε σε ακανόνιστες καταρρεύσεις, και για αυτό τον λόγο κατασκευάσαμε μηχανισμούς με καμπύλη διαμόρφωση και μικρότερο ύψος ώστε να εξετάσουμε την πλαστική παραμόρφωση ως παράγοντα απορρόφησης ενέργειας και όχι την ρηγμάτωση. Οι μηχανισμοί T1 και T2 έχουν ημικυκλική διατομή με ύψος μόλις 4,5mm και πλάτος 7mm, ενώ οι V1, V2 και U1 κυκλική διατομή με διάμετρο 10mm. Οι T1 και V1 επιβάλλουν στο δοκίμιο τριπλό triggering, οι V2 και T2 τετραπλό και ο U1 διπλό και οι συγκρίσεις αφορούν την συμπεριφορά των δοκιμίων με την επιβολή του triggering με το πώς καταρρέουν χωρίς αυτό, καθώς και την αξιολόγηση κάποιων μηχανισμών σε δοκίμια διαφορετικών διαστάσεων. Παρακάτω ακολουθεί πίνακας με τα μεγέθη της κατάρρευσης συγκεντρωμένα για λόγους ευκολίας και μετέπειτα γίνονται οι συγκρίσεις αποτελεσμάτων του κάθε δοκιμίου και μηχανισμού:

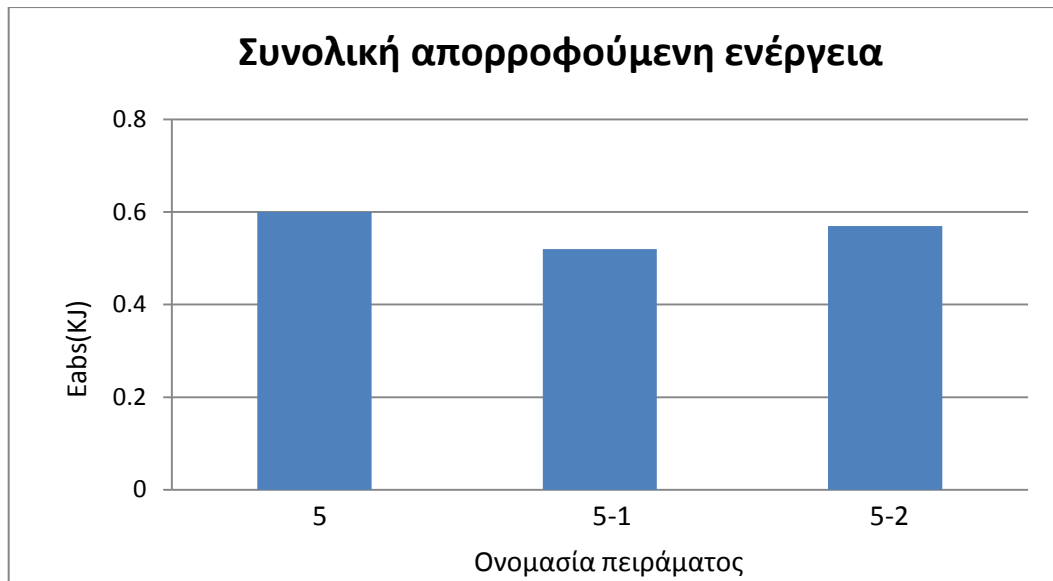
ΔΟΚΙΜΙΑ	ΜΕΓΕΘΗ	χωρίς triggering	T1	T2	V1	V2	U1
A1	P_m (KN)	8,58	7,44	8,15	-	-	-
	E_{abs} (KJ)	0,6	0,52	0,57	-	-	-
	P_{max} (KN)	16,1	13,24	11,84	-	-	-
	CFE	0,532	0,56	0,688	-	-	-
	SEA	34,92	30,3	33,17	-	-	-
A2	P_m (KN)	12,42	12,40	13,19	-	-	-
	E_{abs} (KJ)	0,87	0,87	0,923	-	-	-
	P_{max} (KN)	31,39	27,44	26,84	-	-	-
	CFE	0,39	0,45	0,491	-	-	-
	SEA	30	29,88	31,86	-	-	-
A3	P_m (KN)	41,31	-	39,43	38,66	40	37,62
	E_{abs} (KJ)	3,47	-	3,31	3,248	3,36	3,16
	P_{max} (KN)	76,77	-	76,41	69,18	68,07	73,82
	CFE	0,538	-	0,516	0,558	0,587	0,509
	SEA	42	-	40,1	39,32	40,66	38,26

Πιν 4.3.α: 2^η ομάδα συγκρίσεων

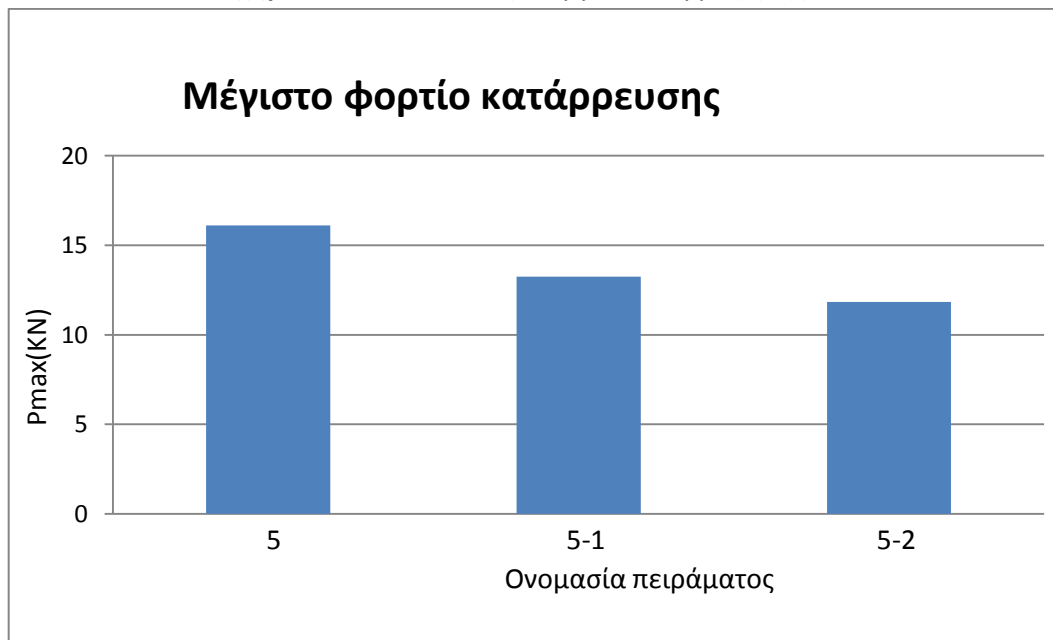
4.3.α: Δοκίμιο A1



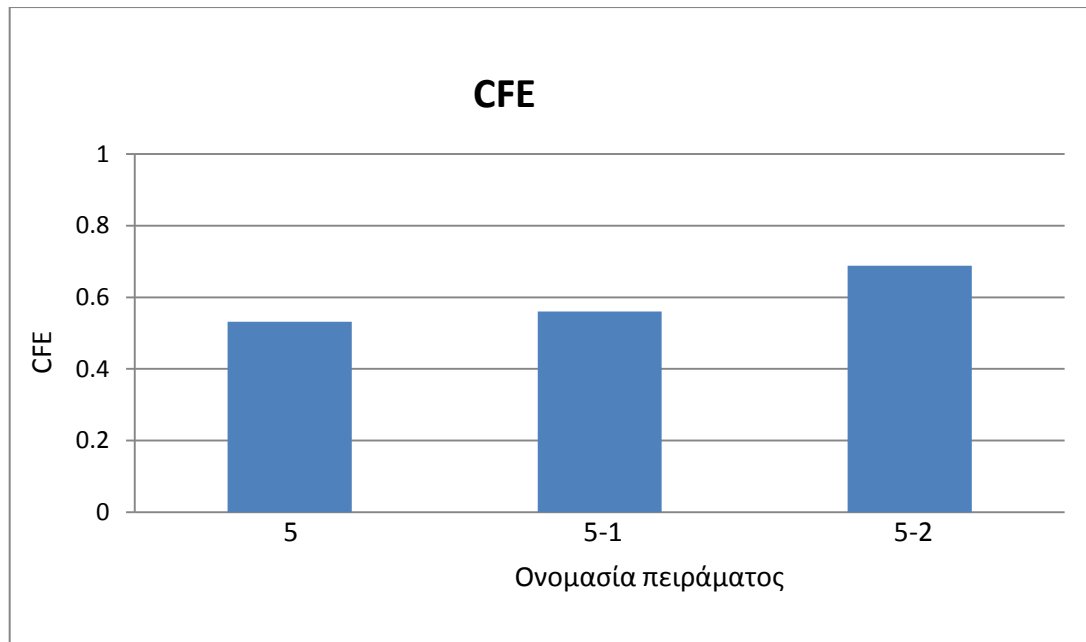
Σχήμα 4.3.α.1 : Μέσο φορτίο κατάρρευσης δοκιμίου A1



Σχήμα 4.3.α.2: Συνολική ενέργεια απορρόφησης A1



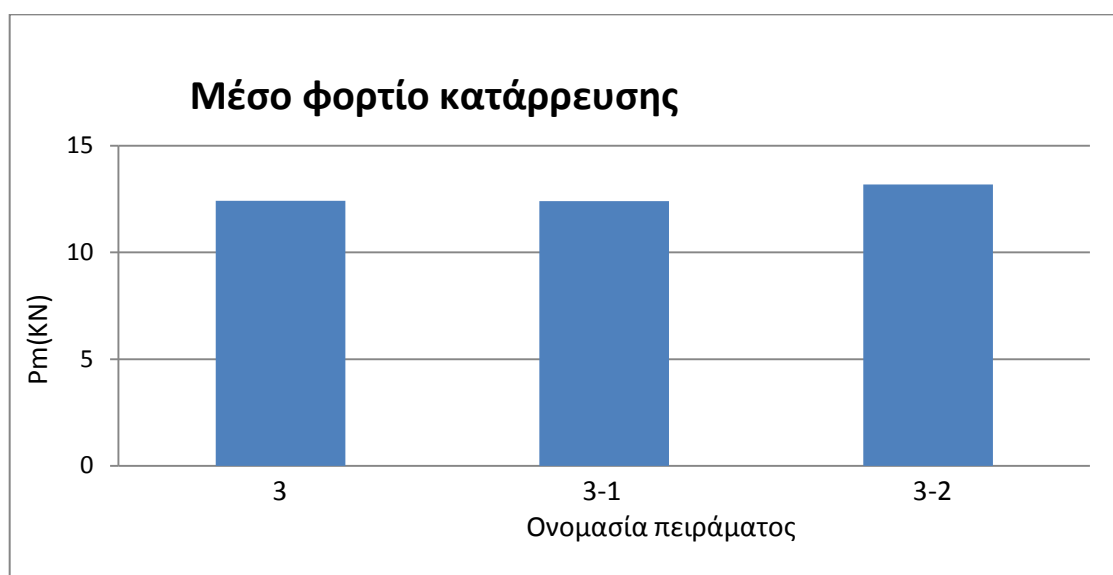
Σχήμα 4.3.α.3: Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης δοκιμίου A1



Σχήμα 4.3.α.4: CFE δοκιμίου A1

Όπως βλέπουμε και από τα διαγράμματα, η επιβολή του triggering οδήγησε σε μείωση της απορροφούμενης ενέργειας. Στο τριπλό παρατηρήθηκαν οι χαμηλότερες επιδόσεις, στη συνέχεια στο τετραπλό και μετά χωρίς triggering. Η χρήση μη αιχμηρής γεωμετρίας οδήγησε σε πιο ομαλή κατάρρευση και πολύ λιγότερη ρηγμάτωση. Το μέγιστο φορτίο μειώθηκε και με το T1 και το T2, περισσότερο στο δεύτερο, μιας και το τετραπλό triggering παρείχε μεγαλύτερη επιφάνεια μετώπου αλληλεπίδρασης, και έτσι λιγότερο υλικό ήρθε σε επαφή με το κάτω μέρος.

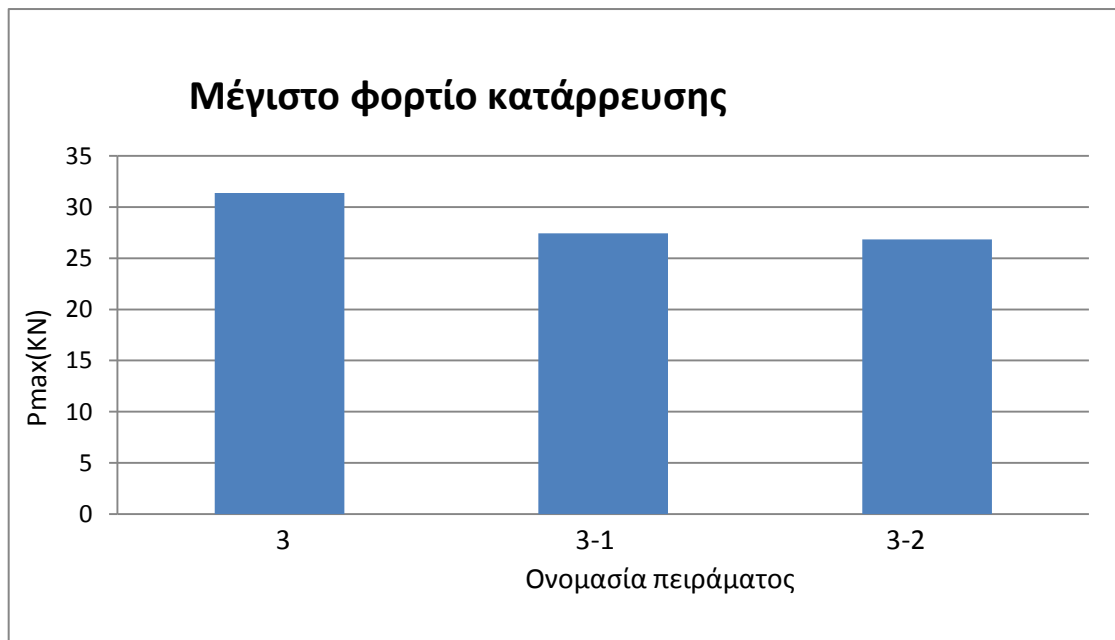
4.3.β: Δοκίμιο A2



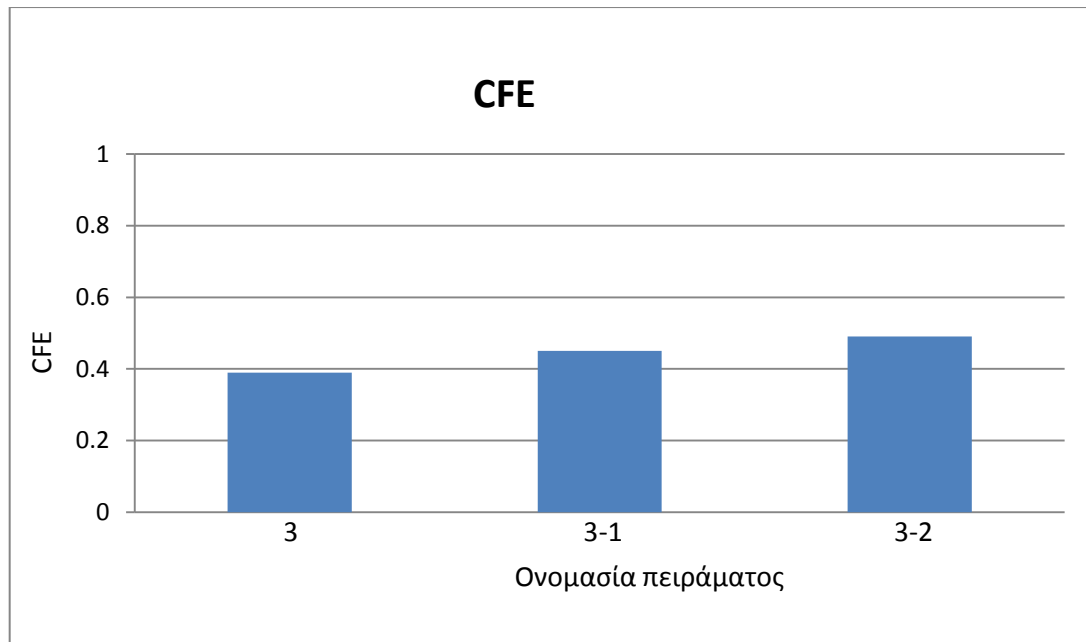
Σχήμα 4.3.β.1 : Μέσο φορτίο κατάρρευσης δοκιμίου A2



Σχήμα 4.3.β.2: Συνολική ενέργεια απορρόφησης A2



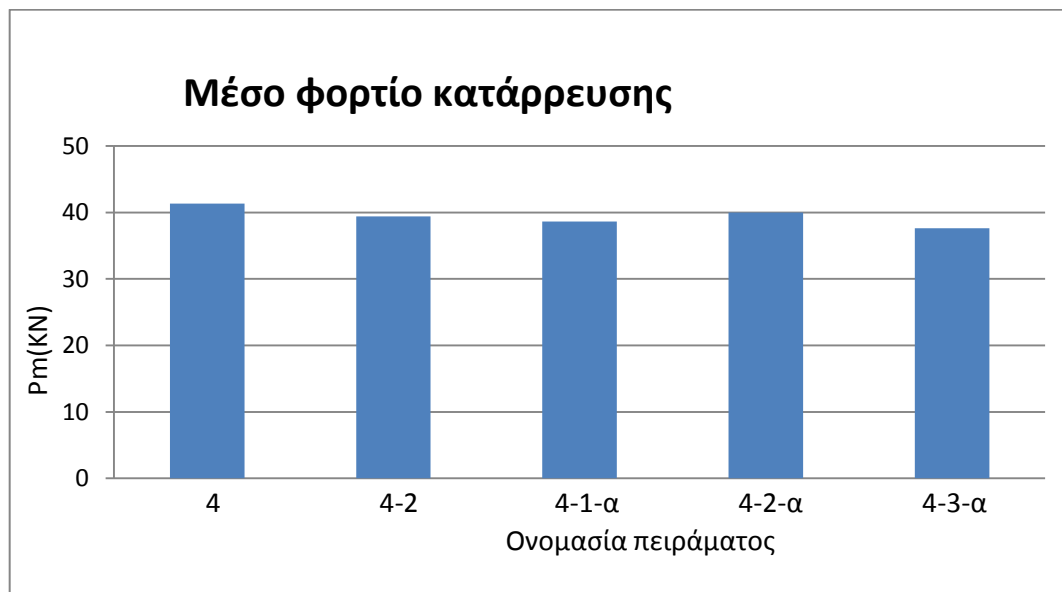
Σχήμα 4.3.β.3: Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης δοκιμίου A2



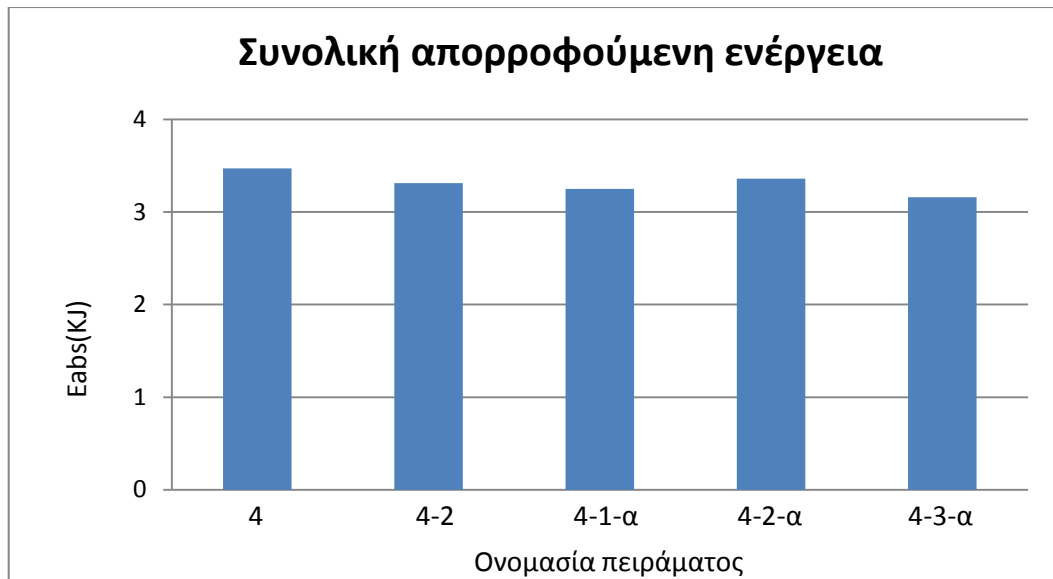
Σχήμα 4.3.β.4: CFE δοκιμίου A2

Η επιβολή τριπλού triggering οδήγησε σε απειροελάχιστη μείωση της απορροφούμενης ενέργειας και του μέσου φορτίου με ταυτόχρονη μείωση του μέγιστου, με συνέπεια την ελάττωση του CFE. Το τετραπλό triggering όμως συντέλεσε σε καλύτερες επιδόσεις απορρόφησης ενέργειας και ακόμα μεγαλύτερη μείωση του μέγιστου φορτίου, και παρόλο που προσπάθησε να διαμορφώσει στο δοκίμιο λοβούς 2D diamond, εκείνο κατέρρευσε σχηματίζοντας 3D diamond, όπως και όταν δεν του επεβλήθει triggering. Σε όλες τις περιπτώσεις σχηματίστηκαν έξι λοβοί.

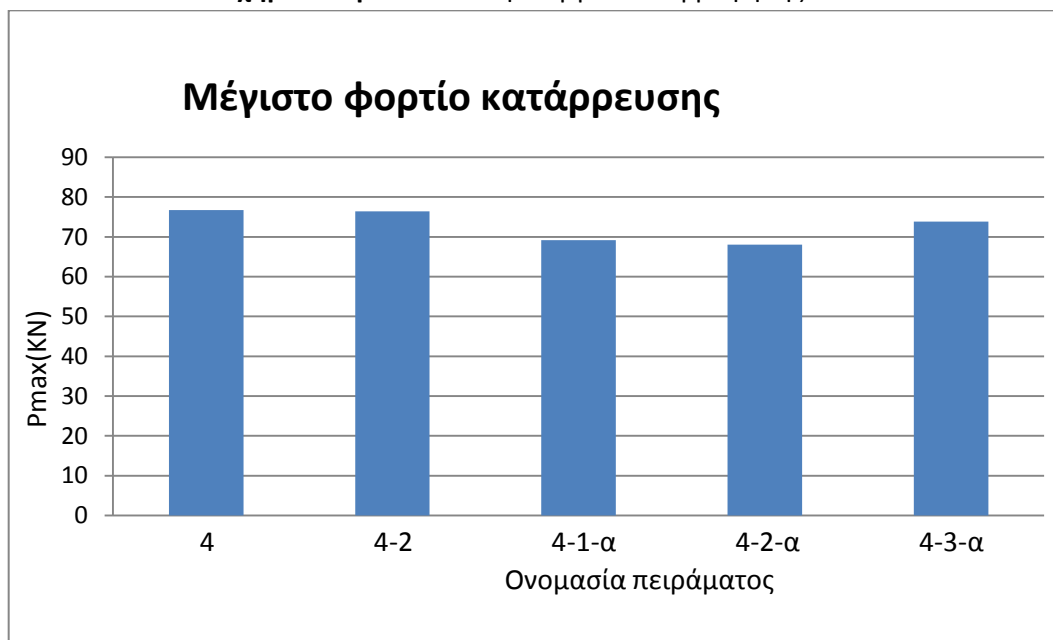
4.3.γ: Δοκίμιο A3



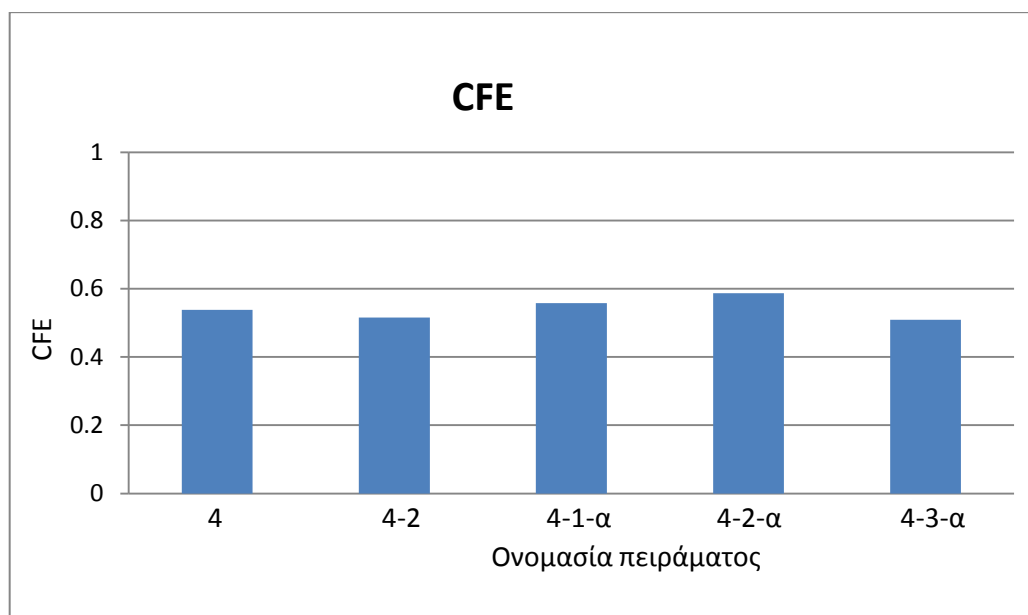
Σχήμα 4.3.γ.1 : Μέσο φορτίο κατάρρευσης δοκιμίου A3



Σχήμα 4.3.γ.2: Συνολική ενέργεια απορρόφησης A3



Σχήμα 4.3.γ.3: Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης δοκιμίου A3



Σχήμα 4.3.γ.4: CFE δοκιμίου A3

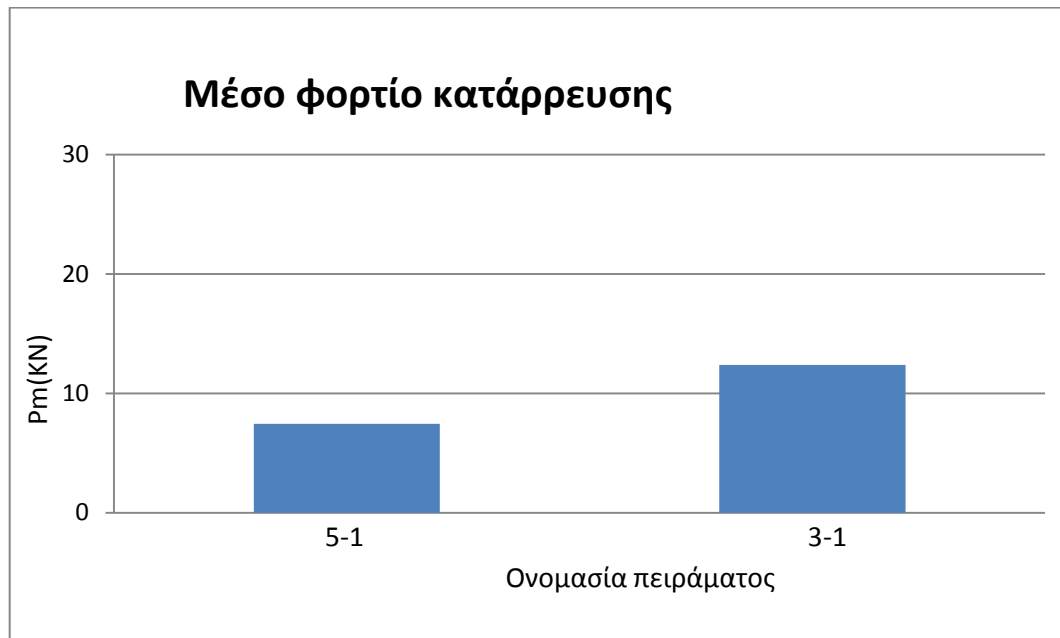
Το πρώτο πείραμα που έγινε με το δοκίμιο A3 ήταν με το μηχανισμό triggering T2. Οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι αρκετά μεγάλες σε σχέση με αυτές του μηχανισμού, και αυτή η διαφορά καθιστά το δοκίμιο σχεδόν ανεπηρέαστο από το triggering. Όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης μειώθηκαν κατά πολύ λίγο σε σχέση με το πείραμα χωρίς triggering, και ο τρόπος κατάρρευσης παραμένει αξονοσυμμετρικός. Για αυτό το λόγο κατασκευάσαμε τους μηχανισμούς V1, V2 και U1, οι οποίοι λόγω των μεγαλύτερων διαστάσεων αναμένουμε να έχουν μεγαλύτερη επιρροή στην κατάρρευση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ενδιαφέρον, καθώς βλέπουμε πως με τους νέους μηχανισμούς αλλάζει ο τρόπος κατάρρευσης. Με το τριπλό και το διπλό triggering το δοκίμιο παρουσιάζει 3D diamond μη εκατούς λοβούς, ενώ με το τετραπλό 2D diamond, που σημαίνει πως ο μηχανισμός V2 επέβαλε αλλαγή στον τρόπο κατάρρευσης, καθώς η μορφή των λοβών που σχηματίστηκαν είναι ελλειπτική. Μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας επιτεύχθηκε όταν το δοκίμιο συμπίεστηκε δίχως triggering, ενώ από τα διαγράμματα παρατηρούμε πως μεγαλύτερη απόδοση με triggering ως προς το μέσο φορτίο επιτεύχθηκε με τον V2, στη συνέχεια με τον V1 και τον U1. Ως προς τον δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (CFE), πάλι ο V2 οδηγεί σε μεγαλύτερη απόδοση, μετά ο V1 και τέλος ο U1. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέτωπο προσβολής με τον μηχανισμό triggering, τόσο μεγαλύτερη είναι και η μείωση του μέγιστου φορτίου.

4.3.δ: Μηχανισμοί triggering T1 και T2

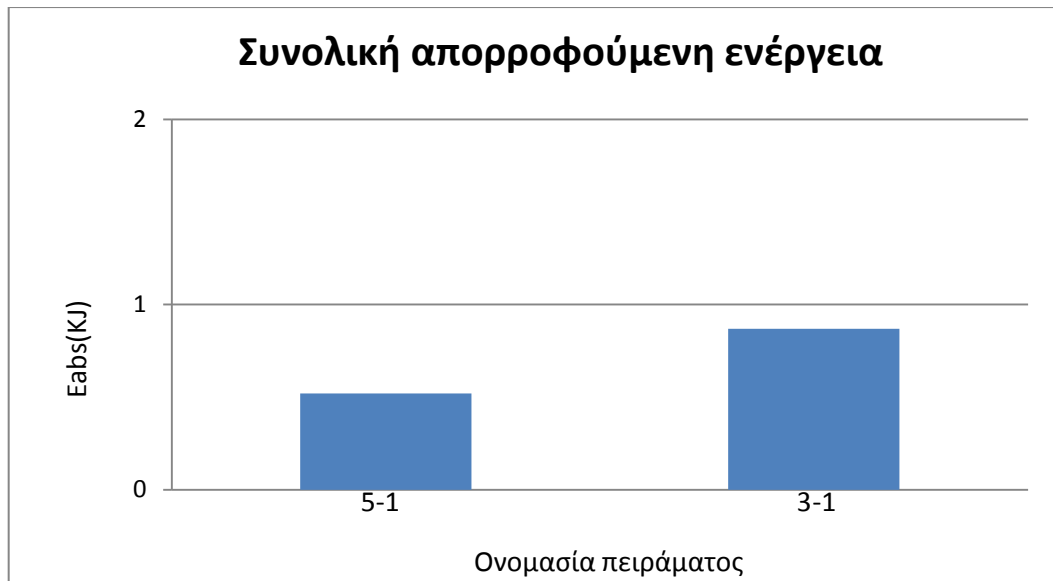
		A1	A2	A3
T1	$P_m(KN)$	7,44	12,4	-
	$E_{abs}(KJ)$	0,52	0,87	-
	$P_{max}(KN)$	13,24	27,44	-
	CFE	0,56	0,45	-
	SEA	30,3	29,88	-
T2	$P_m(KN)$	8,15	13,19	39,43
	$E_{abs}(KJ)$	0,57	0,923	3,31
	$P_{max}(KN)$	11,84	26,84	76,41
	CFE	0,688	0,491	0,516
	SEA	33,17	31,86	40,1

Πιν. 4.3.δ: Μηχανισμοί triggering T1 και T2

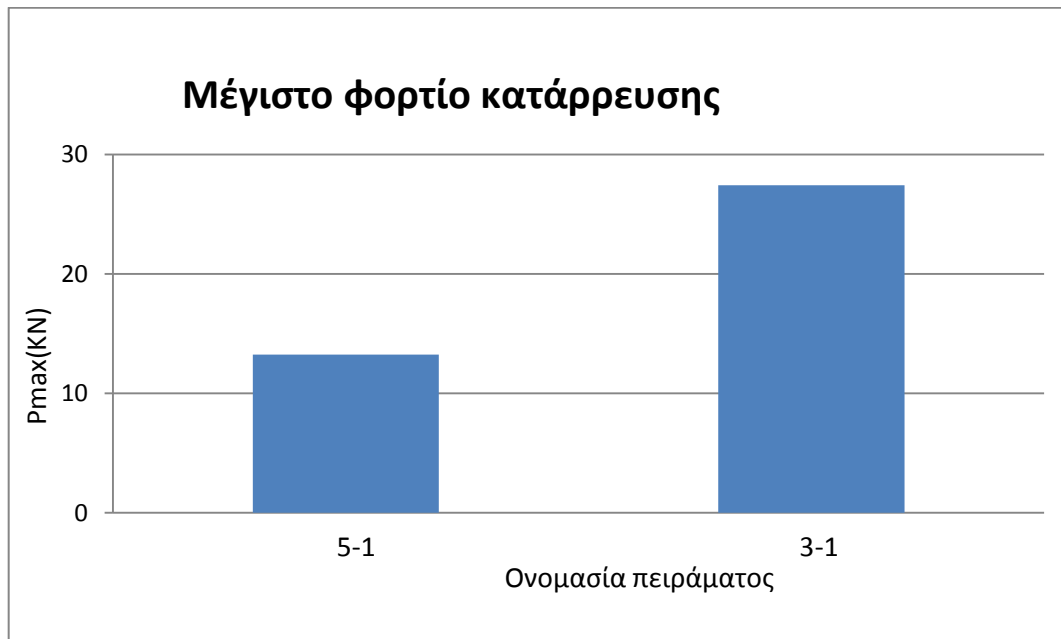
●T1:



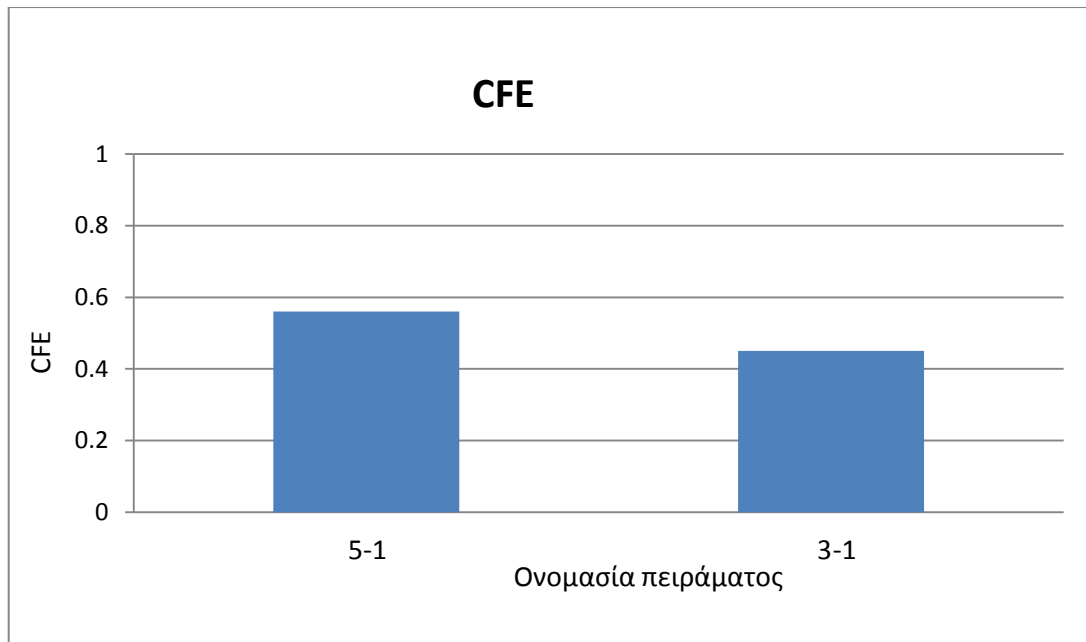
Σχήμα 4.3.δ.1 : Μέσο φορτίο κατάρρευσης



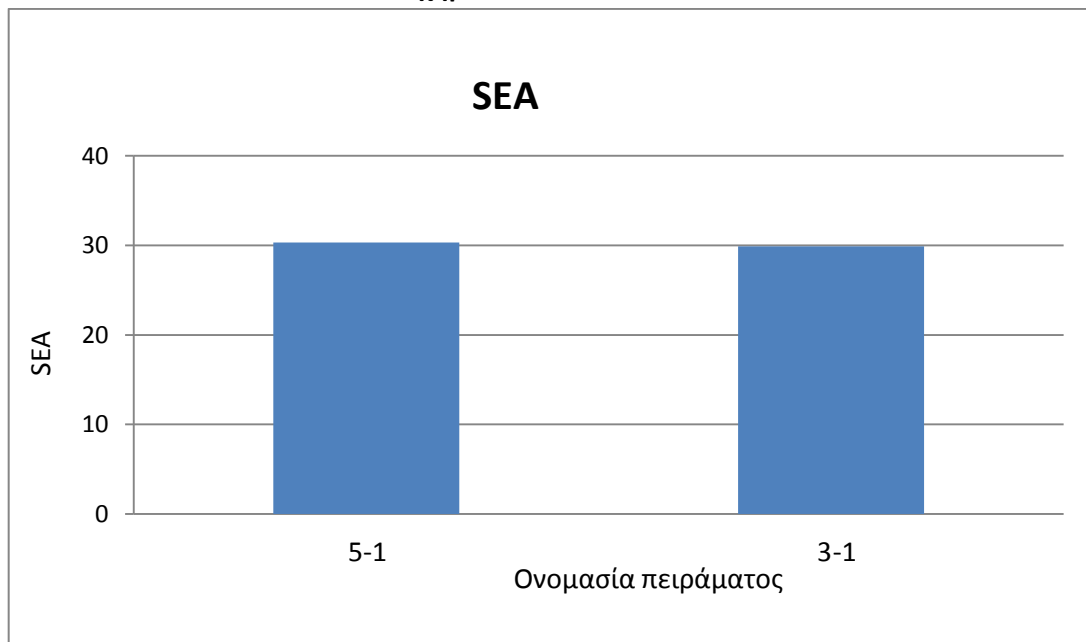
Σχήμα 4.3.δ.2 : Συνολική απορροφούμενη ενέργεια



Σχήμα 4.3.δ.3 : Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης



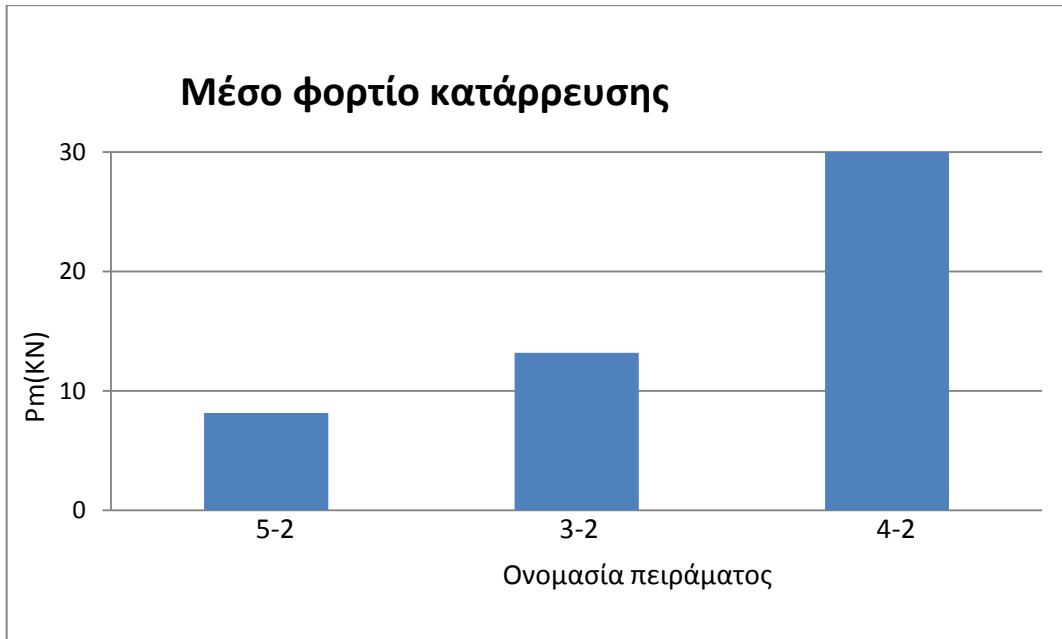
Σχήμα 4.3.δ.4 : CFE



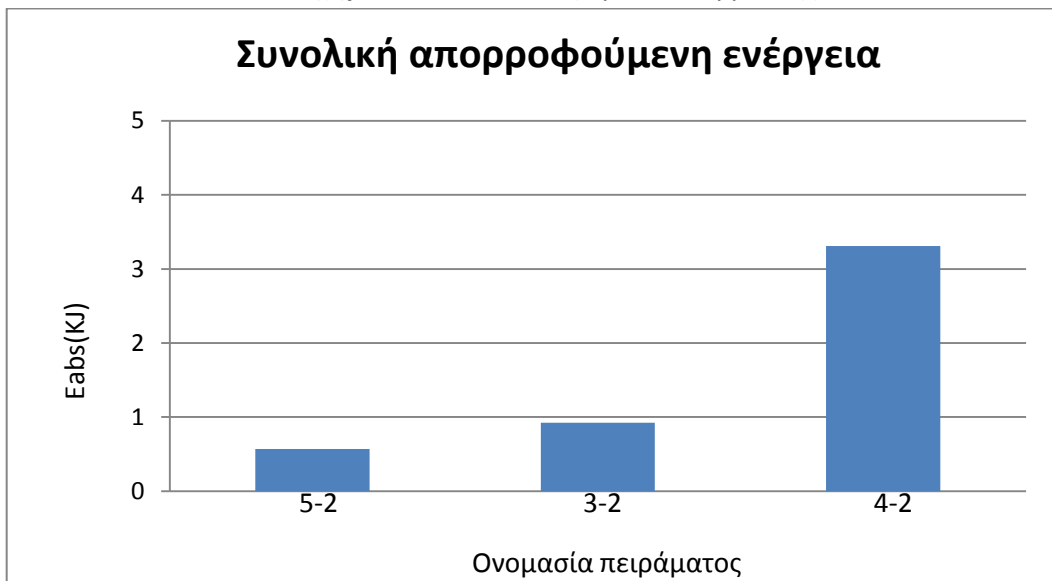
Σχήμα 4.3.δ.5 : SEA

Από το διάγραμμα ειδικής απορρόφησης ενέργειας βλέπουμε πως ο T1 επέδειξε παρόμοιες επιδόσεις και στα δύο δοκίμια, με ελάχιστα μεγαλύτερη τιμή στο A1.

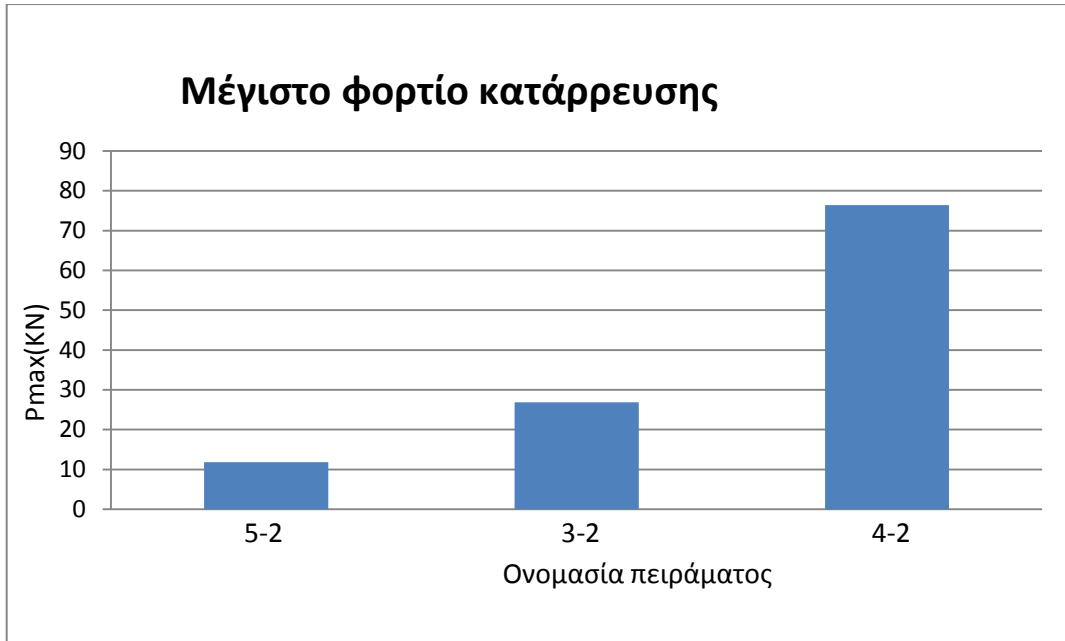
•T2:



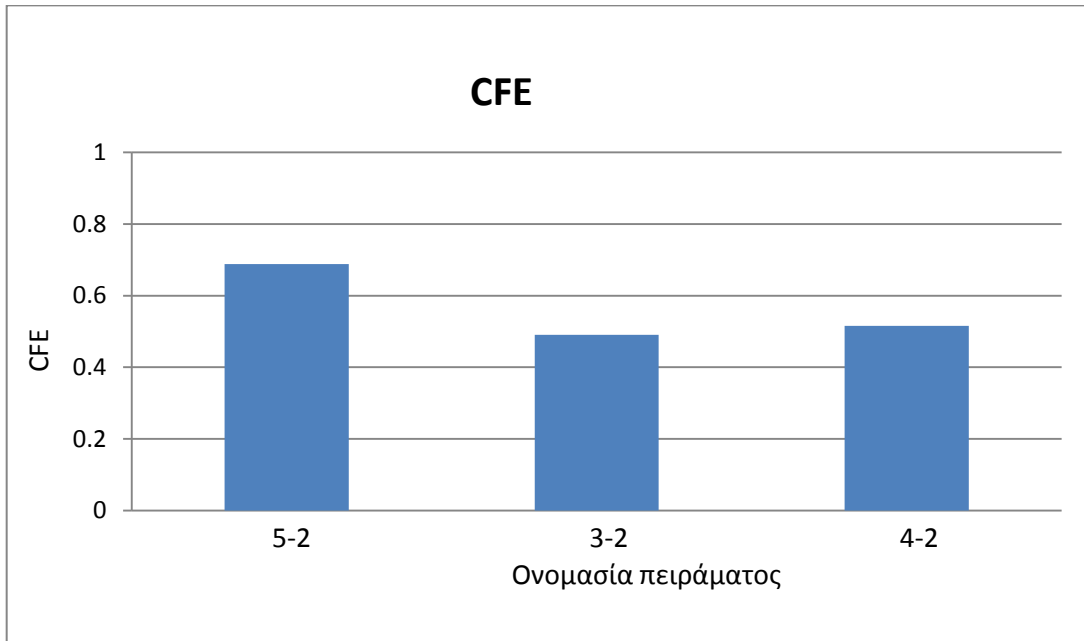
Σχήμα 4.3.δ.6 : Μέσο φορτίο κατάρρευσης



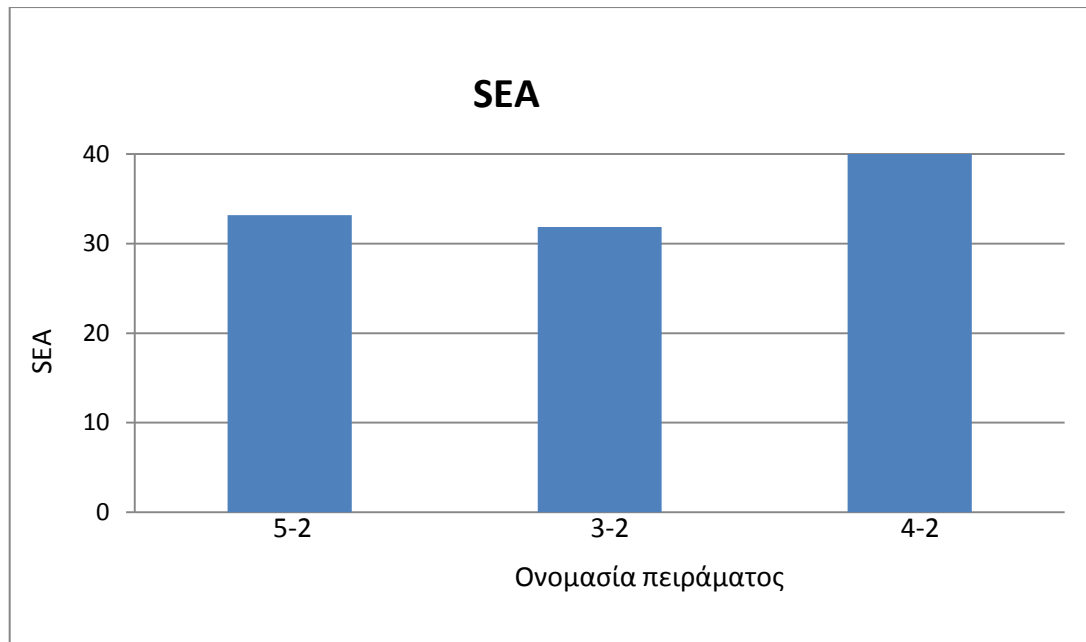
Σχήμα 4.3.δ.7 : Συνολική απορροφούμενη ενέργεια



Σχήμα 4.3.δ.8 : Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης



Σχήμα 4.3.δ.9 : CFE



Σχήμα 4.3.δ.10 : SEA

Ο T2 οδήγησε σε καλύτερη απορρόφηση ενέργειας το μεγαλύτερο δοκίμιο, το A3. Όμως η μεγάλη διαφορά διαστάσεων μεταξύ του μηχανισμού T2 και του A3 συντέλεσε στο να μην επηρεαστεί η κατάρρευση, αυτός ήταν και ο λόγος κατασκευής επιπλέον μηχανισμών. Το μέγιστο φορτίο όπως βλέπουμε είναι συνάρτηση των διαστάσεων του εκάστοτε δοκιμίου, δηλαδή όσο μεγαλύτερο το δοκίμιο τόσο περισσότερο υλικό θα συναντάει αντίσταση από την κάτω πλάκα της διάταξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1:Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Τα αποτελέσματα αφορούν τον τρόπο κατάρρευσης των μεταλλικών κελυφών υπό την επίδραση των μηχανισμών triggering και τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατάρρευσης που υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης για κάθε πείραμα.

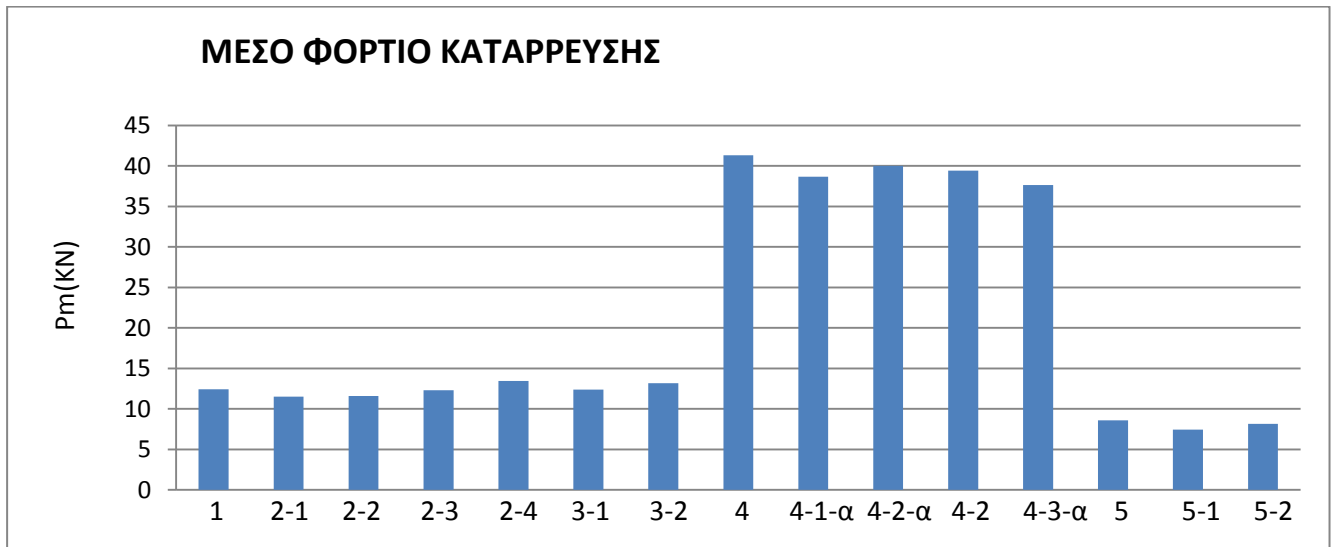
Η πρώτη ομάδα μηχανισμών επέβαλε στα δοκίμια βίαιη και ακανόνιστη κατάρρευση, με ρηγμάτωση του υλικού. Παράμετρος των δοκιμών αποτέλεσε το πλάτος των μηχανισμών, και η διαπίστωση είναι πως για αυξανόμενο πλάτος αυξάνεται και η απορροφούμενη ενέργεια ενώ μειώνεται το μέγιστο φορτίο. Ως συνέπεια αυτού, χρησιμοποιώντας μηχανισμούς με μεγαλύτερο πλάτος καταλήγουμε σε μεγαλύτερες τιμές του δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (CFE).

Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν οι μηχανισμοί T1 και T2, με τους οποίους έγιναν πειράματα στα δοκίμια A1 και A2. Το δοκίμιο A1 σε κατάρρευση χωρίς triggering παρουσιάζει αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης, και η επιβολή τριπλού και τετραπλού triggering το οδηγεί να καταρρεύσει με μη αξονοσυμμετρικό, δημιουργώντας 3D diamond λοβούς. Οι μηχανισμοί triggering δεν βελτιώνουν την απόδοση του δοκιμίου σε απορρόφηση ενέργειας, όμως οδηγούν σε μεγάλη άνοδο του CFE. Για τα πειράματα που έγιναν στο A2, ο μηχανισμός T2 βελτίωσε την ενεργειακή απορρόφηση του δοκιμίου σε σχέση με όταν κατέρρευσε χωρίς triggering και ο τρόπος κατάρρευσης του A2 ήταν 3D diamond μη αξονοσυμμετρικός σε όλες τις περιπτώσεις.

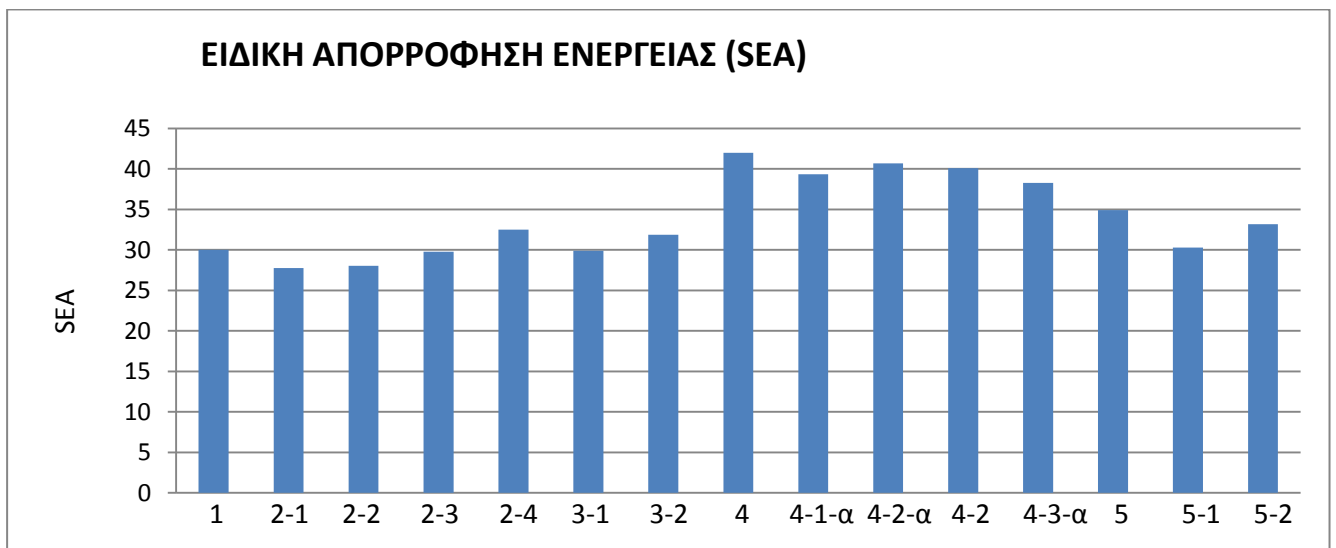
Ύστερα από την διαπίστωση πως ο μηχανισμός T2, λόγω των μικρών του διαστάσεων σε σχέση με το δοκίμιο A3, δεν επηρέασε καθόλου τον τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου, δεν διεξήχθησε πείραμα με τον T1 και αντί για αυτό κατασκευάστηκαν άλλοι τρεις μηχανισμοί triggering. Αυτοί χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά στο A3, το οποίο μόνο του κατέρρευσε επιδεικνύοντας αξονοσυμμετρικό τρόπο. Μέγιστη ενεργειακή απορρόφηση επέδειξε το A3 καταρρέοντας χωρίς triggering. Με τριπλό και τετραπλό διαπιστώσαμε βελτίωση στον CFE, με μονό όμως όχι. Ο τρόπος κατάρρευσης με τριπλό και διπλό ήταν μη αξονοσυμμετρικός 3D diamond, με τετραπλό όμως παρατηρούμε πως η γεωμετρία του μηχανισμού επέβαλε τον σχηματισμό 2D λοβών με ελλειπτική γεωμετρία.

Ένα ορθό συμπέρασμα από τα πειράματα είναι πως αξιολογώντας τους μηχανισμούς triggering, καλύτερα αποτελέσματα επέδειξαν εκείνοι με σχήμα σταυρού.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο πίνακες για όλα τα πειράματα για τα δύο μεγέθη που ενδιαφέρουν τον μηχανικό: τη συνολική απορροφούμενη ενέργεια και την ειδική απορρόφηση ενέργειας.



Πιν 5.1: Μέσο φορτίο κατάρρευσης



Πιν 5.2: Ειδική απορρόφηση ενέργειας

5.2: Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η μελέτη της επίδρασης του εξωτερικού triggering στην συμπεριφορά κατάρρευσης μεταλλικών κελυφών, που είναι και το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, μπορεί να συνεχιστεί και με άλλες μεθόδους καθώς και με μεταβολή των παραμέτρων.

Η επίδραση του triggering στην κατάρρευση μπορεί να προσομοιωθεί μέσω ειδικών λογισμικών και να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά των πειραμάτων. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να αποφύγουμε το κόστος και τον χρόνο που απαιτείται για την κατεργασία των δοκιμίων και των μηχανισμών, καθώς και για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Επίσης μπορεί να γίνει περαιτέρω διερεύνηση της αποδοτικότητας μιας κατασκευής που να αποτελείται από διαφορετικές γεωμετρικές κελυφών και μηχανισμών triggering από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Μια σημαντική παράμετρος που σε μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να μεταβληθεί είναι το υλικό των κελυφών που συμπίεστηκαν. Θα ήταν χρήσιμο να μελετηθεί και η συμπεριφορά διαφορετικών υλικών σε εξωτερικό triggering, που θα μπορούσαν να παρουσιάσουν καλύτερη συμπεριφορά κατά την συμπίεσή τους.

Άλλη μια παράμετρος που μπορεί να μεταβληθεί είναι οι συνθήκες φόρτισης. Θα μπορούσαν να γίνουν πειράματα σε δυναμικές συνθήκες, με διαφορετικές ταχύτητες κινητής κεφαλής, ακόμα και σε διαφορετική διεύθυνση φόρτισης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. Κατεργασίες των υλικών Ι**, Αθαν.Γ.Μάμαλη, 1998, εκδόσεις ΕΜΠ
- 2. Κατεργασίες των υλικών**, Αθαν.Γ.Μάμαλη, 1991, εκδόσεις ΕΜΠ
- 3. Energy absorption of structures and materials**, Guoxing Lu and Tongxi Yu, 2000
- 4. Experimental investigations on the crush behavior of AA6061-T6 aluminum square tubes with different types of through hole discontinuities**, Qingwu Cheng, William Altenhof, Li Li, *Thin-Walled Structures*, 2006, **44**, 441-454.
- 5. The quasi static crumbling of thin walled circular cylinders and frusta under axial compression**, Α.Γ.Μάμαλης, W.Johnson, *Int. J. Mech. Sci.*, 1984, **25**, 713-732
- 6. The effect of tube end constraining on the axial crushing behavior of an aluminum tube**, Alper Tasdemirci, *Materials and Design*, 2008, **29**, 1992-2001
- 7. The energy absorption characteristics of double-cell tubular profiles**, S.Chung Kim Yuen, G.N.Nurick, R.A.Starke, *Latin American Journal Of Solids and Structures*, 2008, **5**, 289-317
- 8. Collapsible impact energy absorbers:an overview**, A.A.A.Alghamdi, *Thin-Walled Structures*, 2000, **39**, 189-213
- 9. Metallic tube type energy absorbers:a synopsis**, A.G.Olabi, Edmund Morris, M.S.J.Hashmi, *Thin-Walled Structures*, 2007, **45**, 706-726
- 10. Mathematical modeling of axial crushing of cylindrical tubes**, N.K.Gupta, Hussain Abbas, *Thin-Walled Structures*, 2000, **38**, 355-375
- 11. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading**, J.M.Alexander, *Q.J. Mech. Appl. Math.*, 1960, **13**, 1-9
- 12. An analysis of axi-symmetrical axial collapse of round tubes**, N.K.Gupta, R.Velmurugan, *Thin-Walled Structures*, 1995, **22**, 261-274
- 13. Crashworthiness of vehicles**, W.Johnson, Mamalis, *Mechanical Engineering Applications*, 1978
- 14. Metallic energy dissipating systems**, W.Johnson, S.R.Reid, *Appl Mech Rev*, 1978, **31**(3), 277-288
- 15. The large-scale crumpling of thin cylindrical columns**, A.Pugsley, M.Macaulay, *Quart J Mech Appl Math*, 1960, **13**, 1-9
- 16. On the axisymmetric progressive crushing of circular tubes under axial compression**, Bardi FC, Yun HD, Kyriakides S, *Int J Solids Struct*, 2003, **40**, 3137-3155
- 17. Plastic collapse of axially compressed cylindrical shells**, S.C.Batterman, 1965, *AIAA J*, **3**, 316
- 18. Protection of car occupants in frontal impact with heavy lorries: frontal structures**, Johnson W, Walton AC, 1983, 111-123

- 19. Axial crushing analysis of tubes deforming in the multi-lobe mode**, Singace AA, , Int J Mech Sci, 1999, **41**, 865-890
- 20. Structural impact and crashworthiness**, Morton J, 1984
- 21. Effect of triggering on the energy absorption capacity of axially compressed aluminium tubes**, S.Lee, C.Hahn, M.Rhee, J.E., , Materials and Design, 1999, **20**, 31-40