



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Δ.Π.Μ.Σ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΝΑΝΤΙ
ΚΡΟΥΣΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΔΟΜΩΝ
ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ
ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ**

ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Μανωλάκος Δημήτριος, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2024

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη του φαινομένου των κρουστικών καταπονήσεων είναι ένας σημαντικός τομέας της μηχανικής λόγω της επίδρασης που έχει στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων. Με εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, τις μεταφορές και την συγκοινωνιολογία, είναι λογικό ότι η ανάπτυξη δομών απορρόφησης ενέργειας από συγκρούσεις που προσφέρουν ασφάλεια στους χρήστες είναι εξαιρετικά σημαντική.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσπάθεια αποτίμησης της συμπεριφοράς χαλύβδινων δομών έναντι κρούσης, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς προσανατολισμούς τετραγωνικών σωληνωτών διατομών. Ακόμα, στόχος αυτής της έρευνας είναι να αναπτύξει μια νέα προσέγγιση που θα συμβάλλει πιο αποτελεσματικά στην απορρόφηση ενέργειας. Αυτό θα επιτευχθεί με τη μελέτη της συμπεριφοράς διαφορετικών συνδυασμών χαλύβδινων τετραγωνικών σωλήνων υπό κρούση, την προσομοίωση με υπολογιστικά μοντέλα και τη σύγκριση των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων. Οι προσομοιώσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και το πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Εκεί χρησιμοποιήθηκε ο κατάλληλος εξοπλισμός για την κατασκευή των δοκιμίων, τη στατική και δυναμική φόρτισή τους και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας, πραγματοποιείται αρχικά μια ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, με αναφορές σε ιστορικά στοιχεία και τις εφαρμογές των ενεργειακών απορροφητών. Επίσης, γίνεται επεξήγηση του φαινομένου της κρούσης με μαθηματικούς όρους, καθώς και των δεικτών αξιολόγησης αντοχής δομών έναντι κρουστικών καταπονήσεων (δείκτες crashworthiness).

Στο πειραματικό μέρος όπου είναι και το κύριο μέρος της εργασίας αρχικά γίνεται παρουσίαση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε στο εργαστήριο. Ακολουθεί η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων και στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία μοντελοποίησης για την προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία, μαζί με τα υπολογιστικά αποτελέσματα. Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων, τα οποία σχολιάζονται.

Καταλήγοντας, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μία από τις τέσσερις δομές που κατασκευάστηκαν αποδίδει ικανοποιητικά. Παρ' όλα αυτά όμως, ενώ οι διατάξεις της προσομοίωσης με τα πειράματα δεν φάνηκε να έχουν μεγάλες διαφορές μετά την κρούση, τα αριθμητικά αποτελέσματα φανέρωναν σε αρκετές περιπτώσεις το αντίθετο. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται περαιτέρω έρευνα, καθώς τα γενικά αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά. Πιθανές τροποποιήσεις σε μεθόδους και μεγαλύτερη επαναληψιμότητα θα μπορούσαν να βελτιώσουν την αξιοπιστία της έρευνας.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CHEMICAL ENGINEERING
I.I.P.P. “MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY”

Master Thesis

**OPTIMIZATION OF CRASHWORTHINESS
CAPABILITY OF STRUCTURES FORMED BY
COMBINING THIN-WALLED SQUARE TUBES**

STERGIOU DIMITRIOS

Supervisor: Professor Dimitrios Manolakos

ATHENS

JUNE 2024

ABSTRACT

The study of the phenomenon of impact loading is an important field of engineering due to its impact on people's daily lives. With applications in the automotive industry, transportation, and traffic engineering, it is logical that the development of structures that absorb energy from collisions and provide safety to users is extremely important.

The purpose of this thesis is to evaluate the behavior of steel structures under impact, using different orientations of square tubular sections. Additionally, the aim of this research is to develop a new approach that will contribute more effectively to energy absorption. This will be achieved by studying the behavior of different combinations of steel square tubes under impact, simulating them with computational models, and comparing the experimental and theoretical results. The simulations using the finite element method, as well as the experimental part of the thesis, were carried out at the Manufacturing Technology Laboratory of the National Technical University of Athens. There, the appropriate equipment was used for the construction of the specimens, their static and dynamic loading, and the extraction of the measurement results.

In the theoretical part of the thesis, a literature review is initially conducted, with references to historical data and the applications of energy absorbers. Additionally, the phenomenon of impact is explained in mathematical terms, as well as the indices for evaluating the crashworthiness of structures.

In the experimental part, which is also the main part of the thesis, the process followed in the laboratory is initially presented. This is followed by the presentation of the experimental results, and then the modeling process for finite element simulation is described, along with the computational results. Finally, a comparison is made between the experimental and computational results, which are then discussed.

In conclusion, the results show that one of the four constructed structures performs satisfactorily. Nevertheless, while the configurations of the simulation and the experiments did not seem to have significant differences after the impact, the numerical results often indicated otherwise. In any case, further research is required as the overall results were encouraging. Possible modifications to methods and greater repeatability could improve the reliability of the research.

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής

Επιβλέπων:

Δημήτριος Μανωλάκος, καθηγητής

Μέλη Επιτροπής:

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της φοίτησής μου στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών». Αποτελεί μέρος της ερευνητικής εργασίας του εργαστηρίου του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν και όλες οι πειραματικές δοκιμές.

Ολοκληρώνοντας έτος την παρούσα εργασία και τον κύκλο των μεταπτυχιακών σπουδών μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν με την πολύτιμη βοήθειά τους.

Αρχικά, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου, Δημήτριο Μανωλάκο που μου έδωσε την ευκαιρία να συμμετάσχω στην ερευνητική εργασία, να κατανοήσω εις βάθος το θέμα της εργασίας αλλά και να πάρω μια μικρή αλλά πολύτιμη για εμένα εμπειρία στο εργαστήριο της Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες, θα ήθελα να εκφράσω και για τον κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο (ΕΔΠ), για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων και τη διαδικασία της προσομοίωσης με υπολογιστικό μοντέλο. Ακόμα, οφείλω να ευχαριστήσω τον Κωνσταντίνο Κερασιώτη, για τη συνεργασία μας στο εργαστήριο, κατά την προετοιμασία των δοκιμών και την πραγματοποίηση των πειραματικών δοκιμών. Και οι δύο, πάντα με χιούμορ και καλή διάθεση, συνέβαλαν σε μια εξαιρετική συνεργασία.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή και συνεργάτη μου, Γιώργο Ασπιώτη, καθώς η συνεργασία μας στο πλαίσιο συγγραφής των μεταπτυχιακών εργασιών μας την τελευταία χρονιά συνέβαλε τα μέγιστα στο να κάνω ένα νέο φίλο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά και τους φίλους μου, που με στήριξαν σε όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου και στη διάρκεια της τελικής φάσης που ήταν η συγγραφή της διπλωματικής μου εργασίας.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	III
ABSTRACT	V
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	VII
Περιεχόμενα.....	VIII
Πίνακας Εικόνων	X
Πίνακας Διαγραμμάτων	XIII
Πίνακας Σχημάτων	XV
Κατάλογος Πινάκων	XVI
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Σημασία της αντοχής δομών έναντι κρούσης.....	1
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	2
2.1 Ιστορική Αναφορά.....	2
2.2 Εφαρμογές.....	3
3. Θεωρητικό Πλαίσιο	5
3.1 Χάλυβας.....	5
3.2 Θεωρία της Κρούσης.....	7
3.3 Δείκτες Crashworthiness	8
3.4 Είδη Παραμορφώσεων.....	11
3.5 Ενεργό Μήκος Λοβών.....	14
3.6 Πλευρική Φόρτιση.....	17
3.7 Σύνθετες Δομές	18
4. Πειραματική Διαδικασία	20
4.1 Δοκίμια	20
4.2 Μηχανήματα και Διαδικασία	22
5. Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών	33
5.1 Στατική Φόρτιση.....	33
5.2 Δυναμική Φόρτιση	41
6. Προσομοίωση Πειραματικού Προγράμματος με LS-Dyna.....	47
6.1 Δημιουργία Δοκιμών.....	47
6.2 Καθορισμός Οριακών Συνθηκών.....	48
6.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης	55
6.3.1 Δοκίμιο S0_D	55
6.3.2 Δοκίμιο S30_D	60
6.3.3 Δοκίμιο S45_D	65

6.3.4	Δοκίμιο S90_D	70
7.	Σύγκριση & Συμπεράσματα.....	75
7.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντελοποίησης με τα αποτελέσματα των πειραμάτων 75	
7.2	Συμπεράσματα	78
8.	Βιβλιογραφία.....	79

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 2 . 1 . 1: Ο Πύργος του Άιφελ σε Πρώιμη Κατασκευαστική Φάση	2
Εικόνα 2 . 1 . 2: Η Γέφυρα του Μπρούκλιν σε Πρώιμη Κατασκευαστική Φάση	3
Εικόνα 2 . 1 . 3: Ζώνες Παραμόρφωσης (Crumple Zones)	4
Εικόνα 3 . 1 . 1: Χάλυβας Οπλισμού Σκυροδέματος σε Ευθύγραμμες Ράβδους	5
Εικόνα 3 . 1 . 2: Διάφορες Διατομές Χάλυβα	6
Εικόνα 3 . 4 . 1: Εκτατοί Λοβοί	12
Εικόνα 3 . 4 . 2: Μη Εκτατοί Λοβοί	12
Εικόνα 3 . 4 . 3: Λυγισμός	13
Εικόνα 4 . 1 . 1: Μεμονωμένα Δοκίμια Χάλυβα	22
Εικόνα 4 . 1 . 2: Δομές για δοκιμή επιβολής θλιπτικού φορτίου	22
Εικόνα 4 . 2 . 1: Διαδικασία κοπής δοκιμίων με ηλεκτρικό πριόνι	23
Εικόνα 4 . 2 . 2: Μηχανική Πρέσα Instron 4482	23
Εικόνα 4 . 2 . 3: Χρήση αρπαγών για εφελκυστικές δοκιμές	24
Εικόνα 4 . 2 . 4: Πίνακας ελέγχου Instron 4482	25
Εικόνα 4 . 2 . 5: : Πειραματικές Διατάξεις Δοκιμίων Χάλυβα (S45_S & S30_S) για στατική φόρτιση.....	26
Εικόνα 4 . 2 . 6: : Πειραματικές Διατάξεις Δοκιμίων Χάλυβα (S0_S & S90_S) για στατική φόρτιση.....	26
Εικόνα 4 . 2 . 7: Μεμονωμένο δοκίμιο S-A υπό πλευρική δυναμική καταπόνηση	28
Εικόνα 4 . 2 . 8: Μεμονωμένο δοκίμιο S-A υπό πλευρική δυναμική καταπόνηση	29
Εικόνα 4 . 2 . 9: Σφύρα	30
Εικόνα 4 . 2 . 10: Οθόνη καταγραφής αποτελεσμάτων & Εκτυπωτής Hameg HM 8143-2	31
Εικόνα 4 . 2 . 11: Δοκίμιο Δυναμικής Φόρτισης (T3)	31
Εικόνα 4 . 2 . 12: Δομές για δοκιμή επιβολής θλιπτικού φορτίου	32
Εικόνα 5 . 1 . 1: S0_S μετά την κατάρρευση.....	34
Εικόνα 5 . 1 . 2: S30_S μετά την κατάρρευση.....	36
Εικόνα 5 . 1 . 3: S45_S μετά την κατάρρευση.....	38
Εικόνα 5 . 1 . 4: S90_S μετά την κατάρρευση.....	40
Εικόνα 5 . 2 . 1: Δοκίμιο S90_D (T2) μετά την κρούση.....	41
Εικόνα 5 . 2 . 2: Δοκίμιο S90_D (T3) μετά την κρούση.....	42
Εικόνα 5 . 2 . 3: Δοκίμιο S0_D μετά την κρούση.....	43
Εικόνα 5 . 2 . 4: Δοκίμιο S30_D μετά την κρούση.....	44

Εικόνα 5 . 2 . 5: Δοκίμιο S45_D μετά την κρούση.....	45
Εικόνα 6 . 1 . 1: Δομή πριν την προσομοίωση κρούσης.....	47
Εικόνα 6 . 2 . 1: Δημιουργία Shell Section για τα σωληνωτά δοκίμια	48
Εικόνα 6 . 2 . 2: Δημιουργία Solid Section: plup για τη σφύρα και pldn για την απαραμόρφωτη κάτω πλάκα	48
Εικόνα 6 . 2 . 3: Ορισμός υλικού (χάλυβα) για τις διατομές	49
Εικόνα 6 . 2 . 4: Ορισμός υλικού και βαθμών ελευθερίας για σφύρα	49
Εικόνα 6 . 2 . 5: Ορισμός υλικού και βαθμών ελευθερίας για απαραμόρφωτη κάτω πλάκα	50
Εικόνα 6 . 2 . 6: Δημιουργία σετ αποτελούμενα από τα επιμέρους parts (ορθογωνικές σωληνωτές διατομές).....	50
Εικόνα 6 . 2 . 7: Αντιστοίχιση των στοιχείων κελυφωτής διατομής (shell section) με τα στοιχεία των δοκιμίων (parts) και το υλικό (material).....	51
Εικόνα 6 . 2 . 8: Αντιστοίχιση του στοιχείου της σφύρας (plup) με το υλικό (rigid material) και τη διατομή (solid section).....	51
Εικόνα 6 . 2 . 9: Αντιστοίχιση του στοιχείου της κάτω πλάκας (pldn) με το υλικό (rigid material) και τη διατομή (solid section).....	51
Εικόνα 6 . 2 . 10: Ορισμός ιδιοτήτων διεπιφανειών δομής-σφύρας και δομής-κάτω πλάκας.....	52
Εικόνα 6 . 2 . 11: Ορισμός ιδιοτήτων αλληλεπίδρασης διεπιφανειών εσωτερικά της δομής.....	52
Εικόνα 6 . 2 . 12: Απόδοση ταχύτητας πτώσης σφύρας από ύψος 1.5 m.....	53
Εικόνα 6 . 2 . 13: Ορισμός χρόνου τερματισμού κρουστικής δοκιμής στα 40 ms	53
Εικόνα 6 . 2 . 14: Επιλογή μοντέλου Hourglass	54
Εικόνα 6 . 2 . 15: Εντολές για διαγράμματα Φορτίου – Χρόνου και Μετατόπισης – Χρόνου.....	54
Εικόνα 6 . 3 . 1 . 1: Δοκίμιο S0_D.....	55
Εικόνα 6 . 3 . 1 . 2: Πρόσωση και πλάγια όψη δοκιμίου S0_D	55
Εικόνα 6 . 3 . 1 . 3: Πρόσωση δοκιμίου S0_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης	56
Εικόνα 6 . 3 . 1 . 4: Πλάγια όψη δοκιμίου S0_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης.....	56
Εικόνα 6 . 3 . 1 . 5: Πλάγια όψη δοκιμίου S0_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης.....	57
Εικόνα 6 . 3 . 1 . 6: Πρόσωση δοκιμίου S0_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης	57
Εικόνα 6 . 3 . 2 . 1: Δοκίμιο S30_D.....	60
Εικόνα 6 . 3 . 2 . 2: Πρόσωση και πλάγια όψη δοκιμίου S30_D	60

Εικόνα 6 . 3 . 2 . 3: Πρόσοψη δοκιμίου S30_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης	61
Εικόνα 6 . 3 . 2 . 4: Πλάγια όψη δοκιμίου S30_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης.....	61
Εικόνα 6 . 3 . 2 . 5: Πλάγια όψη δοκιμίου S30_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης.....	62
Εικόνα 6 . 3 . 2 . 6: Πρόσοψη δοκιμίου S30_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης	62
Εικόνα 6 . 3 . 3 . 1: Δοκίμιο S45_D.....	65
Εικόνα 6 . 3 . 3 . 2: Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου S45_D.....	65
Εικόνα 6 . 3 . 3 . 3: Πλάγια όψη δοκιμίου S45_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης.....	66
Εικόνα 6 . 3 . 3 . 4: Πρόσοψη δοκιμίου S45_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης	66
Εικόνα 6 . 3 . 3 . 5: Πρόσοψη δοκιμίου S45_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης	67
Εικόνα 6 . 3 . 3 . 6: Πλάγια όψη δοκιμίου S45_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης.....	67
Εικόνα 6 . 3 . 4 . 1: Δοκίμιο S90_D.....	70
Εικόνα 6 . 3 . 4 . 2: Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου S90_D.....	70
Εικόνα 6 . 3 . 4 . 3: Πλάγια όψη δοκιμίου S90_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης.....	71
Εικόνα 6 . 3 . 4 . 4: Πρόσοψη δοκιμίου S90_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης	71
Εικόνα 6 . 3 . 4 . 5: Πρόσοψη δοκιμίου S90_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης	72
Εικόνα 6 . 3 . 4 . 6: Πλάγια όψη δοκιμίου S90_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης.....	72

Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3 . 2 . 1: Τυπική Καμπύλη Δύναμης - Παραμόρφωσης	8
Διάγραμμα 4 . 2 . 1: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης λωρίδας χάλυβα εφελκυστικής δοκιμής.....	27
Διάγραμμα 4 . 2 . 2: Δοκίμιο S-A υπό δυναμική καταπόνηση	28
Διάγραμμα 4 . 2 . 3: Δοκίμιο S-B υπό δυναμική καταπόνηση	29
Διάγραμμα 5 . 1 . 1: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου S0_S	33
Διάγραμμα 5 . 1 . 2: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου S0_S	33
Διάγραμμα 5 . 1 . 3: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου S30_S	35
Διάγραμμα 5 . 1 . 4: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου S30_S	35
Διάγραμμα 5 . 1 . 5: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου S45_S	37
Διάγραμμα 5 . 1 . 6: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου S45_S	37
Διάγραμμα 5 . 1 . 7: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου S90_S	39
Διάγραμμα 5 . 1 . 8: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου S90_S	39
Διάγραμμα 5 . 2 . 1: Δοκίμιο S90_D (T2) υπό δυναμική φόρτιση	41
Διάγραμμα 5 . 2 . 2: Δοκίμιο S90_D (T3) υπό δυναμική φόρτιση	42
Διάγραμμα 5 . 2 . 3: Δοκίμιο S0_D υπό δυναμική φόρτιση	43
Διάγραμμα 5 . 2 . 4: Δοκίμιο S30_D υπό δυναμική φόρτιση	44
Διάγραμμα 5 . 2 . 5: Δοκίμιο S45_D υπό δυναμική φόρτιση	45
Διάγραμμα 5 . 2 . 6: Συγκριτικό διάγραμμα δομών υπό δυναμική καταπόνηση.....	46
Διάγραμμα 6 . 3 . 1 . 1: Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) δοκιμίου S0_D	58
Διάγραμμα 6 . 3 . 1 . 2: Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) δοκιμίου S0_D	58
Διάγραμμα 6 . 3 . 1 . 3: Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Displacement) δοκιμίου S0_D	59
Διάγραμμα 6 . 3 . 2 . 1: Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) δοκιμίου S30_D	63
Διάγραμμα 6 . 3 . 2 . 2: Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) δοκιμίου S30_D	63
Διάγραμμα 6 . 3 . 2 . 3: Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Displacement) δοκιμίου S30_D	64
Διάγραμμα 6 . 3 . 3 . 1: Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) δοκιμίου S45_D	68
Διάγραμμα 6 . 3 . 3 . 2: Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) δοκιμίου S45_D	68

Διάγραμμα 6 . 3 . 3 . 3: Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Displacement) δοκιμίου S45_D	69
Διάγραμμα 6 . 3 . 4 . 1: Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) δοκιμίου S90_D	73
Διάγραμμα 6 . 3 . 4 . 2: Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) δοκιμίου S90_D	73
Διάγραμμα 6 . 3 . 4 . 3: Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Displacement) δοκιμίου S90_D	74

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 3 . 2 . 1: Stroke Efficiency	11
Σχήμα 3 . 4 . 1: Κάτοψη Εκτατών και Μη Εκτατών Λοβών	14
Σχήμα 3 . 5 . 1: Κατάρρευση Δοκιμίου Τετραγωνικής Διατομής.....	15
Σχήμα 3 . 5 . 2: Εμφάνιση λοβών και συμμετρία αυτών ως προς θεωρητικά απαραμόρφωτη έδρα δοκιμίου τετραγωνικής διατομής (πλάγια όψη)	16
Σχήμα 3 . 5 . 3: Θλιπτική Φόρτιση Επίπεδου Ελάσματος	16
Σχήμα 3 . 5 . 4: Θλιπτική Φόρτιση Επίπεδου Ελάσματος (πλάγια όψη).....	17
Σχήμα 3 . 6 . 1: Θεωρητικό μοντέλο πλαστική παραμόρφωσης ορθογώνιου (τετράγωνου) σωλήνα υπό πλευρική φόρτιση.....	17
Σχήμα 4 . 1 . 1: Διατομή δοκιμίου και πλαϊνή όψη δοκιμίου	20
Σχήμα 4 . 1 . 2: Διάταξη δοκιμίων S0 & S90	21
Σχήμα 4 . 1 . 3: Διάταξη Δοκιμίων S30 & S45.....	21

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3 . 6 . 1: Σύγκριση αξονικής-πλευρικής φόρτισης μεταλλικών σωληνωτών διατομών	18
Πίνακας 7 . 1 . 1: Συγκεντρωτικός συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών και ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για δοκιμές υπό δυναμική φόρτιση	75
Πίνακας 7 . 1 . 2: Συγκριτικό ραβδόγραμμα μέγιστων τιμών φορτίων	76
Πίνακας 7 . 1 . 3: Συγκριτικό ραβδόγραμμα μέγιστων τιμών μετατοπίσεων	77
Πίνακας 7 . 1 . 4: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης για δοκιμές υπό δυναμική φόρτιση	77

1. Εισαγωγή

1.1 Σημασία της αντοχής δομών έναντι κρούσης

Η αντοχή των δομών στην κρούση αποτελεί ένα θέμα που απασχολεί ευρέως τους μηχανικούς, τους αρχιτέκτονες και τους αρμόδιους φορείς στον τομέα της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Καθώς οι κατασκευές αντιμετωπίζουν διάφορες μορφές κρούσεων από φυσικές καταστροφές όπως οι σεισμοί και οι τυφώνες έως και ατυχήματα και εξωτερικές πιέσεις όπως για παράδειγμα οι συγκρούσεις οχημάτων, η αντοχή αυτών των κατασκευών είναι ζωτικής σημασίας για πολλούς λόγους.

Αρχικά, η ασφάλεια. Οι ανθεκτικές κατασκευές μπορούν να αντέξουν τις κρουστικές καταπονήσεις χωρίς να καταρρεύσουν ή να υποστούν σημαντικές ζημιές. Αυτό είναι κρίσιμο για τη διασφάλιση της ασφάλειας των κατοίκων, των εργαζομένων και του γενικού κοινού. Για παράδειγμα, κτήρια που βρίσκονται σε περιοχές με σεισμική δραστηριότητα πρέπει να σχεδιάζονται για να αντέχουν σεισμικές δυνάμεις προκειμένου να προστατεύονται πρωτίστως ζωές και έπειτα περιουσίες. Γίνεται κατανοητό έτσι, ότι δομές που αντέχουν σε τέτοιες καταπονήσεις διατηρούν την ακεραιότητά τους με την πάροδο του χρόνου μειώνοντας την ανάγκη για συχνές επισκευές ή αντικαταστάσεις. Γεγονός που αφορά άμεσα δομές όπως γέφυρες, δρόμοι και φράγματα, οι οποίες υφίστανται διάφορες μορφές κρούσεων όπως σύγκρουση οχημάτων, βαριά φορτία και περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Στη συνέχεια, με την αύξηση των φυσικών καταστροφών και των ατυχημάτων σε παγκόσμιο επίπεδο η ανάγκη για κατασκευαστικά υλικά και σχεδιασμό που να μπορούν να αντέξουν αυτές τις καταστάσεις είναι πειστική. Μια προσέγγιση που ακολουθείται είναι η ανάπτυξη νέων υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες αντοχής στην κρούση. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση πιο ανθεκτικών και ελαφρύτερων υλικών, την εφαρμογή νέων τεχνικών κατασκευής, ή ακόμα και τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών όπως οι νανοϋλικές επενδύσεις για να ενισχυθεί η αντοχή των υλικών.

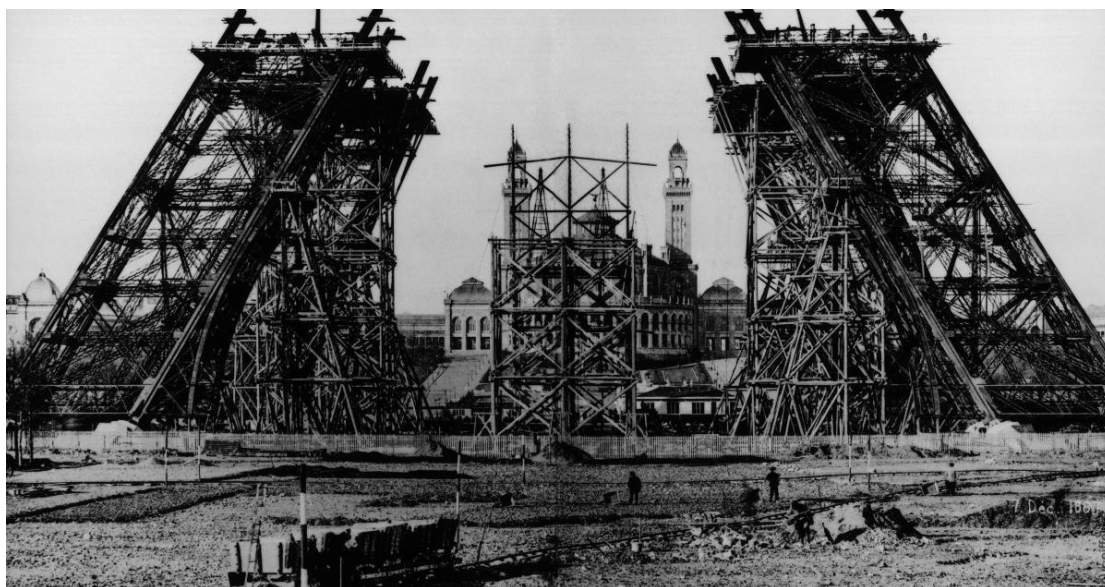
Επίσης, η ανάπτυξη νέων προτύπων και κανονιστικών πλαισίων που να αντικατοπτρίζουν τις τελευταίες εξελίξεις στον τομέα της μηχανικής αντοχής στην κρούση είναι εξίσου σημαντική. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την αναθεώρηση των κατασκευαστικών κώδικων και προτύπων για να περιλάβουν πιο αυστηρές απαιτήσεις για την αντοχή στην κρούση και την εφαρμογή νέων μεθόδων δοκιμής και αξιολόγησης. Η έρευνα σε αυτόν τον τομέα επίσης επικεντρώνεται στην ανάπτυξη προηγμένων μοντέλων πρόβλεψης και προσομοίωσης που μπορούν να βοηθήσουν στην αξιολόγηση της αντοχής κατασκευών σε διάφορες κρίσιμες συνθήκες κρούσης πριν από την πραγματική κατασκευή, γεγονός που βοηθά στον περιορισμό των οικονομικών βλαβών από ατυχήματα διότι μειώνονται τα έξοδα επισκευών, επανακατασκευής και αποζημιώσεων.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Ιστορική Αναφορά

Ιστορικά, οι λεπτότοιχες κατασκευές έχουν χρησιμοποιηθεί ως ενεργειακοί απορροφητές με στόχο να προστατεύσουν τους επιβαίνοντες οχημάτων σε περίπτωση πρόσκρουσης. Η μελέτη για βελτιστοποίηση της ενεργειακής απορρόφησης σε κατάσταση σύγκρουσης λεπτότοιχων κατασκευών είναι συνεχής και σε μεγάλο εύρος υλικών.

Συγκεκριμένα, στις αρχές του 20ού αιώνα, με την ανάπτυξη της βιομηχανίας χάλυβα, άρχισαν να χρησιμοποιούνται οι πρώτες λεπτότοιχες χαλύβδινες κατασκευές στα οχήματα, κυρίως για τα πλαίσια και τα κινητήρια μέρη, και όχι μόνο.



Εικόνα 2 . 1 . 1: Ο Πύργος του Άιφελ σε Πρώιμη Κατασκευαστική Φάση

Σχεδιασμένος από τον Γουστάβο Άιφελ, ο Πύργος του Άιφελ είναι ένα από τα πιο αναγνωρίσιμα σύμβολα στον κόσμο. Κατασκευάστηκε εξ ολοκλήρου από χάλυβα την χρονολογία 1887-1889.

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, οι χαλύβδινες κατασκευές γίνονταν ολοένα και πιο δημοφιλείς, με τη χρήση χαλύβδινων σκελετών να ενισχύεται για την αύξηση της ανθεκτικότητας.

Στις δεκαετίες του '60 και '70, η τεχνολογία χάλυβα εξελίχθηκε περαιτέρω, ενισχύοντας τα χαρακτηριστικά των υλικών. Εμφανίστηκαν υψηλής αντοχής και ελαφριά χαλύβδινα κράματα, βελτιώνοντας την απόδοση και μειώνοντας το βάρος των οχημάτων. Ακόμα, την δεκαετία του '60 ξεκίνησαν οι έρευνες πάνω σε ενεργειακούς απορροφητές από λεπτότοιχους σωλήνες χάλυβα όταν ο Alexander εφάρμοσε την θεωρητική φόρμουλα σε μοντέλο για το μέσο φορτίο σε κυκλικής διατομής σωλήνες. Έπειτα, οι Wierzbicki και Abramowicz έκαναν έρευνα σε χαλύβδινους σωλήνες τετραγωνικής διατομής όπου επαληθεύτηκε τις δεκαετίες του '80 και '90 μέσα από μια σειρά πειραματικών μεθόδων από τον Abramowicz.

Σήμερα, οι κατασκευές από χαλύβδινδους σκελετούς και λεπτότοιχες χαλύβδινες δομές επωφελούνται από τις προηγμένες τεχνολογίες όπως για παράδειγμα οι υβριδικές κατασκευές για βελτιωμένη επίδοση, ασφάλεια και αποδοτικότητα καυσίμου κάτι που δείχνει ότι η ασφάλεια έναντι πρόσκρουσης και οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί για τον έλεγχο των αέριων ρύπων έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη ενδιαφέροντος στον τομέα του crashworthiness και στη μείωση του βάρους των οχημάτων.



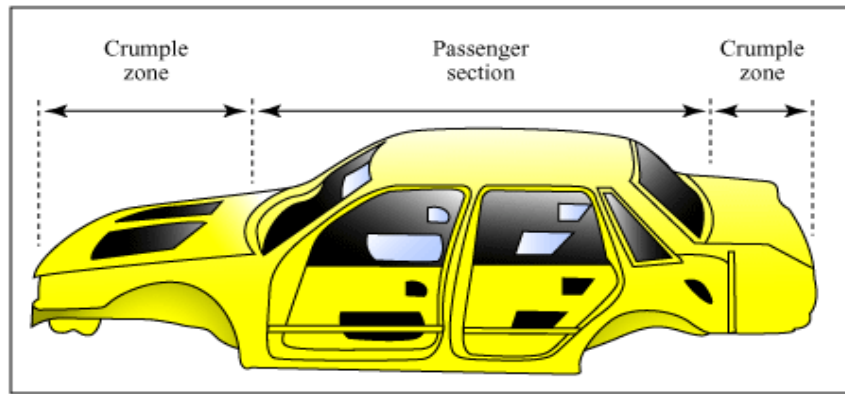
Μία από τις παλαιότερες γέφυρες στις Ηνωμένες Πολιτείες, η Γέφυρα Μπούκλιν όπου συνδέει το Μανχάταν με το Μπούκλιν. Χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό χάλυβα και πέτρας στην κατασκευή της.

Εικόνα 2 . 1 . 2: Η Γέφυρα του Μπούκλιν σε Πρώιμη Κατασκευαστική Φάση

2.2 Εφαρμογές

Η απορρόφηση της ενέργειας κατά την διάρκεια της κρούσης βρίσκει σημαντική εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία καθώς είναι κρίσιμος παράγοντας για την ασφάλεια των επιβατών στα αυτοκίνητα. Η αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιεί διάφορες τεχνικές και τεχνολογίες για να διασφαλίσει ότι τα οχήματα μπορούν να απορροφήσουν όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης, μειώνοντας έτσι τις δυνάμεις που μεταφέρονται στους επιβάτες. Για το λόγο αυτό προστίθενται στοιχεία όπως οι αερόσακοι, οι ενισχυμένες καμπίνες επιβατών καθώς και οι ζώνες καταστροφής (crumple zones). (Baroutaji et al., 2017)

Οι ζώνες παραμόρφωσης (crumple zones) είναι σχεδιασμένες περιοχές του αυτοκινήτου που απορροφούν και διαχέουν την ενέργεια μιας σύγκρουσης μέσω ελεγχόμενης παραμόρφωσης. Αυτές οι ζώνες βρίσκονται συνήθως στο μπροστινό και πίσω μέρος του οχήματος και βοηθούν στη μείωση των δυνάμεων που φτάνουν στην καμπίνα των επιβατών.



Εικόνα 2 . 1 . 3: Ζώνες Παραμόρφωσης (Crumple Zones)

Ακόμα, η χρήση υλικών υψηλής αντοχής, όπως χάλυβας υψηλής αντοχής και σύνθετα υλικά, αυξάνει την ικανότητα του οχήματος να απορροφά ενέργεια χωρίς να θυσιάζει την ακεραιότητα της καμπίνας. Αυτά τα υλικά μπορούν να παραμορφωθούν υπό υψηλές φορτίσεις, απορροφώντας ενέργεια και προστατεύοντας τους επιβάτες. (Johnson, 1996)

Οι δομές από λεπτότοιχους χάλυβες είναι ελαφριές σε σχέση με παραδοσιακά υλικά κατασκευής όπως το σκυρόδεμα και η πέτρα. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές όπου το βάρος είναι κρίσιμο, όπως για παράδειγμα αεροσκάφη και αυτοκίνητα. Στις εφαρμογές αυτές που απαιτούν αντοχή και ελαφρύ σχεδιασμό βασικό είναι ότι οι συγκεκριμένες δομές μπορούν να παρέχουν σημαντική δομική αντοχή ενώ ελαχιστοποιούν τη χρήση υλικού. (Zou et al., 2014) Ακόμα, τα εξαρτήματα από λεπτότοιχους χάλυβες μπορούν να προεκτείνονται προκατασκευασμένα εκτός του χώρου εργασίας και να συναρμολογούνται γρήγορα στον τόπο εργασίας, διευκολύνοντας τις τεχνικές κατασκευών. Αυτή η προσέγγιση είναι ευνοϊκή για έργα που απαιτούν γρήγορη συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση, όπως προσωρινές κατασκευές και προκατασκευασμένα κτίρια.

Ο λεπτότοιχος χαλύβδινος κατασκευές, επίσης, προσφέρουν ευελιξία στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό λόγω της δυνατότητάς του να διαμορφώνονται εύκολα. Επιτρέπει τη δημιουργία πολύπλοκων γεωμετριών και καινοτόμων σχεδίων σε αρχιτεκτονικές εφαρμογές όπως συστήματα οροφής και εσωτερικά διαχωριστικά. (Wang et al., 2023)

Ο χάλυβας χαρακτηρίζεται από ανθεκτικότητα και αντοχή στη διάβρωση ειδικά όταν εφαρμόζονται κατάλληλες επιστρώσεις. Έτσι, κατασκευές από λεπτότοιχους χάλυβες μπορούν να αντέχουν σε σκληρές καιρικές συνθήκες, καθιστώντας τις κατάλληλες για εξωτερικές εφαρμογές όπως γέφυρες, τέντες και ναυτιλιακές κατασκευές. (Ozdagli et al., 2020)

Ο σύντομος χρόνος κατασκευής, τα μειωμένα λειτουργικά έξοδα και οι ελάχιστων απαιτήσεων συντήρησης κατά τη διάρκεια της διάρκειας ζωής των κατασκευών αυτών προσφέρουν οικονομικές εξοικονομήσεις σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υλικά. Αυτό τις καθιστά οικονομικά εφικτές για διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των κατοικιών, των επαγγελματικών κτιρίων και των βιομηχανικών κατασκευών. (Wang et al., 2023)

3. Θεωρητικό Πλαίσιο

3.1 Χάλυβας

Ο χάλυβας είναι ένα ευέλικτο και ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό σε διάφορες βιομηχανίες λόγω των εξαιρετικών μηχανικών του ιδιοτήτων και του σχετικά χαμηλού κόστους. Εδώ είναι μερικά κύρια σημεία για τον χάλυβα:



Εικόνα 3.1.1: Χάλυβας Οπλισμού Σκυροδέματος σε Ευθύγραμμες Ράβδους

Σύνθεση: Ο χάλυβας αποτελείται κυρίως από σίδηρο και άνθρακα, συνήθως περιέχοντας λιγότερο από 2% άνθρακα κατά βάρος. Άλλα στοιχεία κράματος όπως μαγγάνιο, χρώμιο, νικέλιο και μολυβδαίνιο μπορούν επίσης να προστεθούν για να ενισχυθούν συγκεκριμένες ιδιότητες.

Μηχανικές Ιδιότητες: Ο χάλυβας εκδηλώνει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένης της υψηλής **αντοχής σε εφελκυσμό – τράβηγμα (Tensile Strength)**, της **σκληρότητας (Hardness)**, της **ελαστικότητας (Elasticity)**, της **διαπερατότητας (Permeability)** και της **ευελιξίας (Ductility)**. Αυτές οι ιδιότητες το καθιστούν κατάλληλο για μια ευρεία γκάμα εφαρμογών, από δομικά στοιχεία έως μέρη μηχανών.

Τύποι Χάλυβα: Υπάρχουν αρκετοί τύποι χάλυβα, κατηγοριοποιημένοι με βάση τη χημική τους σύσταση, τη μέθοδο επεξεργασίας και την προοριζόμενη χρήση τους. Οι κοινότεροι τύποι περιλαμβάνουν τον ατσάλι, τον κράματα χάλυβα, το ανοξείδωτο χάλυβα και το εργαλειώδες χάλυβα.

Περιεχόμενο Άνθρακα: Το περιεχόμενο άνθρακα στον χάλυβα επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητές του. Οι χάλυβες χαμηλού άνθρακα (έως 0,3% άνθρακα) είναι δομικά και εύκολα συγκολλησιμοι, ενώ οι χάλυβες υψηλού άνθρακα (0,6% έως 2% άνθρακα) είναι πιο σκληροί και κατάλληλοι για εφαρμογές που απαιτούν αντοχή στη φθορά.

Στοιχεία Κράματος: Τα στοιχεία κράματος που προστίθενται στον χάλυβα μπορούν να τροποποιήσουν τις ιδιότητές του για να ανταποκριθούν σε συγκεκριμένες απαιτήσεις. Για παράδειγμα, το χρώμιο και το νικέλιο προστίθενται στο ανοξείδωτο χάλυβα για να βελτιωθεί η αντοχή στη διάβρωση.

Διαδικασίες Παραγωγής: Ο χάλυβας μπορεί να παραχθεί μέσω διαφόρων διαδικασιών όπως:

- **Εκχύλιση Σιδήρου** από φυσικές πηγές όπως τα μεταλλεία.
- **Σιδηρουργία.** Ο εκχυλισμένος σίδηρος μπορεί να υποστεί διάφορες διαδικασίες όπως η αφαίρεση ανεπιθύμητων ουσιών και η προσθήκη κατάλληλων συστατικών για την παραγωγή του επιθυμητού χάλυβα.
- **Χύτευση** όπου ο χάλυβας στη συνέχεια χύνεται σε κατάλληλα καλούπια για να διαμορφωθεί σε επιθυμητά σχήματα και μεγέθη.
- **Θερμική Επεξεργασία.** Όπως η θέρμανση και η ψύξη και χρησιμοποιείται για να δοθούν στον χάλυβα οι επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες, όπως η σκληρότητα και η αντοχή.
- **Τυποποίηση** όπου ο χάλυβας υφίσταται επιπλέον επεξεργασία με κυλινδρικά μηχανήματα για να λάβει το επιθυμητό πάχος και σχήμα.

Εφαρμογές: Ο χάλυβας χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή, την κατασκευή αυτοκινήτων, την υποδομή, τη μηχανολογία, τη ναυπηγική, την παραγωγή εργαλείων και σε πολλές άλλες βιομηχανίες.

Ανακύκλωση: Ο χάλυβας είναι εξαιρετικά ανακυκλώσιμος και διατηρεί τις ιδιότητές του ακόμα και μετά από πολλά κύκλους ανακύκλωσης. Η ανακύκλωση του χάλυβα βοηθά στη διατήρηση των φυσικών πόρων, μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και ελαχιστοποιεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Δευτερεύοντα Στοιχεία Κράματος Χάλυβα: Με την προσθήκη δευτερευόντων στοιχείων στο βασικό κράμα χάλυβα έχουμε σημαντικές επιδράσεις στις ιδιότητες του τελικού κράματος δηλαδή βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων. Μερικά από αυτά τα στοιχεία είναι:

- **Χρόμιο (Manganese):** Προσδίδει αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες.
- **Νικέλιο (Nickel):** Προσδίδει ανθεκτικότητα στην διάβρωση.
- **Μαγγάνιο (Chromium):** Προσδίδει ανθεκτικότητα στην διάβρωση και βελτιώνει την σκληρότητα και την αντοχή.
- **Βανάδιο (Vanadium):** Βελτιώνει την σκληρότητα και την αντοχή.
- **Κοβάλτιο (Cobalt):** Προσδίδει υψηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και υψηλά φορτία.



Εικόνα 3. 1 . 2: Διάφορες Διατομές Χάλυβα

3.2 Θεωρία της Κρούσης

Τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στη θεωρία της κρούσης εξαρτώνται από το είδος της κρούσης που μελετάμε. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα για τόσο ελαστικές όσο και ανελαστικές κρούσεις, και η ανάλυση της κάθε μίας απαιτεί διαφορετικές μαθηματικές τεχνικές.

- **Ελαστική Κρούση**

Στην ελαστική κρούση, τα σώματα διατηρούν το σχήμα τους και δεν υπάρχει μόνιμη αλλοίωση τους. Για να αναλύσουμε μαθηματικά την ελαστική κρούση, χρησιμοποιούμε τους νόμους διατήρησης της ορμής και της ενέργειας.

Ας θεωρήσουμε δύο σώματα μάζας m_1 και m_2 που συγκρούονται ελαστικά. Οι αρχικές ταχύτητες των σωμάτων είναι v_{1i} και v_{2i} αντίστοιχα, ενώ οι τελικές ταχύτητες είναι v_{1f} και v_{2f} .

i. Νόμος Διατήρησης της Ορμής:

$$m_1 \cdot v_{1i} + m_2 \cdot v_{2i} = m_1 \cdot v_{1f} + m_2 \cdot v_{2f}$$

ii. Νόμος Διατήρησης της Ενέργειας:

$$\frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_{1i}^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_{2i}^2 = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_{1f}^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_{2f}^2$$

iii. Νόμος Διατήρησης της Ενέργειας στη Μορφή της Ενέργειας Διάσπασης (ενέργεια που αποθηκεύεται στην μορφή ελαστικής δυναμικής ενέργειας):

$$\frac{1}{2} \cdot k \cdot (v_{1f} - v_{2f})^2 = \frac{1}{2} \cdot k \cdot (v_{1i} - v_{2i})^2$$

Στην τελευταία εξίσωση, k είναι η σταθερά ελαστικότητας των σωμάτων, η οποία αντιπροσωπεύει την τάση των σωμάτων να επανέλθουν στην αρχική τους μορφή μετά την κρούση.

Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να λυθούν τα άγνωστα v_{1f} και v_{2f} , δηλαδή οι τελικές ταχύτητες των σωμάτων μετά την ελαστική κρούση. Η επίλυση αυτού του συστήματος εξισώσεων θα παρέχει τις τιμές των τελικών ταχυτήτων και επομένως τα αποτελέσματα της κρούσης.

- **Ανελαστική Κρούση**

Στην ανελαστική κρούση, υπάρχει απώλεια ενέργειας και μόνιμη αλλοίωση των σωμάτων. Τα βασικά μαθηματικά μοντέλα περιλαμβάνουν:

i. Νόμος Διατήρησης της Ορμής:

$$m_1 \cdot v_{1i} + m_2 \cdot v_{2i} = m_1 \cdot v_{1f} + m_2 \cdot v_{2f}$$

ii. Νόμος Διατήρησης της Ενέργειας:

$$\frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_{1i}^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_{2i}^2 = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_{1f}^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_{2f}^2$$

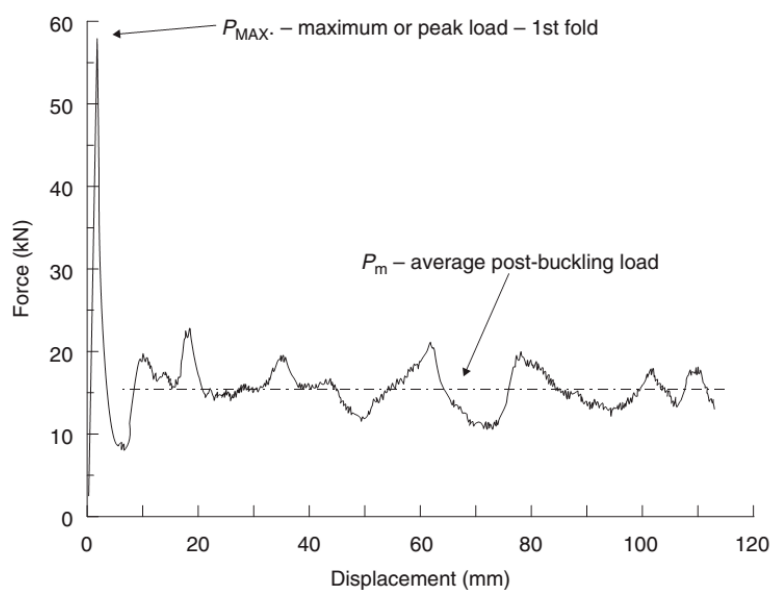
Αυτές οι εξισώσεις θα χρησιμοποιηθούν για να λυθούν τα άγνωστα $v/1$ και $v/2$, δηλαδή οι τελικές ταχύτητες των σωμάτων μετά την ανελαστική κρούση. Η κύρια διαφορά με την ελαστική κρούση είναι ότι στην ανελαστική κρούση θα χρειαστεί να λύσουμε ένα σύστημα εξισώσεων για τις ταχύτητες μετά την κρούση χωρίς την προσθήκη της επιπλέον εξίσωσης που λαμβάνει υπόψη την ενέργεια διάσπασης. Επιπλέον, η απώλεια κινητικής ενέργειας πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επίλυση του συστήματος εξισώσεων.

3.3 Δείκτες Crashworthiness

Ο όρος Crashworthiness χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του '50 στην αεροναυπηγική βιομηχανία με σκοπό να περιγράψει την αποδοτικότητα της κρούσης μιας κατασκευής με μια άλλη προκειμένου να προστατευτούν οι επιβάτες από επικείμενα ατυχήματα. (Huh & Kang, 2002)

Οι παράγοντες που συμβάλλουν στην απόδοση του crashworthiness περιλαμβάνουν τη σωστή επιλογή υλικών, τη σωστή δομή και σχεδίαση των κρίσιμων εξαρτημάτων του οχήματος, καθώς και τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών όπως τα συστήματα ελέγχου ασφαλείας και οι αερόσακοι. Συνολικά, η ανάπτυξη της crashworthiness αποτελεί σημαντικό κομμάτι της αυτοκινητοβιομηχανίας και των τομέων μεταφορών, με στόχο την ελαχιστοποίηση των τραυματισμών κατά τη διάρκεια ατυχημάτων. (Abdullah et al., 2020)

Ακόμα, σημαντική είναι η ύπαρξη κριτηρίων για την ποσοτικοποίηση, την αξιολόγηση και τον έλεγχο της συμπεριφοράς των συστημάτων απορρόφησης ενέργειας. Τα συγκεκριμένα κριτήρια (μεγέθη) εμφανίζονται και προκύπτουν από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης:



Διάγραμμα 3. 2. 1: Τυπική Καμπύλη Δύναμης - Παραμόρφωσης

Ενέργεια απορρόφησης - Energy Absorption (E_{abs})

Η ενέργεια απορρόφησης (E_{abs}) εκφράζει την συνολική ενέργεια που απορροφήθηκε από τη δομή ενός συστήματος απορρόφησης ενέργειας μέσω πλαστικής παραμόρφωσης σε συνθήκες πρόσκρουσης. Η ενέργεια απορρόφησης είναι ίση με το έργο που προκύπτει από την δύναμη φορτίου F και την παραμόρφωση δ με αρχική τιμή δ_i και τελική τιμή δ_f .

$$E_{abs} = \int_{\delta_i}^{\delta_f} F d\delta$$

Μέγιστο Φορτίο Κατάρρευσης - Peak crush force (PCF), (P_{max})

Η μέγιστη δύναμη P_{max} είναι η μέγιστη δύναμη αντίδρασης που παράγεται από τη δομή ενός συστήματος απορρόφησης ενέργειας και παρατηρείται στην αρχή της διαδικασίας κατάρρευσης. Η συγκεκριμένη δύναμη πρέπει να οριοθετείτε κάτω από μια τιμή και ιδανικότερα να βρίσκεται ακριβώς κάτω από ένα όριο. Επίσης, να παραμείνει σχεδόν σταθερή κατά τη διάρκεια της απορρόφησης ενέργειας ώστε να είναι ομαλή η μετάβαση στην πλαστική περιοχή των συστημάτων απορρόφησης ενέργειας.

Μέσο Φορτίο Κατάρρευσης (P_{mean})

Αντιστοιχεί, στον λόγο της ενέργειας απορρόφησης προς την μετατόπιση που υπέστη το δοκίμιο κατά την διάρκεια επιβολής φορτίου. Υψηλή τιμή του μέσου φορτίου, αντιστοιχεί σε μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας για δεδομένη παραμόρφωση. Είναι ένα σημαντικό μέγεθος καθώς ορισμένα συστήματα απορρόφησης ενέργειας έχουν περιορισμό στο ύψος της κατασκευής τους.

$$P_{mean} = \frac{E_{abs}}{\delta f}$$

Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης - Specific Energy Absorption (SEA)

Υψηλότερη ειδική ενέργεια απορρόφησης έχουν αποδοτικά συστήματα απορρόφησης ενέργειας και ελαφρά μέλη σύνθλιψης. Η συγκεκριμένη ενέργεια συσχετίζει την ενέργεια απορρόφησης με τη μάζα του συστήματος απορρόφησης ενέργειας και αποτελεί σημαντικό κριτήριο για τις ελαφριές κατασκευές. Συχνά λαμβάνεται υπόψη μόνο η μάζα του συστήματος ενέργειας που δέχεται την κρούση. Ωστόσο, σε πιο σύνθετες δομές και όπου χρησιμοποιούνται συστήματα σύσφιξης, η θρυμματισμένη μάζα είναι δύσκολο να προσδιοριστεί και επομένως πρέπει να ληφθεί υπόψη η πλήρης μάζα της κατασκευής. Προκύπτει από τον λόγο της ενέργειας που απορροφά ένα σύστημα απορρόφησης ενέργειας E_{abs} με την μάζα του συστήματος που έχει καταρρεύσει $m_{destroyed}$. Η μάζα $m_{destroyed}$ υπολογίζεται γνωρίζοντας την πυκνότητα του υπό μελέτη υλικού από τον τύπο:

$$m_{destroyed} = \rho \cdot x \cdot V$$

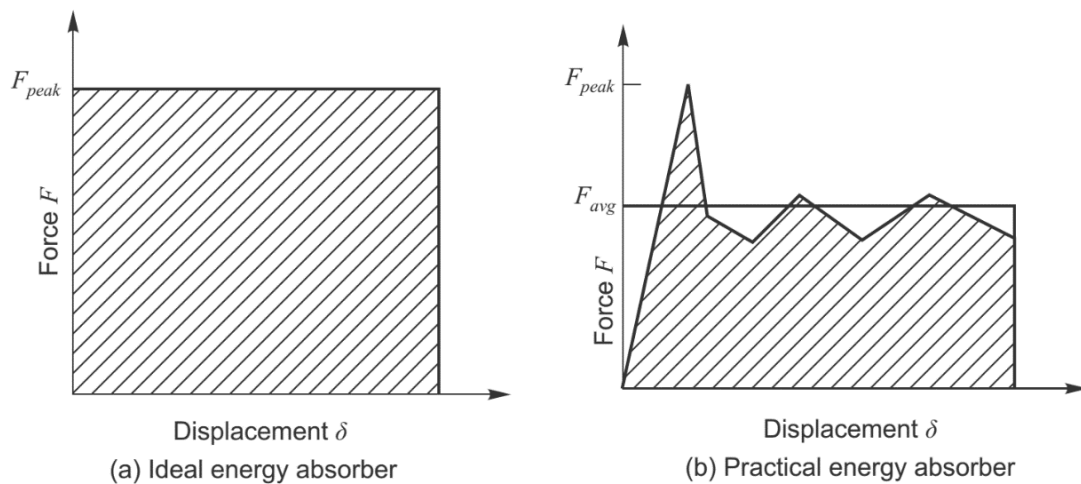
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου - Crush Force Efficiency (CFE or AE)

Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (CFE) είναι η αναλογία μεταξύ του μέσου φορτίου κατάρρευσης P_{mean} και του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης P_{max} .

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

Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (CFE) είναι ένας σημαντικός δείκτης που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση ενός συστήματος απορρόφησης ενέργειας. Στην ιδανική περίπτωση, ο δείκτης CFE είναι κοντά στην μονάδα (ιδανικός απορροφητής ενέργειας) και παράγει μια σταθερή καμπύλη δύναμης-παραμόρφωσης.

Ο χαμηλός δείκτης CFE υποδεικνύει υψηλό μέγιστο φορτίο κατάρρευσης P_{max} το οποίο μπορεί να προκαλέσει υψηλότερα επίπεδα επιβράδυνσης σε ένα όχημα κάτι που μπορεί να υπερβεί την ανοχή του ανθρώπου και να βλάψει ενδεχομένως τους επιβάτες κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης. Σε ορισμένες δημοσιεύσεις χρησιμοποιείται επίσης η έκφραση $1 / AE$ και ονομάζεται ομοιομορφία φορτίου (LU).

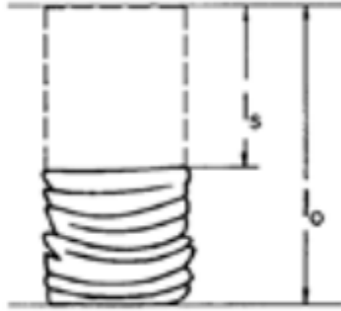


Διάγραμμα: 3 . 2 . 1: Χαρακτηριστικά από απορροφητή ενέργειας α) Ιδανικός ενεργειακός απορροφητής (Crush Force Efficiency 100%) β) Πραγματικός ενεργειακός απορροφητής.

Αποδοτικότητα Μετατόπισης - Stroke efficiency (SE)

Το SE είναι ο λόγος μεταξύ της μέγιστης παραμόρφωσης ls του δομικού μέλους απορρόφησης ενέργειας και του αρχικού μήκους l_0 του δομικού μέλους και δίνεται από την σχέση :

$$SE = \frac{ls}{l_0}$$



Σχήμα 3 . 2 . 1: Stroke Efficiency

Το SE υποδηλώνει την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ενός δομικού μέρους κατά τη διάρκεια μιας κρούσης. Οι υψηλές αναλογίες υποδεικνύουν την αποτελεσματική χρήση του υλικού.

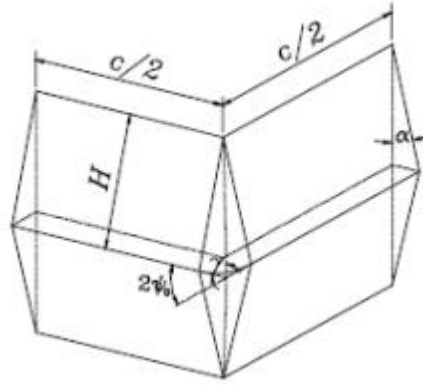
Οι δομές που αποτυγχάνουν κατά την διάρκεια της αναδίπλωσης μόνο ένας συγκεκριμένος αριθμός λοβών μπορεί να σχηματιστεί εντός του αρχικού μήκους. Σε δομές που υπάρχουν μηχανισμοί trigger μπορεί να περιοριστεί το μήκος της παραμόρφωσης οπότε να έχουμε και μικρότερο δείκτη SE. Στην ιδανική περίπτωση που το SE πλησιάζει την μονάδα τότε παραμορφώνεται το συνολικό μήκος του μέλους απορρόφησης ενέργειας κατά την διάρκεια απορρόφησης της ενέργειας σύγκρουσης. (Daneshi & Hosseiniour, 2002)

Είναι μια χρήσιμη παράμετρος που πρέπει να αξιολογείται κατά το σχεδιασμό ενεργειακών απορροφητών ενέργειας ειδικά όταν μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα. Τέτοια μέρη απορρόφησης ενέργειας μπορεί να είναι ένας σωλήνας σύγκρουσης ή ένας προφυλακτήρας όπου βιώνουν τα πρώτα φορτία σύγκρουσης, προκειμένου στην περίπτωση ενός οχήματος να υποστούν ελάχιστη ζημιά τα υπόλοιπα μέρη του και κυριότερα οι επιβάτες σε μία δεδομένη ταχύτητα κρούσης.

3.4 Είδη Παραμορφώσεων

Εκτατοί λοβοί

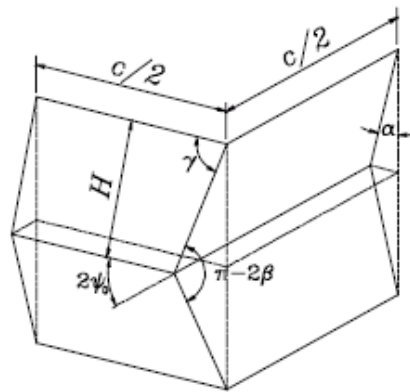
Το συγκεκριμένο είδος παραμόρφωσης χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό τετραγωνικού τύπου αναδίπλωσης συμμετρικό ως προς κάθετο άξονα συμμετρίας του δοκιμίου ενώ η απορροφούμενη ενέργεια παρουσιάζει αύξηση όσο ασκείται το φορτίο με βάση το διάγραμμα φορτίου μετατόπισης.



Εικόνα 3 . 4 . 1: Εκτατοί Λοβοί

Μη εκτατοί λοβοί

Στο συγκεκριμένο είδος παραμόρφωσης, το δοκίμιο που καταρρέει περιέχει δυο είδη αρμών: τα σταθερά οριζόντια και τα κεκλιμένα μετατοπισμένα. Οι οριζόντιοι πλαστικοί αρμοί στις δυο απέναντι πλευρές στη δημιουργία κάθε λοβού, κινούνται προς τα έξω μειώνοντας το αρχικό τους μήκος, ενώ ταυτόχρονα οι πλαστικοί αρμοί στις άλλες δυο παράπλευρες έδρες κινούνται προς τα μέσα αυξάνοντας το μήκος τους. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης του δοκιμίου, όμοιοι λοβοί διαμορφώνονται ανά επίπεδο στραμμένοι κατά $\pi/2$ των προηγούμενων και ούτω καθ' εξής. Οι κεκλιμένοι πλαστικοί αρμοί ξεκινούν από τις γωνίες του δοκιμίου, και καταλήγουν σε $\pm 45^\circ$ ως προς τους οριζόντιους πλαστικούς αρμούς.



Εικόνα 3 . 4 . 2: Μη Εκτατοί Λοβοί

Ανάμικτου τύπου λοβοί

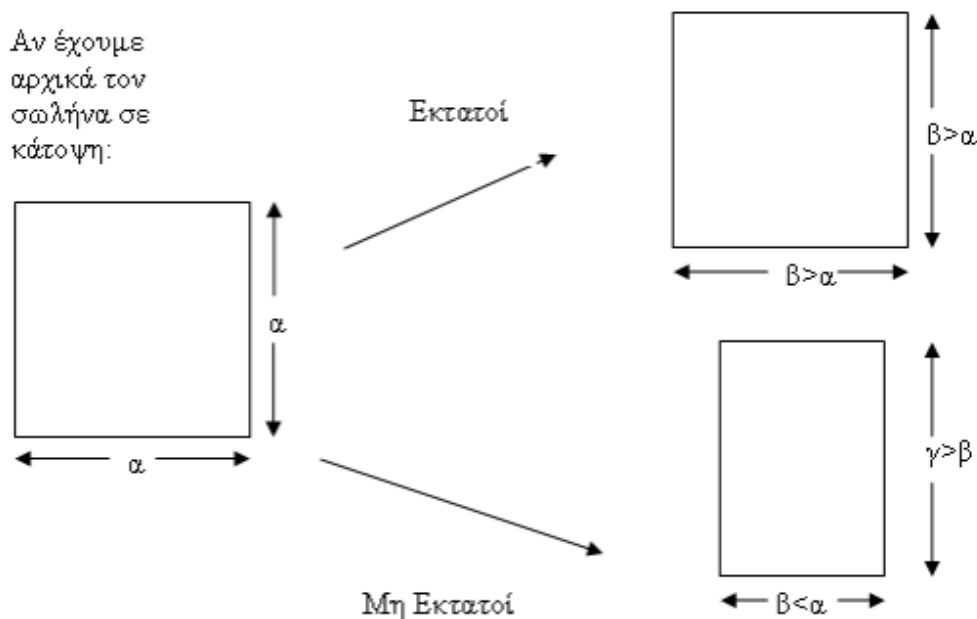
Συνδυασμός αρχικά σχηματισμένων αξονοσυμμετρικών λοβών, οι οποίοι διαδέχονται από μη εκτατούς λοβούς με τη πρόοδο της κατάρρευσης του δοκιμίου. Ο συγκεκριμένος τρόπος κατάρρευσης ανταποδίδεται στο γεγονός ότι τα δοκίμια δεν διαμορφώνονται με απόλυτη συμμετρία και είναι μεγάλη η πιθανότητα να εμφανίζουν συχνά ατέλειες στη δομή και τη γεωμετρία τους. Στη πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι εν λόγω ασυμμετρίες δεν είναι δυνατό να ανιχνευθούν με γυμνό μάτι και προκαλούν εκδήλωση μικτού τρόπου κατάρρευσης.

Τύπου Euler (Λυγισμός)

Συγκεκριμένα ονομάζεται πλευρική κάμψη του δοκιμίου. Είναι φαινόμενο στο οποίο το δοκίμιο αστοχεί σε συγκεκριμένη φάση της καταπόνησης που επιδέχεται. Δεν ορίζεται ως απαραίτητη προϋπόθεση η υπέρβαση του ορίου αντοχής του υλικού και για το λόγο αυτό ο συγκεκριμένος τρόπος κατάρρευσης λογίζεται ως ξεχωριστός τύπος κατάρρευσης. Δοκίμια που χαρακτηρίζονται από μεγάλο σχετικά μήκος και αντίστοιχα μικρό πάχος διατομής είναι πιο επιρρεπή στο να εκδηλώσουν την εν λόγω συμπεριφορά κατάρρευσης. Ορισμένες φορές έχει παρατηρηθεί και δοκίμια αρχικά να καταπονούνται αξονικά και εν συνεχεία να υπόκεινται σε λυγισμό.



Εικόνα 3 . 4 . 3: Λυγισμός



Σχήμα 3 . 4 . 1: Κάτοψη Εκτατών και Μη Εκτατών Λοβών

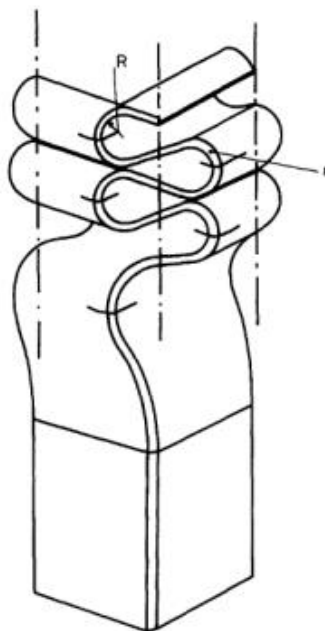
3.5 Ενεργό Μήκος Λοβών

Η διαδικασία κατάρρευσης του δοκιμίου προχωράει πάντα προοδευτικά κατά ένα επαρκές μικρό μήκος. Αφού διαμορφωθεί η πρώτη πτύχωση, τότε είτε από καθαρή πλαστική αναδίπλωση, είτε από διαδικασία πριν την αναδίπλωση, το δοκίμιο συνεχίζει να καταρρέει κατακόρυφα κατά την αξονική διεύθυνση, κατά το ίδιο μήκος επόμενων λοβών. (Abramowicz & Jones, 1986) Ο πλαστικός αρμός φαίνεται να παραμένει σε επίπεδο κεκλιμένο κατά 45° , ως προς τα δυο επίπεδα συμμετρίας της ημιτομής του τετραγωνικού δοκιμίου. Η διαδικασία δίπλωσης του κάθε λοβού τερματίζεται όταν έρθουν σε επαφή – όταν συμπίπτουν - οι άνω και κάτω ακμές του λοβού.

Αξιόλογο είναι ότι ο πλαστικός αρμός διαμορφώνεται ως μια κυψέλη με διπλή καμπύλωση. Η μικρή ακτίνα της καμπύλωσης είναι η r , όπως φαίνεται παραπάνω, και είναι σταθερή σε όλο τον αρμό, και συνήθως είναι ίσο με το πάχος του τοιχώματος του πλέγματος. Η δεύτερη ακτίνα της καμπύλωσης R , είναι κατά πολύ μεγαλύτερη, ενώ και οι τέσσερις πλευρές του δοκιμίου υπόκεινται σε κυλινδρικού τύπου αναδίπλωση.

Είναι προφανές ότι η παρουσία αυτών των ακτίνων έχει σημαντική επίδραση στο ενεργό μήκος αναδίπλωσης του δοκιμίου, και συνεπώς στην δύναμη που εμφανίζεται σε όλη τη διάρκεια της κατάρρευσης του δοκιμίου. Η πλειοψηφία των μοντέλων που πραγματευόμαστε θεωρούνται ότι είναι κατασκευασμένα από υλικό πλήρους πλαστικής συμπεριφοράς με μεγάλη ακαμψία. Τέτοιο υλικό παρουσιάζει ασυνέχειες υπό κλίση στους σταθερούς πλαστικούς αρμούς. Θεωρώντας τους πλαστικούς αρμούς φιζαρισμένους με το υλικό, η ακτίνα του αρμού μηδενίζεται και το ενεργό μήκος κατάρρευσης, είναι ίσο με το μήκος της κυματοροής του τύπου αναδίπλωσης $2H$.

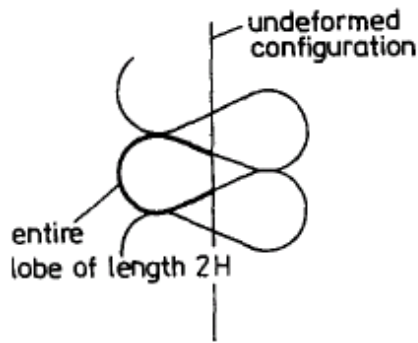
Η πραγματική αξονική κατάρρευση των δοκιμίων με λεπτά τοιχώματα τετραγωνικής διατομής, είναι πολύ πιο περίπλοκη από ό,τι φαίνεται στις παραπάνω απλουστευμένες εικόνες. Παρατηρώντας τους πλαστικούς αρμούς, βλέπουμε ότι η τελική θέση του παραμορφωμένου άκρου του δοκιμίου προκύπτει από δυο συνακόλουθα τσακίσματα ενός αρχικά επίπεδου ελάσματος. (Abramowicz & Jones, 1986)



Σχήμα 3. 5. 1: Κατάρρευση Δοκιμίου Τετραγωνικής Διατομής

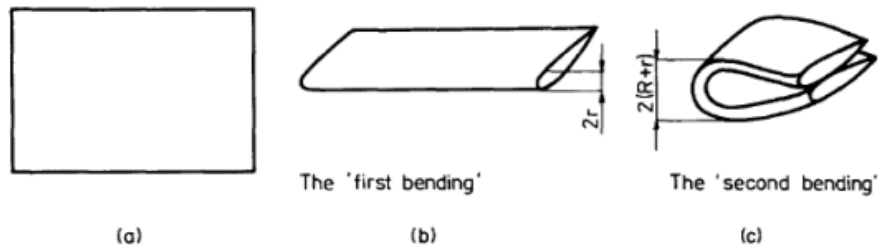
Κατά την πρώτη αναδίπλωση, το αρχικά επίπεδο έλασμα διπλώνει κατά μια γωνία ελαφρά μεγαλύτερη και σχηματίζει τη μορφή (b) του Σχήματος 3.6, και το μέγιστο καθ' ύψος μήκος λοβού είναι $2r$. Ύστερα, το παραμορφωμένο έλασμα διπλώνεται ξανά σε διεύθυνση κάθετη προς την αρχική αναδίπλωση. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται δεύτερη αναδίπλωση, και απεικονίζεται παραπάνω στο (c) (Σχήμα 3.6). Το μέγιστο καθ' ύψος μήκος αυτού του λοβού είναι $2r + 2R$.

Στην πραγματικότητα, στην κατάρρευση του δοκιμίου τα γεγονότα ακολουθούν διαφορετική διαδικασία. Και οι δυο ακτίνες εμφανίζονται από το ξεκίνημα της κατάρρευσης του δοκιμίου, καθώς η τομή της τοροειδούς κυλινδρικής επιφάνειας, μεταφέρεται σε όλο το υλικό. (Liu, 2008) Είναι μάλλον δύσκολο να αναλύσουμε το φαινόμενο αυτό της δεύτερης αναδίπλωσης κοντά στον αρμό. Ωστόσο, κοντά στο κέντρο των πλευρών του δοκιμίου, η δεύτερη αναδίπλωση είναι απλά μια αναδίπλωση ενός επίπεδου μεταλλικού ελάσματος.



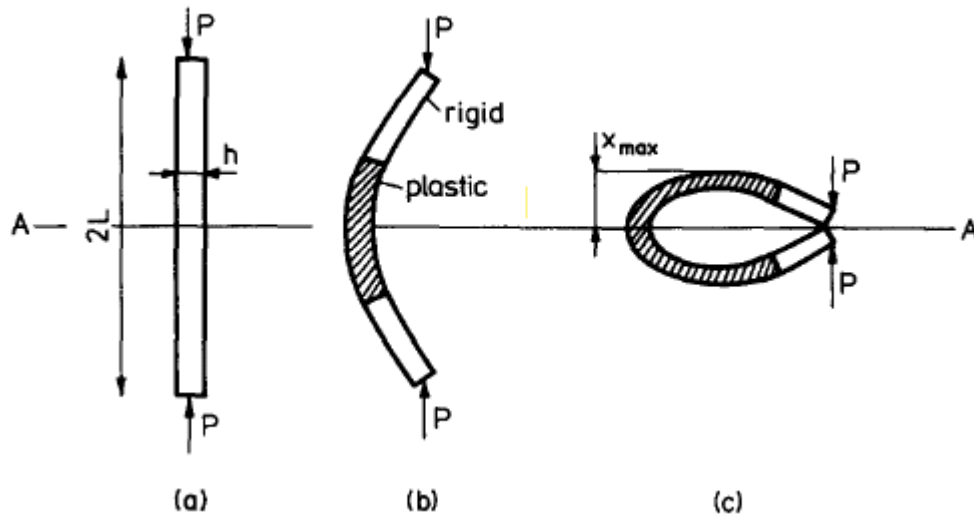
Σχήμα 3 . 5 . 2: Εμφάνιση λοβών και συμμετρία αυτών ως προς θεωρητικά απαραμόρφωτη έδρα δοκιμίου τετραγωνικής διατομής (πλάγια όψη)

Επομένως, θεωρείται ότι η ακτίνα της κυλινδρικής αναδίπλωσης διαμορφώνεται από τις πλαϊνές έδρες του δοκιμίου, αντί από τις γωνιακές ακμές του δοκιμίου. Τότε το μέγιστο καθ' ύψος μήκος λοβού ελέγχεται και εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.



Σχήμα 3 . 5 . 3: Θλιπτική Φόρτιση Επίπεδου Ελάσματος

Ακόμα, κατά την δημιουργία ενός λοβού, η πλαστική παραμόρφωση εξαπλώνεται σε όλο το μήκος του λοβού προσδίδοντάς του ένα τελικό σχήμα, το οποίο έχει συμμετρία ως προς επίπεδο A-A, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα το οποίο αντιστοιχεί σε θλιπτική φόρτιση επίπεδου ελάσματος με τις φάσεις αναδίπλωσης αφού το φορτίο θλίψης πάρει την κρίσιμη τιμή και το έλασμα αρχίσει την αναδίπλωση.(ALEXANDER, 1960)

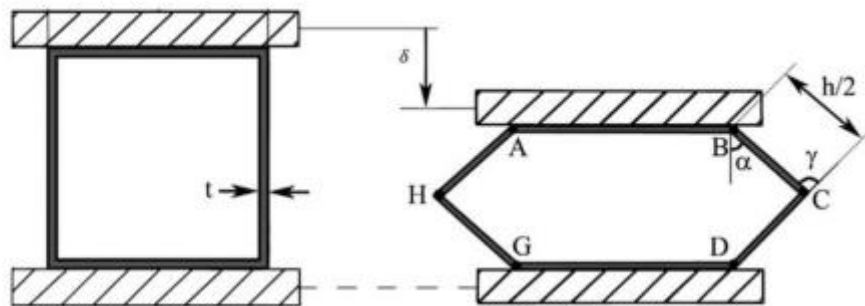


Σχήμα 3 . 5 . 4: Θλιπτική Φόρτιση Επίπεδου Ελάσματος (πλάγια όψη)

3.6 Πλευρική Φόρτιση

Γενικά, η πλευρική κατάρρευση προκαλείται από την πλευρική άσκηση θλιπτικού φορτίου μέχρι το υλικό υποχωρήσει πλήρως. (Redwood, 1964) Αποτελεί μία απ' τις πιο συνηθισμένες μορφές κατάρρευσης και λόγω της ευρείας εφαρμογής της στην αυτοκινητοβιομηχανία, έχει γίνει αντικείμενο πολλών ερευνητικών μελετών.

Συγκεκριμένα, σε χαλύβδινα δοκίμια τετραγωνικής διατομής υπό πλευρική φόρτιση δημιουργούνται τρία ζεύγη πλαστικών αρμών. Δύο ζεύγη πλαστικών αρμών σχηματίζονται σε διασταυρώσεις κάθετων και οριζόντιων πλευρών ενώ το τελευταίο ζεύγος σχηματίζεται στο μέσο ύψος των κατακόρυφων πλευρών του σωλήνα.



Σχήμα 3 . 6 . 1: Θεωρητικό μοντέλο πλαστική παραμόρφωσης ορθογώνιου (τετράγωνου) σωλήνα υπό πλευρική φόρτιση.

Όταν οι τοπικές παραμορφώσεις επεκταθούν σε όλο τον όγκο του δοκιμίου επέρχεται συνολική κατάρρευση και εκδηλώνεται με κάμψη ή με θραύση του υλικού. Σημαντικό ρόλο σε αυτό έχει η ταχύτητα και η ενέργεια της κρούσης καθώς οι έντονες και ταχείες παραμορφώσεις σχετίζονται με υψηλότερες ταχύτητες.

	Πλευρική Φόρτιση	Αξονική Φόρτιση
Κατεύθυνση Δύναμης	Κάθετα προς τον διαμήκη άξονα	Κατά μήκος του διαμήκη άξονα
Εφαρμογές	Πλευρικές συγκρούσεις, φορτίσεις ανέμου, κύματα	Στήριξη κατασκευών, στοιχεία εφελκυσμού/συμπίεσης (υποστυλώματα, δοκοί)
Κύριες Τάσεις	Διατμητικές και Καμπτικές Τάσεις	Αξονικές Τάσεις (θλίψη/εφελκυσμός)
Τρόποι Αστοχίας	Λυγισμός, κάμψη, τοπική παραμόρφωση	Λυγισμός (θλίψη), Θραύση (εφελκυσμός)
Παραμόρφωση	Πλευρική κάμψη, εκτροπή	Αξονική συρρίκνωση (συμπίεση) ή επιμήκυνση (έλξη)
Μέθοδοι Δοκιμής	Εκκρεμές, σφύρα πίπτουσας μάζας, υδραυλικοί ενεργοποιητές	Μηχανές δοκιμής εφελκυσμού/θλίψης

Πίνακας 3 . 6 . 1: Σύγκριση αξονικής-πλευρικής φόρτισης μεταλλικών σωληνωτών διατομών

Παράγοντες που επηρεάζουν τον μηχανισμό κατάρρευσης

- **Γεωμετρία Σωλήνα:** Το πάχος των τοιχωμάτων, οι διαστάσεις του ορθογώνιου προφίλ και η αναλογία διαστάσεων επηρεάζουν τον τρόπο κατάρρευσης. Τα στοιχεία με λεπτότερα τοιχώματα τείνουν να παραμορφώνονται πιο εύκολα.
- **Ιδιότητες Υλικού:** Η αντοχή, η σκληρότητα και η πλαστικότητα του χάλυβα καθορίζουν το επίπεδο αντοχής στις πλευρικές καταπονήσεις. Όσο μεγαλύτερη η πλαστικότητα του υλικού τόσο περισσότερη ενέργεια μπορούν να απορροφήσουν ως την αστοχία.
- **Συγκολλήσεις και Συνδέσεις:** Οι θέσεις συγκολλήσεων και ο τύπος σύνδεσης μπορούν να λειτουργήσουν ως περιοχές αδυναμίας, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται ο τρόπος και το σημείο κατάρρευσης.

3.7 Σύνθετες Δομές

Οι σύνθετες δομές βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή σε βιομηχανίες όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροναυπηγική λόγω της υψηλής αντοχής του χάλυβα. Οι χαλύβδινοι σωλήνες μπορούν να στοιβάζονται μαζί και έτσι σχηματίζονται σωληνωτά συστήματα με την επιθυμητή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας . (Wu et al., 2020)Ακόμα, οι σύνθετες δομές έχουν περισσότερα από ένα στοιχεία που συμπιέζονται στον ίδιο χώρο, με αποτέλεσμα να παρουσιάσουν μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ανά μονάδα μήκους σε σχέση με ένα κέλυφος απλής γεωμετρίας. Έτσι, είναι φυσικό να παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον για εφαρμογές με περιορισμένη ζώνη κατάρρευσης.

Για όλο και μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης οι σωλήνες διατάσσονται σε διάφορες δομές όπως για παράδειγμα με παράλληλη ή με κάθετη στοίβαξη. Η σύνδεση συνήθως γίνεται με συγκόλληση ή με κοιλίες. Οι ισχυρές και ομοιόμορφες συγκολλήσεις μειώνουν σημαντικά τον κίνδυνο αστοχίας στις συνδέσεις. Αρκετά σημαντικό είναι το πάχος των μεμονωμένων δοκιμίων καθώς έχουν μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. (Wierzbicki et al., 1992)

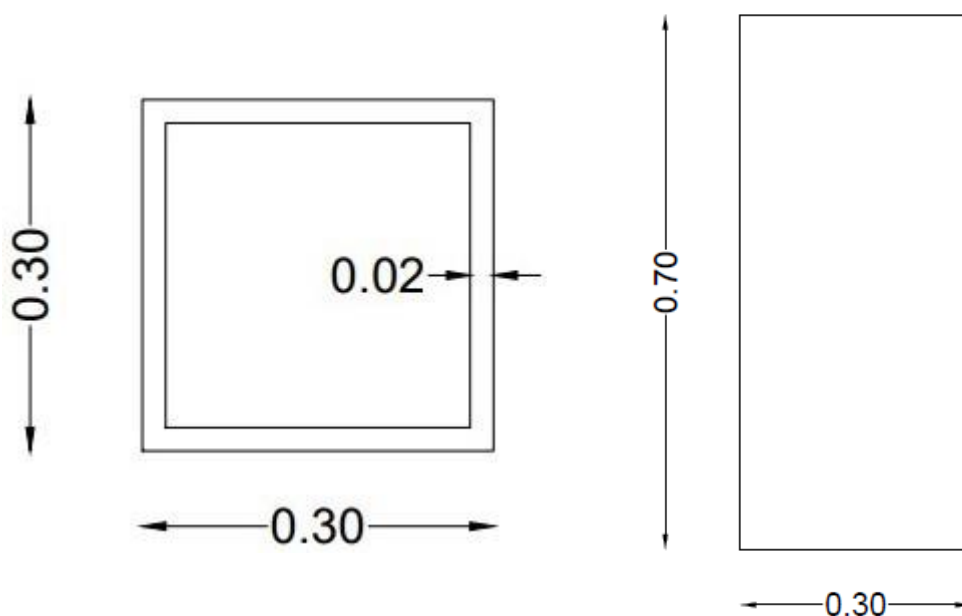
4. Πειραματική Διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, στο κτίριο Ξ της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, πραγματοποιείται περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε, των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και των τεχνικών μέσων με τα οποία διεκπεραιώθηκε το πειραματικό πρόγραμμα.

4.1 Δοκίμια

Δοκίμια

Με βάση τις διαστάσεις της τετραγωνικής διατομής (30x30mm) επιλέχθηκε αρχικό ύψος δοκιμίων 240mm. Οι πλήρεις διαστάσεις των δοκιμίων παρουσιάζονται στο σχήμα 4.1.1, όπου παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά σχέδια των δοκιμίων.



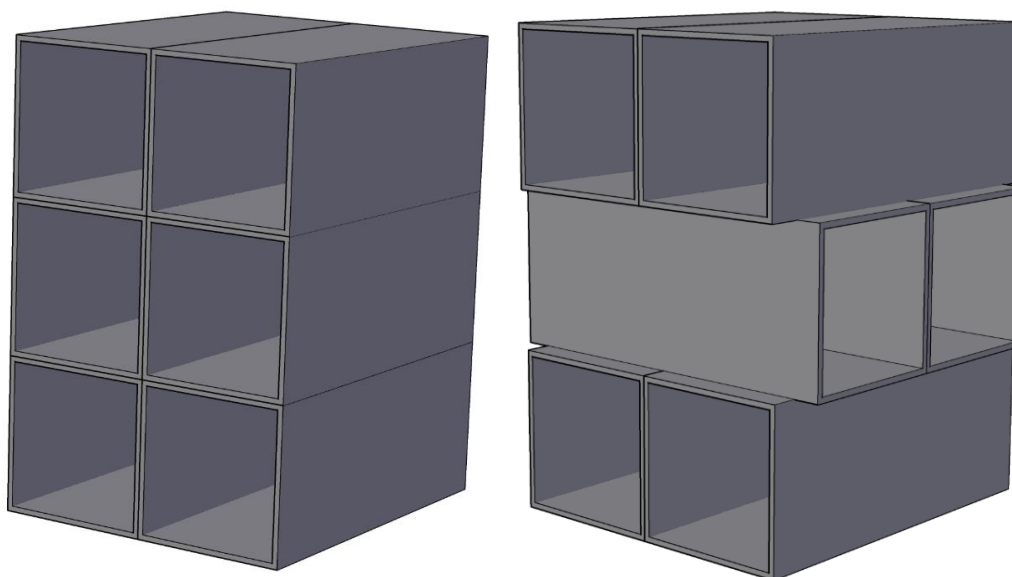
Σχήμα 4.1.1: Διατομή δοκιμίου και πλαϊνή όψη δοκιμίου

Στην συνέχεια, κολλώντας τα δοκίμια μεταξύ τους με θερμόκολλα δημιουργήσαμε διατάξεις τριών στρωμάτων όπως φαίνεται στην εικόνα. Συνολικά, κόπηκαν 64 σωλήνες (30 x 30 mm). Προτού γίνει η κόλληση, οι σωλήνες λειάνθηκαν και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν πλύσεις με στόχο την απομάκρυνση του λιπαντικού που χρησιμοποιήθηκε κατά την κοπή. Μετά την εφαρμογή ζεστής σιλικόνης, διαμορφώθηκαν δέκα (10) δομές, αποτελούμενες από έξι (6) σωλήνες η καθεμία.

Ακόμα, κόπηκαν τέσσερις (4) σωλήνες, επιπλέον, προκειμένου να υποβληθούν σε δοκιμή δυναμικής φόρτισης ως μεμονωμένα δοκίμια. Τέλος, εκπονήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σε λωρίδες του υλικού ώστε να προσδιοριστούν οι μηχανικές του ιδιότητες.

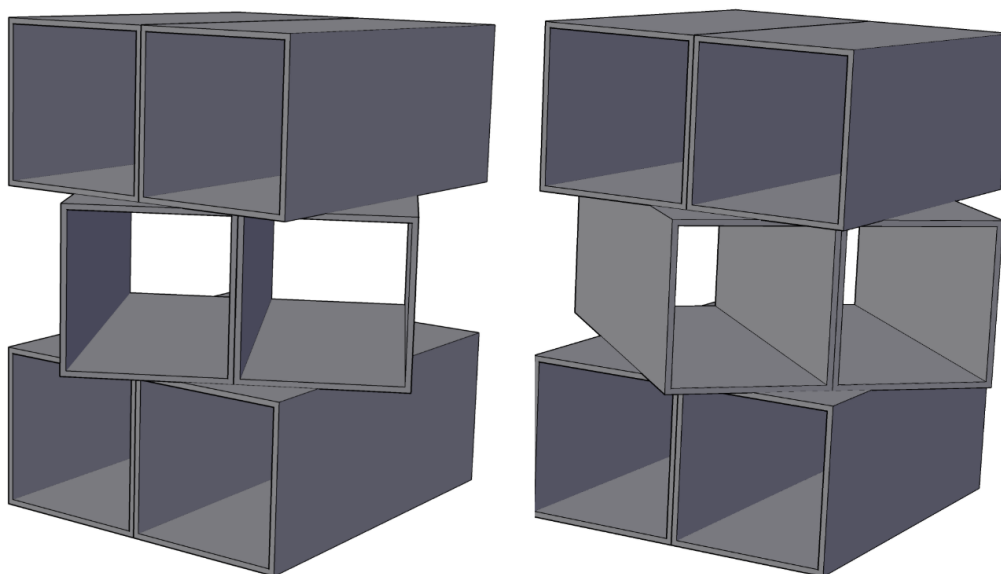
Στα παρακάτω σχήματα, περιγράφεται σχηματικά η ονοματολογία των δομών ανάλογα με τον προσανατολισμό των δοκιμίων. Με το γράμμα **S** δηλώνεται το τετραγωνικό σχήμα (square), ενώ ακολουθεί αριθμός που καθορίζεται από τον προσανατολισμό του δοκιμίου και τέλος, με το γράμμα **D** (dynamic) ή **S** (static) προσδιορίζεται το είδος της καταπόνησης στην οποία υπεβλήθη το δοκίμιο. Έτσι, για παράδειγμα, το δοκίμιο **S0** που δέχεται στατική φόρτιση λαμβάνει την ονομασία **S0_S**.

- **Δοκίμια S0 & S90:** τα στοιχεία έχουν προσανατολισμό 0° και 90° αντίστοιχα.



Σχήμα 4.1.2: Διάταξη δοκιμίων S0 & S90

- **Δοκίμια S30 & S45:** τα στοιχεία έχουν προσανατολισμό 30° και 45° αντίστοιχα.



Σχήμα 4.1.3: Διάταξη Δοκιμίων S30 & S45

Τέλος σημειώνεται, ότι για τις δοκιμές μεμονωμένων δοκιμίων τα δοκίμια έλαβαν αντίστοιχες ονομασίες, ενώ στη θέση του αύξοντα αριθμού τοποθετήθηκαν γράμματα του λατινικού αλφαβήτου (A, B).



Εικόνα 4.1.1: Μεμονωμένα Δοκίμια Χάλυβα



Εικόνα 4.1.2: Δομές για δοκιμή επιβολής θλιπτικού φορτίου

4.2 Μηχανήματα και Διαδικασία

Ηλεκτρικό πριόνι (Πριονοκορδέλα)

Με την συγκεκριμένη μηχανή της RichYoung έγινε η κοπή των χαλύβδινων σωλήνων όπου προμηθευτήκαμε από το εμπόριο. Στην διάταξη αυτή έχουμε την δυνατότητα να μετρήσουμε με ακρίβεια το μήκος του δοκιμίου που θέλουμε να κόψουμε. Έπειτα, αφού ακινητοποιήσουμε το δοκίμιο και ενεργοποιήσουμε την μηχανή, αυτόματα γίνεται έκχυση λιπαντικού στο πριόνι ώστε η κοπή να είναι πιο λεπτομερής και να αποφευχθούν τυχόν σφάλματα λόγω της θερμότητας που

αναπτύσσεται. Έτσι δημιουργούνται τα ελάσματα με την επιθυμητή τετραγωνική ή ορθογωνική διατομή με ραφή συγκόλλησης στην ένωσή τους.

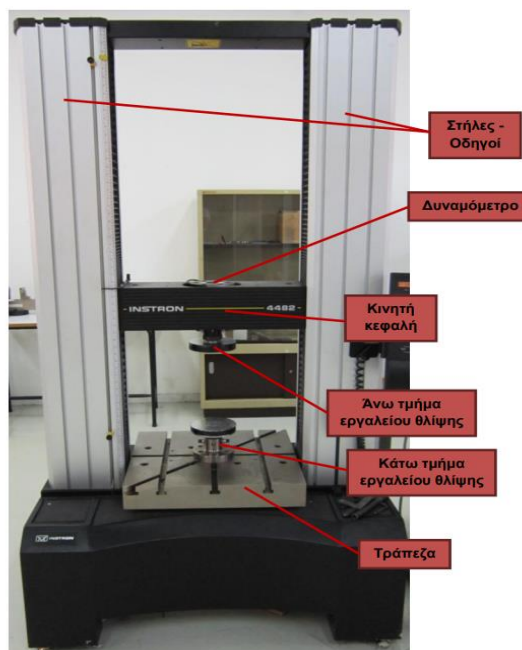


Εικόνα 4 . 2 . 1: Διαδικασία κοπής δοκιμών με ηλεκτρικό πριόνι

Μηχανική πρέσα Instron 4482 – Στατική Φόρτιση

Οι δοκιμές στατικής φόρτισης, καθώς και η δοκιμή εφελκυσμού (για το χαρακτηρισμό του υλικού), πραγματοποιήθηκαν στην μηχανική πρέσα Instron. Η συγκεκριμένη πρέσα έχει μέγιστη θλιπτική ικανότητα 100 kN και περιλαμβάνει κατάλληλες διατάξεις για δοκιμές τόσο σε θλίψη, όσο και σε εφελκυσμό και κάμψη.

Για την εκτέλεση των δοκιμών θλίψης, προσαρμόστηκαν πάνω στην πρέσα επίπεδες πλάκες, ενώ και τα υπόλοιπα μέρη της φαίνονται στην παρακάτω φωτογραφία:



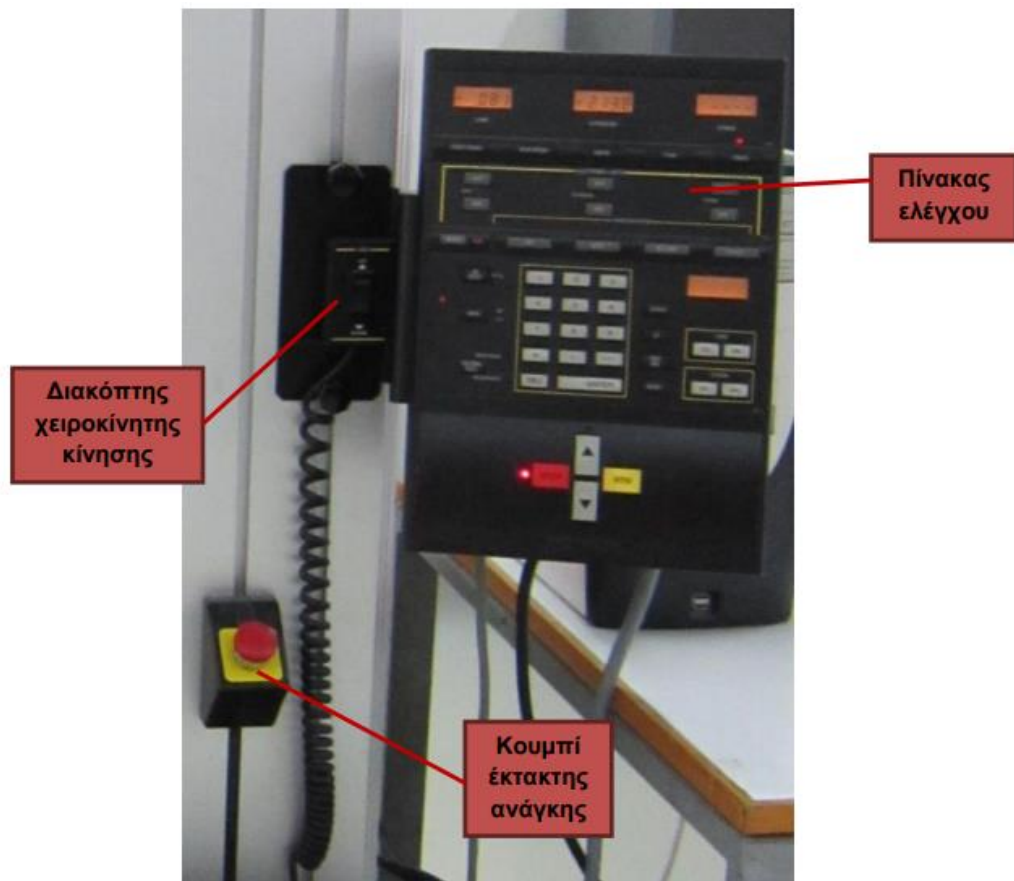
Εικόνα 4 . 2 . 2: Μηχανική Πρέσα Instron 4482

Η πρέσα χρησιμοποιήθηκε, όπως προαναφέρθηκε, και για τις μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού, με χρήση των κατάλληλων διατάξεων για τη συγκράτηση των δοκιμίων (αρπάγες).



Εικόνα 4 . 2 . 3: Χρήση αρπαγών για εφελκυστικές δοκιμές

Η μηχανική πρέσα συνδέεται μέσω σειριακής θύρας με Η/Υ, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με κατάλληλο λογισμικό μέσω του οποίου ορίζονται οι συνθήκες του πειράματος, εκτελούνται και να ληφθούν τα αποτελέσματα καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα.

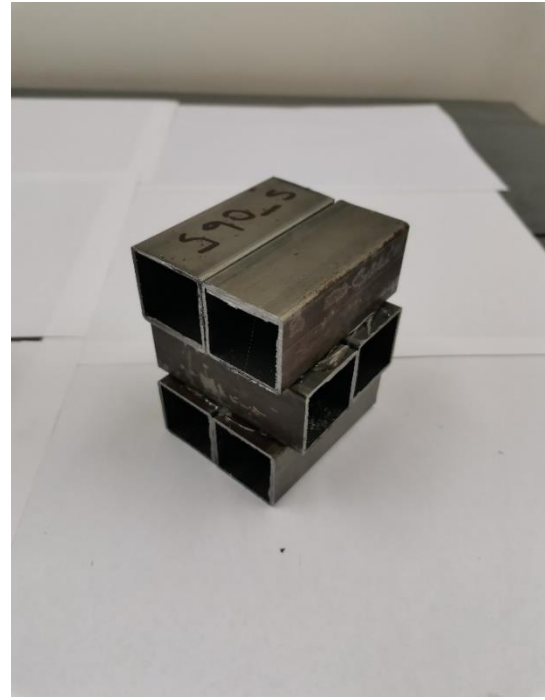


Εικόνα 4 . 2 . 4: Πίνακας ελέγχου Instron 4482

Τα βασικά λειτουργικά της χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- Ονομαστική δύναμη: 100 kN
- Μέγιστη ταχύτητα κεφαλής: 500 mm/min
- Ταχύτητα περιστροφής κεφαλής στην αρχική θέση: 600 mm/min
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα: 75 kN
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής στο μέγιστο φορτίο: 250 mm/min
- Ευαισθησία πρέσας: 2mV/V

Τοποθετώντας, λοιπόν, τις διάφορες διατάξεις των δοκιμίων (0°, 30°, 45° και 90°) στην μηχανική πρέσα τα πειράματα διεξήχθησαν υπό στατικές συνθήκες. (Τα δοκίμια επιλέχθηκε να συμπιεστούν κατά 120 mm, όσο δηλαδή και το μισό μήκος τους και το έμβολο της πρέσας επιλέχθηκε να κινείται με ταχύτητα 40 mm/min, που οιονεί στατική (quasi-static) ταχύτητα καταπόνησης.)



Εικόνα 4.2.6: : Πειραματικές Διατάξεις Δοκιμών Χάλυβα (S0_S & S90_S) για στατική φόρτιση



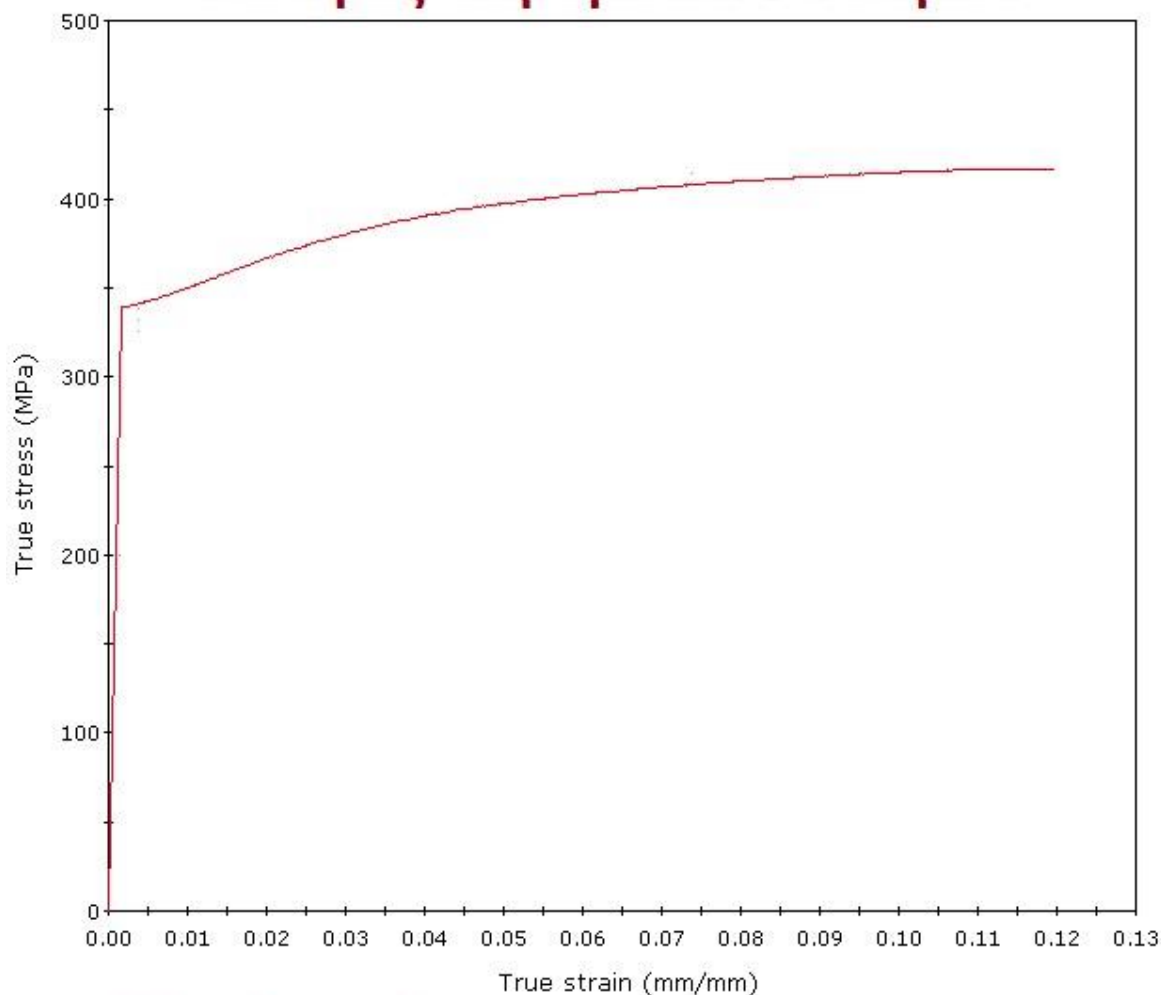
Εικόνα 4.2.5: : Πειραματικές Διατάξεις Δοκιμών Χάλυβα (S45_S & S30_S) για στατική φόρτιση

Χαρακτηρισμός Υλικού

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού λωρίδας του υλικού, έτσι ώστε να εξακριβωθεί το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές δοκιμές. Οι λωρίδες του υλικού είχαν πάχος 1.45 mm, πλάτος 9.40 mm και ενεργό μήκος 80 mm (το ελεύθερο μήκος του υλικού μεταξύ των αρπαγών). Ο ρυθμός παραμόρφωσης που επιλέχθηκε για τη συγκεκριμένη εφελκυστική δοκιμή ήταν 20 mm/min.

Στο διάγραμμα 4.2.1, φαίνεται η σχέση Τάσης – Παραμόρφωσης (Stress – Strain) της λωρίδας του χάλυβα. Η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση είναι ίση περίπου με 12% και η τάση στο σημείο αυτό είναι ίση με 400 MPa. Στο σημείο διαρροής ή τάση είναι ίση με 340 MPa περίπου και η παραμόρφωση ίση με 0,2%.

Χάλυβας πειραματικού δοκιμίου



Μέτρο ελαστικότητας: 207 GPa

Λόγος Poisson: 0.30

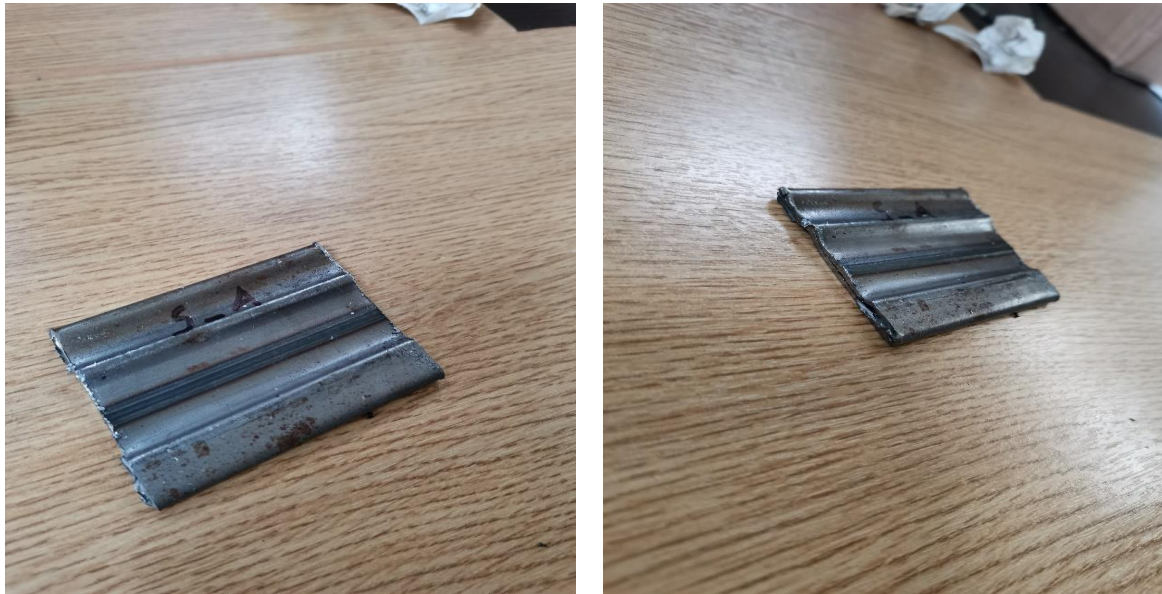
Πυκνότητα: 7.8 g/cm³

Διάγραμμα 4.2.1: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης λωρίδας χάλυβα εφελκυστικής δοκιμής

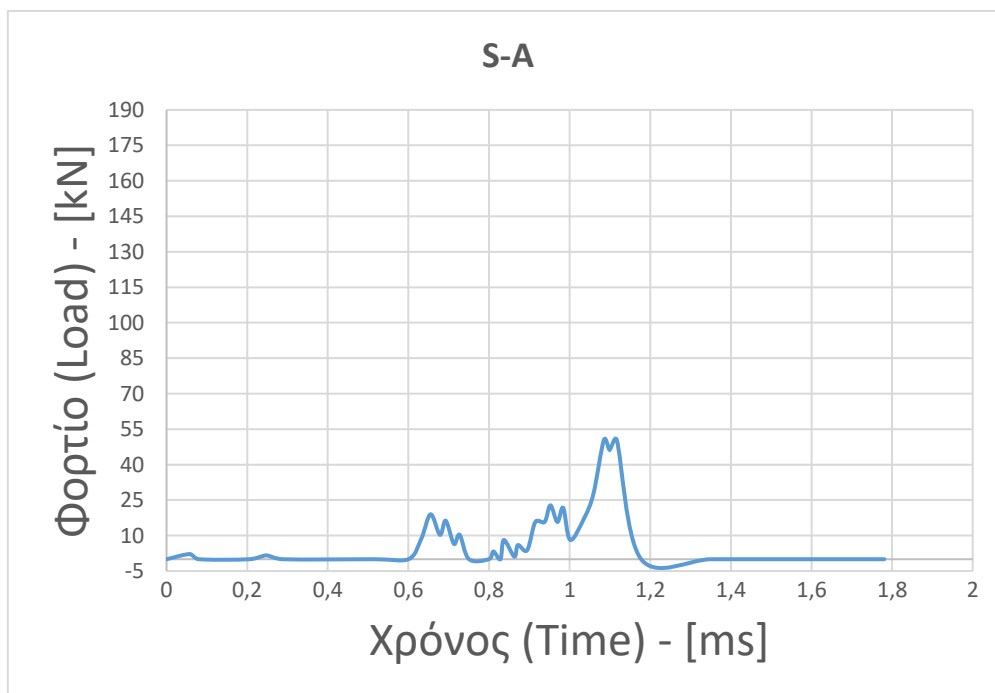
Δυναμική Φόρτιση

Προκειμένου να καθοριστεί το ύψος ρίψης της σφύρας για την τελική διάταξη, κατά τη δυναμική καταπόνηση, αρχικά δοκιμάστηκαν μεμονωμένα δοκίμια σε πλευρική καταπόνηση, από ύψος 0.50 m.

S-A



Εικόνα 4 . 2 . 7: Μεμονωμένο δοκίμιο S-A υπό πλευρική δυναμική καταπόνηση

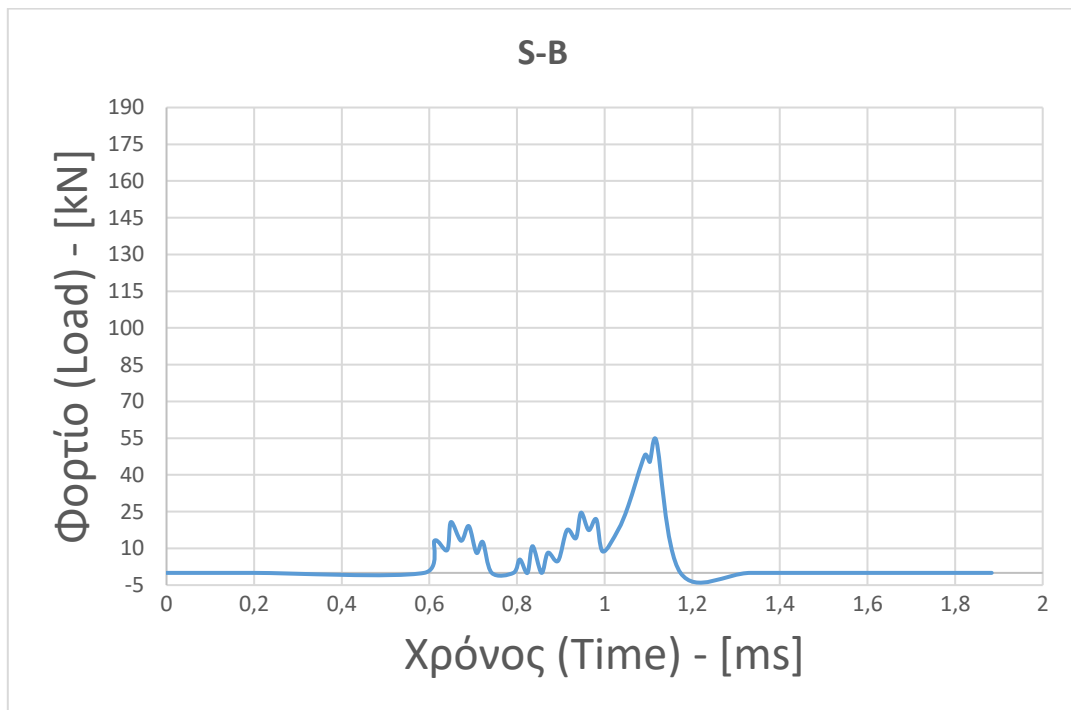


Διάγραμμα 4 . 2 . 2: Δοκίμιο S-A υπό δυναμική καταπόνηση

S-B



Εικόνα 4. 2. 8: Μεμονωμένο δοκίμιο S-A υπό πλευρική δυναμική καταπόνηση



Διάγραμμα 4. 2. 3: Δοκίμιο S-B υπό δυναμική καταπόνηση

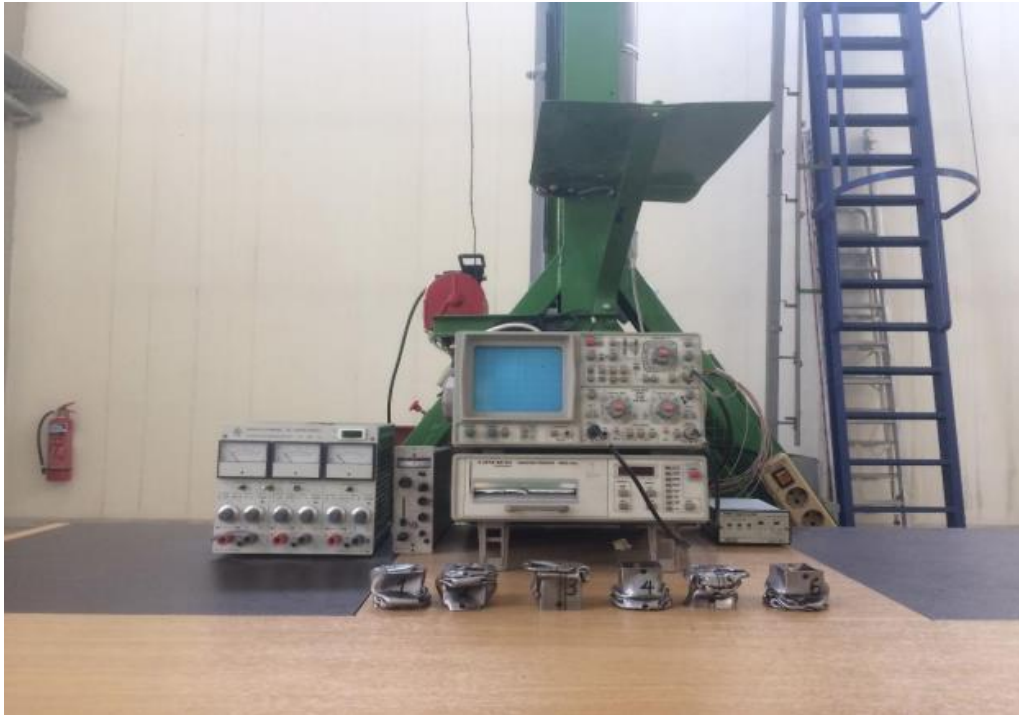
Σφύρα

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τη σφύρα βάρους 78 Kg η οποία μπορεί να ανυψωθεί σε ύψος 5 μέτρων, τη **βάση** όπου τοποθετείται το εκάστοτε δοκίμιο, το **δυναμόμετρο** το οποίο βρίσκεται στο κάτω μέρος της βάσης, ένα **τροφοδοτικό** και ένα **παλμογράφο** από όπου παίρνουμε τα διαγράμματα φορτίου-χρόνου.



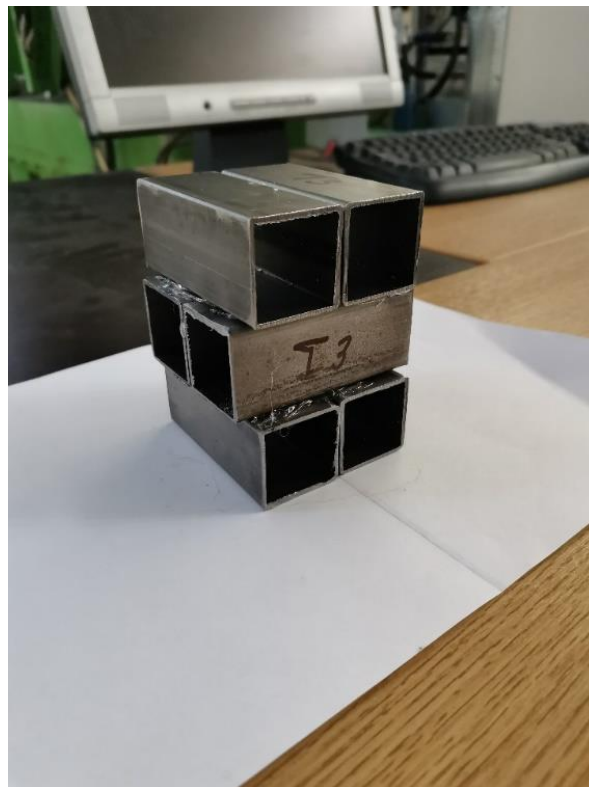
Εικόνα 4 . 2 . 9: Σφύρα

- Σφύρα πέπουσας μάζας ($m \cong 78 \text{ kg}$).
- Δυναμόμετρο Kyowa LC-50TE.
- Ενισχυτής δυναμόμετρου Kyowa CDA – 110A.
- Παλμογράφος δύο καναλιών Hameg HM205 – 3.
- Εκτυπωτής Hameg HM 8143-2.
- Οθόνη καταγραφής αποτελεσμάτων.



Εικόνα 4 . 2 . 10: Οθόνη καταγραφής αποτελεσμάτων & Εκτυπωτής Hameg HM 8143-2

Στη συνέχεια, και με βάση δοκιμαστικές ρίψεις δομές αποτελούμενες από σωληνωτές διατομές κατανεμημένες σε τρία (3) επίπεδα), ορίστηκε σαν τελικό ύψος ρίψης της σφύρας για τη συνθήκες του πειράματος το 1.50 m, με τις δομές να καταπονούνται πλευρικά κατά την κρούση.



Εικόνα 4 . 2 . 11: Δοκίμιο Δυναμικής Φόρτισης (T3)



Εικόνα 4 . 2 . 12: Δομές για δοκιμή επιβολής θλιπτικού φορτίου

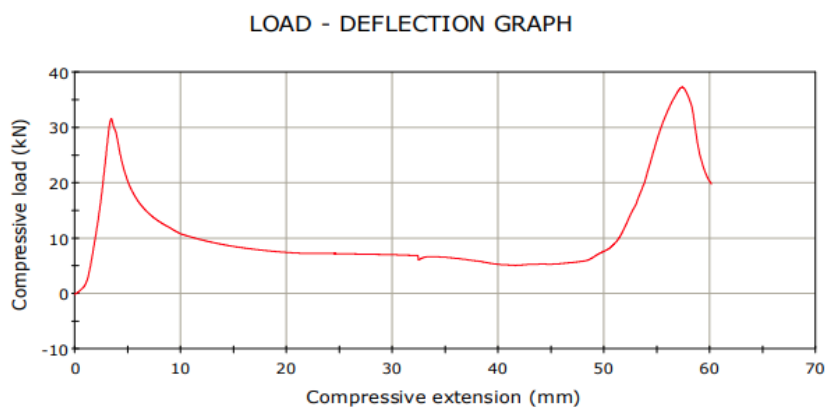
5. Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων, τα οποία εξήχθησαν από τον παλμογράφο της σφύρας πίπτουσας μάζας.

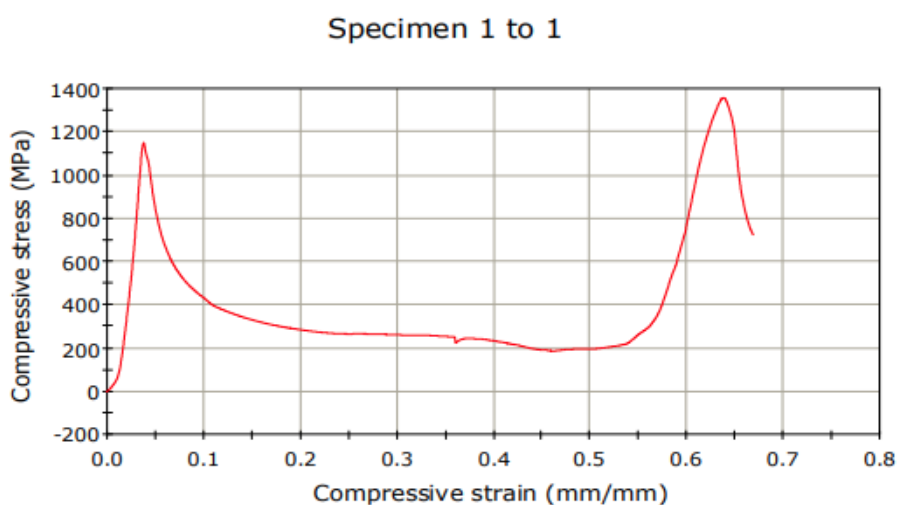
5.1 Στατική Φόρτιση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα διαγράμματα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Deflection) και Τάσης – Παραμόρφωσης (Stress – Strain) των δοκιμίων υπό την επιβολή σταθερού θλιπτικού φορτίου. Ακόμη, παρατίθενται φωτογραφίες από την κατάσταση στην οποία επήλθαν τα δοκίμια μετά τη δοκιμή θλίψης.

➤ Δοκίμιο S0_S (0°)



Διάγραμμα 5 . 1 . 1: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου S0_S



Διάγραμμα 5 . 1 . 2: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου S0_S

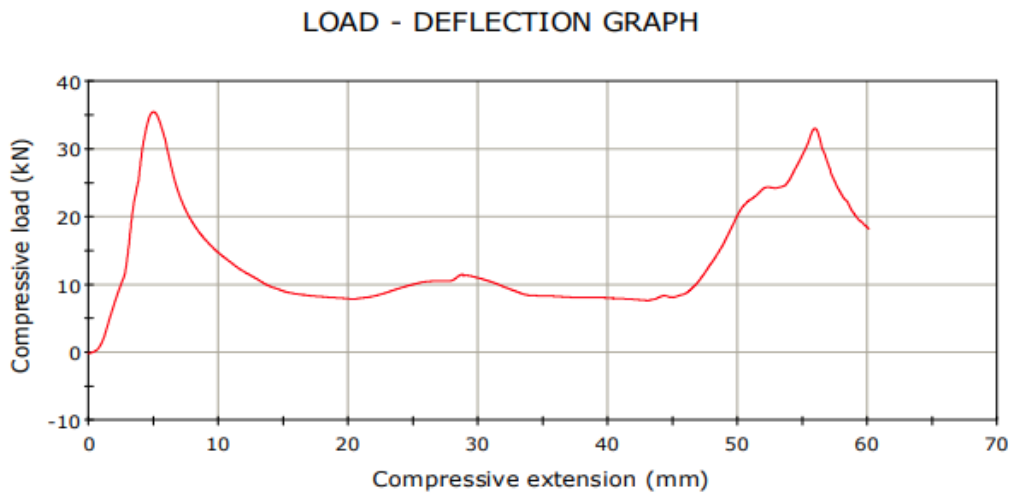


Εικόνα 5 . 1 . 1: S0_S μετά την κατάρρευση

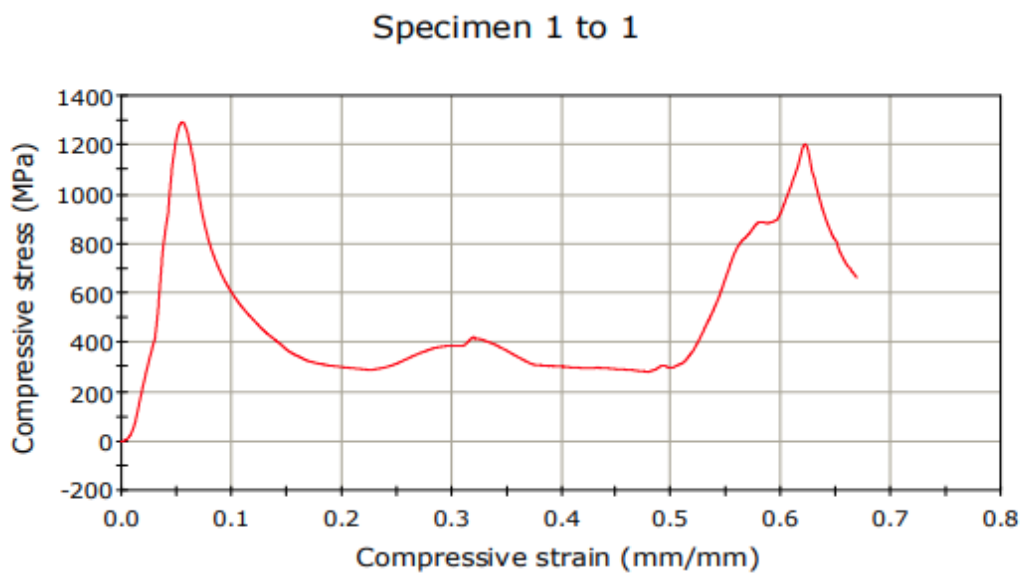
Σύμφωνα με το πρώτο διάγραμμα, το δοκίμιο S0_S δέχτηκε μέγιστο θλιπτικό φορτίο ίσο με περίπου 38 kN ενώ η συμπίεση (λόγω θλίψης) μετρήθηκε στα 60 mm.

Στο διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης, το δοκίμιο δέχθηκε μέγιστη θλιπτική τάση ίση με περίπου 1350 MPa ενώ η παραμόρφωση του ήταν ίση περίπου με 67% ίσο περίπου με το 1/3 του αρχικού.

➤ Δοκίμιο S30_S (30°)



Διάγραμμα 5.1.3: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου S30_S



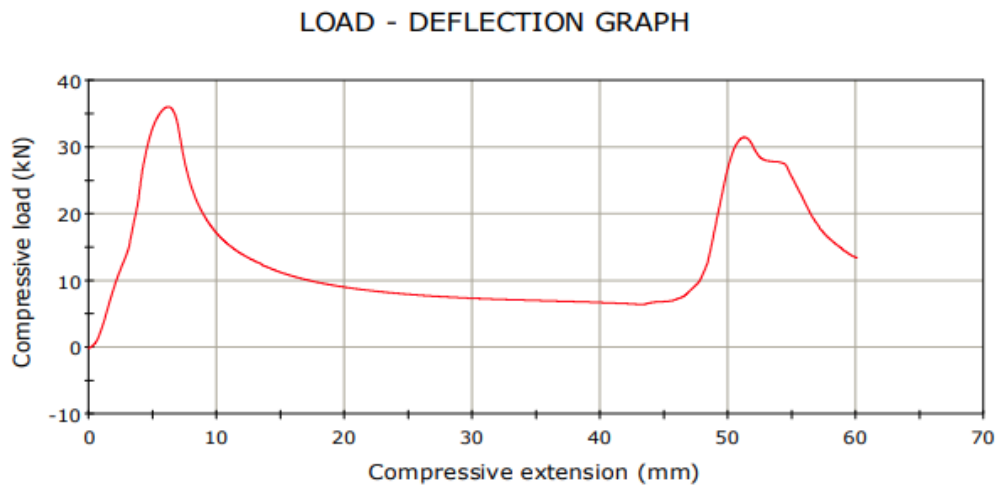
Διάγραμμα 5.1.4: Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης δοκιμίου S30_S



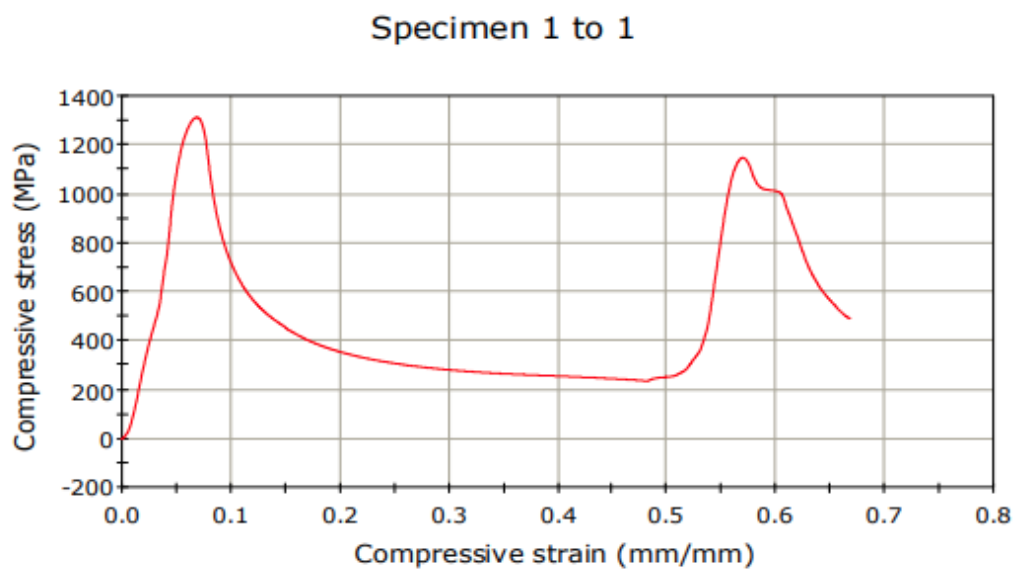
Εικόνα 5.1.2: S30_S μετά την κατάρρευση

Απ' τα διαγράμματα του δοκιμίου S30_S φαίνεται πως δέχτηκε μέγιστο θλιπτικό φορτίο ίσο με 35 kN περίπου, ενώ αντίστοιχα η μέγιστη τάση που αναπτύχθηκε ήταν της τάξεως των 1300 MPa και η παραμόρφωση του περίπου ίση με 67%. Παρατηρούμε πως υπάρχει ίδια περίπου συμπεριφορά κατάρρευσης μεταξύ του S0_S και του S30_S.

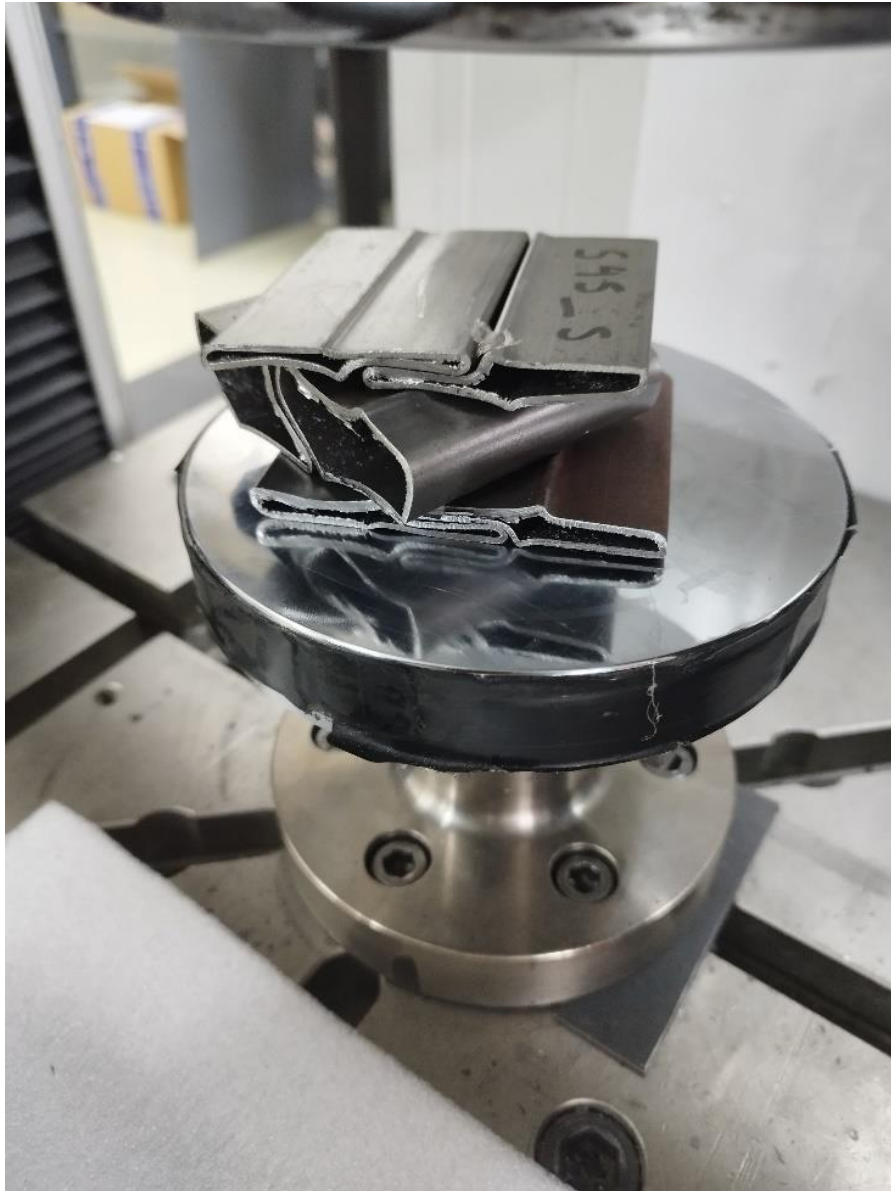
➤ Δοκίμιο S45_S (45°)



Διάγραμμα 5.1.5: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου S45_S



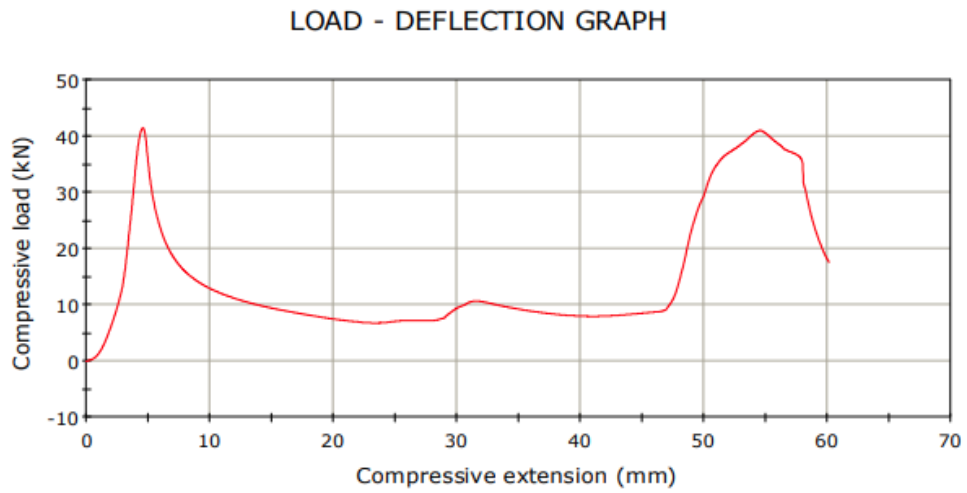
Διάγραμμα 5.1.6: Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης δοκιμίου S45_S



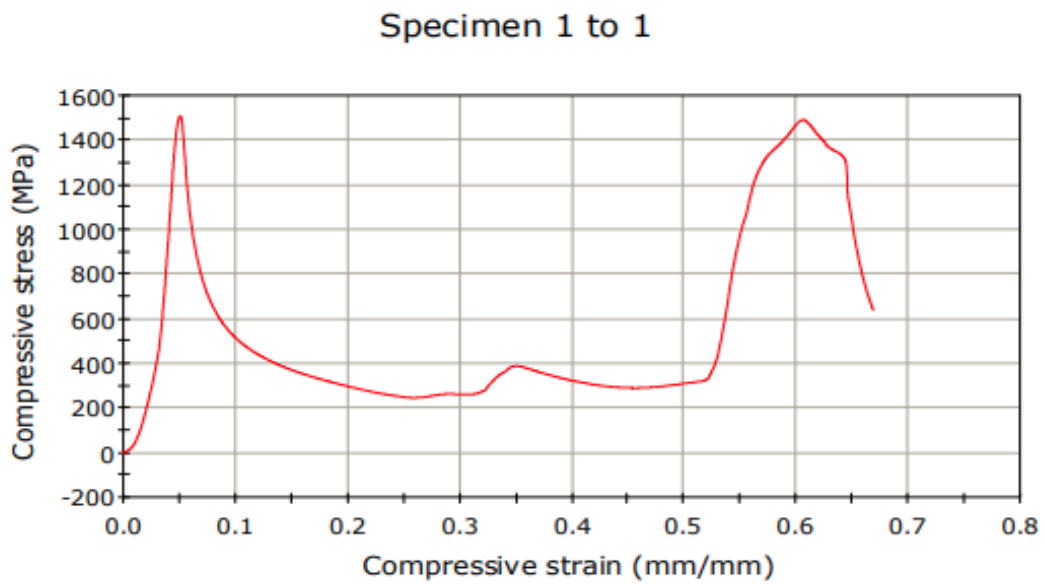
Εικόνα 5 . 1 . 3: S45_5 μετά την κατάρρευση

Στη συγκεκριμένη διάταξη το μέγιστο φορτίο που σημειώθηκε ήταν στα 35 kN, μέγιστη τάση στα 1300 MPa και η παραμόρφωση κατά την κατάρρευση περίπου στο 67%. Η διαφορά με τις προηγούμενες δύο διατάξεις είναι πως εκδηλώνεται πλήρης κάμψη του πρώτου και τρίτου στρώματος, ενώ στις άλλες διατάξεις εκδηλώνεται στο δεύτερο και τρίτο στρώμα.

➤ Δοκίμιο S90_S (90°)



Διάγραμμα 5.1.7: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου S90_S



Διάγραμμα 5.1.8: Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης δοκιμίου S90_S



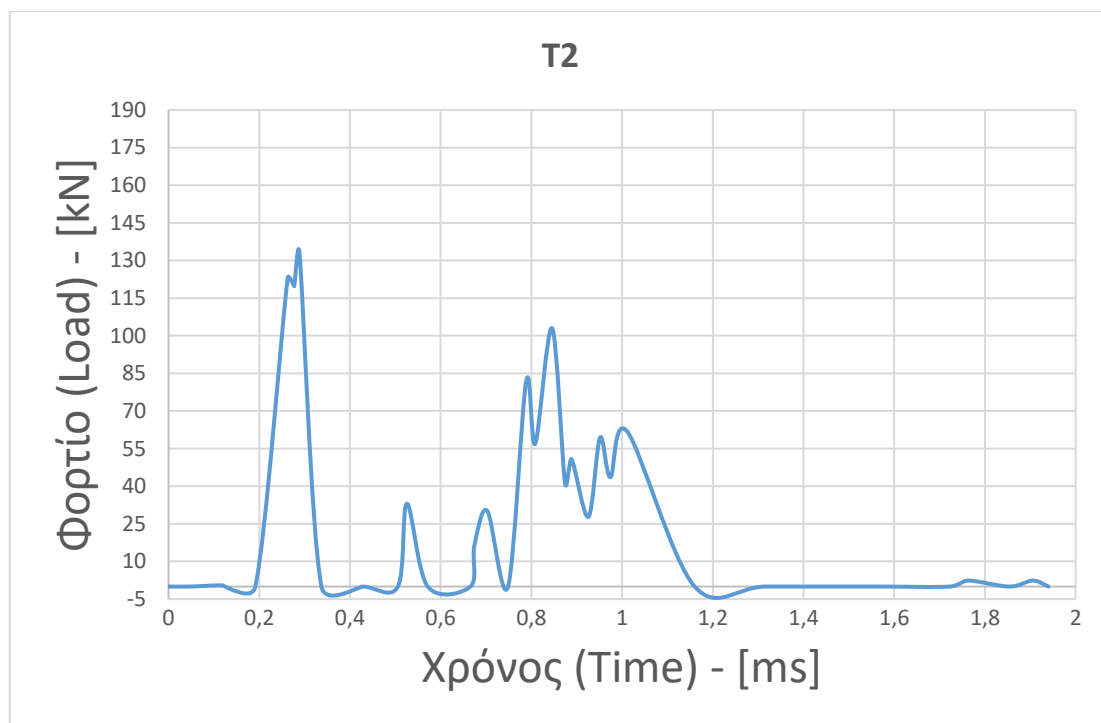
Εικόνα 5 . 1 . 4: S90_S μετά την κατάρρευση

Και εδώ ακολουθείται το ίδιο μοτίβο κατάρρευσης με το δοκίμιο S45_S. Το μέγιστο φορτίο που σημειώθηκε ήταν στα 42 kN, μέγιστη τάση στα 1500 MPa και η παραμόρφωση κατά την κατάρρευση περίπου στο 67%.

5.2 Δυναμική Φόρτιση

Παρακάτω, παρουσιάζονται τα διαγράμματα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) των δοκιμίων που υπεβλήθησαν σε δοκιμή αντοχής έναντι κρούσης με χρήση της σφύρας πίπτουσας μάζας. Επίσης, παρατίθενται φωτογραφίες των δοκιμίων μετά το πέρας της δοκιμής.

- Δοκίμιο T2 (90°)



Διάγραμμα 5 . 2 . 1: Δοκίμιο S90_D (T2) υπό δυναμική φόρτιση

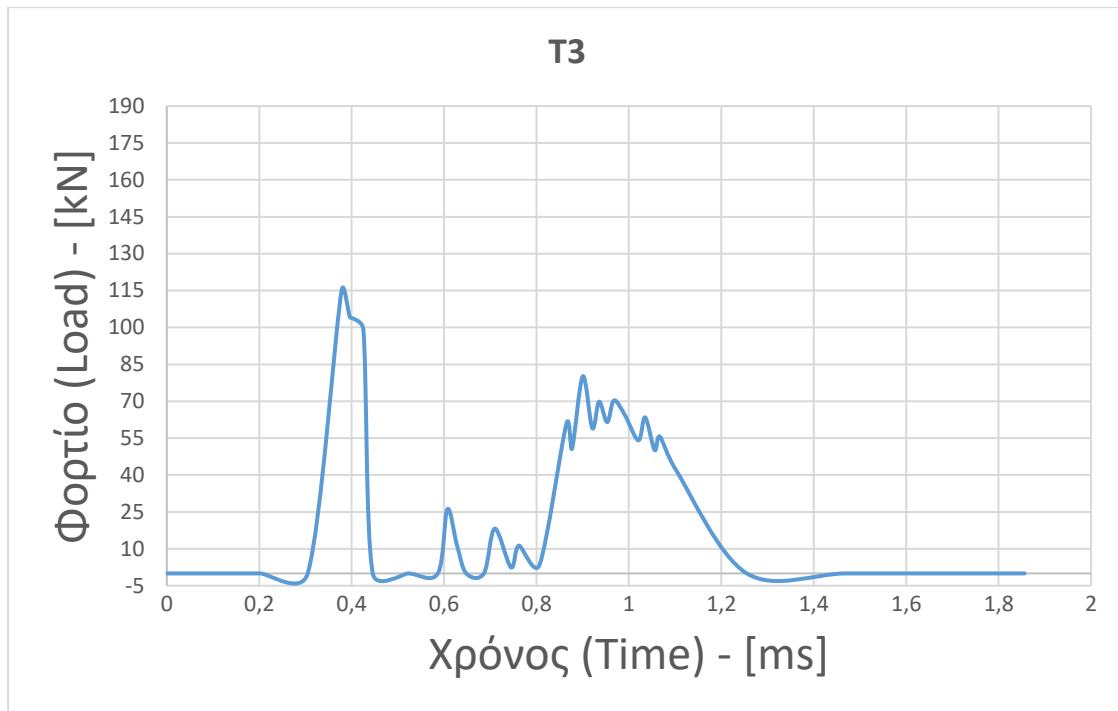


Εικόνα 5 . 2 . 1: Δοκίμιο S90_D (T2) μετά την κρούση

Σύμφωνα με το διάγραμμα του δοκιμίου T2 (90°) παρατηρούμε ότι η τελική του μορφή περιήλθε σε μέγιστο φορτίο ίσο με 133,13 kN.

Από την φωτογραφία του αποτελέσματος της κρουστικής καταπόνησης παρατηρούμε ότι οι τοπικές παραμορφώσεις έχουν επεκταθεί σε όλο τον όγκο του δοκιμίου και έχει επέλθει συνολική κατάρρευση που εκδηλώνεται με πλήρη κάμψη στην πρώτη και τρίτη στρώση ενώ στην μεσαία η κάμψη δεν είναι ολική.

- Δοκίμιο T3 (90°)



Διάγραμμα 5 . 2 . 2: Δοκίμιο S90_D (T3) υπό δυναμική φόρτιση

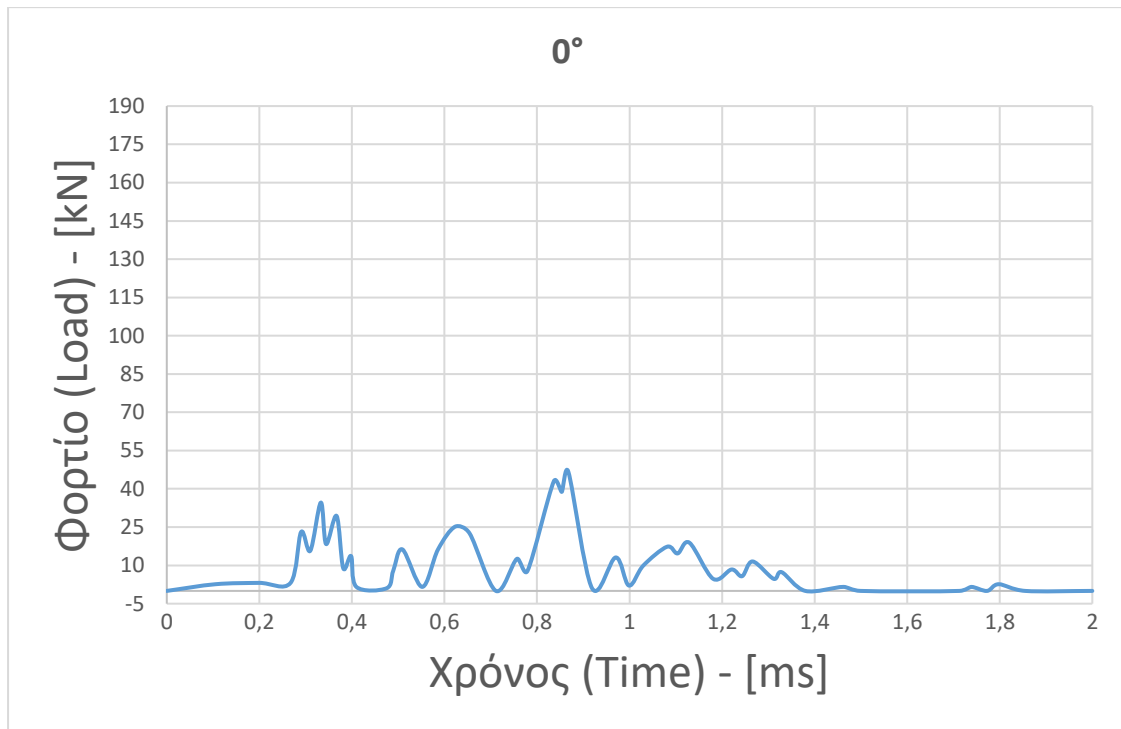


Εικόνα 5 . 2 . 2: Δοκίμιο S90_D (T3) μετά την κρούση

Στο διάγραμμα του δοκιμίου T3 (90°) παρατηρήθηκε πως ενώ η διάταξη είναι ίδια με αυτή του δοκιμίου T2 το μέγιστο βρίσκεται στα 115,08 kN.

Από την φωτογραφία του αποτελέσματος της κρουστικής καταπόνησης παρατηρούμε ότι και εδώ οι τοπικές παραμορφώσεις έχουν επεκταθεί σε όλο τον όγκο του δοκιμίου και έχει επέλθει συνολική κατάρρευση που εκδηλώνεται με πλήρη κάμψη στην πρώτη και τρίτη στρώση ενώ στην μεσαία η κάμψη δεν είναι ολική.

- Δοκίμιο S0_S (0°)



Διάγραμμα 5 . 2 . 3: Δοκίμιο S0_D υπό δυναμική φόρτιση

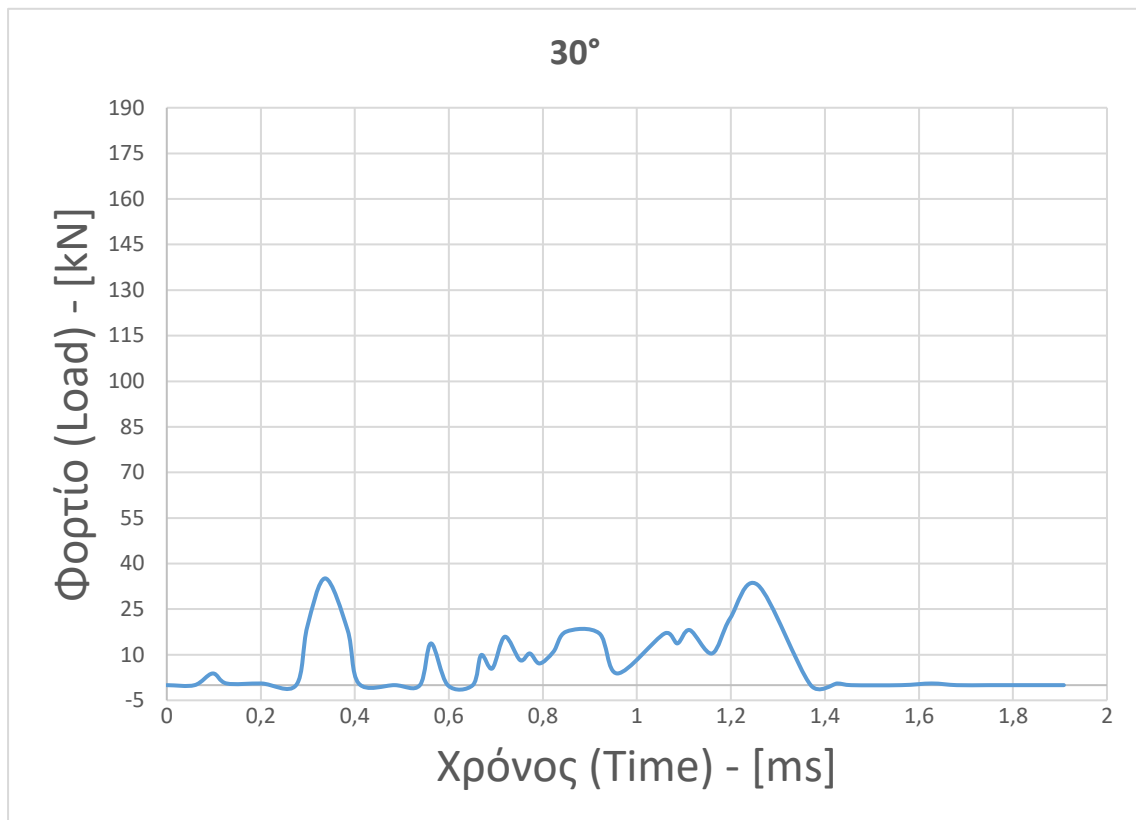


Εικόνα 5 . 2 . 3: Δοκίμιο S0_D μετά την κρούση

Στο διάγραμμα του δοκιμίου S0_D παρατηρήθηκε πως η τελική παραμόρφωση περιήλθε σε μέγιστο φορτίο ίσο με 46,6 kN, αρκετά μικρότερο από αυτό των 90°.

Από την φωτογραφία του αποτελέσματος παρατηρούμε οι τοπικές παραμορφώσεις έχουν επεκταθεί σε όλο τον όγκο του δοκιμίου και έχει επέλθει συνολική κατάρρευση που εκδηλώνεται με πλήρη κάμψη. Ακόμα, βλέπουμε πως η διάταξη έχει αποκολληθεί.

- Δοκίμιο S30_D (30°)



Διάγραμμα 5 . 2 . 4: Δοκίμιο S30_D υπό δυναμική φόρτιση

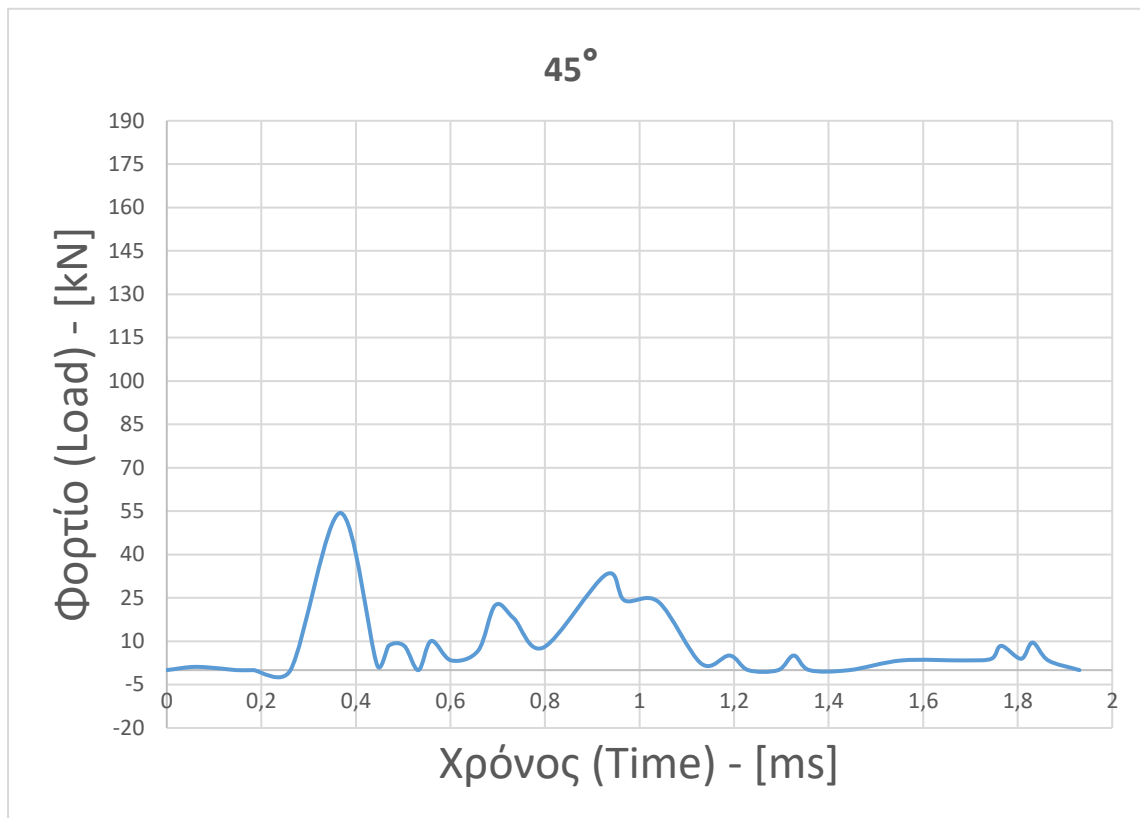


Εικόνα 5 . 2 . 4: Δοκίμιο S30_D μετά την κρούση

Στο διάγραμμα του δοκιμίου S30_D παρατηρήθηκε πως η τελική παραμόρφωση περιήλθε σε μέγιστο φορτίο ίσο με 35,13 kN.

Στην φωτογραφία του αποτελέσματος υπάρχει συνολική κατάρρευση της διάταξης που εκδηλώνεται με πλήρη κάμψη όλων των στρωμάτων.

- Δοκίμιο S45_D (45°)



Διάγραμμα 5 . 2 . 5: Δοκίμιο S45_D υπό δυναμική φόρτιση

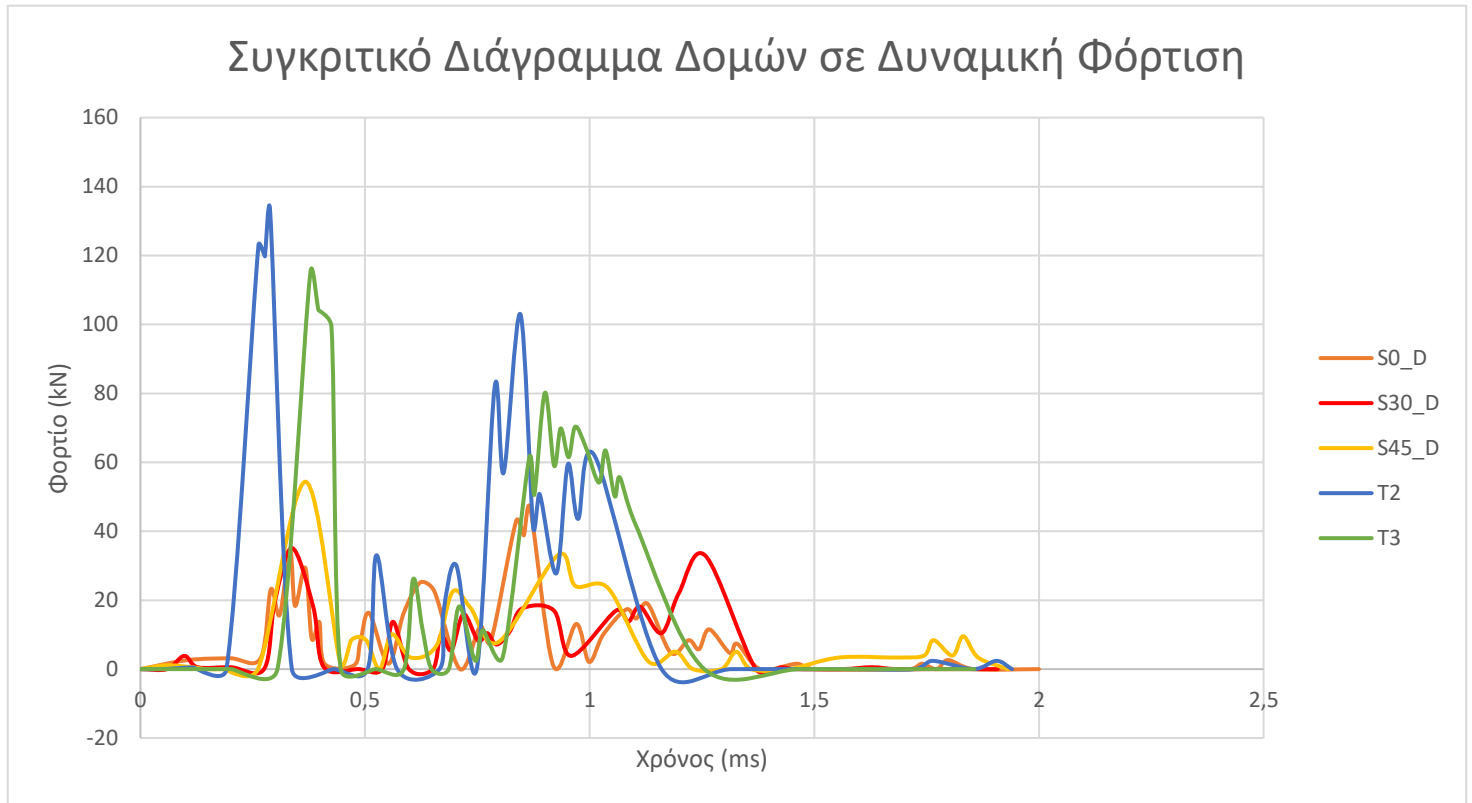


Εικόνα 5 . 2 . 5: Δοκίμιο S45_D μετά την κρούση

Στο διάγραμμα του δοκιμίου S45_D η τελική παραμόρφωση περιήλθε σε μέγιστο φορτίο ίσο με 54,36 kN.

Από την φωτογραφία του αποτελέσματος της κρουστικής καταπόνησης παρατηρούμε ότι και εδώ οι τοπικές παραμορφώσεις έχουν επεκταθεί σε όλο τον όγκο του δοκιμίου και έχει επέλθει συνολική κατάρρευση που εκδηλώνεται με πλήρη κάμψη στην δεύτερη και τρίτη στρώση ενώ στην πρώτη η κάμψη δεν είναι ολική.

Στο παρακάτω διάγραμμα, παρουσιάζονται από κοινού τα διαγράμματα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) των δομών, προκειμένου να καταστεί ευκολότερη η σύγκρισή τους.



Διάγραμμα 5. 2. 6: Συγκριτικό διάγραμμα δομών υπό δυναμική καταπόνηση

Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου για τις κρουστικές δοκιμές στη σφύρα, καθίσταται εμφανές ότι η διάταξη T2 & T3 παρουσιάζει σαφώς καλύτερη αντίδραση σε σχέση με τις υπόλοιπες, με το μέγιστο φορτίο να είναι σχεδόν τριπλάσιο από των υπόλοιπων δομών. Ταυτόχρονα, η παραμόρφωση είναι όπως φαίνεται η μικρότερη, καθώς το ενδιάμεσο στρώμα σχεδόν διατηρεί το σχήμα του σε αντίθεση με τις άλλες τρεις δομές που σχεδόν καταστράφηκαν.

6. Προσομοίωση Πειραματικού Προγράμματος με LS-Dyna

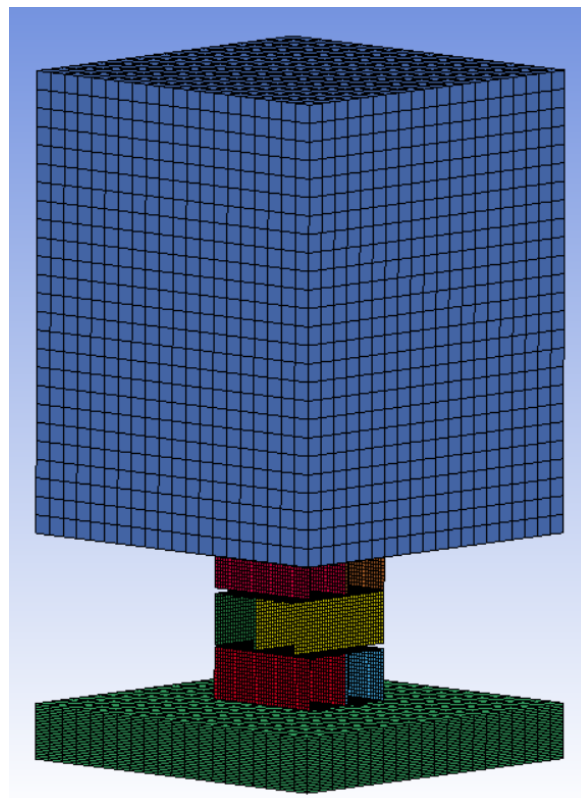
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η μεθοδολογία για τη μοντελοποίηση και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δυναμικής φόρτισης με τη χρήση του προγράμματος LS DYNA. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων, προκειμένου αφενός να ελεγχθεί κατά πόσο η θεωρητική επίλυση προσεγγίζει την πραγματικότητα και, αφετέρου, να διαπιστωθεί εάν, και γιατί, ενδεχομένως υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ των δύο.

6.1 Δημιουργία Δοκιμίων

Οι γεωμετρίες σχηματίζονται στο περιβάλλον του **Mesh**. Οι σωληνωτές διατομές διαστάσεων 30 mm X 30 mm, και μήκους 70 mm, σχεδιάστηκαν στο περιβάλλον του **Shape Mesher**, ως **box shells**, ώστε να θεωρηθούν ως λεπτότοιχες διατομές. Δεδομένου ότι το πάχος ορίζεται αριθμητικά (και όχι σχεδιαστικά) στη συνέχεια, τα στοιχεία σχεδιάστηκαν με διαστάσεις πλευρών μειωμένες κατά το πάχος του στοιχείου (2 mm για τις ανάγκες της προσομοίωσης), και με απόσταση η μία από την άλλη επίσης ίση με 2 mm. Έτσι, οι τελικές διαστάσεις των σωλήνων ήταν 28 mm X 28 mm.

Η κινούμενη πλάκα της σφύρας και η απαραμόρφωτη πλάκα της βάσης σχεδιάστηκαν ως **box solid** στοιχεία.

Με την εντολή **Element Edit** αφαιρέθηκαν οι δύο επιφάνειες οι οποίες ήταν κάθετες στο διαμήκη άξονα του κάθε στοιχείου.

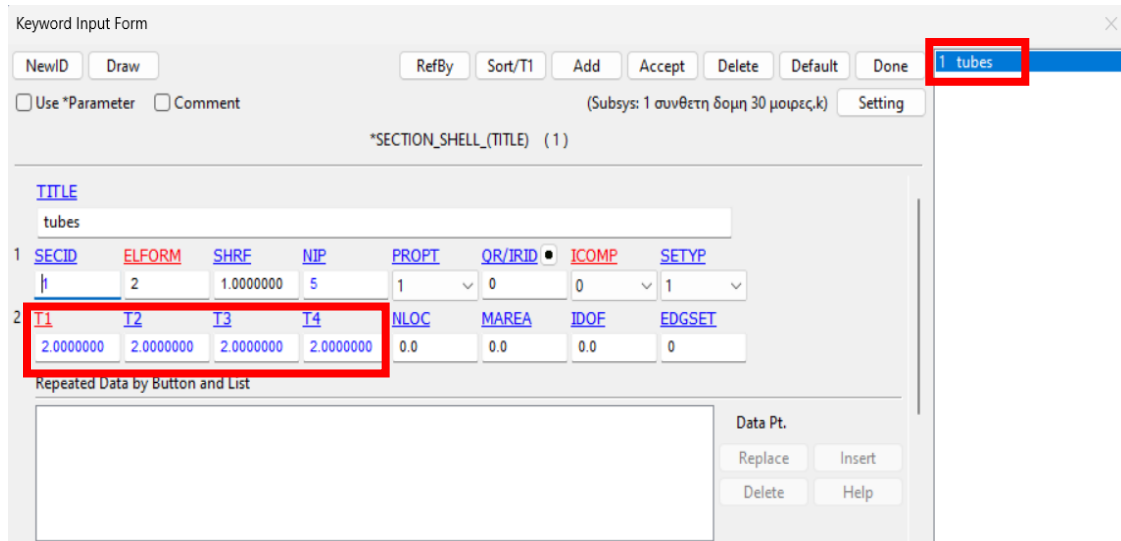


Εικόνα 6.1.1: Δομή πριν την προσομοίωση κρούσης

Η διάσταση του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων (Mesh) ορίστηκε στα 2 mm. Οι διαστάσεις της σφύρας ορίστηκαν στα 200 X 200 X 250 mm, προκειμένου να ανταποκρίνονται στη μάζα της, η οποία είναι 78 kg.

6.2 Καθορισμός Οριακών Συνθηκών

Κατά την μοντελοποίηση, δημιουργού τα **Sections**, μέσω του keyword manager, και συγκεκριμένα του **Shell Section** (για τους σωλήνες) και του **Solid Section** (για τις πλάκες). Στο Shell Section ορίζουμε επίσης το πάχος των σωλήνων ίσο με 2 mm.



Keyword Input Form

Subsys: 1 συνθετη δομη 30 μοιρες,k

*SECTION_SHELL_(TITLE) (1)

TITLE: tubes

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
	2.0000000	2.0000000	2.0000000	2.0000000	0.0	0.0	0.0	0

Repeated Data by Button and List

Data Pt. Buttons: Replace, Insert, Delete, Help

Εικόνα 6.2.1: Δημιουργία Shell Section για τα σωληνωτά δοκίμια



Keyword Input Form

Subsys: 1 συνθετη δομη 30 μοιρες,k

*SECTION_SOLID_(TITLE) (2)

TITLE: plup

1	SECID	ELFORM	AET	UNUSED	UNUSED	UNUSED	COHOFF	GASKETT
	2	1	0				0.0	0.0

Buttons: 2 plup, 3 pldn

Εικόνα 6.2.2: Δημιουργία Solid Section: plup για τη σφύρα και pldn για την απαραμόρφωτη κάτω πλάκα

Το επόμενο σημαντικό βήμα είναι ο προσδιορισμός των του πειράματος. Αυτό πραγματοποιήθηκε μέσω του **Mat** (από το περιβάλλον του keyword manager).

Στην 1^η σειρά ορίζεται η πυκνότητα του υλικού (0.0078 g/mm^3), το μέτρο ελαστικότητας ($E= 207000 \text{ MPa}$), ο λόγος Poisson ($\nu=0.30$) και το όριο διαρροής του υλικού ($SIGY= 340 \text{ MPa}$).

Επίσης, δίνονται οκτώ ζεύγη σημείων από την καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης του υλικού.

Εικόνα 6 . 2 . 3: Ορισμός υλικού (χάλυβα) για τις διατομές

Στη συνέχεια, προσδιορίστηκαν οι ιδιότητες του υλικού της σφύρας και της κάτω πλάκας με τρόπο αντίστοιχο με αυτό των σωλήνων ενώ επίσης προσδιορίστηκαν και οι βαθμοί ελευθερίας κίνησης των δύο σωμάτων.

- Για τη σφύρα ο μόνος ενεργός βαθμός ελευθερίας είναι αυτός της κίνησης κατά τον Z-άξονα.
- Για την κάτω πλάκα, από την στιγμή που δεν κινείται περιορίστηκαν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας.

Εικόνα 6 . 2 . 4: Ορισμός υλικού και βαθμών ελευθερίας για σφύρα

Keyword Input Form

NewID MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 συνθετη δομη 30 μοιρες,k) Setting

*MAT_RIGID_(TITLE) (020) (2)

TITLE
pldn

1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
	3	0.0078000	2.070e+05	0.3000000	0.0	0	0.0	
2	CMO	CON1	CON2					
	1.0	7	7					
3	LCO OR A1	A2	A3	V1	V2	V3		
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Εικόνα 6.2.5: Ορισμός υλικού και βαθμών ελευθερίας για απαραμόρφωτη κάτω πλάκα

Έπειτα, ακολούθησε η ενοποίηση των έξι σωλήνων σε ένα σετ, με την εντολή **Set** → **Part List**, ώστε να συμπεριφέρονται ως ένα σώμα.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 συνθετη δομη 30 μοιρες,k) Setting

*SET_PART_LIST_(TITLE) (1)

TITLE
tubes

1	SID	DA1	DA2	DA3	DA4	SOLVER
	1	0.0	0.0	0.0	0.0	MECH

Repeated Data by Button and List

2	PID1	PID2	PID3	PID4	PID5	PID6	PID7	PID8
	1	2	3	4	5	6	0	0

Range Set Data

1	1	1	2	3	4	5	6	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Data Pt. 1
Replace
Insert
Delete

Εικόνα 6.2.6: Δημιουργία σετ αποτελούμενα από τα επιμέρους parts (ορθογωνικές σωληνωτές διατομές)

Το επόμενο βήμα ήταν η αντιστοίχιση των στοιχείων (σωλήνες και πλάκες) με τα υλικά και τις διατομές.

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' for 'SquareTube 1'. The title field contains 'SquareTube 1'. Below it, a table of properties is displayed with a red box highlighting the first three columns: PID, SECID, and MID. The values are 1, 1, and 1 respectively. Other columns include EOSID (0), HGID (1), GRAV (0), ADPOPT (0), and TMID (0). The right sidebar lists parts 1 through 8, with 'SquareTube 1' selected.

PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADPOPT	TMID
1	1	1	0	1	0	0	0

Εικόνα 6.2.7: Αντιστοίχιση των στοιχείων κελυφωτής διατομής (shell section) με τα στοιχεία των δοκιμίων (parts) και το υλικό (material)

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' for 'plup'. The title field contains 'plup'. Below it, a table of properties is displayed with a red box highlighting the first three columns: PID, SECID, and MID. The values are 7, 2, and 2 respectively. Other columns include EOSID (0), HGID (0), GRAV (0), ADPOPT (0), and TMID (0). The right sidebar lists parts 1 through 8, with 'plup' selected.

PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADPOPT	TMID
7	2	2	0	0	0	0	0

Εικόνα 6.2.8: Αντιστοίχιση του στοιχείου της σφύρας (plup) με το υλικό (rigid material) και τη διατομή (solid section)

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' for 'pldn'. The title field contains 'pldn'. Below it, a table of properties is displayed with a red box highlighting the first three columns: PID, SECID, and MID. The values are 8, 3, and 3 respectively. Other columns include EOSID (0), HGID (0), GRAV (0), ADPOPT (0), and TMID (0). The right sidebar lists parts 1 through 8, with 'pldn' selected.

PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADPOPT	TMID
8	3	3	0	0	0	0	0

Εικόνα 6.2.9: Αντιστοίχιση του στοιχείου της κάτω πλάκας (pldn) με το υλικό (rigid material) και τη διατομή (solid section)

Έπειτα, πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των διεπιφανειών (**Contacts**) με την εντολή **Contact → Nodes to Surface** για τις διεπιφάνειες μεταξύ δομής σωλήνων και σφύρας καθώς και μεταξύ δομής και κάτω πλάκας. Ορίστηκε η δομή ως το τμήμα που δέχεται την παραμόρφωση ενώ η σφύρα και η πλάκα ως τμήματα που επιβάλλουν την παραμόρφωση. Στην πέμπτη σειρά του παραθύρου διαλόγου, ορίστηκαν οι συντελεστές τριβής μεταξύ των επιφανειών.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 συνθετη δομη 30 μοιρες,k) Setting

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

CID	TITLE	MPP1		MPP2				
1	plup-tubes							
2	IGNORE	BCKT	LCBCKT	NS2TRK	INITITR	PARMAX	UNUSED	CPRMB
	0	200		3	2	1.0005		0
3	UNUSED	CHKSEGS	PENSE	GRPABLE				
	0		1.0	0				
4	SURFA	SURFB	SURFATYP	SURFBTYP	SABOXID	SBBOXID	SAPR	SBPR
	1	7	2	3	0	0	0	0
5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.2000000	0.1500000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20
6	SFSA	SFSB	SAST	SBST	SFSAT	SFSBT	FSF	VSF
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000

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

Εικόνα 6 . 2 . 10: Ορισμός ιδιοτήτων διεπιφανειών δομής-σφύρας και δομής-κάτω πλάκας

Με την εντολή **Contacts → Automatic Single Surface** ορίστηκαν οι ιδιότητες των διεπιφανειών εσωτερικά της δομής.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 συνθετη δομη 30 μοιρες,k) Setting

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

CID	TITLE	MPP1		MPP2				
1	tubes							
2	IGNORE	BCKT	LCBCKT	NS2TRK	INITITR	PARMAX	UNUSED	CPRMB
	0	200		3	2	1.0005		0
3	UNUSED	CHKSEGS	PENSE	GRPABLE				
	0		1.0	0				
4	SURFA	SURFB	SURFATYP	SURFBTYP	SABOXID	SBBOXID	SAPR	SBPR
	1	0	2	0	0	0	0	0
5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20
6	SFSA	SFSB	SAST	SBST	SFSAT	SFSBT	FSF	VSF
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000

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

Εικόνα 6 . 2 . 11: Ορισμός ιδιοτήτων αλληλεπίδρασης διεπιφανειών εσωτερικά της δομής

Με την εντολή **Initial → Velocity Rigid Body** αποδόθηκε η ταχύτητα πτώσης της σφύρας από ύψος 1.5 m, η οποία υπολογίστηκε από τη σχέση $V = \sqrt{2 \times g \times h} = 5.47 \text{ mm/ms}$ (τοποθετήθηκε με αρνητικό πρόσημο), με επιτάχυνση βαρύτητας $g=9.8 \text{ m/s}^2$. Παράλληλα ορίστηκε ο χρόνος τερματισμού κρουστικής δοκιμής στα 40 ms.

PID	VX	VY	VZ	VXR	VYR	VZR	ICID
7	0.0	0.0	-5.4770002	0.0	0.0	0.0	0

Εικόνα 6 . 2 . 12: Απόδοση ταχύτητας πτώσης σφύρας από ύψος 1.5 m

ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS	NOSOL
40.000000	0	0.0	0.0	1.000e+08	0

Εικόνα 6 . 2 . 13: Ορισμός χρόνου τερματισμού κρουστικής δοκιμής στα 40 ms

Για το τύπο στιβαρότητας που ακολουθείται κατά την παραμόρφωση των στοιχείων μόνο των μοντέλων των δοκιμίων 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 στιβαρότητας 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 συνθετη δομη 30 μοιρες,k) Setting

*HOURLASS_(TITLE) (1)

TITLE
tubes

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

COMMENT:

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

Εικόνα 6 . 2 . 14: Επιλογή μοντέλου Hourglass

Τέλος, με τις εντολές **ASCII → RCFORC** και **ASCII → RBDOUT**, εξήχθησαν τα διαγράμματα Φορτίου – Χρόνου και Μετατόπισης – Χρόνου, ενώ στη συνέχεια με διασταύρωση αυτών εξήχθη το διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης.

Keyword Input Form

Use *Parameter Comment Accept Done

Subsys: Setting

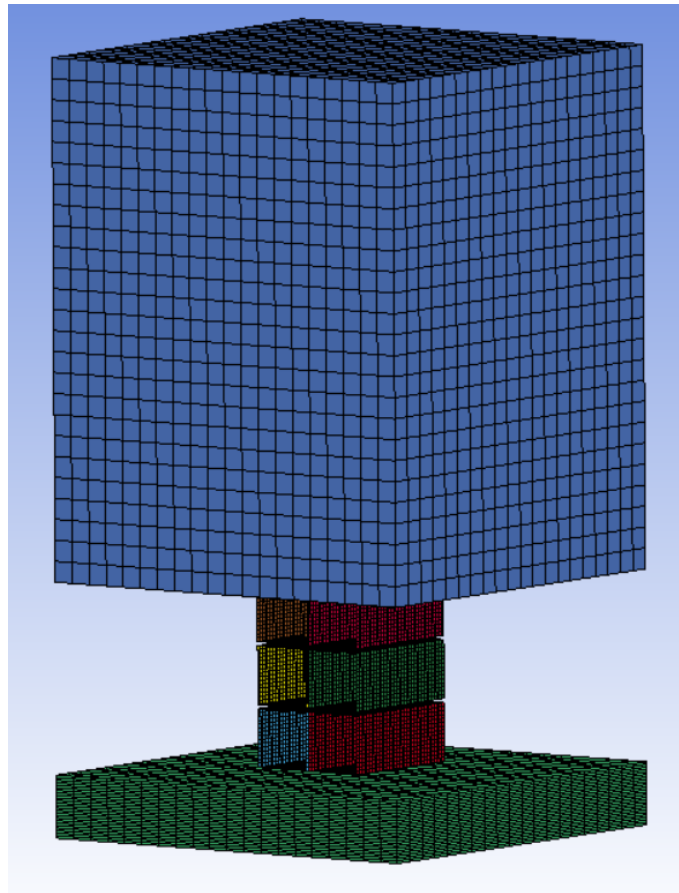
*DATABASE_OPTION (2)

<input type="checkbox"/> PLYOUT	DT	BINARY	LCUR	IOOPT
	0.0	0	0	1
<input type="checkbox"/> PRTUBE	DT	BINARY	LCUR	IOOPT
	0.0	0	0	1
<input type="checkbox"/> PYRO	DT	BINARY	LCUR	IOOPT
	0.0	0	0	1
<input checked="" type="checkbox"/> RBDOUT	DT	BINARY	LCUR	IOOPT
	0.1	0	0	1
<input checked="" type="checkbox"/> RCFORC	DT	BINARY	LCUR	IOOPT
	0.1	0	0	1
<input type="checkbox"/> RWFORC	DT	BINARY	LCUR	IOOPT
	0.0	0	0	1
<input type="checkbox"/> SBTOUT	DT	BINARY	LCUR	IOOPT
	0.0	0	0	1

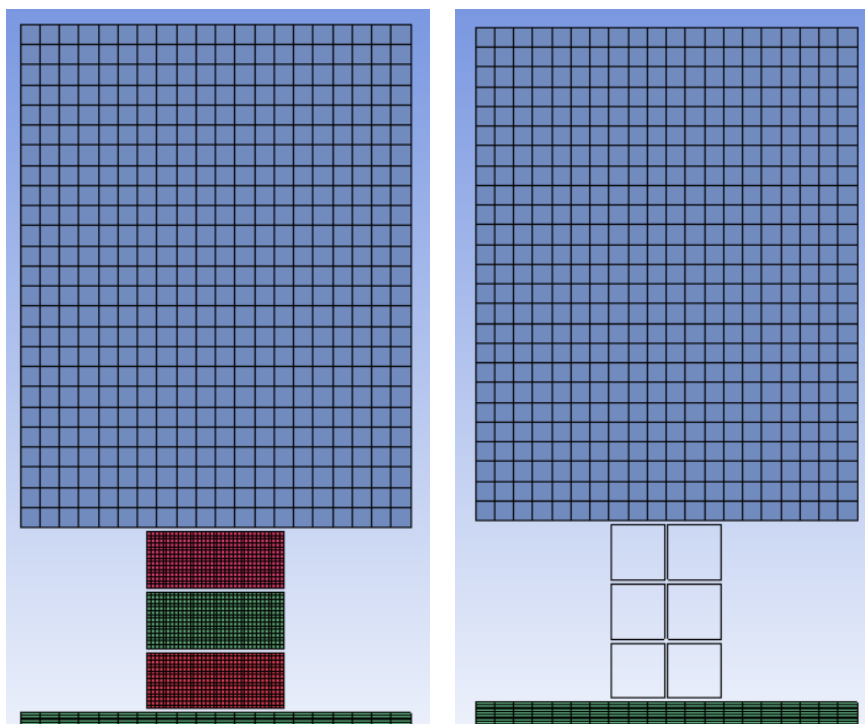
Εικόνα 6 . 2 . 15: Εντολές για διαγράμματα Φορτίου – Χρόνου και Μετατόπισης – Χρόνου

6.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

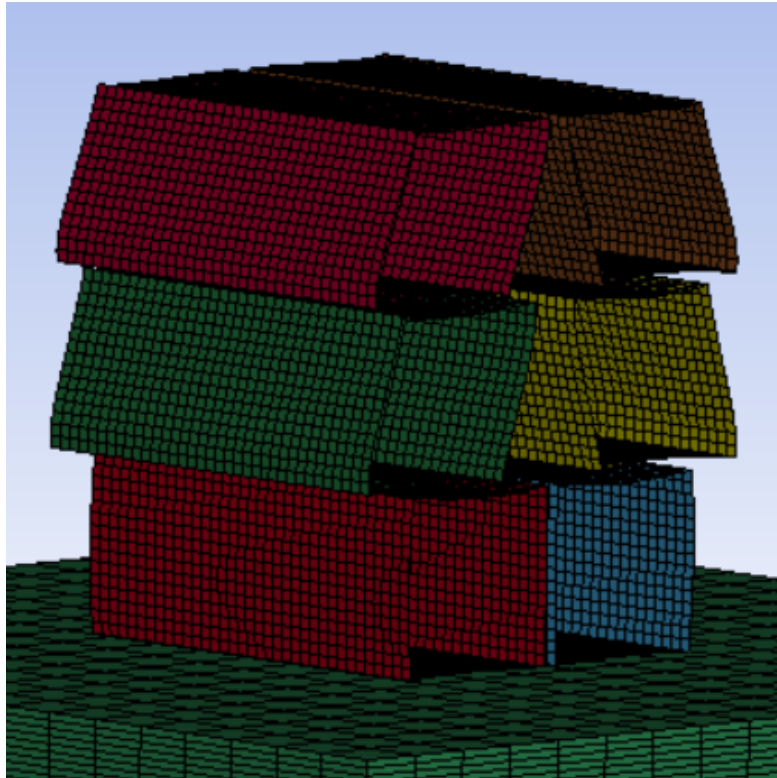
6.3.1 Δοκίμο S0_D



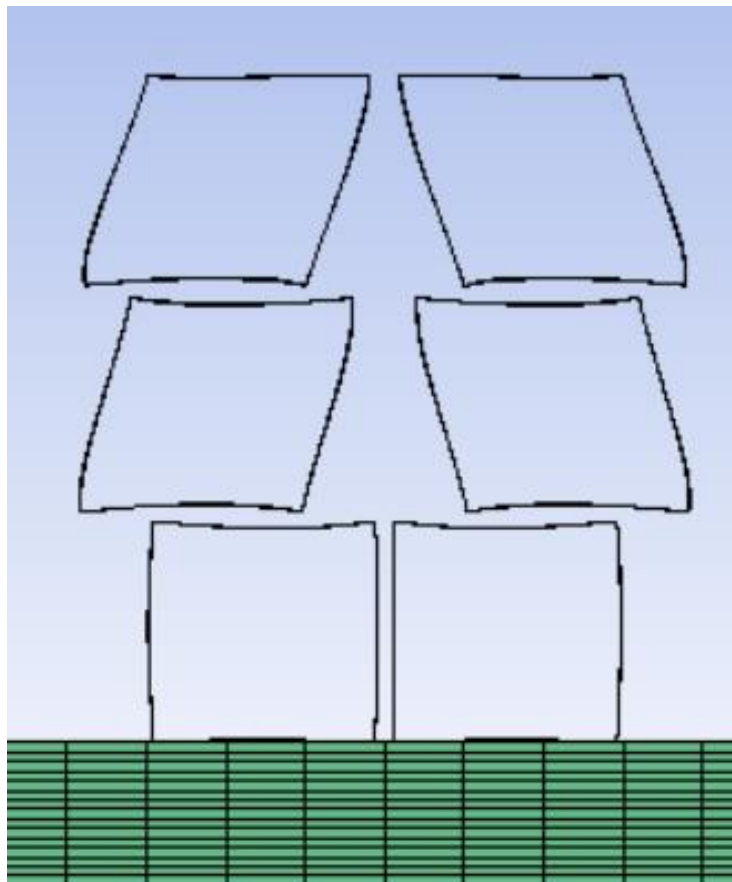
Εικόνα 6.3.1.1: Δοκίμο S0_D



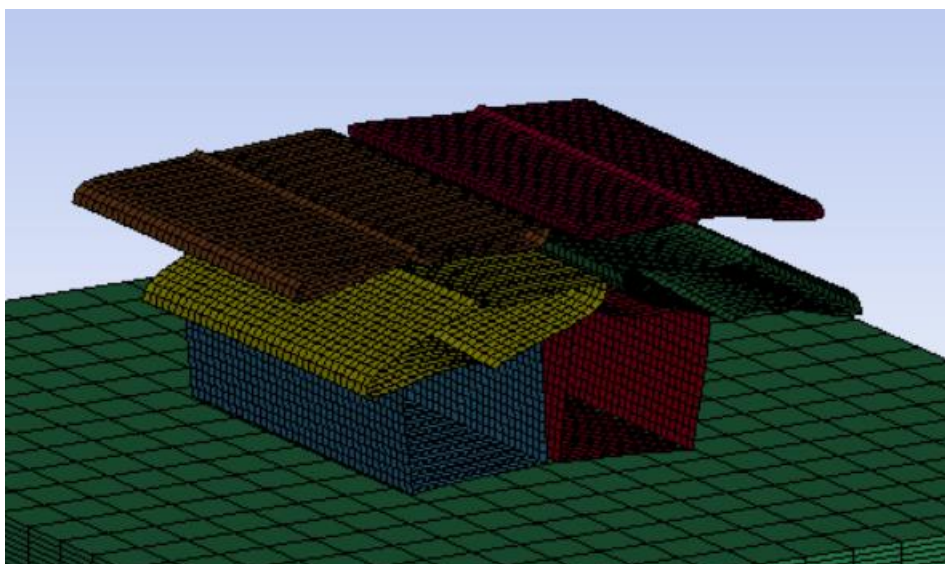
Εικόνα 6.3.1.2: Πρόσψη και πλάγια όψη δοκίμου S0_D



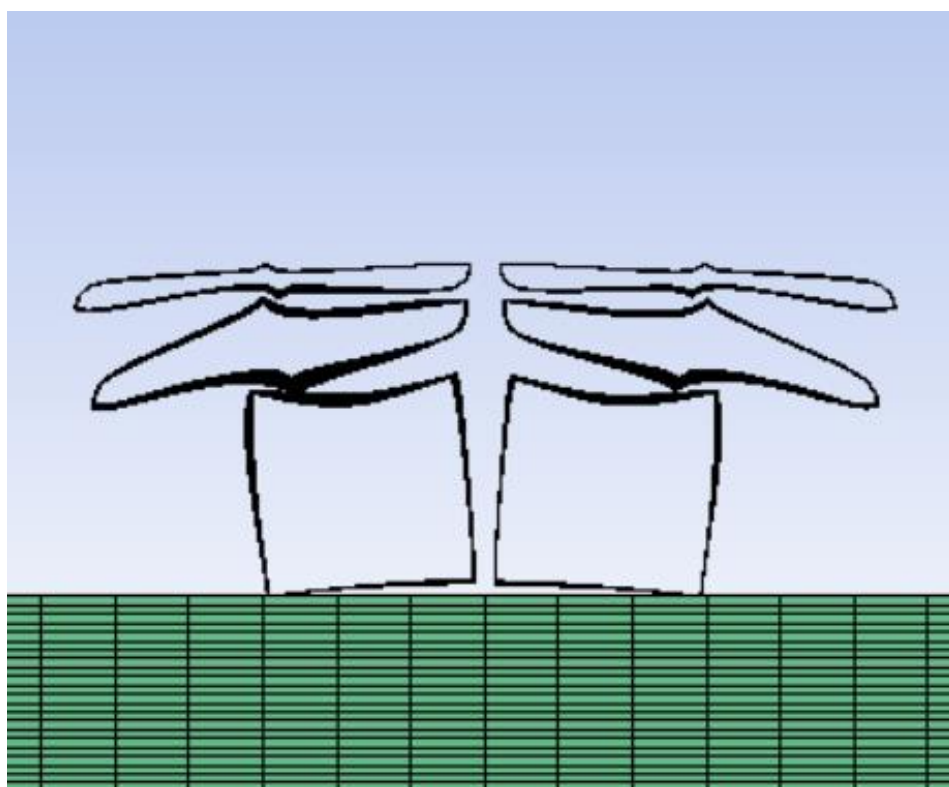
Εικόνα 6 . 3 . 1 . 4: Πλάγια όψη δοκιμίου SO_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης



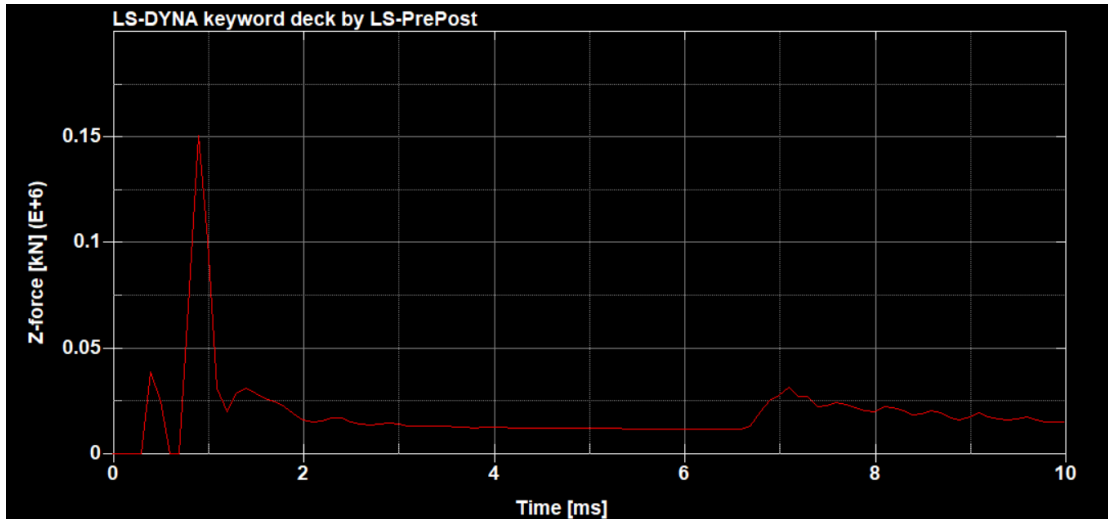
Εικόνα 6 . 3 . 1 . 3: Πρόσοψη δοκιμίου SO_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης



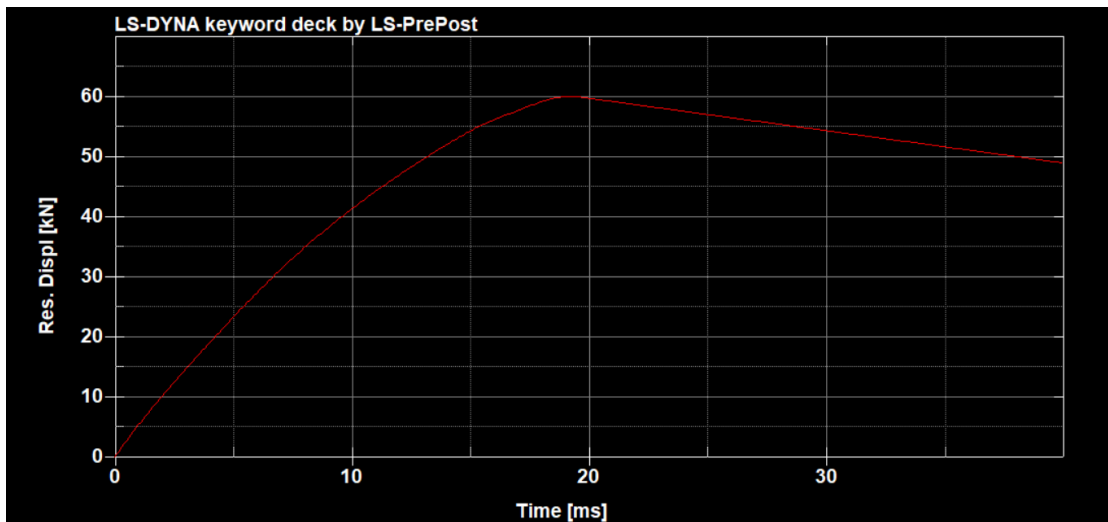
Εικόνα 6 . 3 . 1 . 5: Πλάγια όψη δοκιμίου S0_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης



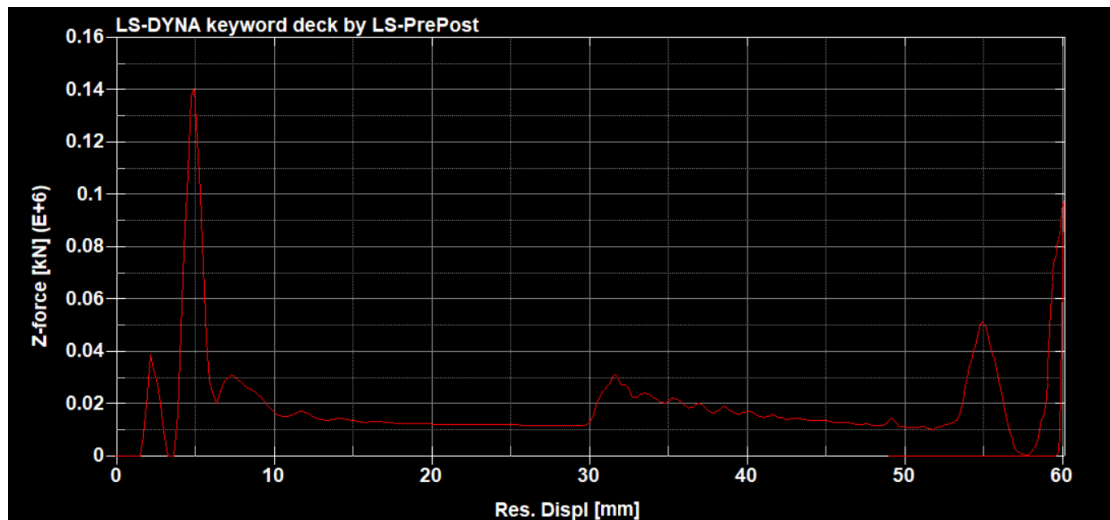
Εικόνα 6 . 3 . 1 . 6: Πρόσοψη δοκιμίου S0_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης



Διάγραμμα 6.3.1.1: Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) δοκιμίου S0_D



Διάγραμμα 6.3.1.2: Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) δοκιμίου S0_D

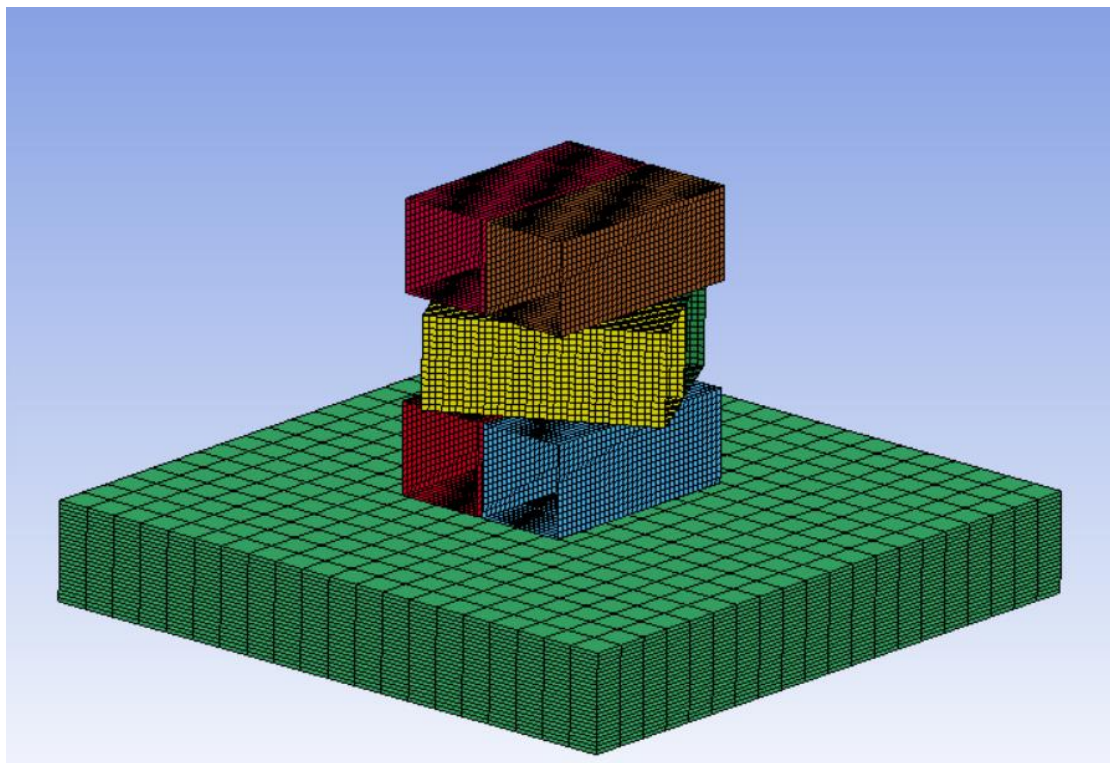


Διάγραμμα 6.3.1.3: Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Displacement) δοκιμίου S0_D

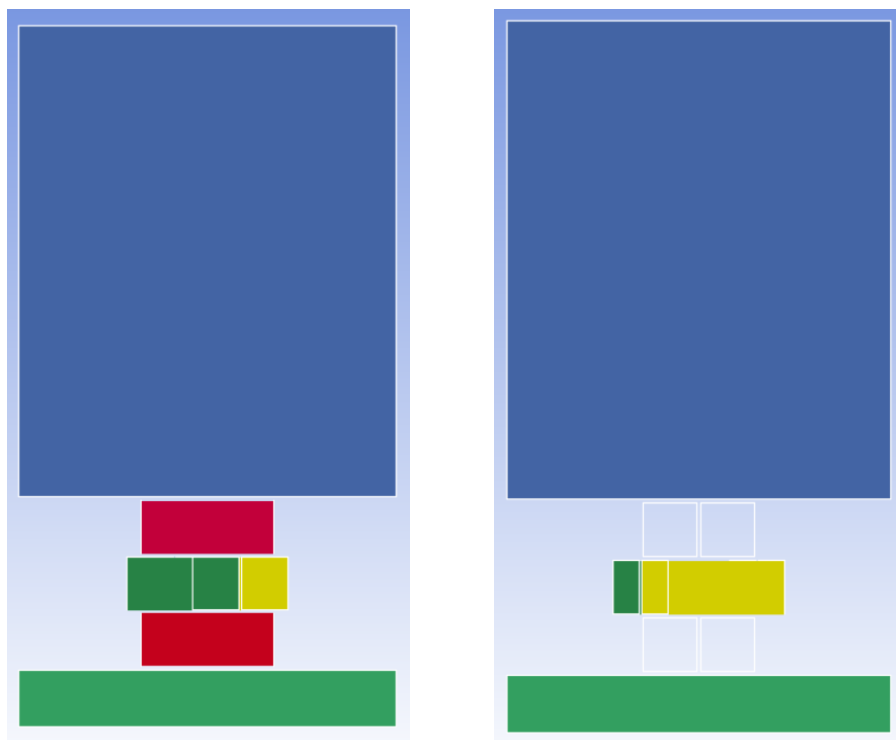
Σύμφωνα με το διάγραμμα της προσομοίωσης του δοκιμίου S0_D (0°) παρατηρούμε ότι το μέγιστο φορτίο (140 kN) έχει προκαλέσει παραμόρφωση ίση με 5 mm. Η τελική παραμόρφωση της διάταξης είναι ίση με 60 mm.

Στο στιγμιότυπο του αποτελέσματος της προσομοίωσης υπάρχει συνολική κατάρρευση της διάταξης που εκδηλώνεται με πλήρη κάμψη του πρώτου στρώματος, μερική του δεύτερου ενώ το τρίτο έχει παραμορφωθεί ελάχιστα.

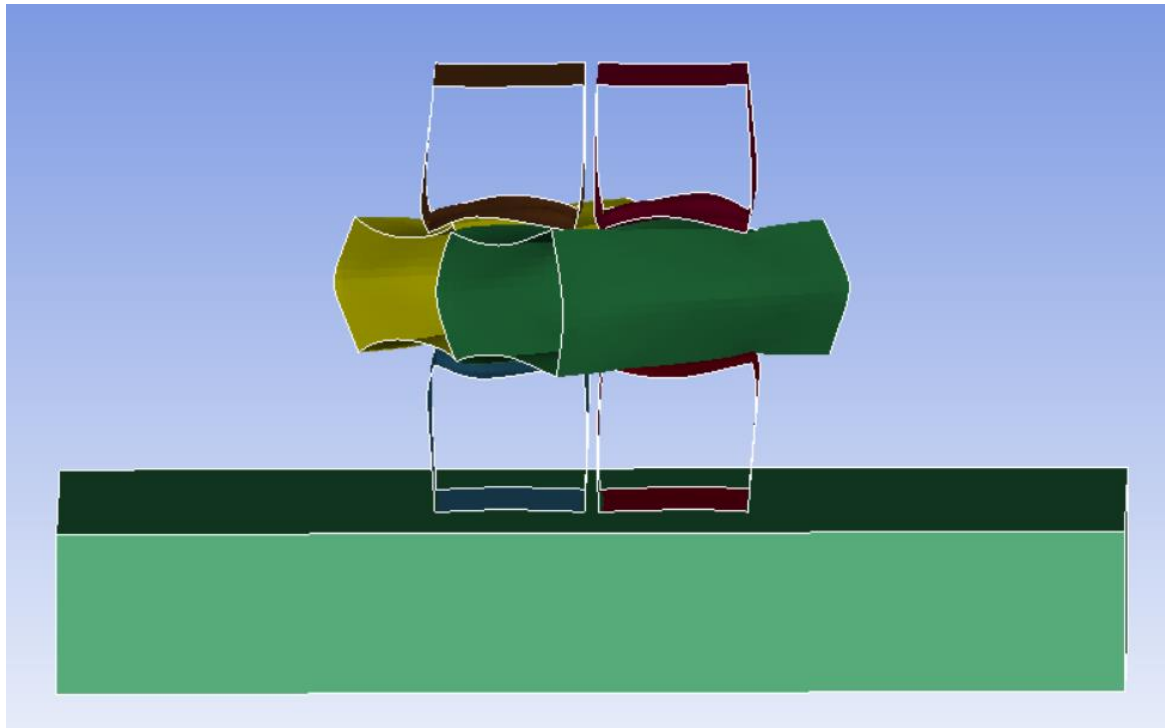
6.3.2 Δοκίμιο S30_D



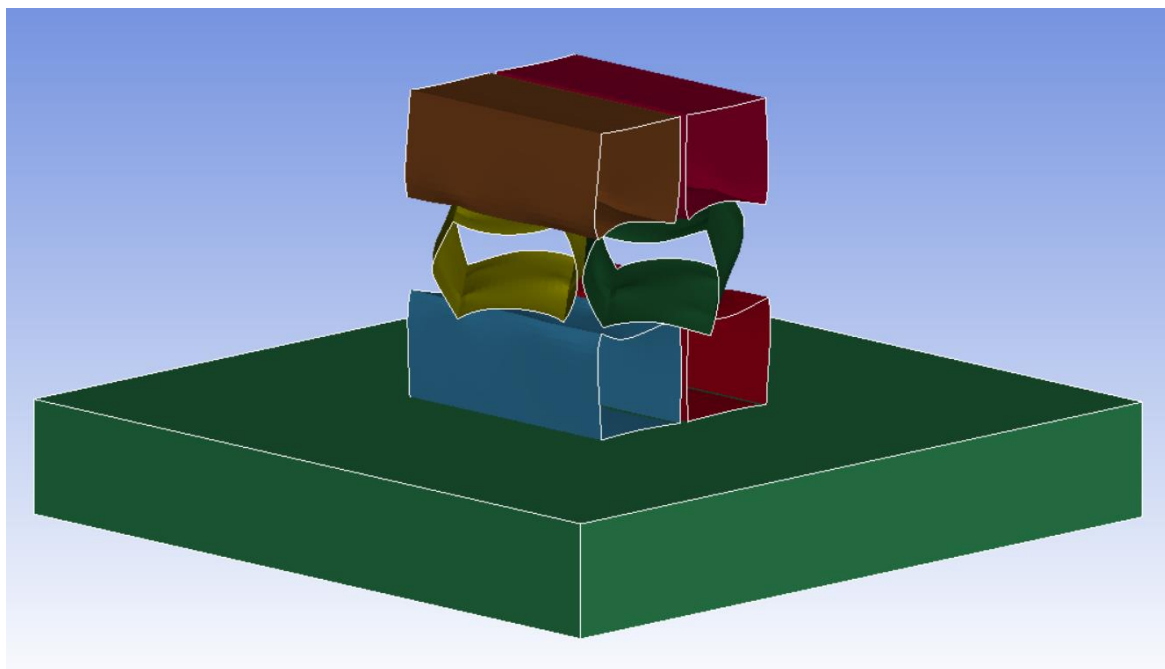
Εικόνα 6.3.2.1: Δοκίμιο S30_D



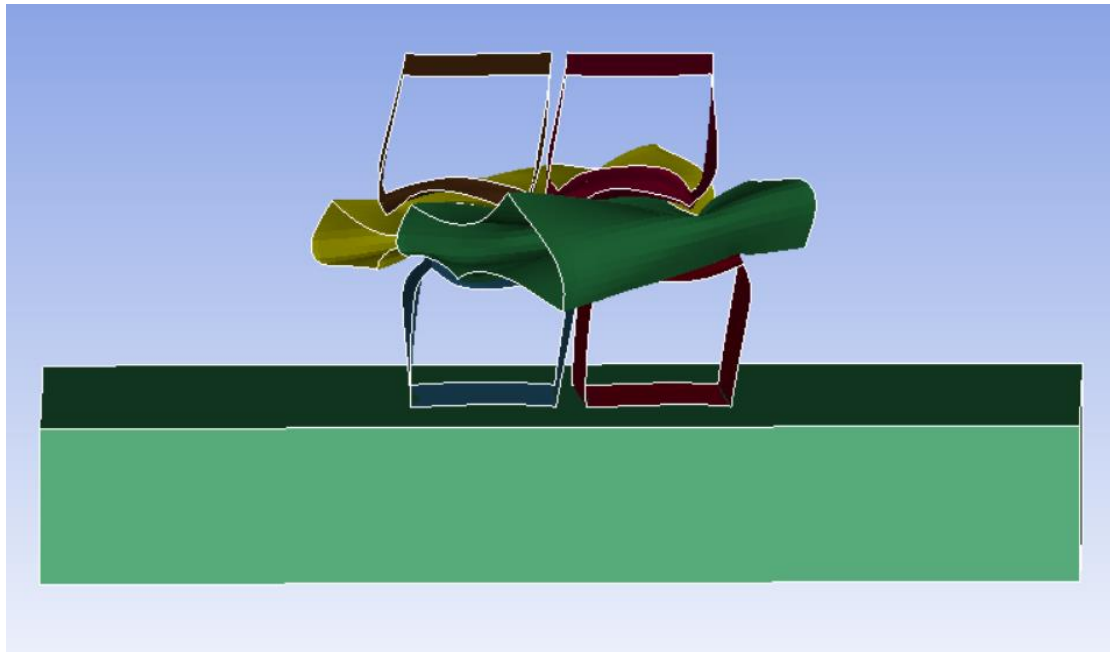
Εικόνα 6.3.2.2: Πρόσσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου S30_D



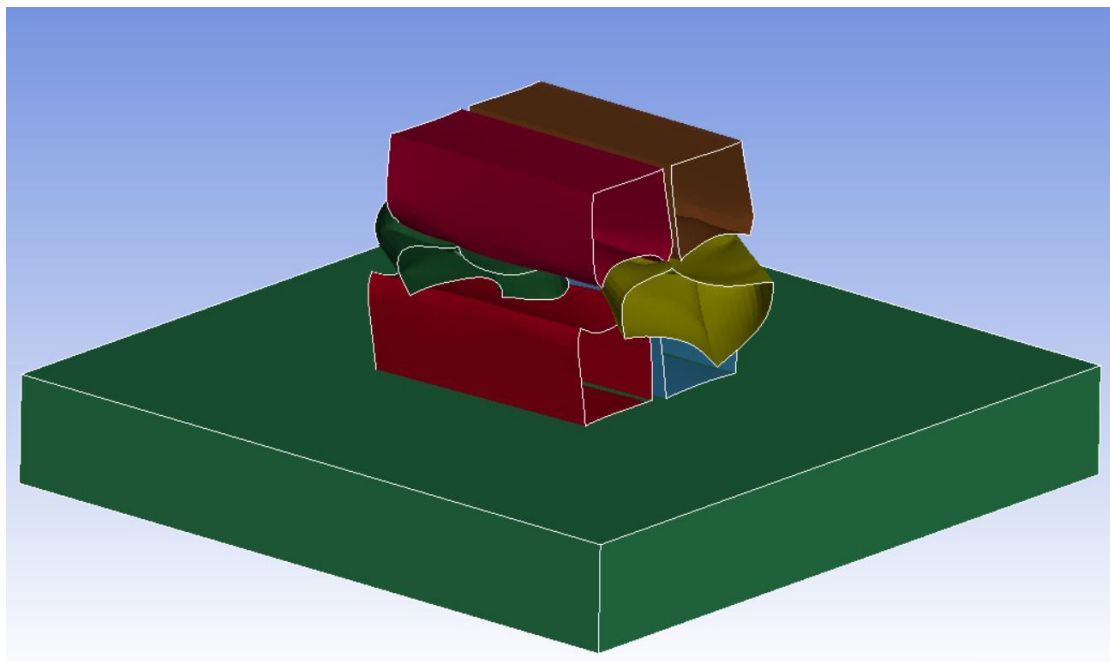
Εικόνα 6 . 3 . 2 . 3: Πρόσοψη δοκιμίου S30_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης



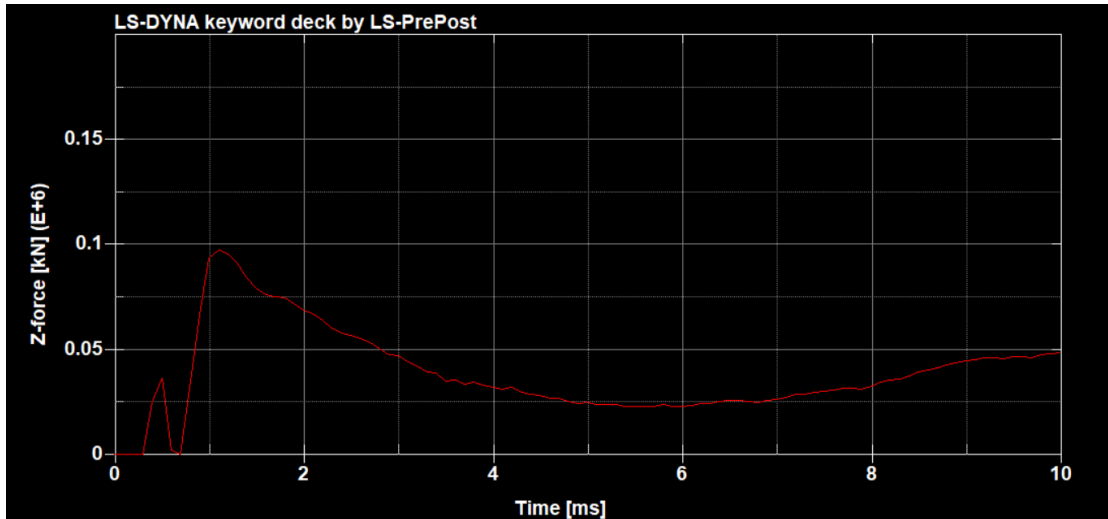
Εικόνα 6 . 3 . 2 . 4: Πλάγια όψη δοκιμίου S30_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης



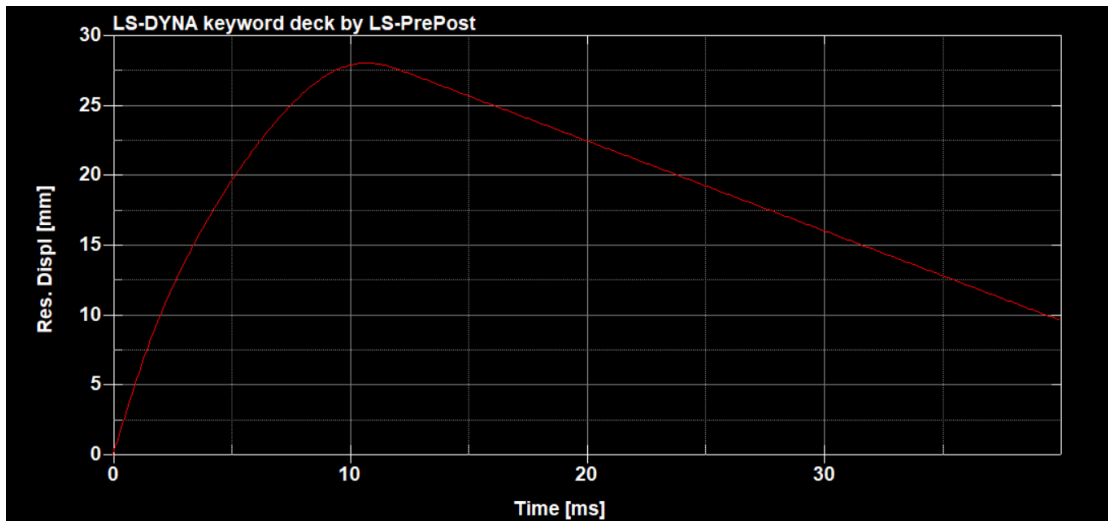
Εικόνα 6 . 3 . 2 . 5: Πλάγια όψη δοκιμίου S30_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης



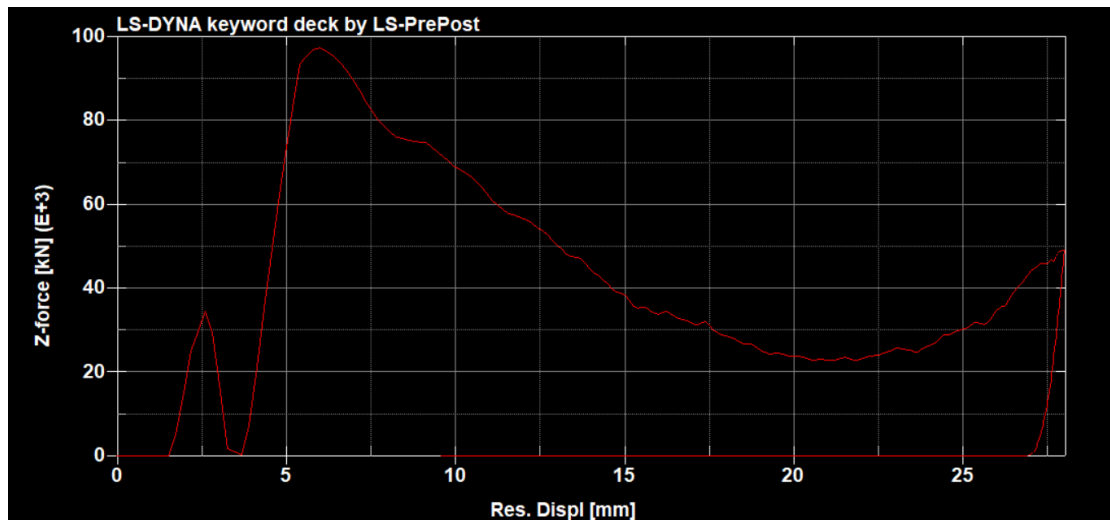
Εικόνα 6 . 3 . 2 . 6: Πρόσφιψη δοκιμίου S30_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης



Διάγραμμα 6.3.2.1: Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) δοκιμίου S30_D



Διάγραμμα 6.3.2.2: Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) δοκιμίου S30_D

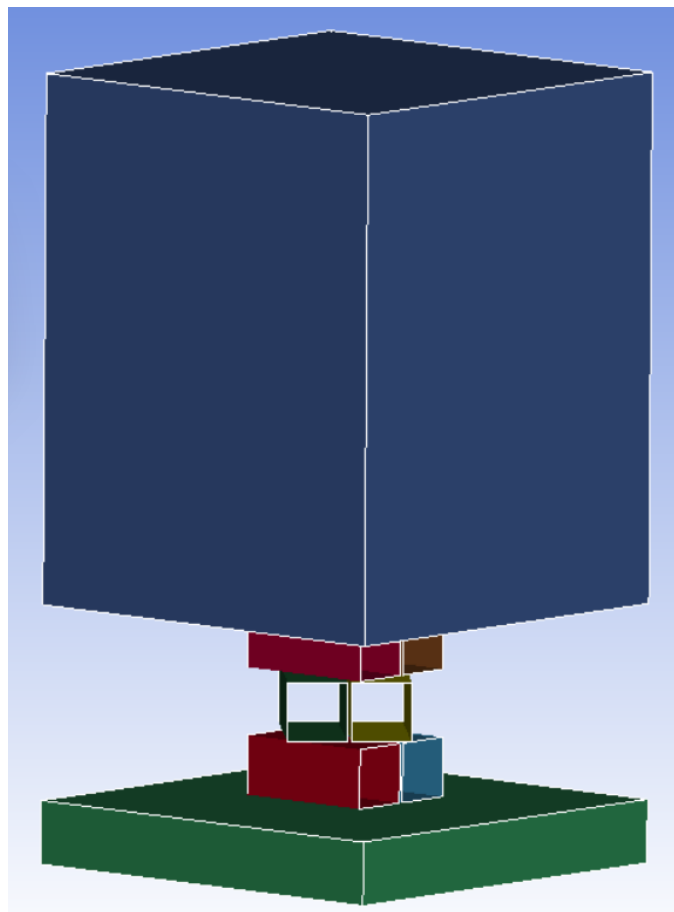


Διάγραμμα 6.3.2.3: Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Displacement) δοκιμίου S30_D

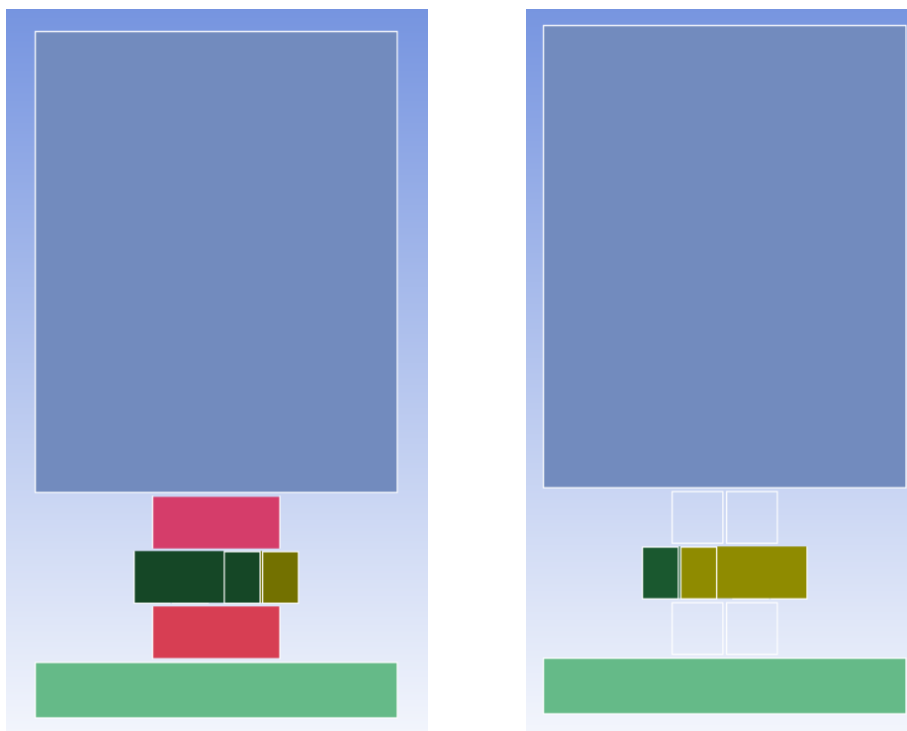
Στο διάγραμμα της προσομοίωσης του δοκιμίου S30_D (30°) παρατηρούμε ότι το μέγιστο φορτίο (98 kN) έχει προκαλέσει παραμόρφωση ίση με 6 mm. Η τελική παραμόρφωση της διάταξης είναι ίση με 28 mm.

Από το στιγμιότυπο του αποτελέσματος της προσομοίωσης υπάρχει μερική κατάρρευση της διάταξης που εκδηλώνεται με πλήρη κάμψη του πρώτου στρώματος, μερική του δεύτερου ενώ το τρίτο έχει παραμορφωθεί ελάχιστα.

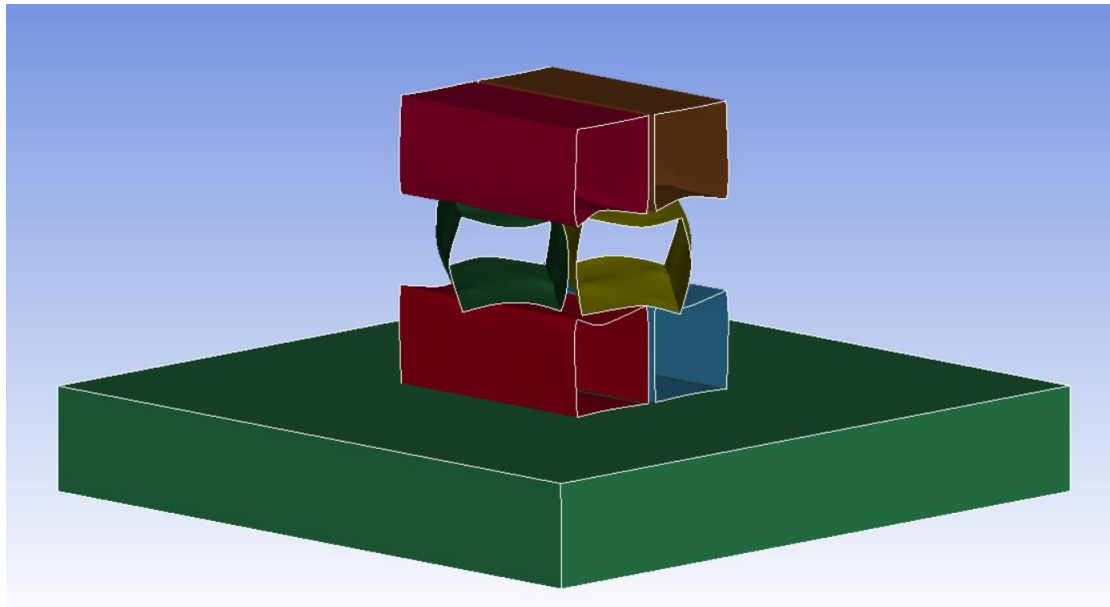
6.3.3 Δοκίμιο S45_D



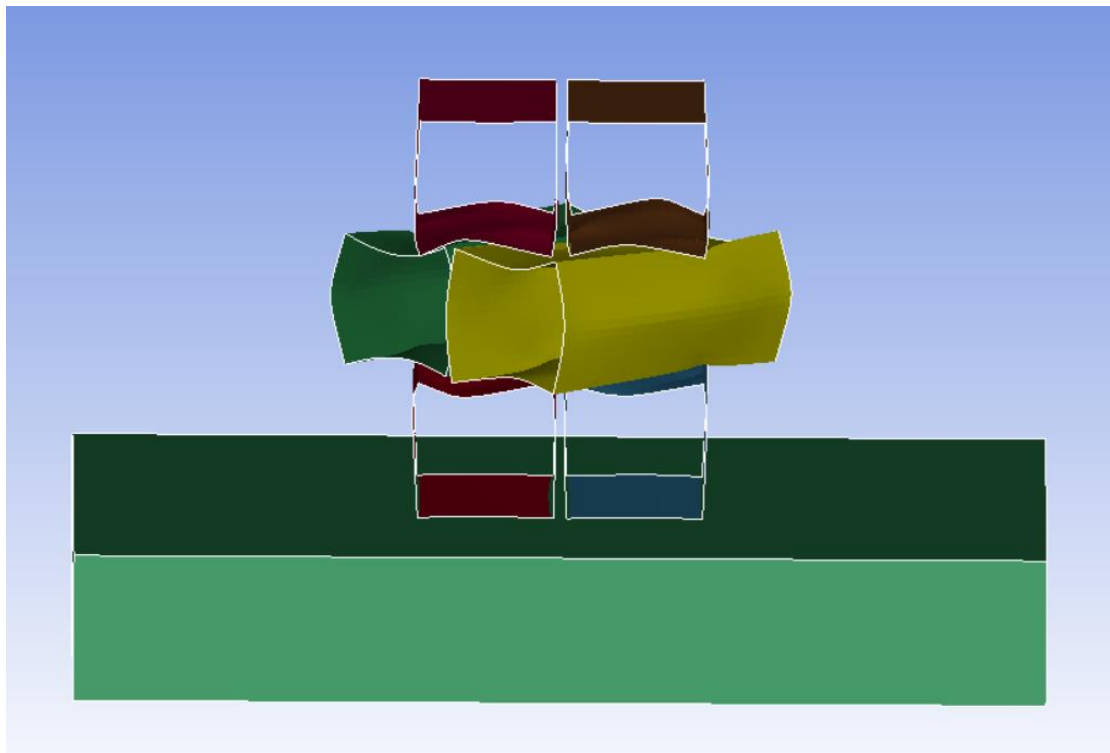
Εικόνα 6 . 3 . 3 . 1: Δοκίμιο S45_D



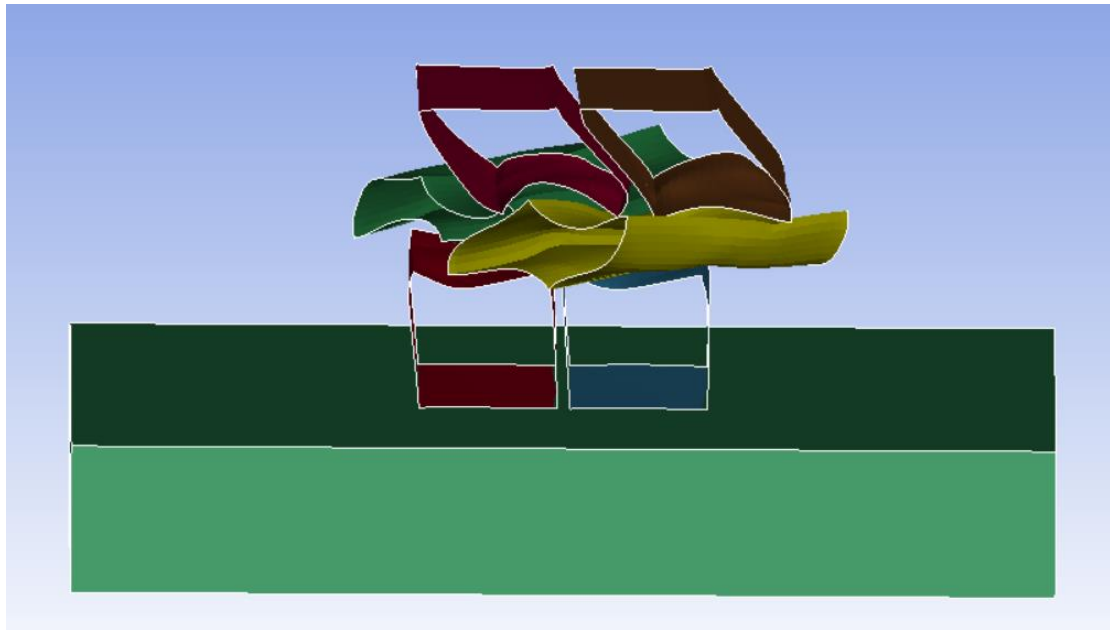
Εικόνα 6 . 3 . 3 . 2: Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου S45_D



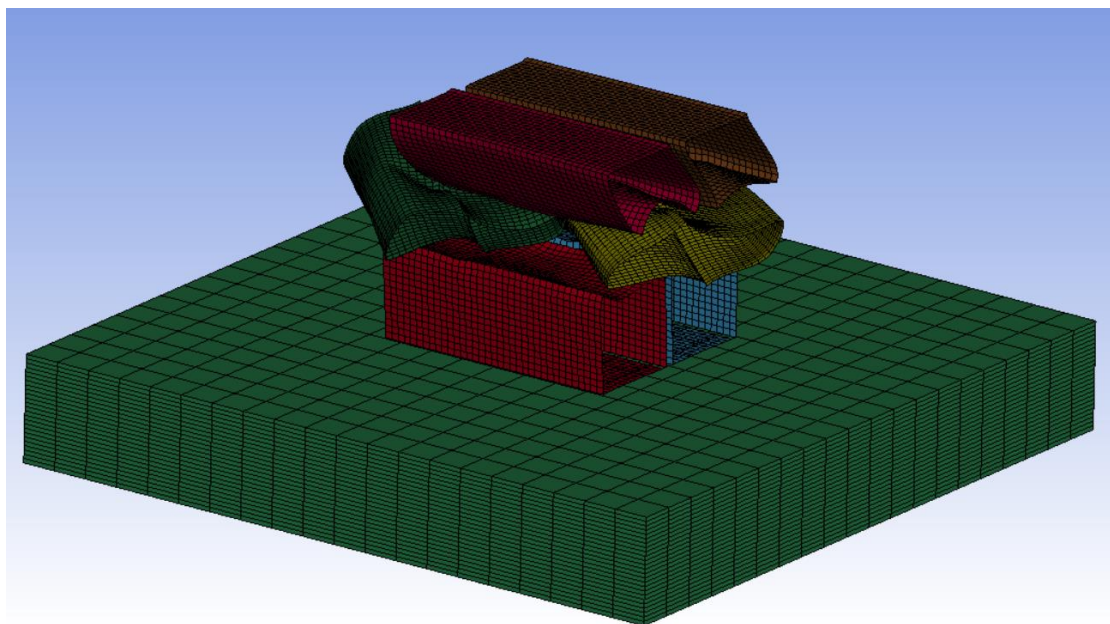
Εικόνα 6 . 3 . 3 . 3: Πλάγια όψη δοκιμίου S45_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης



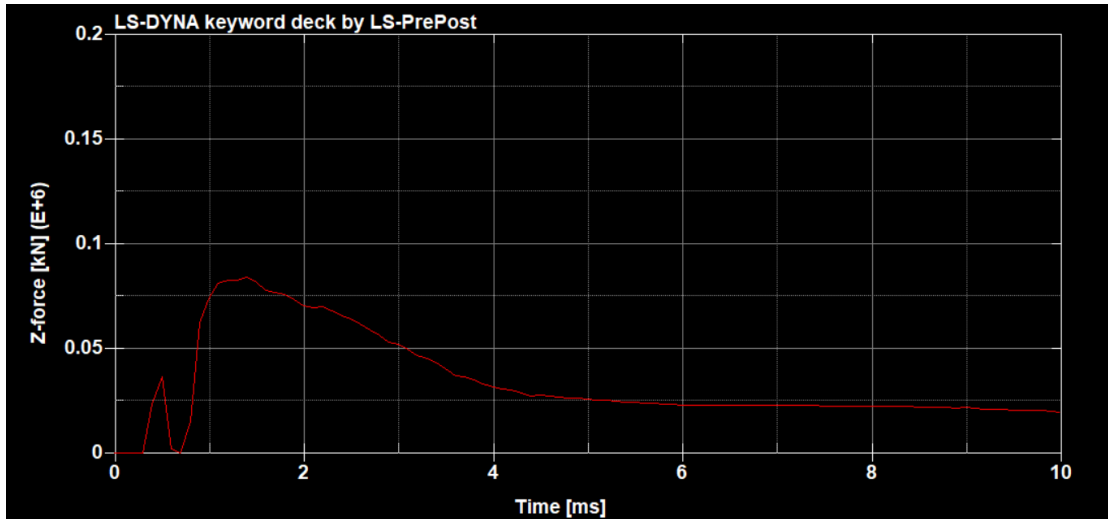
Εικόνα 6 . 3 . 3 . 4: Πρόσφιη δοκιμίου S45_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης



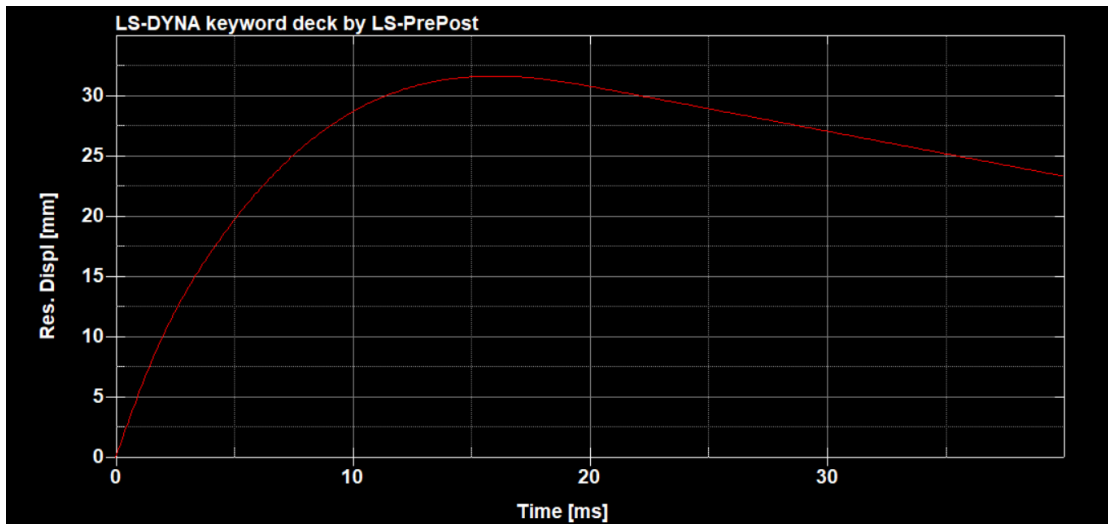
Εικόνα 6 . 3 . 3 . 5: Πρόσφιη δοκιμίου S45_D στο τέλοσ της προσομοίωσησ κρούσησ



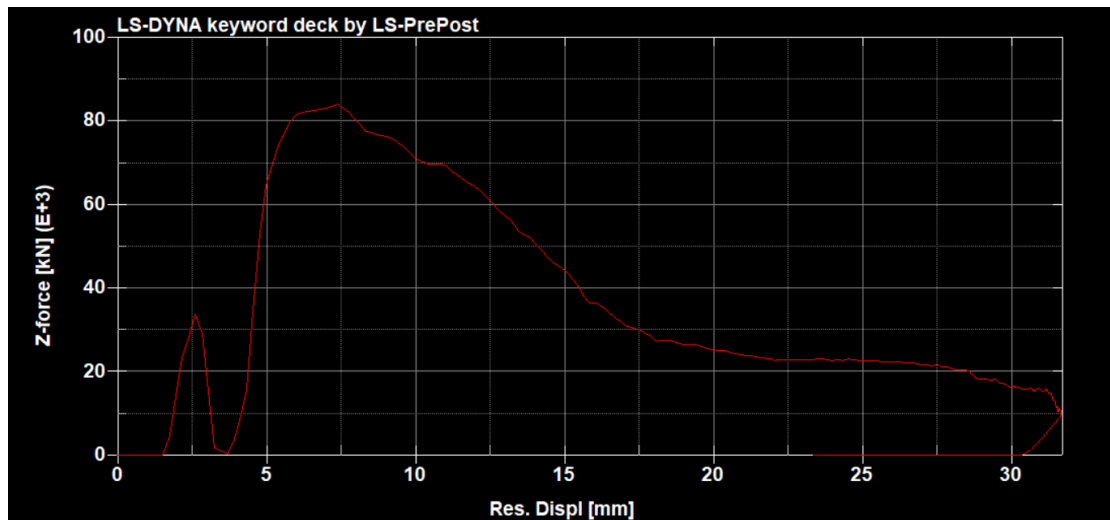
Εικόνα 6 . 3 . 3 . 6: Πλάγια όψη δοκιμίου S45_D στο τέλοσ της προσομοίωσησ κρούσησ



Διάγραμμα 6.3.3.1: Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) δοκιμίου S45_D



Διάγραμμα 6.3.3.2: Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) δοκιμίου S45_D

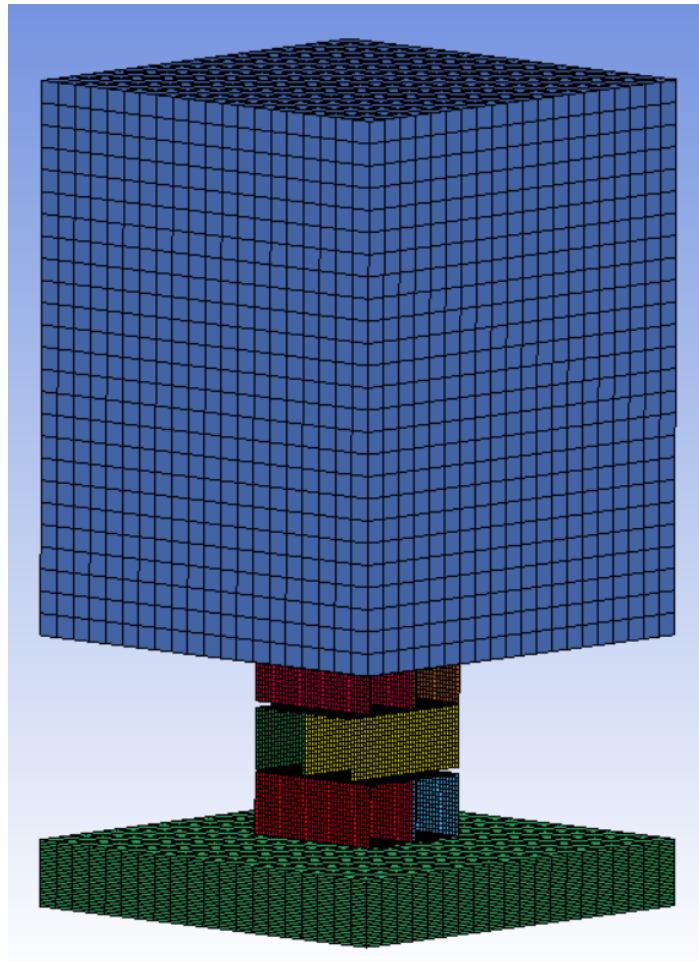


Διάγραμμα 6.3.3.3: Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Displacement) δοκιμίου S45_D

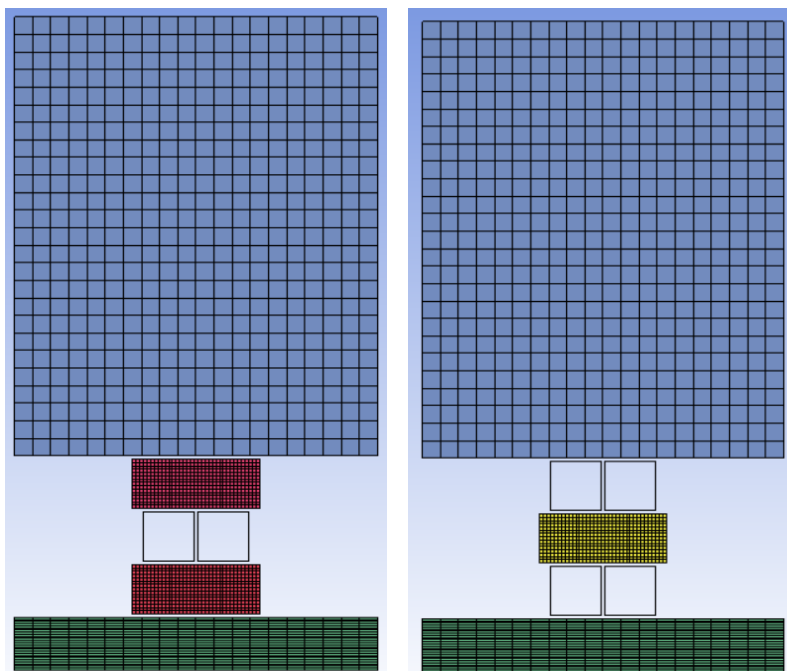
Στο διάγραμμα της προσομοίωσης του δοκιμίου S45_D (45°) παρατηρούμε ότι το μέγιστο φορτίο (83 kN) έχει προκαλέσει παραμόρφωση ίση με 7,5 mm. Η τελική παραμόρφωση της διάταξης είναι ίση με 31,125 mm.

Από το στιγμιότυπο του αποτελέσματος της προσομοίωσης υπάρχει κατάρρευση της διάταξης που εκδηλώνεται κατά κύριο λόγο με πλήρη κάμψη του δευτέρου στρώματος και μερική του πρώτου.

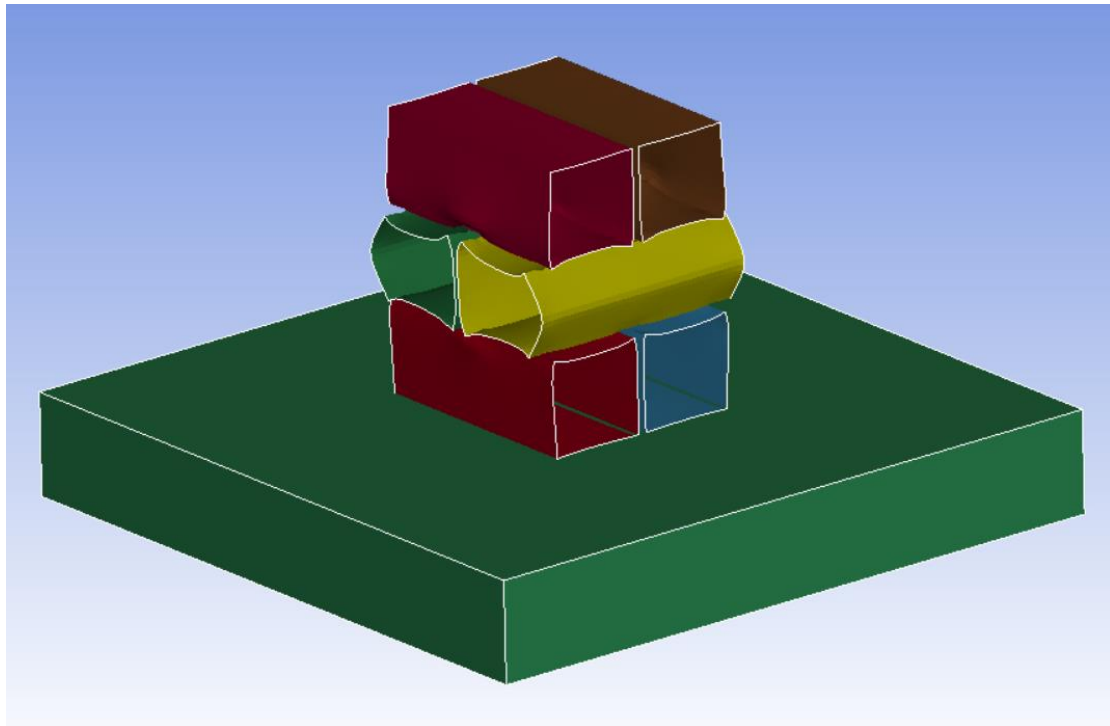
6.3.4 Δοκίμιο S90_D



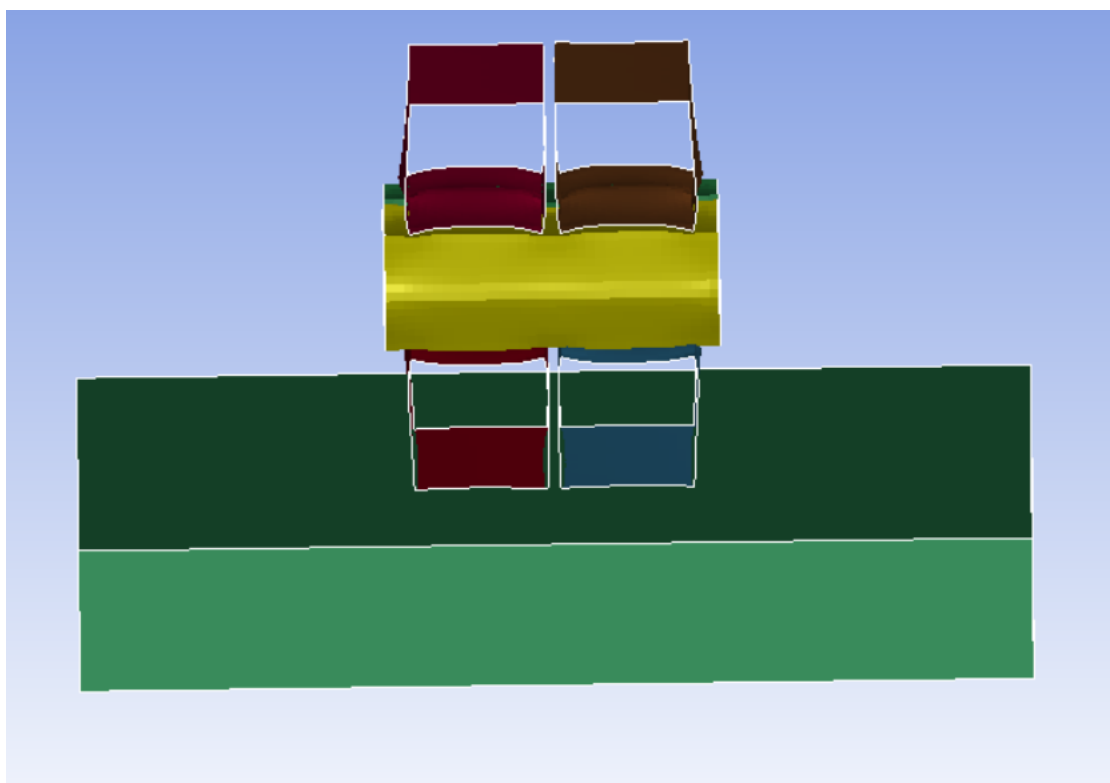
Εικόνα 6.3.4.1: Δοκίμιο S90_D



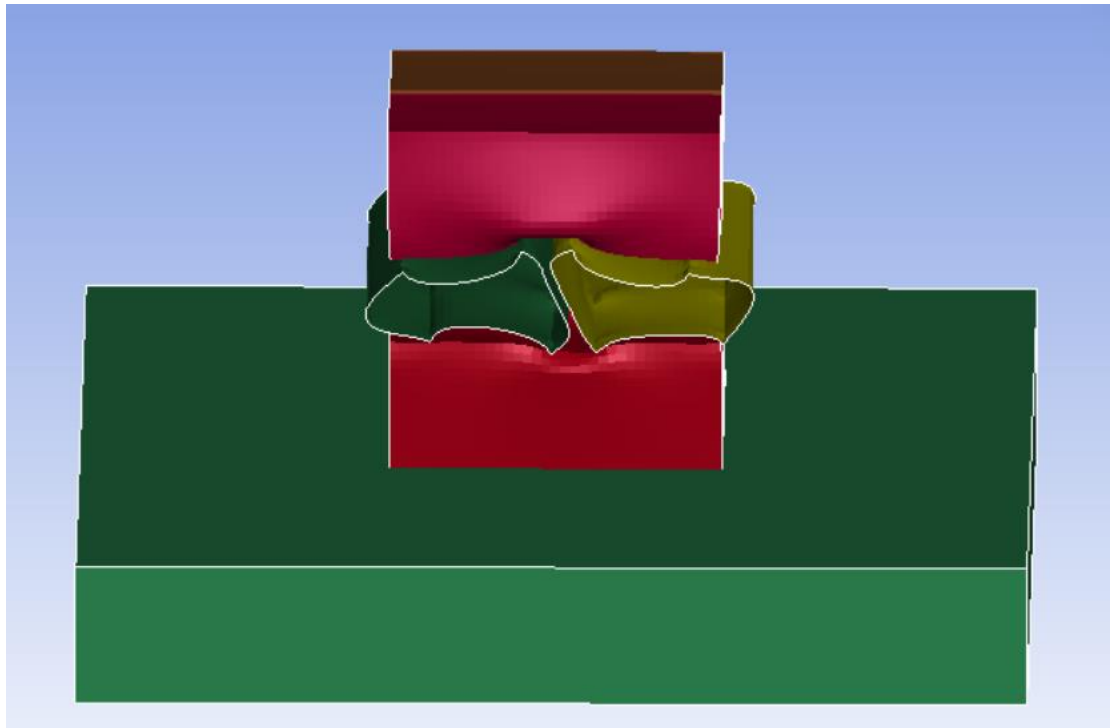
Εικόνα 6.3.4.2: Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου S90_D



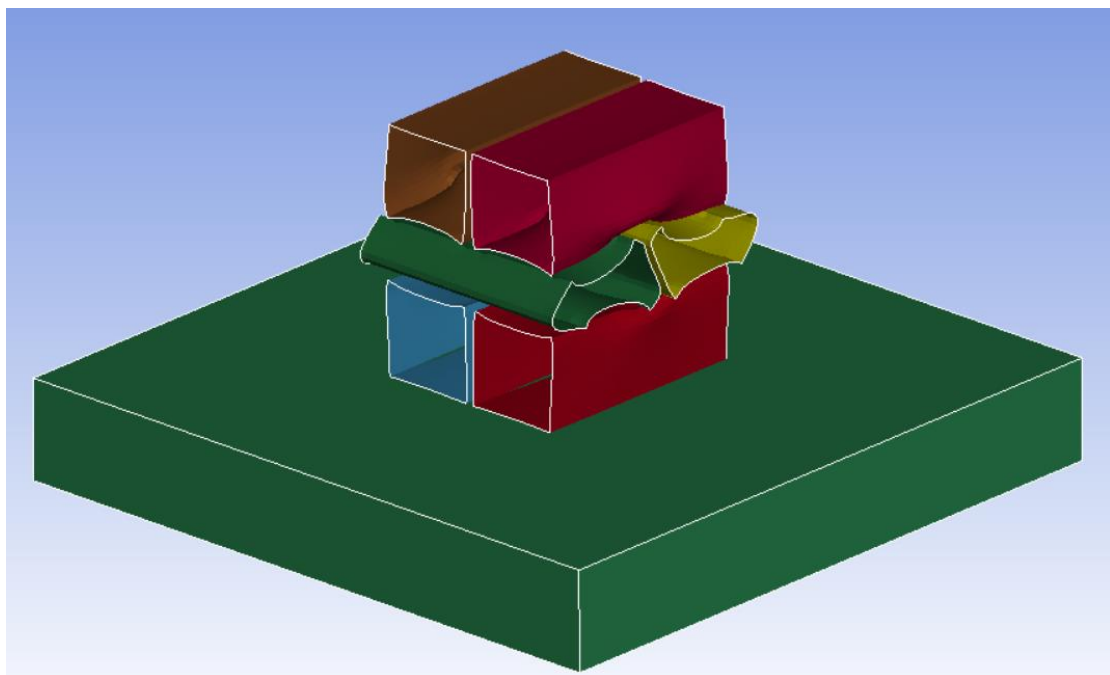
Εικόνα 6 . 3 . 4 . 3: Πλάγια όψη δοκιμίου S90_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης



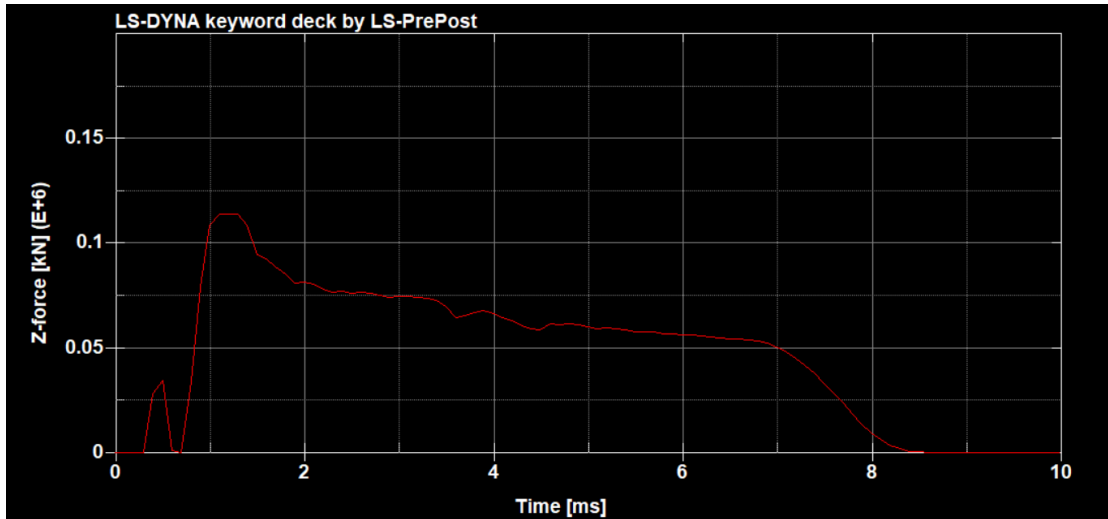
Εικόνα 6 . 3 . 4 . 4: Πρόσοψη δοκιμίου S90_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης



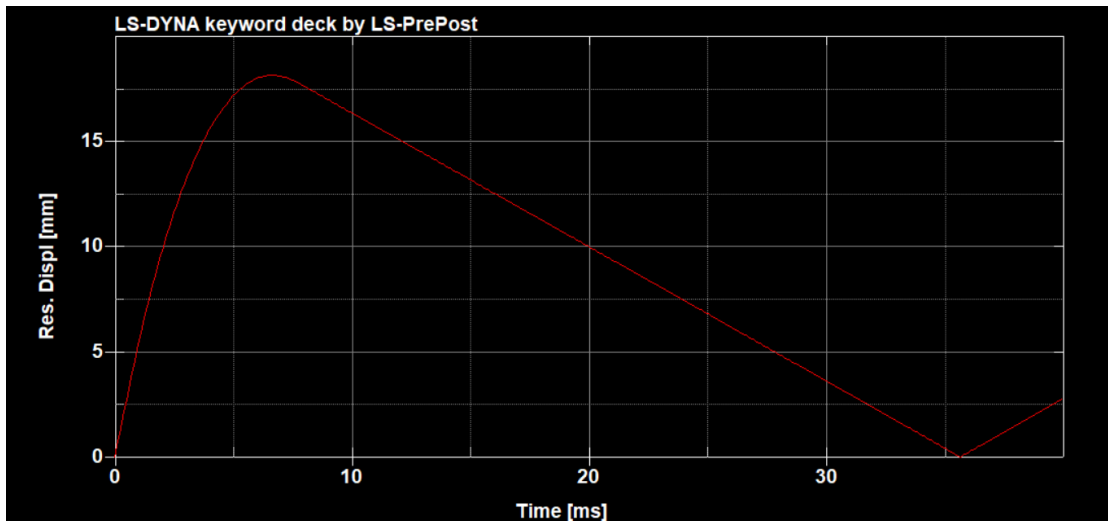
Εικόνα 6 . 3 . 4 . 5: Πρόσφιη δοκιμίου S90_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης



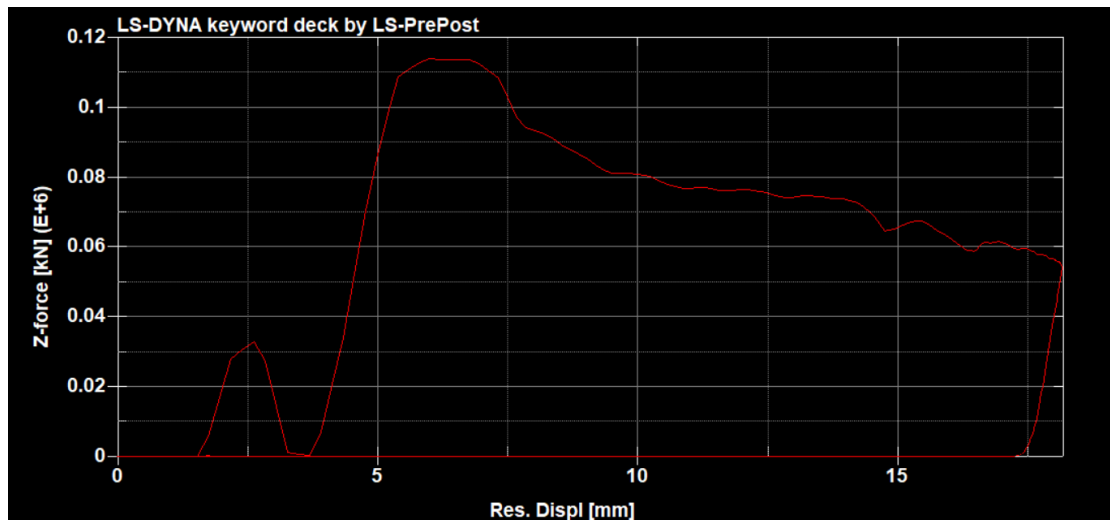
Εικόνα 6 . 3 . 4 . 6: Πλάγια όψη δοκιμίου S90_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης



Διάγραμμα 6.3.4.1: Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) δοκιμίου S90_D



Διάγραμμα 6.3.4.2: Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) δοκιμίου S90_D



Διάγραμμα 6.3.4.3: Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Displacement) δοκιμίου S90_D

Στο διάγραμμα της προσομοίωσης του δοκιμίου S90_D (90°) παρατηρούμε ότι το μέγιστο φορτίο (117,5 kN) έχει προκαλέσει παραμόρφωση ίση με 6,1 mm. Η τελική παραμόρφωση της διάταξης είναι ίση με 18 mm.

Από το στιγμιότυπο του αποτελέσματος της προσομοίωσης υπάρχει κατάρρευση της διάταξης που εκδηλώνεται κατά κύριο λόγο με μερική κάμψη του δεύτερου στρώματος, ενώ το πρώτο με το τρίτο στρώμα έχουν παραμορφωθεί ελάχιστα.

7. Σύγκριση & Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις πειραματικές δοκιμές με τα αντίστοιχα που προέκυψαν με τη χρήση προγράμματος ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία, με στόχο την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αλλά και με προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο μέλλον.

7.1 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 υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων κάθε κατηγορίας που οφείλετε 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.

	Δοκιμή	Μέγιστο Φορτίο - Pmax (kN)	Μετατόπιση - Disp. (mm)
Μονάδες		Pmax (kN)	Disp. (mm)
S0_D (0°)	Προσομοίωση	140	60
	Πείραμα	46.6	60
S30_D (30°)	Προσομοίωση	98	28
	Πείραμα	35.13	70
S45_D (45°)	Προσομοίωση	83	31.125
	Πείραμα	54.36	50
S90_D (90°)	Προσομοίωση	117.5	18
	Πείραμα (T2)	133.13	50
	Πείραμα (T3)	115.08	50

Πίνακας 7.1.1: Συγκεντρωτικός συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών και ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για δοκιμές υπό δυναμική φόρτιση

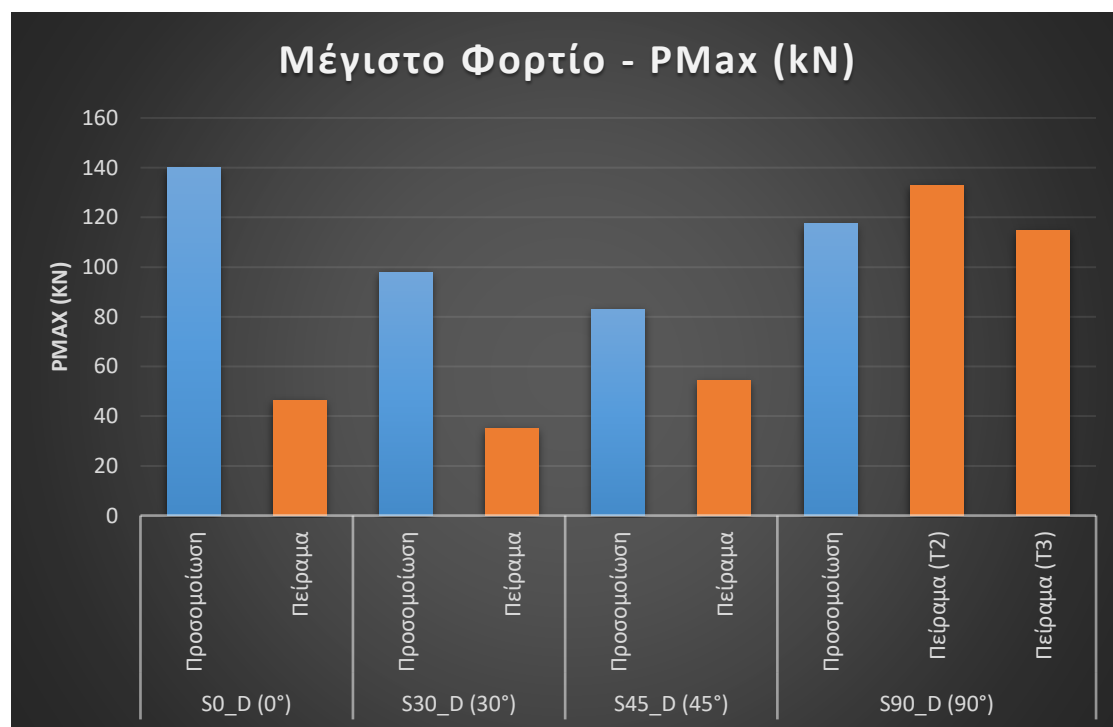
Στον παραπάνω συγκεντρωτικό πίνακα έχουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και των πειραμάτων ώστε να πραγματοποιηθεί μια πρώτη σύγκριση μεταξύ τους ανά τους διαφορετικούς προσανατολισμούς που δοκιμάστηκαν.

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. Ακόμα, σημειώνεται ότι οι τιμές μετατόπισης (βύθισης) από τις δοκιμές σφύρας πίπτουσας μάζας προσδιορίστηκαν εποπτικά κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, δεδομένου ότι το ίδιο το μηχάνημα δεν παρέχει τέτοια δεδομένα.

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.

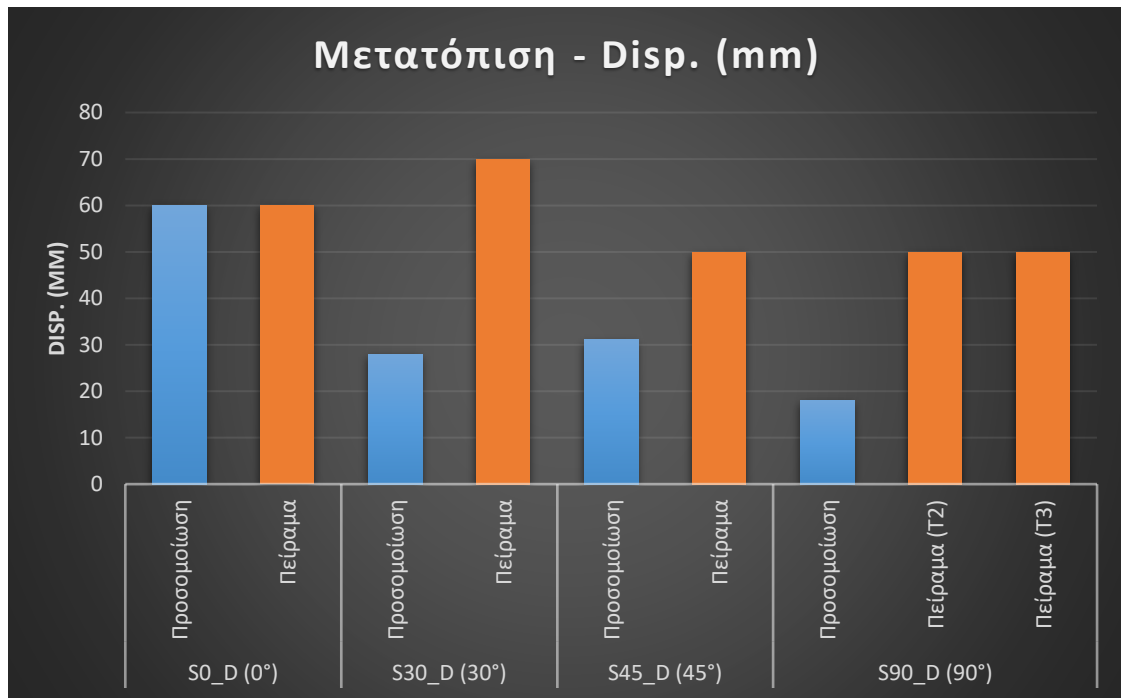
Κατά την μοντελοποίηση οι συνοριακές συνθήκες διαφέρουν από τις πραγματικές στα σημεία επαφής των πλακών της πρέσας με την επιφάνεια του δοκιμίου. Συγκεκριμένα, τα κελύφη της διάταξης δεν ακουμπούν πάντα ολόκληρα με την επιφάνειά τους την πλάκα της μηχανής θλίψης λόγω της κατεργασίας που έχει υποστεί σχηματίζοντας ροπή και συνεπώς υπόκειται σε ευκολότερη και γρηγορότερη αστοχία ενώ στο μοντέλο εφάπτεται ιδανικά. Επίσης, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στο πείραμα τα δοκίμια είναι κολλημένα μεταξύ τους με ζεστή κόλληση (σιλικόνη) λόγος στον οποίο να οφείλονται αρκετές αποκλείσεις αφού δεν μπόρεσε να συγκρατήσει τα μεμονωμένα δοκίμια κατά την διαδικασία της κρούσης.

Παρακάτω ακολουθούν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα δεικτών για κάθε δοκιμή που πραγματοποιήθηκε.



Πίνακας 7. 1. 2: Συγκριτικό ραβδόγραμμα μέγιστων τιμών φορτίων

Όπως παρατηρούμε η υψηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου PMax στο πειραματικό αποτέλεσμα βρίσκεται στις 90° (T2) και είναι ίση με 133,13 kN. Στην διαδικασία της προσομοίωσης η υψηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου PMax βρίσκεται στις 0° (S0_D) και είναι ίση με 140 kN. Η διάταξη στις 30° σημειώνει τα μικρότερα αποτελέσματα με 35,13 kN στη προσομοίωση, ενώ πειραματικά στις 45° με 83 kN.



Πίνακας 7. 1. 3: Συγκριτικό ραβδόγραμμα μέγιστων τιμών μετατοπίσεων

Στο διάγραμμα της μετατόπισης παρατηρούμε ότι η υψηλότερη τιμή πειραματικά βρίσκεται στην διάταξη με τις 30° και είναι ίση με 70 mm κατά προσέγγιση από την στιγμή που η διάταξη της σφύρας δεν παρέχει κάποιο όργανο μέτρησης της μετατόπισης. Οι διατάξεις στις 45°, 90° (T2) και 90° (T3) σημειώνουν την μικρότερη τιμή ίση με 50 mm.

Στην διαδικασία της προσομοίωσης, η υψηλότερη τιμή μετατόπισης είναι ίση με 60 mm στις 0° ενώ η χαμηλότερη στις 90° και είναι ίση με 18 mm.

Μονάδες	Μέση Δύναμη αντίδρασης	Ενέργεια Απορρόφησης	Δείκτης Ομοιομορφίας
	Pmean (kN)	Eabs (kJ)	CFE
S0_D (0°)	19.08	1.14	0.13
S30_D (30°)	40.75	1.14	0.41
S45_D (45°)	37.006	1.15	0.44
S90_D (90°)	62.93	1.18	0.53

Πίνακας 7. 1. 4: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης για δοκιμές υπό δυναμική φόρτιση

Στον παραπάνω Πίνακα παρουσιάζεται η Ενέργεια Απορρόφησης, όπως αυτή προσδιορίστηκε από το εμβαδόν του διαγράμματος Φορτίου – Μετατόπισης του κάθε δοκιμίου, από το υπολογιστικό μοντέλο του LS Dyna. Όπως αναμένεται, οι τιμές παρουσιάζουν σχετική ομοιογένεια.

Παρατηρούμε ακόμα, πως το μέσο φορτίο παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή στις 90° (62.93 kN) ενώ στην διάταξη S0_D παρουσιάζει αισθητή μείωση (19.08 kN)

Στη στήλη του Δείκτη Ομοιομορφίας (Crush Force Efficiency - CFE), παρουσιάζονται οι τιμές που υπολογίστηκαν από την προσομοίωση όπου παρατηρούμε

ότι είναι σχετικά χαμηλές. Συγκεκριμένα, για το δοκίμιο S0_D, η τιμή του CFE απέχει αρκετά από την μονάδα (η οποία είναι η ιδανική τιμή), και κατά συνέπεια το συγκεκριμένο σύστημα απορρόφησης ενέργειας θεωρείται ως το λιγότερο αξιόπιστο ενώ το S90_D θεωρείται το πιο αξιόπιστο απ' τις τέσσερις διατάξεις.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι ο συγκεκριμένος πίνακας απαρτίζεται από τιμές μονάχα της προσομοίωσης καθώς απ' την πειραματική διαδικασία δεν μπορούσαμε να εξάγουμε διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου αφού η σφύρα του εργαστηρίου δεν μας έδινε αυτή την δυνατότητα.

7.2 Συμπεράσματα

Συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα από τις υπολογιστικές αναλύσεις καθώς και τις πειραματικές δοκιμές παρατηρούμε μεγάλες κυρίως αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων κάθε διάταξης, με ελάχιστες εξαιρέσεις. Σε πειραματικές συνθήκες ενώ καταφέραμε να βγάλουμε δεδομένα για το Μέγιστο Φορτίο - PMax και την Μετατόπιση – Disp. δεν είχαμε την δυνατότητα να εισάγουμε δεδομένα για βγάλουμε διαγράμματα Pmean, Eabs και CFE. Έτσι, δεν μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα από την πειραματική διαδικασία.

Σε συνθήκες προσομοίωσης φαίνεται απ' τον πίνακα 7.1.4 ότι η ενέργεια απορρόφησης της διάταξης S90_D είναι η μεγαλύτερη. Ακόμα, παρατηρούμε από τον πίνακα 7.1.4 και συγκεκριμένα από την στήλη της μέσης δύναμης αντίδρασης (Pmean) ότι η διάταξη S90_D έχει την μεγαλύτερη τιμή από τις υπόλοιπες και έτσι κρίνεται πιο κατάλληλη αφού γενικά η υψηλή τιμή του μέσου φορτίου, αντιστοιχεί σε μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας για δεδομένη παραμόρφωση. Επίσης, για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ζεστή κόλληση, η οποία αστόχησε στη διάρκεια της δοκιμής με αποτέλεσμα στο τέλος τα δοκίμια να μην είναι πάντα συνδεδεμένα. Στην προσομοίωση, ορίστηκε ένα set αποτελούμενο από τα επιμέρους σωληνωτά κελύφη, το οποίο συμπεριφερόταν ως ενιαίο σώμα όσον αφορά στις αλληλεπιδράσεις διεπιφανειών στο εσωτερικό της δομής.

Έτσι, οι πειραματικές δοκιμές προκειμένου να εξάγουν γενικευμένα αποτελέσματα είναι καλό να επαναληφθούν περισσότερες φορές ώστε να γενικευθούν μέσω στατιστικών κατανομών στο γενικό πληθυσμό ή η κόλληση τους να γίνεται με συγκόλληση.

Καταλήγουμε, λοιπόν, στο συμπέρασμα ότι το αντικείμενο της παρούσας εργασίας σηματοδοτεί πολλές δυνατότητες για βελτίωση και περαιτέρω έρευνα όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Τέλος, μπορεί να μην λαμβάνεται αποκλειστικά υπόψη η διάταξη και η διατομή του δοκιμίου αλλά και το υλικό όπως κράματα αλουμινίου, σύνθετα υλικά ακόμα και πολυμερή.

8. Βιβλιογραφία

- Abdullah, N. A. Z., Sani, M. S. M., Salwani, M. S., & Husain, N. A. (2020). A review on crashworthiness studies of crash box structure. *Thin-Walled Structures*, 153, 106795. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106795>
- Abramowicz, W., & Jones, N. (1986). Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. *International Journal of Impact Engineering*, 4(4), 243–270. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(86\)90017-5](https://doi.org/10.1016/0734-743X(86)90017-5)
- ALEXANDER, J. M. (1960). AN APPROXIMATE ANALYSIS OF THE COLLAPSE OF THIN CYLINDRICAL SHELLS UNDER AXIAL LOADING. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 13(1), 10–15. <https://doi.org/10.1093/qjmam/13.1.10>
- Baroutaji, A., Sajjia, M., & Olabi, A.-G. (2017). On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. *Thin-Walled Structures*, 118, 137–163. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.05.018>
- Daneshi, G. H., & Hosseinipour, S. J. (2002). Grooves effect on crashworthiness characteristics of thin-walled tubes under axial compression. *Materials & Design*, 23(7), 611–617. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(02\)00052-3](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(02)00052-3)
- Huh, H., & Kang, W. J. (2002). Crash-worthiness assessment of thin-walled structures with the high-strength steel sheet. *International Journal of Vehicle Design*, 30(1/2), 1. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2002.002022>
- Johnson, W. (1996). Introduction to crashworthiness. *International Journal of Crashworthiness*, 1(1), 5–10. <https://doi.org/10.1533/cras.1996.0001>
- Liu, Y. (2008). Crashworthiness design of multi-corner thin-walled columns. *Thin-Walled Structures*, 46(12), 1329–1337. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.04.003>
- Ozdogli, A. I., Moreu, F., Xu, D., & Wang, T. (2020). Experimental Analysis on Effectiveness of Crash Beams for Impact Attenuation of Overheight Vehicle Collisions on Railroad Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 25(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001503](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001503)
- Redwood, R. G. (1964). Discussion: “Crushing of a Tube Between Rigid Plates” (DeRuntz, Jr., John A., and Hodge, Jr., P. G., 1963, ASME J. Appl. Mech., 30, pp. 391–395). *Journal of Applied Mechanics*, 31(2), 357–358. <https://doi.org/10.1115/1.3629622>
- Wang, W., Wang, X., Fu, J., Lu, Z., Zhou, R., Shao, Y., Wang, J., & Morgenthal, G. (2023). A novel frame-type crashworthy device for protecting bridge piers from vehicle collisions. *Structures*, 57, 105313. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105313>
- Wierzbicki, T., Bhat, S. U., Abramowicz, W., & Brodtkin, D. (1992). Alexander revisited—A two folding elements model of progressive crushing of tubes.

International Journal of Solids and Structures, 29(24), 3269–3288.
[https://doi.org/10.1016/0020-7683\(92\)90040-Z](https://doi.org/10.1016/0020-7683(92)90040-Z)

Wu, Z., Zhang, Q., Li, B., Liu, Y., & Pan, Z. (2020). Transverse impact response and residual flexure characteristics of braided composite tubes: Effect of stacking sequence. *Thin-Walled Structures*, 155, 106900.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106900>

Zou, Y., Tarko, A. P., Chen, E., & Romero, M. A. (2014). Effectiveness of cable barriers, guardrails, and concrete barrier walls in reducing the risk of injury. *Accident Analysis & Prevention*, 72, 55–65.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.06.013>