



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ειδικές διατάξεις triggering σε μεταλλικά κελύφη για βελτίωση της συμπεριφοράς τους έναντι κρουστικής φόρτισης: πειραματική και αριθμητική προσομοίωση

Γραφάκος Σταύρος
AM:02-201-05

Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Μανωλάκος

ΑΘΗΝΑ 2023

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμβολής μηχανισμών σταυροειδούς trigger, με την εφαρμογή τους κατά την παραλαβή κρουστικών φορτίων από λεπτότοιχα κελύφη τετραγωνικής διατομής μεγιστοποιώντας την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κατά την αξονική τους καταπόνηση. Οι προσομοιώσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και το πειραματικό μέρος της διπλωματικής πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στο οποίο χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος εξοπλισμός για την κατασκευή των δοκιμίων, την στατική φόρτιση τους και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

Στα πρώτα κεφάλαια γίνεται μια αναφορά στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας από κατασκευές και την εφαρμογή αυτών σε κατασκευές καθώς και την θεωρητική ανάλυση των μηχανισμών που θα μελετηθούν. Αναδεικνύεται δε η ανάγκη που οδήγησε στη χρήση των μηχανισμών trigger και γίνεται παρουσίαση των κυριότερων μηχανισμών που χρησιμοποιούνται και ερευνώνται καθώς και του τρόπου που συγκρίνονται ως προς την αποτελεσματικότητά τους. Κυρίως μέρος της εργασίας αποτελεί η υπολογιστική και πειραματική ανάλυση των κατασκευών καταλήγοντας στη σύγκριση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας, η εξαγωγή των συμπερασμάτων και προτάσεις ως προς τη βελτιστοποίηση της χρήσης των μηχανισμών trigger.

Abstract

The aim of this thesis is to study the contribution of cross-trigger mechanisms, with their application during the receipt of impact loads from thin-walled shells of square cross-section, maximizing the energy absorption capacity during their axial stress. The finite element simulations and the experimental part of the thesis were carried out at the Laboratory of Machining Technology of the National Technical University of Athens, where suitable equipment was used for the construction of the specimens, their static load and the extraction of the experimental results.

In the first chapters, a reference is made to the energy absorption capacity of structures and its application to structures, as well as the theoretical analysis of the mechanisms to be studied. The necessity that led to the use of trigger mechanisms is highlighted and a presentation of the main mechanisms used and investigated and how they are compared in terms of their effectiveness is given. The main part of this thesis is the computational and experimental analysis of the constructs leading to the comparison of the results of the experimental process, the conclusions and suggestions as to the optimization of the use of trigger mechanisms.

Πρόλογος

Η εργασία αυτή διενεργήθηκε στο Εργαστήριο του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών, του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Δημήτριου Μανωλάκου και τη συνδρομή του Δρ.Μηχ. Πρωτεσίλαου Κωστάζου (ΕΔΙΠ), τους οποίους και ευχαριστώ για τη βοήθεια και τη συμβολή τους στην εργασία, τόσο σε πρακτικό όσο και σε θεωρητικό επίπεδο.

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract	3
Περιεχόμενα	5
Κατάλογος Σχημάτων	7
Κατάλογος Πινάκων	10
1 Εισαγωγή	11
1.1 Γενικές αρχές κατασκευών και υλικών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας.....	11
2 Θεωρία κατάρρευσης δοκιμίων σε θλιπτικό φορτίο	14
3 Κατασκευές πρόσκρουσης με διατάξεις σκανδάλων συγκέντρωσης τάσεως	21
3.1 Διατάξεις trigger σε τετραγωνικές διατομές.....	25
4 Στοιχεία Θεωρίας	28
4.1 Δείκτες απόδοσης διατάξεων απορρόφησης κρουστικών φορτίων	28
4.1.1 Φορτίο κορυφής P_{max}	28
4.1.2 Απορροφούμενη ενέργεια	28
4.1.3 Μέσο φορτίο P_{mean}	28
4.1.4 Ειδική απορρόφηση ενέργειας.....	28
4.1.5 Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου (Crush Force Efficiency-CFE)	28
4.2 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.....	29
4.3 Εισαγωγή Σενάρια προς ανάλυση- Γεωμετρία δοκιμίων.....	31
4.4 Δοκιμή εφελκυσμού	31
4.5 Υπολογισμός Πραγματικών Τάσεων και Παραμορφώσεων.....	32
4.6 Γεωμετρία δοκιμίων	33
4.7 Γεωμετρία μηχανισμών trigger.....	33
4.8 Πειραματική διάταξη	34
4.9 Μοντελοποίηση πειραμάτων σε περιβάλλον LS-Dyna	35
4.9.1 Δημιουργία δοκιμίων.	35
4.9.2 Καθορισμός οριακών συνθηκών.....	36
4.9.3 Καθορισμός μηχανικών ιδιοτήτων υλικών.....	42
4.9.4 Υπολογισμός αποτελεσμάτων και αντιστοίχιση δεδομένων με την εκάστοτε γεωμετρία	44
5 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	46
5.1 Προσομοίωση χωρίς μηχανισμό σταυροειδούς trigger	46

5.2 Προσομοίωση με τοποθέτηση σταυροειδούς trigger σε προσανατολισμό στις 0°	48
5.3 Προσομοίωση με τοποθέτηση σταυροειδούς trigger σε προσανατολισμό 30°	50
5.4 Προσομοίωση με τοποθέτηση σταυροειδούς trigger σε προσανατολισμό 45°	53
5.5 Προσομοίωση με τοποθέτηση σταυροειδούς trigger σε προσανατολισμό 60°	55
6 Πειραματικά Αποτελέσματα	58
6.1.1 Πειραματική δοκιμή χωρίς μηχανισμό trigger	58
6.2 Πειραματικές δοκιμές με μηχανισμό trigger σταυρού με διαφορετικούς προσανατολισμούς.....	60
6.2.1 Πειραματική δοκιμή με τοποθέτηση σταυροειδούς trigger σε προσανατολισμό 0°	60
6.2.2 Πειραματική δοκιμή με τοποθέτηση σταυροειδούς trigger σε προσανατολισμό 30°.....	61
6.2.3 Πειραματική δοκιμή με τοποθέτηση σταυροειδούς trigger σε προσανατολισμό 45°.....	63
6.2.4 Πειραματική δοκιμή με τοποθέτηση σταυροειδούς trigger σε προσανατολισμό 60°.....	65
6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντελοποίησης με τα αποτελέσματα των πειραμάτων.	67
7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	72
Βιβλιογραφία	73

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1	Κυλινδρικά δοκίμια που σχηματίζουν α) παραμορφωση δακτιλίου, β) παραμορφωση διαμαντιού, γ) μικτή παραμορφωση.....	15
Εικόνα 2	Μηχανισμός αρθρώσεων για μηχανικό ισοδύναμο δημιουργίας παραμορφώσεων	17
Εικόνα 3	Διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας που προταθήκαν για μοντελοποίηση του κανονικού τρόπου θλίψης σύμφωνα με τον α)Alexander(1960) b)Abramowicz και Jones(1986) c)Grzebieta(1990) d)Wierzbicki(1992).	17
Εικόνα 4	Δοκίμια τετραγωνικής διατομής α) συμπαγής διπλωσεις $c/h=23$ β) μη συμπαγής διπλωσεις $\psi/h=100$	18
Εικόνα 5	Γεωμετρική απεικόνιση δοκιμίου μοντέλου Wierzbicki & Abramowicz και παραμορφωμένο σωμα.....	19
Εικόνα 6	Διαμορφώσεις μηχανισμού λοξότμησης (chamfer trigger), μηχανισμού σύζευξης (coupled triggers) και μηχανισμού τριπλής ΣΥζεύξης (triple coupled triggers)	21
Εικόνα 7	Δοκίμια με διαφορές γωνίας λοξοτομησης τύπου B ,T, I ,H.....	22
Εικόνα 8	Triggers με τροποποίηση πάχους τοιχώματος κυκλικής διατομής	23
Εικόνα 9	δοκίμιο τετραγωνικής διατομής (αριστερά) και διαστάσεις διατομής (δεξιά)	33
Εικόνα 10	Γεωμετρία trigger τύπου σταυρού.....	34
Εικόνα 11	μηχανή θλίψης instron 4482	35
Εικόνα 12	Απεικόνιση κελύφους με τις απαραμόρφωτες πλάκες και μηχανισμό trigger	36
Εικόνα 13	Κατασκευή καμπύλης ταχύτητας άνω πλάκας	36
Εικόνα 14	ορισμός κίνηση της άνω πλάκας.....	37
Εικόνα 15	Ενοποίηση μηχανισμού trigger με κάτω πλακά σε ένα σώμα.....	37
Εικόνα 16	ορισμός επαφής μηχανισμού trigger με το κέλυφος	38
Εικόνα 17	Ορισμός συνθηκών επαφής ίδιου κελύφους	39
Εικόνα 18	Συνθήκες επαφής πλάκας με κέλυφος.....	39
Εικόνα 19	Επιλογές ελέγχου επαφής επιφανειών.....	40
Εικόνα 20	ορισμός χρόνου τερματισμού.....	40
Εικόνα 21	επιλογή παραμετρών hourglass	41
Εικόνα 22	ορισμός πάχους και τύπος πεπερασμένων στοιχείων τύπου κελύφους.....	41
Εικόνα 23	ορισμός πάχους και τύπος πεπερασμένων στοιχείων τύπου στερεού συμπαγή	42
Εικόνα 24	Επιλογή ιδιοτήτων υλικού κελύφους	42
Εικόνα 25	Επιλογή ιδιοτήτων υλικού κινούμενης πλάκας	43
Εικόνα 26	Επιλογή ιδιοτήτων υλικού Σταθερής πλάκας.....	44
Εικόνα 27	Αντιστοίχιση γεωμετρίας και ιδιοτήτων κελύφους και στερεών σωμάτων	45
Εικόνα 28	Αντιστοίχιση γεωμετρίας και ιδιοτήτων σωμάτων που αποτελούν τον μηχανισμό trigger	45
Εικόνα 29	αρχικό απαραμόρφωτο και πλήρως παραμορφωμένο δοκίμιο.....	46
Εικόνα 30	Στιγμιότυπα παραμόρφωσης δοκιμίου χωρίς μηχανισμό trigger	46

Εικόνα 31 Όψεις τελικού δοκιμίου, έπειτα την ολοκλήρωση του πειράματος χωρίς χρήση μηχανισμού trigger	47
Εικόνα 32 Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης δοκιμής χωρίς μηχανισμό trigger	47
Εικόνα 33 Γεωμετρία δοκιμίου με μηχανισμό trigger τοποθετημένο στις 0°	48
Εικόνα 34 αρχικό απαραμόρφωτο και πλήρως παραμορφωμένο δοκίμιο με μηχανισμό trigger τοποθετημένο στις 0°.....	48
Εικόνα 35 Στιγμιότυπα παραμόρφωσης δοκιμίου με μηχανισμό trigger στις 0°	49
Εικόνα 36 Όψεις τελικού δοκιμίου, έπειτα την ολοκλήρωση του πειράματος με χρήση μηχανισμού trigger στις 0°	49
Εικόνα 37 Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης δοκιμής με μηχανισμό trigger στις 0°.....	50
Εικόνα 38 αρχικό απαραμόρφωτο και πλήρως παραμορφωμένο δοκίμιο με μηχανισμό trigger τοποθετημένο στις 30°.....	51
Εικόνα 39 Στιγμιότυπα παραμόρφωσης δοκιμίου με μηχανισμό trigger στις 30°	51
Εικόνα 40 Όψεις τελικού δοκιμίου, έπειτα την ολοκλήρωση του πειράματος με χρήση μηχανισμού trigger στις 30°	52
Εικόνα 41 Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης δοκιμής με μηχανισμό trigger στις 30°.....	52
Εικόνα 42 αρχικό απαραμόρφωτο και πλήρως παραμορφωμένο δοκίμιο με μηχανισμό trigger τοποθετημένο στις 45°.....	53
Εικόνα 43 Στιγμιότυπα παραμόρφωσης δοκιμίου με μηχανισμό trigger στις 45°	53
Εικόνα 44 Στιγμιότυπα παραμόρφωσης δοκιμίου με μηχανισμό trigger στις 45°	54
Εικόνα 45 Όψεις τελικού δοκιμίου, έπειτα την ολοκλήρωση του πειράματος με χρήση μηχανισμού trigger στις 45°	54
Εικόνα 46 Γεωμετρία δοκιμίου με μηχανισμό trigger τοποθετημένο στις 60°	55
Εικόνα 47 αρχικό απαραμόρφωτο και πλήρως παραμορφωμένο δοκίμιο με μηχανισμό trigger τοποθετημένο στις 60°.....	55
Εικόνα 48 στιγμιότυπα παραμόρφωσης δοκιμίου με μηχανισμό trigger στις 60°	56
Εικόνα 49 Όψεις τελικού δοκιμίου, έπειτα την ολοκλήρωση του πειράματος με χρήση μηχανισμού trigger στις 60°	56
Εικόνα 50 Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης δοκιμής με μηχανισμό trigger στις 60°.....	57
Εικόνα 51 Στάδια παραμόρφωσης δοκιμίου χωρίς τη χρήση μηχανισμού trigger	58
Εικόνα 52 Όψεις τελικού δοκιμίου, έπειτα την ολοκλήρωση του πειράματος χωρίς χρήση μηχανισμού trigger	59
Εικόνα 53 Στάδια παραμόρφωσης δοκιμίου χωρίς τη χρήση μηχανισμού trigger με προσανατολισμό 0°	60
Εικόνα 54 Όψεις κατεστραμμένου δοκιμίου με χρήση μηχανισμού σταυροειδούς trigger με προσανατολισμό 0°	61
Εικόνα 55 Στάδια παραμόρφωσης δοκιμίου χωρίς τη χρήση μηχανισμού trigger με προσανατολισμό 30°	62
Εικόνα 56 ΌΨΕΙΣ ΚΑΤΕΣΤΡΑΜΜΕΝΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΣΤΑΥΡΟΕΙΔΟΥΣ ΣΚΑΝΔΑΛΗΣ ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ 30°.....	63
Εικόνα 57 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΣΤΑΥΡΟΕΙΔΟΥΣ ΣΚΑΝΔΑΛΗ ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ 30°	63

Εικόνα 58	Στάδια παραμόρφωσης δοκιμίου χωρίς τη χρήση μηχανισμού trigger με προσανατολισμό 45°	64
Εικόνα 59	Όψεις κατεστραμμένου δοκιμίου με χρήση μηχανισμού σταυροειδούς trigger με προσανατολισμό	65
Εικόνα 60	Στάδια παραμόρφωσης δοκιμίου χωρίς τη χρήση μηχανισμού trigger με προσανατολισμό 60°	66
Εικόνα 61	Όψεις κατεστραμμένου δοκιμίου με χρήση μηχανισμού σταυροειδούς σκανδαλής με προσανατολισμό 60°	66
Εικόνα 62	Ραυδόγραμμα Μέγιστης δύναμης αντίδρασης	69
Εικόνα 63	ραυδογραμμα μέσησ δυναμης αντιδρασης	69
Εικόνα 64	Ραυδόγραμμα ενέργειας απορρόφησης.....	70
Εικόνα 65	Ραυδόγραμμα κανονικοποιημένης ενέργειας απορρόφησης.....	70
Εικόνα 66	Ραυδόγραμμα δείκτη ομοιομορφίας	71

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Συγκεντρωτικός πίνακας προσομιώσεων και πειραματικών αποτελεσμάτων ... 68

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικές αρχές κατασκευών και υλικών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας.

Οι συμβατικές κατασκευές, απαιτείται να διαθέτουν συγκεκριμένη αντοχή και ακαμψία κάτω από καθορισμένα φορτία οδηγώντας τον εκάστοτε μηχανικό, σε επιλογή του υλικού και γεωμετρίας βασιζόμενη στην μεγίστη ελαστική παραμόρφωση της κατασκευής κατά τη φόρτιση της. Οι βλάβες των κατασκευών αποδίδονται κυρίως σε κόπωση, διάβρωση ή υποβάθμιση του υλικού μετά επαναλαμβανόμενες φορτίσεις καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του. Από την άλλη πλευρά, ο σχεδιασμός και η ανάλυση των κατασκευών που απορροφούν ενέργεια είναι πολύ διαφορετικός από τη συμβατική δομική σχεδίαση και ανάλυση που βασίζεται στην ελαστική παραμόρφωση των υλικών. Οι κατασκευές που σχεδιάζονται ώστε να απορροφήσουν ενέργεια είναι απαραίτητο να αντέχουν έντονα κρουστικά φορτία, σημειώνουν δηλαδή μεγάλες αλλαγές γεωμετρίας, φαινόμενα σκληρύνσεως, φαινόμενα αλλαγής ρυθμού παραμόρφωσης τους και εναλλαγές μεταξύ διαφορετικών τρόπων παραμόρφωσης, όπως σε κάμψη, θλίψη, εφελκυσμό. Για αυτούς τους λόγους, οι περισσότεροι απορροφητές ενέργειας είναι κατασκευασμένοι από όλκιμα υλικά όπως ο χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και τα κράματα αλουμινίου ή εναλλακτικά όταν αναφερόμαστε σε μη μεταλλικά υλικά πλαστικά ενισχυμένα με ίνες, αφροί πολυμερών, σύνθετα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που απαιτούν ελάχιστο βάρος.

Η μελέτη της συμπεριφοράς των δομών που απορροφούν ενέργεια ξεκινά συνήθως με υπολογισμό της στατικής τους αντοχής θεωρητικά, επαληθεύοντας τους υπολογισμούς με την υλοποίηση πειραματικών δοκιμών καταστρεπτικών ή μη. Όταν η φόρτιση κατασκευών πραγματοποιείται με χαμηλή ταχύτητα (της τάξης των 50 m/s), η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης στην αύξηση της τάσης διαρροής και της παραμόρφωσης μπορεί συνήθως να υπολογιστεί απλούστερα, χρησιμοποιώντας την απλή εξίσωση Cowper–Symonds με βάση τη μέση ταχύτητα παραμόρφωσης. Ορισμένες μελέτες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι συγκεκριμένοι τρόποι παραμόρφωσης είναι πιο ευαίσθητοι σε δυναμικά φαινόμενα από άλλους, γεγονός που οδηγεί σε σφάλματα εκτίμησης της παραμόρφωσης και της τάσης αστοχίας κατά τη μελέτη δοκιμών μοντέλων μεγάλης κλίμακας ή και ακόμα σε πραγματικές συνθήκες.

Είναι προφανές ότι ο σχεδιασμός των κατασκευών απορρόφησης ενέργειας στα διάφορα υλικά συνδέεται με τον συγκεκριμένο σκοπό και τις συνθήκες υπό τις οποίες πρόκειται να λάβουν. Ο σχεδιασμός τους μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τη μια εφαρμογή στην άλλη στοχεύοντας στη απορρόφηση της κινητικής ενέργειας με ελεγχόμενο και προκαθορισμένο μη αναστρέψιμο τρόπο. Οι κατασκευές θα πρέπει να μπορούν να μετατρέψουν το μεγαλύτερο μέρος της κινητικής ενέργειας σε ανελαστική ενέργεια μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης ή με τη μετατροπή της σε άλλη μορφή ενέργειας. Κυριότερες μορφές μη αναστρέψιμης ενέργειας στη διαδικασία της παραμόρφωσης κατασκευών είναι η πλαστική διάχυση, παραμόρφωση με απορρόφηση ενέργειας, ενέργεια που διαχέεται από τριβή ή θραύση. Αίτιο των προαναφερθέντων μπορεί να θεωρηθούν οι μικροσκοπικές παραμορφώσεις τα μικροσκοπικά κατάγματα.

Η μέγιστη δύναμη αντίδρασης ενός απορροφητή ενέργειας είναι αναγκαίο να διατηρείται κάτω από ένα όριο και ιδανικά η δύναμη αντίδρασης είναι αναγκαίο να παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραμόρφωσης της κατασκευής απορρόφησης ενέργειας. Η δυνατότητα της κατασκευής να απορροφά και να διαχέει την ενέργεια στο περιβάλλον οδηγεί στη μείωση των δυνάμεων που πιθανά οδηγήσουν σε φθορά, ζημία ή τραυματισμό του εξοπλισμού ή ανθρώπου που καλούνται να προστατεύσουν. Για παράδειγμα, ένας καθήμενος επιβάτης στο κάθισμα ενός οχήματος που συγκρατείται από ζώνη ασφαλείας, υπόκειται κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης επιτάχυνση η οποία είναι περίπου ίση με την επιτάχυνση του ίδιου του οχήματος. Αν η επιταχύνσεις πολλαπλασιαστούν με το βάρος των μελών του ανθρωπίνου σώματος, η δύναμη που προκύπτει είναι μεγάλη που αν διαιρεθεί με την επιφάνεια της ζώνης δημιουργεί μεγάλες τάσεις που θα οδηγήσουν σε τραυματισμό του ανθρωπίνου σώματος, χωρίς να λάβουμε υπόψη πιθανή σύγκρουση του με μέρος του οχήματος. Με την ενσωμάτωση των απορροφητήρων ενέργειας που λειτουργούν ως ανακόπτες φορτίου, επιτυγχάνεται δραματική μείωση της απορροφήθησας ενέργειας από το ανθρωπινό σώμα οδηγώντας στο μικρό ή μη τραυματισμό του.

Για μια κατασκευή που απορροφά ενέργεια, η δύναμη αντίδρασης είναι απαραίτητο να είναι περιορισμένη και σχεδόν σταθερή, το έργο δε που παράγεται από τη δύναμη είναι ίσο με το μέτρο της επί τη μετατόπιση που πραγματοποιήθηκε κατά τη δράση αυτής στη διεύθυνση εφαρμογής της. Επομένως, εάν η κατασκευή έχει σχεδιαστεί με στόχο να απορροφήσει μεγάλη ποσότητα ενέργειας, προκειμένου να μη δημιουργηθούν υψηλές δυνάμεις αντίδρασης, απαιτείται μεγάλη μετατόπιση κατά την εφαρμογής αυτής. Για παράδειγμα σώμα που κινείται ευθύγραμμα και σταθερά με ταχύτητα v για να ακινητοποιηθεί είναι αναγκαίο να διανύσει απόσταση ίση με $x=vt/2$ απόσταση στην οποία η δύναμη επιβράδυνσης δρα μετατρέποντας κινητική ενέργεια σε άλλες μορφές όπως δυναμική ενέργεια, θερμότητα. Εκτός από την επίδραση της δύναμης, τα φαινόμενα κρούσης χρειάζεται να αναλυθούν από τη μεριά της κινητικής ενέργειας διότι η κινητική ενέργεια που θα διασκορπιστεί καθορίζεται από το χρόνο εξέλιξης του φαινομένου. Πιο συγκεκριμένα όσο μικρότερος είναι ο χρόνος εφαρμογής, τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη που δημιουργείται με αποτέλεσμα την αύξησης της ζημιάς ή του τραυματισμού κατά το συμβάν πρόσκρουσης. Σύμφωνα με αυτή τη παρατήρηση για την απορρόφηση μεγάλης ποσότητας ενέργειας όταν δεν είναι δυνατή η μεγάλη μετατόπιση, η κατασκευή καλείται να απορροφήσει περισσότερη ενέργεια μέσω της παραμόρφωσης της. Αν η ενέργεια αυτή είναι μεγάλη η επιλογή της γεωμετρίας και υλικά που θα χρησιμοποιηθούν είναι απαραίτητο να μπορούν να απορροφήσουν κατά το μέγιστό την ενέργεια της φόρτισης.

Στην επιλογή υλικών που απορροφούν ενέργεια, ο λόγος μέγιστης παραμόρφωσης υπό προσδιορισμένο φορτίο προς το αρχικό πάχος του υλικού καταλαμβάνει μεγάλη σημασία για την επιλογή τους. Ως εκ τούτου, τα συνηθισμένα στερεά μέταλλα ή τα στερεά πολυμερή δεν επιτυγχάνουν υψηλή αναλογία D_{max}/H . Ωστόσο, πολύ υψηλότερη αναλογία πετυχαίνουν κυψελοειδή υλικά όπως μορφές κηρήθρων (honeycombs) και φελιζόλ γεγονός που οφείλεται στα κενά που υπάρχουν μεταξύ των δομών επιτρέποντας υψηλές παραμορφώσεις των δομών τους. Για την αντιμετώπιση αβέβαιων φορτίων, η παραμόρφωσης και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας της εκάστοτε σχεδιασμένης κατασκευής είναι επιθυμητό να είναι σταθερή και παράλληλα η διεργασία να είναι επαναλήψιμη, έτσι ώστε η αξιοπιστία της κατασκευής να διασφαλίζεται.

Στο σημερινό ανταγωνιστικό περιβάλλον της παγκόσμιας οικονομίας, σχεδιαστικός περιορισμός των συσκευών απορρόφησης ενέργειας καθίσταται το κόστος. Συνεπώς όλες οι

προστατευτικές δομές πρέπει να μπορούν να κατασκευαστούν και να λειτουργούν εντός των οικονομικών ορίων που έχουν τεθεί. Αυτό είναι ιδιαίτερα ισχύει για συσκευές απορρόφησης ενέργειας επειδή είναι συνήθως αντικείμενα μιας χρήσης, δεδομένου ότι οι περισσότερες αφού παραμορφωθούν, απορρίπτονται και αντικαθίστανται. Οι οικονομικοί περιορισμοί μπορεί να ξεπεραστούν μόνο με τον λεπτομερή υπολογισμό και σχεδιασμό των ειδικών κατασκευών απορρόφησης ενέργειας, το οποίο είναι και το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

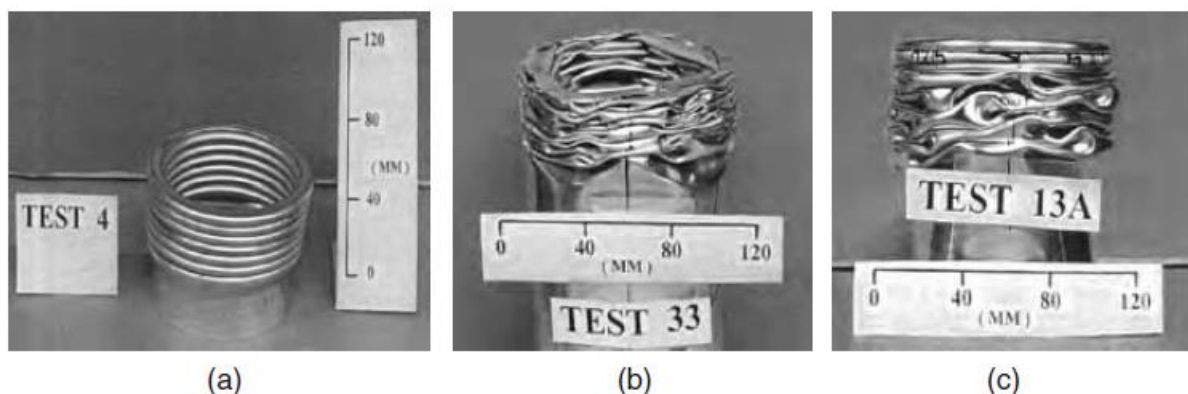
2 Θεωρία κατάρρευσης δοκιμών σε θλιπτικό φορτίο

Μεγάλο τμήμα έρευνας και ανάπτυξης των αυτοκινητοβιομηχανιών και των αεροναυπηγικών εταιριών αλλά και σε στο σχεδιασμό ευρέως τύπου κατασκευών αφορά τον σχεδιασμό αρκετά στιβαρών και ανθεκτικών κατασκευών διατηρώντας στο ελάχιστο το βάρος στοχεύοντας την προστασία ανθρώπων και εξοπλισμού, ακόμα και κατά την περίπτωση που θα φορτιστούν από έντονα δυναμικά και κρουστικά φορτία. Η γενική αρχή που διέπει αυτή τη πολιτική σχεδιασμού σχετίζεται με τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση όλων των ιδιοτήτων και αντοχών της εκάστοτε κατασκευής και υλικού. Η ανάπτυξη των κατασκευών απορρόφησης κρουστικών φορτίων σχετίζεται με τον σχεδιασμό, που βασίζεται στην ανάλυση και τον υπολογισμό της πλαστικής παραμόρφωσης των τμημάτων της κατασκευής ώστε σε ιδιαίτερες μη κανονικές συνθήκες να είναι σε θέση να παραλάβουν το φορτίο κατά το βέλτιστο δυνατό. Ιδιαίτερο χωρίο ανάλυσης και εφαρμογής του ανωτέρου τρόπου σχεδιασμού αφορούν οι διατάξεις απορρόφησης ενέργειας κρουστικών φορτίων, που δεδομένης της μεγάλης ποσότητας ενέργειας και του μικρού χρονικού διαστήματος που διαχειρίζονται, δημιουργούν την ανάγκη της αφομοίωσης της από τα μέρη της κατασκευής με αποτέλεσμα να προστατευθούν οι περιοχές ενδιαφέροντος από την κρούση. Με ακριβείς υπολογισμούς και ελέγχους έχουν επιτευχθεί ελαφριές κατασκευές μεταλλικών ή μη κατασκευών σύνθετης γεωμετρικής διαμόρφωσης που σημειώνουν μεγάλες αντοχές έναντι ισχυρών δυναμικών φορτίσεων και κρουστικής καταπόνησης (Mamalis A. G., 1986) (SHELLS, 1988), (Mamalis A. G., 1986) (Mamalis AG, 1989).

Ο πιο συνήθης τύπος κατασκευής που χρησιμοποιείται σε διατάξεις απορρόφησης κρουστικών φορτίων είναι οι λεπτότοιχοι μεταλλικοί σωλήνες ή γενικότερα τα κελύφη. Τις τελευταίες δεκαετίες, μελέτες έχουν διεξαχθεί με αντικείμενο την αξονική κρούση λεπτότοιχων κυλινδρικών κελύφων όπου και παρατηρήθηκε η ιδιότητα τους να σημειώνουν μεγάλη απορρόφηση ενέργειας. (Yamashita M, 2003) (Abramowicz W, 1984). Αρκετές δοκιμές σημειώθηκαν επίσης και σε διαφορετικών γεωμετριών λεπτότοιχα κελύφη και ιδίως σε πολυγωνικές γεωμετρίες. (Karagiozova D, 2005), (Leller J, 2004) (Guillow SR) (Xiang Y, 2006). Η πληθώρα των πειραματικών δοκιμών περιορίστηκε στην μελέτη των τετραγωνικών και εξαγωνικών διατομών (Rossi A, 2005) (Zhang X, 2010) με συγκρίσεις να πραγματοποιούνται ακόμα με σύνθετες πολύγωνες γεωμετρίες (Leller J, 2004). Σημαντική παρατήρηση σημειώνεται στο ότι η αντοχή σε κρούση αυξάνεται όσο αυξάνεται και ο αριθμός των πλευρών της διατομής των κελύφων σχηματίζοντας αστεροειδή γεωμετρίες, δεδομένου ότι σημειώνουν δυνατότητα απορρόφησης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας που οφείλεται στις πτυχώσεις εξωτερικά και εσωτερικά της αρχικής γεωμετρίας τους που σχηματίζουν κατά την συμπίεση τους. Αρκετές μέθοδοι κατασκευής πολύγωνων κελύφων για κρουστικά φορτία αναπτύχθηκαν όπως έλασης χάλυβα χαμηλού άνθρακα AISI1018 για τη δημιουργία οκταγωνικής διατομής κελύφους που σχηματίστηκε με τη συγκόλληση των δυο συμμετρικών διαμορφωμένων φύλλων χάλυβα και τη δημιουργία πολύγωνων κελύφων από συμπαγείς δοκούς που δημιουργούνται με κοπή σύρματος σε αγωγή λουτρό τα οποία δεν σημειώνουν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, λόγω απουσίας διεργασιών συγκόλλησης.

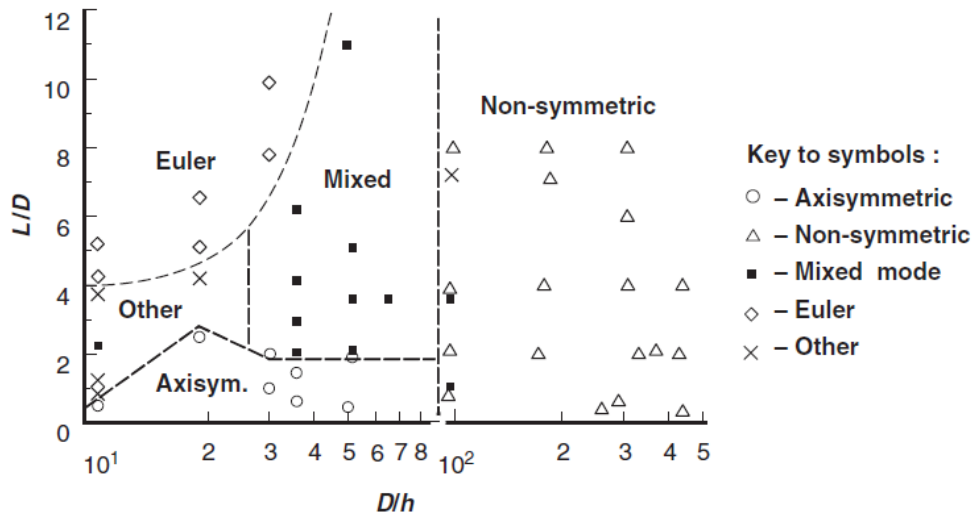
Μεγάλη ομοιότητα μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται εάν ληφθεί υπόψη η επιρροή της παραμόρφωσης υλικού, η επίδραση της απόστασης θλίψης και η ευαισθησία στις δυναμικές φορτίσεις σε εφαρμογές αξονικής συμπίεσης σε λεπτότοιχους

κυλινδρικούς σωλήνες. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως δυναμική προοδευτική κάμψη που ξεχωρίζει από την δυναμική πλαστική κάμψη η οποία αναπτύσσει υψηλότερες ταχύτητες σύγκρουσης. Η αξονική προοδευτική θλίψη σωλήνων έχει πρόσφατα κερδίσει περισσότερη προσοχή όσον αφορά τη χρήση στο σχεδιασμό κρουστικών συσκευών απορρόφησης ενέργειας (Mamalis A. G., 1986). Κατά την αξονική συμπίεση κυλινδρικών διατάξεων, χωρίς την ύπαρξη διατάξεων ή ατελειών τα κυριότερα είδη παραμορφώσεων κατηγοριοποιούνται στους μη εκτατούς λοβούς, στους εκτατούς λοβούς και συνδυασμό αυτών. Σύμφωνα με αυτό το είδος των μη εκτατών λοβών παραμόρφωσης, το δοκίμιο που καταρρέει σχηματίζει δισδιάστατα και τριδιάστατα είδη αρμών σε τριγωνική μορφή όπου η κάθε άρθρωση διαφέρει κατά $\pi/3$ ενώ υπάρχει και η καρό μορφή σε (diamond) σχήμα όπου η κάθε άρθρωση διαφέρει κατά $\pi/4$. Αντίστοιχα οι εκτατοί λοβοί χαρακτηρίζονται από το σχηματισμό κυκλικού τύπου αναδίπλωσης συμμετρικό ως προς κάθετο άξονα συμμετρίας περιστροφής του δοκιμίου με αποτέλεσμα τον σχηματισμό κυλινδρικών δακτυλίων (rings), που δημιουργούνται κατά την εκτατή κατάρρευση των δοκιμίων. Η περίπτωση που σχηματίζεται κατάρρευση με συνδυασμό ενός ή περισσότερων αρχικά σχηματισμένων αξονοσυμμετρικών λοβών, οι οποίοι ακολουθούνται από μη εκτατούς λοβούς καθώς προχωράει η κατάρρευση του δοκιμίου, χαρακτηρίζεται ως ανάμεικτων τύπων λοβοί. Σχηματική απεικόνιση κάθε είδους σχηματισμένου λοβού απεικονίζεται στη παρακάτω εικόνα.



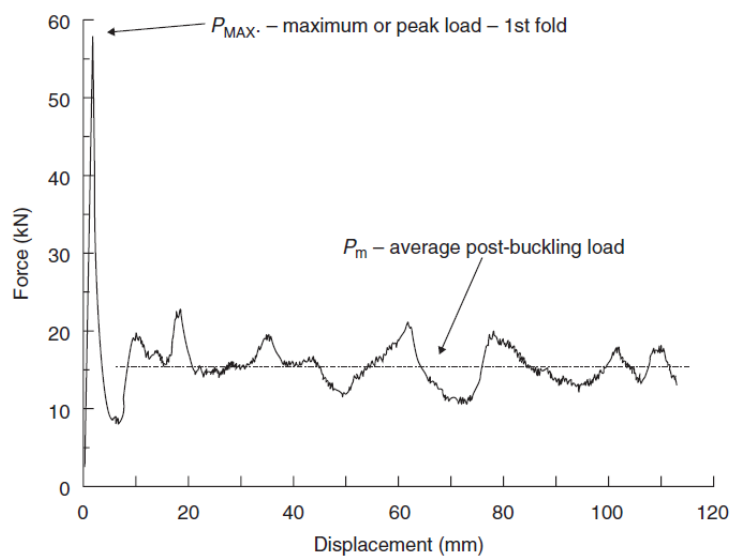
Εικόνα 1 Κυλινδρικά δοκίμια που σχηματίζουν α) παραμορφωση δακτυλίου, β) παραμορφωση διαμαντιού, γ) μικτή παραμορφωση

Οι σωλήνες που δέχονται αξονικά φορτία παραμορφώνονται είτε αξονοσυμμετρικά είτε μη, συμπεριφορά που εξαρτάται ως επί το πλείστον από τη διάμετρο του σωλήνα και το πάχος του τοιχώματος, δηλαδή από το λόγο D/t και σχηματικά ομαδοποιούνται στην ακόλουθη εικόνα. Η επίδραση του μήκους σωλήνα και του πάχους L/t και του λόγου D/t κατά τον τρόπο θλίψης ερευνήθηκε από τον Andrew 1983 και παρουσίασε ένα κεφάλαιο ταξινόμησης σχετίζοντας αυτές τις μεταβλητές. Σχετικά λεπτοί σωλήνες κανονικά σχηματίζουν λοβούς μορφής διαμαντιού(καρό) και παχύτεροι σωλήνες γενικά παραμορφώνονται (καταρρέουν) με ομαλό (αξονοσυμμετρικό) τρόπο, σχηματίζοντας ομόκεντρους δακτυλίδιους.

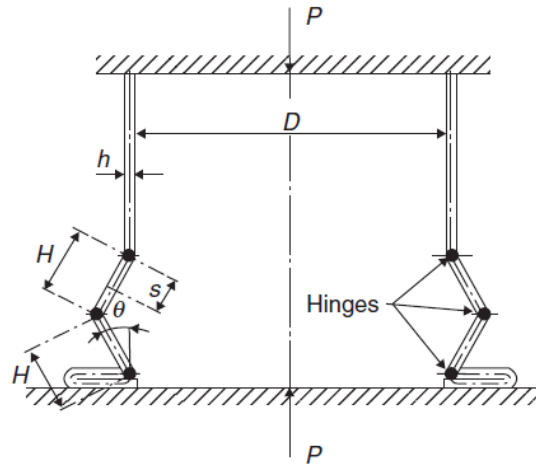


Εικόνα 1 διάγραμμα κατηγοριοποίησης μοτίβων παραμορφωσης λεπτοτοιχων κυλινδρικών σωληνων συναρτησει λογων μηκους/διαμετρου και διαμετρου/παχους τοιχωματος.

Σε κάποιες περιπτώσεις, λεπτοί σωλήνες αρχικά παραμορφώνονται σχηματίζοντας ομαλό τύπο πτυχής πριν μετατραπούν σε τύπο διαμαντιού(καρό) όπως αναφέρονται αναλυτικά. Ορόσημο αυτής της προσέγγισης αποτελεί η εργασία του Alexander (1960), ο οποίος διατύπωσε το θεωρητικό μοντέλο για την αξονική κατάρρευση κυλινδρικών σωληνων με σχηματισμό (αξονοσυμμετρικών) δακτυλίων (λοβών). Κατά την εξέταση της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης του πειράματος αξονικής συμπίεσης, συσχετίστηκε η σημείωση των τοπικών ακροτάτων με τον σχηματισμό πλαστικών αρμών/αρθρώσεων (plastic hinges) με την υπόθεση ότι σε κάθε άρθρωση διπλώνεται γειτονική περιοχή του κελύφους, με την πλαστική παραμόρφωση του υλικού, ώστε να σχηματίζονται πλαστικοί αρμοί (και λοβοί) σε μορφή δακτυλίων. Σκοπός αυτής της προσέγγισης είναι η σύνθεση ισοδύναμου μηχανικού μοντέλου, που συνδέει την διακύμανση στη δύναμη θλίψης - κατά την εξέλιξη της φόρτισης - με τον σχηματισμό λοβών. Με αυτόν τον τρόπο το πρόβλημα αξονικής συμπίεσης μετατρέπεται σε τοπική κάμψη του υλικού

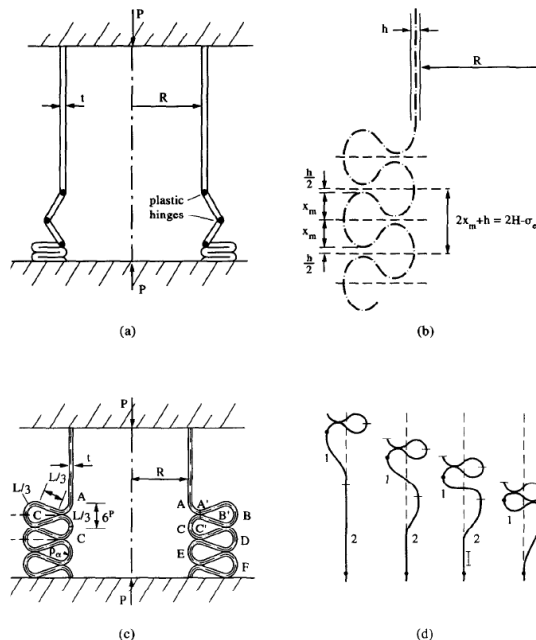


Εικόνα 2 Διάγραμμα δύναμης μετατόπιση όπου σημειώνονται τα σημεία σχηματισμού διπλωμάτων.



Εικόνα 2 Μηχανισμός αρθρώσεων για μηχανικό ισοδύναμο δημιουργίας παραμορφώσεων

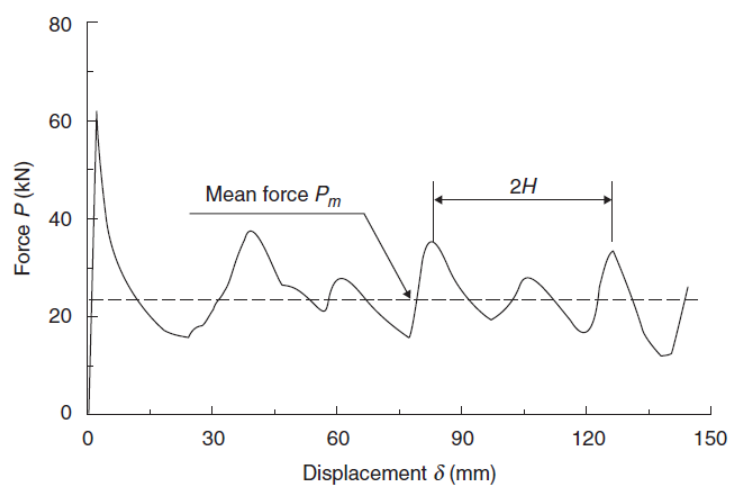
Μετά την προσπάθεια του Alexander 1960 να εκτιμήσει αναλυτικά το μέσο θλιπτικό φορτίο ενός αξονικά θλιβόμενου σωλήνα που μορφοποιείται με ομαλό τρόπο, πολλοί ερευνητές εργάστηκαν σε θεωρητικό υπόβαθρο με τον μηχανισμό άρθρωση τύπου μεντεσέ και επικεντρώθηκαν στον επαναπροσδιορισμό κάποιων παραμέτρων ώστε να οριστεί ο υπολογισμός του μέσου θλιπτικού φορτίου (Johnson 1972, Andronicou και Walker 1981, Amdahl και Soreide 1981). Άλλοι προσπάθησαν να βελτιώσουν το μοντέλο του Alexander σε μια προσπάθεια να παράγουν μια πιο ρεαλιστική πτύχωση (Wierzbicki και Bhat 1984, Abramowicz και Jones 1986, Grzebieta 1990). Στο εικόνα **Error! Reference source not found.** διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας που προταθήκαν για μοντελοποίηση του κανονικού τρόπου θλίψης προσπαθώντας να μοντελοποιήσουν τις πτυχώσεις που δημιουργούνται κατά την πλαστική παραμόρφωση



Εικόνα 3 Διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας που προταθήκαν για μοντελοποίηση του κανονικού τρόπου θλίψης σύμφωνα με τον α) Alexander(1960) b) Abramowicz και Jones(1986) c) Grzebieta(1990) d) Wierzbicki(1992).

Τα παραπάνω μοντέλα θεωρούν μόνο ακτινική εκτόπιση του τοιχώματος του σωλήνα προσπαθώντας να επιτύχουν ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο πτύχωσης. Αναλυτικά μοντέλα για

συμπεριφορά πλαστικής θλίψης έχουν παρουσιάσει μεταξύ άλλων ο Jones 1989 και Singace 1994. Παρόλο που η συμπίεση λεπτότοιχων διατομών τετραγωνικής διατομής έχει παρόμοια επίδοση με τις κυλινδρικές διατομές, οι μηχανισμοί που περιγράφουν τον τρόπο αστοχίας και παραμόρφωσης είναι τελείως διαφορετικοί μολονότι τα διαγράμματα δύναμης μετατόπισης σημειώνουν παρόμοια μορφή αντίστοιχη αυτής του Εικόνα 3. Αναλύοντας το διάγραμμα παρατηρούμε ότι η μέγιστη δύναμη σημειώνεται πριν τη δημιουργία του πρώτου λοβού με τους υπόλοιπους να σχηματίζονται ευκολότερα. Με την έναρξη της παραμόρφωσης η δύναμη μειώνεται διότι σημειώνεται κίνηση και αυξάνεται εκ νέου μέχρι να καταρρεύσει “εκ νέου” το υλικό. Αυτό συμβαίνει γιατί και η τετράγωνη και η κυκλικές διατομές υπόκεινται σταδιακή αστοχία κατά την επιβολή αξονικών θλιπτικών φορτίων. Μια γενική μορφή παραμορφώσιμου σχήματος σημειώνεται στο **Error! Reference source not found.**



Εικόνα 3 Διάγραμμα δύναμης μετατόπιση όπου σημειώνονται τα σημεία σχηματισμού διπλωμάτων



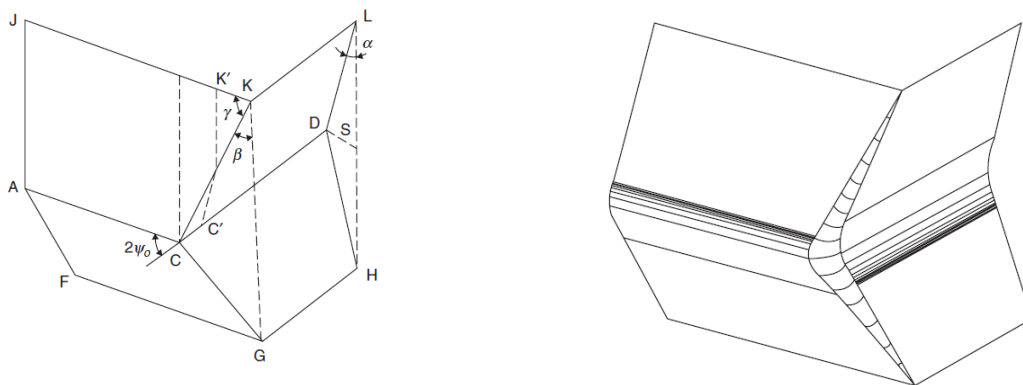
(a)



(b)

Εικόνα 4 Δοκίμια τετραγωνικής διατομής α) συμπαγής διπλώσεις $c/h=23$ β) μη συμπαγής διπλώσεις $\psi/h=100$

Έπειτα από πειραματικές παρατηρήσεις την σχηματοποίησης των παραμορφωμένων δοκιμών κατά την εκτέλεση πειραμάτων συμπίεσης μπορούμε να συνοψίσουμε με τη δημιουργία του παραμορφώσιμου μοντέλου που απεικονίζεται στο μοντέλο του Wierzbicki and Abramowicz, 1983.



Εικόνα 5 Γεωμετρική απεικόνιση δοκιμίου μοντέλου Wierzbicki & Abramowicz και παραμορφωμένο σωμα.

Το μοντέλο προς ανάλυση αποτελείται από δυο αρθρώσεις την AC και την DC που θεωρούνται ακμές δίπλωσης και παραμένουν σταθερές και τις κινούμενες πλάκες KCDL και CGHD. Η κινούμενη πλάκα KCDL προέρχεται από την κατακόρυφη γωνία K'C'; και η γωνία κλίσης αυξάνεται όσο η παραμόρφωση εξελίσσεται. Η αρχική γεωμετρία του στοιχείου ορίζεται από το συνολικό ύψος αυτού ίσο με 2H. Γενικεύοντας, έστω $2\psi_0$ η γωνία μεταξύ δύο γειτονικών πλακών όπως φαίνεται κατά μήκος του άξονα του κελύφους και c είναι το μήκος της πλευράς των AC' και C'D. Τόσο η γωνία $2\psi_0$ όσο και το σημείο C θεωρείται ότι παραμένουν σταθερά κατά την παραμόρφωση. Αν οι διατομές είναι τετραγωνικές, λόγω της

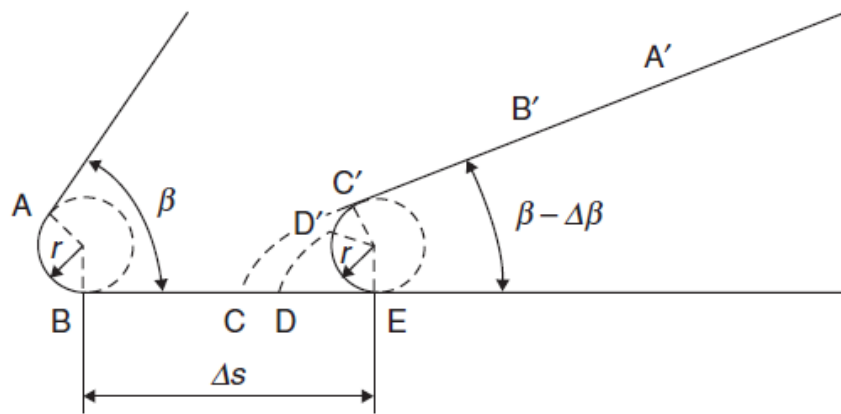
συμμετρίας που σημειώνεται $\psi_o = \pi/2$ και $AC = CD = c$. Κάθε στάδιο κατάρρευσης του στοιχείου μπορεί να περιγράψει με τη παράμετρο δ , που εκφράζει τη μετατόπιση της παραμόρφωσης, α της γωνία περιστροφής του τραπεζίου KLCD και S την οριζόντια απόσταση στο σημείο D τα οποία υπολογίζονται παρακάτω.

$$\begin{aligned}\delta &= 2H(1 - \cos(\alpha)) \\ S &= H\sin(\alpha) \\ \tan(\gamma) &= \frac{\tan(\psi_o)}{\tan(\alpha)} \\ \tan(\gamma) &= \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\psi_o)}\end{aligned}$$

Στην εξιδανικευμένη λειτουργία παραμόρφωσης, όλη η πλαστική παραμόρφωση εμφανίζεται μέσα σε τοπικές πλαστικές αρθρώσεις. Αυτό θα ήταν αποδεκτό εάν δε σημειώνονταν εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση στη περιοχή των αρθρώσεων κατά την κίνηση της πλαστικής άρθρωσης από την θέση KC στη θέση K'C'. Αν μια πλαστική άρθρωση σημείωνε άπειρη καμπυλότητα θα απορροφούσε και άπειρη ενέργεια κατά τη πλαστική της παραμόρφωση. Ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο, που μπορεί να θεωρηθεί κινηματικά αποδεκτό βασίζεται στη παρατήρηση ότι αν η πλαστική άρθρωση μετατραπεί σε πλαστική ζώνη θα προσεγγίσει τη πραγματικότητα με μικρότερο σφάλμα. Έτσι, κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης τέσσερις επίπεδες τραπεζοειδείς πλάκες κινούνται ως άκαμπτα σώματα. Οι πλάκες συνδέονται μέσω μιας κωνικής επιφάνειας που οριοθετείται από δύο ευθείες γραμμές. Καθώς το KC στο (α) κινείται, μια ευθεία γραμμή προσδίδει μια καμπυλότητα σε ένα αρχικά επίπεδο φύλλο (μέρος του JKCA) και το άλλο αφαιρεί αυτή την καμπυλότητα έτσι ώστε το κυρτό φύλλο να κάμπτεται πίσω σε επίπεδο, ενώνοντας το KLCD. Τέλος, οι τέσσερις ενεργές ζώνες παραμόρφωσης συνδέονται με ένα τμήμα ενός δακτυλιοειδούς κελύφους. Αυτή η διπλά κυρτή επιφάνεια έχει μη μηδενική καμπυλότητα Gauss δηλαδή το γινόμενο των δύο κύριων καμπυλοτήτων είναι διάφορο του μηδενός, ενώ τα κυλινδρικά τμήματα πριν και αφού περάσουν αυτό το δακτυλιοειδές κέλυφος έχουν μηδενική καμπυλότητα Gauss. Σημειώνεται επομένως μια αλλαγή της Gaussian καμπυλότητας όταν το υλικό παραμορφώνεται σε γεωμετρία κελύφους και έπειτα ξανά σε κυλινδρική γεωμετρία, εφόσον σημειώνεται εντός επιπέδου παραμόρφωση (Calladine, 1983b).

Αν αναλύσουμε δυσδιάστατα το πρόβλημα μετακίνησης της άρθρωσης μεντεσέ κατά μια μετατόπιση Δs μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια που απορροφάτε από το υλικό κατά την μετατόπιση αν χωρίσουμε την κίνηση σε περισσότερα βήματα και τα αθροίσουμε με την αρχή της επαλληλίας. Παρατηρώντας το ακόλουθο σχήμα, Εικόνα 4 και χωρίζοντας της κίνηση στα τμήματα AB, BC,CD,DE υπολογίζουμε την ενέργεια παραμόρφωσης.

$$\begin{aligned}W &= W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DE} = (\overline{AB} + 2\overline{BC} + \overline{CD} + \overline{DE}) \frac{1}{r} M_p = \frac{1}{r} M_p [\overline{AB} +] \\ &= \frac{1}{r} M_p \left[\overline{AB} + 2 \left(\Delta s - \frac{\overline{AB} + \overline{CD}}{2} \right) + \overline{CE} \right] = \frac{1}{r} M_p \Delta s\end{aligned}$$



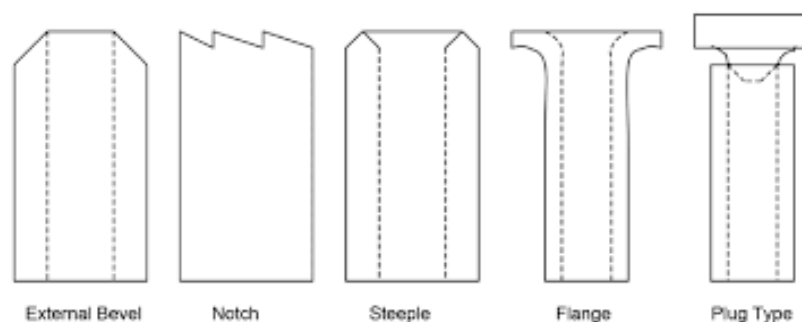
Εικόνα 4 δυσδιάστατη απεικόνιση κινούμενου μεντεσέ

Η παραπάνω εξίσωση ορίστηκε επίσης από τους Meng et al. (1983) και αποδεικνύει ότι η ενέργεια που απορροφάτε από μια κινούμενη άρθρωση μεντεσέ είναι ευθέως ανάλογη στην απόσταση που διανύθηκε και αντιστρόφως ανάλογη με την ακτίνα r του του μεντεσέ που σχηματίζεται. Αυτό εξηγεί γιατί μια απότομη πτυχή (ακτίνας μηδέν) δεν μπορεί να κινηθεί διότι θα απαιτούσε άπειρη εξωτερική ενέργεια. Ο μηχανισμός μιας άρθρωσης που ταξιδεύει μπορεί να γίνει κατανοητός από διαφορετική οπτική θεωρώντας δηλαδή ότι το υλικό ωθείται σε αντίθετη κατεύθυνση, μέσω ενός απαραμόρφωτου διαμορφωτήρα ακτίνας r . Έτσι, η ενέργεια απορροφάτε αρχικά με κάμψη και στη συνέχεια επαναφορά στην αρχική γεωμετρία ελάσματος μήκους Δs .

3 Κατασκευές πρόσκρουσης με διατάξεις σκανδάλων συγκέντρωσης τάσεως

Οι ενεργοποιητές ή μηχανισμοί σκανδαλών (triggers/trigger mechanisms) μπορούν να εφαρμοστούν στο σχεδιασμό κατασκευών συντριβής για να βοηθήσουν στην επίτευξη του επιθυμητού μοτίβου παραμόρφωσης και να επιτύχουν την απορρόφησης μέγιστης ενέργειας. Ο σχεδιασμός διατάξεων με μηχανισμούς triggers που επιβάλλουν προοδευτική λειτουργία σύνθλιψης, μέσω διαφόρων τύπων αστοχίας, βελτιώνουν την ικανότητα απορρόφησης κρουστικών φορτίων πρόσκρουσης. Η απουσία ενός μηχανισμού ενεργοποίησης σε μια διάταξη που υπόκειται σε κρουστικά φορτία οδηγεί τη δομή σε τυχαίες παραμορφώσεις χωρίς τη μέγιστη δυνατή απορρόφηση ενέργειας. Μια διάταξη trigger με σωστά μελετημένη γεωμετρία βοηθά στη μεγιστοποίηση της απορρόφησης ενέργειας και την ελαχιστοποίηση του φορτίου αιχμής που μεταφέρετε στη προστατευόμενη περιοχή κατά την σημείωση πρόσκρουσης.

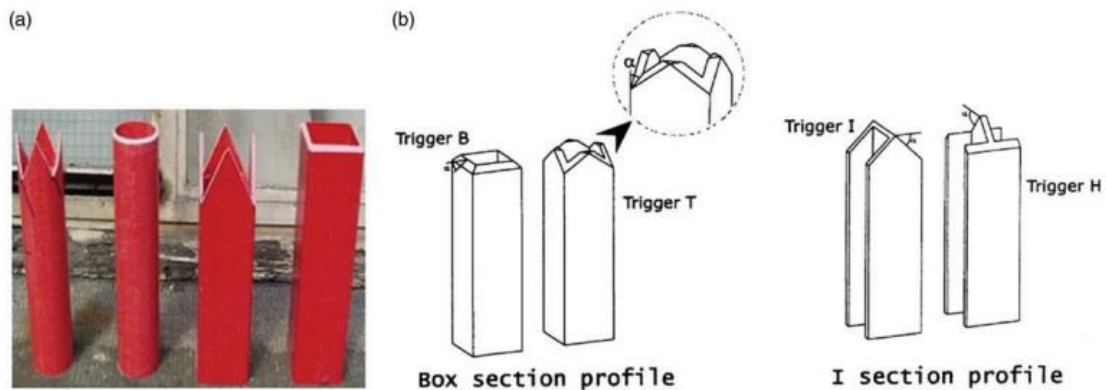
Σημαντικές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στο σχεδιασμό και την ανάλυση των διαμορφώσεων trigger εισάγουν διαφορετικές μεθοδολογίες σχεδιασμού διατάξεων απορρόφησης κρούσεων. Ένας τύπος αυτόνομης μηχανισμού trigger που ενσωματώνεται στα άκρα των σύνθετων δομών απορρόφησης ενέργειας κατά τη διαδικασία κατασκευής, είναι γνωστός στη βιβλιογραφία ως ενσωματωμένες σκανδάλες. Η συγκεντρώσεις τάσεων που σημειώνονται στην επιφάνεια επαφής trigger και κελύφους οδηγούν σε αστοχία των επιφανειών των κελύφων. Οι διαμορφώσεις της ολοκληρωμένου μηχανισμού trigger επιτυγχάνονται με τοπική μείωση του πάχους ενός φύλλου ή την εισαγωγή μιας εντοπισμένης διακοπής, συνήθως με αφαίρεση υλικού (localized cutout). Συγκεντρώσεις τάσεων με αφαίρεση υλικού που συνήθως εφαρμόζονται είναι το λοξόμητο άκρο (external bevel), η καμπυλοειδή μηχανισμού trigger (steeple trigger), , πριονωτής οδόντωσης (notch), trigger βάθμωσης (dent specimens), η τουλίπα (tulip trigger), trigger τύπου βύσματος (plug type) και η συσσώρευση τάσεων με διάνοιξη οπών (holes triggering).



Εικόνα 6 Διαμορφώσεις μηχανισμού λοξόμησης (chamfer trigger), μηχανισμού σύζευξης (coupled triggers) και μηχανισμού τριπλής ΣΥζεύξης (triple coupled triggers)

Ο μηχανισμός trigger 45 μοιρών, chamfer trigger, έχει εφαρμοστεί σε διάφορες σύνθετες δομές απορρόφησης ενέργειας, όπως κυκλικό σωλήνα, τετράγωνο σωλήνα, κωνικό σωλήνα, ημιτονοειδές κύμα, λεπτότοιχες διατομές I, H και C με επιθυμητά αποτελέσματα. (X., 2009), (Jiménez MA, 2000). Η επίδραση της γωνίας λοξοτομής στις αποκρίσεις μετατόπισης

φορτίου επιδρά σε μεγάλο βαθμό στη παραμόρφωση της κατασκευής. Αντίστοιχα δε, οι γεωμετρικές trigger με διαφορετικές γωνίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε διαφορετικά παραμορφωμένα δοκίμια. Και με τις δυο σχεδιαστικές προσεγγίσεις η, περιοχή που έρχεται σε επαφή, κατά το αρχικό στάδιο σύνθλιψης, είναι μικρότερη από την πλήρη διατομή της κατασκευής οδηγώντας σε μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων στην περιοχή επαφής δηλαδή σε ευκολότερη αστοχία και μεγαλύτερες παραμορφώσεις αυτών.



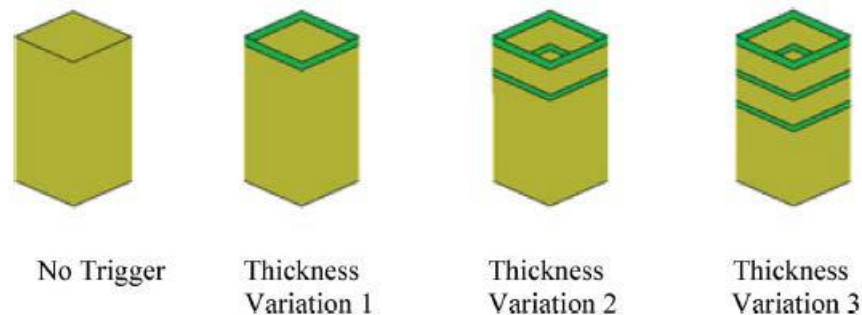
Εικόνα 7 Δοκίμια με διαφορεσ γωνιες λοξοτομισησ τύπου B ,T , I ,H

Άλλο ένα είδος trigger, ο καμπυλοειδής μηχανισμός λειτουργεί παρόμοια με το trigger λοξοτομής, μειώνοντας επίσης τη διατομή του υλικού που έρχεται σε επαφή προκαλώντας μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων. Διαφορετικοί τρόποι ενεργοποίησης για την έναρξη προοδευτικών τρόπων αστοχίας σύνθετων κατασκευών κάτω από στατικό φορτίο σύνθλιψης (M.W. Joosten a b, 2019) εντούτοις, διαπιστώθηκε ότι το βάθος της καμπύλης είναι η σχεδιαστική προδιαγραφή που έχει μεγάλη επίδραση στη παραμόρφωση των δοκιμών κατά την εφαρμογή σταθερού θλιπτικού φορτίου, σε αυτά. Παράλληλα έρευνες πραγματοποιήθηκαν με τη κατασκευή μηχανισμών απορρόφησης ενέργειας από κυκλικούς και τετράγωνους σωλήνες σύνθετων υλικών με χρήση trigger σχήματος τουλίπας (R.A. Eshkoor a, Composites Part B: Engineering). Τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας του σωλήνα από σύνθετο υλικού που ενεργοποιήθηκε από την trigger τουλίπας κάτω από το αξονικό στατικό φορτίο καταγράφηκαν κατά τη εκτέλεση σχετικών πειραμάτων. Με τη παρατήρηση των πειραματικών αυτών δοκιμών, σημειώθηκε αρχικά τοπική αστοχία της επιφάνειας του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την διάταξη triggers και έπειτα συνέχισε να καταρρέει σημειώνοντας ομοιότητα στον τρόπο κατά τον οποίο παραμορφώνονται. Η τελική μορφή του δοκιμίου, μετά την επίδραση φορτίου σημείωσε μια γεωμετρία που παρομοιάζει με ανθοφορία λουλουδιού. Μηχανισμός trigger τουλίπας είναι παρόμοια με ένα μηχανισμό καμπύλης (steep trigger), διότι αμφότερες χαρακτηρίζονται από μειωμένη περιοχή μέσω πολλών καμπυλών.

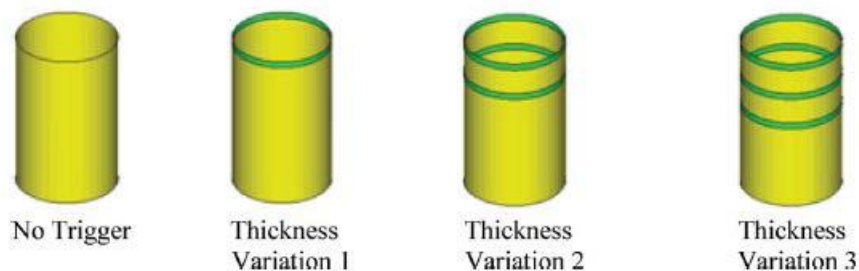
Θετικά αποτελέσματα έχουν σημειωθεί με trigger με γεωμετρία δοντιού πριονιού, που δημιουργείται από μια επαναλαμβανόμενη ακολουθία διαδοχικών κοπών κατά μήκος του πλάτους της δομής, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως μόνο σε επίπεδες κατασκευές. Ο τύπος triggers πριονιού μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμος με μια σειρά μικρών σκανδάλων. Οι Feraboli et al. και Jiang et al (Yiru Ren a b, 2019). αντίστοιχα διερεύνησαν τις αξονικές συμπεριφορές σύνθλιψης και απορρόφησης ενέργειας των επίπεδων πλακών και των κυματιστών δοκών από σύνθετα υλικά.

Ένα άλλο είδος trigger, είναι το trigger πτύχωσης που κατασκευάζεται με τη μετακίνηση ενός ή περισσότερων πτυχώσεων προς κατεύθυνση παράλληλη της κατεύθυνσης φόρτισης

της κατασκευής. Έτσι, υπάρχει ένας διαφορετικός αριθμός πτυχώσεων στην περιοχή ενεργοποίησης, ο οποίος οδηγεί συγκέντρωση τάσεων εξαιτίας της βάρμωσης που σχηματίζεται. Ωστόσο, σημειώνονται ασυνέχειες μεταξύ των γειτονικών πλακών στην περιοχή που ενεργείας του μηχανισμού κατά τη εφαρμογή τους σε γεωμετρίες σωλήνων από σύνθετο υλικό (Lukaszewicz). Αποδείχθηκε λοιπόν ότι με την κατασκευή σωστά διαστασιοποιημένων σκανδαλών πτύχωσης είναι δυνατό να σημειωθούν παραμορφώσεις στα δοκίμια απορροφώντας επιθυμητές ποσότητες ενέργειας μειώνοντας παράλληλα το αρχικό φορτίο αιχμής και παρουσιάζοντας σταθερό φορτίο και τρόπο θλίψης.



Εικόνα 5 Triggers με τροποποίηση πάχους διατομών τετραγωνικής διατομής



Εικόνα 8 Triggers με τροποποίηση πάχους τοιχώματος κυκλικής διατομής

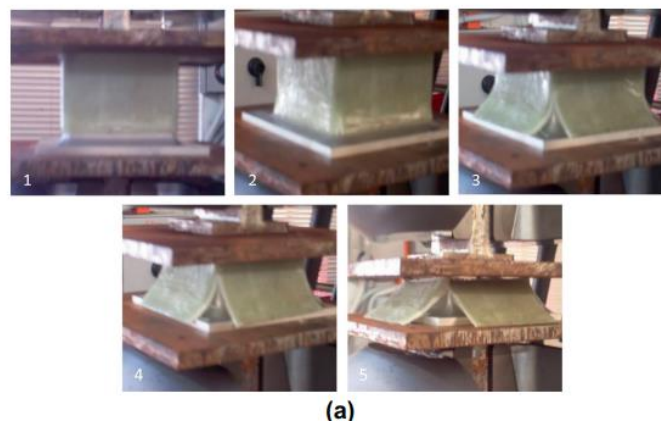
Άλλο ένα είδος trigger που σημειώνει θετικά αποτελέσματα και αποτελεί αντικείμενο έρευνας αφορά το trigger τύπου τουλίπας. Η συμπεριφορά σύνθλιψης των σωλήνων υαλονίματος πολυεστέρα έχει βρεθεί ότι είναι σημαντικά βελτιωμένη και τα τον καταστροφικό έλεγχο δοκιμίων με χρήση trigger τουλίπας σε σύγκριση με τα δοκίμια με λοξότμητο trigger με μετρημένα και έως και 100% περισσότερη ενέργεια απορρόφησης ανά μονάδα βάρους ενώ η σύνθλιψη που παρατηρήθηκε ήταν πιο ελεγχόμενη και προβλέψιμη με το trigger της τουλίπας. Η μορφολογία του υλικού στη ζώνη σύνθλιψης διέφερε ως προς την ποσότητα και το σχέδιο θραύσης. Το μοτίβο θραύσης και η συμπεριφορά σύνθλιψης που ξεκίνησε και από τους δύο παράγοντες triggers βρέθηκε ότι δεν αλλάζουν κατά τη σύνθλιψη. Η διαφορά στη σύνθλιψη φάνηκε να προέρχεται από τις διαφορετικές ικανότητες των σωλήνων να υποστηρίζουν φορτίο λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας των μεμονωμένων κατασκευών μεταφοράς φορτίων που προέκυψαν από την ενεργοποίηση. (Michael J. Czapliski)

Πέραν από το σχεδιασμό των κατασκευών με σημεία συγκέντρωσης τάσεων, διατάξεις σκανδαλών που αποτελούν ξεχωριστό τμήμα των κατασκευών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σημειώνοντας ισοδύναμα αποτελέσματα. Μηχανισμός trigger τύπου βύσματος, είναι μια κατηγορία σκανδαλών που δεν είναι ενσωματωμένη στη δομή αλλά συναρμολογείται μεταξύ της δομής και των μερών που θα μεταφέρουν τα εξωτερικά φορτία σε αυτές. Γενικά, τα υλικά ενεργοποίησης βύσματος είναι πολύ δύσκαμπτα σημειώνοντας

υψηλή σκληρότητα και μπορούν να θεωρηθούν άκαμπτα σώματα, χωρίς να εισάγεται σημαντικό σφάλμα κατά τους θεωρητικούς υπολογισμούς αντοχής τους. Επομένως, ο μηχανισμός μπορεί να αποτρέψει τη κατασκευή από το να παραμορφωθεί προς ανεπιθύμητες κατευθύνσεις οδηγώντας σε συγκεκριμένες γεωμετρίες παραμορφωμένου σώματος απορροφώντας τη μέγιστη δυνατή ενέργεια.

Συνήθως, υπάρχουν δύο τύποι trigger βύσματος, το εσωτερικό βύσμα και το εξωτερικό βύσμα που μπορούν να προκαλέσουν παρόμοιες παραμορφώσεις του υλικού της κατασκευής, απορροφώντας μεγάλες ποσότητες ενέργειας είτε τοποθετηθούν εσωτερικά ή εξωτερικά δημιουργώντας παρόμοιο τρόπο αστοχίας με αυτό που προκαλείται από το trigger τουλίπας όπως αυτή προαναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Επομένως, οι εσωτερικές και οι εξωτερικές σκανδάλες βύσματος έχουν προσελκύσει μεγάλη προσοχή εξαιτίας της εύκολης κατασκευής τους. Οι al. (Jiang Hongyong a b, 2017) μελέτησαν τα χαρακτηριστικά της ικανότητας πρόσκρουσης των σωλήνων σύνθετων υλικών που ενεργοποιήθηκαν από το trigger βύσματος που απλώνεται προς τα έξω (outward-splaying plug trigger). Πιο αποτελεσματική είναι αυτή που σχηματίζει με πτυσσόμενο βύσμα προς τα έξω, όσον αφορά τη μείωση του αρχικού φορτίου αιχμής και την αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας (Shivdayal Patel a, 2019). Στη περίπτωση κυλινδρικών γεωμετριών σκανδάλες είναι αξιοσημείωτο ότι η μικρότερη ακτίνα στο trigger μπορεί να σημειώσει υψηλότερο αρχικό φορτίο αιχμής και να απορροφήσει μεγαλύτερα ποσά ενέργειας (Jiang Hongyong a b, 2017).

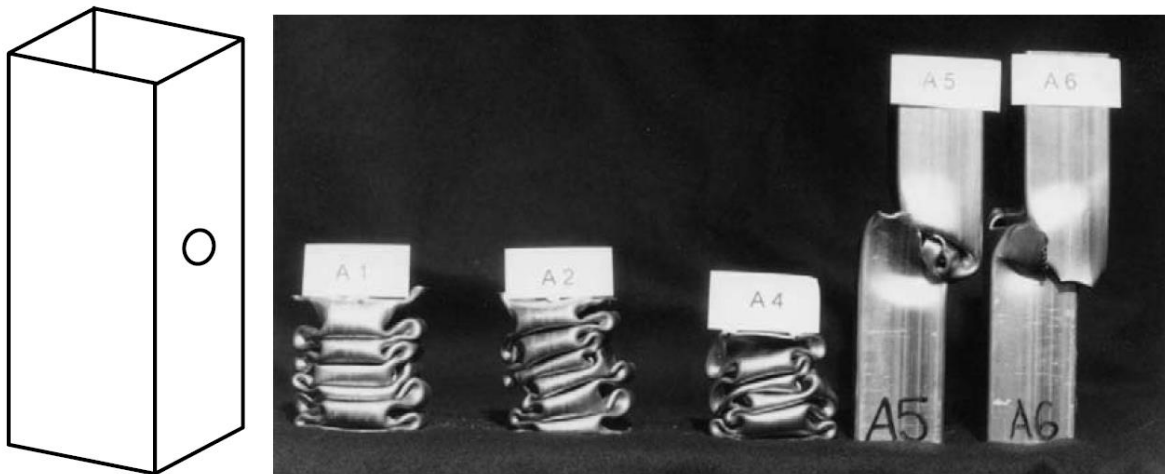
Πανομοιότυπες διατάξεις trigger αστοχίας εσωτερικής και εξωτερικής διάχυσης με χρήση βύσματος κυβοειδούς γεωμετρίας στοχεύοντας την αξονική αποτυχία σύνθλιψης του σωλήνα από σύνθετα υλικά, όπως τα έργα του (S.A. Oshkonr a). Παρόλο που τα μεταλλικά τεμάχια ενεργοποίησαν επιτάχυναν και ενέτειναν τη παραμόρφωση του δοκιμίου εμφάνισαν προοδευτικούς τρόπους αστοχίας πετυχαίνοντας μικρότερο αρχικό φορτίο αιχμής και χαμηλότερη απορρόφηση ενέργειας.



Εικόνα 6 Αποτελέσματα Πειραματικής Δοκιμής από θλίψη μεταλλικής τετραγωνοειδούς διατομή δοκο με χρήση βύσματος κυβοειδούς γεωμετρίας

Μεγάλο μέρος έρευνας για την δημιουργία τάσεων σε δοκίμια αφορά τη προσθήκη τάσεων με διάνοιξη οπών (hole trigger). Αρκετά πειράματα και προσομοιώσεις έχουν πραγματοποιηθεί με διαφορετικές δοκιμές αλλάζοντας τη διάμετρο των οπών σε διαφορετικά δοκίμια. Αποτέλεσμα των δοκιμών είναι η μείωση του μέγιστου φορτίου σύνθλιψης και η

αύξηση της συνολικής ενέργεια που απορρίφθηκε κατά την θλίψη και η διάμετρος της οπής επηρεάζει το μέγεθος του πρώτου λοβού και συνεπώς την απορρόφηση ενέργειας.



Εικόνα 7 Δοκίμια τετραγωνικής διατομής με δύο αντίθετες οπές η διάμετρος των οπών αυξάνεται από αριστερά προς τα δεξιά

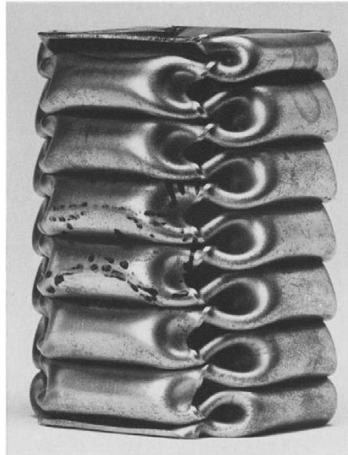
Η μείωση του αρχικού φορτίου αιχμής και η πρόκληση σταθερής προοδευτικής αστοχίας σύνθλιψης είναι τα κύρια πλεονεκτήματα των ενσωματωμένων σκανδαλών στις κατασκευές απορρόφησης κρουστικών φορτίων. Ωστόσο, με την ανάπτυξη των σύνθετων υλικών, οι ενσωματωμένες σκανδάλες δεν σημειώνουν υψηλές επιδόσεις με αποτέλεσμα εξωτερικά εφαρμοσμένοι μηχανισμοί ενεργοποίησης χρησιμοποιούνται για να προκαλέσουν επιθυμητό τρόπο αστοχίας αποσκοπώντας παράλληλα τον προδιαγεγραμμένο τρόπο παραμόρφωσής προσλαμβάνοντας την μέγιστη δυνατή ενέργεια από την εξωτερική εντατική κατάσταση που εφαρμόζεται.

3.1 Διατάξεις trigger σε τετραγωνικές διατομές

Η συμπεριφορά σωλήνων λεπτού τοιχώματος με κυκλικές και ορθογώνιες διατομές που υπόκεινται σε αξονικά φορτία έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και χρησιμοποιείται ευρέως στις κατασκευές. Η αρχική απόκριση λυγισμού αυτών των μελών είναι λιγότερο σημαντική από την άποψη της απορρόφησης ενέργειας σε σχέση με την επακόλουθη συμπεριφορά μετά το λυγισμό όπου σχηματίζονται μεγάλες παραμορφώσεις και στρεβλώσεις των δοκιμίων. Αυτή η συμπεριφορά συχνά εξιδανικεύεται για την επίλυση προβλημάτων ώστε να θεωρείτε το υλικό ως άκαμπτο πλαστικό αφού η ενέργεια που απορροφάτε ελαστικά συνήθως δεν είναι σημαντική, διότι κυριαρχεί η πλαστική παραμόρφωση. Πολλές θεωρητικές μελέτες σε αξονικά συμπιεσμένους σωλήνες με ορθογώνιες διατομές δεν λαμβάνουν υπόψη για λόγο απλούστευσης τις δυναμικές (αδρανειακές) επιδράσεις και προσεγγίζουν το πρόβλημα ως στατικό, το οποίο για χαμηλές ταχύτητες πρόσκρουσης που δεν ενεργοποιούν δυναμικά φαινόμενα πλαστικού λυγισμού, είναι πολύ κοντά στη πραγματικότητα. Η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης των υλικών καθώς και οι επιδράσεις αδράνειας όταν ληφθούν υπόψη προσεγγίζουν το πρόβλημα πολύ κοντά στη πραγματικότητα (P. H. Thornton, 1983) (Paluszny, Design of thin-walled columns for crash energy management - their strength and mode of collapse)

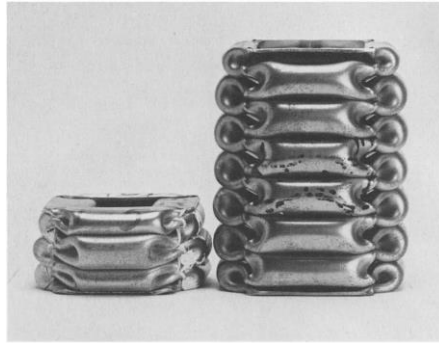
Η παραμόρφωση κελύφων τετραγωνικών διατομών χωρίζεται κυρίως σε δυο τύπους, συμμετρικό και ασύμμετρο. Στο συμμετρικό, ο πρώτος αλλά και οι επακόλουθοι λοβοί που

σχηματίζονται έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα. Το θλιπτικό φορτίο και η απορροφούμενη ενέργεια για ένα σωλήνα τετραγωνικής διατομής παραμένουν ίδια στη περίπτωση που οι εξωτερικοί λοβοί σχηματιστούν εσωτερικά αντί για εξωτερικά, αντίθετα δηλαδή του δοκιμίου που φαίνεται παρακάτω. Σε αυτή την περίπτωση, οι ανεξάρτητοι λοβοί θα έχουν κινηθεί εσωτερικά σημειώνοντας αξονοσυμμετρική συμπεριφορά όμοια όπως στον σχηματισμό λοβών σε θλίψη σωληνωτών δοκιμίων. Στην περίπτωση όπου ο δυο λοβοί σχηματίζονται εσωτερικά και οι άλλοι 2 εξωτερικά, έχουμε επίσης συμμετρική συμπεριφορά.

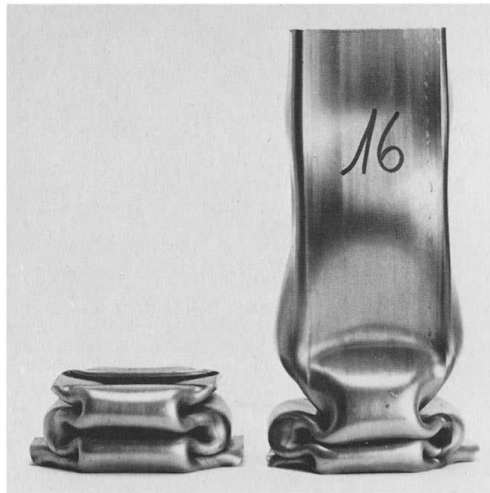


Εικόνα 8 Συμμετρική κατάρρευση σωλήνα τετραγωνικής διατομής

Αν από τη άλλη κατά τη συμπίεση των τετραγωνικών διατομών η πρώτη στρώση των λοβών σχηματίζεται συμμετρικά και στη συνέχεια μια ασύμμετρη στρώση εμφανίζεται στη συνέχεια. Αυτή η διαδοχή των στρώσεων επαναλαμβάνεται στην περαιτέρω παραμόρφωση, αν και συχνά οι ξεχωριστοί λοβοί της ασύμμετρης φόρτισης αλλάζουν θέση. Η ασυμμετρία της παραμόρφωσης όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα, προκαλεί την εμφάνιση κλίσης στο απαραμόρφωτο κομμάτι του σωλήνα σε σχέση με τον κάθετο άξονα. Η γενικότερη κάμψη λόγω της εμφάνιση ασυμμετριών δεν εξαρτάται στο αρχικό μήκος του δοκιμίου αλλά, πιθανώς οφείλεται στην ύπαρξη αρχικών ατελειών στο υλικό. Σημαντικός παράγοντας που επιδρά στη δυνατότητα του υλικού να παραμορφωθεί και να απορροφήσει τη μέγιστη ενέργεια είναι ο χρόνος εκτέλεσης του φαινομένου. Κατά την ψευδοστατική καταπόνηση η ενέργεια μεταφέρεται ομαλά στο δοκίμιο οδηγώντας να μην αποσβένει την ενέργεια και να την μεταφέρει. Σημειώνονται δηλαδή μεγάλες δυνάμεις, μεγάλα φορτία, μειώνοντας τη δυνατότητα προστασίας του εξοπλισμού. Αντιθέτως κατά την δυναμική καταπόνηση όσο αυξάνεται η ταχύτητα συμπίεσης μειώνεται ο χρόνος το υλικό δεν είναι σε θέση να παραμορφωθεί σε μεγάλο βαθμό με αποτέλεσμα. . Στη παρούσα εργασία θα ελεγχθεί η συμπεριφορά δοκιμίων τετραγωνικής διατομής με σταυροειδή μηχανισμό trigger με θεωρητική και πειραματική προσομοίωση, περιεχόμενο που θα αναλυθεί σε επόμενα χωρία στη μέγιστη παραμόρφωση του



Εικόνα 9 Σύγκριση δυναμικής και στατικής φόρτισης. Το αριστερό δοκίμιο συμπιέστηκε κατόπιν δυναμικής φόρτισης



Εικόνα 10 Σύγκριση στατικής και δυναμικής φόρτισης. Το αριστερό δοκίμιο συμπιέστηκε κατόπιν στατικής φόρτισης ενώ το δεξί κατόπιν δυναμικής φόρτισης με ταχύτητα κρούσης $V=10,369 \text{ m}^*s$

4 Στοιχεία Θεωρίας

4.1 Δείκτες απόδοσης διατάξεων απορρόφησης κρουστικών φορτίων

Η απόδοση των κατασκευών αξιολογείται κυρίως με βάση τη συνολική απόκριση της κατασκευής κατά τη συντριβή και δευτερευόντως με βάση την άνεση της κατασκευής. Για την εκτίμηση της απόκρισης των διατάξεων απορρόφησης ενέργειας έναντι αξονικής φόρτισης/κατάρρευσης, εξετάστηκαν οι ακόλουθες παράμετροι:

4.1.1 Φορτίο κορυφής P_{max}

Το φορτίο κορυφής P_{max} είναι το μέγιστο φορτίο που απαιτείται για να αρχίσει η μόνιμη παραμόρφωση της δομής. Αυτή η παράμετρος έχει σημασία καθώς είναι η υψηλότερη δύναμη που σημειώνεται κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης.

4.1.2 Απορροφούμενη ενέργεια

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης E σε μια σύγκρουση ισούται με το εμβαδό κάτω από τη γραφική παράσταση φορτίου-παραμόρφωσης και υπολογίζεται από το εμβαδό της επιφάνειας που σχηματίζεται

$$E = \int_0^s P(x) dx$$

4.1.3 Μέσο φορτίο P_{mean}

Το μέσο φορτίο P_{mean} είναι η μέση δύναμη κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{mean} = \frac{E}{\chi}$$

4.1.4 Ειδική απορρόφηση ενέργειας

Για να συσχετιστεί πόση ενέργεια μπορεί να απορροφήσει μια δομή στη μάζα της, λαμβάνεται η ειδική απορρόφηση ενέργειας (Specific Energy Absorption-SEA). Ορίζεται ως το πηλίκο της απορροφούμενης ενέργειας προς τη μάζα:

$$SEA = \frac{E_{abs}}{m}$$

Όπου m είναι η συμπιεζόμενη μάζα της δομής. Η SEA είναι πολύ σημαντική σε εφαρμογές όπου η μείωση του βάρους είναι πολύ σημαντική, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροδιαστημική βιομηχανία.

4.1.5 Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου (Crush Force Efficiency-CFE)

Ο Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου είναι ο λόγος της μέσης προς την μέγιστη θλιπτική δύναμη, οι δυο παράγοντες που είναι άμεσα συνδεδεμένοι με τα επίπεδα επιβράδυνσης.

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}}$$

Ένας ιδανικός απορροφητής ενέργειας θα είχε συντελεστή CFE ίσο με 100%. Αυτό γίνεται επειδή ένας ιδανικός απορροφητής θα διατηρούσε το φορτίο κορυφής για τη συνολική διάρκεια της θλίψης σταθερό. Εάν η τιμή του CFE είναι μακριά του 100%, αυτό υποδεικνύει αυξομειώσεις των επιβραδύνσεων. (Tarlochan, 2017) , (A.G. Mama-lis, 1998) (F. Mohri, 2002) (SuzhenWu, 2015) (Yiru Ren, 2019) (Alessandro Airoidi, 2005) (G. Balaji1, 2017) (sections, 2017) (Jones, 1984) (A.Pugsley, 1960) (Paluszny, Design of thin-walled columns for crash energy management - their strength and mode of collapse, 1981) (Magee)

4.2 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Η ανάλυση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Engineering: CAE) είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με την χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάλυση γεωμετρίας, που επιτρέπει στον σχεδιαστή να προσομοιώσει και μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφερθεί το προϊόν κατά τη λειτουργία του έτσι ώστε ο σχεδιασμός να είναι βέλτιστος και τα παραγόμενα εξαρτήματα να μην χρειάζονται επανασχεδιασμό άμεσα μετά τη λειτουργία τους, αποτέλεσμα υψηλής επικινδυνότητας και υψηλού κόστους. Λογισμικά επίλυσης τεχνικών προβλημάτων χρησιμοποιούνται σήμερα σε πληθώρα εφαρμογών όπως κινηματικής ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη της λειτουργίας μηχανών ενώ δυναμικής ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση σύνθετων κατασκευών. Μεταξύ των πλέον διαδεδομένων μεθόδων ανάλυσης είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis: FEA) που επιτρέπει τη στατική και δυναμική ανάλυση τάσεων και μετατοπίσεων, θερμική ανάλυση, ρευστομηχανική, αεροδυναμική ανάλυση, ακουστική ανάλυση, κατανομή μαγνητικού πεδίου ακόμη και σύνθετων διατάξεων. Η εφαρμογή της FEM απαιτεί τη χρήση ενός απλουστευμένου αφαιρετικού μοντέλου που πρέπει να γεννηθεί είτε με αλληλεπίδραση του χρήστη ή και αυτόματα. Βασίζεται στον επιμερισμό του συστήματος σε μικρότερες δομές, τα λεγόμενα πεπερασμένα στοιχεία τα οποία αναλύονται ανεξάρτητα και η απόκριση του ενός αποτελεί διέγερση του γειτονικού του.

Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Ένα από τα πρώτα μελήματα για την ανάπτυξη ενός μοντέλου είναι η επιλογή των κατάλληλων πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση ενός συγκεκριμένου. Σαν γενικός κανόνας, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των κόμβων και των στοιχείων ή όσο μεγαλύτερος ο βαθμός πολυωνύμου της συνάρτησης μορφής τόσο ακριβέστερη είναι η λύση των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά επίσης τόσο πιο δαπανηρή είναι η επίλυση και από ένα σημείο και έπειτα το αποτέλεσμα σημειώνει μικρή διαφοροποίηση δηλαδή σφάλμα. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα είναι η γένεση πλέγματος του υπό ανάλυση αντικειμένου, ειδικά όταν έχει περίπλοκο γεωμετρικό σχήμα μια διαδικασία που απαιτεί χρόνο και προσοχή. Γίνονται πολλές προσπάθειες αυτόματης γένεσης πλεγμάτων από το ίδιο το λογισμικό, μετατρέποντας το σε φιλικότερο προς το χρήστη ενώ παράλληλα ελαχιστοποιεί τη πιθανότητα λάθους μειώνοντας το χρόνο προγραμματισμού.

Το σύνολο των απαραίτητων διαδικασιών για την ανάπτυξη ενός πλήρους μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, δηλ. η εισαγωγή της γεωμετρίας, η γένεση του πλέγματος, η επιβολή στηρίξεων και φόρτισης αποτελούν αυτό που συνοπτικά ονομάζεται μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων. Συστήματα που στηρίζονται σε γεωμετρική μοντελοποίηση CAD

είτε εργάζονται απευθείας με το μοντέλο CAD εξαλείφοντας τα βήματα μετάφρασης την απώλεια δεδομένων μικραίνοντας τον κύκλο σχεδιασμού-ανάλυσης-αλλαγής ειδαλλίως μεταφράζουν και εισάγουν τη γεωμετρία, μέθοδος που μπορεί να θεωρηθεί δυσλειτουργική και δύσκολη. Τα περισσότερα συστήματα FEA δίνουν επίσης έμφαση στη δυνατότητα που έχουν να εισάγουν τη γεωμετρία, είτε μέσω τυποποιήσεων είτε απευθείας από συγκεκριμένα συστήματα CAD διευκολύνοντας τη μοντελοποίηση παρέχοντας ταυτόχρονα στο χειριστή πληθώρα επιλογών σχετικές με λειτουργίες δημιουργίας και αλλαγής σύνθετης γεωμετρίας.

Η γένεση πλέγματος είναι το πλέον σημαντικό και δύσκολο στάδιο της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων με τα συστήματα να εξελίσσονται όλο ένα και περισσότερο αναπτύσσοντας δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Τα διάφορα στοιχεία που υποστηρίζονται από ένα σύστημα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν τη λεγόμενη βιβλιοθήκη στοιχείων (element library). Όσο πιο μεγάλο το είδος των στοιχείων τόσο περισσότερες διαφορετικές λύσεις μπορεί να προσεγγίσουν την κάθε λύση του προβλήματος. Να σημειωθεί ότι το ίδιο πλέγμα μπορεί να αντιστοιχεί σε διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία ανάλογα με τον αριθμό κόμβων που αποδίδονται σε αυτό.

Αφού επιλεγεί η διάταξη των στοιχείων, καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης π.χ., στατική ή δυναμική, γραμμική ή μη-γραμμική, επίπεδη εντατική κατάσταση, και επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση. Επίσης, οι βαθμοί ελευθερίας συσχετίζονται με τους κόμβους που περιγράφουν μετατοπίσεις, περιστροφές ή ροή θερμότητας. Κατόπιν καθορίζονται οι οριακές συνθήκες όπως μετατοπίσεις, δυνάμεις, και θερμοκρασίες διαφορές που συνήθως είναι γνωστές για το συνεχές τμήμα του συνόρου του αντικειμένου. Αυτές οι οριακές συνθήκες πρέπει να εκφρασθούν σαν ένα σύνολο τιμών μετατοπίσεων, δυνάμεων, ή θερμοκρασιών σε συγκεκριμένους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων. Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο πρέπει επίσης να αποδοθούν ιδιότητες υλικού καθώς και το πάχος στοιχείων κελύφους και πλακών δεδομένο που το λογισμικό διαχειρίζεται περισσότερο σαν ιδιότητα του υλικού παρά σαν γεωμετρική ιδιότητα της κατασκευής ή του μέσου. Από τη στιγμή που ορισθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας όλες τις παραμέτρους του πλέγματος, το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα που εκτελεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Τα περισσότερα πακέτα προσφέρουν ποικίλους τρόπους εκτίμησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, οι οποίοι περιγράφουν σχηματικά τις τάσεις, παραμορφώσεις, καθώς και το παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής με διακριτές χρωματικές ζώνες.

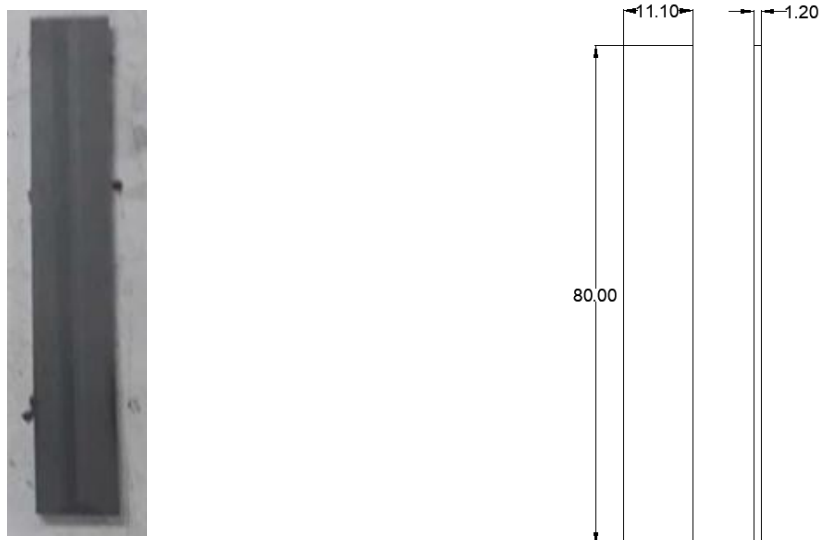
4.3 Εισαγωγή Σενάρια προς ανάλυση- Γεωμετρία δοκιμών

Στη παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών που εκτελέστηκαν και αφορούν τη καταστροφική δοκιμή δοκιμών τετραγωνικής διατομής τα οποία θα αναλυθούν και θα επεξηγηθούν σε αναλυτικό βαθμό. Σκοπός των πειραματικών διατάξεων είναι η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση στον υπολογιστή και συγκεκριμένα μέσω του λογισμικού του LS Dyna ενώ παράλληλα γίνεται αναφορά στη πειραματική διάταξη. 0Κεφάλαιο

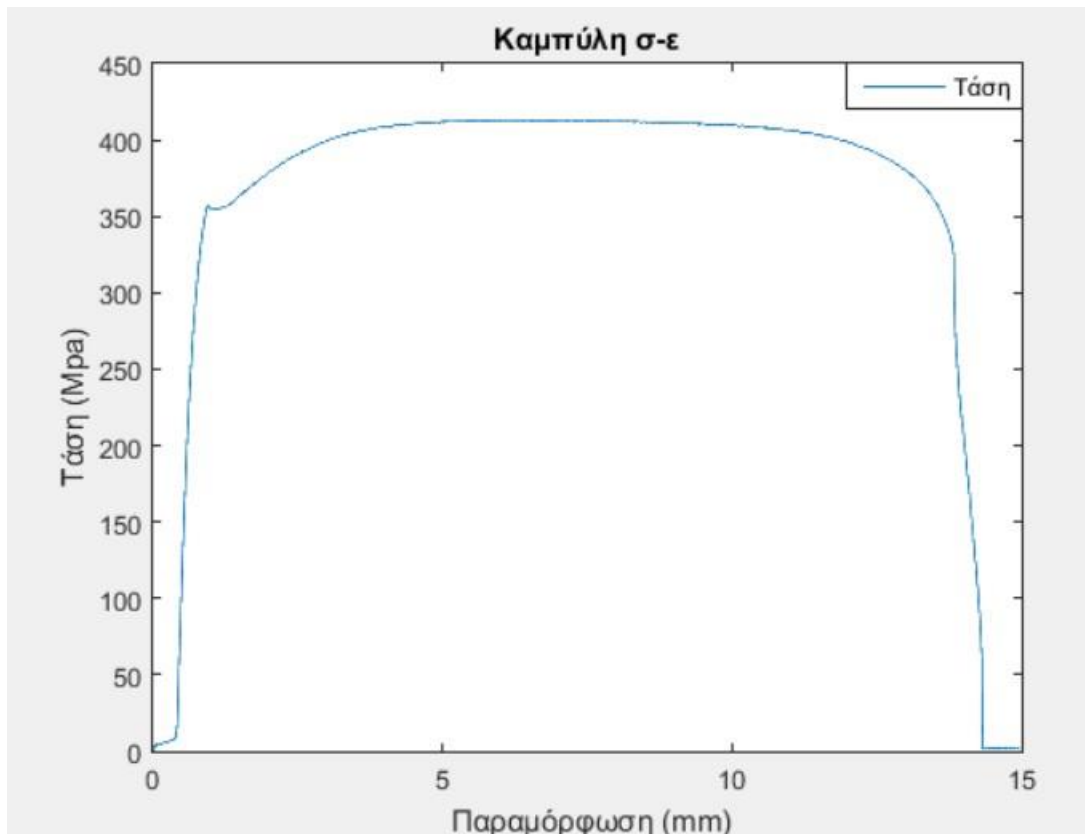
Τα κεφάλαια από το 3 έως και N περιλαμβάνουν το κύριο μέρος της εργασίας.

4.4 Δοκιμή εφελκυσμού

Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του χάλυβα των δοκιμών που θα χρησιμοποιηθούν, πραγματοποιήθηκε δοκιμή εφελκυσμού σε πλακίδιο διαστάσεων 80mm x 11,1mm x 1,20 mm με ελεύθερο μήκος 50mm και ολόκληρο μήκος 80mm. Το μήκος εισχώρησης του δοκιμίου σε κάθε αρπάγη συγκράτησης είναι ίση με 15 mm και συγκρατεί όλο το πλάτος του δοκίμιο με τη ταχύτητα εφελκυσμού κατά την εκτέλεση του πειράματος είναι ίση με 5 mm/min. Από την καμπύλη Τάσης- Παραμόρφωσης προέκυψαν προσεγγιστικά αποτελέσματα για την τιμή του μέτρου ελαστικότητας καθώς και στοιχεία για την συμπεριφορά του υλικού στην πλαστική περιοχή τα οποία συγκεντρώνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 11 Δοκίμιο Εφελκυσμού



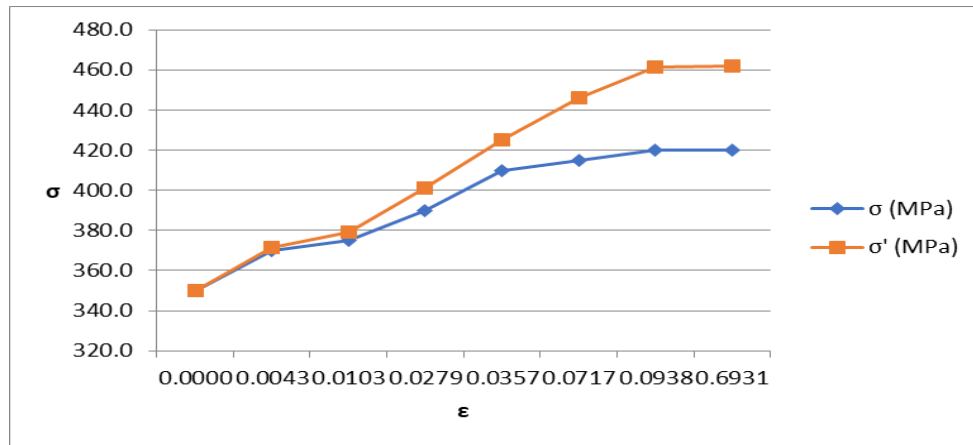
Εικόνα 12 Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης δοκιμίου εκ του πειράματος εφελκισμού

4.5 Υπολογισμός Πραγματικών Τάσεων και Παραμορφώσεων.

Με δεδομένη τη καμπύλη που προέκυψε από το διάγραμμα εφελκισμού επιλέγουμε 8 σημεία από την έναρξη της πλαστικής περιοχής μέχρι την έναρξη της περιοχής λαιμού, σημεία που θα εισαχθούν στο περιβάλλον του LS-Dyna ώστε να προσομοιάσουν τη πραγματική συμπεριφορά του υλικού. Δεδομένου ότι η μηχανική συμπεριφορά του υλικού δε μπορεί να προσδιοριστεί ακριβώς με την ονομαστική τάση και την ονομαστική παραμόρφωση, τα αποτελέσματα του πειράματος του εφελκισμού, διότι αναφέρονται πάντα σε σχέση με τα αρχικά μεγέθη της διατομής και του μήκους του δοκιμίου, είναι απαραίτητο να υπολογιστούν οι πραγματικές τάσεις και παραμορφώσεις οι οποίες υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις.

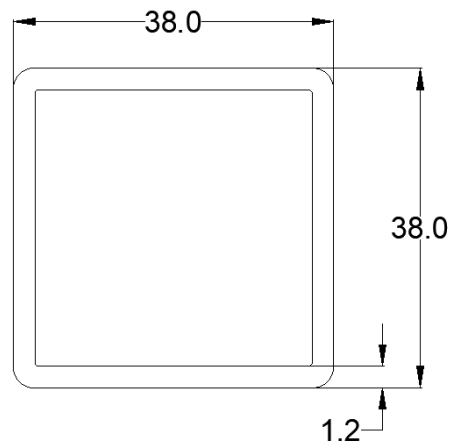
$$\varepsilon' = \varepsilon_0 + \ln(1 + \varepsilon) \quad \text{και} \quad \sigma' = \sigma(1 + \varepsilon)$$

Τα σημεία και οι υπολογισμοί συγκεντρώνονται στον ακόλουθο πίνακα αλλά και συγκριτικά διαγράμματα τα οποία αποτελούν δεδομένα εισαγωγής των μοντέλων προσομοίωσης.



4.6 Γεωμετρία δοκιμίων

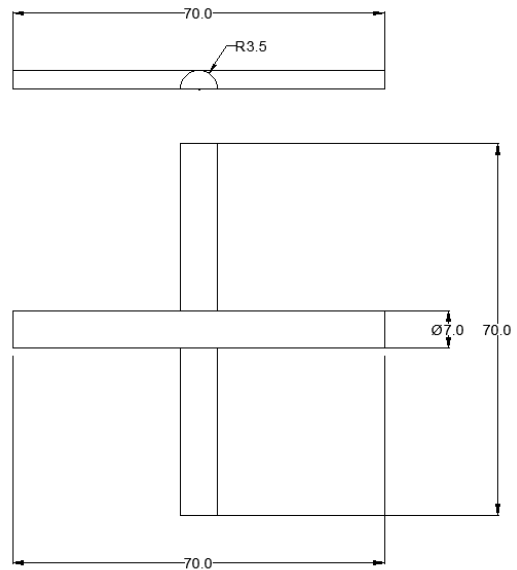
Κοιλοδοκός τετραγωνικής διατομής διαστάσεων 38mm x 38mm x 1.2mm μήκους 100mm αποτελεί το δοκίμιο προς έλεγχο. Το υλικό κατασκευής του είναι χάλυβας με μέσο βάρος 135gr. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν από μεγάλου μήκους κοιλοδοκό που κόπηκε σε κομμάτια 800 mm και οι επιφάνειες του κατεργάστηκαν ώστε να είναι κάθετες και επίπεδες ώστε να μην σημειωθούν ροπές κατά την εκτέλεση των πειραμάτων θλίψης.



Εικόνα 9 δοκίμιο τετραγωνικής διατομής (αριστερά) και διαστάσεις διατομής (δεξιά)

4.7 Γεωμετρία μηχανισμών trigger.

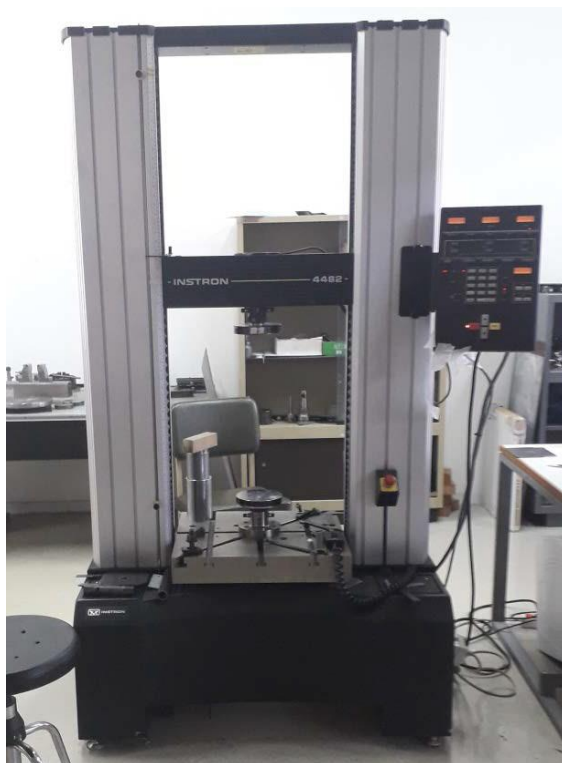
Ράβδος κυκλικής διατομής διαμέτρου 70mm κόβεται διαμήκεις ώστε να σχηματίζει σε δυο ημικυλινδρους. Στη συνέχεια κόβεται εγκάρσια σε ένα κομμάτι 70mm και δύο 35mm. Οι ημικυλινδροι συγκολλήθηκαν με ηλεκτρόδιο τήξεως σχηματίζοντας συμμετρικό σταυρό με εξωτερικές διαστάσεις 50mm. Έπειτα της διεργασίας συγκόλλησης το σημείο της συγκόλλησης λειάνθηκε ώστε να διατηρείται η γεωμετρία και η διάμετρος της ράβδου. Το υλικό κατασκευής του είναι χάλυβας με μέσο βάρος



Εικόνα 10 Γεωμετρία trigger τύπου σταυρού

4.8 Πειραματική διάταξη

Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζονται ο πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε κατά την καταστροφική δοκιμή των δοκιμών με ή χωρίς μηχανισμούς trigger. Οι πραγματοποιηθείσες δοκιμές είναι δοκιμές αξονικής συμπίεσης υπό την επίδραση ψευδοστατικού φορτίου στη μηχανή θλίψης INSTRON 4482 ονομαστικής δύναμης 100 kN και μέγιστης ταχύτητας της κινούμενης κεφαλής ίσης με 500 mm/min. Επίσης η διάταξη σημειώνει μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο ίσο με 75 kN είναι 250 mm/min. Η ευαισθησία κεφαλής πρέσας είναι 2 mV/V και ο πίνακας ελέγχου έχει ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή που αναλαμβάνει την ρύθμιση όλων των παραμέτρων της κατεργασίας και την επεξεργασία όλων των απαραίτητων υπολογισμών. Κατά την εκτέλεση των δοκιμών και των προσομοιώσεων η ταχύτητα κίνησης της πλάκας τέθηκε στο 1mm/sec.



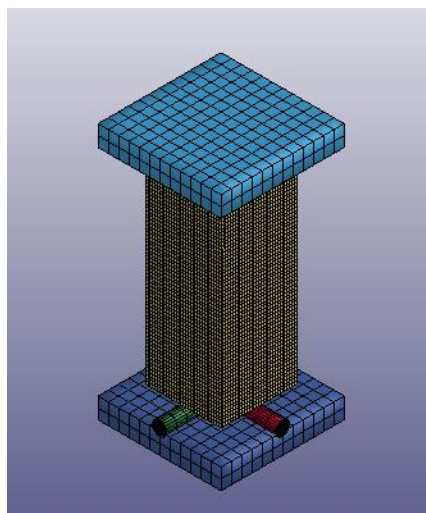
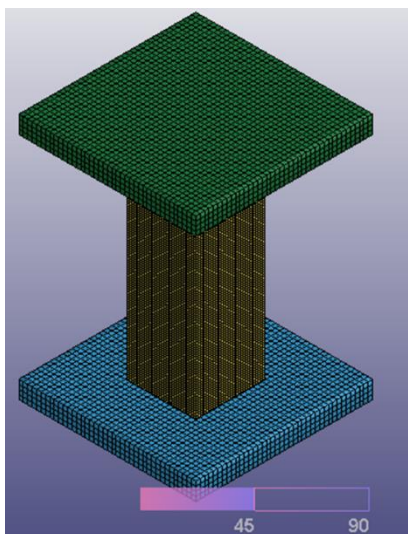
Εικόνα 11 μηχανη θλιψης instron 4482

4.9 Μοντελοποίηση πειραμάτων σε περιβάλλον LS-Dyna

Στο εν λόγω κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία υλοποίησης των μοντελοποιήσεων στο περιβάλλον του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Δεδομένης της γεωμετρίας που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο θα αναλυθεί η μεθοδολογία της προσέγγισης της υλοποίησης των στατικών υπολογισμών των δοκιμών. Τα σχετικά μοντέλα θα δημιουργηθούν στο περιβάλλον LS-PrePost του λογισμικού LS Dyna.

4.9.1 Δημιουργία δοκιμών.

Όπως προαναφέρθηκε η γεωμετρία των δοκιμών των διατάξεων trigger και την μηχανής θα χρειαστεί να σχεδιαστεί με τις ανάλογες ιδιότητες αντοχής τους από πεπερασμένα στοιχεία. Ξεκινώντας με τη λεπτότοιχη διατομή οι διαστάσεις της οποίας όπως αναφέρθηκε είναι διατομής 38mm x 38mm x 1.2mm μήκους 100mm. Δεδομένου του πάχους ίσου με 1.2mm, είναι καλή προσέγγιση να χρησιμοποιηθούν τετραγωνικά πεπερασμένα στοιχεία ακμής 1.2mm. Για να υλοποιηθεί αυτό, δεδομένου ότι το πρόγραμμα σχεδιάζει τα στοιχεία συμμετρικά με κέντρο της επιφάνειας της γεωμετρίας, το δυσδιάστατο λεπτότοιχο κέλυφος θα σχεδιαστεί με ακμές μικρότερες κατά το πάχος του στοιχείου δηλαδή με ακμή 36.8mm και 37 στοιχεία ανά πλευρά διατομής και 83 στοιχεία ανά το ύψος. Οι πλάκες της μηχανής θα έχουν διαστάσεις 50mm x 50mm x 10mm και θα θεωρηθούν απαραμόρφωτες, με εξαίρεση του πειράματος με το μηχανισμό trigger στις 45° όπου η κάτω πλάκα είναι 120mm x 120mm x 10mm ώστε να μην επηρεαστεί το σχίσσιμο του δοκιμίου η κάτω θα παραμένει καθ' όλη την διάρκεια της μοντελοποίησης σταθερή ενώ ή άνω θα κινείται με ταχύτητα 1mm/sec με κατεύθυνση προς τα αρνητικά του άξονα z



Εικόνα 12 Απεικόνιση κελύφους με τις απαραμόρφωτες πλάκες και μηχανισμό trigger

Οι γεωμετρίες σχηματίζονται στο περιβάλλον του mesh και πιο συγκεκριμένα με την καρτέλα του “Shape mesh” όπου οι πλάκες της μηχανής ορίζονται ως “Box solid”, οι μηχανισμοί trigger “Cylinder solid” και το κέλυφος με “Box shell”. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εντολή “Box shell” σχηματίζει παραλληλεπίπεδο με έξι πλευρές οπότε οι δυο εκ αυτών αφαιρούνται με χρήση της εντολής “EleEdit”. Αντίστοιχη προσέγγιση θα πραγματοποιηθεί με την της διάταξη trigger οι οποίες θα σχεδιαστούν και θα επιμεριστούν με πεπερασμένα στοιχεία ίδιας πυκνότητας με αυτής του κελύφους.

4.9.2 Καθορισμός οριακών συνθηκών

Αρχίζοντας τη μοντελοποίηση σχηματίζουμε την καμπύλη της κίνησης της άνω πλάκας, σύμφωνα με τις παραδοχές που έχουν οριστεί για τον έλεγχο των κελύφων λαμβάνοντας υπόψη τις δυνατότητες της μηχανής θλίψης. Επιλέγεται κίνηση της άνω πλάκας με ταχύτητα 1mm/s, η οποία θα παραμένει σταθερή σε όλα τα πειράματα που θα παρουσιαστούν είναι δηλαδή της μορφής $v = -t, t \in [0,80]$.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 40X40X1.2X120.k) Setting

*DEFINE_CURVE_(TITLE) (1)

TITLE

move

1	LCID	SIDR	SFA	SFO	OFFA	OFFO	DATTYP	LCINT
	1	0	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	0	0

Repeated Data by Button and List

A1	O1
0.0	-1.0

1 0.0 -1.0
2 80.0 -1.0

Data Pt. 1 Load XYData

Replace Insert Plot Raise

Delete Help New Padd

Εικόνα 13 Κατασκευή καμπύλης ταχύτητας άνω πλάκας

Ορίζεται η κίνηση της άνω πλάκας κατά τον άξονα z χωρίς τη δυνατότητα περιστροφής ως απαραμόρφωτο σώμα που εκτελεί ευθύγραμμη ομαλή κίνηση, συμφωνά με την καμπύλη κίνησης όπως ορίστηκε προηγουμένως.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 40X40X1.2X120.k) Setting

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_(ID) (1)

ID	TITLE
1	move

PID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
β	3	0	1	1.0000000	0	1.000e+28	0.0

COMMENT:

Εικόνα 14 ορισμός κίνησης της άνω πλάκας

Στη περίπτωση της χρήσης μηχανισμού trigger, η γεωμετρία του trigger με τη γεωμετρία της κάτω πλάκας είναι αναγκαίο να ενοποιηθούν σε ένα σώμα με τη εντολή "Set Part list". Στη συνέχεια ορίζεται ο τρόπος που αλληλοεπιδρούν τα σώματα κατά την επαφή τους. Το στάδιο αυτό είναι κρίσιμο δεδομένου ότι τα φορτία θα μεταφερθούν μέσω της επαφής των σωμάτων μεταξύ τους. Ορίζονται λοιπόν, οι παράμετροι για την μοντελοποίηση της επαφής μεταξύ της άνω πλάκας και του κελύφους, της κάτω πλάκας με το μηχανισμό trigger με το κέλυφος και τέλος του ίδιου του κελύφους με τον εαυτό του γιατί κατά τη παραμόρφωση του και τη δημιουργία λοβών η μέρος της επιφάνειας του έρχεται σε επαφή με άλλο μέρος επιφάνειας αυτού.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 New_Subsystem_1) Setting

*SET_PART_LIST_(TITLE) (0)

TITLE

bottom system (π.χ.)

SID	DA1	DA2	DA3	DA4	SOLVER
1 (π.χ.)	0.0	0.0	0.0	0.0	MECH

Repeated Data by Button and List

PID1	PID2	PID3	PID4	PID5	PID6	PID7	PID8
1 (π.χ.)	2 (π.χ.)	3 (π.χ.)	4 (π.χ.)	5 (π.χ.)			

Range Set Data

Data Pt.

Replace

Insert

Delete

Help

Total Card: 0 Smallest ID: 0 Largest ID: 0 Total deleted card: 0

Εικόνα 15 Ενοποίηση μηχανισμού trigger με κάτω πλάκα σε ένα σώμα.

Σε κάθε διεπιφάνεια καθενός μοντέλου ορίστηκαν οριακές συνθήκες μη εισχώρησης των τοιχωμάτων στην καρτέλα "Contact" του "Keyword Manager". Συγκεκριμένα, οι τρεις διεπιφάνειες που λήφθηκαν υπόψιν ήταν αυτές μεταξύ δοκιμίου και πλάκων (απορροφητής-άνω πλάκα και απορροφητής-κάτω πλάκα) και μεταξύ των σχηματιζόμενων πτυχώσεων του απορροφητή. Οι δυο πρώτες περιπτώσεις μοντελοποιήθηκαν στην υποκαρτέλα "Nodes-to-Surface" όπου ως άκαμπτο-απαραμόρφωτο σώμα (master segment) θεωρήθηκε η κάθε πλάκα σε καθεμία περίπτωση, ενώ ως παραμορφώσιμο σώμα (slave segment) ο απορροφητής. Στη δεύτερη περίπτωση, για τη μη εισχώρηση των σχηματιζόμενων πτυχώσεων κατά τη συμπίεση του απορροφητή, επιλέχθηκε η υποκαρτέλα "Automatic Single Surface", στην οποία ορίστηκε ο απορροφητής ως το μόνο παραμορφώσιμο σώμα, καθώς οι σχηματιζόμενες διεπιφάνειες αποτελούνταν από τις πτυχώσεις του.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 Trigger 45degV100mm 90secs-e.k) Setting

*CONTACT_NODES_TO_SURFACE_(ID/TITLE/MPP) (3)

1	CID	TITLE						
	1	BottomSystem to tube	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
2	IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPRMB
	0	200		3	2	1.0005		0
3	UNUSED	CHKSEGS	PENSEF	GRPABLE				
		0	1.0	0				
4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	1	1	3	2	0	0	0	0
5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.3000000	0.2500000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20

Total Card: 3 Smallest ID: 1 Largest ID: 4 Total deleted card: 0

Εικόνα 16 ορισμός επαφής μηχανισμού trigger με το κέλυφος

Εξέχουσας σημασίας λαμβάνει η τιμή του συντελεστή στατικής τριβής και τριβής ολίσθησης σε αυτό το σημείο της παραμετροποίησης καθώς και ο προσδιορισμός του απαραμόρφωτου σώματος σε σχέση με το παραμορφώσιμο τα οποία ορίζονται ως master και slave αντίστοιχα.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 40X40X1.2X120.k) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_(ID/TITLE/MPP) (1)

1	CID	TITLE						
	3	tube						
		<input type="checkbox"/> MPP1		<input type="checkbox"/> MPP2				
2	IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	C裴ARM8
	0	200		3	2	1.0005		0
3	UNUSED	CHKSEGS	PENSEF	GRPABLE				
		0	1.0	0				
4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	1	0	3	0	0	0	1	0
5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.3000000	0.2500000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20
6	SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT	FSF	VSF
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000
	<input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> AB <input type="checkbox"/> ABC <input type="checkbox"/> ABCD <input type="checkbox"/> ABCDE <input type="checkbox"/> ABCDEF							

Εικόνα 17 Ορισμός συνθηκών επαφής ιδίου κελύφους

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 40X40X1.2X120.k) Setting

*CONTACT_NODES_TO_SURFACE_(ID/TITLE/MPP) (2)

1	CID	TITLE						
	1	tube-to-plup						
		<input type="checkbox"/> MPP1		<input type="checkbox"/> MPP2				
2	IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	C裴ARM8
	0	200		3	2	1.0005		0
3	UNUSED	CHKSEGS	PENSEF	GRPABLE				
		0	1.0	0				
4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	1	3	3	3	0	0	1	0
5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20
6	SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT	FSF	VSF
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000
	<input type="checkbox"/> Thermal <input type="checkbox"/> T_Friction <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> AB <input type="checkbox"/> ABC <input type="checkbox"/> ABCD <input type="checkbox"/> ABCDE <input type="checkbox"/> ABCDEF							

Εικόνα 18 Συνθήκες επαφής πλάκας με κέλυφος

Επόμενη παράμετρος που ορίζεται είναι ο έλεγχος της επαφής. Η επαφή δεν θα λαμβάνει υπόψη της αλλαγές στο πάχος του κελύφους που μπορούν να σημειωθούν καθώς και διείσδυση των επιφανειών μεταξύ τους. Ο χρόνος ολοκλήρωσης ορίζεται στα 80s δεδομένου ότι εκτιμάτε ότι περίπου 70s χρειάζονται για να δημιουργηθούν όλοι οι λοβοί δεδομένου ότι θα σχηματιστούν κατά τη συμπίεση 70- 80mm. Με σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης 1mm/s προκύπτει ο χρόνος τερματισμού.

Keyword Input Form

Clear Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 40X40X1.2X120.k) Setting

*CONTROL_CONTACT (1)

1	SLSFAC	RWPNAL	ISLCHK	SHLTHK	PENOPT	THKCHG	ORIEN	ENMASS
	0.1000000	0.0	1	0	1	0	1	0
2	USRSTR	USRERC	NSBCS	INTERM	XPENE	SSTHK	ECDI	TIEDPRJ
	0	0	0	0	4.0000000	1	0	0
3	SFRIC	DFRIC	EDC	VFC	TH	TH_SF	PEN_SF	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	IGNORE	FRCENG	SKJPRWG	OUTSEG	SPOTSTP	SPOTDEL	SPOTHIN	
	0	0	0	0	0	0	0.0	
5	ISYM	NSEROD	RWGAPS	RWGDTH	RWKSF	ICOV	SWRADE	ITHOFF
	0	0	1	0.0	1.0000000	0	0.0	0
6	SHLEGD	PSTIFF	ITHCNT	TDCNOF	FTALL	UNUSED	SHLTRW	
	0	0	0	0	0	0	0.0	

COMMENT:

Εικόνα 19 Επιλογές ελέγχου επαφής επιφανειών

Keyword Input Form

Clear Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 Trigger 45degV100mm 90secs-e.k) Setting

*CONTROL_TERMINATION (1)

1	ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS	NOSOL
	70.000000	0	0.0	0.0	1.000e+08	0

COMMENT:

ENDTIM:= Termination time. Mandatory.

Εικόνα 20 ορισμός χρόνου τερματισμού

Για το τύπο σιβαρότητας που ακολουθείται κατά την παραμόρφωση των στοιχείων μόνο των μοντέλων των δοκιμών επιλέχθηκε το μοντέλο Flanagan-Belytschko στην καρτέλα "Hourglass" αποδίδοντας την τιμή 4 στην παράμετρο IHQ .Η επιλογή του μοντέλου Flanagan-Belytschko στην καρτέλα "Hourglass" επιλέχθηκε καθώς η θεώρηση αυτή καθιστά το μητρώο σιβαρότητας κατά τη μη-γραμμική επίλυση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων πιο ευσταθή στην υπολογιστική διαδικασία ενισχύοντας έτσι την ικανότητα του μοντέλου για απόδοση μιας ελεγχόμενης και προοδευτικής κατάρρευσης όταν αυτή προκαλείται υπό την επίδραση των υπόλοιπων συνθηκών γεωμετρίας και φόρτισης.

Keyword Input Form

NewID RefBy Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 40X40X1.2X120.k) Setting

*HOURLASS_(TITLE) (1)

TITLE
tube

1	HGID	IHQ	QM	IBQ	Q1	Q2	QB/VDC	QW
	1	4	0.1000000	0	1.5000000	0.0600000	0.1000000	0.1000000

COMMENT:

Εικόνα 21 επιλογή παραμετρων hourglass

Σε επόμενο στάδιο, κατόπιν της δημιουργίας των μοντέλων ελέγχθηκε το πλέγμα διακριτοποίησης τους ώστε να μην αποδίδονται διπλοί κόμβοι (Duplicate nodes). Για την προσομοίωση του πάχους τοιχώματος του δοκιμίου, στην καρτέλα "Section Shell" του "Keyword Manager", επιλέχθηκε το πάχος των στοιχείων (T1/T2/T3/T4) που αφορούσε το πάχος του αρχικού ελάσματος. Αντίστοιχα στη καρτέλα "Section Solid" επιλέχθηκαν οι ιδιότητες των απαραμόρφωτων πλακών.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Sort/T1 Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 40X40X1.2X120.k) Setting

*SECTION_SHELL_(TITLE) (1)

TITLE
tube

1	SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
	1	2	1.0000000	5	1	0	0	1

2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
	1.2000000	1.2000000	1.2000000	1.2000000	0.0	0.0	0.0	0

Repeated Data by Button and List

Data Pt.
 Replace Insert
 Delete Help

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Εικόνα 22 ορισμός πάχους και τύπος πεπερασμένων στοιχείων τύπου κελύφους

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 40X40X1.2X120.k) Setting

*SECTION_SOLID_(TITLE) (1)

TITLE
platens

1 SECID ELFORM AET
2 1 0

Repeated Data by Button and List

Data Pt.
Replace Insert
Delete Help

Repeated Data by Button and List

Total Card: 1 Smallest ID: 2 Largest ID: 2 Total deleted card: 0

Εικόνα 23 ορισμός πάχους και τύπος πεπερασμένων στοιχείων τύπου στερεού συμπαγή

4.9.3 Καθορισμός μηχανικών ιδιοτήτων υλικών

Για τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών χρησιμοποιήθηκαν οι καρτέλες "MAT_020" και "MAT_024" για τις δυο πλάκες και το αριθμητικό μοντέλο αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, το κράμα μαλακού χάλυβα ως υλικό του δοκιμίου περιεγράφηκε από τη πυκνότητά του ($\rho=7,8\text{gr /cm}^3$), το λόγο Poisson ($\nu=0.30$), το μέτρο ελαστικότητας ($E=207\text{ GPa}$). Οκτώ ζεύγη τιμών τάσης (σ) – πλαστικής παραμόρφωσης (ϵ) χρησιμοποιήθηκαν ώστε να περιγράψουν τη κράτυνση του υλικού από την διαρροή έως την αντοχή του. Τα τελευταία λήφθηκαν από πείραμα μονοαξονικού εφελκυσμού του υλικού, από το οποίο παράχθηκε η πραγματική καμπύλη σ - ϵ ,

Keyword Input Form

NewID MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 no crashworth test 3.k) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (1)

TITLE
Crashbox

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
	1	0.0078300	2.070e+05	0.3000000	400.00000	0.0	1.000e+21	0.0

2	C	P	LCSS	LCSR	VP
	0.0	0.0	0	0	0.0

3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	0.0050000	0.0100000	0.0200000	0.0300000	0.0400000	0.0500000	0.1000000

4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	0.0	200.00000	330.00000	350.00000	360.00000	365.00000	380.00000	400.00000

Plot Raise New Padd

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Εικόνα 24 Επιλογή ιδιοτήτων υλικού κελύφους

Η επιλογή της καρτέλας "MAT_024" αντιπροσωπεύει ένα κατά τμήματα γραμμικά κρατυνόμενο υλικό (piecewise linear plasticity) και για αυτό το λόγο θεωρήθηκε κατάλληλη για την συγκεκριμένη μοντελοποίηση δεδομένου του πειράματος εφελκυσμού που έγινε. Η συμπλήρωση της καρτέλας με τις αντίστοιχες τιμές. Η κράτυνση του υλικού, όπως φαίνεται από τη σχετική δοκιμή εφελκυσμού, ήταν αμελητέα, και γι αυτό το υλικό μοντελοποιήθηκε ως τέλεια πλαστικό.

Αναφορικά με τα υλικά των πλακών, επιλέχθηκε η καρτέλα υλικού "MAT_020" η οποία θεωρεί το υλικό ως άκαμπτο και απαραμόρφωτο (rigid). Οι πλάκες θεωρήθηκαν χαλύβδινες, και αποδόθηκαν η πυκνότητα του υλικού ($\rho=7,83\text{gr cm}^{-3}$), ο λόγος Poisson ($\nu=0.3$) και το μέτρο ελαστικότητάς τους ($E=207\text{GPa}$). Ακόμη, καθορίστηκαν και οι κινηματικοί περιορισμοί των δυο πλακών στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων (CMO=1), με την κάτω πλάκα πλήρως δεσμευμένη έναντι μετατοπίσεων (CON1=7) και περιστροφών (CON2=7), ενώ την άνω πλάκα πλήρως δεσμευμένη έναντι περιστροφών (CON2=7) και ελεύθερη έναντι μετατοπίσεων περί τον κατακόρυφο άξονα (CON1=4), όπως παριστάνεται στα ακόλουθα σχήματα αντίστοιχα. Τέλος, σε κάθε σώμα του μοντέλου αντιστοιχίστηκαν στην καρτέλα Part κατάλληλα το είδος των στοιχείων με τα οποία διακριτοποιήθηκε (Section ID) και το υλικό (Material ID), ενώ συγκεκριμένα στο μοντέλο του απορροφητή αντιστοιχίστηκε και το Hourglass ID με το οποίο περιεγράφηκε.

Keyword Input Form

NewID MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 40X40X1.2X120.k) Setting

*MAT_RIGID_(TITLE) (020) (2)

TITLE
plup

1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
	3	0.0078300	2.070e+05	0.3000000	0.0	0	0.0	

2	CMO	CON1	CON2
	1.0	4	7

3	LCO OR A1	A2	A3	V1	V2	V3
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

COMMENT:

Total Card: 2 Smallest ID: 2 Largest ID: 3 Total deleted card: 0

Εικόνα 25 Επιλογή ιδιοτήτων υλικού κινούμενης πλάκας

Keyword Input Form

NewID Use *Parameter Comment (Subsys: 1 40X40X1.2X120.k)

*MAT_RIGID_(TITLE) (020) (2)

TITLE
pldn

1	<u>MID</u>	<u>RO</u>	<u>E</u>	<u>PR</u>	<u>N</u>	<u>COUPLE</u>	<u>M</u>	<u>ALIAS</u>
	1	0.0078300	2.070e+05	0.3000000	0.0	0	0.0	
2	<u>CMO</u>	<u>CON1</u>	<u>CON2</u>					
	1.0	7	7					
3	<u>LCO OR A1</u>	<u>A2</u>	<u>A3</u>	<u>V1</u>	<u>V2</u>	<u>V3</u>		
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

COMMENT:

Εικόνα 26 Επιλογή ιδιοτήτων υλικού Σταθερής πλάκας

4.9.4 Υπολογισμός αποτελεσμάτων και αντιστοίχιση δεδομένων με την εκάστοτε γεωμετρία

Για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων στην καρτέλα "Database" επιλέχθηκαν χρονικά βήματα 1 ms καταγραφής στιγμιότυπων της κατάρρευσης στην υποκαρτέλα "D3plot" και 0,5ms καταγραφής των ασκούμενων δυνάμεων στις διεπιφάνειες στην υποκαρτέλα "Rcforc" Τέλος γίνεται αντιστοίχια των παραπάνω σε κάθε γεωμετρία στο περιβάλλον του "Keyword Manager" στην ενότητα "Part"

Keyword Input Form

NewID Use *Parameter Comment (Subsys: 1 40X40X1.2X120.k)

*PART_(TITLE) (3)

1 TITLE
tube

2	<u>PID</u>	<u>SECID</u>	<u>MID</u>	<u>EOSID</u>	<u>HGID</u>	<u>GRAV</u>	<u>ADPOPT</u>	<u>TMID</u>
	1	1	1	0	1	0	0	0

COMMENT:

Keyword Input Form

NewID Use *Parameter Comment (Subsys: 1 40X40X1.2X120.k)

*PART_(TITLE) (3)

1 TITLE
pldn

2	<u>PID</u>	<u>SECID</u>	<u>MID</u>	<u>EOSID</u>	<u>HGID</u>	<u>GRAV</u>	<u>ADPOPT</u>	<u>TMID</u>
	2	2	2	0	0	0	0	0

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 40X40X1.2X120.k) Setting

*PART_(TITLE) (3)

1 TITLE
plup

2 PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID

3	2	3	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

COMMENT:

Εικόνα 27 Αντιστοίχιση γεωμετρίας και ιδιοτήτων κελύφους και στερεών σωμάτων

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 Trigger 45degV100mm 90secs-e.k) Setting

*PART_(TITLE) (7)

1 TITLE
TR1

2 PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID

3	1	1	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

COMMENT:

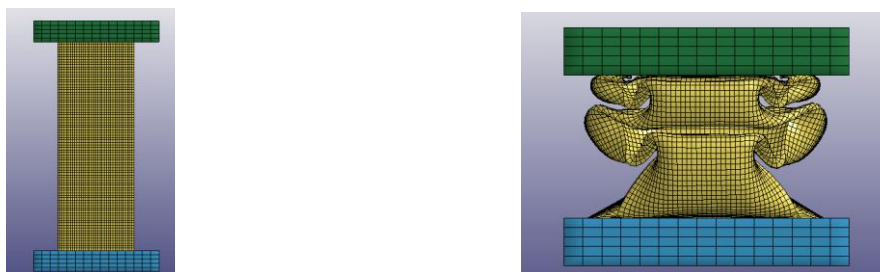
Total Card: 7 Smallest ID: 1 Largest ID: 7 Total deleted card: 0

Εικόνα 28 Αντιστοίχιση γεωμετρίας και ιδιοτήτων σωμάτων που αποτελούν τον μηχανισμό trigger

5 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

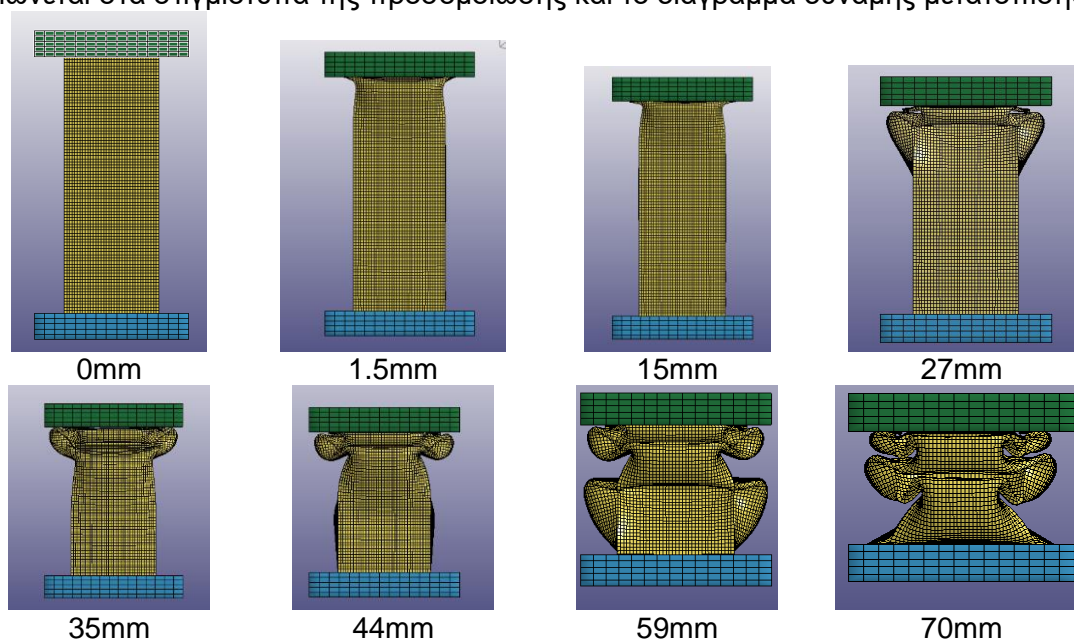
Στη παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογιστικών προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν με σκοπό τη δημιουργία αποτελεσμάτων που να προβλέπουν τη συμπεριφορά των δοκιμίων στη πραγματικότητα, και συγκεκριμένα κατά την εκτέλεση της καταστροφικής δοκιμής. Οι προσομοιώσεις που θα αναλυθούν θα επεξηγηθούν σε αναλυτικό βαθμό μέσω της ανάλυσης στον υπολογιστή και συγκεκριμένα με χρήση του λογισμικού του LS Dyna. Τα υπολογιστικά μοντέλα δημιουργήθηκαν σύμφωνα με της δυνατότητας να επαληθευτούν με χρήση μηχανής θλιπτικών καταπονήσεων

5.1 Προσομοίωση χωρίς μηχανισμό σταυροειδούς trigger

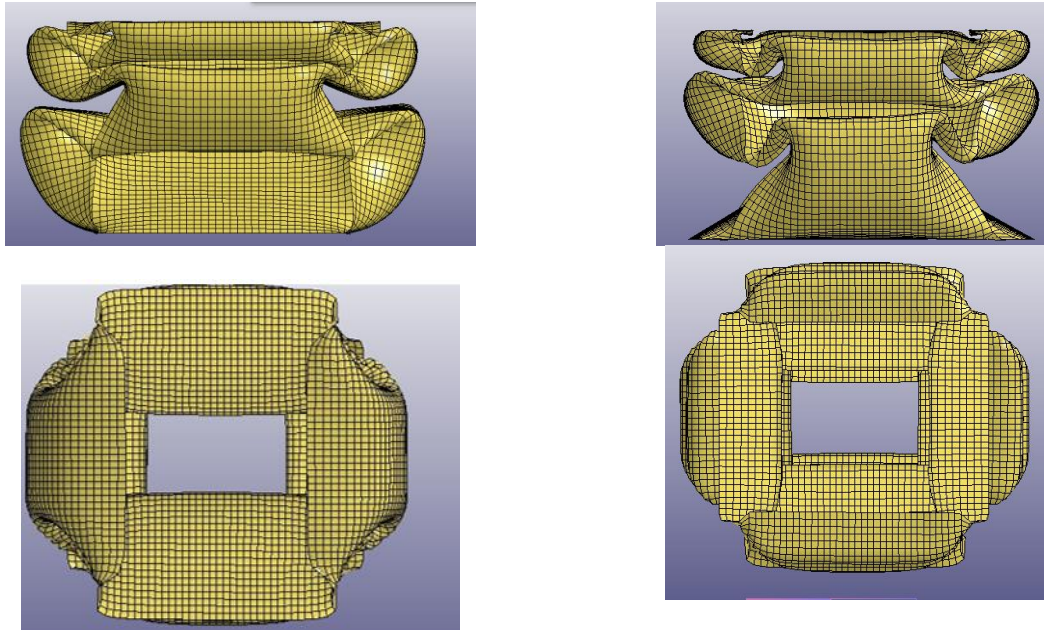


Εικόνα 29 αρχικό απαραμόρφωτο και πλήρωσ παραμορφωμένο δοκίμιο.

Κατά τη προσομοίωση της κατάρρευσης του δοκιμίου χωρίς τη προσθήκη του μηχανισμού σταυροειδούς trigger η άνω πλάκα μετατοπίστηκε κατά 70mm στα αρνητικά του άξονα Z. Κατά την κατάρρευση σχηματίστηκαν πέντε μη εκατοί λοβοί περίπου στις θέσεις 1.5mm, 10.5mm, 29mm, 43.3mm και 65,1mm από την αρχική θέση της άνω πλάκας, όπως σημειώνεται στα στιγμιότυπα της προσομοίωσης και το διάγραμμα δύναμης μετατόπισης.

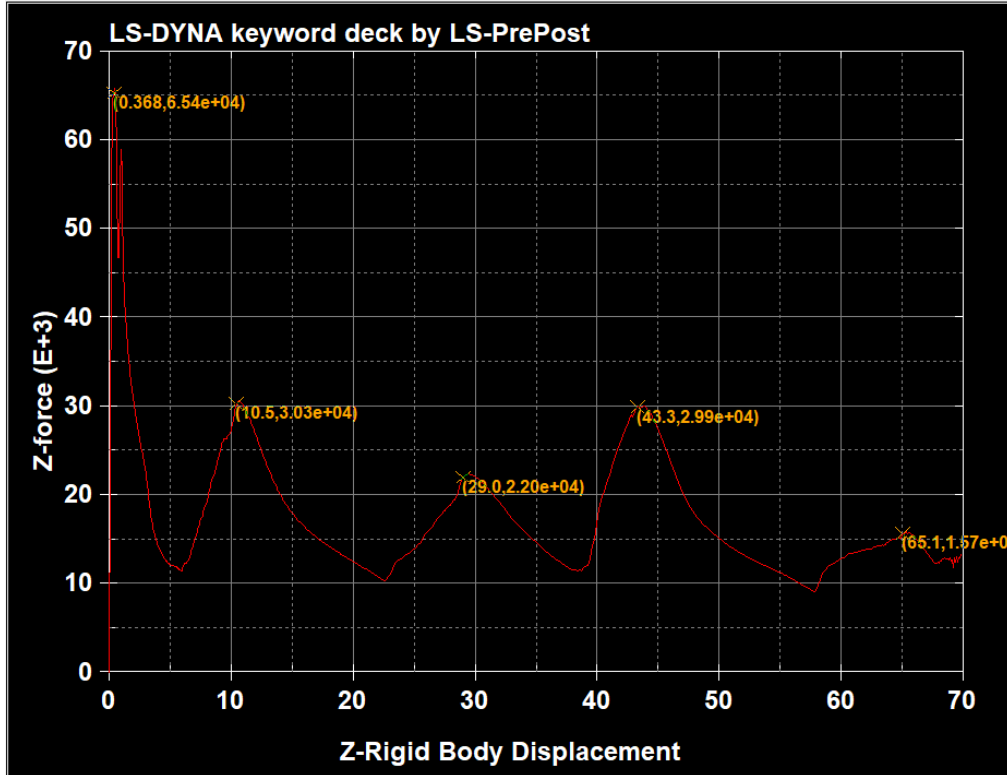


Εικόνα 30 Στιγμιότυπα παραμόρφωσης δοκιμίου χωρίς μηχανισμό trigger



Εικόνα 31 Όψεις τελικού δοκιμίου, έπειτα την ολοκλήρωση του πειράματος χωρίς χρήση μηχανισμού trigger

Από τη προσομοίωση εξάγουμε το διάγραμμα δύναμης μετατόπισης προκειμένου να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τα μεγέθη και τους δείκτες ώστε να αξιολογηθεί η συμπεριφορά του δοκιμίου. Ο σχηματισμός κάθε λοβού σημειώνεται με τα ακρότατα της συνάρτησης τα οποία συνδέονται και με την απεικόνιση των στιγμιότυπων της προσομοίωσης.

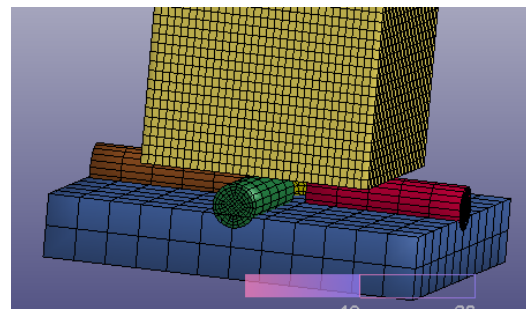
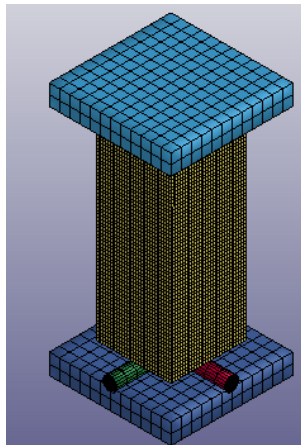


Εικόνα 32 Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης δοκιμής χωρίς μηχανισμό trigger

Αναλύοντας το διάγραμμα παρατηρείται μέγιστη δύναμη αντίδρασης (Pmax) ίση με 65,4 kN κατά το σχηματισμό του πρώτου λοβού σχεδόν αμέσως μετά της έναρξης της

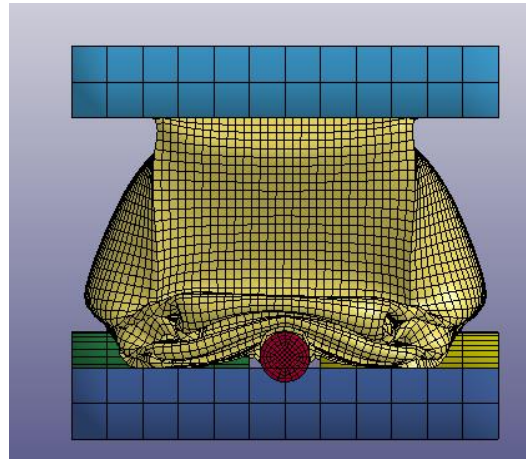
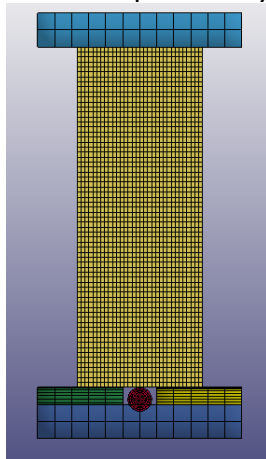
μετατόπισης της άνω πλάκας όπως, σημειώνεται κατά τη δημιουργία του πρώτου λοβού και δημιουργείτε ολικό μέγιστο. Τα επόμενα τοπικά ακρότατα περιγράφουν τους επόμενους τρεις λοβούς. Η μέση δύναμη υπολογίζεται σε (P_{mean}) 24,38kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου υπολογίστηκε 1,71 kJ ολοκληρώνοντας τη γραφική παράσταση, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 9,11 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE είναι ίσος 0,372.

5.2 Προσομοίωση με τοποθέτηση σταυροειδούς trigger σε προσανατολισμό στις 0°



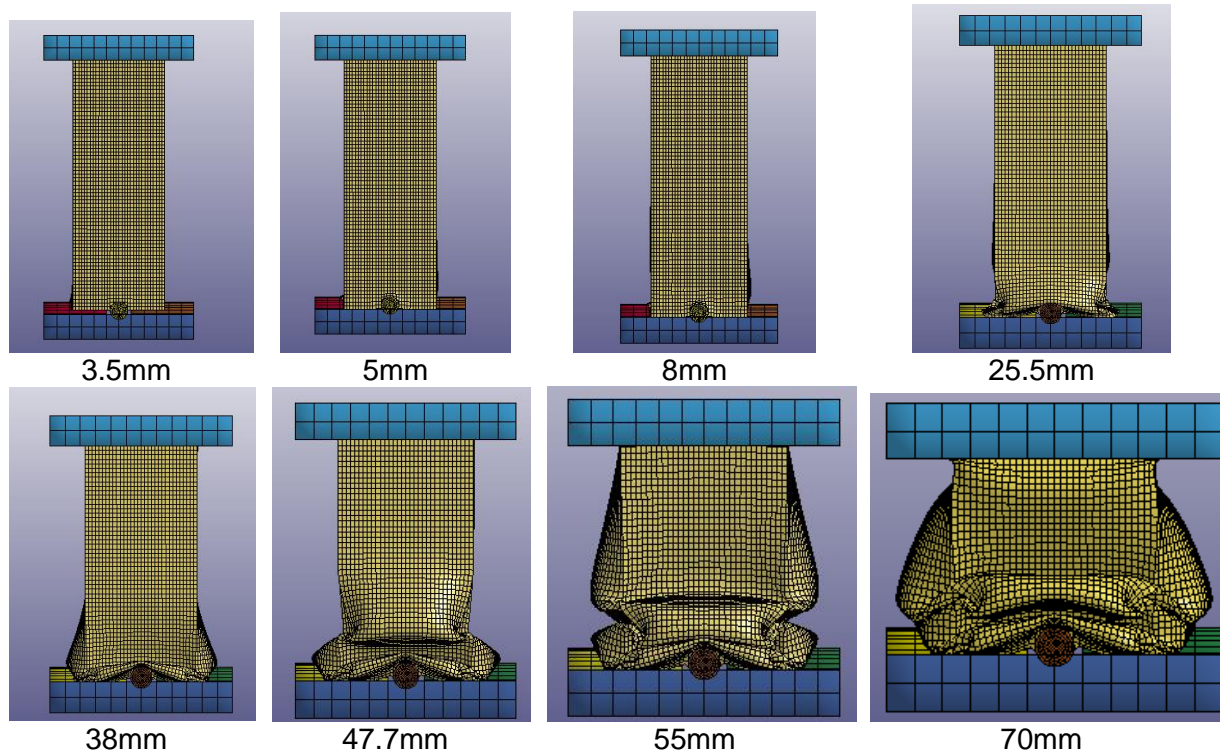
Εικόνα 33 Γεωμετρία δοκιμίου με μηχανισμό trigger τοποθετημένο στις 0°

Στη παρούσα παράγραφο θα μελετηθεί η αντοχή του ίδιου δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger. Η πρώτη θέση αυτού γίνεται με τέτοιο τρόπο που οι κύλινδροι του σταυρού τοποθετούνται κάθετα στις επιφάνειες των ακμών του δοκιμίου, σε θέση μηδέν μοιρών 0°, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

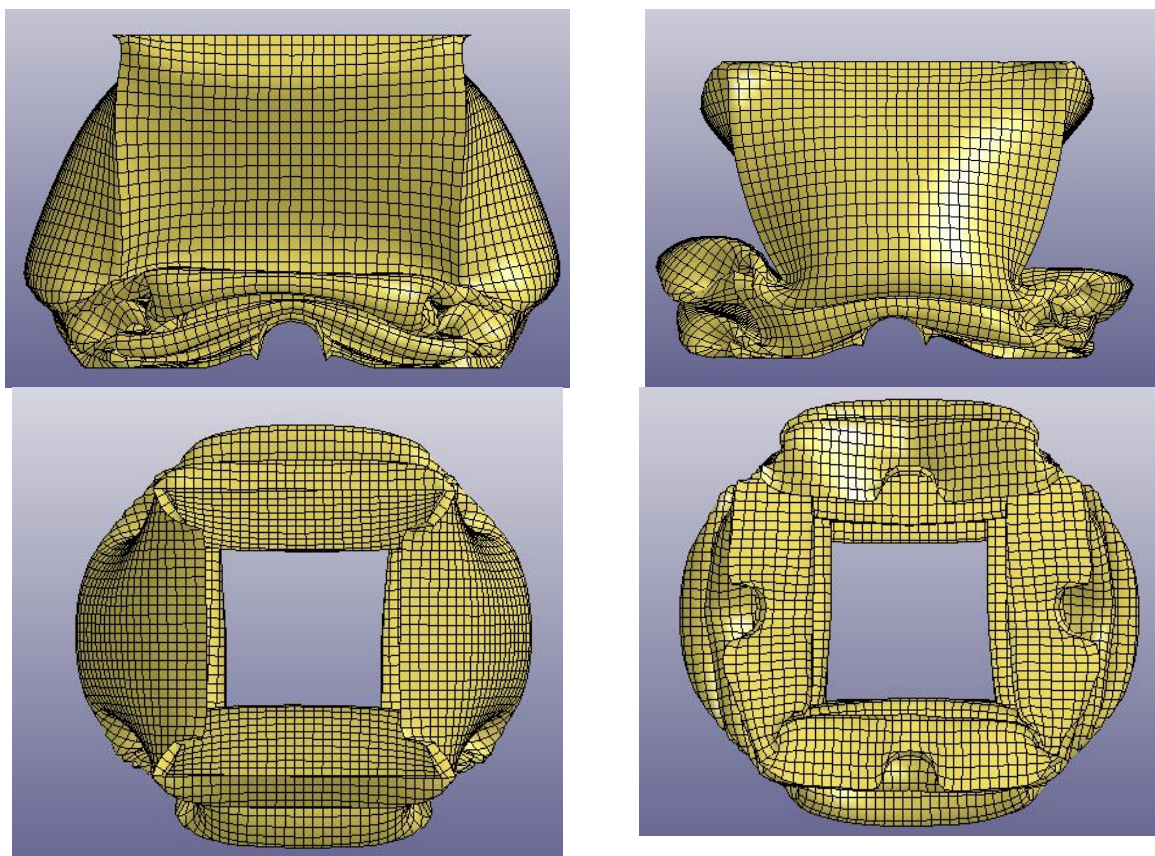


Εικόνα 34 αρχικό απαραμόρφωτο και πλήρως παραμορφωμένο δοκίμιο με μηχανισμό trigger τοποθετημένο στις 0°.

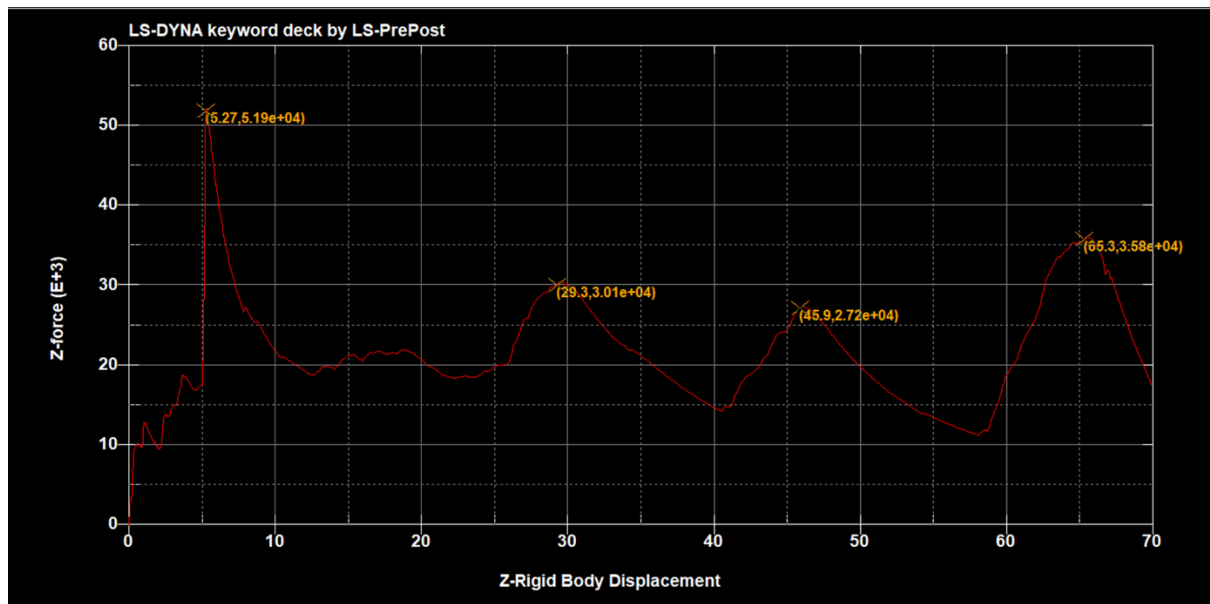
Κατά τη προσομοίωση της κατάρρευσης του δοκιμίου με τη χρήση του μηχανισμού σταυροειδούς trigger στις 0° η άνω πλάκα μετατοπίστηκε κατά 70mm στα αρνητικά του άξονα Z. Κατά την κατάρρευση σχηματίστηκαν πέντε μη εκατοί λοβοί περίπου στις θέσεις 5,3mm, 29,3mm, 45,9mm και 65,3mm από την αρχική θέση της άνω πλάκας, όπως σημειώνεται στα στιγμιότυπα της προσομοίωσης και το διάγραμμα δύναμης μετατόπισης.



Εικόνα 35 Στιγμιότυπα παραμόρφωσης δοκιμίου με μηχανισμό trigger στις 0°



Εικόνα 36 Όψεις τελικού δοκιμίου, έπειτα την ολοκλήρωση του πειράματος με χρήση μηχανισμού trigger στις 0°

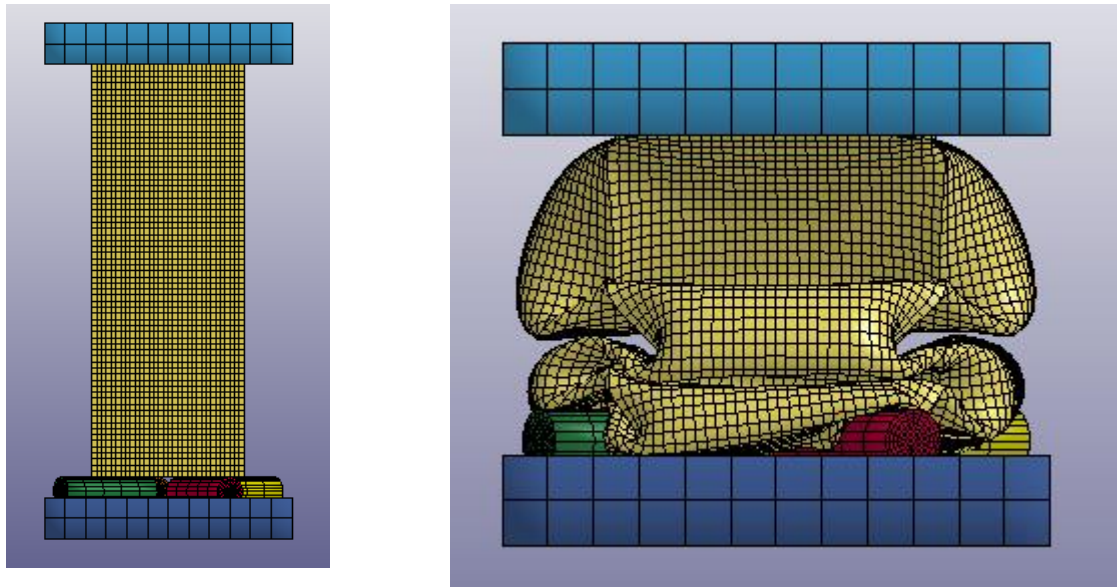


Εικόνα 37 Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης δοκιμής με μηχανισμό trigger στις 0°

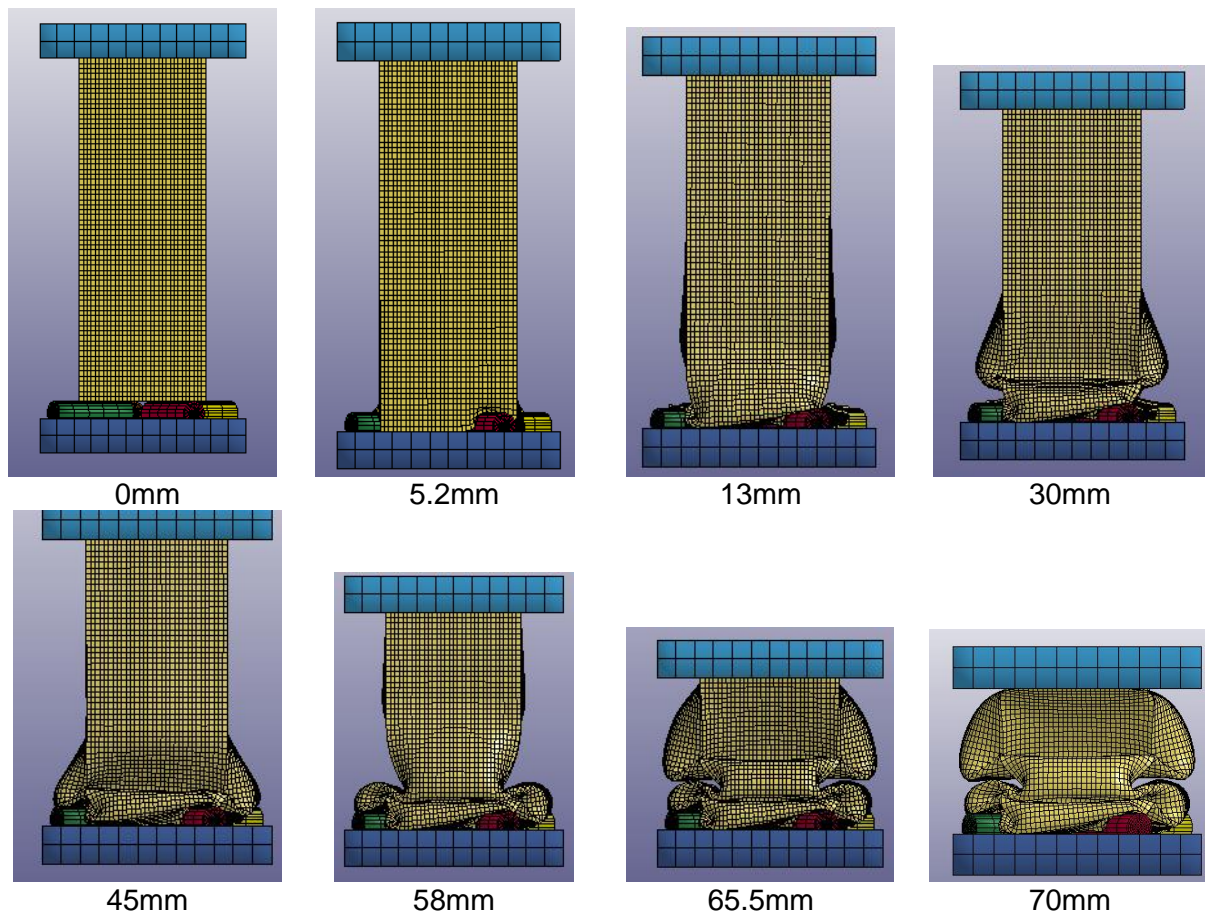
Αναλύοντας το διάγραμμα παρατηρείται μέγιστη δύναμη αντίδρασης (P_{max}) ίση με 51.9 kN που σημειώνεται κατά τη δημιουργία του πρώτου λοβού και δημιουργεί ολικό μέγιστο. Τα επόμενα τοπικά ακρότατα περιγράφουν τους επόμενους τρεις λοβούς. Η μέση δύναμη υπολογίζεται σε (P_{mean}) 21.58kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου υπολογίστηκε 1,51 kJ ολοκληρώνοντας τη γραφική παράσταση, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 11.19 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE είναι ίσος 0,416

5.3 Προσομοίωση με τοποθέτηση σταυροειδούς trigger σε προσανατολισμό 30°

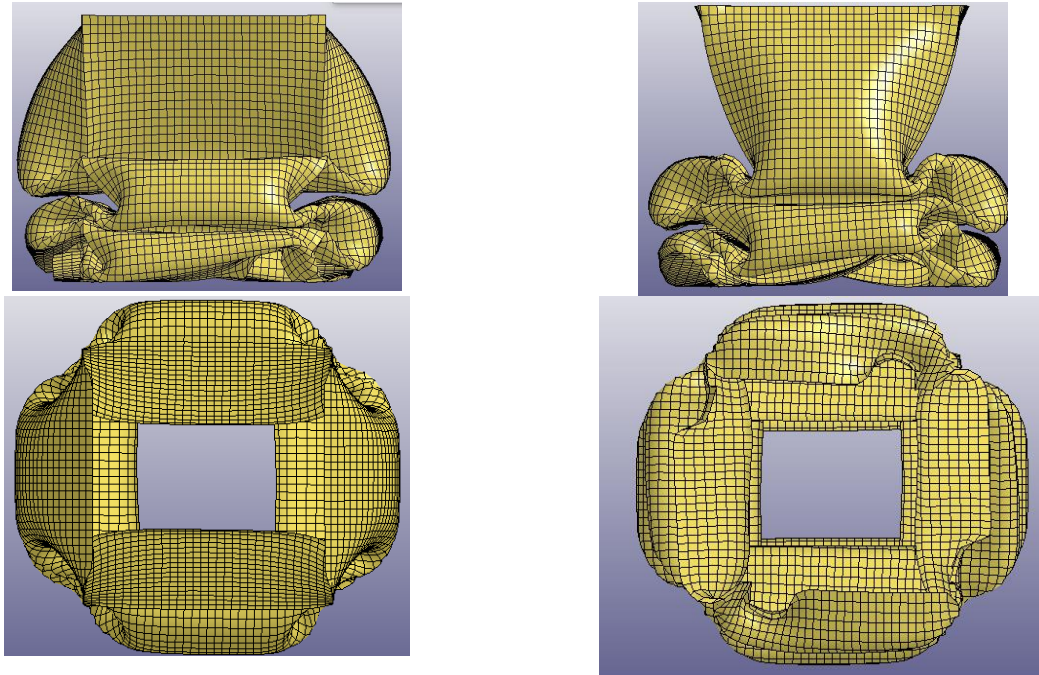
Σε αυτή παράγραφο θα μελετηθεί η αντοχή του ίδιου δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger. Η δεύτερη θέση αυτού γίνεται με τέτοιο τρόπο που οι κύλινδροι του σταυρού τοποθετούνται λοξά στις επιφάνειες των ακμών του δοκιμίου, σε θέση μηδέν μοιρών 30°, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 38 αρχικό απαραμόρφωτο και πλήρως παραμορφωμένο δοκίμιο με μηχανισμό trigger τοποθετημένο στις 30°.

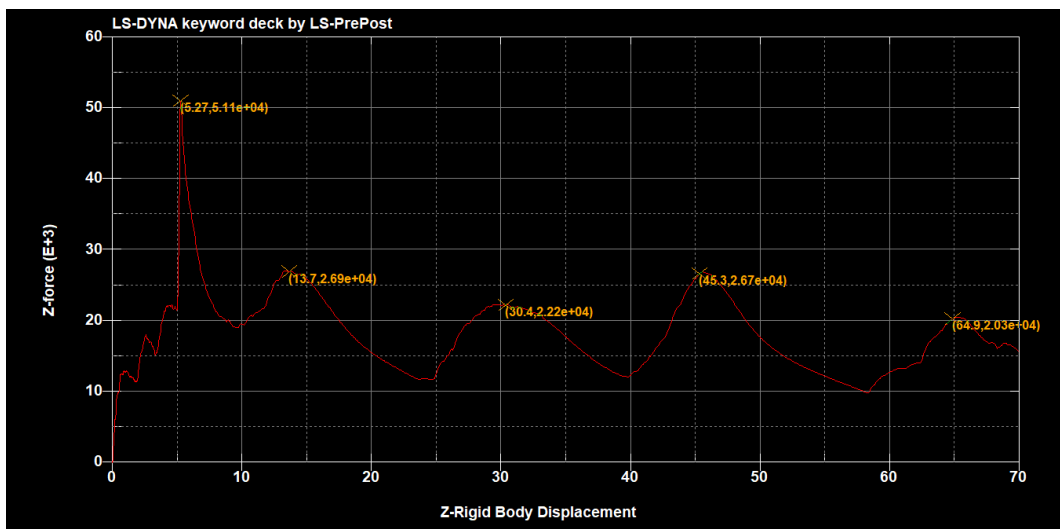


Εικόνα 39 Στιγμιότυπα παραμόρφωσης δοκιμίου με μηχανισμό trigger στις 30°



Εικόνα 40 Όψεις τελικού δοκιμίου, έπειτα την ολοκλήρωση του πειράματος με χρήση μηχανισμού trigger στις 30°

Κατά τη προσομοίωση της κατάρρευσης του δοκιμίου με τη χρήση του μηχανισμού σταυροειδούς trigger στις 30° η άνω πλάκα μετατοπίστηκε κατά 70mm στα αρνητικά του άξονα Z. Κατά την κατάρρευση σχηματίστηκαν πέντε μη εκατοί λοβοί περίπου στις θέσεις 5,27mm, 13,7mm, 30,4mm, 45,3mm και 64,9mm από την αρχική θέση της άνω πλάκας, όπως σημειώνεται στα στιγμιότυπα της προσομοίωσης και το διάγραμμα δύναμης μετατόπισης. Ο σχηματισμός κάθε λοβού σημειώνεται με τα ακρότατα της συνάρτησης τα οποία συνδέονται και με την απεικόνιση των στιγμιότυπων της προσομοίωσης.



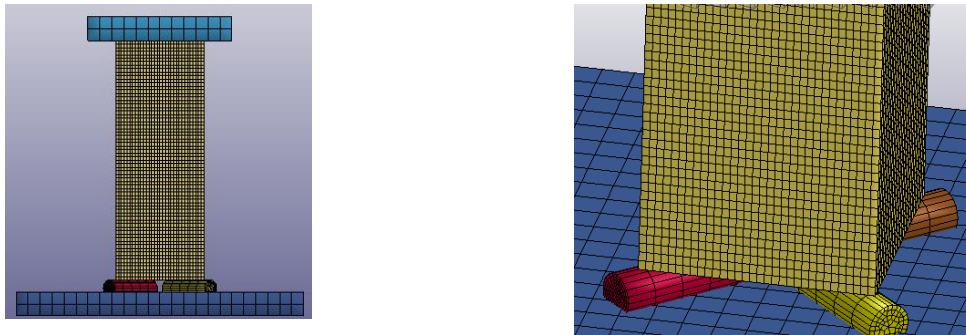
Εικόνα 41 Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης δοκιμής με μηχανισμό trigger στις 30°

Αναλύοντας το διάγραμμα παρατηρείται μέγιστη δύναμη αντίδρασης (Pmax) ίση με 51.1 kN που σημειώνεται κατά τη δημιουργία του πρώτου λοβού και δημιουργεί ολικό μέγιστο. Τα επόμενα τοπικά ακρότατα περιγράφουν τους επόμενους τρεις λοβούς. Η μέση δύναμη υπολογίζεται σε (Pmean) 18.14kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου υπολογίστηκε

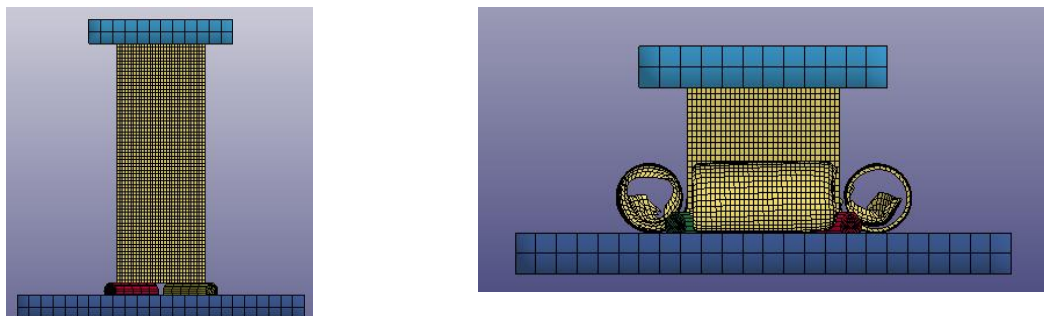
1,27 kJ ολοκληρώνοντας τη γραφική παράσταση, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 9.41 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE είναι ίσος 0,355

5.4 Προσομοίωση με τοποθέτηση σταυροειδούς trigger σε προσανατολισμό 45°

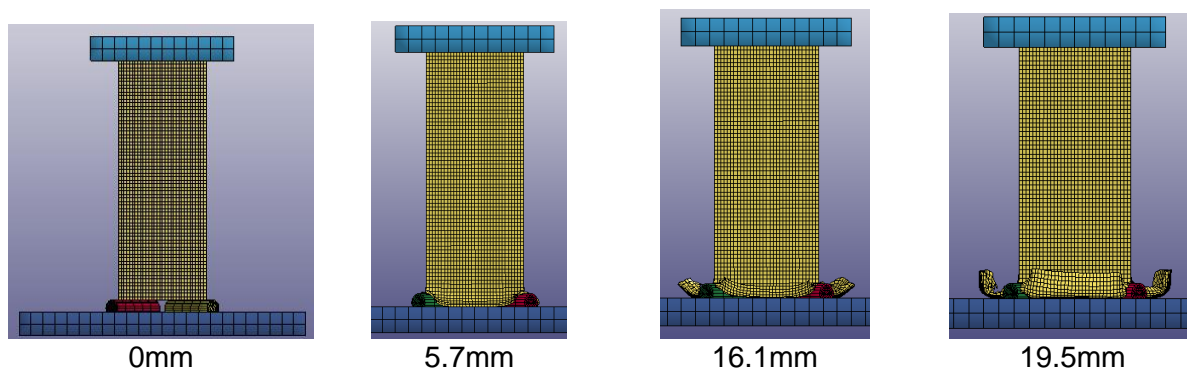
Περιεχόμενο αυτής της παράγραφου σχετίζεται με τη μελέτη της αντοχής του ίδιου του δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger. Η τρίτη θέση αυτού γίνεται με τέτοιο τρόπο που οι κύλινδροι του σταυρού τοποθετούνται ώστε η αξονική του κυλίνδρου να είναι παράλληλα με αυτή των ακμών του δοκιμίου, σε θέση μηδέν μοιρών 45ο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

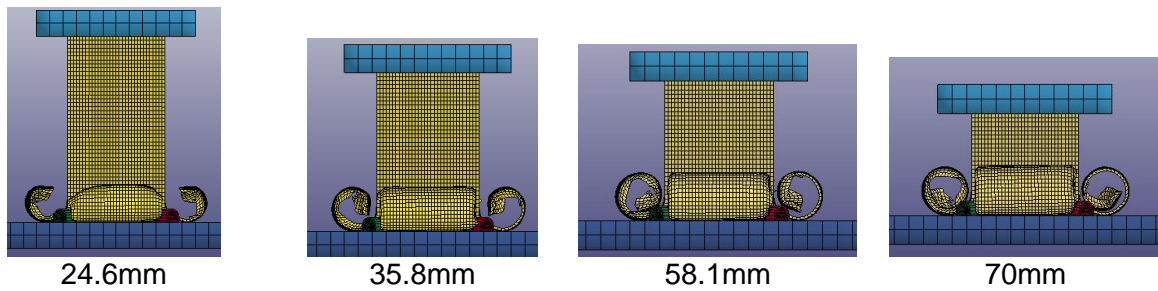


Εικόνα 42 αρχικό απαραμόρφωτο και πλήρως παραμορφωμένο δοκίμιο με μηχανισμό trigger τοποθετημένο στις 45°



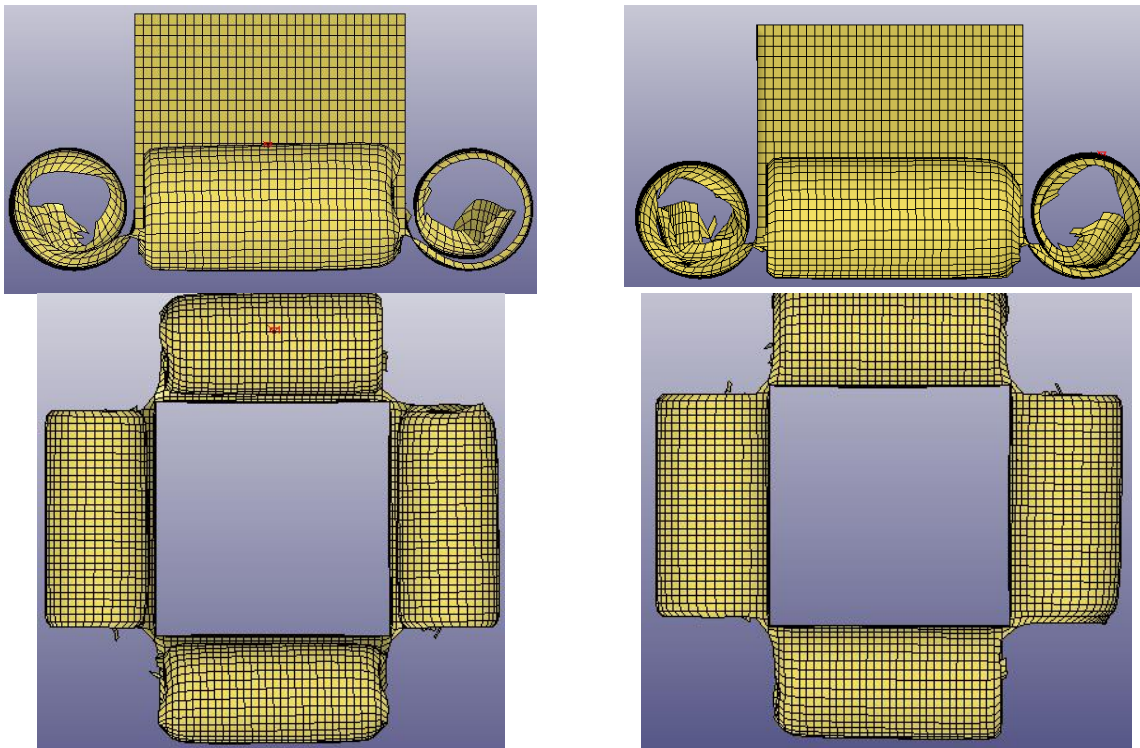
Εικόνα 43 Στιγμιότυπα παραμόρφωσης δοκιμίου με μηχανισμό trigger στις 45°





Εικόνα 44 Στιγμιότυπα παραμόρφωσης δοκιμίου με μηχανισμό trigger στις 45°

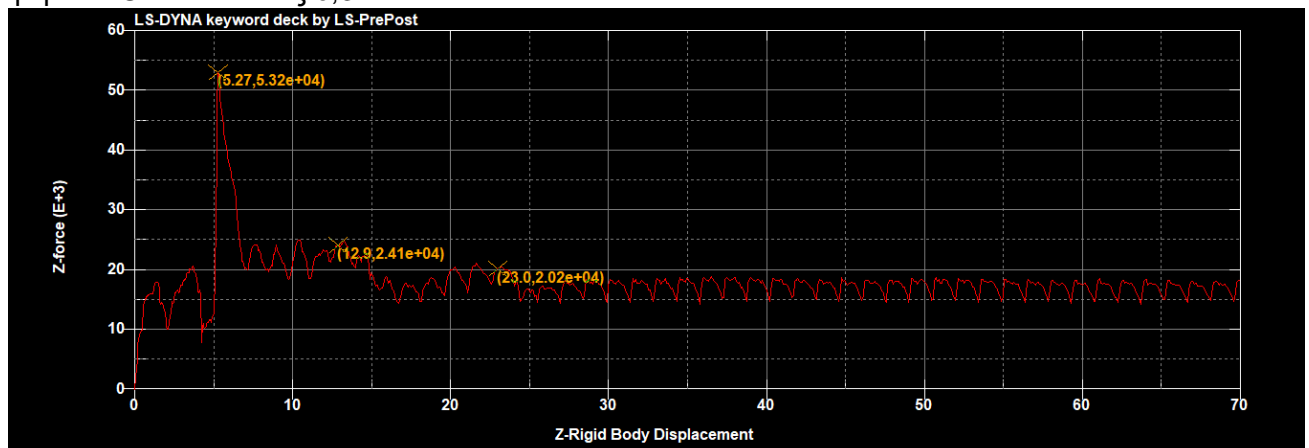
Κατά τη προσομοίωση της κατάρρευσης του δοκιμίου με τη χρήση του μηχανισμού σταυροειδούς trigger στις 45° η άνω πλάκα μετατοπίστηκε κατά 70mm στα αρνητικά του άξονα Z. Κατά την κατάρρευση το δοκίμιο αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά στις γωνίες όπου αρχίζει να σχίζεται . Κατά την μετακίνηση της πλάκας με σταθερή ταχύτητα και δεδομένης της ήδη συσσώρευσης τάσεων στις ακμές και το σχίσμο γίνεται με σταθερή δύναμη. Στα στιγμιότυπα της προσομοίωσης απεικονίζεται τη συστρωφή της κάθε αποκομμένης πλάκας που δεδομένης της γεωμετρίας του μηχανισμού σκανφάλλης και την επαφή της με τη κάτω πλάκα κύτρεται και σχηματίζει ομόκεντρους κύκλους σχηματίζοντας ρολό.



Εικόνα 45 Όψεις τελικού δοκιμίου, έπειτα την ολοκλήρωση του πειράματος με χρήση μηχανισμού trigger στις 45°

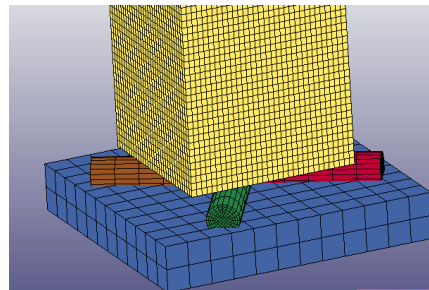
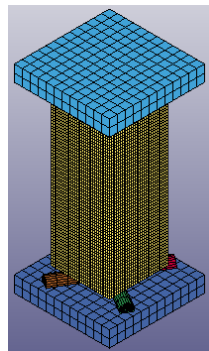
Αναλύοντας το διάγραμμα παρατηρείται μέγιστη δύναμη αντίδρασης (P_{max}) ίση με 53.2 kN που σημειώνεται κατά τη δημιουργία του πρώτου λοβού και δημιουργεί ολικό μέγιστο. Τα τοπικά ακρότατα τα οποία σημειώνονται πολλά σε αριθμό οφείλονται στη κατάρρευση στοιχείων (element) κατά την εξέλιξη του φαινομένου, και δεν λαμβάνονται υπόψη. Η μέση δύναμη υπολογίζεται σε (P_{mean}) 18.2kN. Τα ακρότατα που σχηματίζονται πριν το σχίσμο οφείλονται στην επαφή τη κάτω επιφάνειας του δοκιμίου με την κάτω πλάκα της πρέσας Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου υπολογίστηκε 1,28 kJ ολοκληρώνοντας τη γραφική

παράσταση, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 0,97 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE είναι ίσος 0,34.

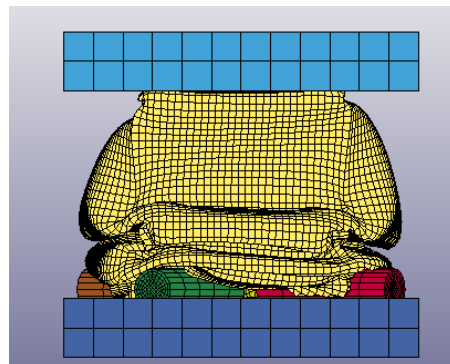
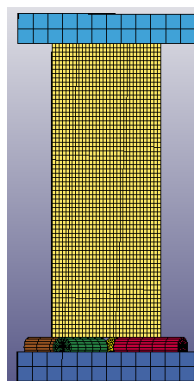


5.5 Προσομοίωση με τοποθέτηση σταυροειδούς trigger σε προσανατολισμό 60°

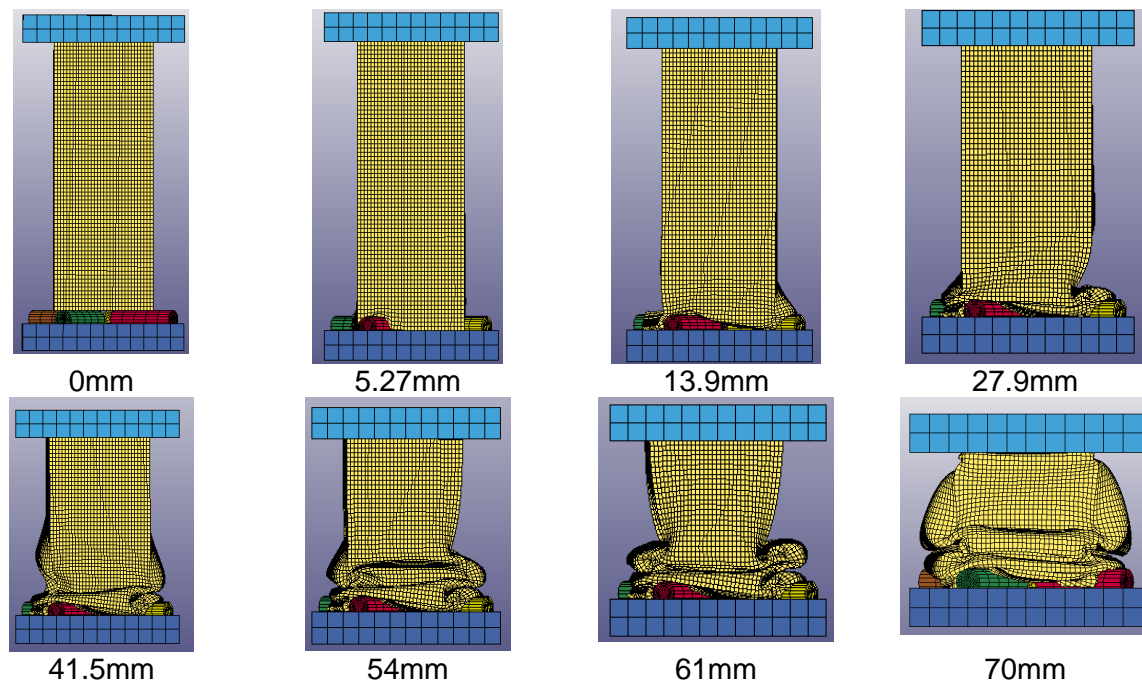
Στη παρούσα παράγραφο θα μελετηθεί η αντοχή του ίδιου δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger. Η πρώτη θέση αυτού γίνεται με τέτοιο τρόπο που οι κύλινδροι του σταυρού τοποθετούνται λοξά στις επιφάνειες των ακμών του δοκιμίου, σε θέση μηδέν μοιρών 60°, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



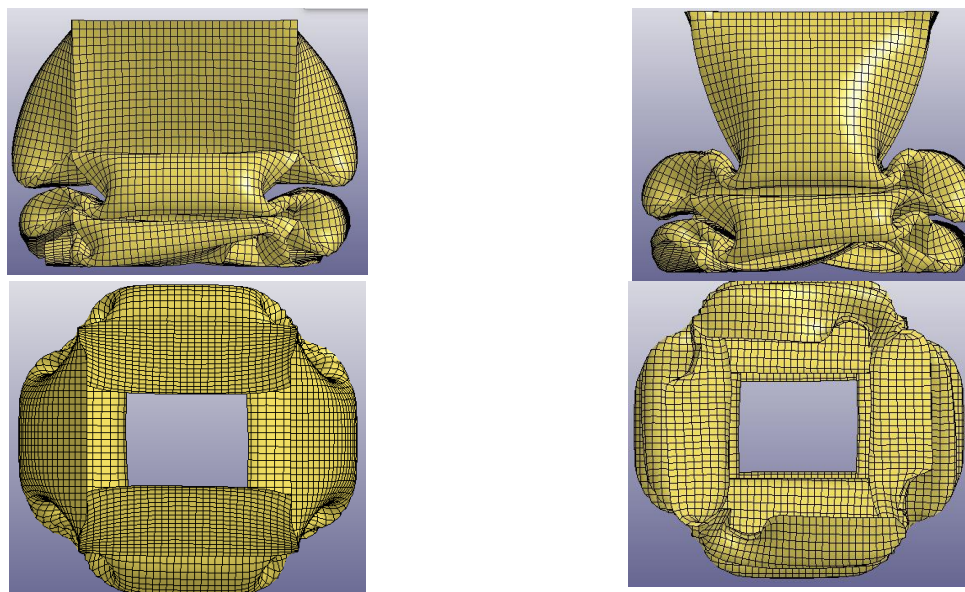
Εικόνα 46 Γεωμετρία δοκιμίου με μηχανισμό trigger τοποθετημένο στις 60°



Εικόνα 47 αρχικό απαραμόρφωτο και πλήρως παραμορφωμένο δοκίμιο με μηχανισμό trigger τοποθετημένο στις 60°.

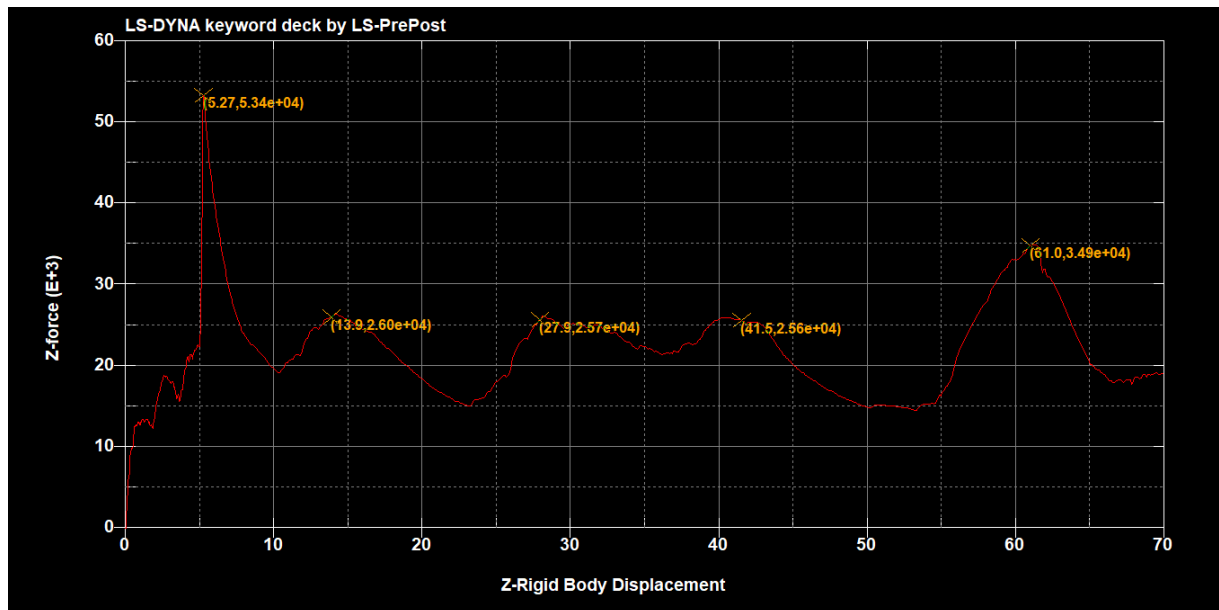


Εικόνα 48 στιγμιότυπα παραμόρφωσης δοκιμίου με μηχανισμό trigger στις 60°



Εικόνα 49 Όψεις τελικού δοκιμίου, έπειτα την ολοκλήρωση του πειράματος με χρήση μηχανισμού trigger στις 60°

Κατά τη προσομοίωση της κατάρρευσης του δοκιμίου με τη χρήση του μηχανισμού σταυροειδούς trigger στις 60° η άνω πλάκα μετατοπίστηκε κατά 70mm στα αρνητικά του άξονα Z. Κατά την κατάρρευση σχηματίστηκαν πέντε μη εκατοί λοβοί περίπου στις θέσεις 5,27mm, 13,9mm, 27,9mm και 41.5mm, 61.0mm από την αρχική θέση της άνω πλάκας, όπως σημειώνεται στα στιγμιότυπα της προσομοίωσης και το διάγραμμα δύναμης μετατόπισης. Ο σχηματισμός κάθε λοβού σημειώνεται με τα ακρότατα της συνάρτησης τα οποία συνδέονται και με την απεικόνιση των στιγμιότυπων της προσομοίωσης.



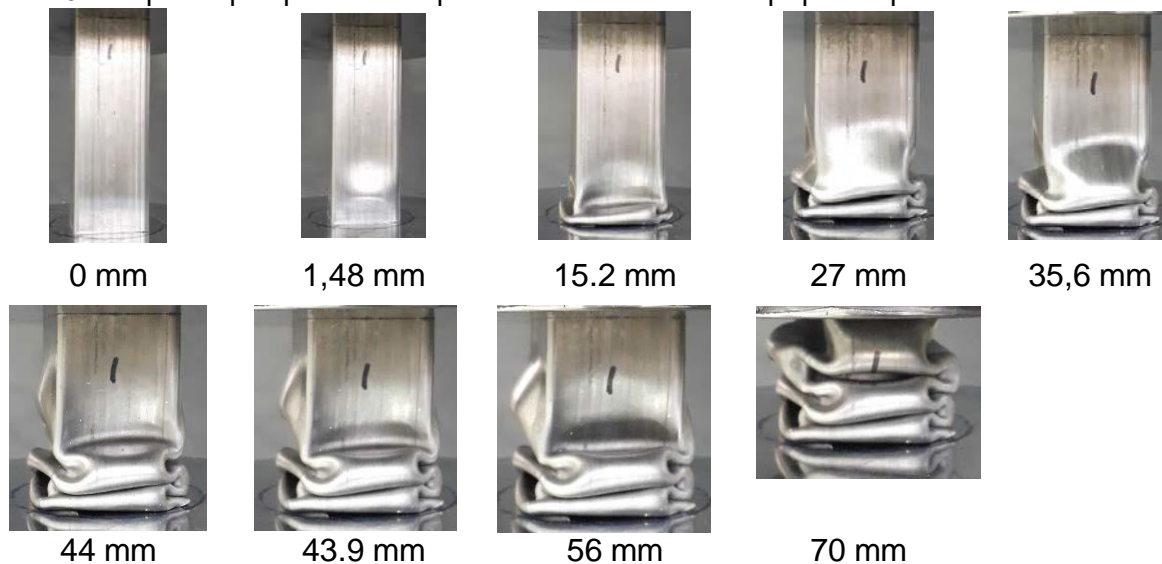
Εικόνα 50 Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης δοκιμής με μηχανισμό trigger στις 60°

Αναλύοντας το διάγραμμα παρατηρείται μέγιστη δύναμη αντίδρασης (P_{max}) ίση με 52.7 kN που σημειώνεται κατά τη δημιουργία του πρώτου λοβού και δημιουργεί ολικό μέγιστο. Τα επόμενα τοπικά ακρότατα περιγράφουν τους επόμενους τρεις λοβούς. Η μέση δύναμη υπολογίζεται σε (P_{mean}) 21.18kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου υπολογίστηκε 1,53 kJ ολοκληρώνοντας τη γραφική παράσταση, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 11.33 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE είναι ίσος 0,413

6 Πειραματικά Αποτελέσματα

6.1.1 Πειραματική δοκιμή χωρίς μηχανισμό trigger

Αρχικά, προκειμένου να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τη προστιθέμενη αξία που θα προσφέρουν οι διατάξεις trigger σταυρού είναι σημαντικό να μελετήσουμε και πειραματικά την συμπεριφορά του δοκιμίου χωρίς τη διάταξη trigger. Δοκίμιο τετραγωνικής διατομής μήκους 80mm με μάζα 135,4 gr, συμπιέστηκε ψευδοστατικά στη μηχανή θλίψης το οποίο αστόχησε σε λυγισμό και σημείωσε εκατούς λοβούς. Πιο συγκεκριμένα τέσσερις μη εκατοί λοβοί δημιουργήθηκαν με τον πρώτο να σημειώνεται κατά τη μετατόπισή της κινούμενης πλάκας κατά 15,2mm σημειώθηκε ο πρώτος και έκτοτε το φαινόμενο της αστοχία επιταχύνθηκε με τον επόμενο λοβό να σημειώνεται στα 27mm. Ο τρίτος και ο τέταρτος μη εκατοός λοβός σημειώθηκαν στα 44mm και 65mm αντίστοιχα. Έπειτα από τη μετατόπιση των 70mm η κινούμενη πλάκα σταματά να κινείται και το πείραμα σταματά.



Εικόνα 51 Στάδια παραμόρφωσης δοκιμίου χωρίς τη χρήση μηχανισμού trigger



Κάτοψη



Οπίσθια όψη



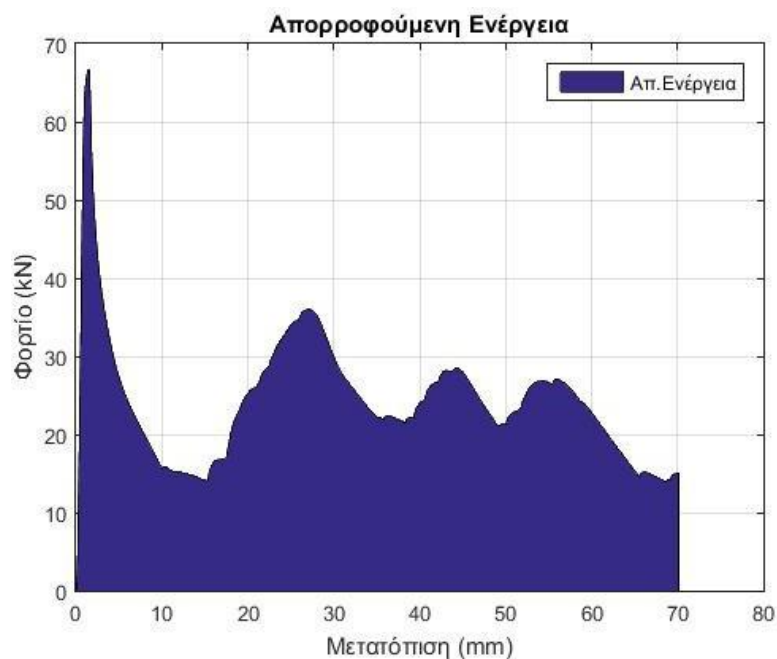
Πρόσψη



Άνοψη

Εικόνα 52 Όψεις τελικού δοκιμίου, έπειτα την ολοκλήρωση του πειράματος χωρίς χρήση μηχανισμού trigger

Το διάγραμμα δύναμης μετατόπισης από την παραπάνω καταστροφική δοκιμή σημειώνεται παρακάτω. Αναλύοντας το διάγραμμα παρατηρείται μέγιστη δύναμη αντίδρασης (P_{max}) ίση με 66,82 kN που σημειώνεται κατά τη δημιουργία του πρώτου λοβού και δημιουργεί ολικό μέγιστο. Τα επόμενα τοπικά ακρότατα περιγράφουν τους επόμενους τρεις λοβούς. Η μέση δύναμη υπολογίζεται σε (P_{mean}) 24,38kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου υπολογίστηκε 1,7107 kJ, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 18,05 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE είναι ίσος 0,3649.

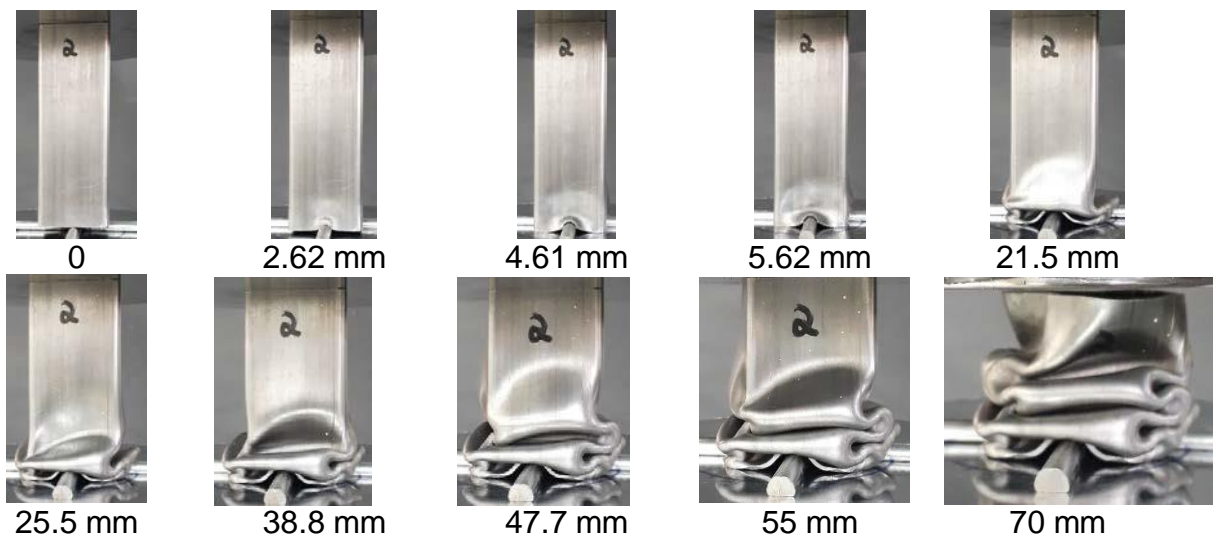


Διάγραμμα 1 Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο χωρίς τη χρήση μηχανισμού trigger

6.2 Πειραματικές δοκιμές με μηχανισμό trigger σταυρού με διαφορετικούς προσανατολισμούς.

6.2.1 Πειραματική δοκιμή με τοποθέτηση σταυροειδούς trigger σε προσανατολισμό 0°

Στο πείραμα δημιουργηθήκαν 4 μη-εκτατοί λοβοί μέχρι την μέγιστη βράχυνση των 70 mm. Η δημιουργία του πρώτου λοβού όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εικόνες ολοκληρώνεται κοντά στα 21 mm. Η δημιουργία των υπόλοιπων 3 λοβών ξεκινάει κοντά στα 25 mm και ολοκληρώνεται στα 60 mm. Αυτό οφείλεται στις γεωμετρικές ατέλειες του δοκιμίου οι οποίες έχουν προκύψει κατά την διαμόρφωση του χάλυβα, από την ύπαρξη συγκολλήσεων και από την επίδραση του μηχανισμού trigger.



Εικόνα 53 Στάδια παραμόρφωσης δοκιμίου χωρίς τη χρήση μηχανισμού trigger με προσανατολισμό 0°



Κάτοψη



Άνοψη

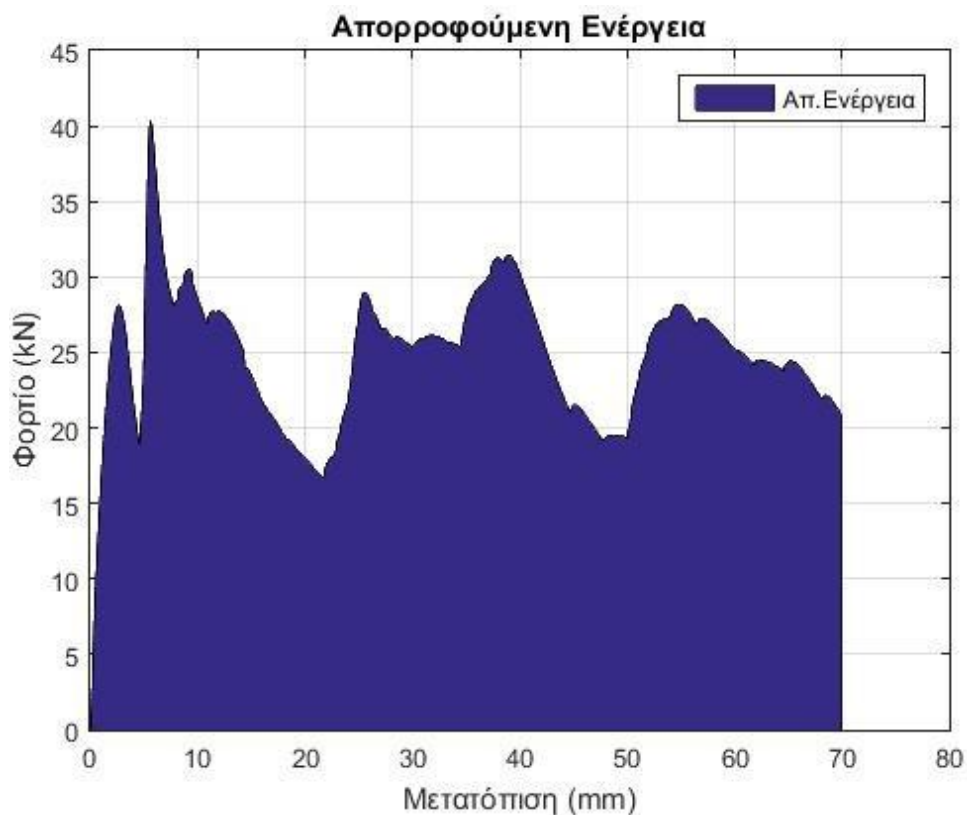


Πρόψη



Οπίσθια όψη

Εικόνα 54 Όψεις κατεστραμμένου δοκιμίου με χρήση μηχανισμού σταυροειδούς trigger με προσανατολισμό 0°

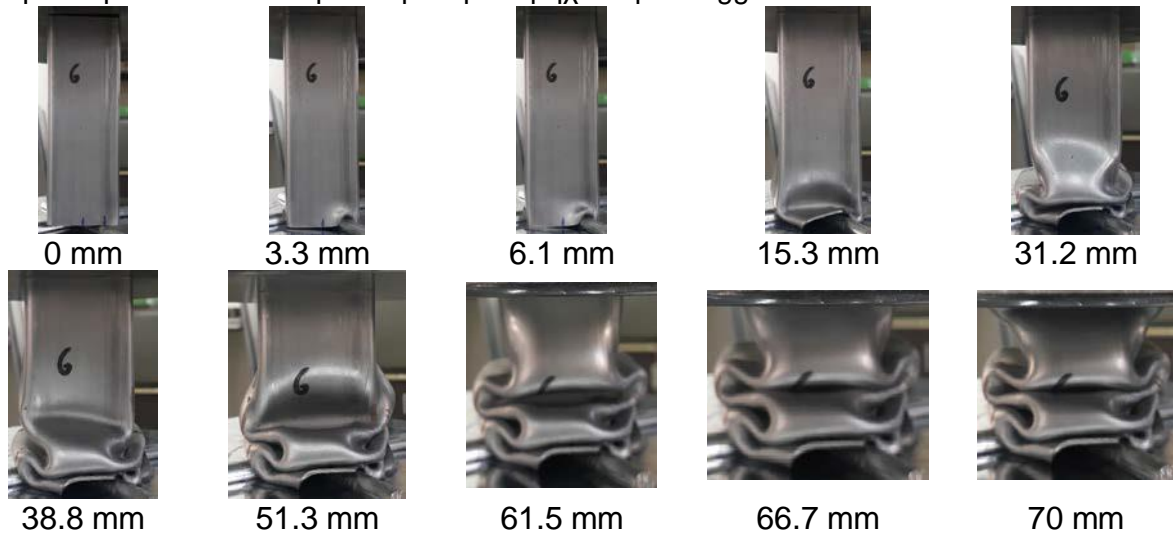


Διάγραμμα 2 Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο με μηχανισμό σταυροειδούς trigger με προσανατολισμό 0°

Η μάζα του δοκιμίου στο πείραμα μετρήθηκε 135,3 gr. Η μέγιστη δύναμη αντίδρασης (P_{max}) μετρήθηκε 40,39 kN και η μέση (P_{mean}) 24,77 kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου ήταν 1,7347 kJ, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 18,32 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE ήταν 0,6135.

6.2.2 Πειραματική δοκιμή με τοποθέτηση σταυροειδούς trigger σε προσανατολισμό 30°

Στο πείραμα δημιουργηθήκαν 4 μη-εκτατοί λοβοί μέχρι την μέγιστη βράχυνση των 70 mm. και παρατηρείται και μια τάση του δοκιμίου να συμπιέζεται με κατεύθυνση στην αριστερή πλευρά. Η δημιουργία του πρώτου λοβού όπως φαίνεται και από τις παρακάτω εικόνες ολοκληρώνεται κοντά στα 20 mm. Η δημιουργία των υπόλοιπων 2 λοβών ξεκινάει κοντά στα 40 mm και ολοκληρώνεται στα 65 mm. Αυτό οφείλεται στις γεωμετρικές ατέλειες του δοκιμίου οι οποίες έχουν προκύψει κατά την διαμόρφωση του χάλυβα, από την ύπαρξη συγκολλήσεων και από την επίδραση του μηχανισμού trigger.



Εικόνα 55 Στάδια παραμόρφωσης δοκιμίου χωρίς τη χρήση μηχανισμού trigger με προσανατολισμό 30°



Κάτοψη



Άνοψη

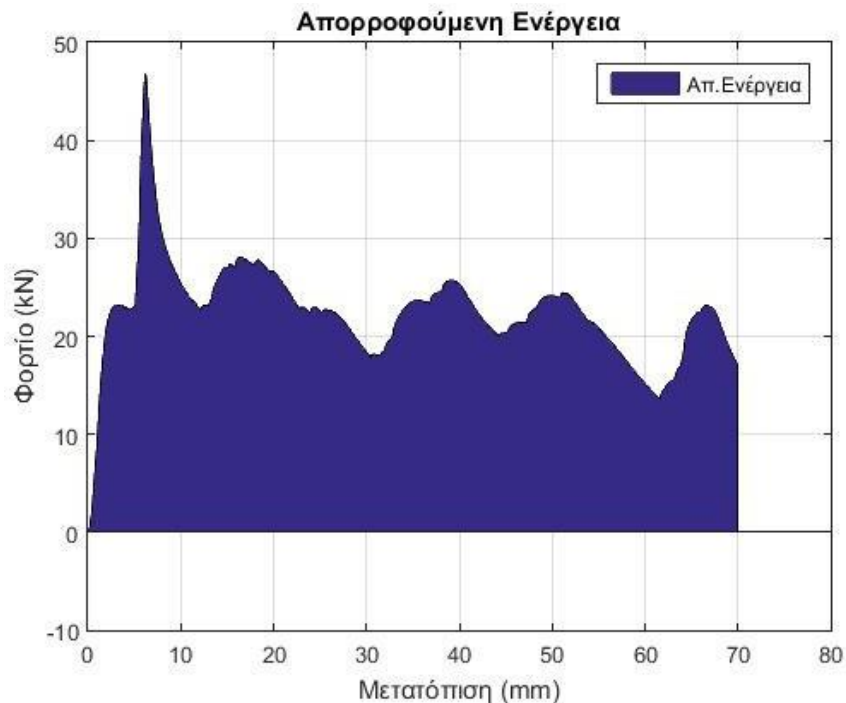


Πρόψη



Οπίσθια όψη

Εικόνα 56 Όψεις κατεστραμμένου δοκιμίου με χρήση μηχανισμού σταυροειδούς σκανδαλής με προσανατολισμό 30°



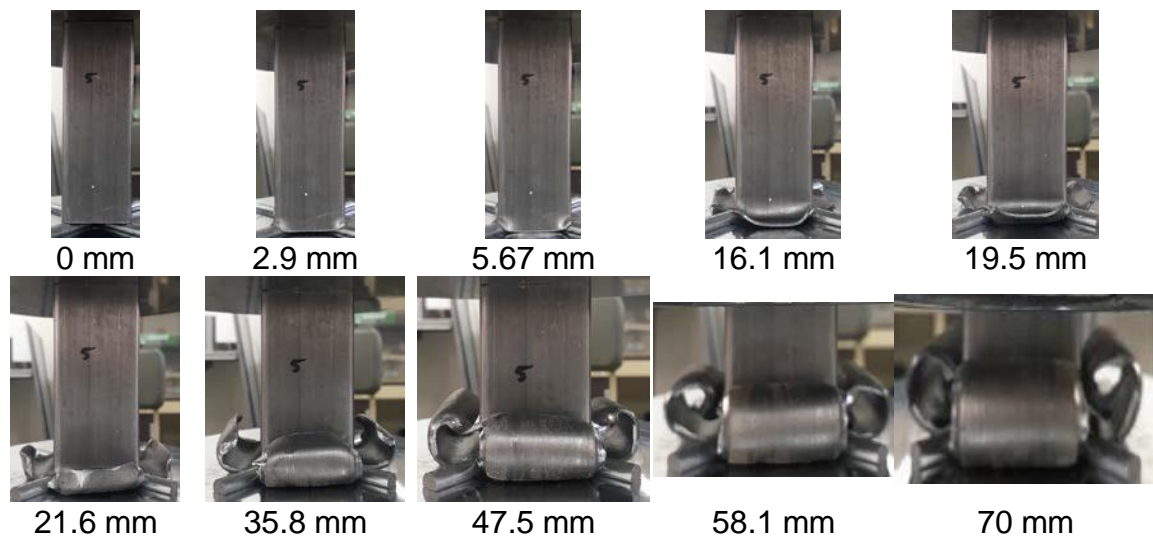
Εικόνα 57 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΣΤΑΥΡΟΕΙΔΟΥΣ ΣΚΑΝΔΑΛΗ ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ 30°

Η μάζα του δοκιμίου στο πείραμα μετρήθηκε 133,4 gr. Η μέγιστη δύναμη αντί-δρασης (P_{max}) μετρήθηκε 46,73 kN και η μέση (P_{mean}) 22,49 kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου ήταν 1,5752 kJ, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 16,86 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE ήταν 0,4815.

6.2.3 Πειραματική δοκιμή με τοποθέτηση σταυροειδούς trigger σε προσανατολισμό 45°

Στο πείραμα δεν δημιουργηθήκαν λοβοί και δεν είχαμε συμπίεση του δοκιμίου, αλλά όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε ότι το δοκίμιο ανοίγει

ομοιόμορφα στις 4 γωνίες υπό την επίδραση του μηχανισμού trigger και αναδιπλώνεται κάθε πλευρά ομοιόμορφα γύρω από τον εαυτό της, μέχρι την μέγιστη βράχυνση των 70 mm.



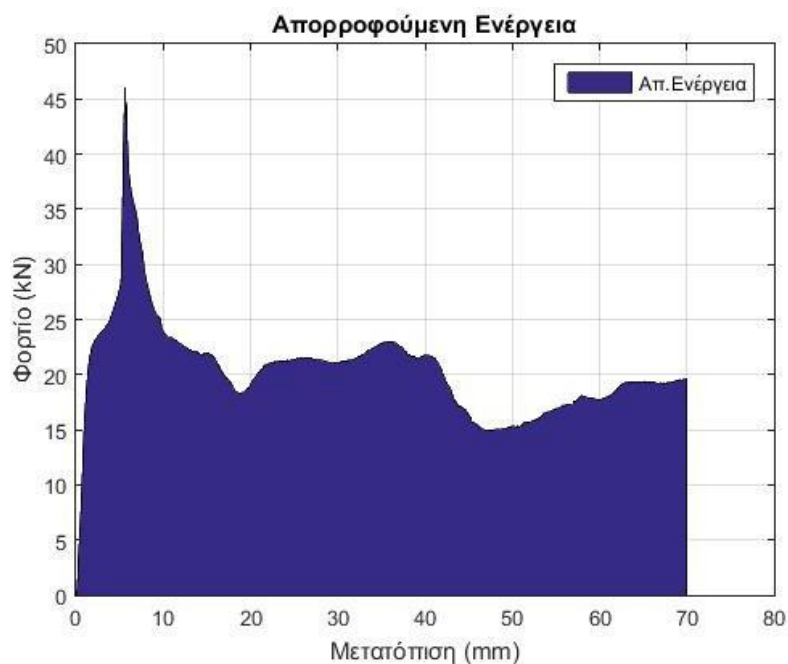
Εικόνα 58 Στάδια παραμόρφωσης δοκιμίου χωρίς τη χρήση μηχανισμού trigger με προσανατολισμό 45°

Η μάζα του δοκιμίου στο πείραμα μετρήθηκε 135,2 gr. Η μέγιστη δύναμη αντίδρασης (P_{max}) μετρήθηκε 46,03 kN και η μέση (P_{mean}) 20,47kN. Κατά την συμπίεση του κελύφους παρατηρείται παραμόρφωση περίπου μέχρι την μεταποίηση της πλάκας κατά 16mm, όπου και οι τάσεις ξεπερνούν τα όρια θραύσης και σημειώνεται απόσχιση των επιφανειών. Με την συμπίεση λόγω της συσσώρευσης τάσης η ρωγμή εξαπλώνεται η απόσχιση σχηματίζεται ψηλότερα από την άνω επιφάνεια του μηχανισμού trigger μειώνοντας και την δύναμη αντίδρασης, γεγονός που ξεκινά να σημειώνεται στα 40mm βύθισης. Στα 48mm το έλασμα όπως παραμορφώνεται συστρέφεται και ακουμπά το κέλυφος με αποτέλεσμα η περεταίρω συμπίεση του να απαιτεί περισσότερη ενέργεια ώστε να υπερνικηθεί η επαφή γεγονός που αποτυπώνεται στο διάγραμμα με αύξηση της δύναμης. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου ήταν 1,4341 kJ, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 15,15 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE ήταν 0,4449.





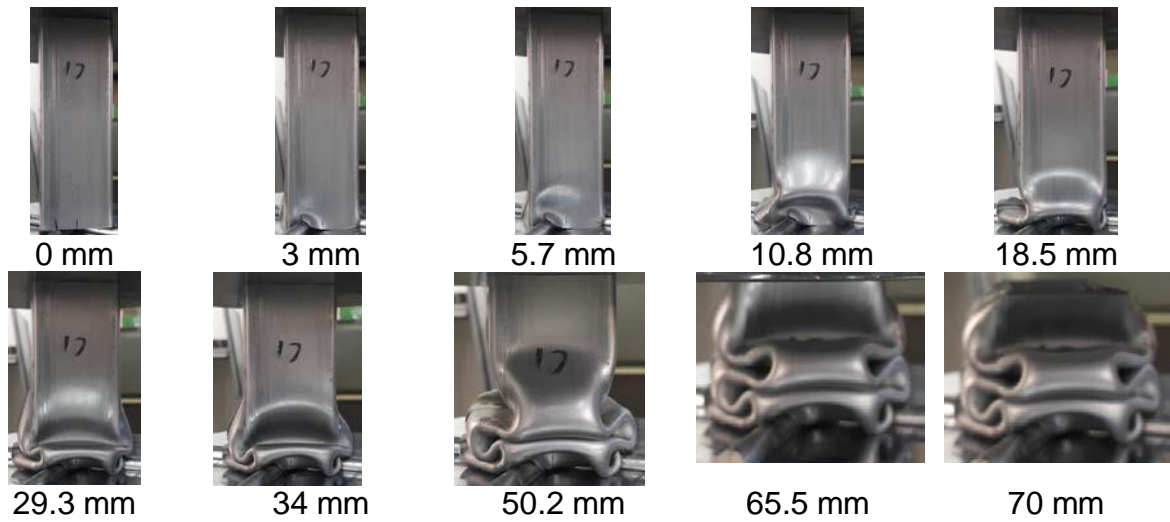
Εικόνα 59 Όψεις κατεστραμμένου δοκιμίου με χρήση μηχανισμού σταυροειδούς trigger με προσανατολισμό



Διάγραμμα 3 διαγραμμα απορροφουμενης ενεργειας-μετατοπισης για δοκιμιο με μηχανισμο σταυροειδους σκανδαλη με προσανατολισμο 45°

6.2.4 Πειραματική δοκιμή με τοποθέτηση σταυροειδούς trigger σε προσανατολισμό 60°

Στο πείραμα δημιουργηθήκαν 4 μη-εκτατοί λοβοί μέχρι την μέγιστη βράχυνση των 70 mm. Η δημιουργία του πρώτου λοβού όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εικόνες ολοκληρώνεται κοντά στα 30 mm. Η δημιουργία των υπόλοιπων 3 λοβών ξεκινάει κοντά στα 35 mm και ολοκληρώνεται στα 65 mm. Αυτό οφείλεται στις γεωμετρικές ατέλειες του δοκιμίου οι οποίες έχουν προκύψει κατά την διαμόρφωση του χάλυβα, από την ύπαρξη συγκολλήσεων και από την επίδραση του μηχανισμού trigger.



Εικόνα 60 Στάδια παραμόρφωσης δοκιμίου χωρίς τη χρήση μηχανισμού trigger με προσανατολισμό 60°



Κάτοψη



Άνοψη

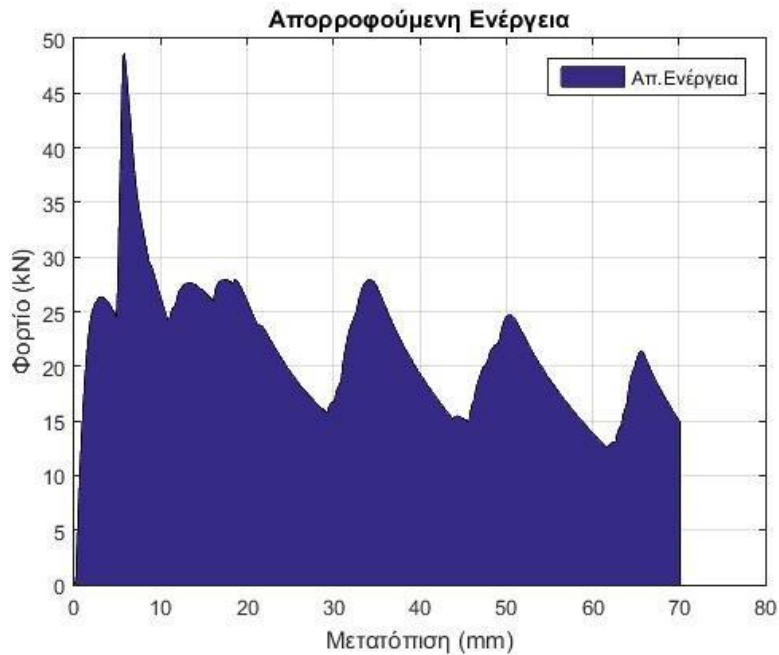


Πρόοψη



Οπίσθια όψη

Εικόνα 61 Όψεις κατεστραμμένου δοκιμίου με χρήση μηχανισμού σταυροειδούς σκανδαλής με προσανατολισμό 60°



Διάγραμμα 4 Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο με μηχανισμό σταυροειδούς trigger με προσανατολισμό 60°

Η μάζα του δοκιμίου στο πείραμα μετρήθηκε 133,8 gr. Η μέγιστη δύναμη αντίδρασης (P_{max}) μετρήθηκε 48,6 kN και η μέση (P_{mean}) 21,79 kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου ήταν 1,5287 kJ, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 16,32 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE ήταν 0,4483.

6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντελοποίησης με τα αποτελέσματα των πειραμάτων.

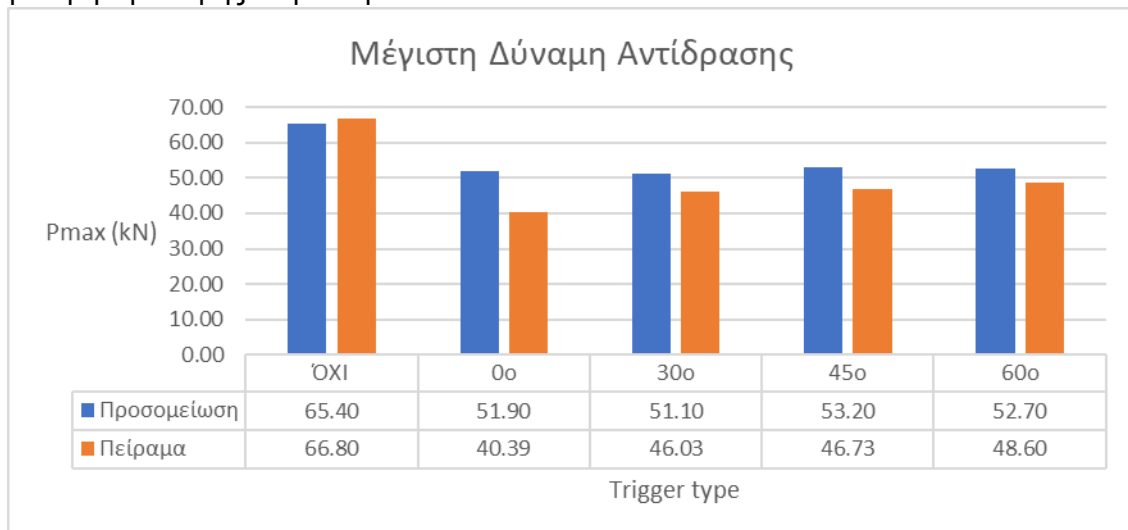
Στην εν λόγω ενότητα θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των προσομοιώσεων με τα πειραματικά δεδομένα από την εκτέλεση των καταστροφικών δοκιμών. Όπως είναι αναμενόμενο ο συσχετισμός και σύγκριση των παραπάνω οδηγεί στη σημείωση αποκλίσεων μεταξύ των αποτελεσμάτων κάθε κατηγορίας που οφείλτε σε πληθώρα παραγόντων βάσει πραγματικών φαινομένων και συνθηκών ή παραδοχών που τέθηκαν για την προσέγγιση της λύσης των προαναφερθέντων δοκιμών. Στόχος της αναλυτικής επεξήγησης των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι η επιστημονική συμπερασματολογία και η πρόταση του καλύτερου δυνατού συνδυασμού. Στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα έχουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και των πειραμάτων ώστε να πραγματοποιηθεί μια πρώτη σύγκριση μεταξύ τους και με το αρχικό δοκίμιο χωρίς μηχανισμό σταυροειδούς σκανδάλης ανά τους διαφορετικούς προσανατολισμούς που δοκιμάστηκαν.

Πίνακας 1 Συγκεντρωτικός πίνακας προσομοιώσεων και πειραματικών αποτελεσμάτων

Μηχανισμός trigger	Δοκιμή	Μάζα	Μέγιστη Δύναμη Αντίδρασης	Μέση Δύναμη Αντίδρασης	Ενέργεια απορρόφησης	Ειδική ενέργεια απορρόφησης	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου
Μονάδες		(gr)	Pmax (kN)	Pmean (kN)	Eabs (kJ)	SEA (J/gr)	CFE
OXI	Προσομείωση	142.9	65.40	24.39	1.71	11.97	0.37
	Πείραμα	135.4	66.80	24.38	1.71	18.05	0.37
0°	Προσομείωση	142.9	51.90	21.58	1.51	10.57	0.42
	Πείραμα	135.3	40.39	24.78	1.73	18.32	0.61
30°	Προσομείωση	142.9	51.10	18.14	1.27	8.89	0.35
	Πείραμα	135.2	46.03	20.48	1.43	15.15	0.44
45°	Προσομείωση	142.9	53.20	18.20	1.28	8.96	0.34
	Πείραμα	133.4	46.73	22.49	1.58	16.87	0.48
60°	Προσομείωση	142.9	52.70	21.18	1.53	10.71	0.40
	Πείραμα	133.8	48.60	21.79	1.53	16.32	0.45

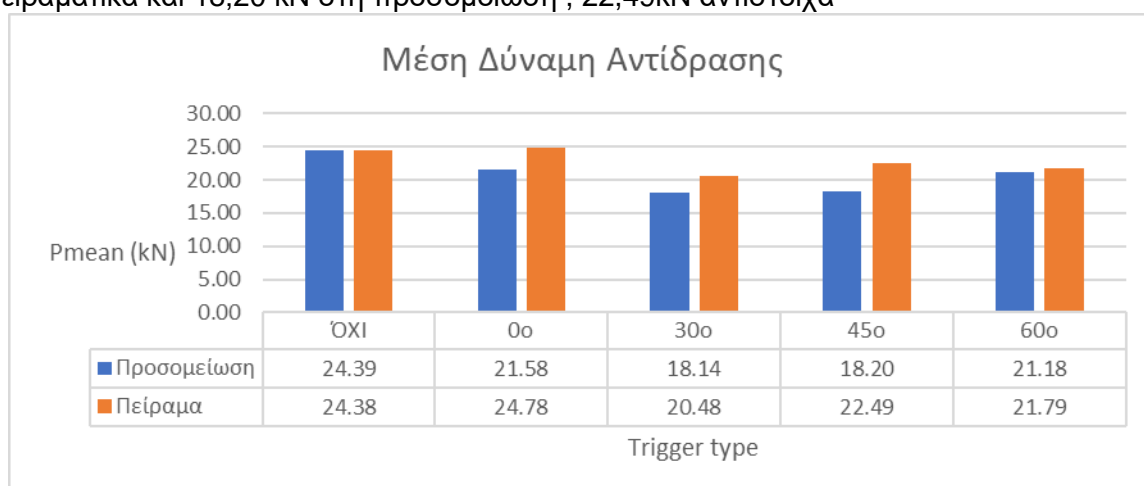
Αρχικά παρατηρούνται αρκετές αποκλίσεις ιδιαίτερα μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών προσομοιώσεων. Αυτό οφείλεται στις γεωμετρικές ατέλειες του δοκιμίου οι οποίες έχουν προκύψει κατά την διαμόρφωση του χάλυβα. Πιο συγκεκριμένα στο υπολογιστικό μοντέλο οι ακμές του κελύφους τετραγωνικής διατομής σχηματίζουν ιδανική γωνία 90°, ενώ στα πραγματικά κελύφη κατά την έλαση του φύλλου και την κάμψη του σχηματίζει ράδια στις εκάστοτε γωνίες αυξάνοντας την τοπική και συνολική δυσκαμψία και μεγαλύτερη αντοχή στις σχηματιζόμενες διατμητικές τάσεις που σημειώνονται κατά την φόρτιση. Οι ακμές θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως κολώνες αυξάνοντας την αντοχή του δοκιμίου σε λυγισμό. Επιπρόσθετα κατά την υπολογιστική προσομοίωση το υλικό θεωρείται ισόπαχο ισοτροπικό και ορθοτροπικό, απαλλαγμένο από ατέλειες και καταναγκασμούς, γεγονός που δεν συμβαίνει στη πραγματικότητα. Ακόμα για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του υλικού το πείραμα του εφελκυσμού δεν υλοποιήθηκε με δοκίμιο σύμφωνα με τις υποδείξεις κάποιου προτύπου και έλεγχος πραγματοποιήθηκε σε ένα μόνο δοκίμιο, γεγονός που αυξάνει τη πιθανότητα εκχώρησης δεδομένων στο υπολογιστικό μοντέλο με σφάλμα. Σημαντικός παράγοντας Επίσης έπειτα της έλασης του μεταλλικού φύλλου για την ένωση των δυο ακμών χρησιμοποιήθηκε μέθοδος συγκόλλησης. Το ίδιο το ηλεκτρόδιο δημιουργεί μια ζώνη διαφορετικών ιδιοτήτων και εισάγει ατέλειες, ενώ η μεταφορά θερμότητας δημιουργεί τη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη που δημιουργεί παραμένουσες τάσεις στα όρια αυτής. Επίσης το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων τέθηκε ίσο με το πάχος του ελάσματος, γεγονός που θα μπορούσε με πιθανή πύκνωση του μοντέλου να δημιουργήσει ρεαλιστικότερα αποτελέσματα σε συνδυασμό με τον έλεγχο σύγκλησης του μοντέλου. Κατά την μοντελοποίηση οι συνοριακές συνθήκες διαφέρουν από τις πραγματικές στα σημεία επαφής των πλακών της πρέσας με την επιφάνεια του δοκιμίου. Αναλυτικότερα στην πραγματικότητα όλο το πάχος του κελύφους πατά με την πλάκα της μηχανής θλίψης, ενώ στο μοντέλο επειδή το κάθε στοιχείο σχηματίζεται με τοξωτές ακμές κατά την κίνηση τα πλάκας οδηγεί σε περιστροφή του στοιχείου σχηματίζοντας ροπή και συνεπώς ευκολότερη και γρηγορότερη αστοχία. Παρακάτω ακολουθούν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα δεικτών για κάθε δοκιμή που πραγματοποιήθηκε.

Αρχίζοντας από την σύγκριση μέγιστης δύναμης αντίδρασης παρατηρούμε ότι και στη πειραματική και την υπολογιστική προσομοίωση η μη χρήση trigger σημειώνει μεγαλύτερη δύναμη, γεγονός αναμενόμενο δεδομένου ότι ο απαραμόρφωτος σταυρός δημιουργεί υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων διευκολύνοντας την αστοχία δηλαδή μειώνοντας το σχηματισμό μέγιστων δυνάμεων. Βέλτιστα αποτελέσματα σημειώνει η δοκιμή με το μηχανισμό trigger στη θέση 0° με σχηματισμό 40,39kN στο πειραματικό και 51,90 kN στη προσομοίωση. Καλύτερα αποτελέσματα από πλευράς προσομοίωσης σημειώνει η θέση του μηχανισμού trigger στις 30° με τη μέγιστη δύναμη να υπολογίζεται στα 51,10 kN, 1,5% μικρότερη τη δοκιμής στη θέση 0°.



Εικόνα 62 Ραυδόγραμμα Μέγιστης δύναμης αντίδρασης

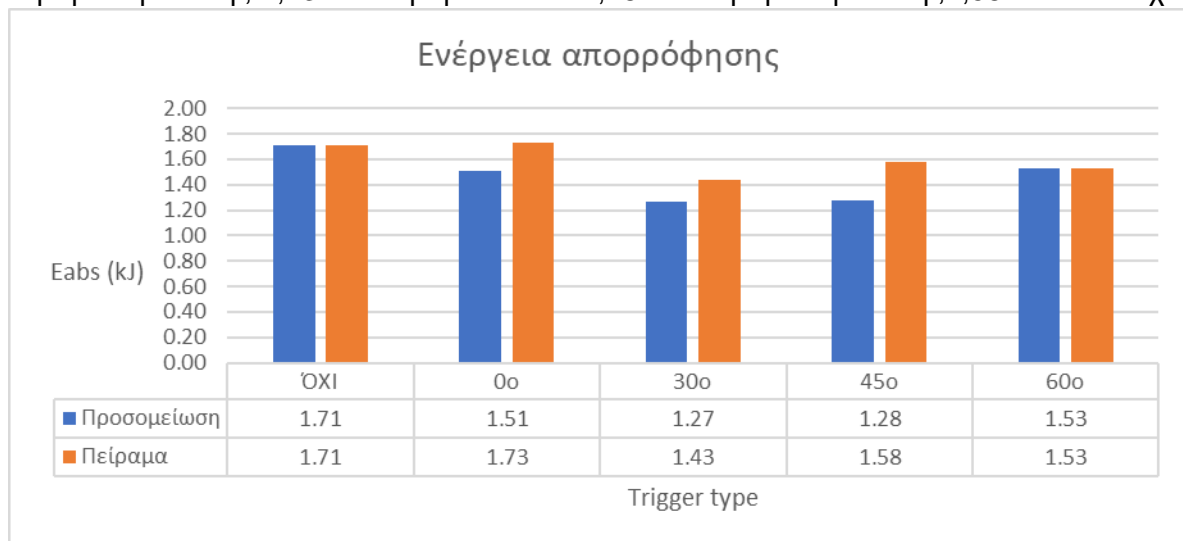
Και στη περίπτωση χωρίς μηχανισμό trigger το μέσο φορτίο είναι μεγαλύτερο σε σχέση με την ύπαρξη του, αποτέλεσμα που ενισχύει τον αρχικό σχεδιασμό για μείωση την καταπόνησης της κατασκευής προς προστασία. Πιο συγκεκριμένα σημειώνει τις μέγιστες τιμές ίσες με 24,39 kN στη προσομοίωση, 24,38 kN. Η θέση του μηχανισμού trigger στις 30° και τις 45° σημειώνει τα καλύτερα αποτελέσματα με 18,14 kN στη προσομοίωση , 20,48 kN πειραματικά και 18,20 kN στη προσομοίωση , 22,49kN αντίστοιχα



Εικόνα 63 ραυδογραμμα μέσησ δυναμης αντιδρασης

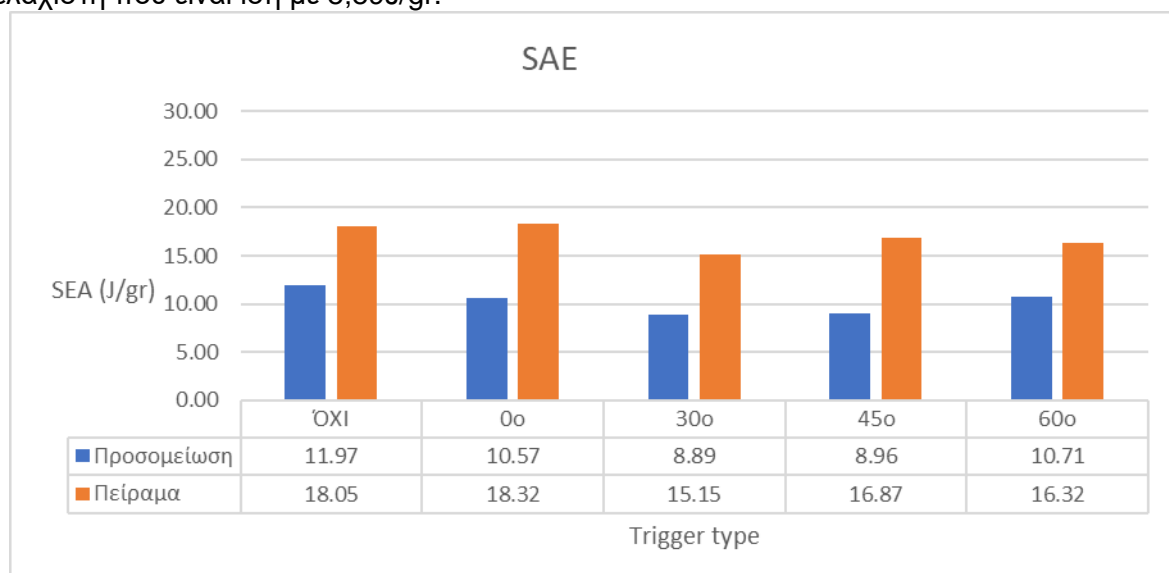
Ομοίως χωρίς μηχανισμό trigger το μέσο φορτίο είναι μεγαλύτερο ταυτόχρονα στα θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα, σημειώνοντας τις μέγιστες τιμές ίσες με 1,7kJ

Βέβαια η ενέργεια απορρόφησης είναι μέγιστη στο πειραματικό αποτέλεσμα με το μηχανισμό trigger στις 0° που είναι ίση με 1,73kJ , 1,1% μεγαλύτερη. Η θέση του μηχανισμού trigger στις 30° και τις 45° σημειώνει τα μικρότερα απ αποτελέσματα με 1,27 kN στη προσομοίωση , 1,43 kN πειραματικά και 1,28 kN στη προσομοίωση , 1,58kN αντίστοιχα



Εικόνα 64 Ραυδόγραμμα ενέργειας απορρόφησης

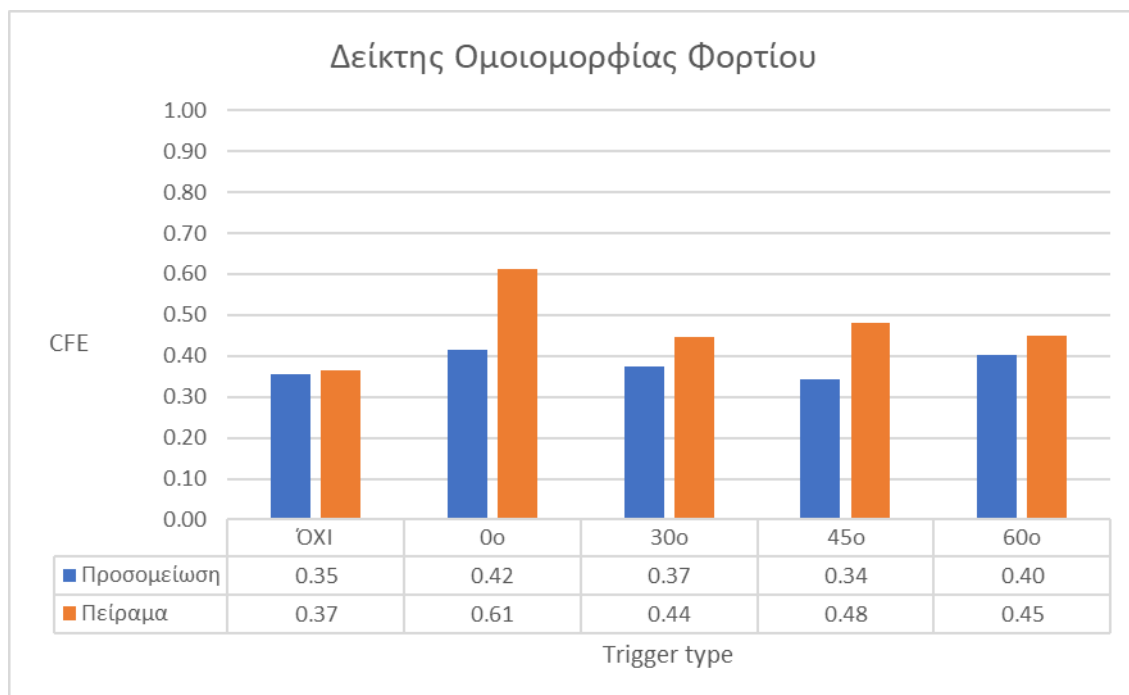
Κατά τον υπολογισμό κανονικοποιημένης ενέργειας απορρόφησης ανά μονάδα βάρους σημειώνεται σε όλες τις περιπτώσεις διαφοροποίηση στη μέτρηση του βάρους κάθε δοκιμίου. Τα αποτελέσματα αυτά ενισχύει την αρχική παρατήρηση περί ανομοιομορφίας της γεωμετρίας και των ιδιοτήτων των υλικών και συνεπώς και της πυκνότητας οπότε κρίνεται σκόπιμο να μη συσχετιστούν άμεσα τα πειραματικά με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Στις προσομοιώσεις που η γεωμετρία είναι ιδανική η δοκιμή χωρίς μηχανισμό trigger σημειώνει τη μέγιστη τιμή των 11,97 J/gr ενώ με τον προσανατολισμό trigger στις 30° σημειώνεται η ελάχιστη που είναι ίση με 8,89J/gr.



Εικόνα 65 Ραυδόγραμμα κανονικοποιημένης ενέργειας απορρόφησης

Αντίστοιχα στα πειραματικά στη δοκιμή χωρίς μηχανισμό trigger σημειώνει τη μέγιστη τιμή ίση με 18,05kJ/gr ενώ το δοκίμιο με το μηχανισμό trigger στις 30° σημειώνει την ελάχιστη τιμή 15,15 kJ/gr. Παρόλες τις παραδοχές και τις τροποποιήσεις και στα

πειραματικά και στη προσομοίωση το δοκίμιο με το μηχανισμό trigger στις 30° σημειώνει την ελάχιστη τιμή.



Εικόνα 66 Ραυδόγραμμα δείκτη ομοιομορφίας

Τέλος, ολοκληρώνουμε τη σύγκριση με τον υπολογισμό του δείκτη ομοιομορφίας. Σε όλες τις αναλύσεις τα πειραματικά αποτελέσματα σημειώνουν μεγαλύτερο δείκτη ομοιομορφίας από τις προσομοιώσεις. Χαμηλότερη τιμή σημειώνει και στις δυο περιπτώσεις στο δοκίμιο χωρίς μηχανισμό trigger, με CFE 0.35 στη προσομοίωση και CFE 0.37 ως αποτέλεσμα καταστροφικής δοκιμής. Τα δοκίμια με μηχανισμό trigger με προσανατολισμό 30° και 45° ακολουθούν με ενδιάμεσες τιμές λόγων ενώ με προσανατολισμό 0ο με CFE 0.42 στη προσομοίωση και CFE 0.61 ως αποτέλεσμα καταστροφικής δοκιμής

7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα από τις υπολογιστικές αναλύσεις καθώς και τις πειραματικές δοκιμές παρατηρούμε πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ των τελικών αποτελεσμάτων σε όλες τις διαφορετικές δοκιμές. Πιο συγκεκριμένα η προσθήκη μηχανισμού trigger με προσανατολισμό 0° σημειώνει τα καλύτερα αποτελέσματα δεδομένου ότι σημειώνει την μικρότερη μέγιστη δύναμη καθώς και τη μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας. Επίσης οι δείκτες κανονικοποιημένης ενέργειας απορρόφησης και ομοιομορφίας τόσο και στην προσομοίωση και στα πειραματικά αποτελέσματα σημειώνουν μέγιστες τιμές για την δοκιμή. Το μέσο φορτίο είναι υψηλότερο δεδομένης της μεγαλύτερης ενέργεια απορρόφησης. Από πλευρά επιδόσεων ακολουθούν οι δοκιμές χωρίς μηχανισμό trigger και έπονται οι δοκιμές με την προσθήκη μηχανισμού trigger σε άλλους προσανατολισμούς. Ακόμα και στην περίπτωση που σημειώνεται σχίσσιμο του δοκιμίου δεν σημειώνονται αποτελέσματα που να κυριαρχούν των άλλων δοκιμών.

Οι κυριότερες αιτίες απόκλισης πειράματος και υπολογιστικού μοντέλου κατά κύριο λόγο οφείλονται σε εξιδανίκευση του υπολογιστικού μοντέλου το οποίο θεωρήθηκε ότι σημειώνει ιδανική γεωμετρία με καθαρές επιφάνειες και τέλειες ορθές γωνίες. Επίσης το υλικό του κελύφους θεωρείται ιδανικό ισότροπο ομοιογενειές με σταθερές μηχανικές ιδιότητες καθώς και το υλικό των πλακών και του μηχανισμού trigger απόλυτα απαραμόρφωτο. Βεβαίως παρόλες τις ιδεατές παραδοχές τα δεδομένα που περιγράφουν την μηχανική συμπεριφορά των ιδιοτήτων του κελύφους προέρχονται από μη πρότυπη καταστροφική δοκιμή μόνο ενός δοκιμίου εφελκυσμού, γεγονός που εισάγει σφάλμα και εξηγεί διαφοροποίηση υπολογιστικών σε σχέση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Για να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η υπολογιστική προσομοίωση οι περιοχές με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες όπως η μηχανικές ιδιότητες υλικού θερμικά επηρεασμένη ζώνη συγκόλλησης καθώς και οι ακμές κάμψης των ελασμάτων για τη δημιουργία του κελύφους είναι απαραίτητο να μοντελοποιηθούν. Τέλος οι πειραματικές δοκιμές προκειμένου να εξάγουν γενικευμένα αποτελέσματα είναι καλό να επαναληφθούν περισσότερες φορές ώστε να γενικευθούν μέσω στατιστικών κατανομών στο γενικό πληθυσμό.

Από τα παραπάνω μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι το αντικείμενο της εν λόγω εργασίας σηματοδοτεί πολλές δυνατότητες για βελτίωση και περαιτέρω έρευνα. Αρχικά όπως προαναφέρθηκε στην παραπάνω παράγραφο η λεπτομερέστερη και πιο κοντά στην πραγματικότητα μοντελοποίηση του κελύφους προσομοιάζοντας της θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και τη υπάρχουσα πλαστική παραμόρφωση για το σχηματισμό του κελύφους. Διαφορετικοί μηχανισμοί triggering και μεγαλύτερη ποικιλία διατομών είτε ως προς τις διαστάσεις είτε ως προς τη γεωμετρία μπορούν να δοκιμαστούν και να συγκριθούν με τα εν λόγω αποτελέσματα. Πέραν της γεωμετρίας διαφορετικά υλικά μπορούν να ελεγχθούν όπως κράματα αλουμινίου, πολυμερή και σύνθετα υλικά. Τέλος, η μοντελοποίηση του φαινομένου μπορεί προσομοιωθεί είτε πειραματικά είτε υπολογιστικά σε συνθήκες δυναμικής ή και κρουστικής μεταβολής των φορτίων

Βιβλιογραφία

- [1] N. Sharp, «Timed running speed of a cheetah (*Acinonyx jubatus*),» *Journal of Zoology*, τόμ. 241, pp. 493-494, 1997.
- [2] J. Usherwood και A. Wilson , «Biomechanics: no force limit on greyhound sprint speed,» *Nature*, αρ. 438, pp. 753-754, 2005.
- [3] M. Goto, M. Kawai, M. Nakata, K. Itamoto, H. Miyata και Y. Ikebe, «Distribution of muscle fibers in skeletal muscles of the cheetah (*Acinonyx jubatus*),» *Mammalian Biology*, τόμ. 78, pp. 127-133, 2013.
- [4] J. Macpherson και Y. Ye, «The cat vertebral column: stance configuration and range of motion,» *Experimental Brain Research*, τόμ. 119, pp. 324-332, 1998.
- [5] L. D. Maes, M. Herbin, R. Hackert , V. L. Bels και A. Abourachid, «Steady locomotion in dogs: temporal and associated spatial coordination patterns and the effect of speed,» *Journal of Experimental Biology*, αρ. 211, pp. 138-149, 2008.
- [6] P. E. Hudson, S. A. Corr και A. M. Wilson, «High speed galloping in the cheetah (*Acinonyx jubatus*) and the racing greyhound (*Canis familiaris*): spatio-temporal and kinetic characteristics,» *The Journal of Experimental Biology*, τόμ. 215, pp. 2425-2434, 2012.
- [7] P. E. Hudson, S. A. Corr, R. C. Payne-Davis, S. N. Clancy, E. Lane και A. M. Wilson, «Functional anatomy of the cheetah (*Acinonyx jubatus*) forelimb,» *Journal of Anatomy*, τόμ. 218, pp. 375-385, 2011.
- [8] P. E. Hudson, S. A. Corr, R. C. Payne-Davis, S. N. Clancy, E. Lane και A. M. Wilson, «Functional anatomy of the cheetah (*Acinonyx jubatus*) hindlimb,» *Journal of Anatomy*, τόμ. 218, pp. 363-374, 2011.
- [9] M. Hildebrand, «Motions of the Running Cheetah and Horse,» *Journal of Mammalogy*, τόμ. 40, αρ. 4, pp. 481-495, 1959.
- [10] M. Hildebrand, «Further studies on locomotion of the cheetah,» *Journal of Mammalogy*, τόμ. 42, αρ. 1, pp. 84-91, 1961.
- [11] N. Schilling και R. Hackert, «Sagittal spine movements of small therian mammals during asymmetrical gaits,» *Journal of Experimental Biology*, τόμ. 209, pp. 3925-3939, 2006.
- [12] R. Alexander, «Why mammals gallop,» *Am. Zool.*, τόμ. 28, pp. 237-245, 1988.
- [13] R. M. Alexander, N. J. Dimery και R. F. Ker, «Elastic structures in the back and their role in galloping in some mammals,» *J. Zool. Lond.*, αρ. 207, pp. 467-482, 1985.
- [14] C. Taylor, «Why change gaits? Recruitment of muscles and muscle fibres as a function of speed and gait,» *Am. Zool.*, τόμ. 18, pp. 153-161, 1978.
- [15] G. A. Cavagna, N. C. Heglund και C. R. Taylor, «Mechanical work in terrestrial locomotion: two basic mechanisms for minimizing energy expenditure.,» *Am. J. Physiol.*, τόμ. 233, pp. 243-261, 1977.
- [16] A. W. English, «The functions of the lumbar spine during stepping in the cat,» *Journal of Morphology*, τόμ. 165, pp. 55-66, 1980.
- [17] Maxon, «Maxon section program,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/msp>.
- [18] S. Cotton, I. M. C. Olaru, M. Bellman, T. van der Ven, J. Godowksi και J. Pratt, «Fastrunner: A fast, efficient and robust bipedal robot. Concept and planar simulation,» σε *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.
- [19] A. Ananthanarayanan, M. Azadi και S. Kim, «Towards a bio-inspired leg design for high-speed

- running,» *Bioinspiration & Biomimetics*, τόμ. Vol. 7, αρ. No. 4, 2012.
- [20] Maxon, «Maxon motor selection,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/msp>.
- [21] M. Motors, «Motor data key information,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/catalog>.
- [22] A. Ananthanarayanan, M. Azadi και S. Kim, «Towards a bio-inspired leg design for high-speed running,» *Bioinspir. Biomim*, τόμ. 7, 2012.
- [23] S. Seok, A. Wang, C. Y. D. Otten, J. Lang και S. Kim, «Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT cheetah robot,» σε *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2013.
- [24] J. McKenzie, «Design of Robotic Quadruped Legs,» 2012.
- [25] G. Hickman, «The mammalian tail: a review of functions,» *Mammal Review*, 1979.
- [26] K. Takita, R. Hodoshima και S. Hirose, «Fundamental mechanism of dinosaur-like robot TITRUS-II utilizing coupled drive,» σε *Proceedings 2000 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2000.
- [27] A. Jusufi, «Righting and turning in mid-air using appendage inertia: reptile tails, analytical models an bio-inspired robots,» *Bioinspiration & biomimetics*, τόμ. 5, αρ. 4, 2010.
- [28] J. Aaron, «Tail assisted dynamic self-righting,» σε *Proceedings of the Fifteenth Int Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Baltimore, MD, 2012.
- [29] N. J. Kohut, «Precise dynamic turning of a 10 cm legged robot on a low friction surface using a tail,» σε *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2013.
- [30] C. Fisher και A. Patel, «FlipBot: A Lizard Inspired Stunt Robot,» σε *Preparation of Papers for IFAC Conferences & Symposia*, 2014.
- [31] A. De, A. M. Johnson και D. E. Koditschek, «Monopedal Hopping with a Leg and a Tail».
- [32] F. J. Berenguer και F. M. Monasterio-Huelin, «Zappa, a quasi-passive biped walking robot with a tail: Modeling, behavior, and kinematic estimation using accelerometers,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55.9, pp. 3281-3289, 2008.
- [33] S. Jensen-Segal, S. Virost και W. R. Provancher, «ROCR: Dynamic vertical wall climbing with a pendular two-link mass-shifting robot,» σε *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2008.
- [34] R. Briggs, M. Haberland, S. Kim και J. Lee, «Tails in biomimetic design: Analysis, simulation, and experiment,» σε *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2012.
- [35] E. H. S. Chang-Siu, *A Tale of a Tail*, UC Berkeley: Mechanical Engineering, 2013.
- [36] N. Cherouvim και E. Papadopoulos, «Speed Control of Quadrupedal Bounding Using a Reaction Wheel,» σε *IEEE Int. Conf. on Control Applications, (CCA '06)*, Technische Universität München, Munich, Germany, October 4-6, 2006.
- [37] C. Casarez, I. Penskiy και S. Bergbreiter, «Using an inertial tail for rapid turns on a miniature legged robot,» σε *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2013.
- [38] C. Schmidt-Wetekam και T. Bewley, «An arm suspension mechanism for an underactuated single legged hopping robot,» σε *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2011.
- [39] «<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-hardware/fast-running-biped-robot-based-on-velociraptor>,» [Ηλεκτρονικό].
- [40] A. M. Bloch, *Nonholonomic mechanics and control (Vol. 24)*, Springer Science & Business Media, 2003.
- [41] A. De Luca και G. Oriolo, *Modelling and control of nonholonomic mechanical systems (pp. 277-342)*, Vienna: Springer , 1995.

- [42] K. Machairas και E. Papadopoulos, «On Quadruped Attitude Dynamics and Control Using Reaction Wheels and Tails,» σε *Proc. of the European Control Conference*, Johannes Kepler University, Linz, Austria, July 15-17, 2015.
- [43] K. Machairas και E. Papadopoulos, «On Attitude Dynamics and Control of Legged Robots Using Tail-Like Systems,» σε *ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics*, Barcelona, Catalonia, Spain, 2015.
- [44] R. M. Alexander και A. Vernon, «The mechanics of hopping by kangaroos (Macropodidae),» *Journal of Zoology*, τόμ. 177, pp. 265-303, 1975.
- [45] J. G. Zeglin, Uniroo: A One Legged Dynamic Hopping Robot, Massachusetts Institute of Technology, Mechanical Engineering. Department, 1991.