



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

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

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΈΝΑΝΤΙ
ΚΡΟΥΣΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΔΟΜΩΝ
ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ
ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ**

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Δ. ΑΣΠΙΩΤΗΣ-ΠΕΡΙΒΟΛΑΡΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Μανωλάκος Δημήτριος, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2024

Στον πατέρα μου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη του φαινομένου της κρούσης αποτελεί έναν πολύ σημαντικό κλάδο της μηχανικής λόγω του αντίκτυπου που έχει στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Με εφαρμογές στους κλάδους της αυτοκινητοβιομηχανίας, των μεταφορών και της συγκοινωνιολογίας, είναι επόμενο ότι η ανάπτυξη δομών που δύνανται να απορροφούν την ενέργεια συγκρούσεων παρέχοντας ασφάλεια στους χρήστες είναι εξαιρετικής σημασίας.

Μέσω της παρούσας εργασίας, πραγματοποιείται μια προσπάθεια αποτίμησης της συμπεριφοράς χαλύβδινων δομών έναντι κρούσης, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς προσανατολισμούς ορθογωνικών σωληνωτών διατομών. Σκοπός της διατριβής αυτής είναι η βελτιστοποίηση της ανθεκτικότητας, καθώς, ως ιδιότητα μια δομής, είναι κρίσιμη για την ασφάλεια των χρηστών. Το πεδίο εφαρμογής είναι αρκετά ευρύ, δεδομένου ότι αφορά σε διάφορους κλάδους της μηχανικής, ενώ παρά τις εξελίξεις της τεχνολογίας, οι υπάρχουσες προσεγγίσεις πολλές φορές αποτυγχάνουν να διασφαλίσουν την αποτελεσματικότητα στην απορρόφηση της ενέργειας στην περίπτωση μίας κρούσης.

Στόχος της έρευνας αυτής, είναι η ανάπτυξη μίας νέας προσέγγισης που θα συμβάλλει πιο αποδοτικά στην απορρόφηση ενέργειας, μέσω της διερεύνησης της συμπεριφοράς διαφορετικών συνδυασμών χαλύβδινων ορθογωνικών σωλήνων έναντι κρούσης, της προσομοίωσης με υπολογιστικό μοντέλο και της σύγκρισης πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων. Τα ευρήματα στοχεύουν στο να συμβάλουν στον τομέα, παρέχοντας ασφαλέστερες και πιο αποδοτικές σχεδιαστικές λύσεις.

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 της εργασίας, αρχικά γίνεται παρουσίαση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε στο εργαστήριο. Στη συνέχεια, γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων και, τέλος, παρατίθεται η διαδικασία μοντελοποίησης για την προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία, καθώς και τα υπολογιστικά αποτελέσματα. Τέλος πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων, τα οποία και σχολιάζονται.

Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, υποδεικνύουν ότι η μία εκ των τεσσάρων δομών που κατασκευάστηκαν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αναφορικά με το υπολογιστικό μοντέλο, οι δομές δε φάνηκε να παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές, πλην όμως τα αποτελέσματα αντικρούστηκαν από τις εικόνες των παραμορφωμένων σωμάτων από τις πειραματικές δοκιμές. Σε κάθε περίπτωση, ενδείκνυται περαιτέρω έρευνα, διότι τα αποτελέσματα ήταν σε γενικές γραμμές ενθαρρυντικά, με πιθανή τροποποίηση κάποιων μεθόδων αλλά και μεγαλύτερο βαθμό επαναληψιμότητας, για καλύτερη αξιοπιστία.



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 RECTANGULAR
TUBES**

GEORGIOS D. ASPIOTIS-PERIVOLARIS

Supervisor: Professor Dimitrios Manolakos

ATHENS

JUNE 2024

[iv]

ABSTRACT

The study of the phenomenon of impact is a very important branch of engineering due to its impact on people's daily lives. With applications in the fields of automotive industry, transportation, and transport planning, it is evident that the development of structures capable of absorbing collision energy while providing safety to users is of exceptional importance.

This study attempts to evaluate the behavior of steel structures against impacts using different orientations of rectangular tubular sections. The aim of this thesis is to optimize crashworthiness, as this property of a structure is critical for user safety. The goal of this research is to develop a new approach that will contribute more effectively to energy absorption by investigating the behavior of different combinations of steel rectangular tubes against impacts, simulating with a computational model, and comparing experimental and theoretical results. The findings aim to contribute to the field by providing safer and more efficient design solutions.

In the theoretical part of the study, a literature review is initially conducted, with references to historical data and applications of energy absorbers. The phenomenon of impact is also explained in mathematical terms, as well as the evaluation indicators of structural strength against impact loads (crashworthiness indicators).

In the experimental part of the study, the process followed in the laboratory is initially presented. Subsequently, the experimental results are presented, and finally, the modeling process for finite element simulation and the computational results are provided. Finally, a comparison between experimental and computational results is made, which are then discussed.

The results of the experimental process indicate that one of the four structures constructed gives satisfactory results. Regarding the computational model, the structures did not appear to show significant differences; however, the results were contradicted by the images of the deformed structures from the experimental tests. In any case, further research is recommended because the results were generally encouraging, with possible modifications to some methods and a higher degree of repeatability for better reliability.

ΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Επιβλέπων:

Δημήτριος Μανωλάκος, Ομότιμος Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Μέλη Επιτροπής:

Κόλλια Κωνσταντίνα, Καθηγήτρια, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Μανωλάκος Δημήτριος, Ομότιμος Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Μαρκόπουλος Άγγελος, Αναπλ. Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

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.

Αρχικά, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου, Δημήτριο Μανωλάκο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να συμμετάσχω σε αυτή την ερευνητική εργασία. Καθ' όλη τη διάρκεια της διεκπεραίωσης της εργασίας ήταν αρωγός και οι συμβουλές του και η καθοδήγησή του ήταν πάντα καίριες ώστε να διευκολύνεται η διαδικασία.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες, θα ήθελα να εκφράσω και για τον κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο (ΕΔΙΠ), 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.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το φίλο και συνεργάτη μου, Δημήτρη Στεργίου, καθώς η συνεργασία μας στο πλαίσιο συγγραφής των μεταπτυχιακών εργασιών μας την τελευταία χρονιά ήταν καθόλα εξαιρετική.

Τέλος, δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους γονείς και την αδερφή μου, και τους φίλους μου, καθώς η στήριξη τους, η αγάπη τους, οι συμβουλές και η πίστη τους σε εμένα συνέβαλαν καθοριστικά στην πορεία μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ABSTRACT	v
ΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ	vi
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	vii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	2
2.1 Ιστορικά Στοιχεία.....	2
2.2 Εφαρμογές	3
3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	6
3.1 Χάλυβας.....	6
3.1.1 Διαδικασία Παραγωγής	7
3.1.2 Μηχανικές Ιδιότητες.....	7
3.1.3 Δευτερεύοντα Στοιχεία Κράματος Χάλυβα.....	8
3.2 Θεωρία της Κρούσης	9
3.2.1 Ελαστική Κρούση.....	9
3.2.2 Ανελαστική Κρούση.....	10
3.3 Δείκτες Crashworthiness.....	11
3.4 Σχηματισμός Λοβών και Είδη Παραμορφώσεων	15
3.4.1 Σχηματισμός Λοβών	15
3.4.2 Ενεργό Μήκος Κατάρρευσης	17
3.5 Πλευρική Φόρτιση.....	21
3.5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το μηχανισμό κατάρρευσης:.....	22
3.6 Σύνθετες Δομές.....	23
4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	24
4.1 Δοκίμια Πειραματικού Προγράμματος.....	24
4.1.1 Ονοματολογία Δοκιμίων	25
4.2 Εξοπλισμός και Πειραματική Διαδικασία.....	29
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	43
5.1 Αποτελέσματα Στατικής Φόρτισης.....	43
5.2 Αποτελέσματα Δυναμικής Φόρτισης.....	51
6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	62
6.1 Μεθοδολογία.....	62
6.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	73
6.2.1 Δοκίμιο R1_D.....	73

6.2.2	Δοκίμιο R2_D	77
6.2.3	Δοκίμιο R3_D	81
6.2.4	Δοκίμιο R4_D	85
7	ΣΥΓΚΡΙΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	89
7.1	Σύγκριση Αποτελεσμάτων	89
7.2	Συμπεράσματα	92
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	94

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1.	Στρατιωτική γέφυρα Bailey.....	2
Εικόνα 2.2.	Ζώνες καταστροφής στο εμπρόσθιο και οπίσθιο τμήμα αυτοκινήτου	3
Εικόνα 2.3.	Προστατευτικό οδόφραγμα (διαστάσεις σε mm).....	4
Εικόνα 3.1.	Διάφορες διατομές χάλυβα.....	6
Εικόνα 4.1.	Διατομή δοκιμίου και πλαϊνή όψη δοκιμίου.....	24
Εικόνα 5.1.	Δοκίμιο R1_D, μετά την κρούση.....	52
Εικόνα 5.2.	Δοκίμιο R2_D, μετά την κρούση.....	54
Εικόνα 5.3.	Δοκίμιο R3_D_1, μετά την κρούση.....	56
Εικόνα 5.4.	Δοκίμιο R3_D_2, μετά την κρούση.....	58
Εικόνα 5.5.	Δοκίμιο R4_D, μετά την κρούση.....	60
Εικόνα 6.1:	Δομή πριν την προσομοίωση κρούσης.....	62
Εικόνα 6.2.	Δημιουργία Shell Section για τα σωληνωτά δοκίμια.....	63
Εικόνα 6.3:	Δημιουργία Solid Section: plup για τη σφύρα και pldn για την απαραμόρφωτη κάτω πλάκα.....	64
Εικόνα 6.4.	Ορισμός υλικού (χάλυβα) για τις διατομές.....	65
Εικόνα 6.5.	Ορισμός υλικού και βαθμών ελευθερίας για σφύρα.....	66
Εικόνα 6.6.	Ορισμός υλικού και βαθμών ελευθερίας για κάτω πλάκα.....	66
Εικόνα 6.7.	Δημιουργία σερτ αποτελούμενα από τα επιμέρους parts (ορθογωνικές σωληνωτές διατομές).....	67
Εικόνα 6.8	Αντιστοίχιση του στοιχείου της κάτω πλάκας (pldn) με το υλικό (rigid material) και τη διατομή (solid section).....	68
Εικόνα 6.9.	Αντιστοίχιση των στοιχείων κελυφωτής διατομής (shell section) με τα στοιχεία των δοκιμίων (parts) και το υλικό (material).....	68
Εικόνα 6.10.	Αντιστοίχιση του στοιχείου της σφύρας (plup) με το υλικό (rigid material) και τη διατομή (solid section).....	69
Εικόνα 6.11.	Ορισμός ιδιοτήτων διεπιφανειών δομής-σφύρας και δομής-κάτω πλάκας	69
Εικόνα 6.12.	Ορισμός ιδιοτήτων αλληλεπίδρασης διεπιφανειών εσωτερικά της δομής	70
Εικόνα 6.13.	Απόδοση ταχύτητας πτώσης σφύρας από ύψος 1.5 m.....	70
Εικόνα 6.14.	Επιλογή μοντέλου Hourglass	71
Εικόνα 6.15.	Ορισμός χρόνου τερματισμού κρουστικής δοκιμής στα 40 ms	71

Εικόνα 6.16. . Εντολές για διαγράμματα Φορτίου – Χρόνου και Μετατόπισης – Χρόνου.....	72
Εικόνα 6.17. Δοκίμιο R1_D.....	75
Εικόνα 6.18. Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου R1_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης.....	75
Εικόνα 6.19. Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου R1_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης.....	76
Εικόνα 6.20. Προοπτική απεικόνιση δοκιμίου R1_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης.....	76
Εικόνα 6.21. Δοκίμιο R2_D.....	79
Εικόνα 6.22. Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου R2_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης.....	79
Εικόνα 6.23. Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου R2_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης.....	80
Εικόνα 6.24. Προοπτική απεικόνιση δοκιμίου R2_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης.....	80
Εικόνα 6.25. Δοκίμιο R3_D.....	83
Εικόνα 6.26. Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου R3_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης.....	83
Εικόνα 6.27. Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου R3_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης.....	84
Εικόνα 6.28. Προοπτική απεικόνιση δοκιμίου R3_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης.....	84
Εικόνα 6.29. . Δοκίμιο R4_D.....	87
Εικόνα 6.30. Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου R4_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης.....	87
Εικόνα 6.31. Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου R4_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης.....	88
Εικόνα 6.32. Προοπτική απεικόνιση δοκιμίου R4_D στο τέλος της δοκιμής κρούσης.....	88

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 4.1. Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης λωρίδας χάλυβα υπό εφελκυστική δοκιμή.Εικόνα 4.5. Εφελκυστική δοκιμή λωρίδας χάλυβα	33
Διάγραμμα 4.1. Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης λωρίδας χάλυβα υπό εφελκυστική δοκιμή.....	34
Διάγραμμα 4.2. Δοκίμιο R_A, υπό δυναμική καταπόνηση, με πλευρά επιβολής φορτίου πλάτους 30 mm	37
Διάγραμμα 4.3. Δοκίμιο R_B, υπό δυναμική καταπόνηση, με πλευρά επιβολής φορτίου πλάτους 30 mmΕικόνα 4.8. Μεμονωμένα δοκίμια υπό πλευρική δυναμική καταπόνηση.....	37
Διάγραμμα 4.3. Δοκίμιο R_B, υπό δυναμική καταπόνηση, με πλευρά επιβολής φορτίου πλάτους 30 mm	38
Διάγραμμα 4.5 Δοκίμιο R_C, υπό δυναμική καταπόνηση, με πλευρά επιβολής φορτίου πλάτους 40 mm	39
Διάγραμμα 4.4. Δοκίμιο R_D, υπό δυναμική καταπόνηση, με πλευρά επιβολής φορτίου πλάτους 40 mm	39
Διάγραμμα 5.1. Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 1, R1_ΣΕικόνα 4.11. Δομές για στατική φόρτιση.....	42
Διάγραμμα 5.1. Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 1, R1_Σ	43
Διάγραμμα 5.2. Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου R1_Σ.....	44
Διάγραμμα 5.3. Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης δοκιμίου R2_Σ	45
Διάγραμμα 5.4. Διάγραμμα Τάσης – Μετατόπισης δοκιμίου R2_Σ	45
Διάγραμμα 5.5. Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης δοκιμίου R3_Σ	47
Διάγραμμα 5.6. Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου R3_Σ.....	47
Διάγραμμα 5.7. Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης δοκιμίου R4_Σ.....	49
Διάγραμμα 5.8. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης δοκιμίου R4_Σ	49
Διάγραμμα 5.9. Δοκίμιο R1_D υπό δυναμική καταπόνηση	51
Διάγραμμα 5.10. Δοκίμιο R2_D, υπό δυναμική καταπόνηση	53
Διάγραμμα 5.11. Δοκίμιο R3_D_1, υπό δυναμική καταπόνηση.....	55
Διάγραμμα 5.12. Δοκίμιο R3_D_2, υπό δυναμική καταπόνηση	57
Διάγραμμα 5.13. Δοκίμιο R4_D, υπό δυναμική καταπόνηση	59
Διάγραμμα 5.14. Συγκριτικό διάγραμμα δομών υπό δυναμική καταπόνηση	61
Διάγραμμα 6.1. Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) δοκιμίου R1_D.....	73
Διάγραμμα 6.2. Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) δοκιμίου R1_D	73
Διάγραμμα 6.3. Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Displacement) δοκιμίου R1_D	74
Διάγραμμα 6.4. Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) δοκιμίου R2_D.....	77
Διάγραμμα 6.5. Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) δοκιμίου R2_D	77
Διάγραμμα 6.6. Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Displacement) δοκιμίου R2_D	78
Διάγραμμα 6.8. Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) δοκιμίου R3_D	81
Διάγραμμα 6.7. Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) δοκιμίου R3_D.....	81

Διάγραμμα 6.9. Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Displacement) δοκιμίου R3_D	82
Διάγραμμα 6.11. Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) δοκιμίου R4_D	85
Διάγραμμα 6.10. Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) δοκιμίου R4_D.....	85
Διάγραμμα 6.12. Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Displacement) δοκιμίου R4_D	86
Διάγραμμα 7.1. Συγκριτικό ιστόγραμμα μέγιστων τιμών φορτίων	90
Διάγραμμα 7.2. Συγκριτικό ιστόγραμμα μέγιστων τιμών μετατοπίσεων	90

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως κρούση ορίζεται η φυσική συνάντηση δύο σωμάτων με βίαιο και αιφνίδιο τρόπο. Στόχος της μηχανικής, στην ουσία της, είναι η δημιουργία και εύρεση λύσεων που ανταποκρίνονται στις ανάγκες των ανθρώπων. Ένας βασικός παράγοντας για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι η ασφάλεια. Με τον σχεδιασμό δομών που είναι ικανές να απορροφούν την ενέργεια κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος τραυματισμός ή ζημιά, και έτσι αντιμετωπίζεται η πτυχή της ασφάλειας. Επομένως, η αντοχή σε κρούση δεν είναι απλώς μια τεχνική απαίτηση, αλλά αποτελεί ζήτημα προστασίας της ανθρώπινης ζωής και ευημερίας. Για παράδειγμα, στην αυτοκινητοβιομηχανία, οι μηχανικές προδιαγραφές επηρεάζουν άμεσα την ασφάλεια των οδηγών, των επιβατών και των πεζών κατά τις συγκρούσεις. Στην αεροδιαστημική και την πολιτική μηχανική, η αντοχή έναντι κρούσης μπορεί να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην επιβίωση ανθρώπων σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης.

Επιπλέον, οι εφαρμογές της μηχανικής καθοδηγούνται από νομικά και κανονιστικά πλαίσια τα οποία επιβάλλουν συγκεκριμένα πρότυπα ασφαλείας. Η κρουστική αντοχή αποτελεί κρίσιμη παράμετρο και, κατά συνέπεια, οι μηχανικοί οφείλουν να τηρούν τις απαιτήσεις αυτές για να εξασφαλίζεται ότι τα σχέδιά τους πληρούν τις προϋποθέσεις και τα πρωτοκόλλα ασφαλείας. Η εμπιστοσύνη του κοινού στις εφαρμογές της μηχανικής είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το αίσθημα ασφάλειας και ενισχύεται με τη δέσμευση στην ασφάλεια.

Στις μέρες μας, η αναζήτηση για βελτίωση των προδιαγραφών έναντι της κρούσης, σε συνδυασμό με την ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, ωθεί σε ανάπτυξη καινοτόμων υλικών καθώς και σε μεθοδολογίες σχεδιασμού, με αποτέλεσμα να ωφελούνται οι διάφοροι κλάδοι της μηχανικής. Άλλωστε, η συνεργασία μεταξύ των κλάδων είναι αναγκαία, καθώς το φαινόμενο των συγκρούσεων δεν απαντάται αποκλειστικά σε έναν τομέα αφενός και, αφετέρου, η βελτιστοποίηση των αντοχών κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή διαφορετικών δομών αφορά στην πλειοψηφία των κλάδων των θετικών επιστημών (φυσικοί, μηχανικοί, επιστήμονες υλικών κ.α.).

Τέλος, δε γίνεται να παραληφθούν οι οικονομικές συνέπειες του προβλήματος. Με την ανακάλυψη νέων λύσεων, αλλά και πρακτικών, διευκολύνεται ο περιορισμός των οικονομικών βλαβών από ατυχήματα διότι μειώνονται τα έξοδα επισκευών, επανακατασκευής και αποζημιώσεων.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Ιστορικά Στοιχεία

Η χρήση μεταλλικών δομών ως μέσον απορρόφησης ενέργειας κρούσης, ξεκίνησε πιθανότατα από την αρχαία εποχή, αλλά διαδόθηκε ευρέως κατά τη διάρκεια της βιομηχανικής επανάστασης, όπου η τεχνολογία και οι κατασκευαστικές τεχνικές εξελίχθηκαν σημαντικά.

Κατά τον 19^ο αιώνα, οι μεταλλικές κατασκευές άρχισαν να χρησιμοποιούνται εκτενώς στην κατασκευή γεφυρών και κτιρίων, ειδικά μετά την ανάπτυξη νέων μεθόδων παραγωγής χάλυβα. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, ξεκίνησε η εφαρμογή των πρώτων χαλύβδινων κατασκευών σε οχήματα, για τα κινητήρια μέρη σε πρώτο στάδιο. Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, η τεχνολογία των μεταλλικών κατασκευών βελτιώθηκε σημαντικά. Αιτία ήταν η ανάγκη για περισσότερες εφαρμογές, όπως οι γέφυρες Bailey, οι οποίες ήταν εύκολες και γρήγορες στη συναρμολόγηση.



Εικόνα 2.1. Στρατιωτική γέφυρα Bailey

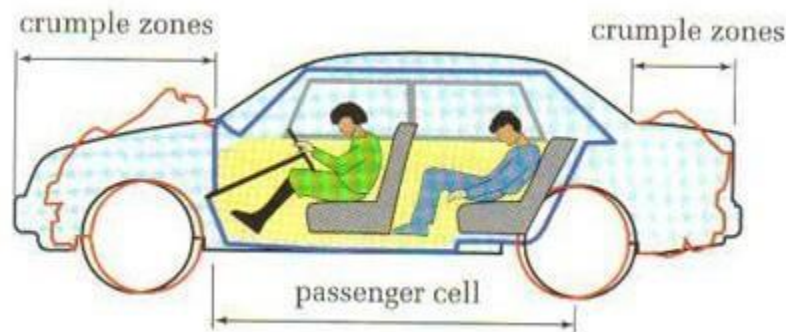
Μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, η τεχνολογία των μεταλλικών κατασκευών συνέχισε να εξελίσσεται περισσότερο, καθώς εμφανίστηκαν κράματα υψηλής αντοχής και μικρού βάρους, συνδυάζοντας την ανθεκτικότητα με την απόδοση. Σήμερα, οι μεταλλικές δομές χαλύβδινων σκελετών χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων των κτιρίων ειδικών προδιαγραφών και υψηλής αντοχής, των γεφυρών και οδικών συστημάτων και, σαφώς, της ασφάλειας στις μεταφορές (σιδηροδρομικές κ.α.).

2.2 Εφαρμογές

Ο σχεδιασμός των κατασκευών ώστε να αντεπεξέρχονται στο φαινόμενο της κρούσης, είναι ένα ιδιαίτερος κρίσιμο πεδίο στη μηχανική, το οποίο επικεντρώνεται στην ανάπτυξη υλικών και δομών που μπορούν να αντέξουν τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κρούση. Οι διάφοροι κλάδοι της μηχανικής είναι αλληλένδετοι και, κατά συνέπεια, η διασφάλιση της αντοχής έναντι κρούσης βρίσκει εφαρμογές σε πολλούς από αυτούς (Johnson, 1996).

Στην αυτοκινητοβιομηχανία, η ασφάλεια των επιβατών διασφαλίζεται μέσω της ικανότητας των οχημάτων να απορροφήσουν την ενέργεια κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης. Ο σχεδιασμός διαφορετικών μοντέλων, ώστε να εξεταστούν όλοι οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να εκδηλωθεί μια σύγκρουση είναι εξαιρετικά σημαντικός για την προστασία της ανθρώπινης ζωής και την ελαχιστοποίηση των ζημιών. 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 καταστροφής (crumple zones) είναι ειδικά σχεδιασμένες περιοχές στην εμπρόσθια και οπίσθια πλευρά των αυτοκινήτων που σχεδιάζονται για να παρέχουν προστασία στους επιβάτες, κατά τη διάρκεια ενός τροχαίου ατυχήματος. Λειτουργούν μέσω της απορρόφησης ενέργειας της σύγκρουσης, καθώς κατασκευάζονται από ειδικά σχεδιασμένα υλικά, όπως ενισχυμένοι χάλυβες ή πλαστικά ειδικών προδιαγραφών. Τα υλικά αυτά, έχουν την ιδιότητα να συμπιέζονται κατά τη σύγκρουση, ούτως ώστε να ελαχιστοποιούνται οι δυνάμεις που μεταφέρονται στους επιβάτες (Grabianowski, 2011).

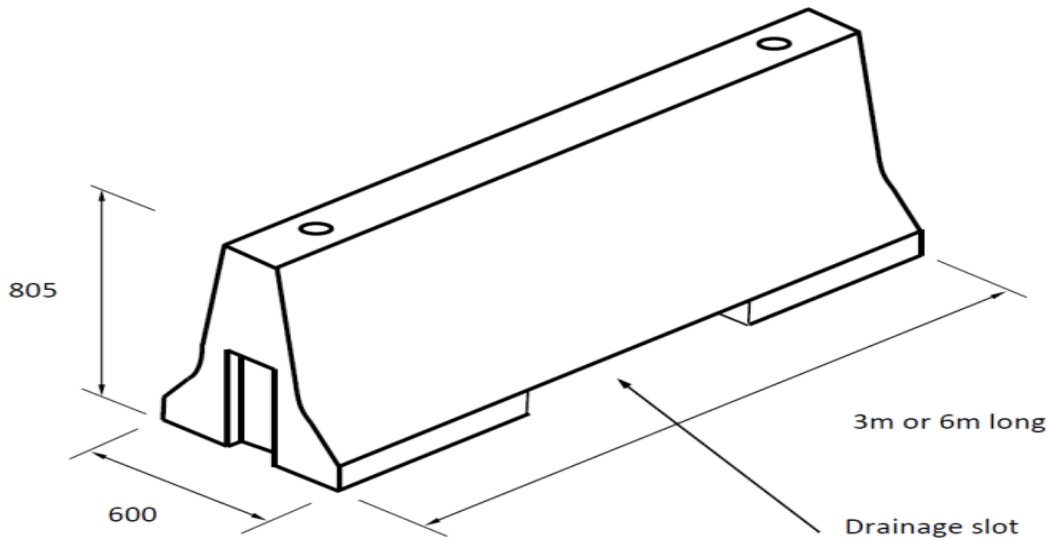


Εικόνα 2.2. Ζώνες καταστροφής στο εμπρόσθιο και οπίσθιο τμήμα αυτοκινήτου

Τις τελευταίες δεκαετίες, η ανάπτυξη της τεχνολογίας σύνθετων υλικών, έχει οδηγήσει και στην αναπόφευκτη χρήση τους στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η ικανότητα των σύνθετων υλικών να απορροφούν ενέργεια σχετίζεται με πληθώρα παραμέτρων, όπως ο τύπος της ίνας, ο τύπος της μήτρας, η αρχιτεκτονική των ινών και η γεωμετρία. Η έρευνα σε αυτό το πεδίο συνεχίζεται, δεδομένου ότι η δυνατότητα συνδυασμού διάφορων υλικών για την εύρεση του καταλληλότερου, είναι εξαιρετικά ευρεία, ενώ ρόλο παίζει και το κόστος παραγωγής, σαφώς (Jacob et al., 2004).

Αν και η αντοχή έναντι της κρούσης είναι μια έννοια που έχει συσχετιστεί κυρίως με την αυτοκινητοβιομηχανία, οι επεκτάσεις της στον κλάδο της πολιτικής μηχανικής δεν είναι αμελητέες αν αναλογιστεί κανείς τη σημασία του σχεδιασμού των κατασκευών με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ανθεκτικά σε περίπτωση παρουσίας τέτοιων φαινομένων με στόχο, κατά βάση, την προστασία των χρηστών και, δευτερευόντως, την ελαχιστοποίηση βλαβών που συνεπάγονται οικονομική ζημία για την ανακατασκευή ή επισκευή των κατεστραμμένων κατασκευών. Στην πολιτική μηχανική, η εφαρμογή των αρχών της αντοχής κατά της κρουστικής καταπόνησης, σταδιακά, αποκτά μεγαλύτερη σημασία με στόχο την άμβλυση των επιπτώσεων σε φαινόμενα συγκρούσεων, βιομηχανικών ατυχημάτων και φυσικών καταστροφών. Ο βασικός κλάδος στον οποίο απαντώνται τέτοιου είδους φαινόμενα είναι κυρίως η συγκοινωνιολογία, αν και βρίσκει εφαρμογή και στον αντισεισμικό σχεδιασμό κτιρίων (Wang et al., 2023) και των λιμενικών έργων (Wang et al., 2022).

Το πλέον τυπικό παράδειγμα είναι οι συγκρούσεις οχημάτων. Σύμφωνα με έρευνες, η πρόσκρουση σε οδόφραγμα ενέχει μικρότερο κίνδυνο τραυματισμού από την πρόσκρουση σε εμπόδιο (στύλος, τοίχος) ή την πτώση από πρανές, με το κίνδυνο να μειώνεται από 39% έως και 85%. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος απορρόφησης της σύγκρουσης φαίνεται να είναι η εγκατάσταση οδοφραγμάτων με καλώδια (cable barriers) (όπου το επιτρέπουν οι κυκλοφοριακές συνθήκες), ακολουθούν τα μεταλλικά κιγκλιδώματα (guardrails) και, τέλος, τα τοιχία σκυροδέματος (concrete walls) (Zou et al., 2014).



Εικόνα 2.3. Προστατευτικό οδόφραγμα (διαστάσεις σε mm)

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό παράδειγμα, είναι οι συγκρούσεις οχημάτων με ανισόπεδες διαβάσεις (οδικές ή σιδηροδρομικές) λόγω υπέρβασης ύψους. Είναι σαφές ότι τέτοιου είδους ατυχήματα, ακόμα και αν αποφευχθεί ο οποιοσδήποτε τραυματισμός, έχουν σοβαρές οικονομικές επιπτώσεις τόσο για τα ίδια τα οχήματα όσο και για τις υποδομές. Σε έρευνες, όπως αυτή των Ozdagli et al., μελετάται το πρόβλημα σύγκρουσης ημιρυμουλκούμενων φορτηγών με υπερυψωμένες σιδηροδρομικές γέφυρες και διαβάσεις οι οποίες οδηγούν σε διακοπές στην κυκλοφορία. Οι υφιστάμενες μέθοδοι ενημέρωσης των οδηγών (λχ προειδοποιητικές πινακίδες) φαίνεται είναι ανεπαρκείς, και οι συγκρούσεις παραμένουν ένα επίμονο πρόβλημα. Η προτεινόμενη λύση περιλαμβάνει την προσθήκη δοκών απορρόφησης κραδασμών σε αυτές τις γέφυρες για την εξομάλυνση της σύγκρουσης. Οι δοκοί αυτές μπορούν να ενισχύσουν την ασφάλεια των σιδηροδρόμων, των οδοστρωμάτων, των οδηγών και των , ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη έρευνα, η προσθήκη δοκών απορρόφησης κραδασμών μειώνει σημαντικά τις μόνιμες παραμορφώσεις, διατηρώντας τη λειτουργικότητα της γέφυρας μετά τη σύγκρουση, ενώ απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός της αναμενόμενης έντασης της κρούσης για το βέλτιστο σχεδιασμό της δοκού απορρόφησης ενέργειας (Ozdagli et al., 2020).

Ένα άλλο ζήτημα, το οποίο απασχολεί τον κλάδο είναι αυτό των τρομοκρατικών επιθέσεων σε πολιτικά κτίρια. Οι εκρήξεις παράγουν υπερηχητικά φωστικά κύματα, τα οποία καταστρέφουν δομές και οδηγούν σε απώλειες ανθρώπινων ζωών. Συνήθως, οι συμβατικές δομές δεν είναι σχεδιασμένες με τρόπο τέτοιο ώστε να αντιστέκονται σε φορτία από εκρήξεις, και συνεπώς, ο επανασχεδιασμός και η ενίσχυση τέτοιων κτιρίων έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Διάφορες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για την εύρεση ενός βέλτιστου μηχανισμού απορρόφησης ενέργειας, εφαρμόσιμου σε ευρύ πεδίο εφαρμογών σχεδιασμού. Στην εργασία των Abada et al. (Abada & Ibrahim, 2020), ερευνάται ο συνδυασμός δύο τεχνικών απορρόφησης με χρήση δομών λεπτότοιχων σωλήνων, από κράμα αλουμινίου και εποξικής ρητίνης. Ο συνδυασμός πολλαπλών σωλήνων για το σχηματισμό δομής με περισσότερα του ενός κελιά, έδειξε αύξηση 116% στην ενέργεια απορρόφησης σε σχέση με την αντίστοιχη δομή με έναν μόνο σωλήνα. Μάλιστα, τα παραπάνω ευρήματα φαίνεται να στηρίζονται και από την αριθμητική προσομοίωση, με το πρόγραμμα LS Dyna, τα οποία παρουσίασαν αύξηση της τάξεως του 131.70% σε σχέση αντίστοιχα.

3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

3.1 Χάλυβας

Ο χάλυβας είναι ένα κράμα σιδήρου με άνθρακα σε διάφορες αναλογίες, καθώς επίσης και σε συνδυασμό με άλλα μέταλλα. Είναι γνωστός και ως ατσάλι, ενώ ο χάλυβας που δεν σκουριάζει είναι το γνωστό ανοξείδωτο ατσάλι (κράμα σιδήρου, άνθρακα και χρωμίου).

Αδιαμφισβήτητα, αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα βιομηχανικά υλικά με εξαιρετικά πεδίο εφαρμογών. Ο δομικός χάλυβας προκύπτει από τη θερμή έλαση ημιτελών προϊόντων χάλυβα (κυλινδρικές ή τετράγωνες διατομές) σε θερμοκρασίες πέραν των 900°C. Συναντάται σε επιμήκη (λάμες, κοιλοδοκοί, σιδηροδοκοί) προϊόντα και πλατιά προϊόντα (λαμαρίνες). Διαμορφώνονται σε διάφορες διατομές και προφίλ με συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τα οποία καθορίζουν και τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Ο χάλυβας χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των κατασκευών, της αυτοκινητοβιομηχανίας, των σωλήνων, των εργαλείων, των ατσάλινων καλωδίων και πολλών άλλων. Η ευρεία χρήση του οφείλεται στη σκληρότητα, την αντοχή και την ανθεκτικότητά του.



Εικόνα 3.1. Διάφορες διατομές χάλυβα

3.1.1 Διαδικασία Παραγωγής

Η διαδικασία παραγωγής χάλυβα είναι μια σύνθετη διαδικασία που περιλαμβάνει διάφορα στάδια. Ανάλογα με τον τύπο του χάλυβα που παράγεται και τις επιθυμητές ιδιότητες, οι διαδικασίες μπορεί να διαφέρουν. Ωστόσο, η βασική διαδικασία περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα στάδια:

Εκχύλιση Σιδήρου: Η διαδικασία ξεκινά με την 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: Ο χάλυβας στη συνέχεια χύνεται σε κατάλληλα καλούπια για να διαμορφωθεί σε επιθυμητά σχήματα και μεγέθη.

Θερμική Επεξεργασία: Η θερμική επεξεργασία, όπως η θέρμανση και η ψύξη, χρησιμοποιείται για να δοθούν στον χάλυβα οι επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες, όπως η σκληρότητα και η αντοχή.

Τυποποίηση: Ο χάλυβας μπορεί επίσης να υποστεί τυποποίηση, όπως η περαιτέρω επεξεργασία με κυλινδρικά μηχανήματα για να λάβει το επιθυμητό πάχος και σχήμα.

3.1.2 Μηχανικές Ιδιότητες

Ο χάλυβας έχει διάφορες μηχανικές ιδιότητες που τον καθιστούν ένα ευέλικτο και χρήσιμο υλικό σε πολλές εφαρμογές. Ορισμένες από τις κύριες μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα περιλαμβάνουν:

Αντοχή σε εφελκυσμό (Tensile Strength): Ο χάλυβας έχει υψηλή αντοχή σε τράβηγμα, δηλαδή μπορεί να αντέξει σημαντικές δυνάμεις που ασκούνται σε αυτόν χωρίς να αποτελείται.

Σκληρότητα (Hardness): Η ικανότητα του χάλυβα να αντιστέκεται σε διάφορες μορφές παραμόρφωσης όταν δέχεται φορτία.

Ελαστικότητα (Elasticity): Ο χάλυβας έχει καλή ελαστικότητα, που του επιτρέπει να επιστρέφει στην αρχική του μορφή μετά από μικρή παραμόρφωση.

Διαπερατότητα (Permeability): Ο χάλυβας είναι μη σκληρός ωστόσο διατηρεί υψηλή αντοχή στη διάβρωση και στη διάβρωση.

Ευελξία (Ductility): Η ικανότητα του χάλυβα να μπορεί να επιτρέψει σημαντική παραμόρφωση πριν από την αποτυχία.

Ακόμη, ο χάλυβας χαρακτηρίζεται επίσης από την ικανότητά του να μπορεί να υποστεί επεξεργασίες όπως η κατεργασία με μηχανικά εργαλεία, η συγκόλληση και η σφυρηλασία, προσθέτοντας έτσι στην ευελιξία και τη χρηστικότητα του σε ποικίλες εφαρμογές.

Τέλος, ο χάλυβας μπορεί να υποστεί επεξεργασίες επιφανειών για να επιτύχει ειδικές ιδιότητες, όπως η αντίσταση στη διάβρωση ή η βελτίωση της αισθητικής. Επιπλέον, ο χάλυβας μπορεί να επεξεργαστεί χημικά για να αποκτήσει ειδικές ιδιότητες, όπως η αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες ή η βελτίωση της αντοχής στη διάβρωση.

3.1.3 Δευτερεύοντα Στοιχεία Κράματος Χάλυβα

Η προσθήκη δευτερευόντων στοιχείων στο βασικό κράμα του χάλυβα μπορεί να έχει σημαντικές επιδράσεις στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Αυτά τα στοιχεία προστίθενται με σκοπό τη βελτίωση ή την προσθήκη επιθυμητών χαρακτηριστικών, όπως αντοχή, σκληρότητα, αντίσταση στη διάβρωση κ.λπ.

Ορισμένα από τα δευτερεύοντα στοιχεία που μπορούν να προστεθούν στον χάλυβα περιλαμβάνουν:

Μαγγάνιο (Manganese): Βελτιώνει την αντοχή και τη σκληρότητα του χάλυβα, καθώς και την ανθεκτικότητά του στη διάβρωση.

Χρώμιο (Chromium): Προσδίδει αντοχή στη διάβρωση και αντίσταση στις υψηλές θερμοκρασίες, καθιστώντας τον χάλυβα κατάλληλο για εφαρμογές σε περιβάλλοντα με υψηλή θερμοκρασία.

Νικέλιο (Nickel): Βελτιώνει την ανθεκτικότητα στη διάβρωση και την αντίσταση στη διάβρωση, καθιστώντας τον χάλυβα κατάλληλο για εφαρμογές σε αυστηρά περιβάλλοντα.

Βανάδιο (Vanadium): Προσδίδει αντοχή και σκληρότητα στον χάλυβα, καθιστώντας τον κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη αντοχή.

Κοβάλτιο (Cobalt): Χρησιμοποιείται σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και φορτία.

Αυτά τα δευτερεύοντα στοιχεία συχνά προστίθενται σε μικρές ποσότητες στον χάλυβα, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής και τις επιθυμητές ιδιότητες του τελικού προϊόντος.

3.2 Θεωρία της Κρούσης

Η θεωρία της κρούσης είναι ένας βασικός τομέας της φυσικής που εξετάζει τις συνέπειες των συγκρούσεων μεταξύ αντικειμένων. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τόσο τις κρούσεις μεταξύ σωμάτων όπως πέτρες ή αυτοκίνητα, όσο και μικρότερα επίπεδα, όπως μόρια ή άτομα. Η θεωρία της κρούσης εξετάζει πώς αλληλεπιδρούν τα αντικείμενα κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης, συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς ενέργειας, της αλλαγής της κίνησης και της παραγωγής θερμότητας.

3.2.1 Ελαστική Κρούση

Η ελαστική κρούση είναι ένα είδος κρούσης μεταξύ δύο αντικειμένων όπου δεν υπάρχει μόνιμη αλλαγή στο σχήμα ή στη δομή των αντικειμένων κατά τη σύγκρουση. Κατά την ελαστική κρούση, η ενέργεια διατηρείται, δηλαδή καμία ενέργεια δεν απορροφάται ή χάνεται κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης. Αυτό σημαίνει ότι η συνολική ενέργεια (η οποία αποτελείται από την κινητική ενέργεια και τη δυναμική ενέργεια) παραμένει σταθερή πριν και μετά την κρούση.

Αυτός ο τύπος κρούσης συχνά συμβαίνει σε αντικείμενα που είναι κατασκευασμένα από ελαστικά υλικά, όπως λάστιχο ή ελαστικά πλαστικά. Κλασικά παραδείγματα ελαστικών κρούσεων περιλαμβάνουν τη σύγκρουση μεταξύ δύο μπάλων πινγκ-πονγκ ή μπιλιάρδου.

Η κατανόηση της ελαστικής κρούσης είναι σημαντική σε πολλούς τομείς, όπως η μηχανική, καθώς βοηθά να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά των υλικών και των αντικειμένων κατά τις κρούσεις και να σχεδιάσουμε καλύτερα συστήματα που μπορούν να αντέξουν τις συγκρούσεις χωρίς μόνιμες ζημιές.

Τα δύο κύρια μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν την ελαστική κρούση είναι:

Μοντέλο της συγκρούσιμης σφαίρας (Colliding Spheres Model): Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις ελαστικές κρούσεις μεταξύ δύο σφαιρικών αντικειμένων. Το μοντέλο υποθέτει ότι οι σφαίρες είναι σταθερές, και ότι κατά τη σύγκρουση δεν υπάρχει απώλεια κινητικής ενέργειας. Με βάση αυτήν την υπόθεση, μπορεί να υπολογιστεί η τελική ταχύτητα των σφαιρών μετά την κρούση.

Μοντέλο του ελαστικού σκληρού σφαίρας (Hard-Sphere Elastic Model): Αυτό το μοντέλο επεκτείνει το μοντέλο της συγκρούσιμης σφαίρας περιλαμβάνοντας την έννοια της σκληρότητας των αντικειμένων. Υποθέτει ότι κατά τη σύγκρουση, τα αντικείμενα συμπεριφέρονται ως σκληρές σφαίρες που αλληλεπιδρούν με ελαστικό τρόπο. Αυτό το μοντέλο επιτρέπει την ανάλυση των κρουστικών συγκρούσεων μεταξύ αντικειμένων που διαφέρουν σε μέγεθος και μάζα.

3.2.2 Ανελαστική Κρούση

Η ανελαστική κρούση είναι ένας τύπος κρούσης μεταξύ δύο αντικειμένων κατά την οποία χάνεται μέρος ή όλη η ενέργεια κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης. Κατά την ανελαστική κρούση, η ενέργεια μετατρέπεται σε άλλες μορφές ενέργειας, όπως θερμότητα, ή απορροφάται από τα αντικείμενα, προκαλώντας αλλαγές στην κίνησή τους ή στη δομή τους.

Τα αντικείμενα μπορεί να υποστούν μόνιμες αλλαγές στη δομή τους κατά την ανελαστική κρούση, και συνήθως αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη ζημιά σε σύγκριση με την ελαστική κρούση. Ένα παράδειγμα ανελαστικής κρούσης είναι η σύγκρουση δύο αυτοκινήτων σε μεγάλες ταχύτητες, όπου υπάρχει συνήθως μεγάλη ζημιά και απώλεια ενέργειας λόγω της απότομης αλλαγής στην κίνηση και τη δομή των οχημάτων.

Η ανελαστική κρούση είναι σημαντική σε πολλούς τομείς, όπως η μηχανική, και η κατανόησή της μας βοηθά να αναπτύξουμε ασφαλέστερα και πιο αποτελεσματικά συστήματα που μπορούν να αντιμετωπίσουν τις συγκρούσεις. Τα βασικά μαθηματικά μοντέλα είναι τα εξής:

1. Αρχή Διατήρησης της Ορμής

$$\Delta \vec{P} = 0 \Leftrightarrow m_{αρχ} \times \vec{v}_{αρχ} = m_{csλ} \times \vec{v}_{csλ}$$

Εξίσωση 3.1

Όπου m η μάζα και v η ταχύτητα του συστήματος.

$$2. E_{αρχ} = E_{csλ} \Leftrightarrow \frac{1}{2} m_1 v_{1,αρχ}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{2,αρχ}^2 = \frac{1}{2} m_1 v_{1,csλ}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{2,csλ}^2 + Q$$

Εξίσωση 3.2

Όπου Q η θερμότητα που εκλύεται ή απορροφάται κατά την κρούση.

3.3 Δείκτες Crashworthiness

Η έννοια της ασφάλειας στην οδική κυκλοφορία και η ανάγκη για τη βελτίωση της ασφάλειας των οχημάτων έχει εξελιχθεί σημαντικά μέσα στον 20ο και 21ο αιώνα. Στις αρχές του 20ού αιώνα, οι αυτοκινητιστές και άλλοι επιβάτες δεν είχαν τα ίδια επίπεδα ασφάλειας που έχουμε σήμερα. Ο όρος Crashworthiness χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην αεροναυπηγική βιομηχανία στις αρχές της δεκαετίας του 1950 και χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αποδοτικότητα της κρούσης μιας κατασκευής με μια άλλη.

Σχήμα 3.1: Τυπική Καμπύλη Φορτίου-Μετατόπισης.

Η έρευνα στον τομέα της ασφάλειας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών δεικτών crashworthiness. Ορισμένοι από αυτούς τους δείκτες περιλαμβάνουν την ενεργειακή απορρόφηση κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης, την αντοχή των δομικών στοιχείων του οχήματος, την απόδοση των αερόσακων και των ζωνών ασφαλείας, και άλλους.

Με την πάροδο του χρόνου, οι δείκτες ασφάλειας έχουν βελτιωθεί και έχουν ενσωματωθεί στους κανονισμούς ασφαλείας των οχημάτων. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας, όπως οι προηγμένοι αισθητήρες, τα συστήματα πρόληψης συγκρούσεων και οι προηγμένες δομικές τεχνολογίες, έχουν συμβάλει επίσης στη βελτίωση της crashworthiness των οχημάτων. Τα συγκεκριμένα κριτήρια-μεγέθη προκύπτουν από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, κατά την πειραματική δοκιμή των υλικών.

Ενέργεια απορρόφησης – Energy absorption (E_{abs})

Η ενέργεια απορρόφησης (E_{abs}) εκφράζει την συνολική ενέργεια που απορροφάται 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 .

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

Εξίσωση 3.3

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 οριοθετείται κάτω από μια τιμή. 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.

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

Εξίσωση 3.4

Σχήμα 3.2: Χαρακτηριστικά συστήματος απορρόφησης ενέργειας: α) Ιδανικό σύστημα απορρόφησης ενέργειας (Crush Force Efficiency 100%), β) Πραγματικό σύστημα απορρόφησης ενέργειας.

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:

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

Εξίσωση 3.5

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} .

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

Εξίσωση 3.6

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).

Αποδοτικότητα Μετατόπισης - Stroke efficiency (SE)

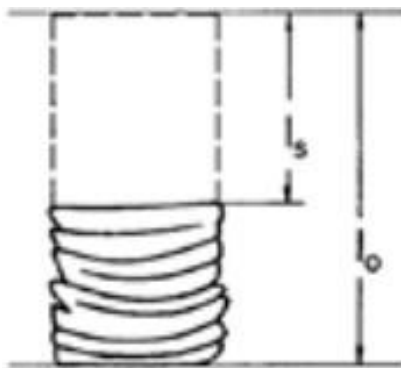
Το SE είναι ο λόγος μεταξύ της μέγιστης παραμόρφωσης l_s του δομικού μέλους απορρόφησης ενέργειας και του αρχικού μήκους l_0 του δομικού μέλους και δίνεται από την σχέση :

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

Εξίσωση 3.7

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).



Σχήμα 3.3. Αποδοτικότητα μετατόπισης

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 κυρίτερα οι επιβάτες σε μία δεδομένη ταχύτητα κρούσης.

3.4 Σχηματισμός Λοβών και Είδη Παραμορφώσεων

3.4.1 Σχηματισμός Λοβών

Μη εκτατοί λοβοί

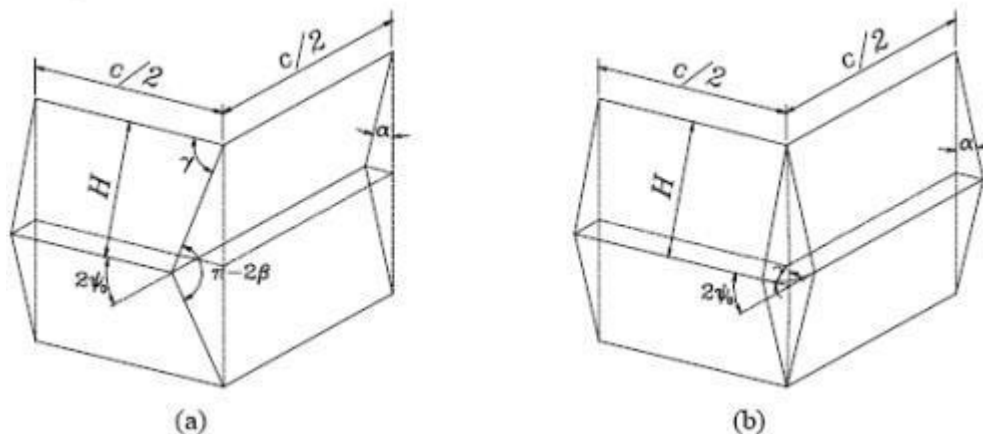
Σε αυτό το είδος παραμόρφωσης, το δοκίμιο που καταρρέει περιέχει δυο είδη αρμών: τα σταθερά οριζόντια, και τα κεκλιμένα μετατοπισμένα. Οι οριζόντιοι πλαστικοί αρμοί στις δυο απέναντι πλευρές στη δημιουργία κάθε λοβού, κινούνται προς τα έξω μειώνοντας το αρχικό τους μήκος, ενώ ταυτόχρονα οι πλαστικοί 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 οριζώντιους πλαστικούς αρμούς.

Εκτατοί λοβοί

Αυτό το είδος παραμόρφωσης χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό τετραγωνικού τύπου αναδίπλωσης συμμετρικό ως προς κάθετο άξονα συμμετρίας/περιστροφής του δοκιμίου. Είναι παρόμοιο με τους κυλινδρικούς δακτυλίους που σχηματίζονται κατά την εκτατή κατάρρευση των κυλινδρικών δοκιμίων.

Ανάμικτου τύπου λοβοί

Αυτός ο τύπος κατάρρευσης, αποτελεί συνδυασμό ενός ή περισσότερων αρχικά σχηματισμένων εκτατών λοβών, οι οποίοι ακολουθούνται από μη εκτατούς λοβούς καθώς προχωράει η κατάρρευση του δοκιμίου. Αν συνδυαστούν κατάλληλα οι δυο προηγούμενοι τύποι θα επιφέρουν το αποτέλεσμα των ανάμικτων λοβών.



Σχήμα 3.4: a) μη εκτατοί λοβοί και b) εκτατοί λοβοί.

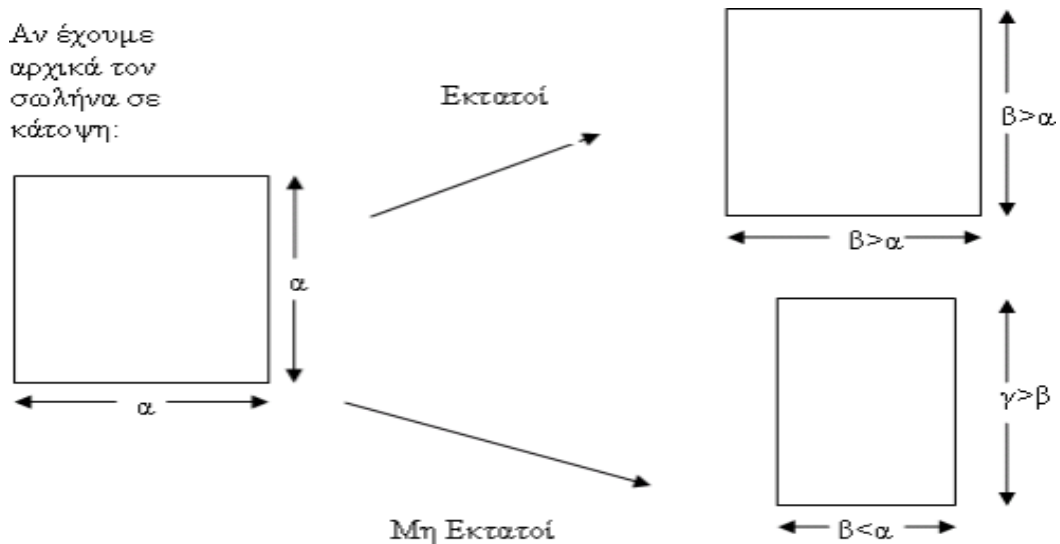
Τύπου Euler (Λυγισμός)

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.

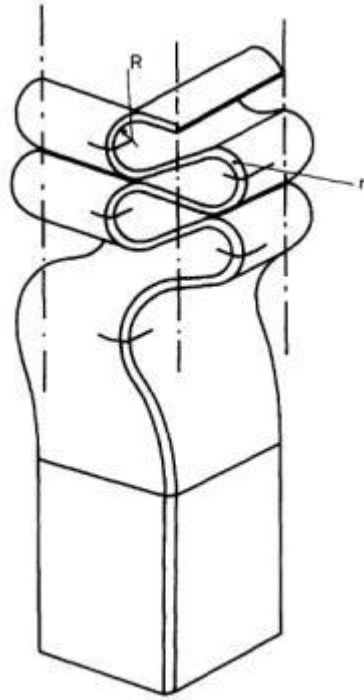
3.4.2 Ενεργό Μήκος Κατάρρευσης

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. 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 (Abramowicz & Jones, 1986).

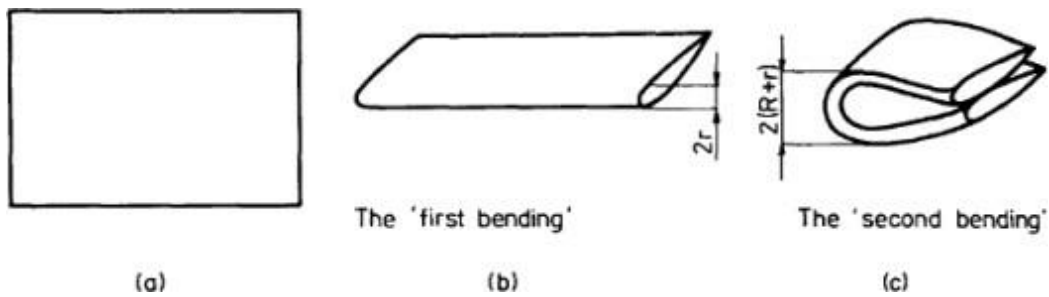
Αξιόλογο είναι ότι ο πλαστικός αρμός διαμορφώνεται ως μια κυνέλη με διπλή καμπύλωση. Η μικρή ακτίνα της καμπύλωσης είναι η r , όπως φαίνεται παραπάνω, και είναι σταθερή σε όλο τον αρμό, και συνήθως είναι ίσο με το πάχος του τοιχώματος του πλέγματος. Η δεύτερη ακτίνα της καμπύλωσης R , είναι κατά πολύ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



Σχήμα 3.5: Εκτατοί και μη εκτατοί λοβοί σε κάτοψη.

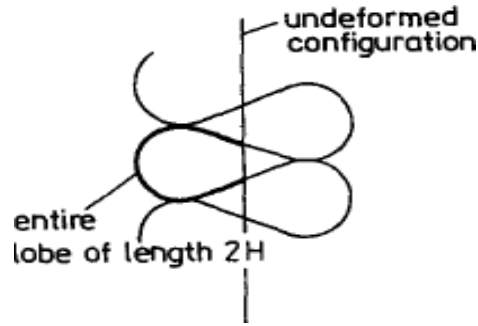


Σχήμα 3.8: Διαδικασία κατάρρευσης δοκιμίου τετραγωνικής διατομής.



Σχήμα 3.11: Αναδίπλωση λεπτού ελάσματος και δημιουργία λοβού.

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 φιξαρισμένους με το υλικό, η ακτίνα του αρμού μηδενίζεται και το ενεργό μήκος κατάρρευσης, είναι ίσο με το μήκος της κυματοροής του τύπου αναδίπλωσης $2H$ (Abramowicz & Jones, 1986).

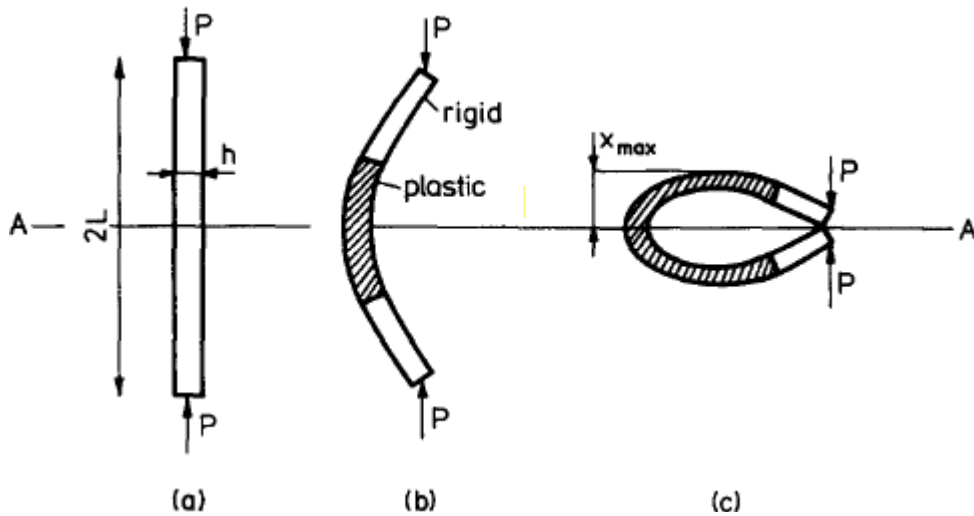


Σχήμα 3.12: Εμφάνιση λοβών και συμμετρία αυτών ως προς θεωρητικά απαραμόρφωτη έδρα δοκιμίου τετραγωνικής διατομής (πλάγια όψη).

Η πραγματική αξονική κατάρρευση των δοκιμίων με λεπτά τοιχώματα τετραγωνικής διατομής, είναι πολύ πιο περίπλοκη από ότι 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.

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 τορσειδούς κυλινδρικής επιφάνειας, μεταφέρεται σε όλο το υλικό. 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 (Liu, 2008).



Σχήμα 3.15: Θλιπτική φόρτιση επίπεδου ελάσματος.

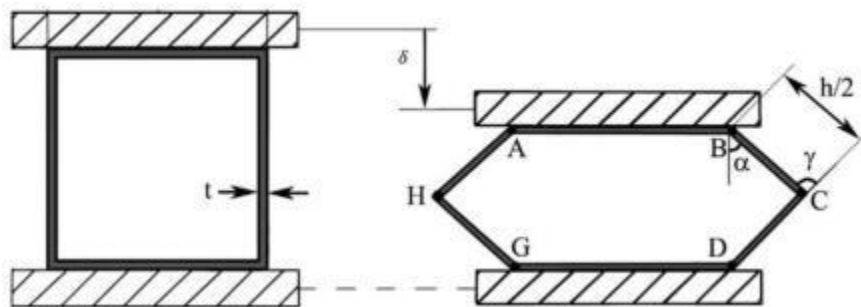
Επομένως, θεωρείται ότι η ακτίνα της κυλινδρικής αναδίπλωσης διαμορφώνεται από τις πλαϊνές έδρες του δοκιμίου, αντί από τις γωνιακές ακμές του δοκιμίου. Τότε το μέγιστο καθ' ύψος μήκος λοβού ελέγχεται και εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

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).

3.5 Πλευρική Φόρτιση

Η εφαρμογή πλευρικού φορτίου σε χαλύβδινα δοκίμια οδηγεί στην πλευρική κατάρρευση, καθώς η θλιπτική τάση επιβάλλεται σε όλο το μήκος του δοκιμίου, παράλληλα στο διαμήκη άξονά του. Αποτελεί μία από τις πιο συνηθισμένες μορφές κατάρρευσης, λόγω της ευρείας εφαρμογής των διατάξεων αυτών στην αυτοκινητοβιομηχανία (Redwood, 1964).

Σε σωληνωτές διατομές, π.χ. τετραγωνικές, ο μηχανισμός παραμόρφωσης περιλαμβάνει τη δημιουργία τριών ζευγών πλαστικών αρμών (EIKONA), δύο εκ των οποίων σχηματίζονται σε διασταυρώσεις καθέτων και οριζόντιων πλευρών, ενώ το τρίτο ζεύγος σχηματίζεται στο μέσο ύψος των κατακόρυφων πλευρών της διατομής.



Εικόνα 3.1. Θεωρητικό μοντέλο πλαστική παραμόρφωσης ορθογώνιου (τετράγωνου) σωλήνα υπό πλευρική φόρτιση.

Η συνολική κατάρρευση επέρχεται όταν οι τοπικές παραμορφώσεις (πτυχές), επεκτείνονται σε όλον τον όγκο του δοκιμίου, και μπορεί να εκδηλωθεί με είτε με κάμψη είτε με θραύση του υλικού. Γενικά, σημαντικό ρόλο παίζει η ταχύτητα, όπως και η ενέργεια της κρούσης, διότι οι έντονες και ταχείες παραμορφώσεις σχετίζονται με υψηλότερες ταχύτητες.

3.5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το 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.

Στον παρακάτω πίνακα, γίνεται μια συνοπτική σύγκριση μεταξύ αξονικής και πλευρικής φόρτισης σωλήνων χάλυβα:

	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	Διαμητικές 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 3.1: Σύγκριση αξονικής-πλευρικής φόρτισης μεταλλικών σωληνωτών διατομών.

3.6 Σύνθετες Δομές

Η κρουστική αντοχή δομών που αποτελούνται από χαλύβδινους σωλήνες στιβαγμένους μαζί αποτελεί ένα σύνθετο θέμα που αφορά στην αντοχή και την απόκριση των δομών αυτών σε κρουστικές καταπονήσεις. Τέτοιες δομές χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η κατασκευαστική και η αεροναυπηγική, λόγω της υψηλής αντοχής και ανθεκτικότητας του χάλυβα.

Πολλοί ερευνητές, ισχυρίζονται ότι η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας αυξάνεται σημαντικά με τη στίβαξη πολλαπλών σωλήνων (πχ ορθογωνικής ή τετραγωνικής διατομής). Μάλιστα, παρουσιάζουν έντονο ενδιαφέρον για εφαρμογές με περιορισμένη ζώνη κατάρρευσης, διότι αποτελούνται από περισσότερα του ενός στοιχεία που συμπιέζονται στον ίδιο χώρο με συνέπεια να εκδηλώνουν μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ανά μονάδα μήκους σε σχέση με ένα μεμονωμένο κέλυφος απλής γεωμετρίας (Wierzbicki et al., 1992).

Για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων, οι σωλήνες μπορεί να είναι διατεταγμένοι σε διάφορες διαμορφώσεις (πχ με παράλληλη ή κάθετη στίβαξη), ενώ η σύνδεση μπορεί να γίνει είτε με χρήση κοχλιών είτε με συγκόλληση. Όπως και στην περίπτωση των μεμονωμένων στοιχείων, το πάχος του δοκιμίου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, με στοιχεία μεγαλύτερου πάχους να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι, σε σχέση με συμπαγείς δομές, οι σωλήνες έχουν μικρότερο βάρος, παρουσιάζοντας μια καλή αναλογία αντοχής προς βάρος. Τέλος, το είδος και η ποιότητα της σύνδεσης παίζει, επίσης, καθοριστικό ρόλο στην συμπεριφορά της δομής: οι ισχυρές και ομοιόμορφες συγκολλήσεις μειώνουν σημαντικά τον κίνδυνο αστοχίας στις συνδέσεις (Wu et al., 2020).

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

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.

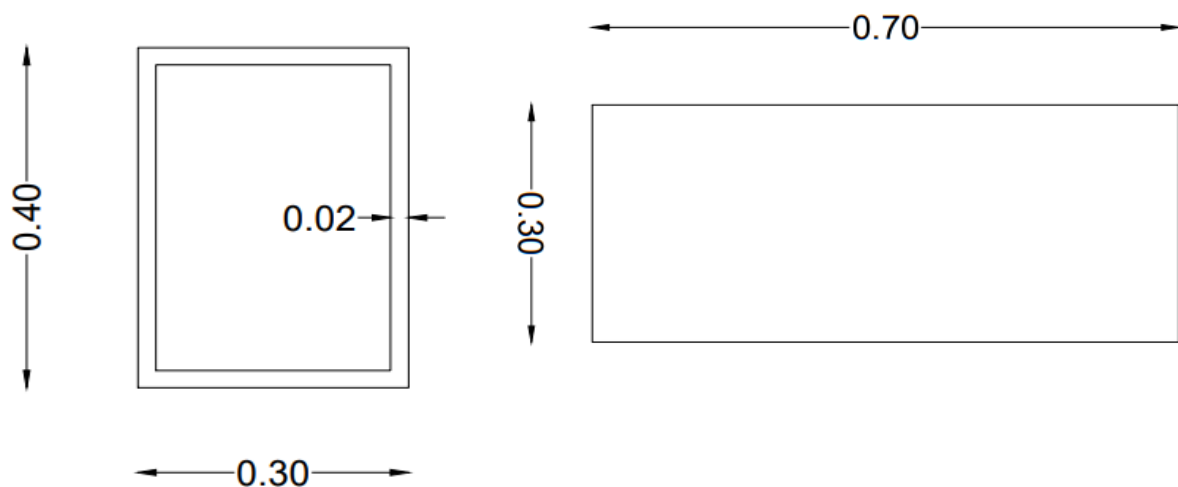
4.1 Δοκίμια Πειραματικού Προγράμματος

Τα δοκίμια των πειραμάτων ήταν κατασκευασμένα από κάμψη επίπεδων ελασμάτων χάλυβα (στραντζάρισμα), με τη χρήση συγκόλλησης στην ένωσή τους διαστάσεων 30 x 40 mm, ώστε να διαμορφωθεί η ορθογωνική διατομή πάχους 1.5 mm (περίπου). Οι ορθογωνικοί σωλήνες προμηθεύτηκαν από το εμπόριο.

Στο χώρο του εργαστηρίου πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των σωλήνων για τη διαμόρφωση των δοκιμών. Με τη χρήση κοπτικής μηχανής, κόπηκαν σωλήνες μήκους 7 cm. Για το σχηματισμό των δομών του πειραματικού προγράμματος, χρησιμοποιήθηκαν έξι (6) σωλήνες, σε διαφορετικούς προσανατολισμούς, με αποτέλεσμα η τελική δομή να έχει στρώσεις (επίπεδα) ορθογωνικών σωλήνων.

Στο σύνολο κόπηκαν 64 σωλήνες (30 x 40 mm), μήκους 7 cm, οι οποίοι κολλήθηκαν με χρήση ζεστής σιλικόνης, ώστε να συγκρατηθούν κατά τη δυναμική δοκιμή. 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.

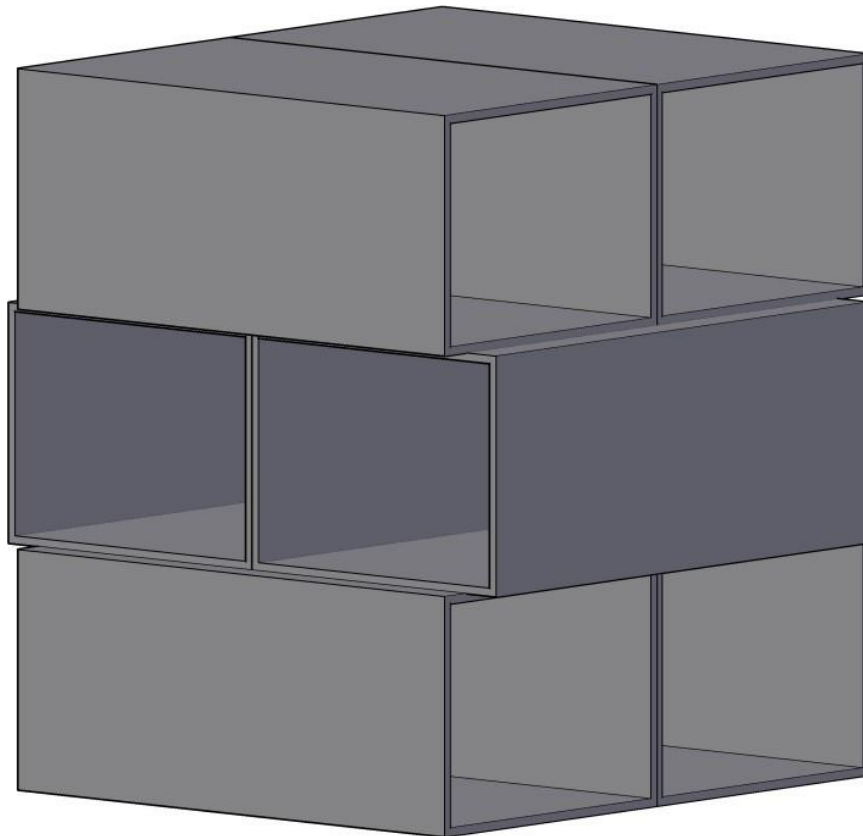


Εικόνα 4.1. Διατομή δοκιμίου και πλαϊνή όψη δοκιμίου

4.1.1 Ονοματολογία Δοκιμών

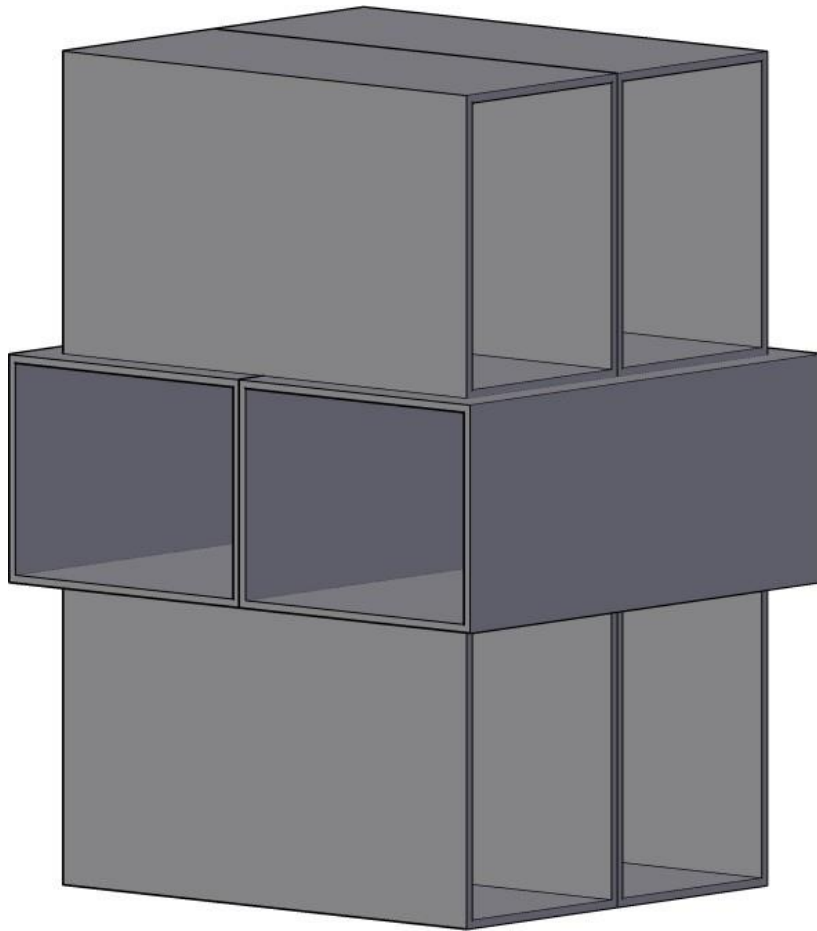
Στα παρακάτω σχήματα, περιγράφεται σχηματικά η ονοματολογία των δομών ανάλογα με τον προσανατολισμό των δοκιμών. Με το γράμμα **R** δηλώνεται το ορθογωνικό σχήμα (Rectangular), ενώ ακολουθεί ο αύξων αριθμός (**A/A**) που καθορίζεται από τον προσανατολισμό του δοκιμίου και τέλος, με το γράμμα **D** (dynamic) ή **S** (static) προσδιορίζεται το είδος της καταπόνησης στην οποία υπεβλήθη το δοκίμιο. Έτσι, για παράδειγμα, το δοκίμιο R1 που δέχεται δυναμική φόρτιση λαμβάνει την ονομασία **R1_D** κ.ο.κ.

- Δοκίμια R1: όλα τα στοιχεία έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, με την πλευρά πλάτους 40 mm να αποτελεί την επιφάνεια έδρασης (κάτω πλευρά) και την επιφάνεια που δέχεται το φορτίο (άνω).



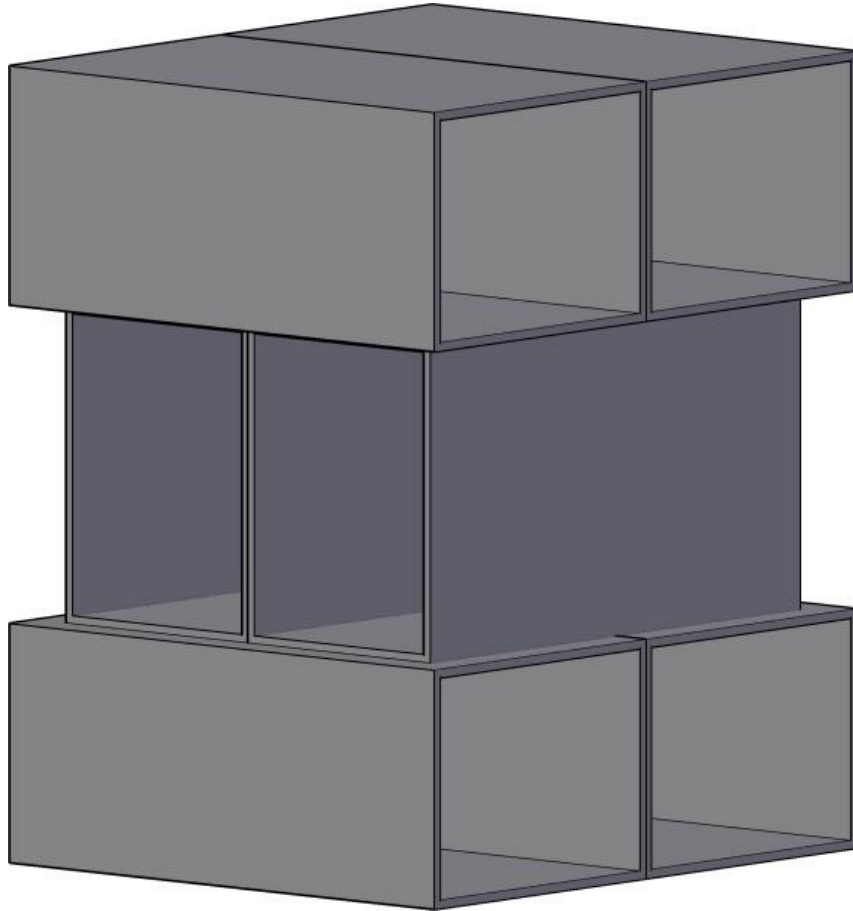
Σχήμα 4.1. Διάταξη δοκιμών R1

- Δοκίμια R2: πλευρά έδρασης και πλευρά επιβολής φορτίου είναι η πλευρά της οποίας τα δοκίμια έχουν πλάτος 30 mm, ενώ το ενδιάμεσο στρώμα έχει διαφορετικό προσανατολισμό.



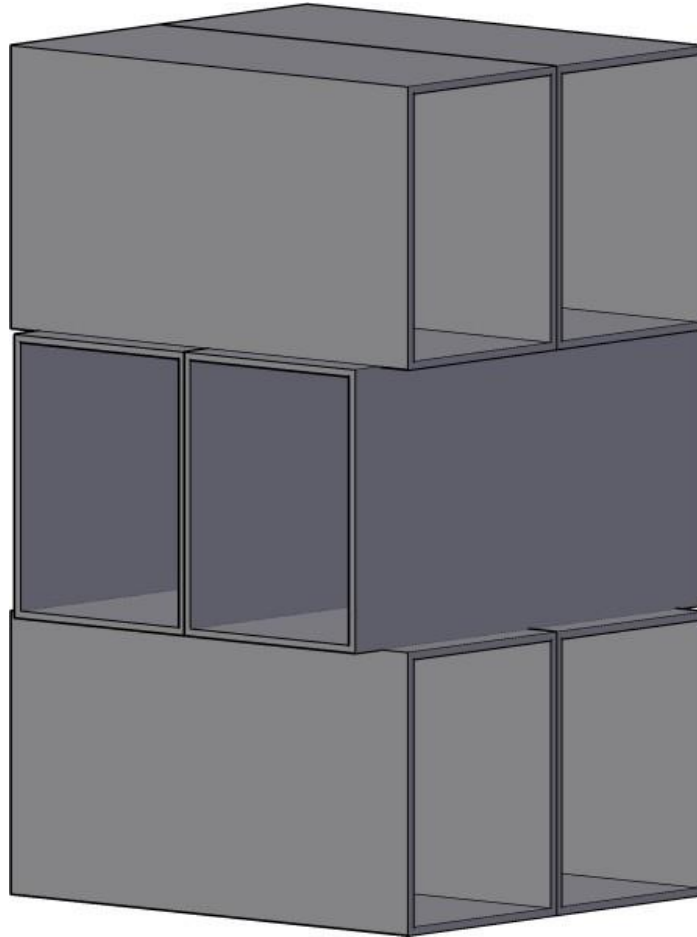
Σχήμα 4.2. Διάταξη δοκιμίων R2

- Δοκίμια R3: πρόκειται, επί της ουσίας, για την αντίστροφη περίπτωση της διάταξης R2, με τα στοιχεία των πλευρών έδρασης και επιβολής φορτίου να έχουν πλάτος 40 mm και το ενδιάμεσο στρώμα να έχει αντίθετο προσανατολισμό.



Σχήμα 4.3. Διάταξη δοκιμίων R3

- Δοκίμια R4: στην τελευταία διάταξη, όλα τα επιμέρους στοιχεία έχουν ίδιο προσανατολισμό, ενώ είναι πρακτικά η αντίστροφη περίπτωση με αυτή των δοκιμίων R1.



Σχήμα 4.4. Διάταξη δοκιμίων R4

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, C και D): οι περιπτώσεις A και B αναφέρονται σε δοκίμιο με επιφάνεια έδρασης (και επιβολής φορτίου) αυτή με πλάτος 30 mm, ενώ αντίστοιχα οι C και D αναφέρονται στα δοκίμια με επιφάνεια έδρασης ίση με 40 mm.

4.2 Εξοπλισμός και Πειραματική Διαδικασία

- Ηλεκτρικό πριόνι – Πριονοκορδέλα

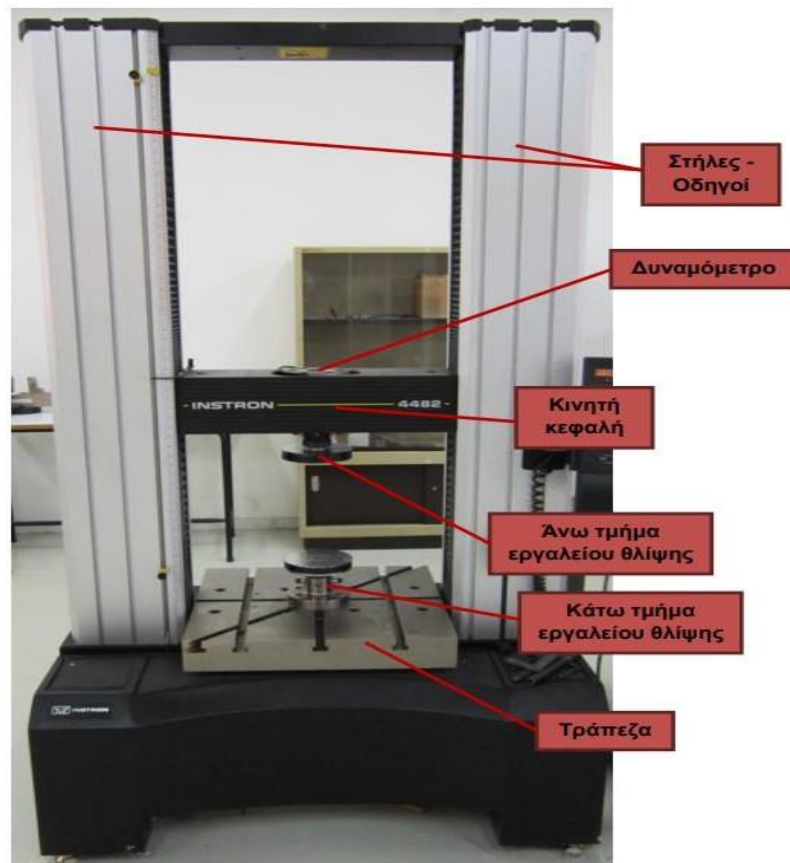
Με την συγκεκριμένη μηχανή της RichYoung έγινε η κοπή των χαλύβδινων σωλήνων όπου προμηθευτήκαμε από το εμπόριο. Στην διάταξη αυτή έχουμε την δυνατότητα να μετρήσουμε με ακρίβεια το μήκος του δοκίμιου που θέλουμε να κόψουμε. Έπειτα, αφού ακινητοποιήσουμε το δοκίμιο και ενεργοποιήσουμε την μηχανή, αυτόματα 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 4.1. Διαδικασία κοπής δοκίμιων με ηλεκτρικό πριόνι

- Στατική Φόρτιση - Μηχανική Πρέσα Instron 4482

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:



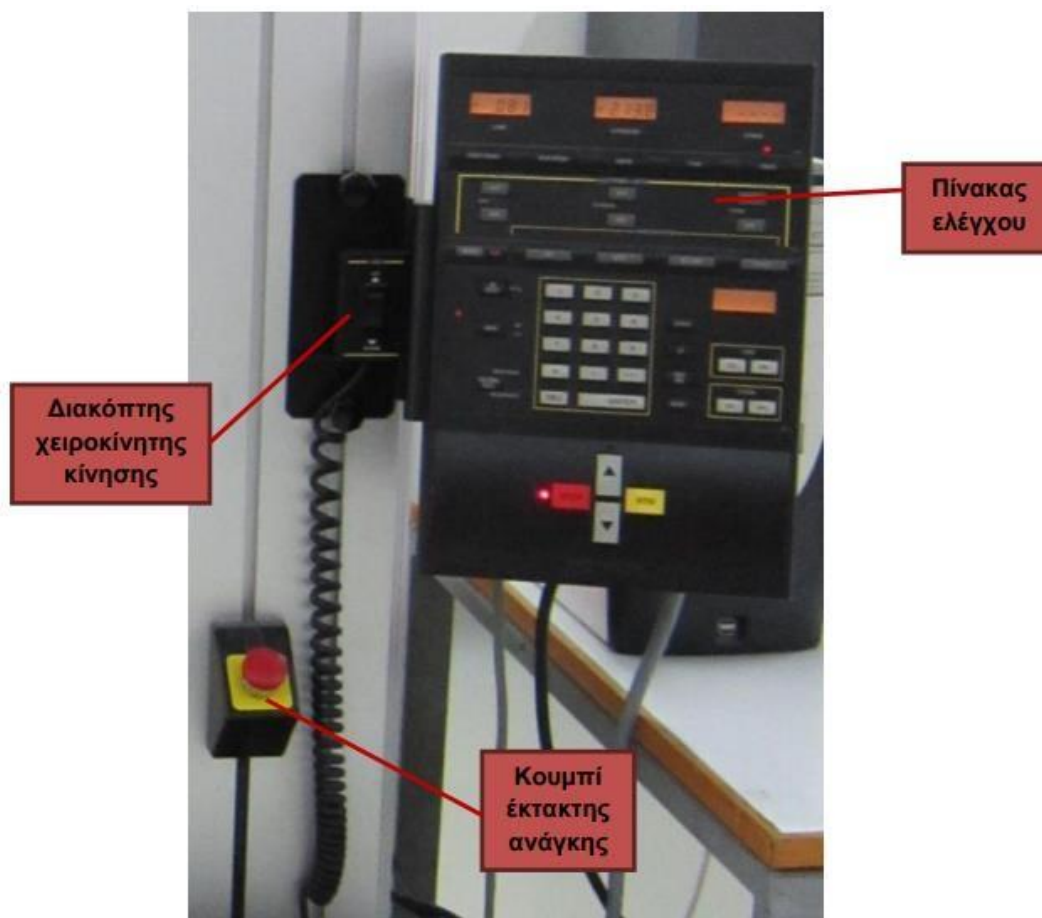
Εικόνα 4.2. Μηχανική Πρέσα Instron 4482



Εικόνα 4.3. Χρήση αρπαγών για εφελκυστικές δοκιμές.

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

Ακόμα, η Instron, περιλαμβάνει τον πίνακα ελέγχου, μέσω του οποίου μπορούν να οριστούν οι συνθήκες του πειράματος.



Εικόνα 4.4. Πίνακας ελέγχου Instron 4482.

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.

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

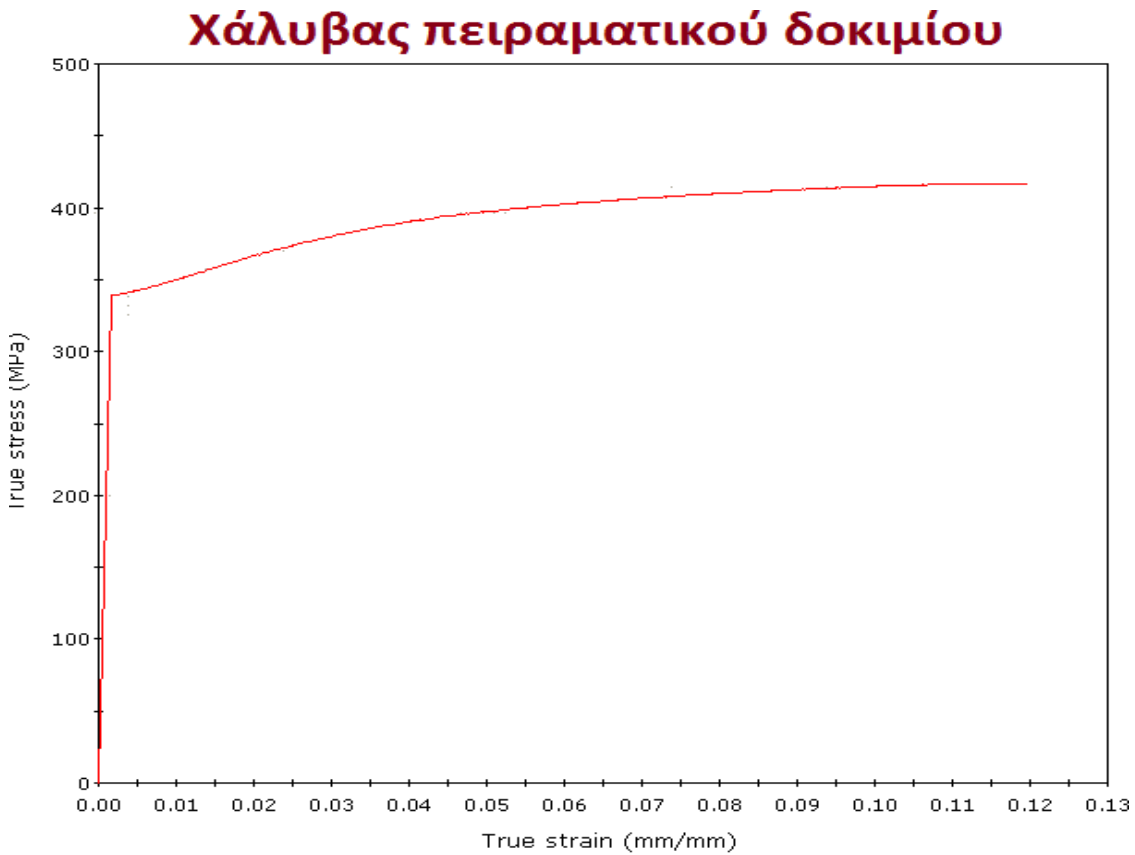
Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού λωρίδας του υλικού, έτσι ώστε να εξακριβωθεί το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές δοκιμές. Οι λωρίδες του υλικού είχαν πάχος 1.45 mm, πλάτος 9.40 mm και ενεργό μήκος 80 mm (το ελεύθερο μήκος του υλικού μεταξύ των αρπαγών).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



Εικόνα 4.5. Εφελκυστική δοκιμή λωρίδας χάλυβα

Στο παρακάτω Διάγραμμα 4.1, παρουσιάζεται η σχέση Τάσης – Παραμόρφωσης (Stress – Strain) της λωρίδας του χάλυβα. Η τάση διαρροής φαίνεται να είναι περίπου 340 MPa ενώ η μέγιστη τάση αντίστοιχα 400 MPa. Σύμφωνα με τις δοκιμές, το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα προσδιορίστηκε στα 207 GPa και ο λόγος Poisson ίσος με 0.30.

Στη συνέχεια, για κάθε ένα από τα διαφορετικά δοκίμια, πραγματοποιήθηκε μία πειραματική δοκιμή πλευρικής θλίψης (lateral loading). Ο ρυθμός παραμόρφωσης (συμπίεσης) που επιλέχθηκε για το αυτό το σκέλος του πειράματος ήταν 20 mm/min, ενώ η σχετική υγρασία στο χώρο 50% και η θερμοκρασία 18 °C.

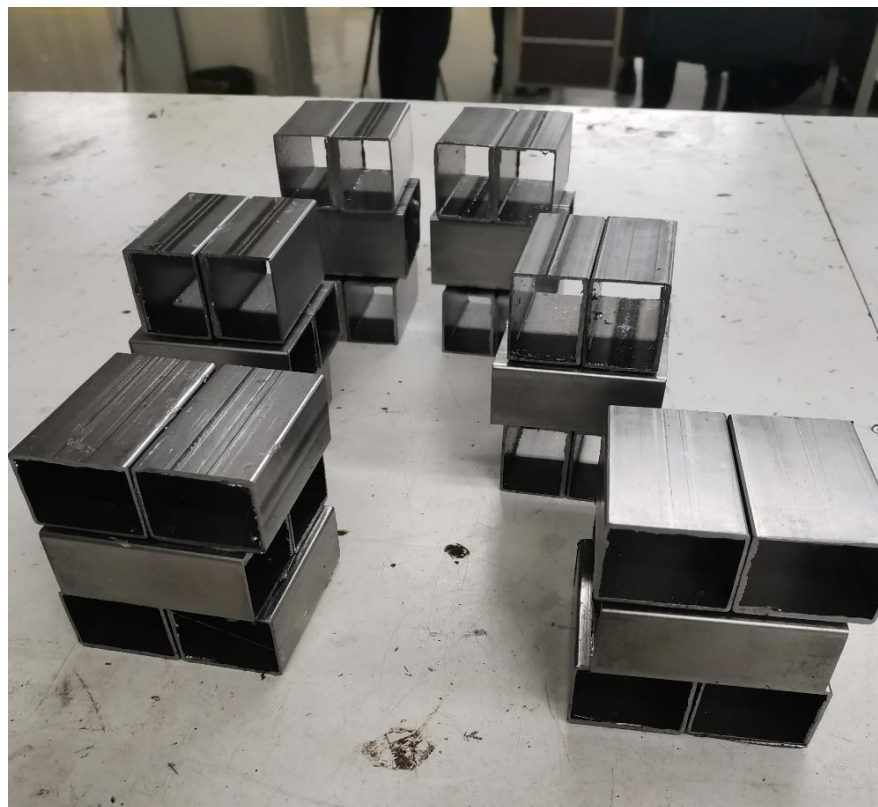


Μέτρο ελαστικότητας: 207 GPa

Λόγος Poisson: 0.30

Πυκνότητα: 7.8 g/cm³

Διάγραμμα 4.2. Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης λωρίδας χάλυβα υπό εφελκυστική δοκιμή.



Εικόνα 4.7. Δομές για δοκιμή επιβολής θλιπτικού φορτίου.

- Δυναμική Καταπόνηση - Σφύρα Πίπτουσας Μάζας

Για την πλευρική καταπόνηση των δομών υπό δυναμικές συνθήκες, χρησιμοποιήθηκε η σφύρα πίπτουσας μάζας του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από την μάζα 78 kg, η οποία μπορεί να ανυψωθεί έως ύψος 5.00 m, καθώς και από:

- Δυναμόμετρο Kyowa LC-50TE
- Ενισχυτή δυναμόμετρου Kyowa CDA – 110A
- Παλμογράφο 2 καναλιών Hameg HM205 – 3
- Εκτυπωτή Hameg HM 8143 – 2
- Οθόνη καταγραφής αποτελεσμάτων



Εικόνα 4.6. Σφύρα πίπτουσας μάζας

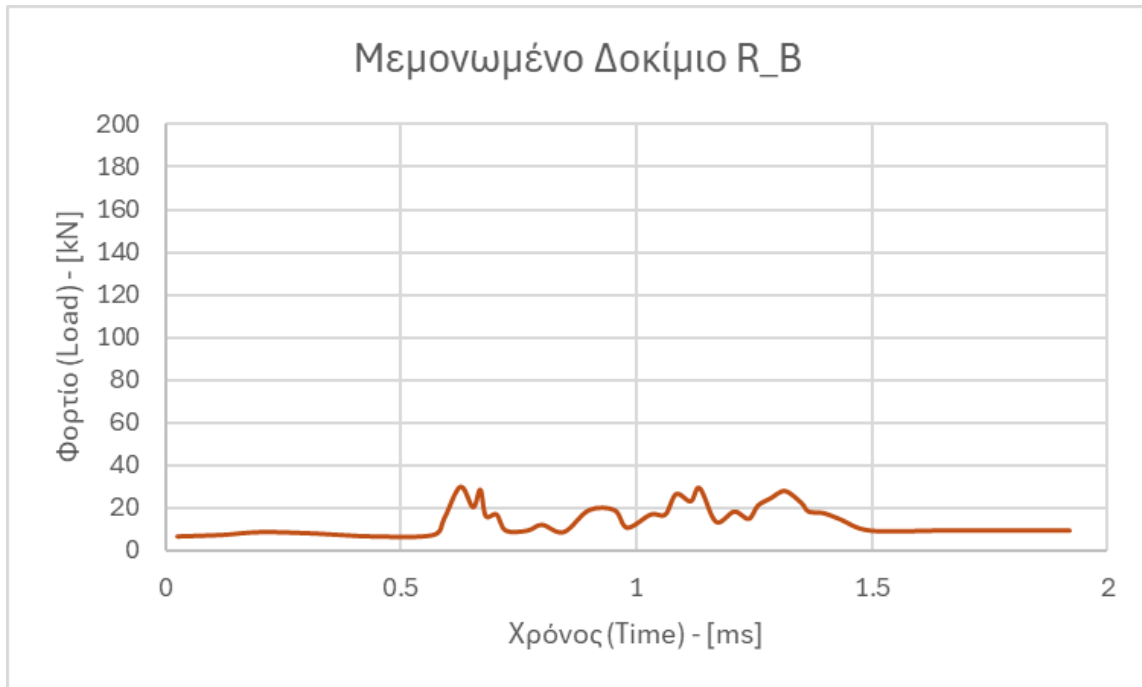
Προκειμένου να καθορισθεί το ύψος ρίψης της σφύρας για την τελική διάταξη, κατά τη δυναμική καταπόνηση, αρχικά δοκιμάστηκαν μεμονωμένα δοκίμια σε πλευρική καταπόνηση, από ύψος 0.50 m, προσανατολισμένα με την πλευρά των 40 mm καθέτως αλλά και με την πλευρά των 30 mm, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.3. Δοκίμιο R_A, υπό δυναμική καταπόνηση, με πλευρά επιβολής φορτίου πλάτους 30 mm



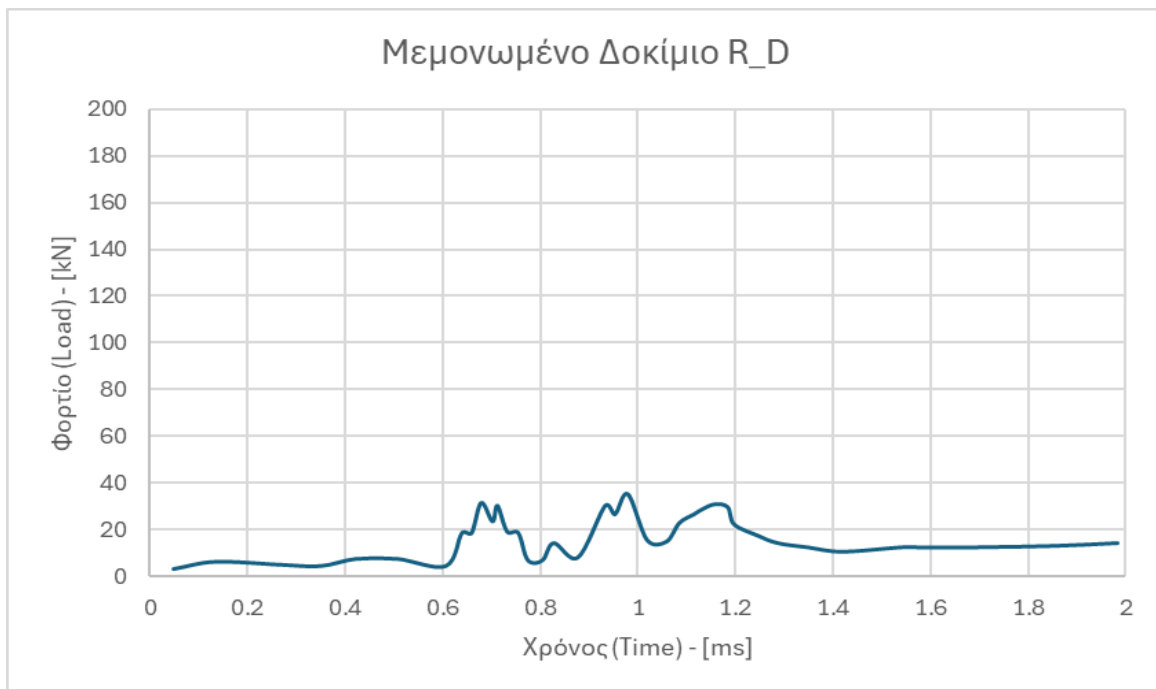
Εικόνα 4.8. Μεμονωμένα δοκίμια υπό πλευρική δυναμική καταπόνηση.



Διάγραμμα 4.5. Δοκίμιο R_B, υπό δυναμική καταπόνηση, με πλευρά επιβολής φορτίου πλάτους 30 mm

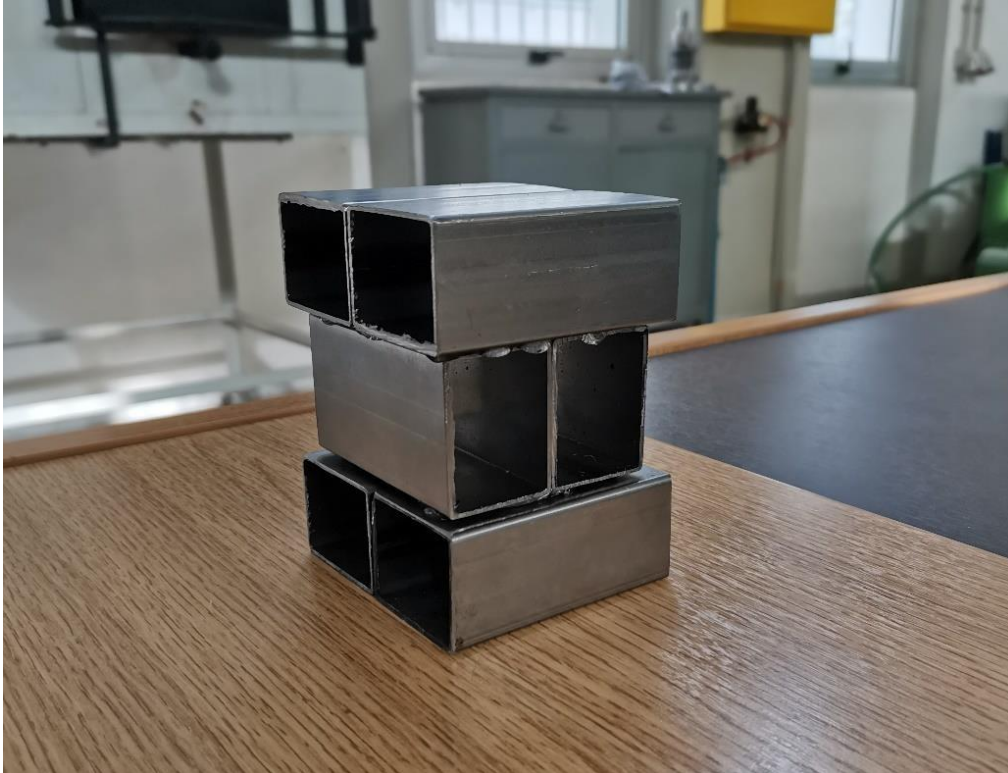


Διάγραμμα 4.6 Δοκίμιο R_C, υπό δυναμική καταπόνηση, με πλευρά επιβολής φορτίου πλάτους 40 mm

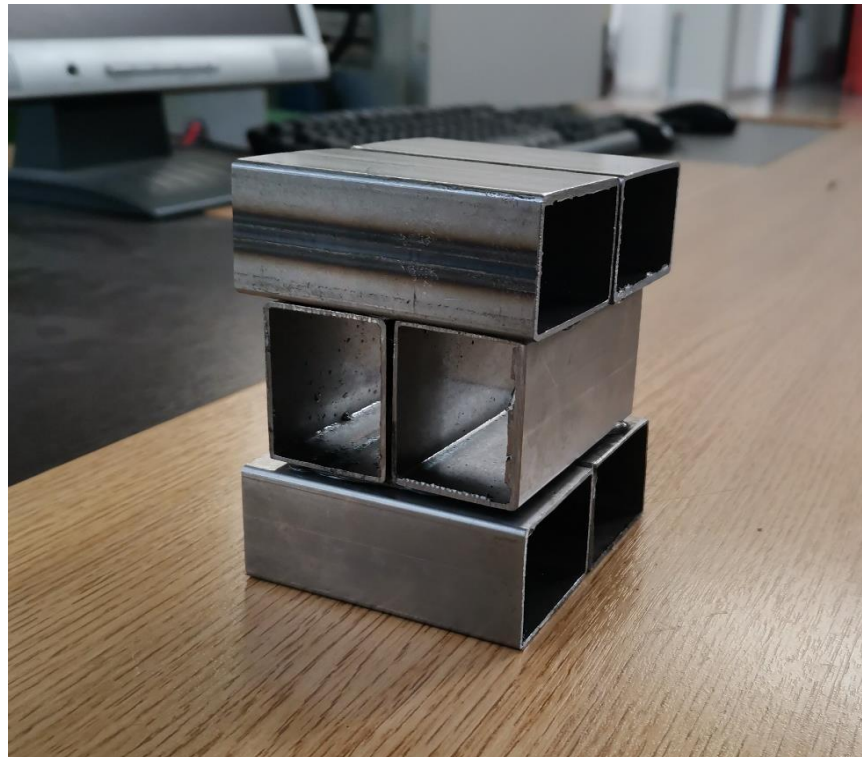


Διάγραμμα 4.7. Δοκίμιο R_D, υπό δυναμική καταπόνηση, με πλευρά επιβολής φορτίου πλάτους 40 mm

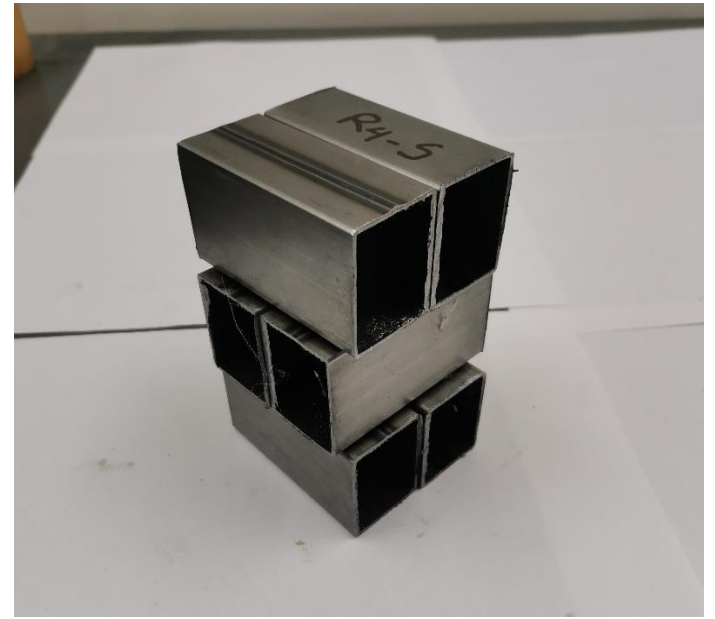
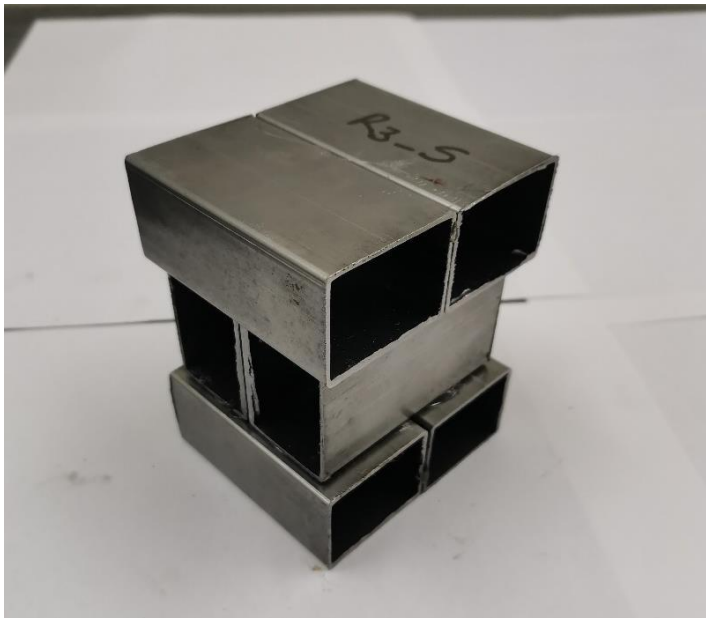
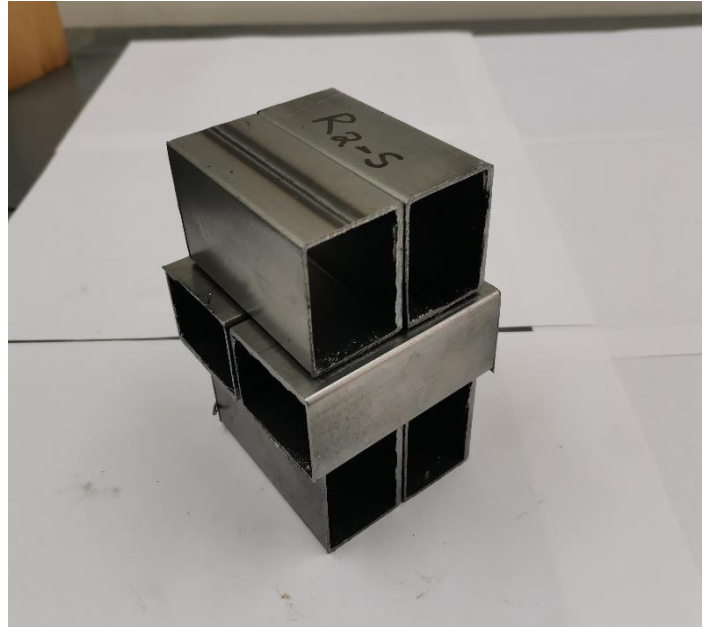
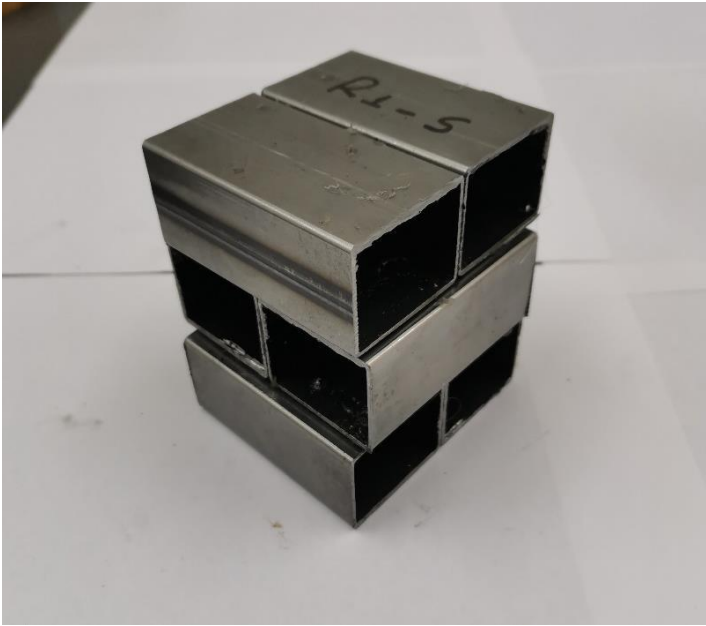
Στη συνέχεια, και με βάση δοκιμαστικές ρίψεις δομές αποτελούμενες από σωληνωτές διατομές κατανεμημένες σε τρία (3) επίπεδα, ορίστηκε σαν τελικό ύψος ρίψης της σφύρας για τη συνθήκες του πειράματος το 1.50 m, με τις δομές να καταπονούνται πλευρικά κατά την κρούση.



Εικόνα 4.9. Δομή R3



Εικόνα 4.10. Δοκίμα δυναμικής φόρτισης



Εικόνα 4.8. Δομές για στατική φόρτιση

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

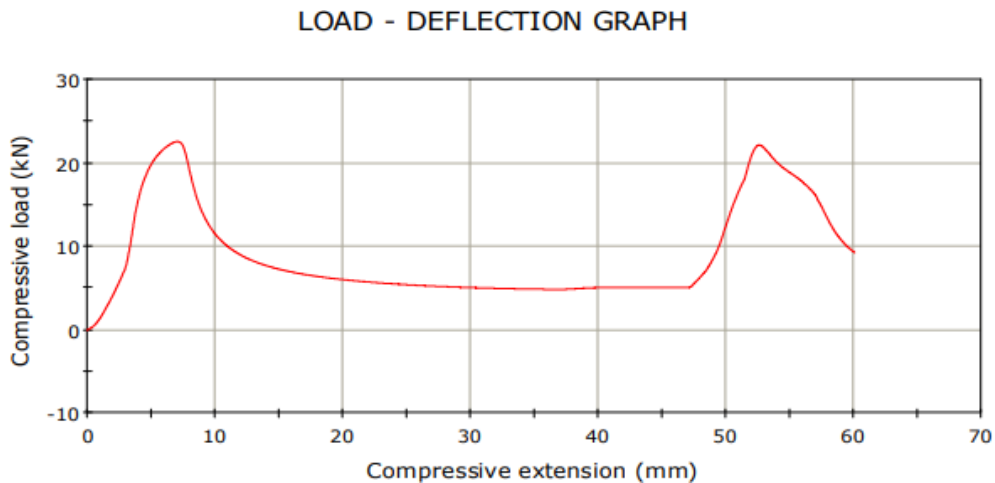
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων, τα οποία εξήχθησαν από τον παλμογράφο της σφύρας πίπτουσας μάζας.

Στην πρώτη ενότητα, παρατίθενται τα αποτελέσματα της πειραματικής δοκιμής υπό στατική φόρτιση, ενώ, στη δεύτερη, αντίστοιχα, τα διαγράμματα από τη δοκιμή υπό δυναμική φόρτιση.

5.1 Αποτελέσματα Στατικής Φόρτισης

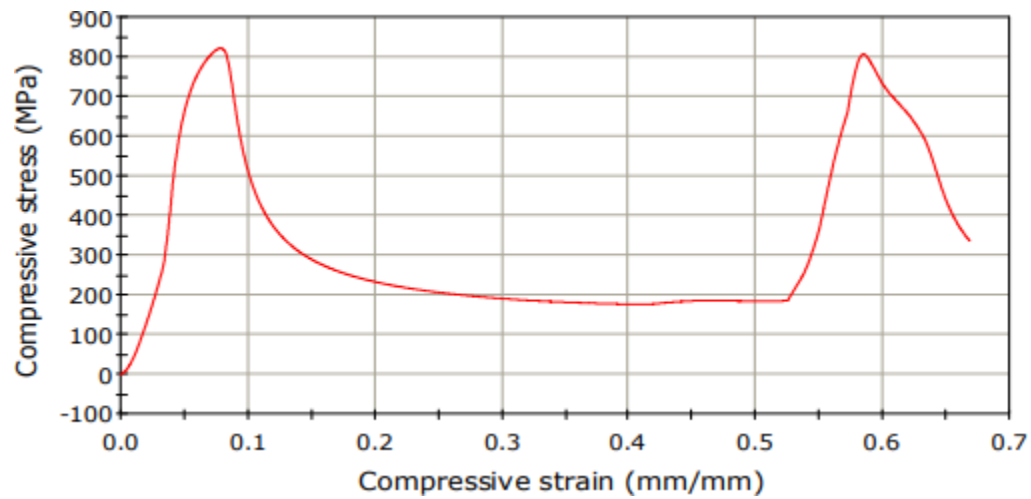
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα διαγράμματα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Deflection) και Τάσης – Παραμόρφωσης (Stress – Strain) των δοκιμίων υπό την επιβολή σταθερού θλιπτικού φορτίου. Ακόμη, παρατίθενται φωτογραφίες από την κατάσταση στην οποία επήλθαν τα δοκίμια μετά τη δοκιμή θλίψης.

- Δοκίμιο R1_S



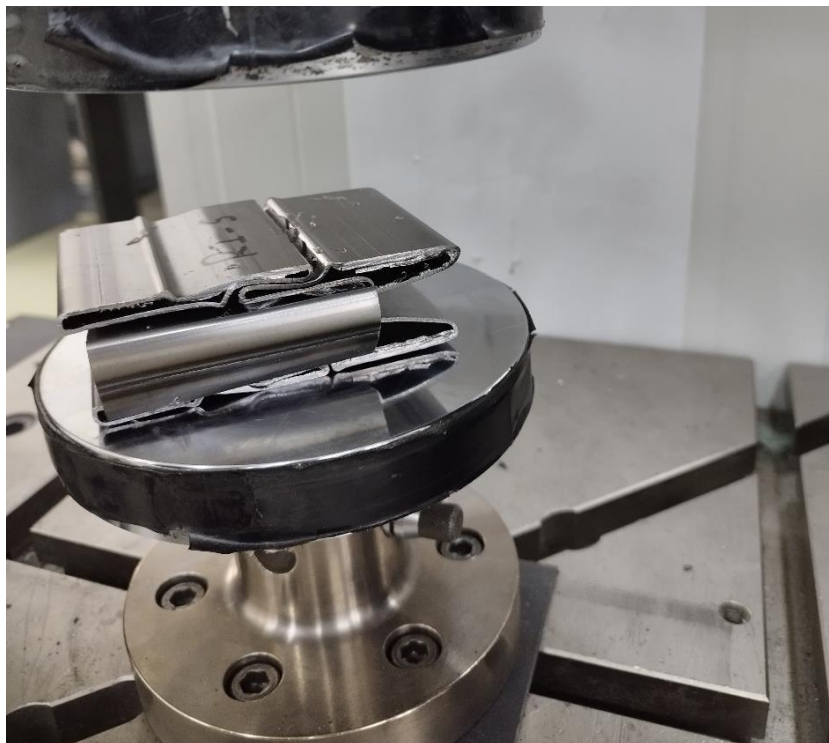
Διάγραμμα 5.1. Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 1, R1_S

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, το δοκίμιο R1_S δέχτηκε μέγιστο θλιπτικό φορτίο ίσο με περίπου 22 kN ενώ η συμπίεση (λόγω θλίψης) μετρήθηκε στα 60 mm.



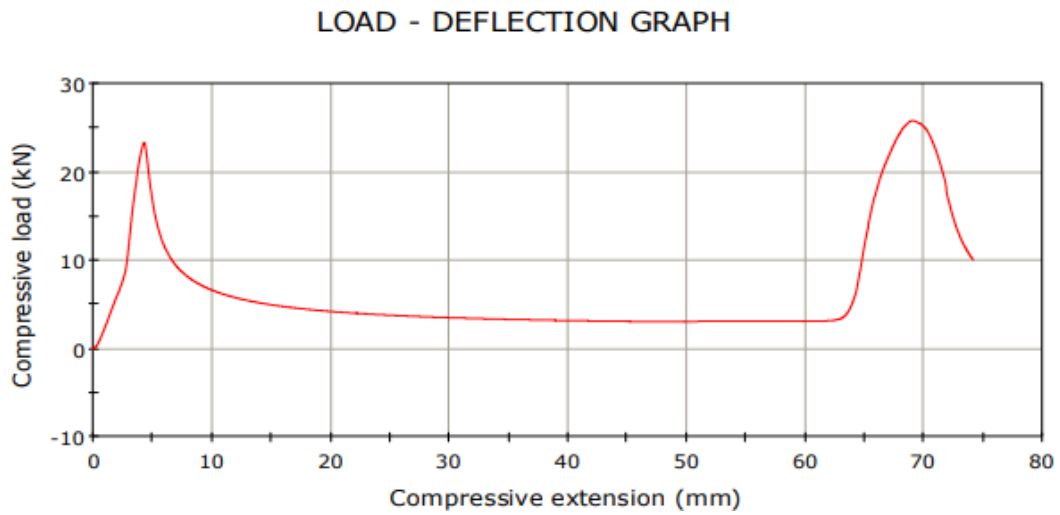
Διάγραμμα 5.2. Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίου R1_S

Όσον αφορά στο διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης, το δοκίμιο δέχθηκε μέγιστη θλιπτική τάση ίση με περίπου 820 MPa ενώ η παραμόρφωση του ήταν ίση περίπου με 67% (ήτοι το τελικό «ύψος» της δομής ήταν ίσο με το 1/3 του αρχικού).

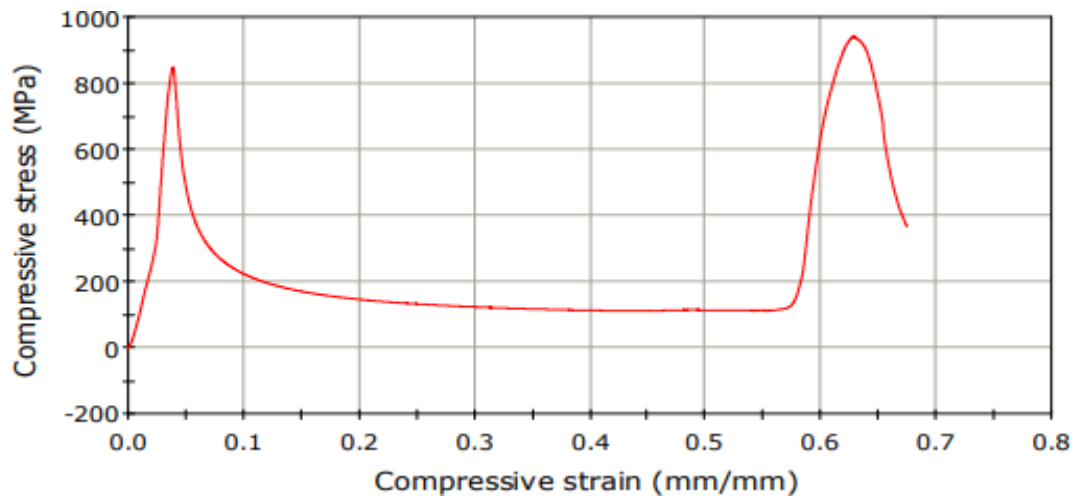


Εικόνα 5.1. Δοκίμιο R1_S μετά την κατάρρευση

- Δοκίμιο R2_S



Διάγραμμα 5.3. Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης δοκιμίου R2_S



Διάγραμμα 5.6. Διάγραμμα Τάσης - Μετατόπισης δοκιμίου R2_S

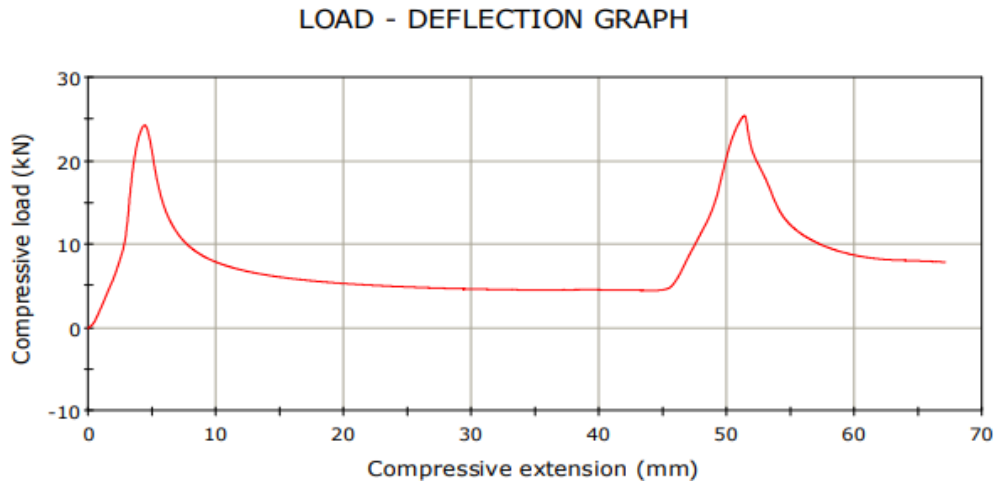


Εικόνα 5.2. Δοκίμιο R2_S μετά την κατάρρευση

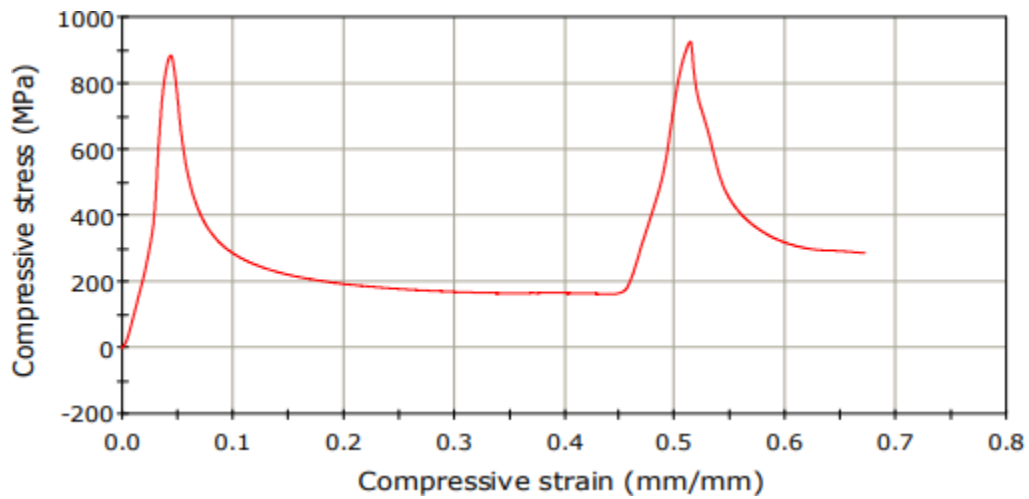
Το δοκίμιο R2_S κατά την επιβολή θλιπτικού φορτίου με σταθερό ρυθμό δέχτηκε μέγιστο θλιπτικό φορτίο ίσο με 23 kN περίπου, ενώ αντίστοιχα η μέγιστη τάση που αναπτύχθηκε ήταν της τάξεως των 900 MPa (πριν την κατάρρευσή του) και η παραμόρφωση του περίπου ίση με 67%.

Σε γενικές γραμμές η συμπεριφορά του, είναι αρκετά όμοια με αυτή της πρώτης δομής και δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες αποκλίσεις.

- Δοκίμιο R3_S



Διάγραμμα 5.7. Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης δοκίμιου R3_S



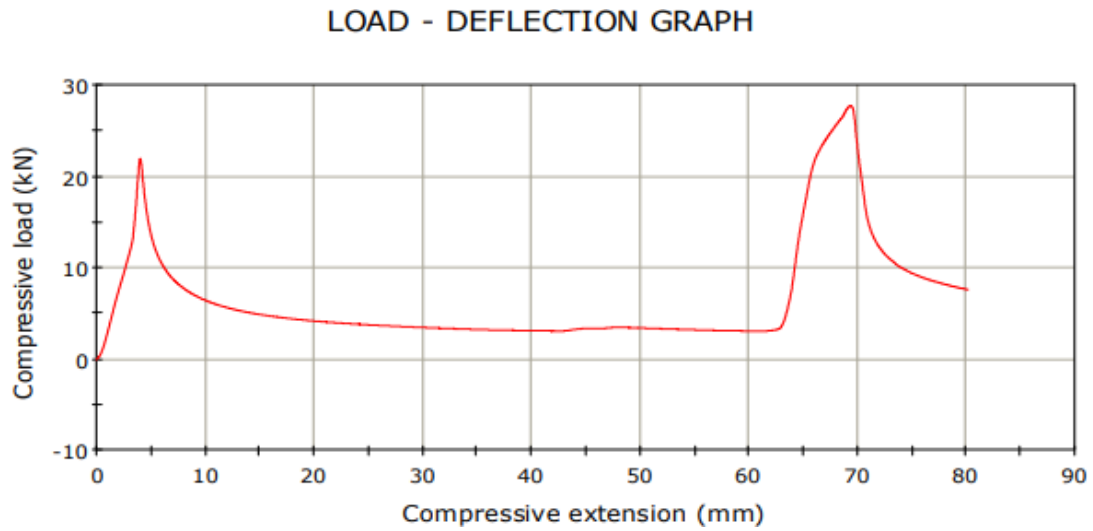
Διάγραμμα 5.8. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης δοκίμιου R3_S



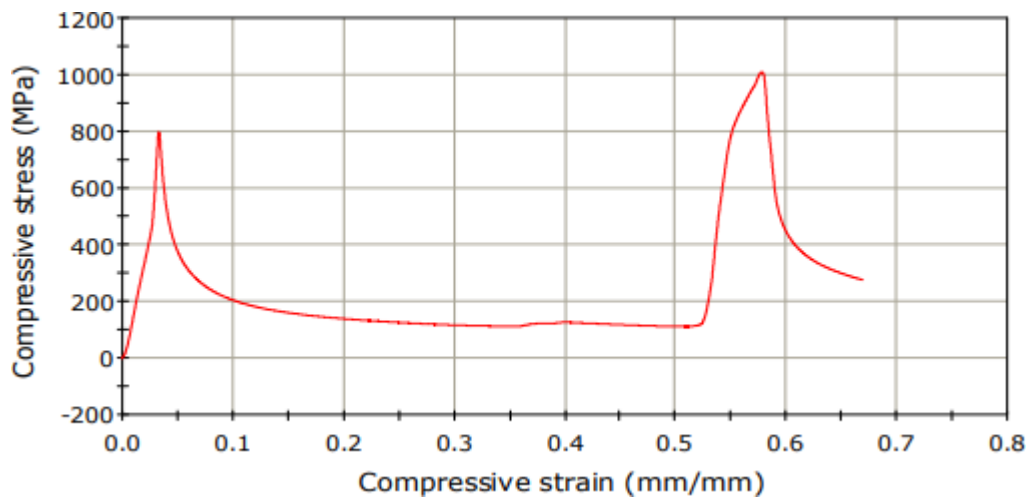
Εικόνα 5.3. Δοκίμιο R3_S μετά την κατάρρευση

Με βάση τα Διαγράμματα 5.5 και 5.6, και το δοκίμιο R3_S, ακολουθεί το μοτίβο των προηγούμενων δύο. Μέγιστο φορτίο που σημειώθηκε ήταν στα 25 kN, μέγιστη τάση στα 900 MPa και παραμόρφωση κατά την κατάρρευση περίπου στο 67%.

- Δοκίμο R4_S



Διάγραμμα 5.9. Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης δοκιμίου R4_S



Διάγραμμα 5.10. Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης δοκιμίου R4_S.



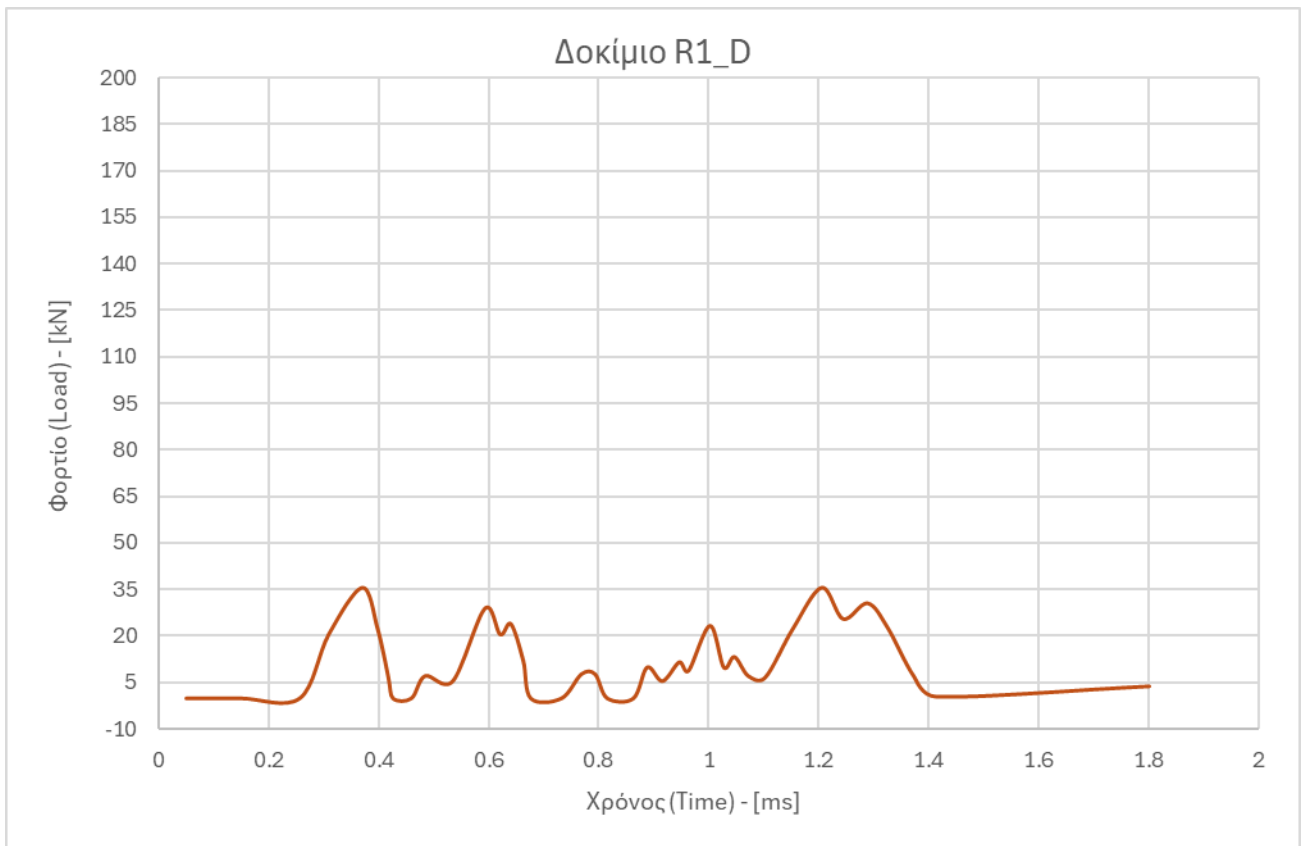
Εικόνα 5.4. Δοκίμιο R4_S μετά την κατάρρευση

Τέλος, το R4_S, φαίνεται να παρουσιάζει ελαφρώς υψηλότερο μέγιστο φορτίο, στα 29 kN, και θλιπτική τάση περίπου στα 1000 MPa. Η παραμόρφωση είναι και εδώ ίση με 67%.

5.2 Αποτελέσματα Δυναμικής Φόρτισης

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 R1_D



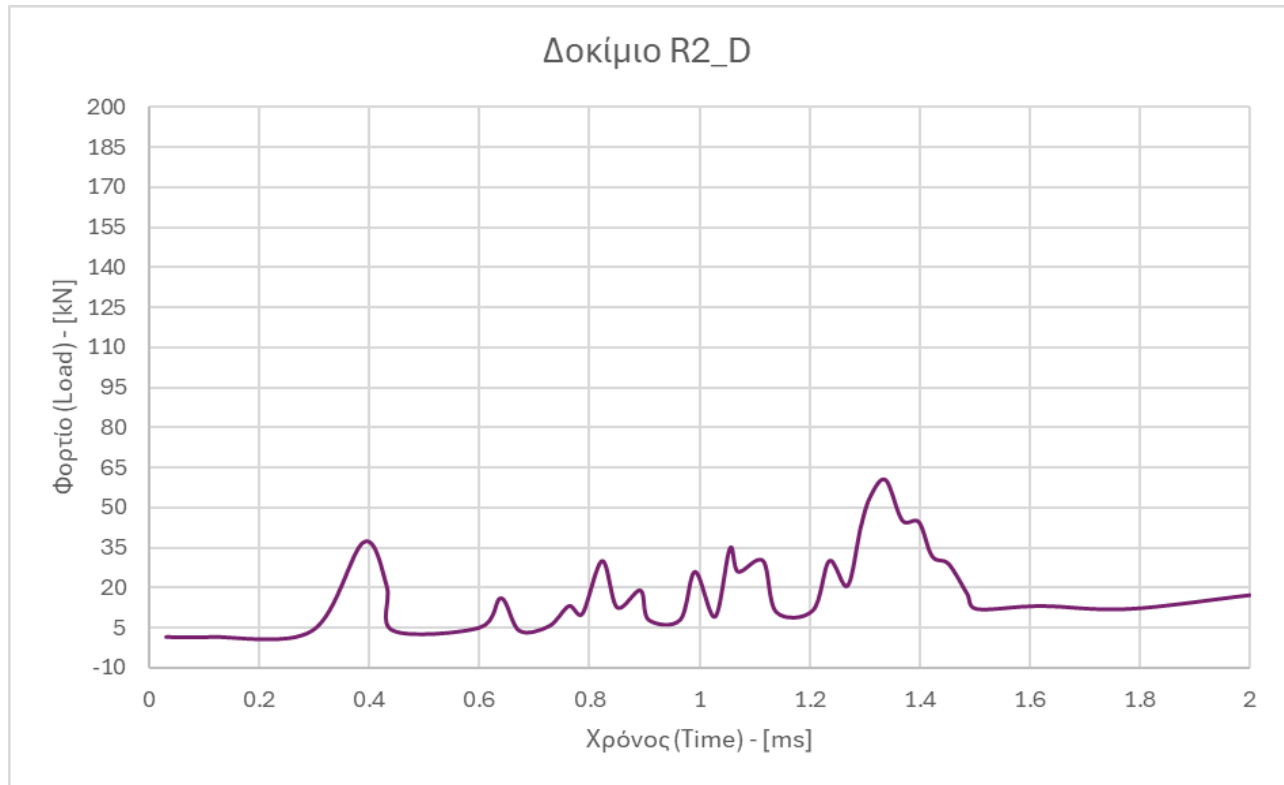
Διάγραμμα 5.11. Δοκίμιο R1_D υπό δυναμική καταπόνηση

Σύμφωνα με το παραπάνω Διάγραμμα 5.9, το μέγιστο φορτίο που φαίνεται να αναπτύσσεται στην πρώτη δομή είναι ίσο με 35 kN περίπου. Στις εικόνες που ακολουθούν, φαίνεται επίσης η κατάσταση στην οποία περιήλθε η σύνθετη δομή μετά τη δοκιμή κρούσης. Το δοκίμιο έχει συμπιεστεί πλήρως υπό το βάρος της σφύρας και η παραμόρφωση είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη.



Εικόνα 5.1. Δοκίμιο R1_D, μετά την κρούση

- Δοκίμιο R2_D



Διάγραμμα 5.12. Δοκίμιο R2_D, υπό δυναμική καταπόνηση

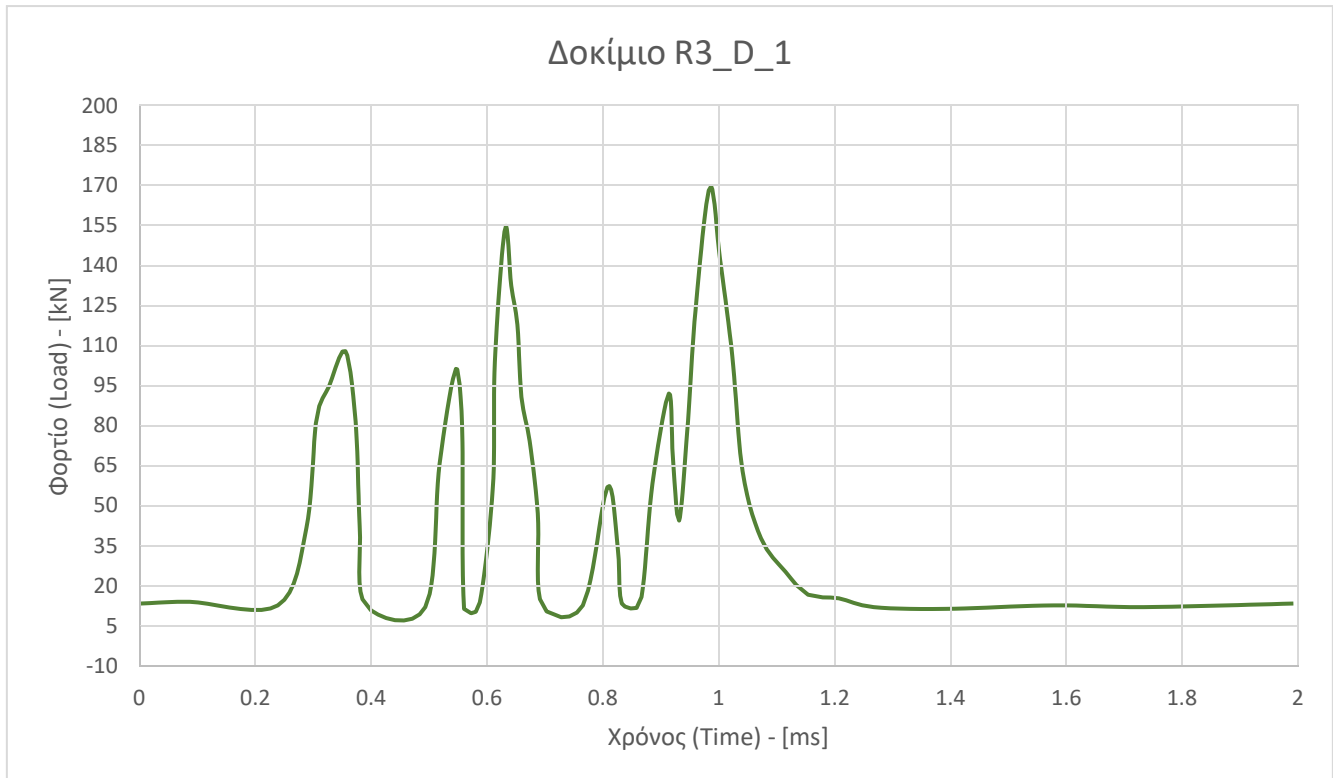
Σχετικά με το δοκίμιο R2_D, παρατηρούμε μέγιστο φορτίο ίσο με 60 kN περίπου, όπως και το προηγούμενο, ενώ και σε αυτή την περίπτωση έχει επέλθει ολοκληρωτική κατάρρευση της δομής, λόγω της κρουστικής καταπόνησης.



Εικόνα 5.2. Δοκίμιο R2_D, μετά την κρούση

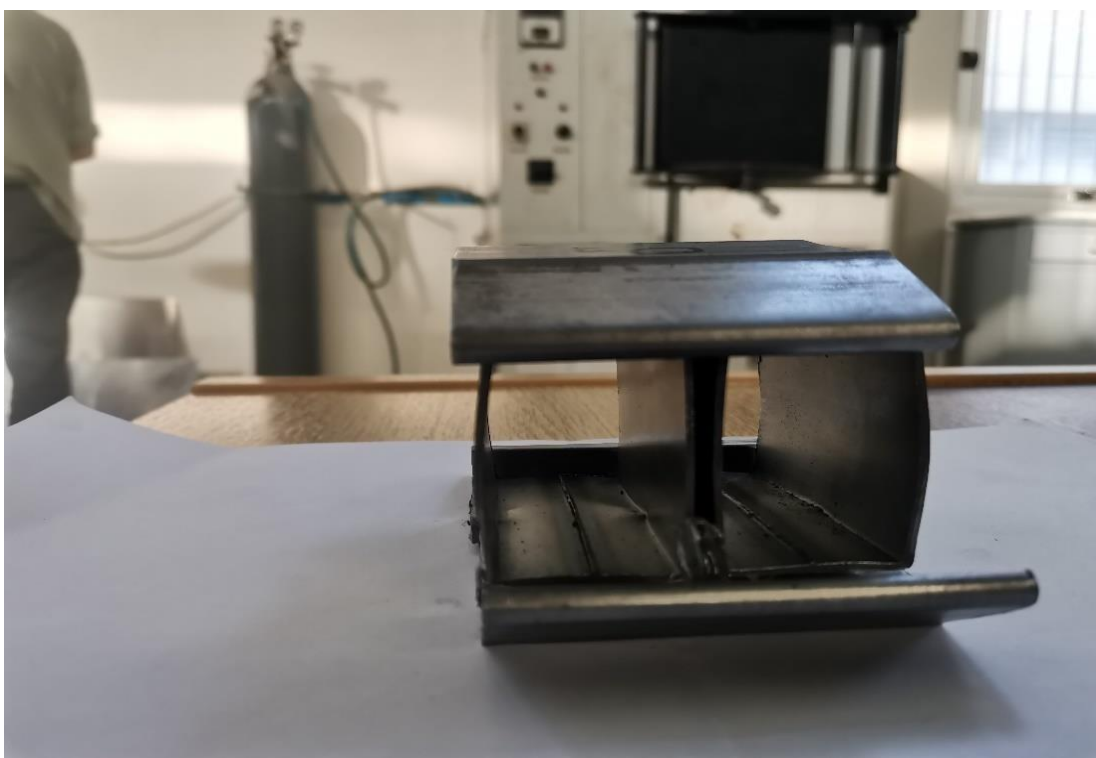
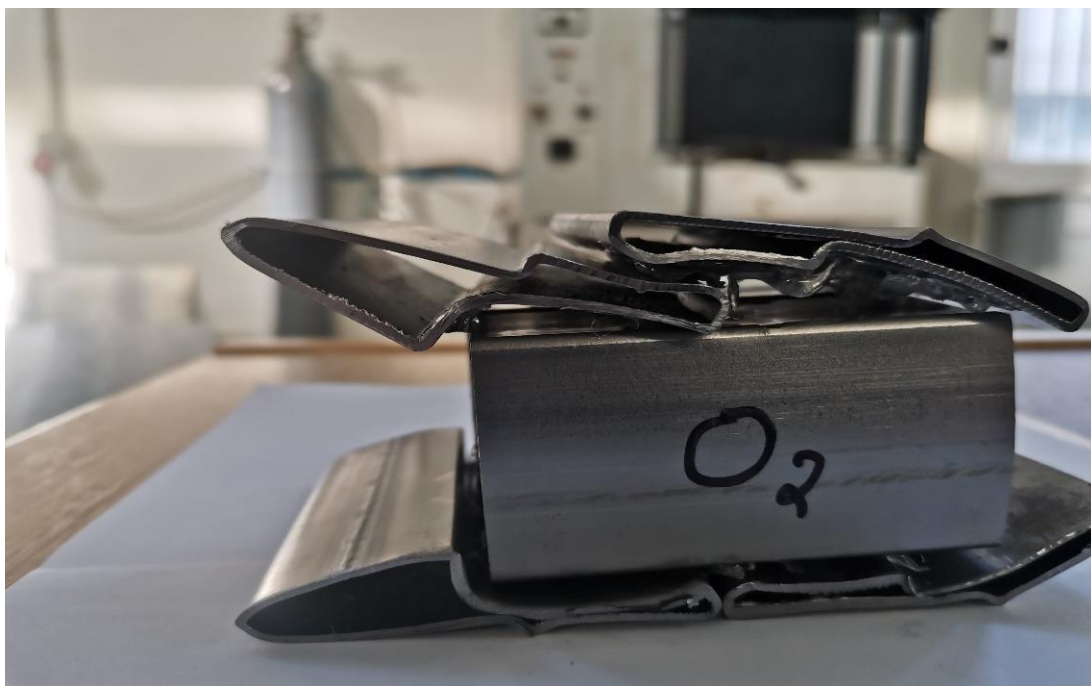
- Δοκίμιο R3_D_1

Για τη διάταξη του δοκιμίου R3_D, φτιάχτηκαν δύο (2) δοκίμια (R3_D_1 και R3_D_2).



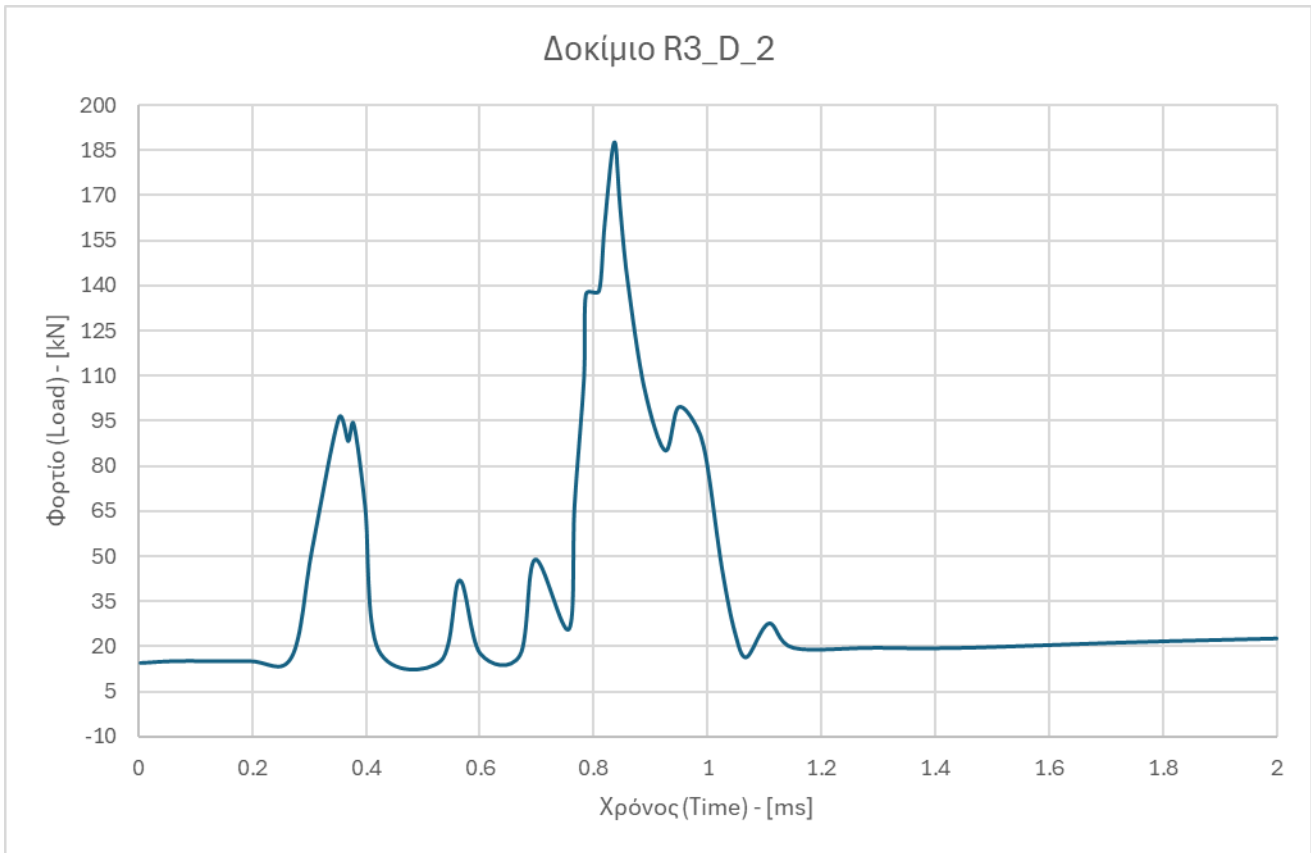
Διάγραμμα 5.13. Δοκίμιο R3_D_1, υπό δυναμική καταπόνηση

Το δοκίμιο R3_D_1, σε αντίθεση με τα προηγούμενα, φαίνεται να δέχεται μεγαλύτερο κρουστικό φορτίο στη μάζα του, και μάλιστα με αρκετή απόκλιση: το μέγιστο φορτίο σε αυτή την περίπτωση είναι ίσο με 170 kN. Η εικόνα των διατομών μετά τη δοκιμή, φαίνεται σαφώς βελτιωμένη, με το ενδιάμεσο επίπεδο να παρουσιάζει πολύ μικρότερη παραμόρφωση. Τα εξωτερικά στρώματα, φαίνεται να έχουν καταρρεύσει πλήρως.



Εικόνα 5.3. Δοκίμο R3_D_1, μετά την κρούση

- Δοκίμιο R3_D_2



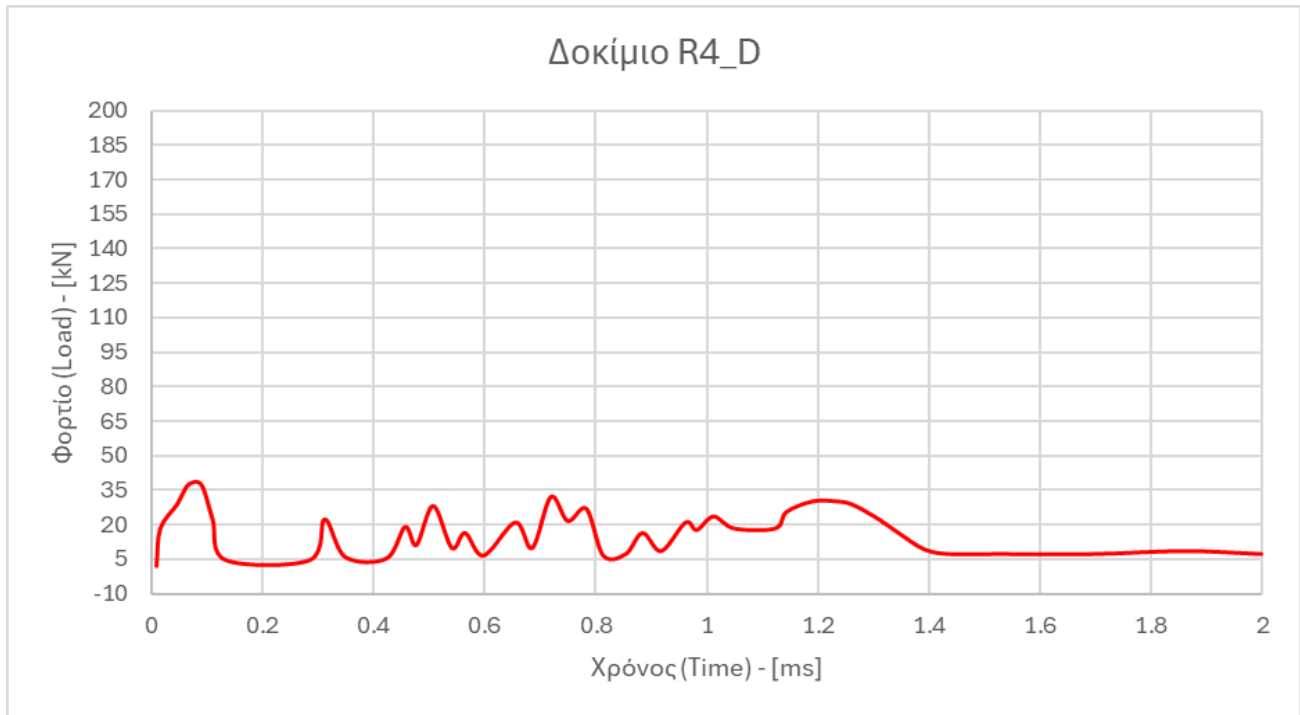
Διάγραμμα 5.14. Δοκίμιο R3_D_2, υπό δυναμική καταπόνηση

Για το δοκίμιο R3_D_2, οι παρατηρήσεις είναι σχετικά όμοιες με αυτές του R3_D_1. Εμφανίζεται μια σχετική ομοιογένεια, αν και το φορτίο παρουσιάζει μέγιστο στα 185-190 kN περίπου. Η παραμόρφωση εδώ περιορίζεται, κατά βάση, στα εξωτερικά στρώματα, ενώ το εσωτερικό εμφανίζει σαφώς μικρότερη παραμόρφωση.



Εικόνα 5.4. Δοκίμιο R3_D_2, μετά την κρούση

- Δοκίμιο R4_D



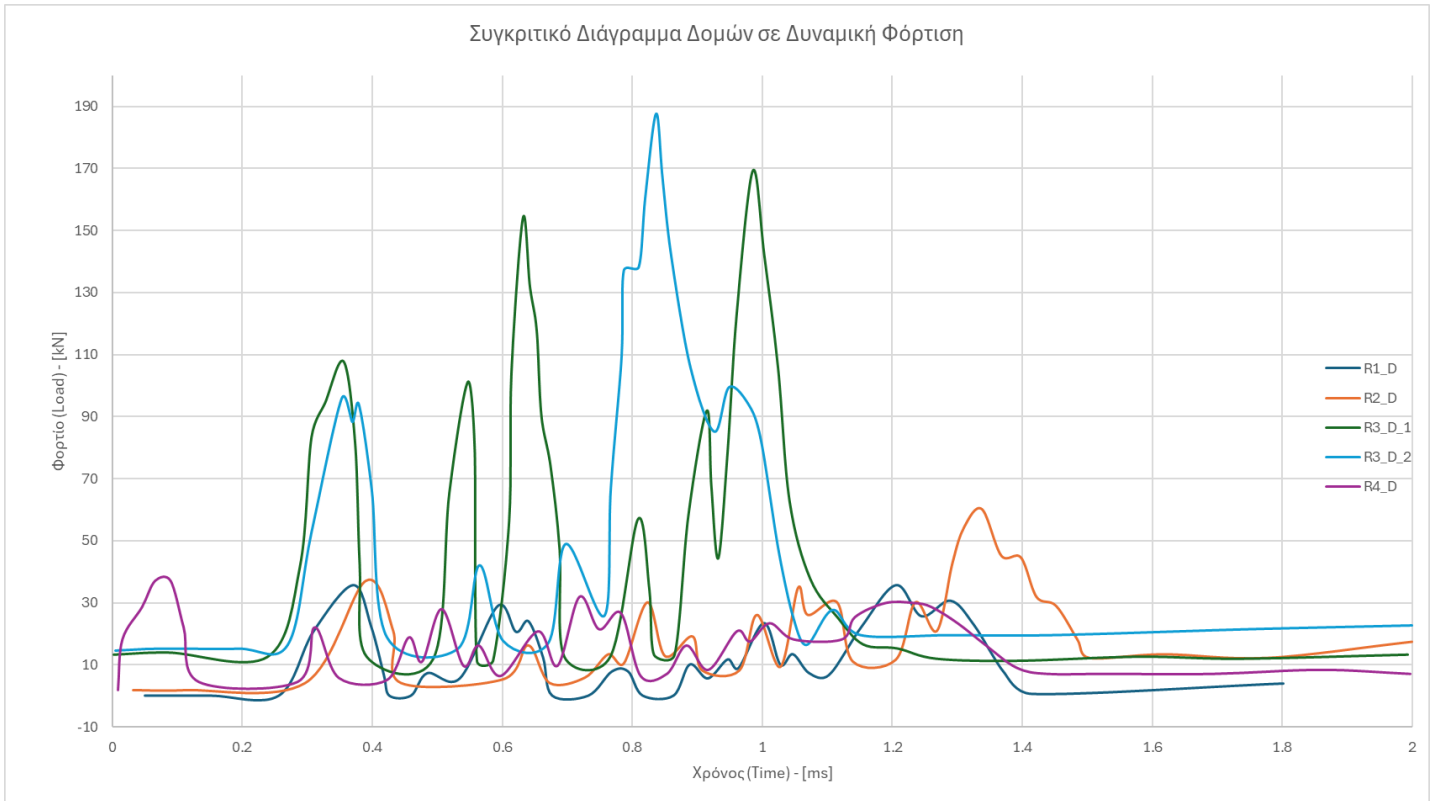
Διάγραμμα 5.15. Δοκίμιο R4_D, υπό δυναμική καταπόνηση

Το δοκίμιο R4_D παρουσιάζει εικόνα αντίστοιχη με αυτή των δύο πρώτων. Το μέγιστο φορτίο είναι σχετικά χαμηλό, περίπου στα 35-40 kN, και η παραμόρφωση της δομής είναι ολική, όπως φαίνεται και στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 5.5. Δοκίμιο R4_D, μετά την κρούση

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



Διάγραμμα 5.16. Συγκριτικό διάγραμμα δομών υπό δυναμική καταπόνηση

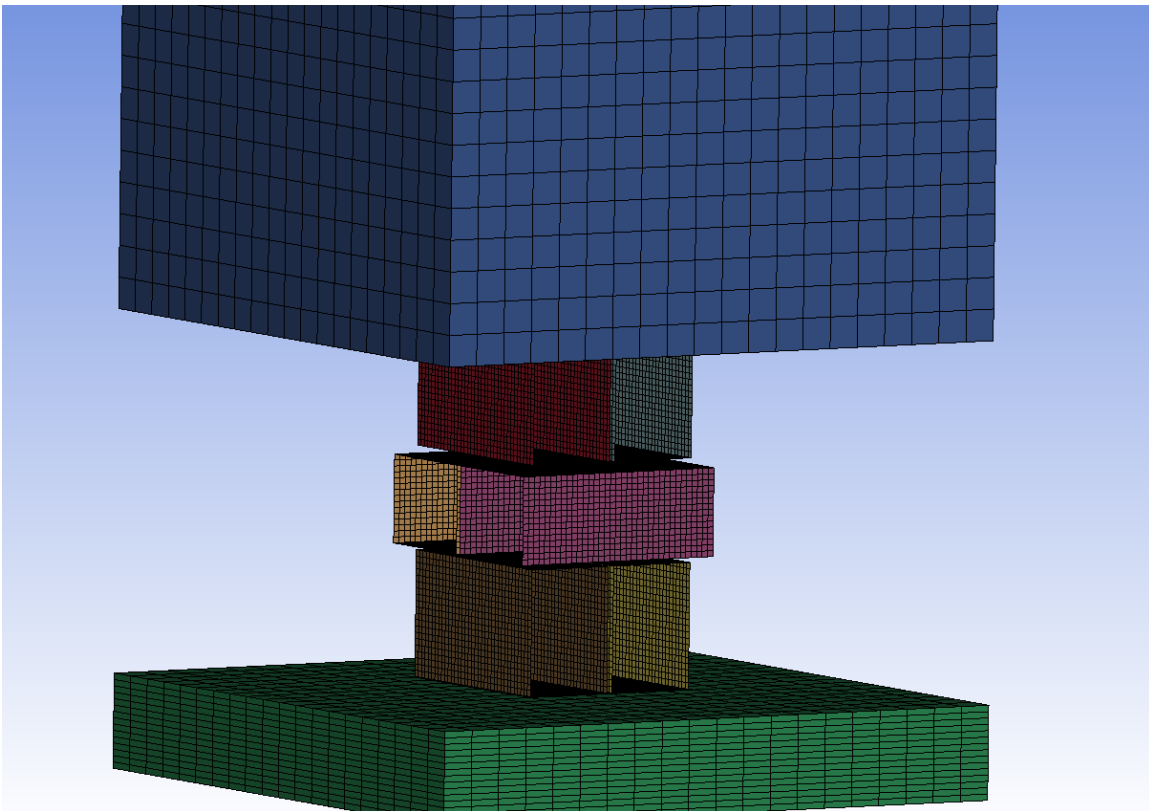
Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου για τις κρουστικές δοκιμές στη σφύρα, καθίσταται εμφανές αυτό που έχει αναφερθεί ως τώρα: η διάταξη R3_D παρουσιάζει σαφώς καλύτερη αντίδραση σε σχέση με τις υπόλοιπες, με το μέγιστο φορτίο που αναλαμβάνει να είναι σχεδόν τριπλάσιο από βέλτιστο των υπόλοιπων δομών. Ταυτόχρονα, η παραμόρφωση είναι σημαντικά μικρότερη, καθώς το ενδιάμεσο στρώμα διατήρησε το σχήμα του σε αντίθεση με τις άλλες τρεις δομές που καταστράφηκαν πλήρως.

6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

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 Μεθοδολογία

Οι σωληνωτές διατομές διαστάσεων 30 mm X 40 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 απομειωμένες 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 38 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 στοιχείου.



Εικόνα 6.1: 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 κιλά.

Αρχίζοντας τη μοντελοποίηση, πραγματοποιήθηκε η δημιουργία των **Sections**, μέσω του keyword manager, και συγκεκριμένα των **Shell Section** (για τους σωλήνες) και των **Solid Section** (για τις πλάκες). Σε αυτό το στάδιο ορίστηκε και το πάχος των ορθογωνικών δοκιμίων ίσο με 2 mm.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Sort/T1 Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 R4_D.k) Setting

*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.
Replace Insert
Delete Help

Repeated Data by Button and List

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

Εικόνα 6.2. Δημιουργία Shell Section για τα σωληνωτά δοκίμια

Keyword Input Form

Use *Parameter
 Comment
 (Subsys: 1 R4_D.k)

*SECTION_SOLID_(TITLE) (2)

TITLE

plup

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

Repeated Data by Button and List

Data Pt.

Repeated Data by Button and List

Data Pt.

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

Εικόνα 6.3: Δημιουργία Solid Section: plup για τη σφύρα και pldn για την απαραμόρφωτη κάτω πλάκα.

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

Keyword Input Form

Use *Parameter
 Comment
 (Subsys: 1 R4_D.k)

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (1)

TITLE

tubes

1	<u>MID</u>	<u>RO</u>	<u>E</u>	<u>PR</u>	<u>SIGY</u>	<u>ETAN</u>	<u>FAIL</u>	<u>TDEL</u>
	1	0.0078000	2.070e+05	0.3000000	340.00000	0.0	1.000e+21	0.0
2	<u>C</u>	<u>P</u>	<u>LCSS</u>	<u>LCSR</u>	<u>VP</u>			
	0.0	0.0	0	0	0.0			
3	<u>EPS1</u>	<u>EPS2</u>	<u>EPS3</u>	<u>EPS4</u>	<u>EPS5</u>	<u>EPS6</u>	<u>EPS7</u>	<u>EPS8</u>
	0.0	0.0050000	0.0100000	0.0200000	0.0250000	0.0300000	0.0400000	0.0500000
4	<u>ES1</u>	<u>ES2</u>	<u>ES3</u>	<u>ES4</u>	<u>ES5</u>	<u>ES6</u>	<u>ES7</u>	<u>ES8</u>
	340.00000	345.00000	350.00000	375.00000	380.00000	385.00000	398.00000	400.00000

COMMENT:

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

Εικόνα 6.4. Ορισμός υλικού (χάλυβα) για τις διατομές

Στην 1^η σειρά ορίστηκε 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, δόθηκαν οκτώ ζεύγη σημείων από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του υλικού.

Keyword Input Form

Use *Parameter Comment
 (Subsys: 1 R4_D.k)

*MAT_RIGID_(TITLE) (020) (2)

TITLE

plup

1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
	2	0.0078000	2.070e+05	0.3000000	0.0	0	0.0	

2	CMO	CON1	CON2
	1.0	4	7

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

COMMENT:

Εικόνα 6.5. Ορισμός υλικού και βαθμών ελευθερίας για σφύρα

Σε αυτό το στάδιο, προσδιορίστηκαν οι ιδιότητες του υλικού της σφύρας και της κάτω πλάκας με τρόπο αντίστοιχο με αυτό των σωλήνων. Ακόμα, προσδιορίστηκαν οι βαθμοί ελευθερίας κίνησης των δύο σωμάτων: για τη σφύρα ο μόνος ενεργός βαθμός ελευθερίας είναι αυτός της κίνησης κατά τον Z-άξονα ενώ για την κάτω πλάκα περιορίστηκαν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας.

Keyword Input Form

Use *Parameter Comment
 (Subsys: 1 R4_D.k)

*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

COMMENT:

Εικόνα 6.6. Ορισμός υλικού και βαθμών ελευθερίας για κάτω πλάκα

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

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 R4_D.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
	9	10	11	12	15	16	0	0

Range Set Data

1_	1	9	10	11	12	15	16	0

Data Pt. 1

Replace

Insert

Delete

Help

Εικόνα 6.7. 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

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 R4_D.k) Setting

*PART_(TITLE) (8)

1 TITLE
pldn

2 PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADOPT TMID

8	3	3	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

COMMENT:

Εικόνα 6.8 Αντιστοίχιση του στοιχείου της κάτω πλάκας (pldn) με το υλικό (rigid material) και τη διατομή (solid section)

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 R4_D.k) Setting

*PART_(TITLE) (8)

1 TITLE
part10

2 PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADOPT TMID

10	1	1	0	1	0	0	0
----	---	---	---	---	---	---	---

COMMENT:

Εικόνα 6.9. Αντιστοίχιση των στοιχείων κελυφωτής διατομής (shell section) με τα στοιχεία των δοκιμίων (parts) και το υλικό (material).

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 R4_D.k) Setting

*PART_(TITLE) (8)

1 TITLE
plup

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

COMMENT:

Εικόνα 6.10. Αντιστοίχιση του στοιχείου της σφύρας (plup) 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 R4_D.k) Setting

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

1 CID TITLE
1 plup-tubes

MPP1 MPP2

2 IGNORE BCKT LCBCKT NS2TRK INITITR PARMAX UNUSED CPARAMB
0 200 3 2 1.0005 0

3 UNUSED CHKSEGS PENSE GRPABLE
0 1.0 0

4 SUREA SUREB SUREATYP SUREBTYP 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

Εικόνα 6.11. 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 R4_D.k) Setting

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

1	CID	TITLE						
	1	tubes						
		<input type="checkbox"/> MPP1		<input type="checkbox"/> MPP2				
2	IGNORE	BCKT	LCBCKT	NS2TRK	INITITR	PARMAX	UNUSED	CPRMB
	0	200		3	2	1.0005		0
3	UNUSED	CHKSEGS	PENSG	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	VSE

Εικόνα 6.12. 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 $V = \sqrt{2 \times g \times h} = 5.47$ mm/ms, με επιτάχυνση βαρύτητας $g=9.8$ m/s².

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 R4_D.k) Setting

*INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY (1)

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

COMMENT:

Εικόνα 6.13. Απόδοση ταχύτητας πτώσης σφύρας από ύψος 1.5 m

Για το τύπο στιβαρότητας που ακολουθείται κατά την παραμόρφωση των στοιχείων μόνο των μοντέλων των δοκιμών επιλέχθηκε το μοντέλο Flanagan-Belytschko στην καρτέλα "Hourglass" αποδίδοντας την τιμή 4 στην παράμετρο IHQ .Η επιλογή του μοντέλου Flanagan-Belytschko στην καρτέλα "Hourglass" επιλέχθηκε καθώς η θεώρηση αυτή καθιστά το μητρώο 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 R4_D.k) Setting

*HOURGLASS_(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:

Enter data into text field

Εικόνα 6.14. Επιλογή μοντέλου Hourglass

Keyword Input Form

Clear Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 R4_D.k) Setting

*CONTROL_TERMINATION (1)

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

COMMENT:

Εικόνα 6.15. Ορισμός χρόνου τερματισμού κρουστικής δοκιμής στα 40 ms

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

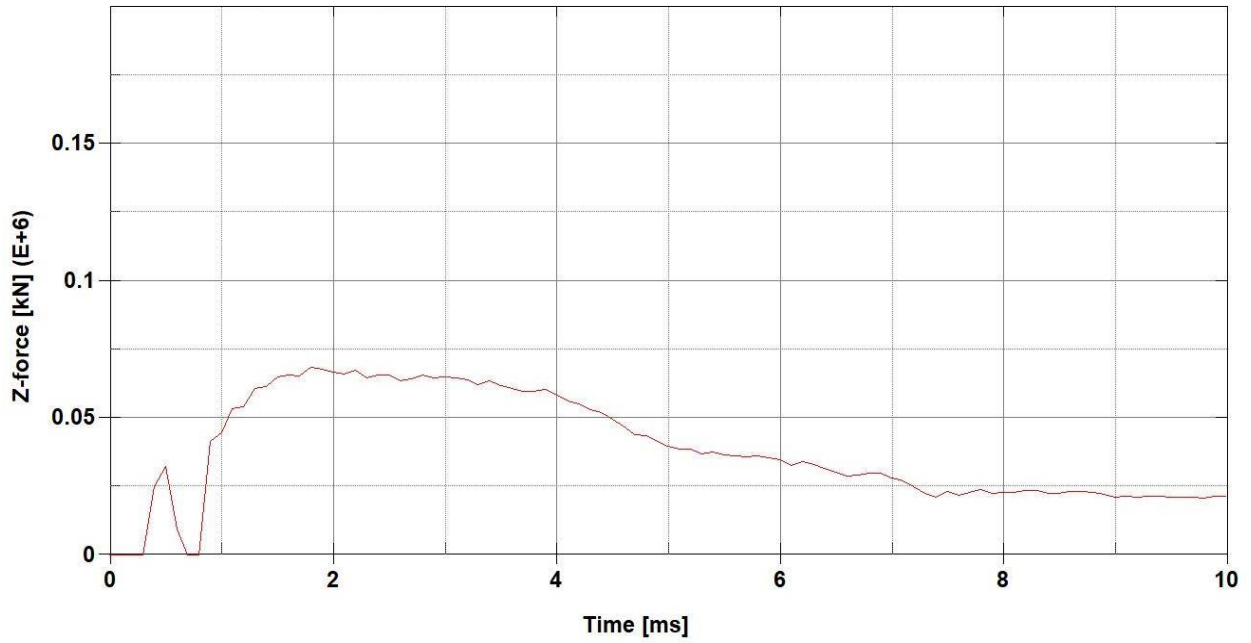
*DATABASE_OPTION (2)

<input type="checkbox"/> 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
<input type="checkbox"/> SECFORC	DT	BINARY	LCUR	IOOPT

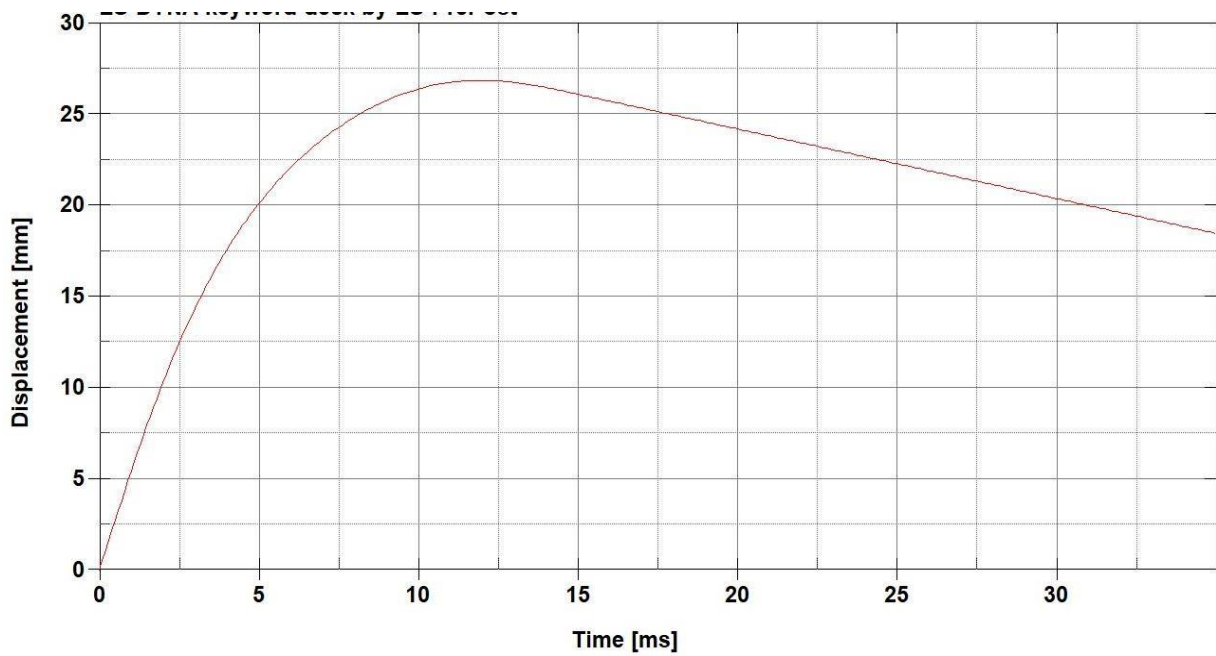
Εικόνα 6.16. . Εντολές για διαγράμματα Φορτίου – Χρόνου και Μετατόπισης – Χρόνου

6.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

6.2.1 Δοκίμιο R1_D



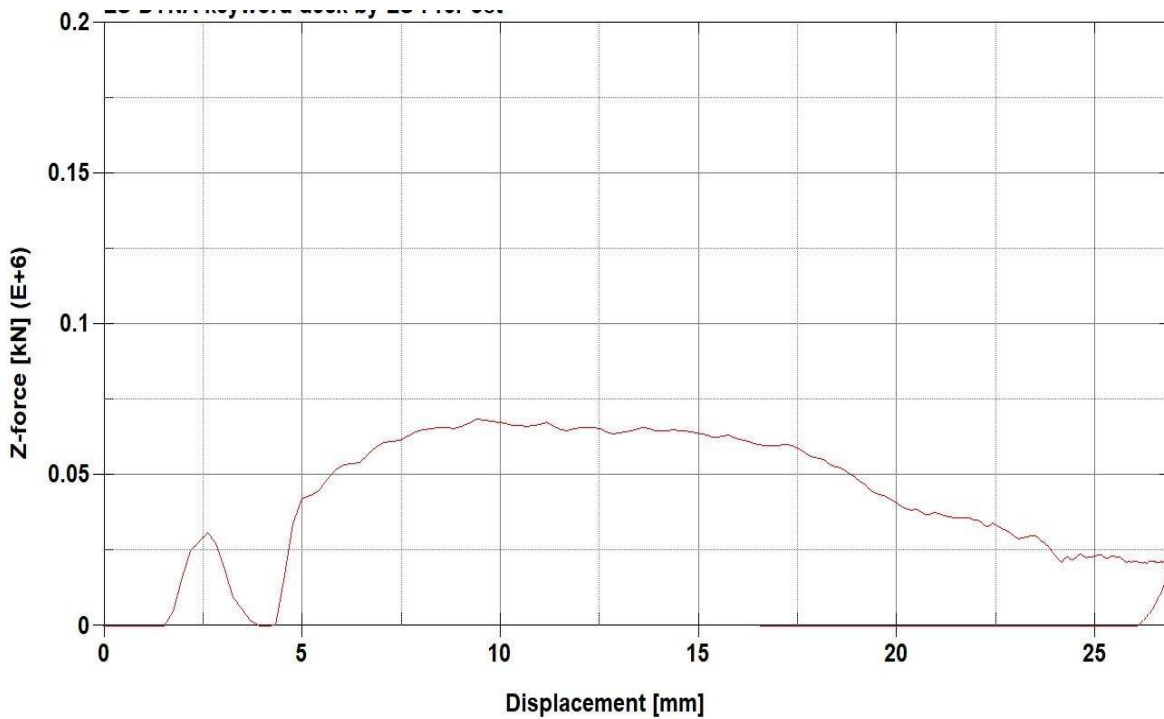
Διάγραμμα 6.1. Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) δοκίμιου R1_D



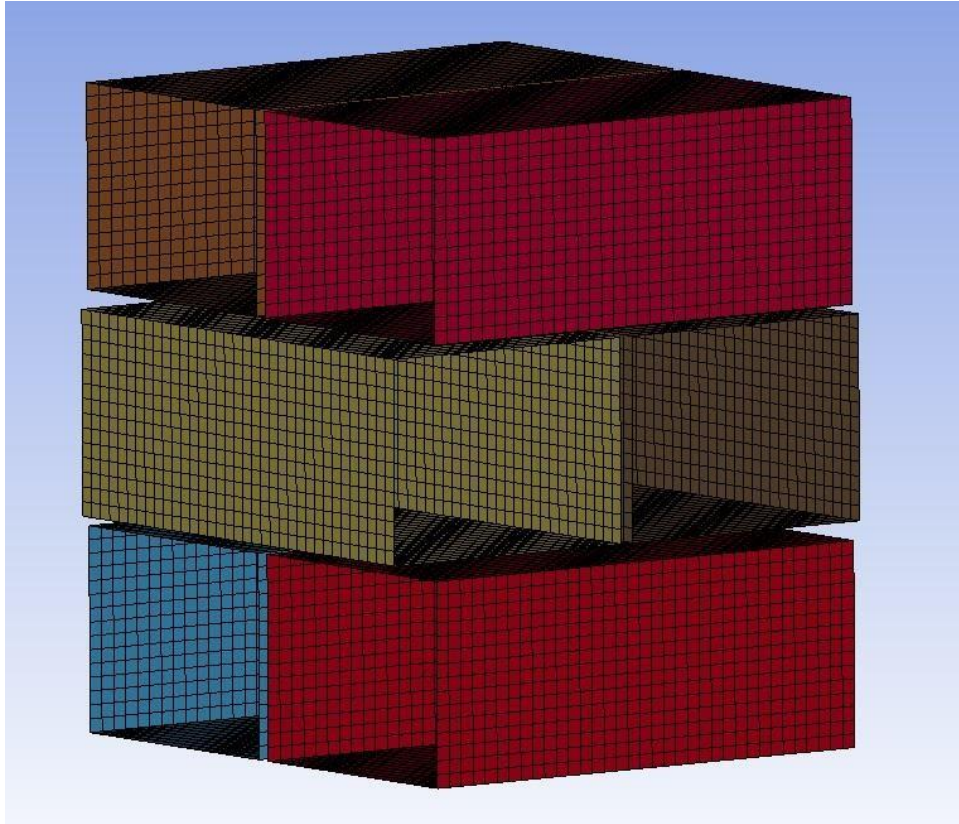
Διάγραμμα 6.2. Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) δοκίμιου R1_D

Το διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου της πρώτης δομής παρουσιάζει μέγιστο φορτίο περίπου στα 70 kN. Το διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Διάγραμμα 6.2) δείχνει μέγιστη παραμόρφωση περίπου 27 mm. Και οι δύο αναφερθείσες τιμές παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα.

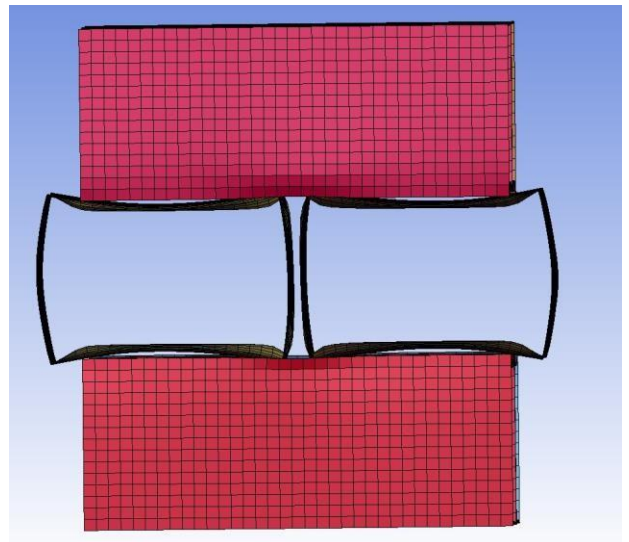
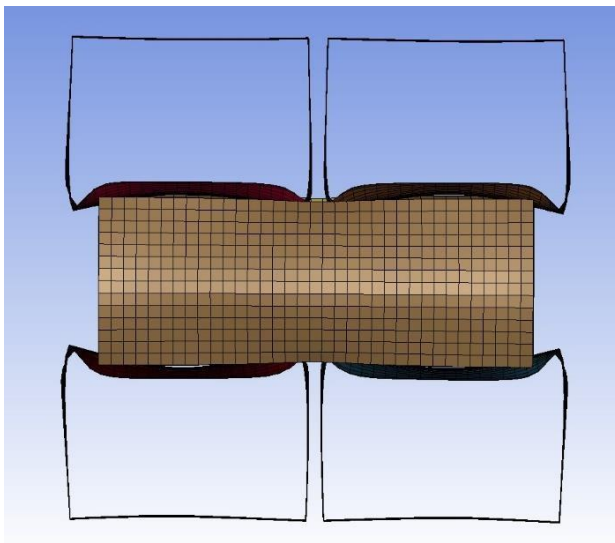
Όσον αφορά στην εικόνα της δομής μετά την κρουστική καταπόνηση, επίσης δε φαίνεται να είναι αντιπροσωπευτική, διότι δε δείχνει σημαντική παραμόρφωση στα εξωτερικά στρώματα, κάτι που δεν υποστηρίζεται από τα δεδομένα της πειραματικής δοκιμής.



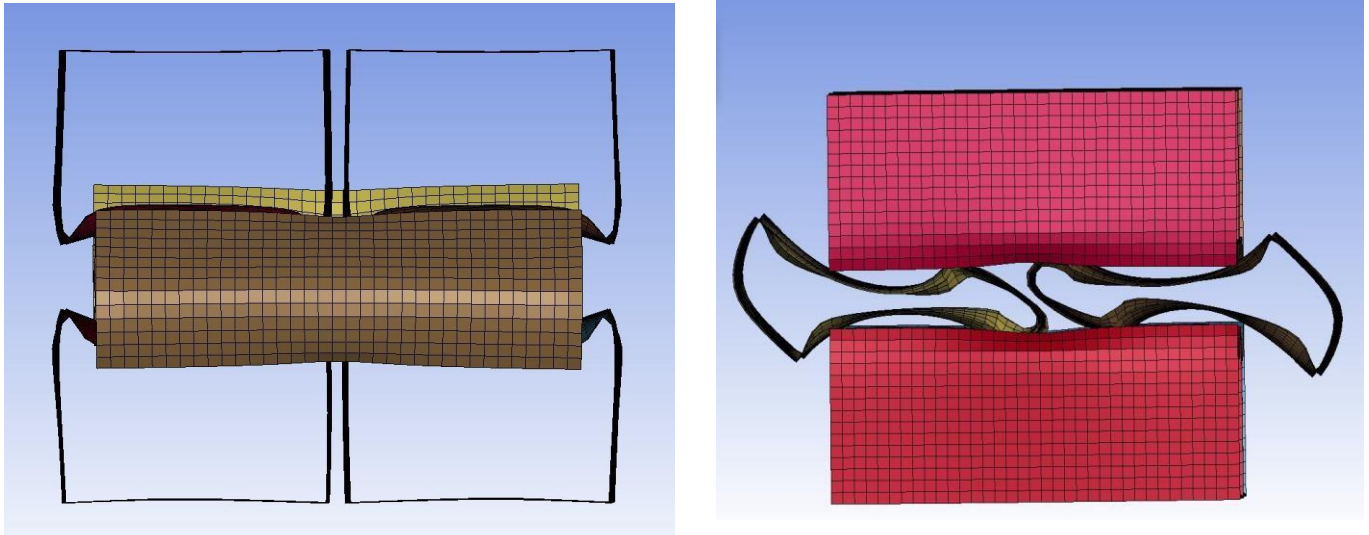
Διάγραμμα 6.3. Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Displacement) δοκιμίου R1_D



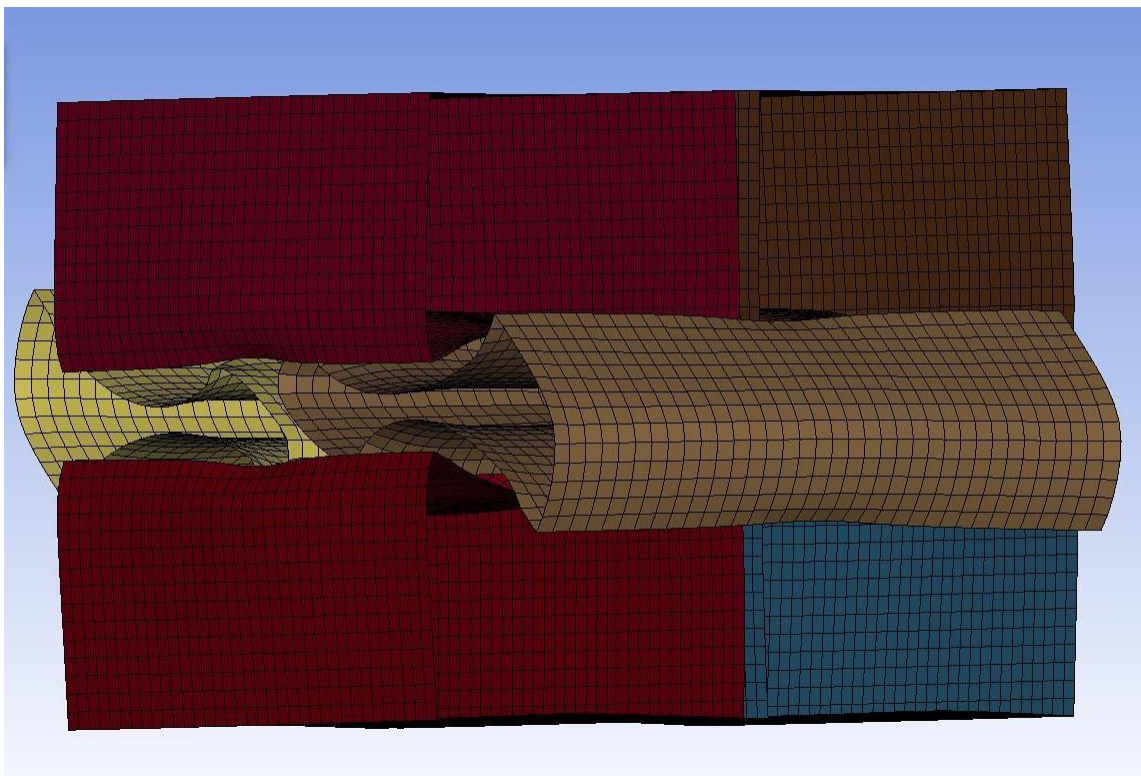
Εικόνα 6.17. Δοκίμιο R1_D



Εικόνα 6.18. Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου R1_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης

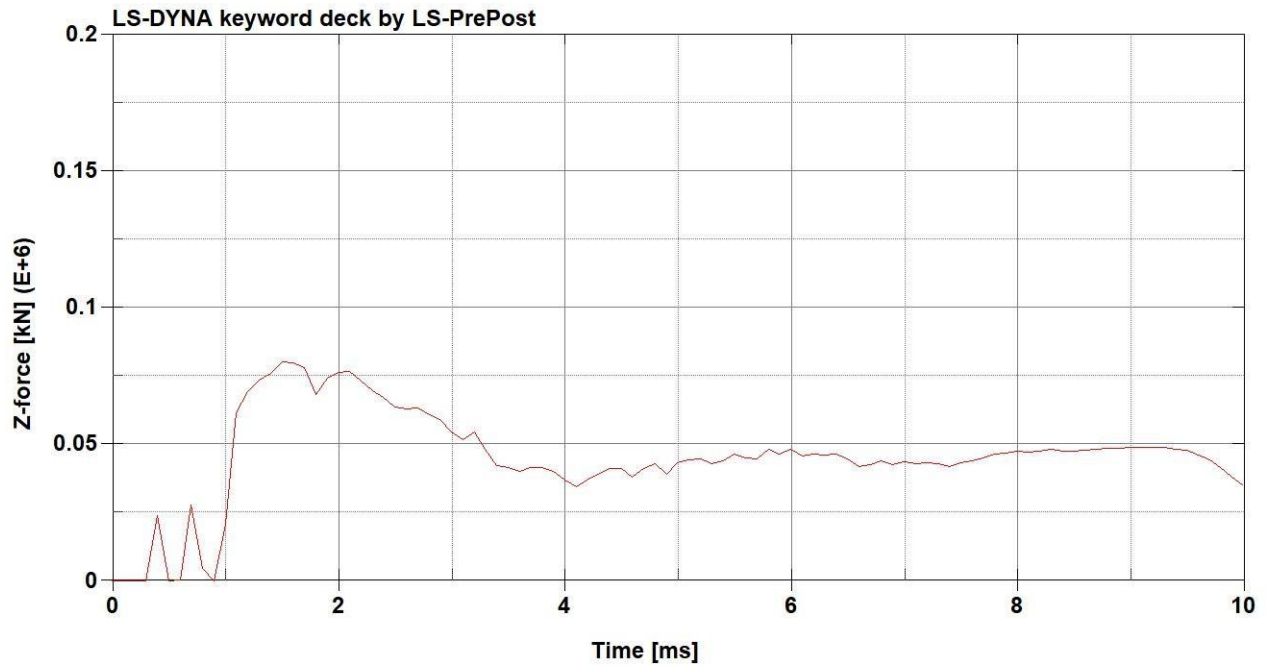


Εικόνα 6.19. Πρόσωση και πλάγια όψη δοκιμίου R1_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης

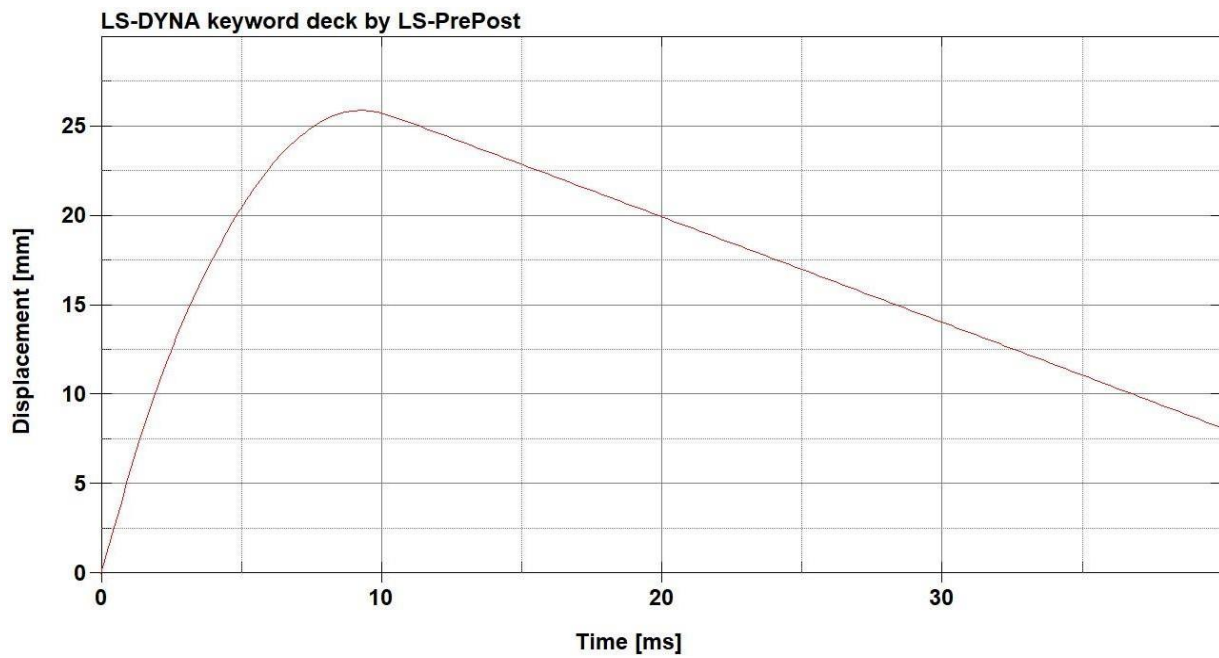


Εικόνα 6.20. Προοπτική απεικόνιση δοκιμίου R1_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης

6.2.2 Δοκίμο R2_D



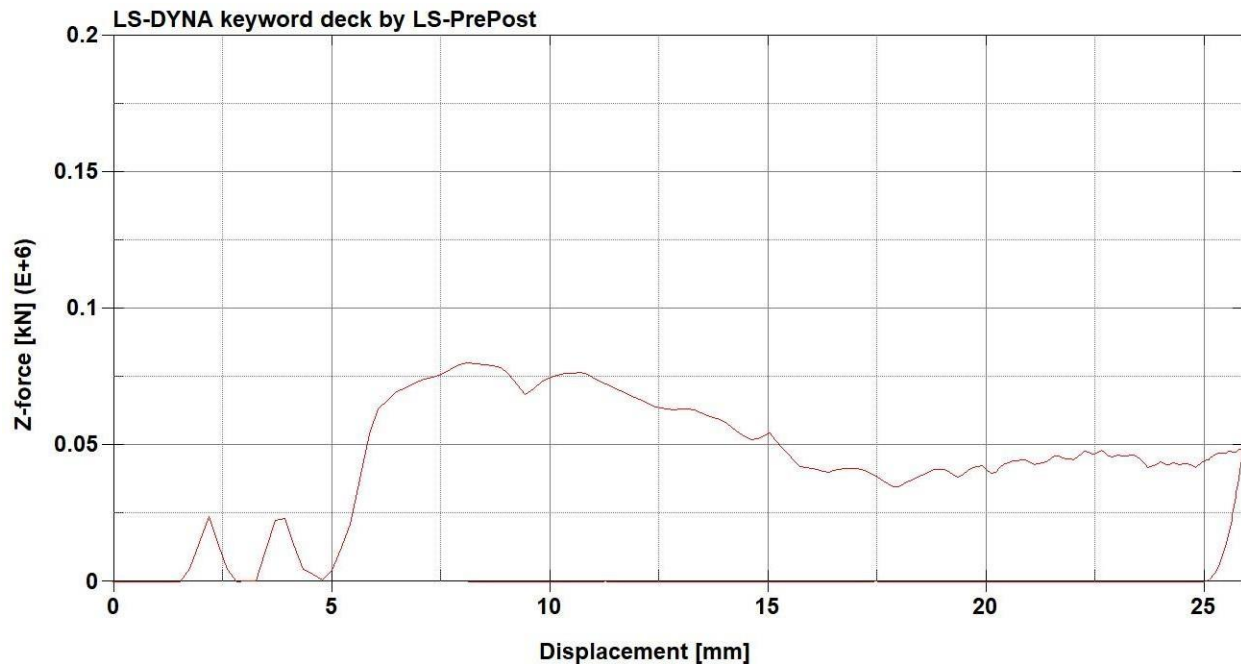
Διάγραμμα 6.4. Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) δοκιμίου R2_D



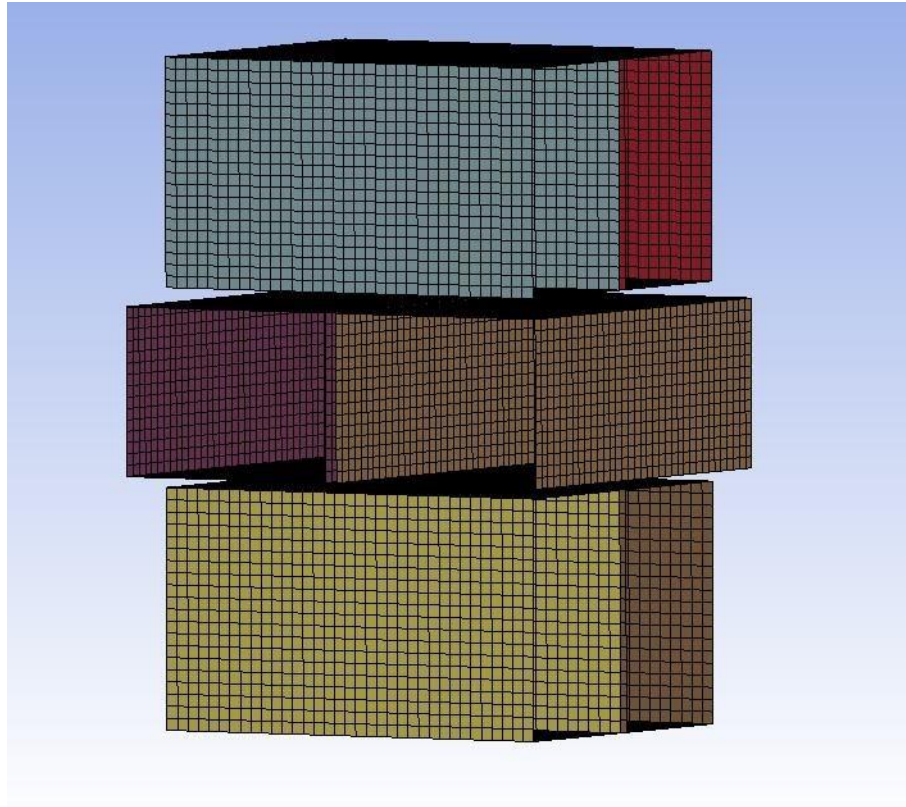
Διάγραμμα 6.5. Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) δοκιμίου R2_D

Στο δοκίμιο R2_D, το μέγιστο φορτίο υπολογίζεται προσεγγιστικά στα 75-80 kN, ενώ η μέγιστη παραμόρφωση επίσης στα 27 mm περίπου. Και σε αυτή την περίπτωση, οι αποκλίσεις μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος είναι αξιοσημείωτες.

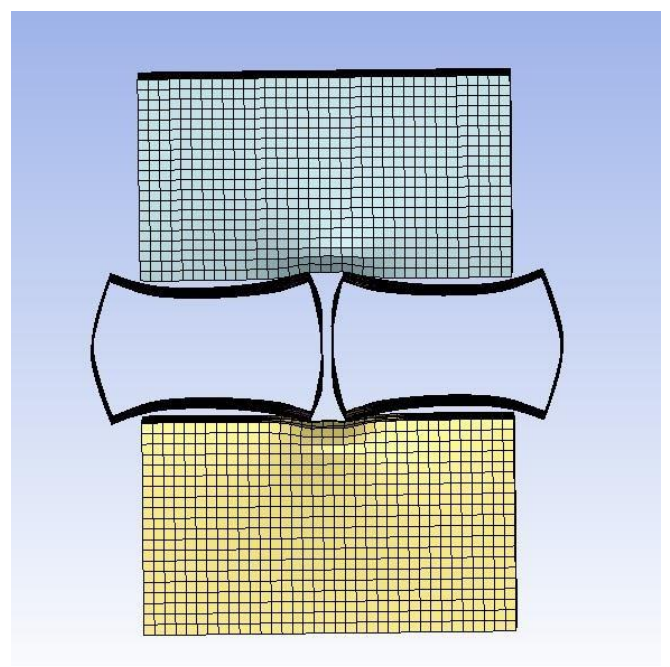
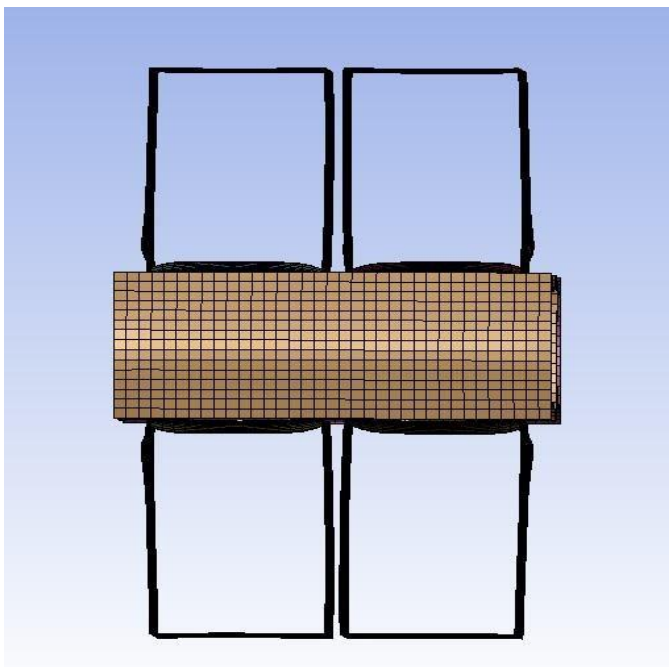
Σχετικά με τις εικόνες του παραμορφωμένου σώματος, δεν παρατηρείται παραμόρφωση στα εξωτερικά στρώματα, κάτι που αντικρούεται από την πραγματική εικόνα του δοκιμίου μετά τη δοκιμή στη σφύρα.



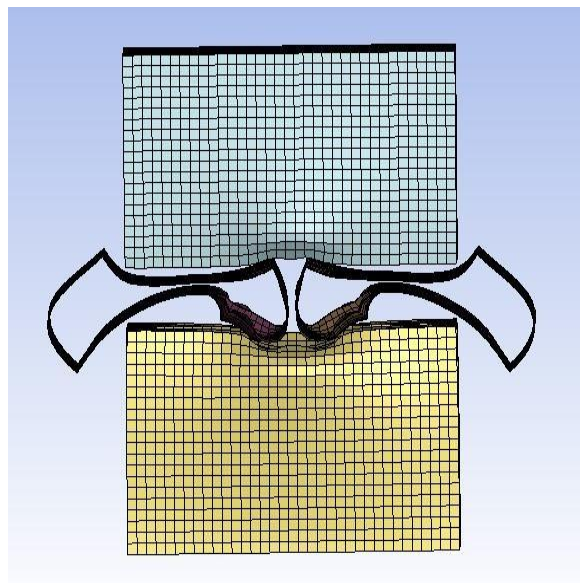
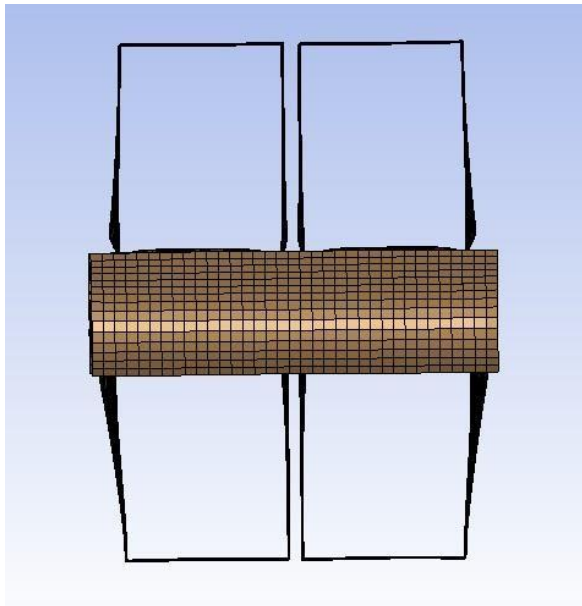
Διάγραμμα 6.6. Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Displacement) δοκιμίου R2_D



Εικόνα 6.21. Δοκίμιο R2_D



Εικόνα 6.22. Πρόσωση και πλάγια όψη δοκιμίου R2_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης

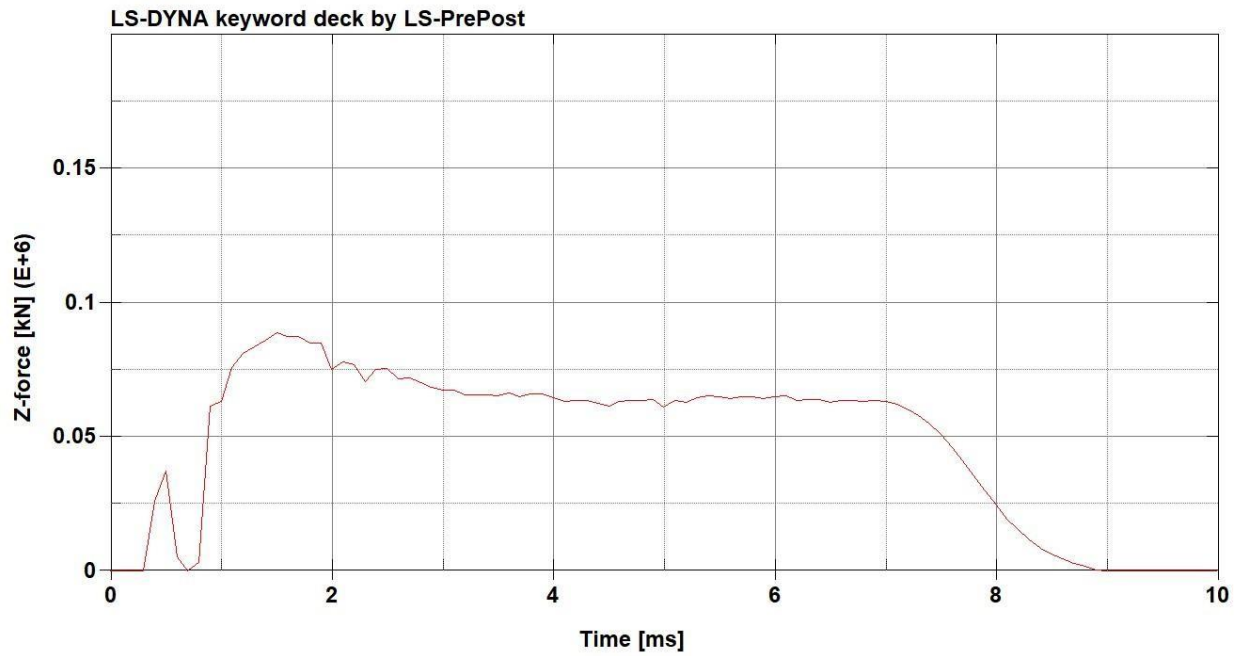


Εικόνα 6.23. Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου R2_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης

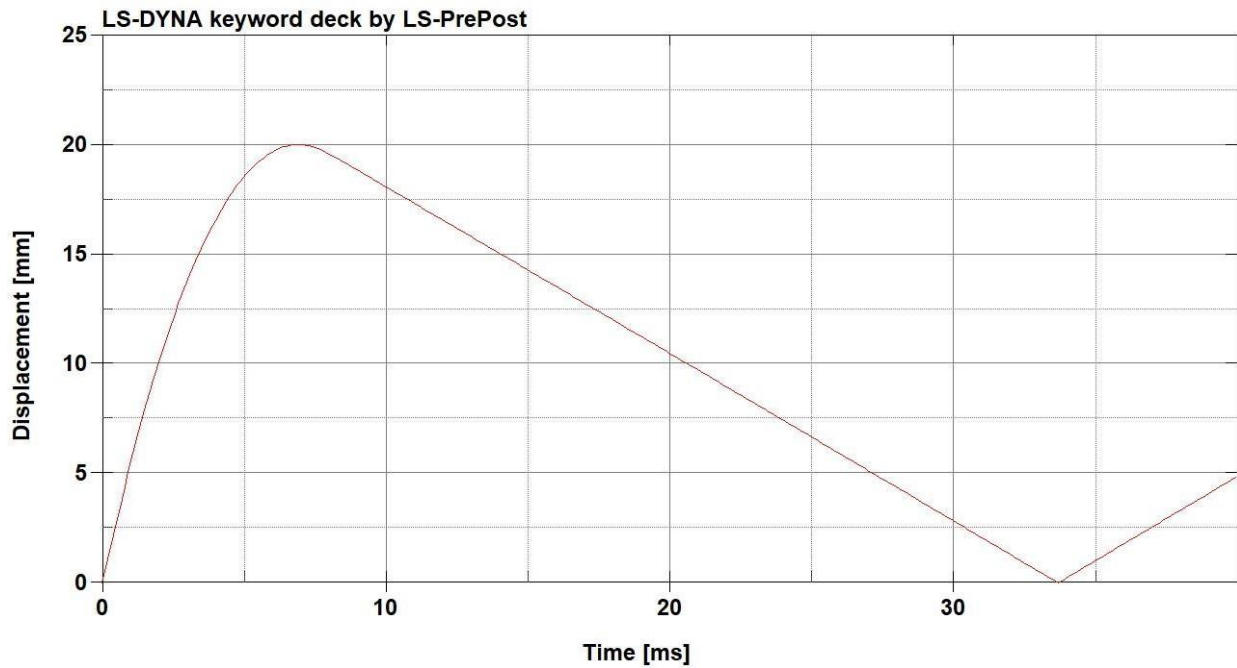


Εικόνα 6.24. Προοπτική απεικόνιση δοκιμίου R2_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης

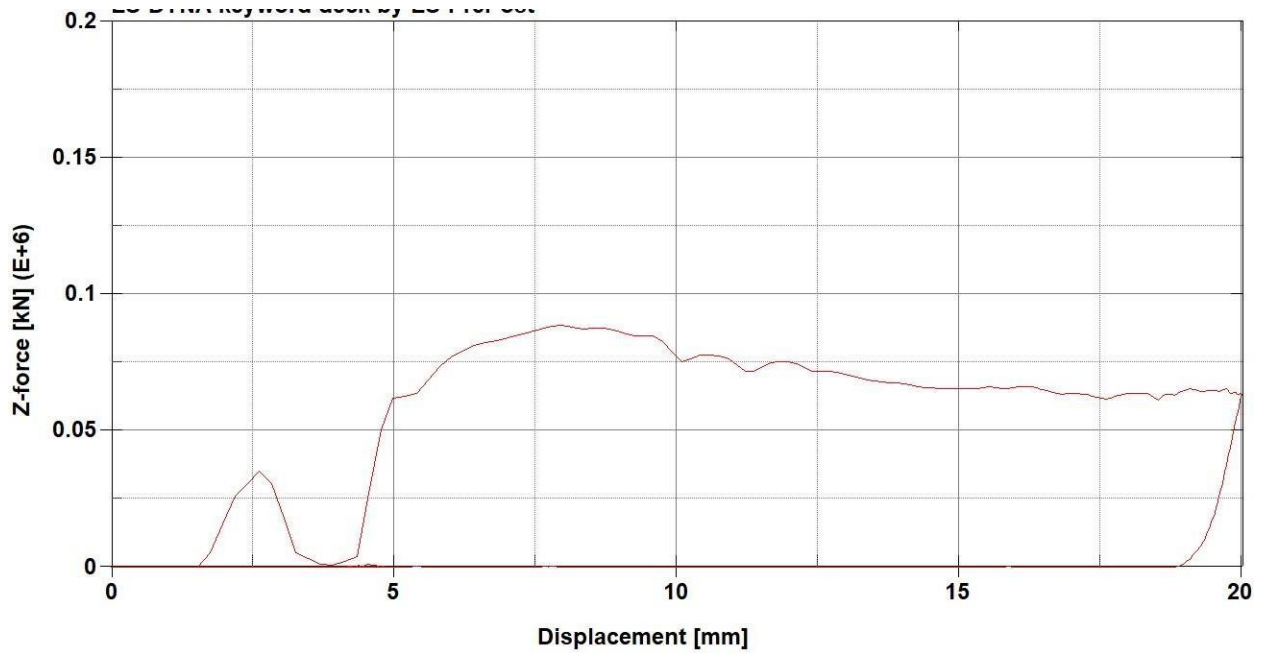
6.2.3 Δοκίμο R3_D



Διάγραμμα 6.8. Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) δοκιμίου R3_D



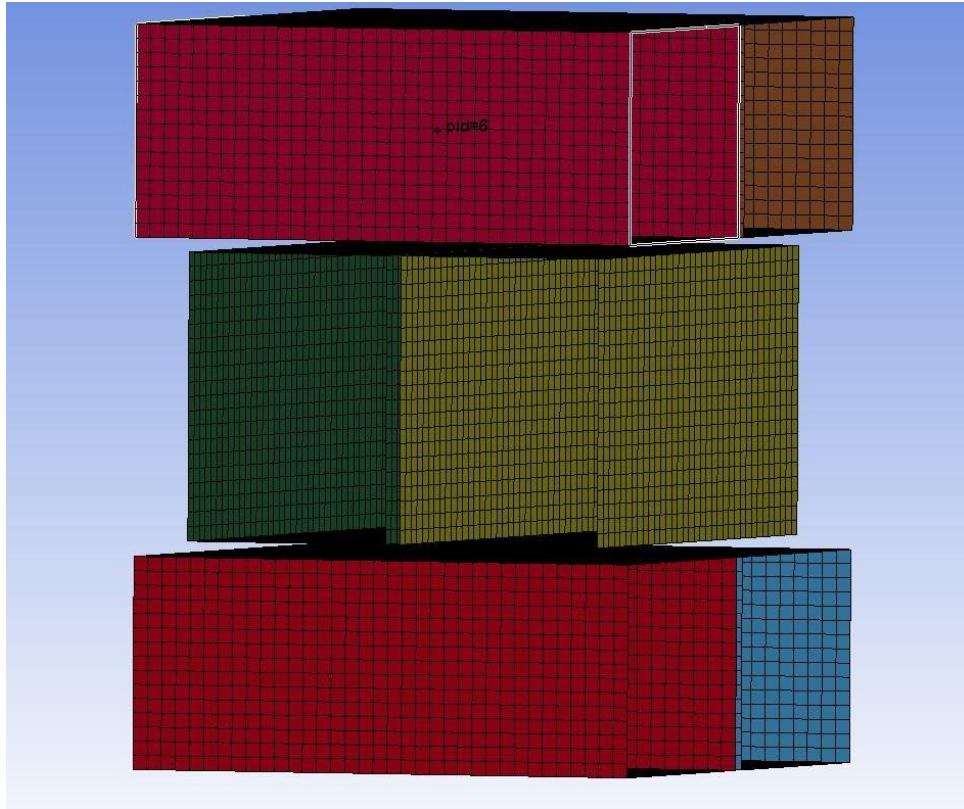
Διάγραμμα 6.7. Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) δοκιμίου R3_D



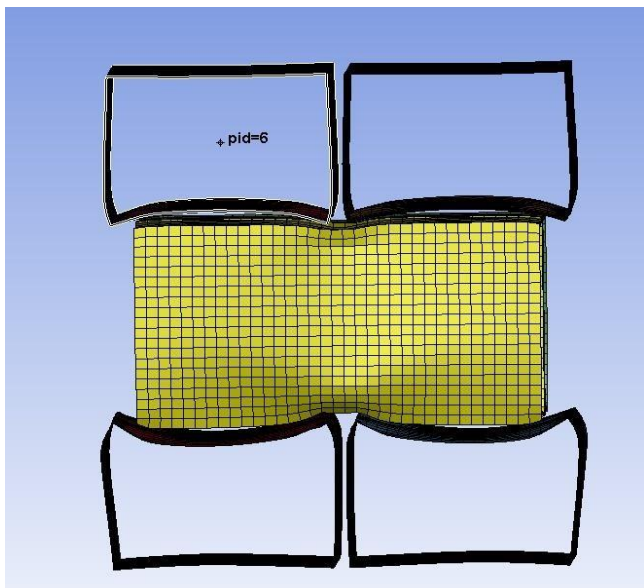
Διάγραμμα 6.9. Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Displacement) δοκιμίου R3_D

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται μέγιστο φορτίο περίπου στα 90 kN για το δοκίμιο R3_D και μέγιστη παραμόρφωση περίπου 20 mm. Σε αυτήν την περίπτωση, η προσομοίωση δίνει σημαντικά μικρότερο φορτίο σε σχέση με την πειραματική δοκιμή.

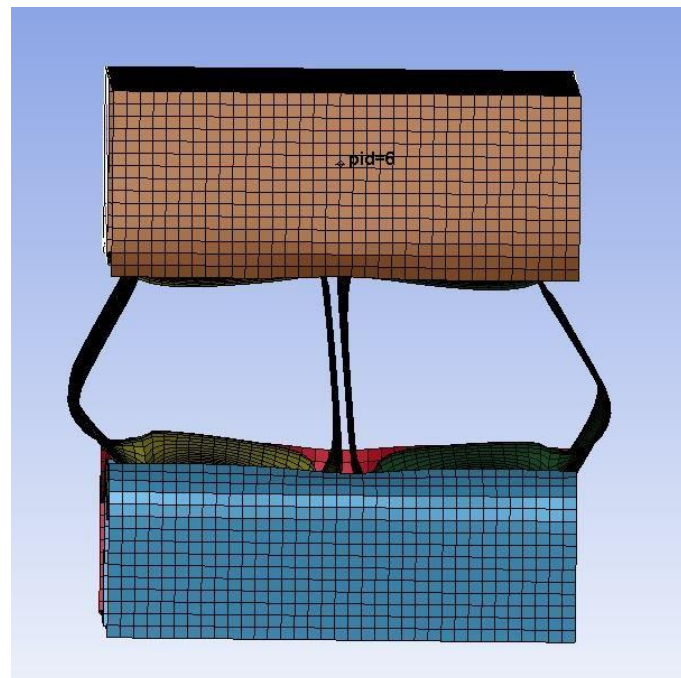
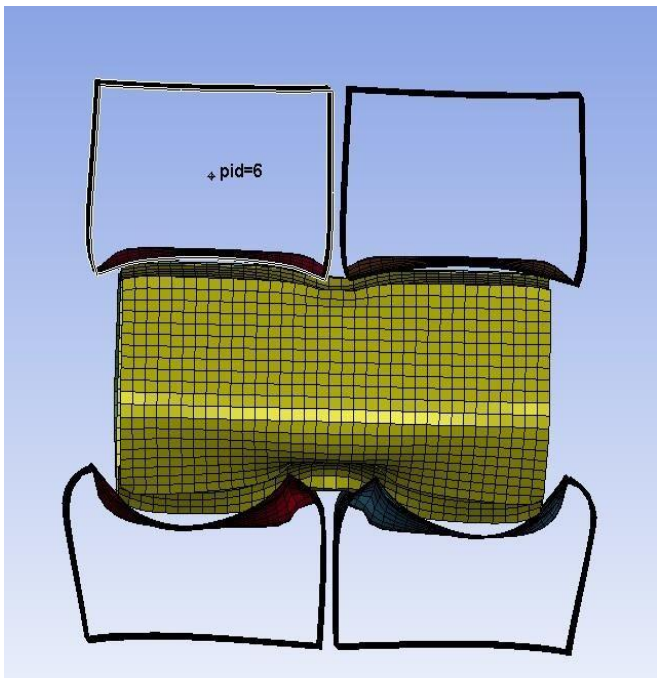
Η εικόνα του παραμορφωμένου σώματος, δείχνει ελάχιστες παραμορφώσεις συνολικά στο δοκίμιο.



Εικόνα 6.25. Δοκίμιο R3_D



Εικόνα 6.26. Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου R3_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης

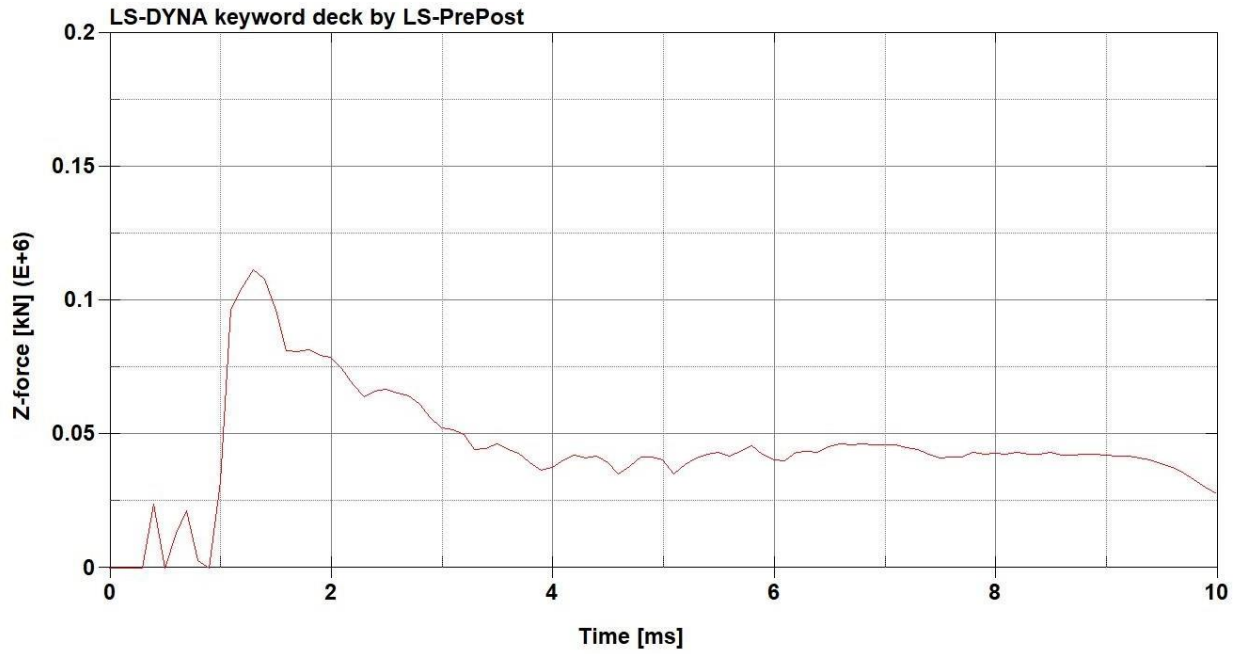


Εικόνα 6.27. Πρόσωση και πλάγια όψη δοκιμίου R3_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης

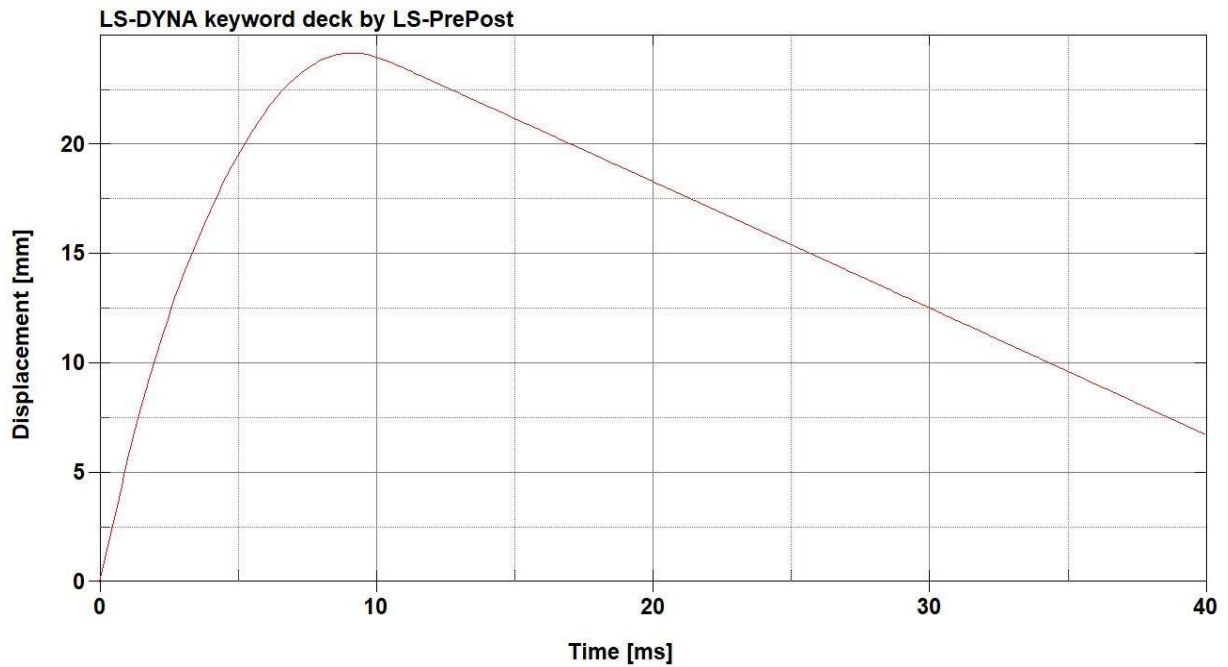


Εικόνα 6.28. Προοπτική απεικόνιση δοκιμίου R3_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης

6.2.4 Δοκίμο R4_D



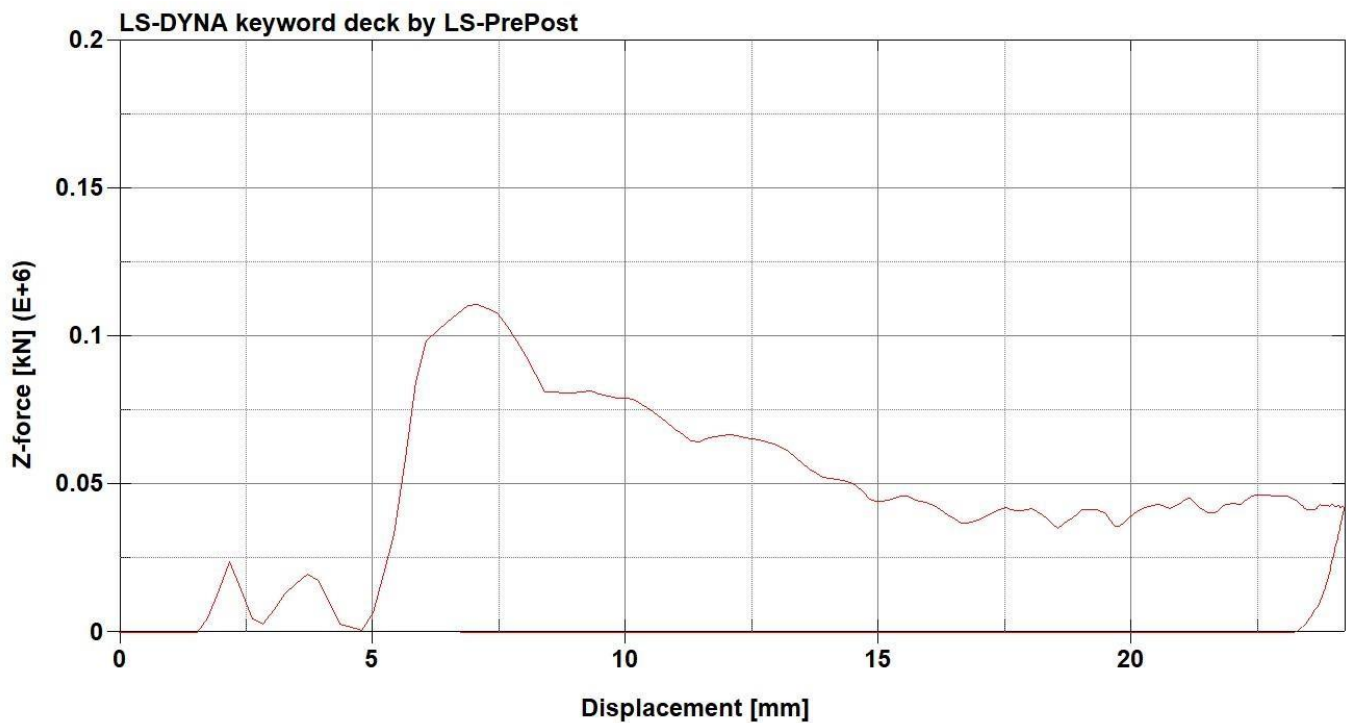
Διάγραμμα 6.11. Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου (Load – Time) δοκιμίου R4_D



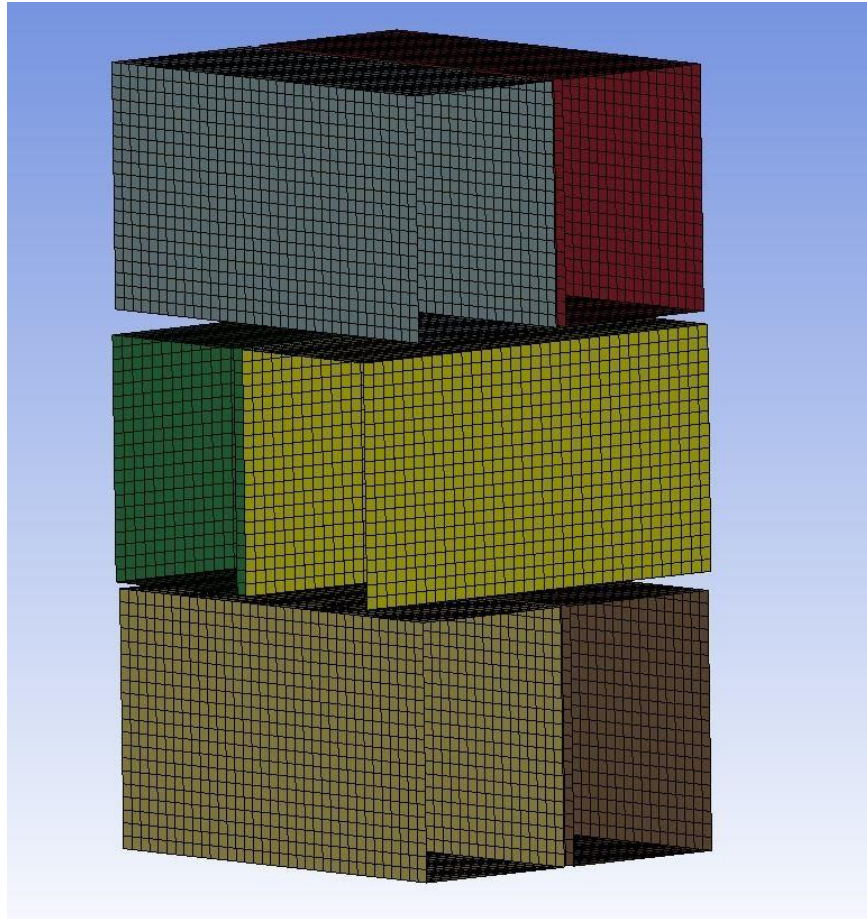
Διάγραμμα 6.10. Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) δοκιμίου R4_D

Η περίπτωση του δοκιμίου R4_D, παρουσιάζει αξιόλογες διαφορές, με το μέγιστο φορτίο να σημειώνεται στα 110 kN, αν και στη δοκιμή της σφύρας η αντίστοιχη τιμή ήταν ίση με 35 kN περίπου. Η παραμόρφωση, προσδιορίζεται περίπου ίση με 25 mm.

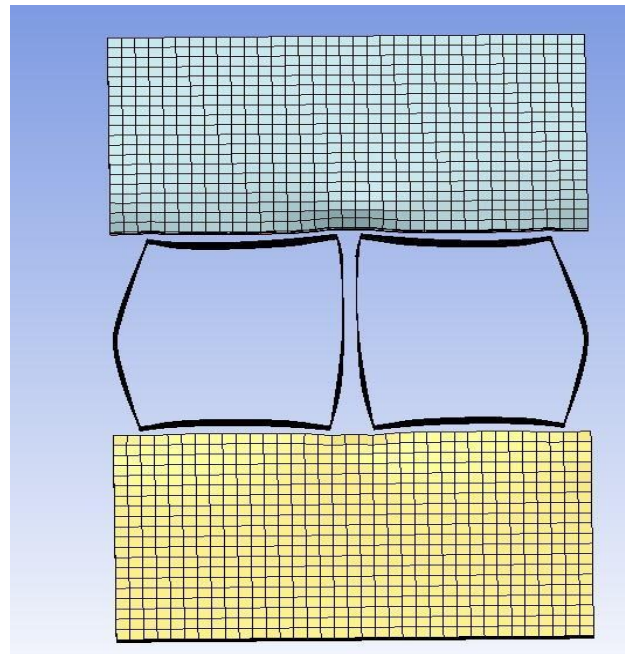
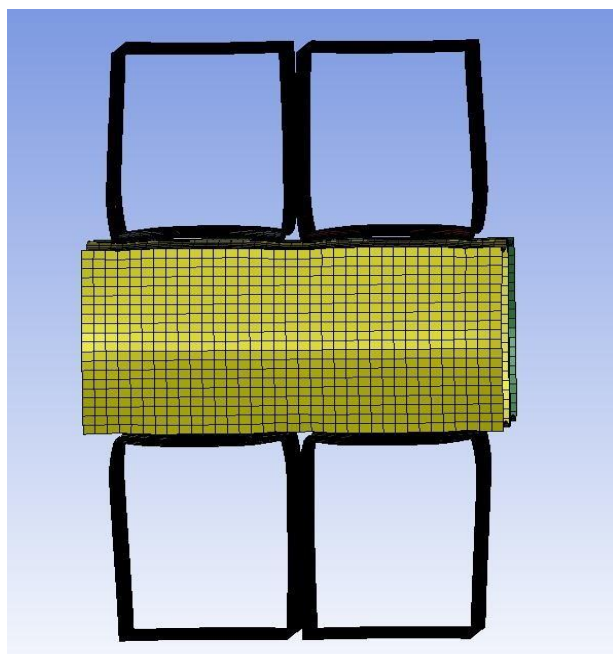
Όσο αφορά στο παραμορφωμένο σώμα, όπως δείχνουν οι ακόλουθες εικόνες, η παραμόρφωση περιορίζεται κατά κύριο λόγο στο μεσαίο στρώμα.



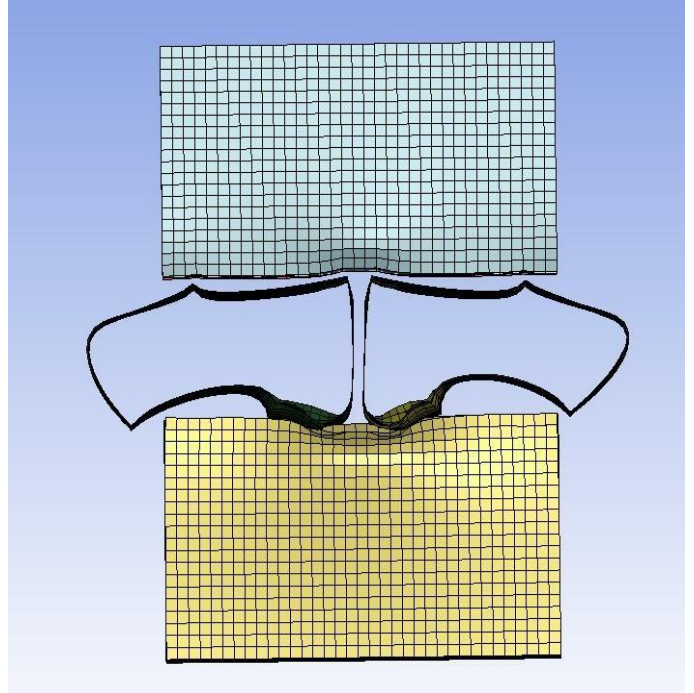
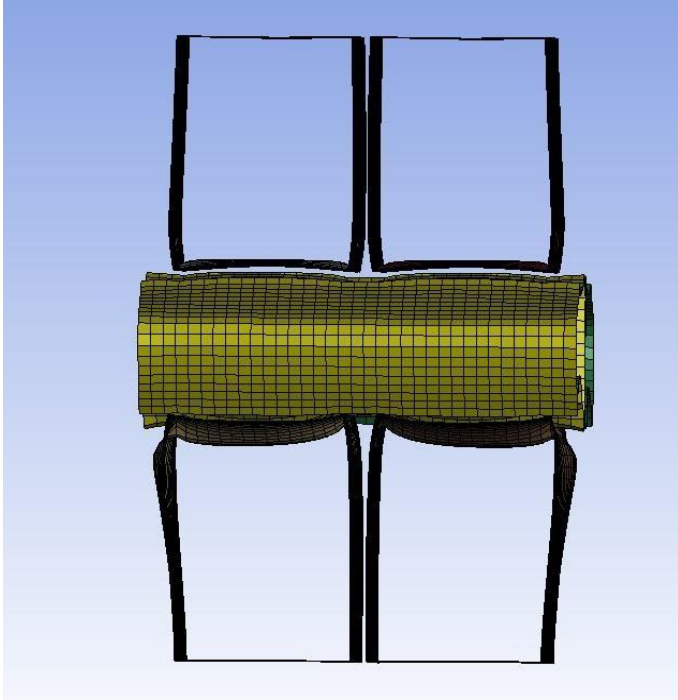
Διάγραμμα 6.12. Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης (Load – Displacement) δοκιμίου R4_D



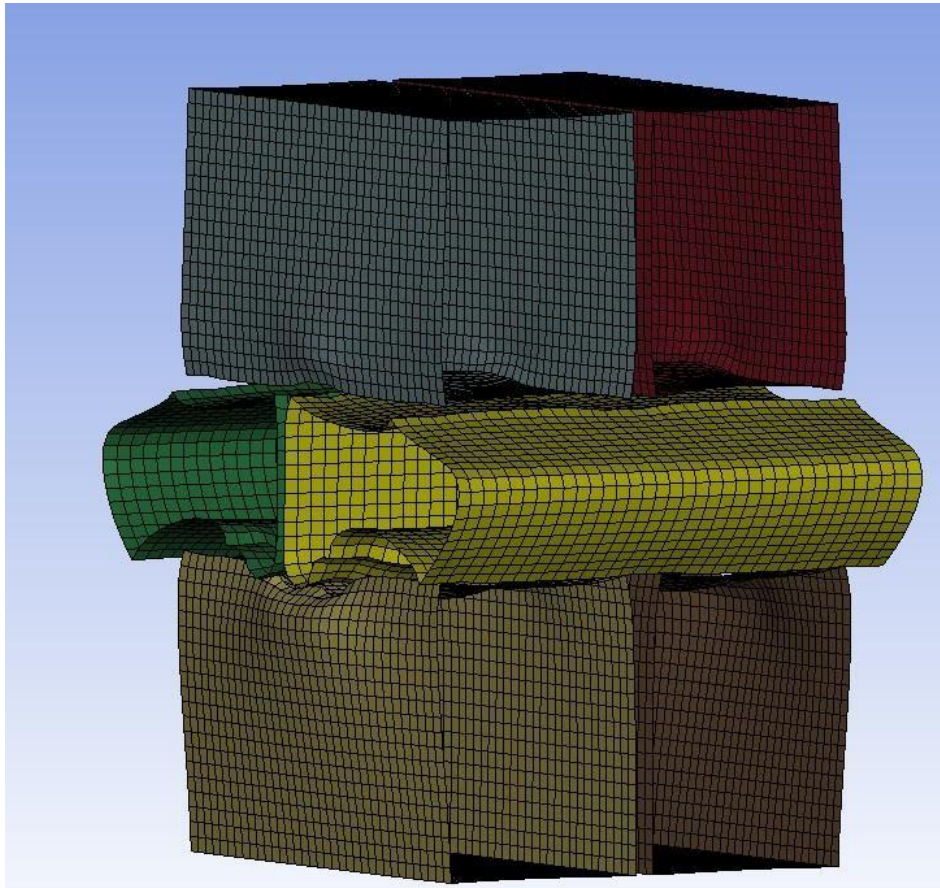
Εικόνα 6.29. . Δοκίμιο R4_D



Εικόνα 6.30. Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου R4_D στην αρχή της προσομοίωσης κρούσης



Εικόνα 6.31. Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου R4_D στο τέλος της προσομοίωσης κρούσης



Εικόνα 6.32. Προοπτική απεικόνιση δοκιμίου R4_D στο τέλος της δοκιμής κρούσης

7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

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.

Ύστερα, 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

Στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα για το μέγιστο φορτίο (max load) και για τη μέγιστη παραμόρφωση (max displacement) των δοκιμών της εργασίας. Οι τιμές της πρώτης στήλης αναφέρονται στα δεδομένα της πειραματικής δοκιμής, ενώ αυτές της δεύτερης στήλης στην προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία (Finite Element Analysis – FEA). 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.

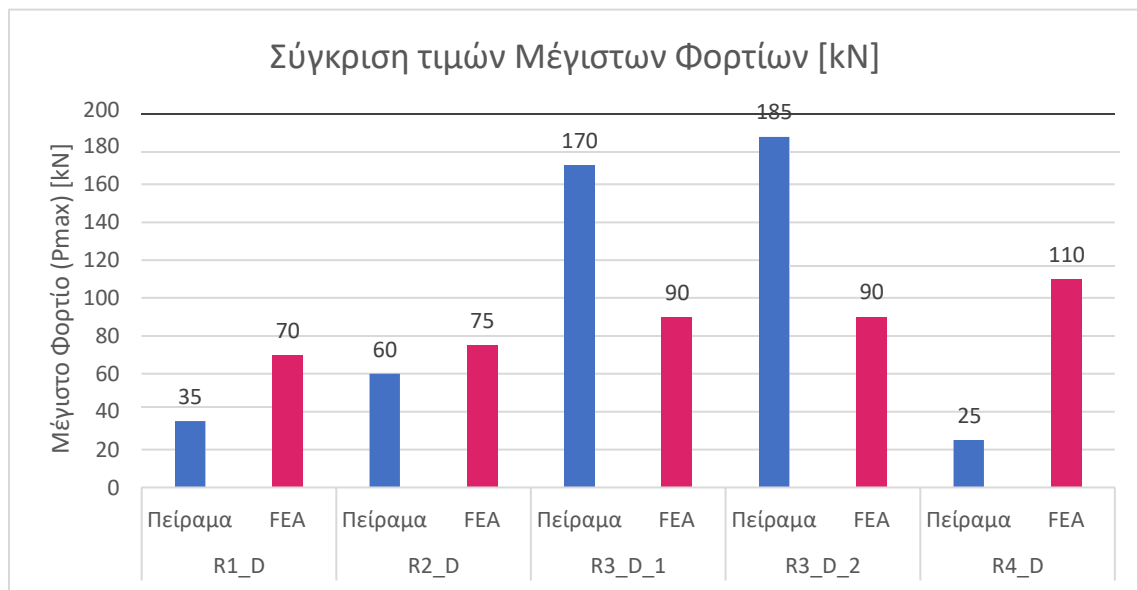
Δοκίμιο	Μέγιστο Φορτίο (Pmax) [kN]		Μέγιστη Μετατόπιση (Displacement) [mm]	
	Πείραμα	FEA	Πείραμα	FEA
R1_D	35	70	≈60	27
R2_D	60	75	≈70	27
R3_D_1	170	90	≈50	20
R3_D_2	185	-	≈50	-
R4_D	35	110	≈70	25

Πίνακας 7.1. Συγκεντρωτικός συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών και ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για δοκιμές υπό δυναμική φόρτιση.

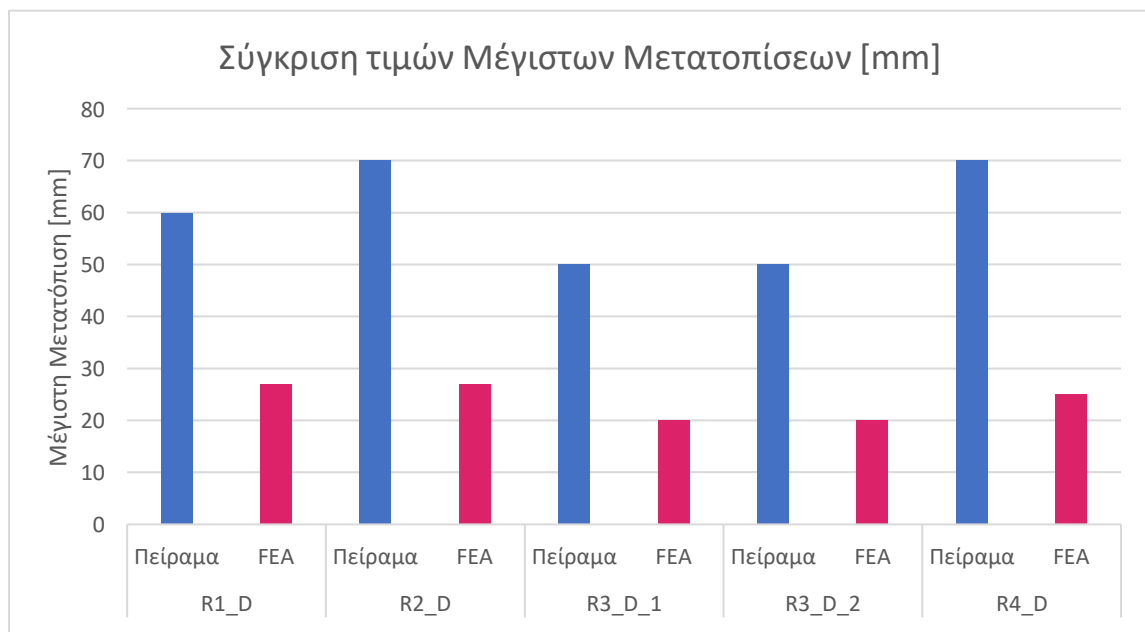
Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι τα δεδομένα από το πρόγραμμα LS Dyna με το οποίο έγινε η ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Π.Σ.), εμφανίζουν σημαντικές αποκλίσεις για τις τιμές μέγιστου φορτίου. Πιο συγκεκριμένα, για τα δοκίμια R1_D και R4_D οι τιμές από την προσομοίωση είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις μετρηθείσες στο πείραμα. Για τα δοκίμια R3_D, τα οποία παρουσίασαν και τη βέλτιστη συμπεριφορά, οι τιμές από την ανάλυση με Π.Σ. είναι αρκετά μικρότερες. Το δοκίμιο R2_D είναι αυτό που παρουσιάζει τη μικρότερη απόκλιση ως προς τις τιμές μέγιστου φορτίου.

Αντίστοιχα, οι μέγιστες παραμορφώσεις μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος παρουσιάζουν ιδιαίτερα σημαντικές διαφορές. Αν και οι τιμές του πειράματος υπολογίστηκαν εποπτικά (όπως προαναφέρθηκε), οι διαφορές είναι αρκετά προφανείς και από τις εικόνες του παραμορφωμένου σώματος. Οι φωτογραφίες του Κεφαλαίου 5 (αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών), δείχνουν πλήρη κατάρρευση όλων των δοκιμών πλην των R3_D_1 και R3_D_2, ενώ τα αντίστοιχα στιγμιότυπα του Κεφαλαίου 6 (αποτελέσματα ανάλυσης με Π.Σ.) δείχνουν πολύ μικρές παραμορφώσεις.

Στα ακόλουθα ιστογράμματα απεικονίζεται η διαφορά που προαναφέρθηκε μεταξύ πειράματος και ανάλυσης με τη μέθοδο Π.Σ.



Διάγραμμα 7.1. Συγκριτικό ιστόγραμμα μέγιστων τιμών φορτίων



Διάγραμμα 7.2. Συγκριτικό ιστόγραμμα μέγιστων τιμών μετατοπίσεων [90]

Στον παρακάτω 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. Επομένως, η σχέση Φορτίου – Μετατόπισης για τα δοκίμια δε καθιστά κάποιο ξεκάθαρα καταλληλότερο για χρήση ως ενεργειακό απορροφητή.

Στη στήλη του Δείκτη Ομοιομορφίας (Crush Force Efficiency - CFE), παρουσιάζονται οι τιμές που υπολογίστηκαν από την προσομοίωση με Π.Σ., οι οποίες είναι σχετικά χαμηλές. Ειδικά για το δοκίμιο R4_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.

Πίνακας 7.2. Ενέργεια απορρόφησης και δείκτης ομοιομορφίας.

Το μέσο φορτίο (P_{mean}) από την προσομοίωση, παρουσιάζει μια μεγαλύτερη τιμή για το δοκίμιο R1_D, αν και όλες οι τιμές βρίσκονται στην ίδια τάξη μεγέθους.

7.2 Συμπεράσματα

Αρχικά, όσον αφορά στα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών στη σφύρα πίπτουσας μάζας, είναι αρκετά ξεκάθαρο ότι η δομή του δοκιμίου R3_D ήταν αυτή που απορρόφησε το μεγαλύτερο κρουστικό φορτίο με τη μικρότερη παραμόρφωση. Οι υπόλοιπες δομές παρουσίασαν πολύ μεγαλύτερες παραμορφώσεις με πολύ μικρότερα φορτία.

Κατά την προσομοίωση του μοντέλου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα LS Dyna, τα δοκίμια εμφάνισαν πολύ μεγαλύτερη ομοιογένεια τόσο ως προς την παραμόρφωσή τους όσο και ως προς τα μέγιστα φορτία. Ωστόσο, στο μοντέλο αυτό δε λαμβάνονται υπόψη ατέλειες του υλικού. Πιο συγκεκριμένα, το υλικό στο LS Dyna θεωρείται ισοτροπικό, ορθοτροπικό και ισοπαχές, κάτι που δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα. Ένας άλλος λόγος στον οποίο ενδέχεται να οφείλονται οι αποκλίσεις είναι ο τρόπος σύνδεσης των επιμέρους σωλήνων για το σχηματισμό της σύνθετης δομής. 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. Στο μοντέλο, ορίστηκε ένα set αποτελούμενο από τα επιμέρους σωληνωτά κελύφη, το οποίο συμπεριφερόταν ως ενιαίο σώμα όσον αφορά στις αλληλεπιδράσεις διεπιφανειών στο εσωτερικό της δομής.

Ακόμα, λόγω πιθανών ατελειών κατά την αρχική κατεργασία του υλικού, δεν αποκλείεται η επαφή μεταξύ των διεπιφανειών, είτε μεταξύ των ορθογωνικών σωλήνων είτε μεταξύ σωλήνων είτε μεταξύ σωλήνων και πλακών, να μην ήταν καθολική. Αντιθέτως, στο υπολογιστικό μοντέλο, οι επιφάνειες βρίσκονται σε πλήρη επαφή.

Κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης, τα δοκίμια παρουσίασαν παρόμοιες τιμές ενέργειας απορρόφησης, και άρα, βάσει αυτής της τιμής δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ξεκάθαρο συμπέρασμα ως προς τη βέλτιστη επιλογή δομής. Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι υψηλότερες τιμές φορτίων μπορεί μεν να συνδέονται με καλύτερη δυνατότητα απορρόφησης φορτίων, μπορεί όμως δε να συσχετίζονται με μεταφορά μεγαλύτερων δυνάμεων στους χρήστες και, συνεπώς, με αύξηση της επικινδυνότητας. Από την άλλη, μεγάλες τιμές παραμορφώσεων, σχετίζονται με καλύτερη απορρόφηση ενέργειας, ωστόσο μπορεί και να υποδεικνύουν και κατάρρευση της κατασκευής γενικότερα, και όχι μόνο του ενεργειακού απορροφητή (που είναι και το ζητούμενο). Παρ'όλα αυτά, το δοκίμιο R4_D παρουσίασε μικρότερο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου, κάτι που το καθιστά λιγότερο αξιόπιστο. Με βάση τα παραπάνω, καταλήγουμε ότι από τα δεδομένα της προσομοίωσης, το δοκίμιο R1_D είναι το προτιμητέο, καθώς η ενέργεια απορρόφησης είναι (ελάχιστα) υψηλότερη σε σχέση με τα υπόλοιπα, ο δείκτης ομοιομορφίας επίσης υψηλότερος και τέλος το μέσο φορτίο είναι και αυτό μεγαλύτερο.

Σχετικά με τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών, δεν προκύπτει σαφής βέλτιστη λύση. Αν και το δοκίμιο R3_D παρουσίασε μέγιστο φορτίο και χαμηλότερη παραμόρφωση, δεν είναι βέβαιο (λόγω του ότι δεν μπορούμε να εξάγουμε διάγραμμα χρόνου-μετατόπισης) ότι η ενέργεια απορρόφησης είναι μεγαλύτερη των άλλων δοκιμών, διότι προκύπτει ως συνάρτηση αυτών των δύο μεγεθών. Όπως προαναφέρθηκε, οι μεγαλύτερες τιμές φορτίων δεν είναι πάντα επιθυμητές, πλην όμως ούτε οι μεγάλες τιμές παραμορφώσεων είναι επιθυμητές. Επομένως, προτείνεται περισσότερο εκτεταμένη έρευνα πάνω σε αυτό το τμήμα, με έμφαση στον προσδιορισμό της ενέργειας παραμόρφωσης, και κατ' επέκταση, και των υπόλοιπων δεικτών crashworthiness, με στόχο την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Βάσει των παραπάνω, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι το αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί μέρος μιας μεγαλύτερης έρευνας, η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Δεδομένης της ευρείας εφαρμογής των δομών που υπόκεινται σε κρουστική καταπόνηση, για χρήση τους ως προστατευτικές διατάξεις στην αυτοκινητοβιομηχανία και σε συγκοινωνιακές εφαρμογές, καθίσταται εμφανής η ανάγκη εξέλιξης της έρευνας στο πεδίο αυτό. Σαν εναλλακτική προσέγγιση και εξέλιξη, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί συγκόλληση για τη σύνδεση και συγκράτηση των δοκιμών, ώστε να αξιολογηθεί η συμπεριφορά τους στην περίπτωση που η σύνδεση τους ομοιάζε σε μεγαλύτερο βαθμό αυτήν ενός ενιαίου σώματος. Σαφώς, θα ήταν καλό οι πειραματικές δοκιμές να πραγματοποιηθούν για μεγαλύτερο αριθμό δοκιμών ούτως ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη επαναληψιμότητα, και, συνεπώς, μεγαλύτερη αξιοπιστία στα αποτελέσματα.

Τέλος, η πρόοδος στον τομέα των τεχνολογικών υλικών, αποτελεί κάθε άλλο παρά τροχοπέδη για την βελτιστοποίηση των υλικών και των δομών που χρησιμοποιούνται σήμερα στον κλάδο. Συγκεκριμένα, οι δυνατότητες που προσφέρουν τα σύνθετα υλικά είναι αρκετά εκτεταμένες και, επομένως, η χρήση τους σε συνδυασμό με τα μεταλλικά υλικά σε εφαρμογές σαν και αυτή που μελετήσαμε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ενδέχεται να αποφέρει πολύ αξιόλογα αποτελέσματα.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abada, M., & Ibrahim, A. (2020). Hybrid multi-cell thin-walled tubes for energy absorption applications: Blast shielding and crashworthiness. *Composites Part B: Engineering*, 183, 107720. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107720>
- 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)
- Grabianowski, E. (2011, September 23). *How Crumple Zones Work*. HowStuffWorks.
- Jacob, G. C., Fellers, J. F., Starbuck, J. M., & Simunovic, S. (2004). Crashworthiness of automotive composite material systems. *Journal of Applied Polymer Science*, 92(5), 3218–3225. <https://doi.org/10.1002/app.20336>
- 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>
- Ozdagli, 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>
- Wang, W., Zhou, F., Zhou, R. X., & Zhong, J. (2022). Numerical evaluation of novel crashworthy devices for protection of RC piers subjected to vessel impact. *Ocean Engineering*, 259, 111857. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111857>

- 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>