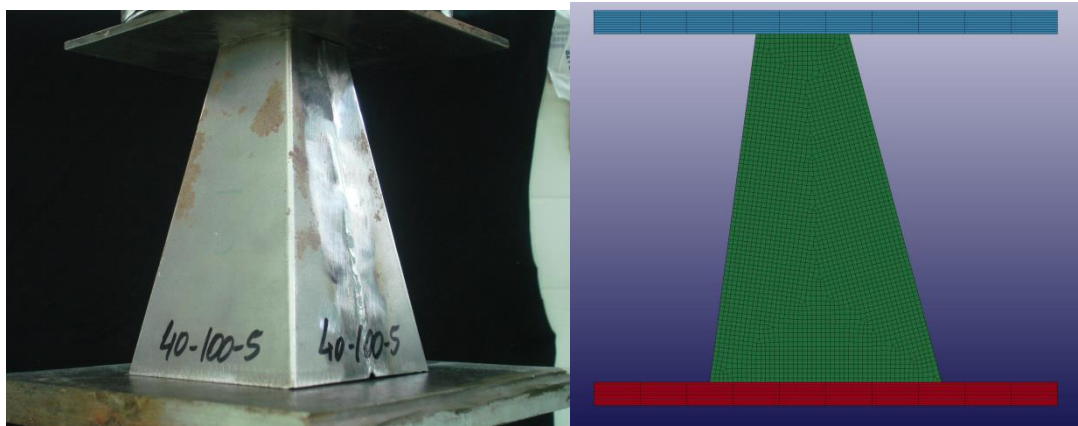




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Του Οικονόμου Αλέξανδρου

“Αξονική καταπόνηση μη συμμετρικών λεπτότοιχων μεταλλικών πυραμίδων: Πειραματική διερεύνηση και προσομοίωση (Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων)”

“Axial loading of non-symmetric thin-walled pyramids: Experimental probe (investigation) and simulation (FEM)”

Επιβλέπων: Μανωλάκος Ε. Δημήτριος (Καθηγητής Ε.Μ.Π.)

ΙΟΥΛΙΟΣ 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι λεπτότοιχες μεταλλικές δομές χρησιμοποιούνται κατα κόρων στην αυτοκινητοβιομηχανία με σκοπό την προστασία των ανθρώπινων ζώων σε περίπτωση πρόσκρουσης αφού έχουν τη δυνατότητα να απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά λεπτότοιχων πυραμίδων σε αξονική κατάρρευση, μέσω πειραματικής διαδικασίας και αριθμητικής προσομοίωσης. Οι μεταλλικές αυτές κόλουμερες πυραμίδες υποβλήθηκαν σε αξονική στατική και δυναμική φόρτιση στους χώρους του εργαστηρίου. Οι πυραμίδες που μελετώνται διαφέρουν ως προς το μέγεθος της άνω βάσης και το σημείο του κέντρου αυτής. Έγινε σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν σε κάθε περίπτωση και σχολιασμός επί αυτών. Παράλληλα έγινε αριθμητική προσομοίωση με χρήση κώδικα Ls-Dyna και σύγκριση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων με εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Λέξεις κλειδιά: κόλουμερη πυραμίδα, αξονική καταπόνηση, δυναμική καταπόνηση, στατική καταπόνηση, χάλυβας, αριθμητική προσομοίωση, απορρόφηση ενέργειας, μοντελοποίηση, Ls-Dyna.

ABSTRACT

Metallic thin-walled structures are extensively used in vehicle industry in order to protect human lives in case of collision, due to their ability of absorbing huge amounts of energy. In current thesis the crushing behavior of thin-walled pyramids is being studied through experiments and numerical simulation. That frusta got through dynamic and static loading (collapse) in lab. The pyramids that are being studied differ in eccentricity and the size of their upper base. A comparison of the experimental results along with further discussion on them was conducted. Meanwhile a numerical simulation by Ls-Dyna was conducted along with a comparison between numerical and experimental results and useful concluding remarks were drawn.

Keywords: frustum, axial fatigue, dynamic loading , static loading , steel, numerical simulation, energy absorption, modelling, Ls-Dyna.

Ευχαριστίες

Η επίτευξη αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι αποτέλεσμα αρωγής όλου του προσωπικού του Τομέα Κατεργασιών της Σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Δ.Ε. Μανωλάκο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον θέμα και για την υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια ενασχόλησής μου με αυτό. Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ.Μηχ. Π.Κ. Κωστάζο για την τεράστια συμβολή του στην διεξαγωγή των πειραμάτων, τις συμβουλές του πάνω στο πρόγραμμα προσομοίωσης και τη συμπαράστασή του σε ό,τι τον χρειάστηκα. Τέλος θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, που με στηρίζουν σε κάθε βήμα μου ανιδιοτελώς.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Θεωρητικό μέρος

1.1: Το αυτοκινητιστικό πρόβλημα.....	7
1.1.1 Η κατάσταση στην Ελλάδα και την Ευρώπη.....	7
1.1.2 Στατιστικά στοιχεία σε παγκόσμιο επίπεδο.....	8
1.2: Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	9
1.3: Το LS-Dyna και οι εφαρμογές του.....	10
1.4: Συμπεριφορά κατασκευών έναντι πρόσκρουσης (Crashworthiness).....	12
1.4.1: Crash characteristics.....	12
1.4.2: Δείκτες Crashworthiness.....	13
1.5: Διαμόρφωση άκρων (triggering).....	14

Κεφάλαιο 2: Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας και δοκιμών

2.1: Εισαγωγή.....	16
2.2: Πειραματική διάταξη.....	16
2.3: Τα δοκίμια.....	20
2.3.1: Τα δοκίμια 40-100.....	20
2.3.2: Τα δοκίμια 50-100.....	23
2.3.3: Τα δοκίμια 60-100.....	24
2.4: Η αριθμητική προσομοίωση μέσω Ls-Dyna.....	27

Κεφάλαιο 3: Στατικά καταπονημένα μοντέλα

3.1: Το δοκίμιο 40-100-5.....	38
3.2: Το δοκίμιο 60-100-1.....	43

Κεφάλαιο 4: Δυναμικά καταπονημένα μοντέλα

4.1: Το δοκίμιο 40-100-2.....	51
4.2: Το δοκίμιο 40-100-3.....	57
4.3: Το δοκίμιο 40-100-6.....	62
4.4: Το δοκίμιο 40-100-8.....	67
4.5: Το δοκίμιο 40-100-9.....	70
4.6: Το δοκίμιο 50-100-1.....	77
4.7: Το δοκίμιο 50-100-3.....	82
4.8: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης.....	88

4.9: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων πειράματος.....	89
4.10: Σύγκριση πειράματος-μοντελοποίησης.....	89
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα</u>	91
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	94

Κεφάλαιο 1 : Θεωρητικό Μέρος

1.1: Το αυτοκινητιστικό πρόβλημα

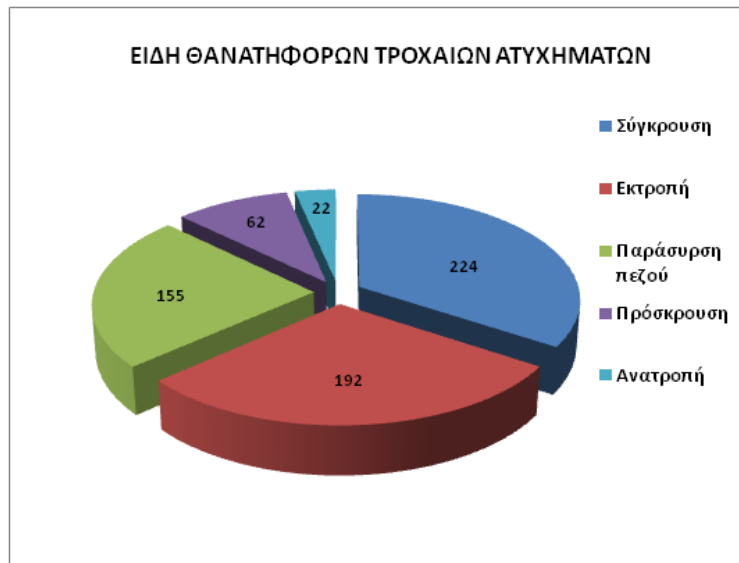
Η πρόοδος της τεχνολογίας έχει οδηγήσει στη ραγδαία αύξηση του πλήθους των οχημάτων αλλά και των αποστάσεων και των ταχυτήτων που αυτά επιτυγχάνουν. Αυτό σημαίνει πως σε περίπτωση σύγκρουσης τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν σοβαρές επιπτώσεις τόσο για τους ανθρώπους όσο και για το περιβάλλον.

Κάθε χρόνο πάνω από ένα εκατομμύριο άτομα σκοτώνονται απο τροχαία ατυχήματα στον κόσμο[1]. Στην Ελλάδα το 2017 και το 2018 σχεδόν 20.000 άνθρωποι τραυματίστηκαν στο δρόμο. Η πλειοψηφία αυτών των ατυχημάτων και οι σοβαροί τραυματισμοί των ατόμων έγιναν σε μετωπικές συγκρούσεις [2].

1.1.1 : Η κατάσταση στην Ελλάδα και την Ευρώπη



Εικόνα 1: Τροχαία ατυχήματα στην Ελλάδα 2017-2018



Εικόνα 2: Είδη τροχαίων ατυχημάτων

Οι επιδόσεις της Ελλάδας σε θέματα οδικής ασφάλειας σημείωσαν εντυπωσιακή βελτίωση συγκριτικά με το 2010 (-41%). Ωστόσο ο αριθμός των θυμάτων από τροχαία ατυχήματα στην χώρα μας παραμένει πολύ υψηλότερος από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο και συγκεκριμένα είναι 69 θάνατοι ανά εκατομμύριο κατοίκων. Σχεδόν το 14% των ανθρώπων που σκοτώθηκαν στους δρόμους της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι ηλικίας μεταξύ 18 και 24 ετών, ενώ μόλις το 8% του ευρωπαϊκού πληθυσμού εμπίπτει σε αυτήν την ηλικιακή ομάδα [3].

1.1.2 Στατιστικά στοιχεία σε παγκόσμιο επίπεδο

Οι συγκρούσεις των οχημάτων, όπως προαναφέραμε αποτελούν ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα σε παγκόσμια κλίμακα. Το μεγαλύτερο πρόβλημα εστιάζεται στις συγκρούσεις/προσκρούσεις των αυτοκινήτων όπου για παράδειγμα στις Η.Π.Α. το 95% των θανάτων από τροχαίο αφορά συγκρούσεις με αυτοκίνητο ενώ μόνο το 4% αφορά συγκρούσεις τρένων και αεροπλάνων μαζί [4].

Κάθε χρόνο περίπου 1,35 εκατομμύρια άνθρωποι σκοτώνονται σε δρόμους σε όλο τον κόσμο. Κάθε μέρα σχεδόν 37 χιλιάδες άνθρωποι σκοτώνονται παγκοσμίως σε τροχαία ατυχήματα με αυτοκίνητα, λεωφορεία, μοτοσικλές, φορτηγά ή πεζούς. Οι οδικοί τραυματισμοί εκτιμάται ότι είναι η όγδοη αιτία θανάτου παγκοσμίως για όλες τις ηλικιακές ομάδες και η κύρια αιτία θανάτου για παιδιά και νέους ηλικίας 5-29 ετών [1]. Επιπρόσθετα οι τραυματισμοί στην οδική κυκλοφορία δημιουργούν τεράστια οικονομική επιβάρυνση στις χώρες με χαμηλό και μεσαία

εισόδημα. Κάθε χρόνο σύμφωνα με την εκτίμηση κόστους του 1998, οι τραυματισμοί στην οδική κυκλοφορία κοστίζουν 518 δισεκατομύρια δολάρια παγκοσμίως και 65 δις σε χώρες χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος, που υπερβαίνουν το συνολικό ποσό που λαμβάνουν οι χώρες αυτές ως αναπτυξιακή βοήθεια.[5]

Το αγοραστικό δυναμικό έχει πλέον γνώση της σημασίας της ασφάλειας του αυτοκινήτου και είναι πλέον η ασφάλεια αυτή ένας βασικός παράγοντας που επηρεάζει τις πωλήσεις κάθε οχήματος. Επιπρόσθετα η ανταγωνιστική φύση που επικρατεί στον τομέα της αυτοκίνησης ωθεί τις εταιρείες στην προσπάθεια κατασκευής ολοένα και ασφαλέστερων οχημάτων κάτι που θα τις βοηθήσει να επικρατήσουν στο χώρο. Συνυπολογίζοντας όλα αυτά καταλαβαίνουμε ότι η ασφάλεια αποτελεί μείζονα σημασία, κάτι που καθιστά αυτόματα την αντοχή σε συγκρούσεις (crashworthiness) του αυτοκινήτου την πρώτη ανάλυση που θα πρέπει να ολοκληρωθεί στο σχεδιασμό αυτού[6]

1.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος (με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή) για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Όμως υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκαν προσεγγιστικές μέθοδοι όπως αυτή των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μεν προσεγγιστική αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ αλλά αυτό με τα χρόνια ξεπεράστηκε με τη ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Για να εφαρμοστεί απαιτούνται τα εξής στάδια:

1. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα και δημιουργείται έτσι το τρισδιάστατο μοντέλο.

2. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται pre processor.

3. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται solver και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους.

4. Όταν τελειώσει η επίλυση πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα που αποκαλείται post processor ,για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.[7]

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) είναι λοιπόν το σύγχρονο εργαλείο που βοηθά μεταξύ άλλων και στην ανάπτυξη ασφαλέστερων οχημάτων. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει στο σχεδιαστή να ερευνά διαφορετικά σχέδια κάθε φορά γρήγορα και αξιόπιστα. Αυτό είναι πολύ σημαντικό ειδικά στα αρχικά στάδια της σχεδίασης όπου επικρατεί αβεβαιότητα και πολλές διαφορετικές εναλλακτικές πρέπει να διερευνηθούν. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το ότι μειώνει σημαντικά τον αριθμό των πρωτοτύπων που θα ελεγχθούν. Αυτό είναι επίσης πολύ σημαντικό αφού τα crash test των οχημάτων είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και ακριβά. Για παράδειγμα η προετοιμασία για ένα crash test διαρκεί περίπου 36 ώρες και μία αρσενική κούκλα που θα χρησιμοποιηθεί σ αυτό στη θέση του οδηγού κοστίζει περίπου 25.000 ευρώ[5].

1.3 Το Ls-Dyna και οι εφαρμογές του.

Το Ls-Dyna είναι ένα προηγμένο πακέτο λογισμικού προσομοίωσης πολλαπλών χρήσεων που αναπτύχθηκε απο την Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Το πακέτο περιέχει πολλές δυνατότητες επίλυσης πολύπλοκων προβλημάτων μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας ρητή ολοκλήρωση χρόνου.Το πρόγραμμα χρησιμοποιείται απο αυτοκινητοβιομηχανίες,εταιρείες του κλάδου της αεροναυπηγικής,κατασκευαστικές και άλλες.

Μερικές από τις εξειδικευμένες λειτουργίες της αυτοκινητοβιομηχανίας που μελετώνται είναι οι παρακάτω :

- Ζώνες προστασίας οχημάτων
- Προεντατήρες
- Δαχτυλίδια ολίσθησης
- Αισθητήρες
- Υβριδικά εικονικά μοντέλα
- Επιταχυνσιόμετρα
- Αερόσακοι

Μια επίσης ευρέως χρησιμοποιούμενη εφαρμογή του Ls-Dyna είναι η μορφοποίηση των μετάλλων και οι κατεργασίες επίπεδου ελάσματος. Το Ls-Dyna προβλέπει με ακρίβεια τις τάσεις και τις παραμορφώσεις στο μέταλλο και ενημερώνει εάν το μέταλλο αποτύχει ή όχι. Επίσης υποστηρίζει την προσαρμοστική διακριτοποίηση και βελτιώνει το πλέγμα κατά την ανάλυση, όπως απαιτείται, για να αυξηθεί η ακρίβεια και να εξοικονομηθεί πολύτιμος χρόνος.

Στις εφαρμογές για μορφοποίηση μετάλλων περιλαμβάνονται τα εξής[9]:

- Τύπωση μεταλλικών ελασμάτων
- Διαμόρφωση με υδραυλική πίεση
- Σφυρηλάτηση
- Βαθειά κοίλανση
- Κατεργασίες πολλαπλών σταδίων

Στην αεροναυπηγική χρησιμοποιείται στις παρακάτω εφαρμογές:

- Ανάλυση αστοχίας
- Λάμα συγκράτησης
- Προσκρούσεις πτηνών (σε παρμπρίζ και πτερύγια των κινητήρων)

Διάφορες άλλες εφαρμογές του Ls-Dyna

- Σχεδιασμός κοντέινερ και εμπορευματοκιβωτίων
- Σχεδιασμός ηλεκτρονικών εξαρτημάτων
- Μορφοποίηση γυαλιού
- Πλαστικά(σχεδιασμός καλουπιού και μορφοποίηση)
- Κοπή μετάλλων

- Αθλητικός εξοπλισμός (μπάλες γκολφ,ρόπαλα μπειζμπολ,κράνη)
- Πολιτική μηχανική (σχεδιασμός πεζοδρομίων)
- Σεισμική μηχανική
- Βιοιατρική(καρδιακές βαλβίδες)

1.4 Συμπεριφορά κατασκευών έναντι πρόσκρουσης (Crashworthiness)

Είναι όρος της μηχανικής που χρησιμοποιείται για να ορίσει την ικανότητα της δομής του οχήματος να προστατεύσει τους επιβάτες του κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης[10]. Δεν περιορίζεται μόνο στα αυτοκίνητα αλλά εφαρμόζεται και σε άλλα μέσα μεταφοράς ,όπως πλοία αεροπλάνα και τρένα. Στην πραγματικότητα η πρώτη συστηματική και επιστημονική έρευνα γύρω απο το crashworthiness εφαρμόστηκε σε βαγόνια σιδηροδρόμου κάπου ανάμεσα στο 1879 με 1890 απο τον Τόμας Άντριους [11]. Με άλλα λόγια crashworthiness είναι η διαδικασία της βελτιστοποίησης μιάς δομής σε συνθήκες σύγκρουσης, θυσιάζοντας την μέσω δοκιμών , με σκοπό την προστασία των επιβατών απο τραυματισμούς.[12]Για να βελτιώσουμε το σχέδιο της κατασκευής μέσω crashworthiness απαιτείται η κατανόηση των διαφορετικών παραγόντων που επηρεάζουν τη διαδικασία της σύγκρουσης.

1.4.1 Crash characteristics

Τα ατυχήματα συμβαίνουν με τυχαίο τρόπο. Ένα αυτοκίνητο μπορεί να συγκρουστεί από διαφορετικές κατευθύνσεις και με διαφορετικές ταχύτητες.Μπορούν επίσης να συγκρουστούν οχήματα πολύ διαφορετικά μεταξύ τους. Ένα αυτοκίνητο μπορεί επίσης να συγκρουστεί με ένα σταθερό εμπόδιο, ένα δέντρο, μια κολώνα και αλλα κατι το οποίο θα προκαλέσει ραγδαία επιβράδυνση του και υψηλά φορτία αφού τα σταθερά αυτά στοιχεία πολύ δύσκολα και σε μικρό βαθμό παραμορφώνονται έτσι ώστε να απορροφήσουν ποσοστό της ενέργειας της σύγκρουσης . Τα προβλήματα του crashworthiness λοιπόν μπορούνε να χαρακτηριστούνε απο:

1. Μετατόπιση και Ενέργεια: Το μήκος του μπροστινού μέρους των αυτοκινήτων μειώνεται συνεχώς με βάση των σύγχρονο σχεδιασμό τους και ταυτόχρονα υπάρχει η ανάγκη αυτά να απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας από μια πιθανή σύγκρουση καθώς και να μειώνουν τη μεταφορά αυτής στην καμπίνα των επιβατών.
2. Ρυθμός κρούσης: Είναι η επιβράδυνση που προκαλείται από τη σύγκρουση με το ανθρώπινο σώμα. Το Head injury criterion (HIC) χρησιμοποιείται για να μειωθεί η ζημία από τον ρυθμό κρούσης με τον εγκέφαλο και πρέπει να είναι μικρότερο από συγκεκριμένα όρια που ορίζονται από συγκεκριμένους κανονισμούς.
3. Η θέση της σύγκρουσης: Η κατασκευή θα πρέπει να μπορεί να μετριάσει τους πιθανούς τραυματισμούς σε διάφορες πιθανές συγκρούσεις όπως μετωπική, εκτροπή, πρόσκρουση και ανατροπή του οχήματος.
4. Η συμβατότητα του αυτοκινήτου: Η κατασκευή του οχήματος θα πρέπει να μπορεί να μετριάσει τους τραυματισμούς σε περίπτωση σύγκρουσης οχημάτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως το σχήμα τους και το βάρος τους.

1.4.2 Δείκτες Crashworthiness

Τα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς ενός υλικού έναντι πρόσκρουσης ονομάζονται crashworthiness characteristics και αποτελούν τη βάση για τη σύγκριση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας ενός υλικού μέσω της παραμόρφωσής του ή της θραύσης του [13]. Τα μεγέθη αυτά προσδιορίζονται μέσω των μετρήσεων που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια του πειράματος που διαμορφώνουν και την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και είναι τα εξής:

- **Μέσο Φορτίο (Mean Crush Load) P_m**

Αντιστοιχεί στο λόγο του αθροίσματος των επιμέρους μετρήσεων του φορτίου P_i προς το σύνολο των μετρήσεων n που ελήφθησαν.

$$P_m [kN] = \frac{\sum_{i=1}^n P_i [kN]}{n}$$

- **Μέγιστο Φορτίο (Peak Crash Load) P_{max}**

Αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή φορτίου που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος.

$$P_{max} = \max(P_i [kN])$$

- **Ενέργεια απορρόφησης (Energy absorption) E_{abs}**

Αντιστοιχεί στη συνολική ενέργεια που απορροφά το υλικό κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης. Η τιμή του μπορεί να βρεθεί μέσω υπολογισμού του εμβαδού της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης.

$$E_{abs} [J] = \int_0^s P(s) [kN] dS [mm]$$

- **Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου (Crush Force Efficiency) CFE**

Αντιστοιχεί στο λόγο του μέσου φορτίου προς το μέγιστο φορτίο και είναι επιθυμητό ο λόγος αυτός, όσο είναι εφικτό, να τείνει στο 1.

$$CFE(\%) = \frac{P_m [kN]}{P_{max} [kN]} \times 100$$

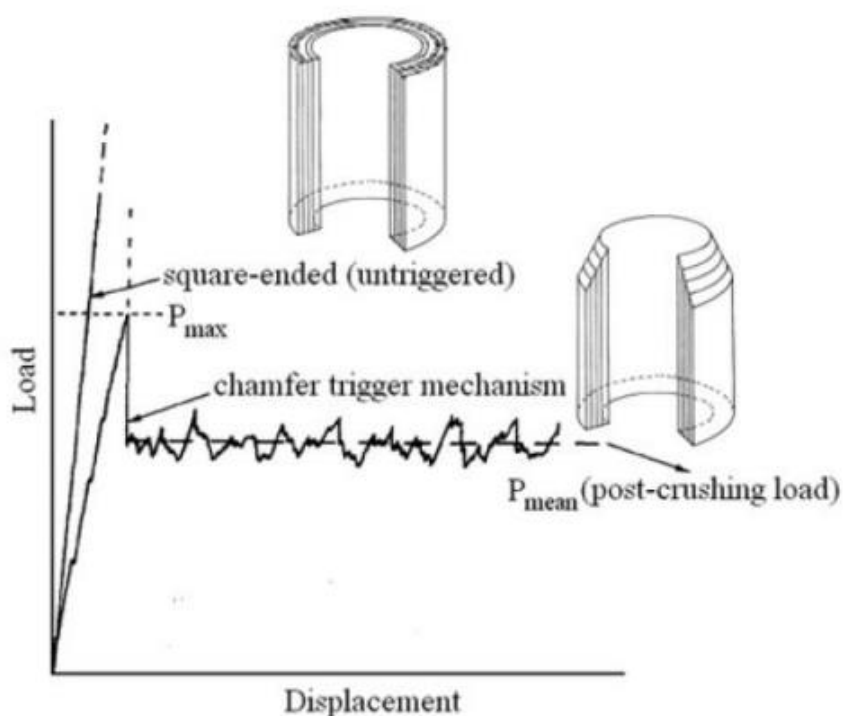
- **Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (Specific Energy Absorption) SEA**

Αντιστοιχεί στο λόγο της συνολικής ενέργειας απορρόφησης E_{abs} προς το ποσοστό της μάζας που έχει καταρρεύσει (M_c)

$$SEA [J/gr] = \frac{E_{abs} [J]}{M_c [gr]}$$

1.5 Διαμόρφωση άκρων (triggering)

Ο Μηχανισμός triggering είναι η διαδικασία κατά την οποία αφαιρείται προοδευτικά υλικό απο το τοίχωμα του δοκιμίου για τη δημιουργία και τη διαμόρφωση ενός πιο "φιλικού" προς κατάρευση αρχικού άκρου. Μέσω της διαμόρφωσης αυτής, επιτυγχάνονται καλύτερα χαρακτηριστικά ενεργειακής απορρόφησης. Πιο συγκεκριμένα βοηθά στην επίτευξη ενός μικρότερου αρχικού φορτίου, το οποίο μεταφράζεται σε μεγαλύτερο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου CFE. Τέλος, μέσω της διαμόρφωσης αυτής δίνεται η δυνατότητα να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες ενός δοκιμίου μέσω λυγισμού [13].



Εικόνα 3: Διαγραμματική απεικόνιση μηχανισμού triggering[14].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

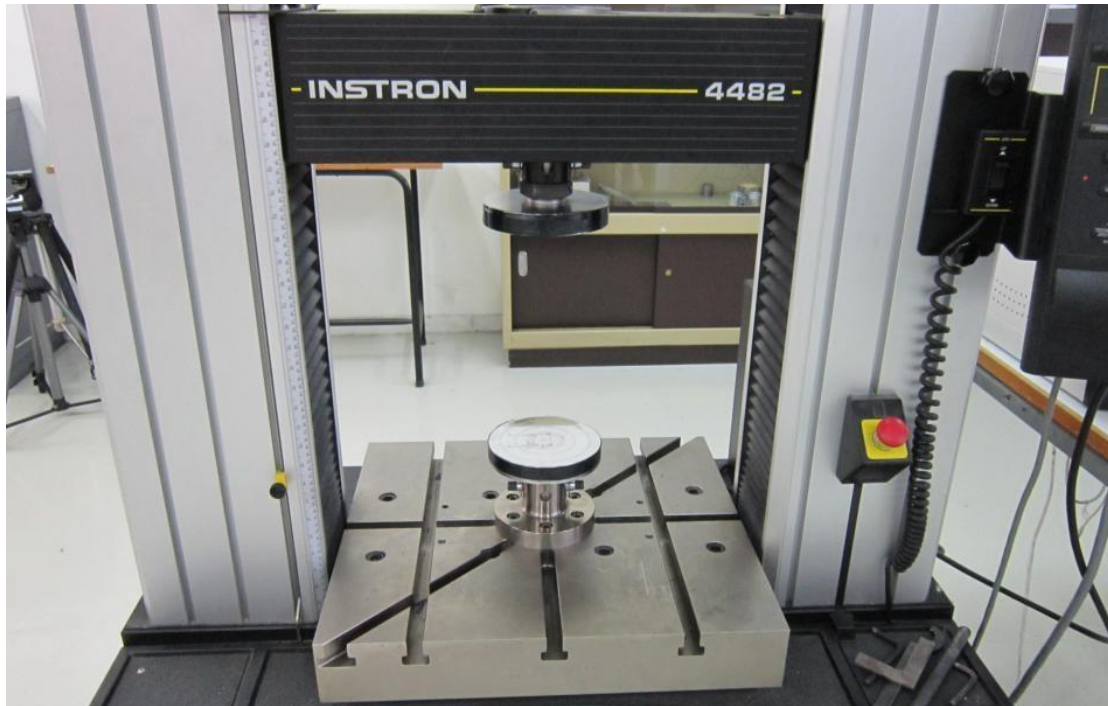
2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε έτσι ώστε να συλλεχθούν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα θα γίνει παρουσίαση των δοκιμίων που μελετήθηκαν, της μηχανικής πρέσας και της σφύρας στις οποίες διεξήχθησαν τα πειράματα καθώς και τον αντίστοιχων συνθηκών. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

2.2 Πειραματική διάταξη

Τα πειράματα έλαβαν χώρα στη μηχανική πρέσα INSTRON 4482 και στη σφύρα, οι οποίες βρίσκονται στον πρώτο όροφο του εργαστηρίου. Η πρέσα αυτή είναι ικανή να εκτελέσει πειράματα εφελκυσμού, θλίψης καθώς και κάμψης. Τα βασικά χαρακτηριστικά της είναι:

- Ονομαστικό φορτίο 10KN
- Μηχανισμός κινητής κεφαλής
- Μέγιστη ταχύτητα κεφαλής 500 mm/min
- Μέγιστο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα τα 75KN



Εικόνα 4: Η INSTRON πριν την εκτέλεση ενός πειράματος θλίψης

Η πρέσα αποτελείται από 3 κυρίως μέρη:

- Το πλαίσιο, μορφής Ο, το οποίο περιλαμβάνει τους οδηγούς κατά μήκος των οποίων κινείται η κινητή κεφαλή και την τράπεζα, όπου φιλοξενείται η κάτω πλάκα συμπίεσης.
- Την κινητή κεφαλή, όπου είναι ενσωματωμένα το δυναμόμετρο και η πλάκα συμπίεσης.
- Τον πίνακα ελέγχου ο οποίος χρησιμοποιείται για το καλιμπράρισμα των αρχικών συνθηκών του πειράματος.

Τέλος η μηχανική πρέσα συνδέεται μέσω σειριακής θύρας με ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με κατάλληλο λογισμικό (Bluehill) με το οποίο είναι δυνατός ο ορισμός των συνθηκών των δοκιμών, η εκτέλεσή τους και η λύση των αποτελεσμάτων και των απαραίτητων διαγραμμάτων που χρειαζόμαστε για την επεξεργασία των μετρήσεων.



Εικόνα 5: Η συνολική διάταξη της INSTRON.

Στα δοκίμια που μελετήθηκαν στατικά η ταχύτητα της πάνω πλάκας της INSTRON ορίστηκε στα 20mm/min

Για την αξονική δυναμική καταπόνηση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε η σφύρα του εργαστηρίου. Το μέγιστο ύψος πύπτουσας μάζας αυτής είναι τα 5m. Στις εικόνες 6 και 7 παρουσιάζονται τα επιμέρους τμήματα και μετρητικά συστήματα της σφύρας.



Εικόνα 6: Διάταξη σφύρας δυναμικών δοκιμών.



Εικόνα 7: Μετρητική διάταξη (ενισχυτές-καταγραφικό).

2.3 Τα δοκίμια

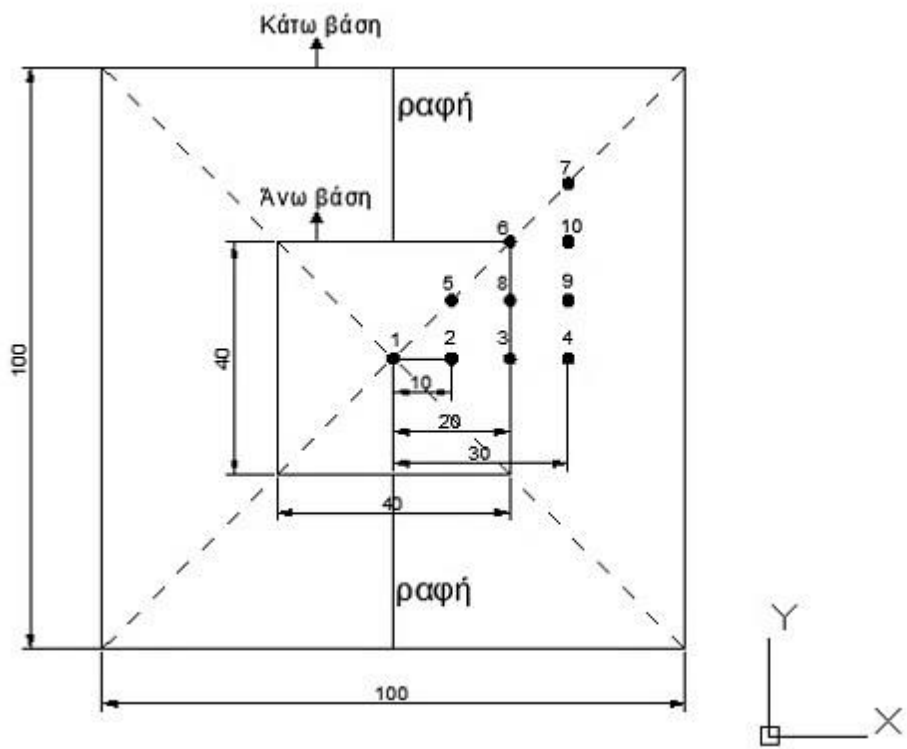
Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν ήταν τετραγωνικές κόλουμερες πυραμίδες από χάλυβα. Η διαφοροποίηση των δοκιμίων που μελετήθηκαν έγκειται στην αλλαγή του μεγέθους της άνω βάσης τους και στη μεταβολή της εκκεντρότητας της πυραμίδας. Το σημείο της άνω βάσης μετακινούνταν ανάλογα σε 10 διαφορετικά σημεία όπως βλέπουμε στις εικόνες 6,8 και 10 (είτε σε οριζόντια είτε σε κάθετη κατεύθυνση σε απόσταση 10mm) . Το ύψος των πυραμίδων είναι κοινό για όλες και ίσο με 150 mm. Το πάχος του τοιχώματος είναι επίσης ίδιο για όλα και ίσο με 1mm.

2.3.1 Τα δοκίμια 40-100

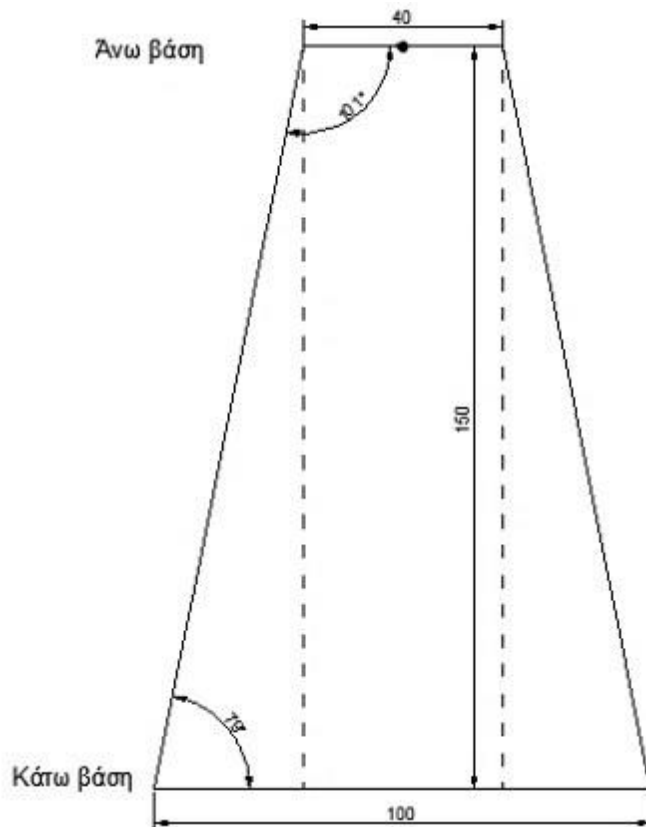
Κάτω βάση : 100x100 mm

Άνω βάση: 40x40 mm

Ύψος πυραμίδας: L=150mm



Εικόνα 8 : Κάτοψη δοκμίου 40-100 με απεικόνιση των θέσεων του κέντρου της άνω βάσης.



Εικόνα 9: Πλάγια όψη του δοκίμιου 40-100[15]

Τα δοκίμια έχουν δύο ραφές, στις δύο απέναντι πλευρές τους. Το κάθε δοκίμιο, δηλαδή, αποτελείται από δύο ξεχωριστά επίπεδα ελάσματα (αρχικά), τα οποία στη συνέχεια κάμφθηκαν (στραντζάρισμα) και συγκολλήθηκαν. Το είδος της ραφής είναι αυτογενής ηλεκτροσυγκόλληση TIG.

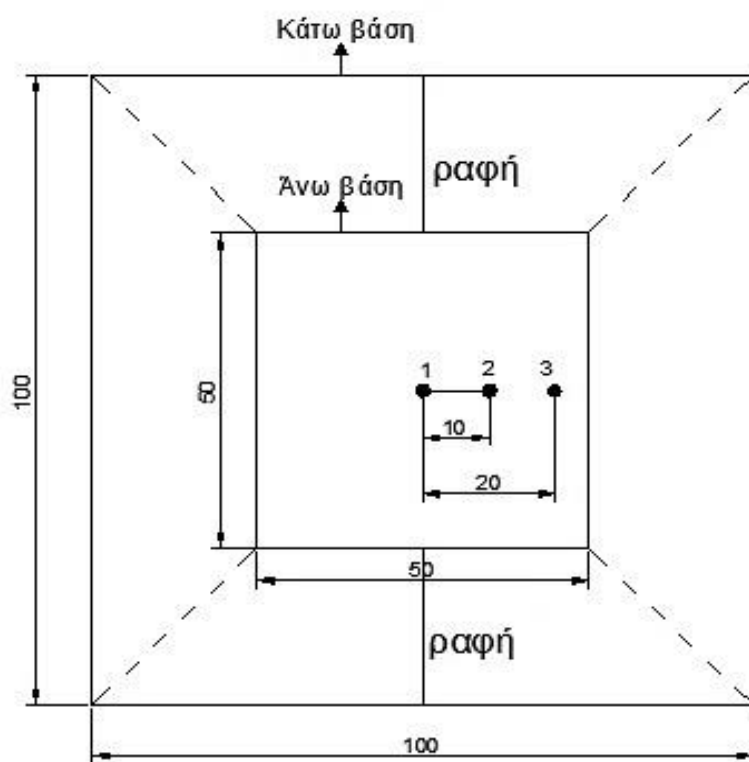
Το παραπάνω σχέδιο αποτελεί παράδειγμα της πλάγιας όψης του δοκίμιου 40-100-1, χωρίς εκκεντρότητα δηλαδή, αφού όπως παρατηρούμε οι πλευρές του είναι συμμετρικές.

2.3.2 Τα δοκίμια 50-100

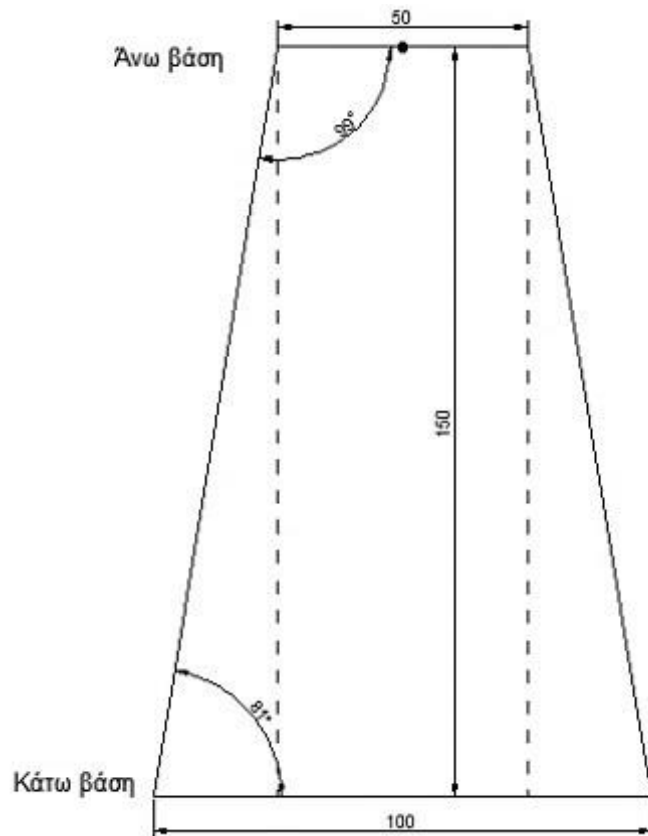
Κάτω βάση : 100x100 mm

Άνω βάση: 50x50 mm

Ύψος πυραμίδας: L=150mm



Εικόνα 10: Κάτοψη δοκίμιου 50-100 με απεικόνιση των θέσεων του κέντρου της άνω βάσης.



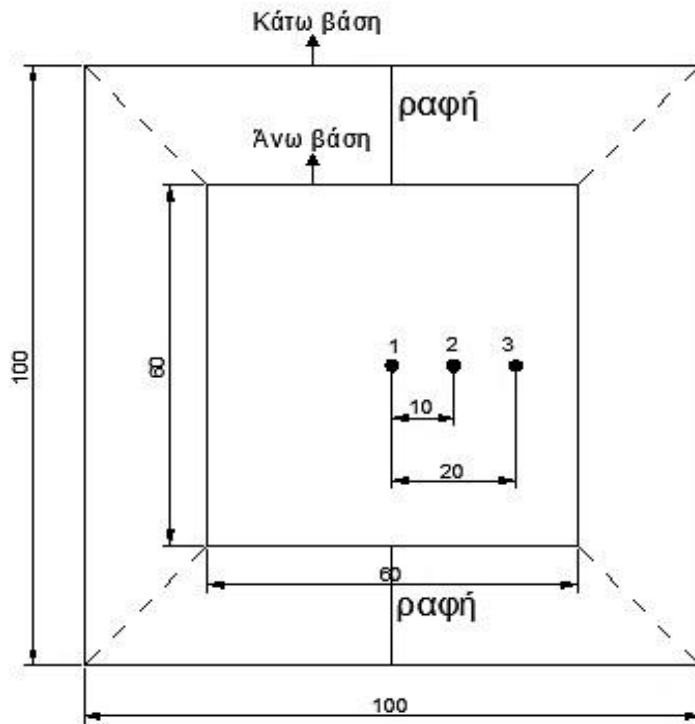
Εικόνα 11: Πλάγια όψη δοκιμίου 50-100

2.3.3 Τα δοκίμια 60-100

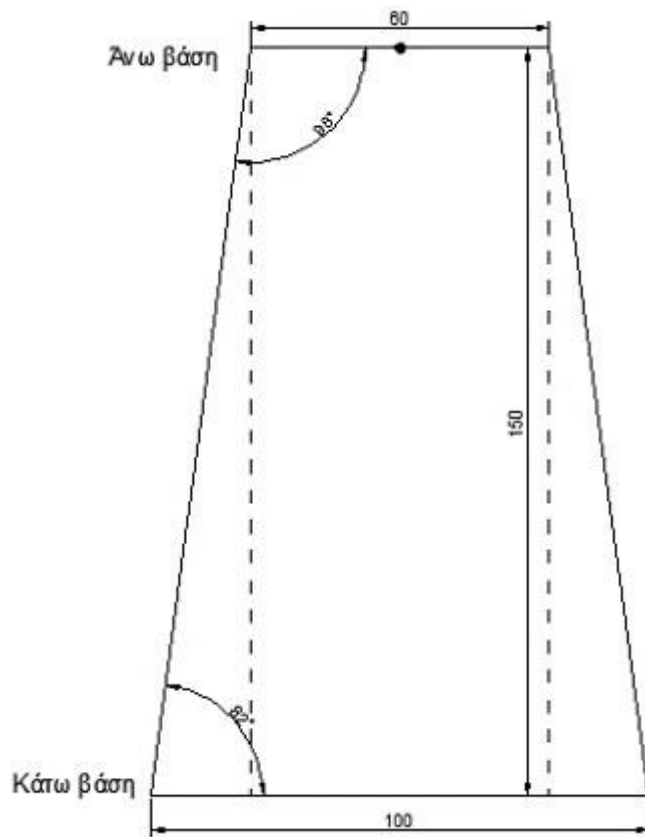
Κάτω βάση : 100x100 mm

Ανω βάση: 60x60 mm

Ύψος πυραμίδας: L=150mm



Εικόνα 12: Κάτοψη δοκιμίου 60-100 με απεικόνιση των θέσεων του κέντρου της άνω βάσης.



Εικόνα 13: Πλάγια όψη του δοκιμίου 60-100

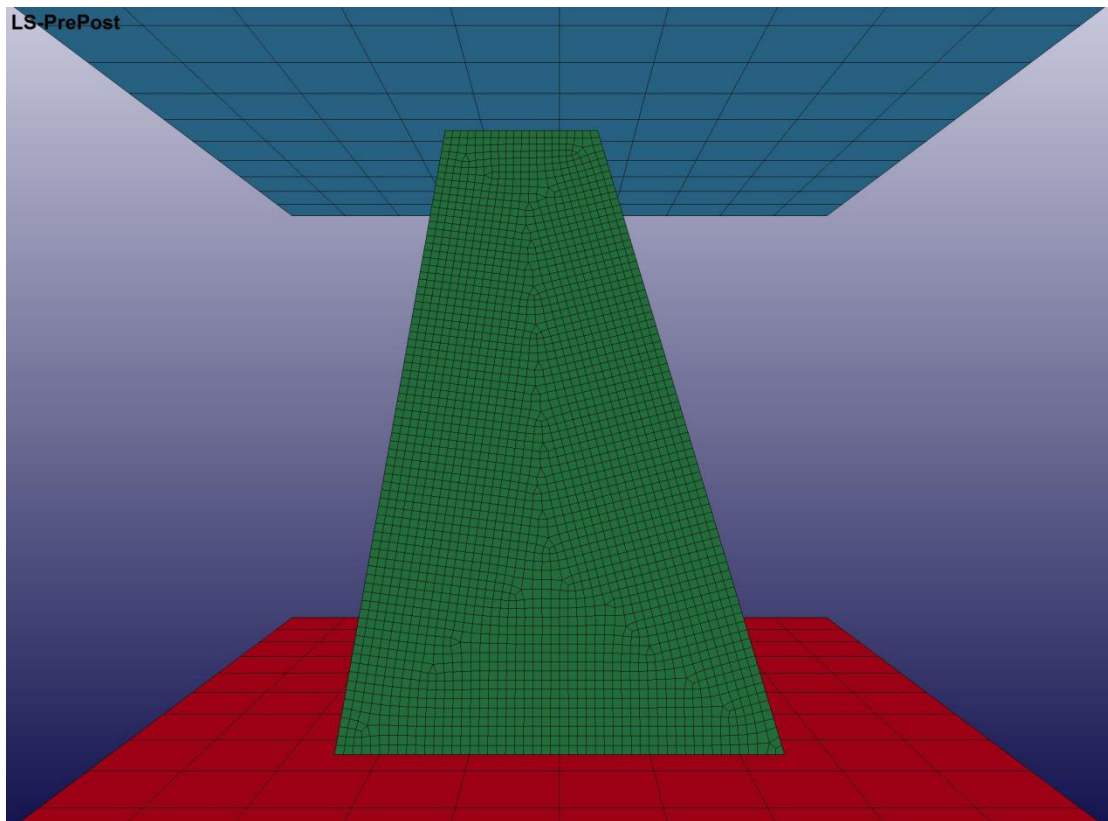
Από τα δοκίμια που είχα στη διάθεση μου για μελέτη το 40-100-5 (δηλαδή αυτο του οποίου το κέντρο της άνω βάσης είναι μετατοπισμένο κατά 10 χιλιοστά οριζόντια και 10 χιλιοστά κάθετα) καθώς και το 60-100-1 συμπίεστηκαν στην INSTRON δεχόμενα στατική καταπόνηση ενώ τα υπόλοιπα (40-100-2, 40-100-3, 40-100-6, 40-100-8, 40-100-9, 50-100-1 και 50-100-3) συμπίεστηκαν στην σφύρα δεχόμενα δυναμική καταπόνηση.

2.4 Η αριθμητική προσομοίωση μέσω Ls-Dyna

Το Ls-Dyna είναι ένα πρόγραμμα που κάνει χρήση πεπερασμένων στοιχείων για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων οπότε όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω η διαδικασία που ακολουθεί είναι η εξής:

- Μοντελοποίηση (pre-processing)
- Επίλυση (solver)
- Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων (post-processing)

Αρχικά σχεδιάζουμε το μοντέλο μας στο περιβάλλον του pre-processor. Το πρόγραμμα μας παρέχει τα κατάλληλα εργαλεία για να μπορέσουμε να το επιτύχουμε αυτό. Στα δικά μας δοκίμια σχεδιάσαμε και τα 10 κατάλληλα καθώς και τις πλάκες συμπίεσης(box solid). Στη συνέχεια διακριτοποιούμε (meshing) δηλαδή σπάμε το μοντέλο μας σε πολλά πεπερασμένα στοιχεία τα οποία θα βοηθήσουνε στην επίλυση του.



Εικόνα 14: Προοπτική ενός διακριτοποιημένου μοντέλου στο Ls-Dyna.

Έπειτα ακολουθεί η δημιουργία του Keyword Manager, ο χώρος δηλαδή όπου θα βάλουμε τα απαραίτητα δεδομένα έτσι ώστε να αναπαραστήσουμε τις συνθήκες του πειράματος όσο πιο πιστά γίνεται μέσω του προγράμματος.

Αρχικά πρέπει να αναφέρουμε ότι πρέπει να γίνει επιλογή ενός συστήματος μονάδων, ώστε αυτές να είναι συμβατές μεταξύ τους και τα αποτελέσματα- ικανοποιητικά ή μη- αξιόπιστα ως προς τα μεγέθη. Αυτές είναι οι :

Πίνακας 1

Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης
Μήκος	mm
Μάζα	g
Χρόνος	ms
Δύναμη	N
Πίεση/Τάση	MPa
Πυκνότητα	g/mm^3

1. Ανοίγουμε το Keyword manager από τη γραμμή εργαλείων του Is-prepost



2. Επιλέγουμε υλικό για τις πλάκες θλίψης (KM>MAT>20_RIGID)

Keyword Input Form

MatIDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter (Subsys: 1) Setting

*MAT_RIGID_(TITLE) (020) (2)

TITLE
kato_plaka

1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
	1	0.0078500	2.070e+005	0.2900000	0.0	0	0.0	

2	CMO	CON1	CON2
	1.0	7	7

3	LCO OR A1	A2	A3	V1	V2	V3
	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

COMMENT:

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

Τοποθετούμε RO(πυκνότητα) E(μέτρο ελαστικότητας και PR(αριθμός poisson)

Επίσης επιλέγουμε CON1 και CON2 (Αφορούνε τους δεσμευμένους βαθμούς ελευθερίας

Για την κάτω πλάκα παίρνω CON1=CON2=7 (δεσμευμένοι όλοι η βαθμοί ελευθερίας) ενώ η μόνη διαφοροποίηση με την άνω πλάκα είναι ότι εκεί επιλέγω CON1=4 , κατι που σημαίνει ότι επιτρέπεται η κίνηση κατά τον z άξονα.

3. Επιλογή υλικού δοκιμίου.(KM>MAT>24_PICEWISE_LINEAR_PLASTICITY)

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done 3 dokimio

Use *Parameter (Subsys: 1) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (1)

TITLE
dokimio

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
	3	0.0078500	2.070e+005	0.2900000	330.00000	0.0	1.000e+021	0.0
2	C	P	LCSS	LCSR	VP			
	0.0	0.0	0	0	0.0			
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	0.0113930	0.0228930	0.0383930	0.0809300	0.1308930	0.1925650	1.0000000
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	330.00000	340.00000	352.50000	365.00000	417.70001	450.00000	479.79990	479.79990

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

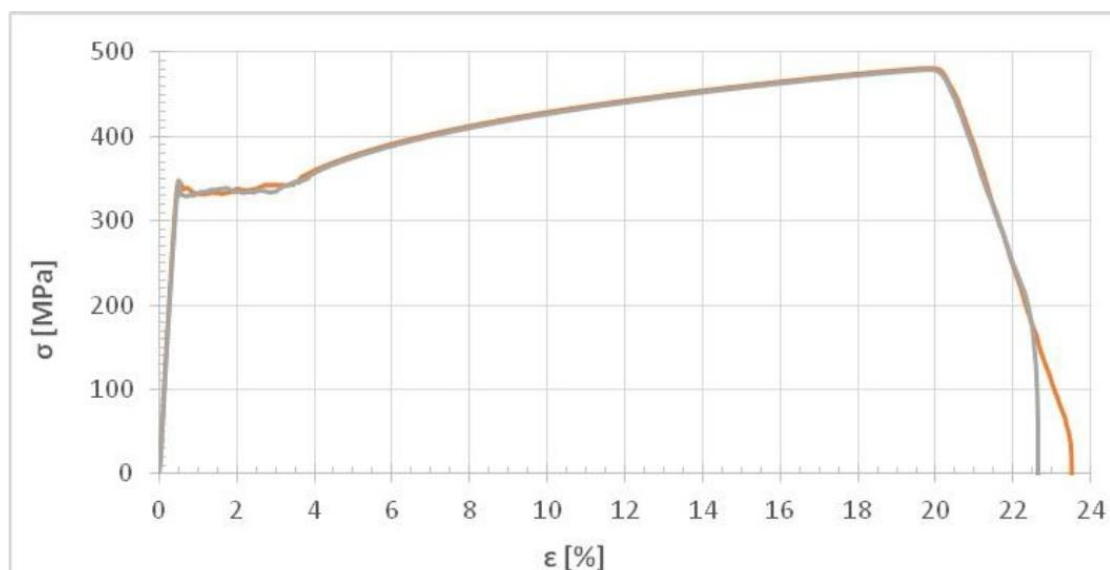
Επιλέγω RO,E και PR όπως και πριν

Τοποθετώ SIGY : όριο διαρροής του υλικού (στην περίπτωση μας τοποθετήσαμε το κάτω όριο διαρροής)

EPS1..EPS8: Παραμόρφωση στην πλαστική περιοχή

ES1..ES8: Τάση στην πλαστική περιοχή

Τις τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων τις πήραμε από το διάγραμμα της εικόνας 13. Το διάγραμμα κατασκευάστηκε μετά από δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού και περιλαμβάνει 2 καμπύλες καθώς έγιναν δυο δοκιμές για επαλήθευση.



Εικόνα 15: Καμπύλη τάσης παραμόρφωσης 2 ελασμάτων από μαλακό χάλυβα [16]

4. Επιλογή 3D πεπερασμένων στοιχείων για τις πλάκες θλίψης
(KM>SECTION>SOLID) Απλώς το ορίζω

Keyword Input Form

Use *Parameter

*SECTION_SOLID_(TITLE) (1)

TITLE
plakes

1 SECID ELFORM AET
1 1 0

Repeated Data by Button and List

Data Pt.
Replace Insert
Delete Help

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

5. Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων για το δοκίμιο μου.
(KM>SECTION>SHELL)

Keyword Input Form

Use *Parameter

*SECTION_SHELL_(TITLE) (1)

TITLE
shell

1	SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	OR/IRID	ICOMP	SETYP
1	2	2	1.0000000	3	1	0	0	1
2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
2	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	0.0	0

Repeated Data by Button and List

Data Pt.
Replace Insert
Delete Help

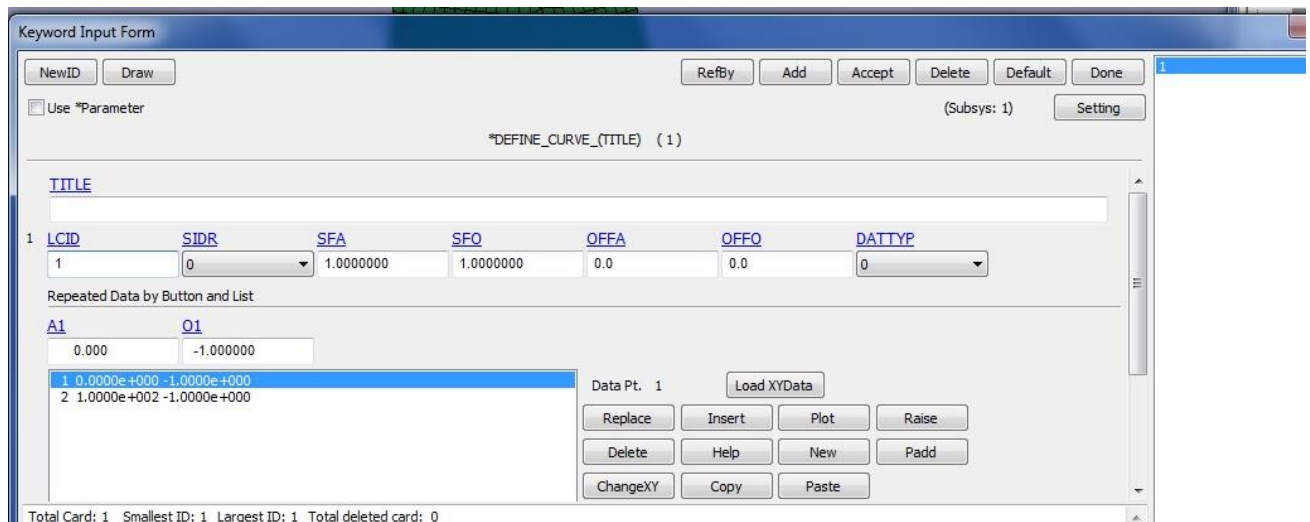
Total Card: 1 Smallest ID: 2 Largest ID: 2 Total deleted card: 0

ELFORM:2 (είδος επιφανειακού μοντέλου Belytsko-Tsay)

NIP:3 (αριθμός σημείων ολοκλήρωσης κατά το πάχος του δοκιμίου)

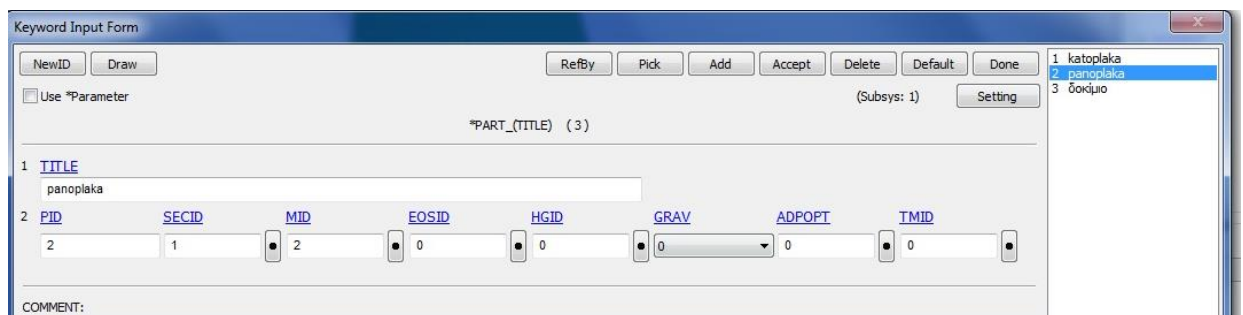
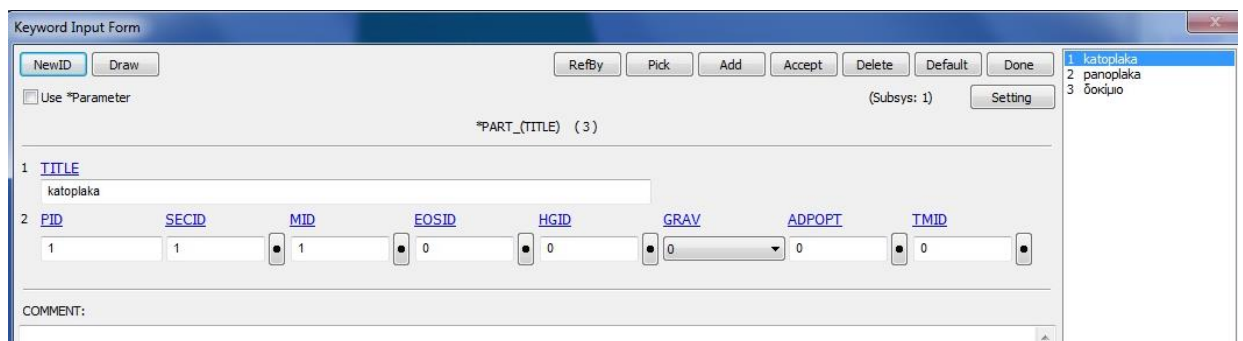
T1=1 (Το πάχος του δοκιμίου μου)

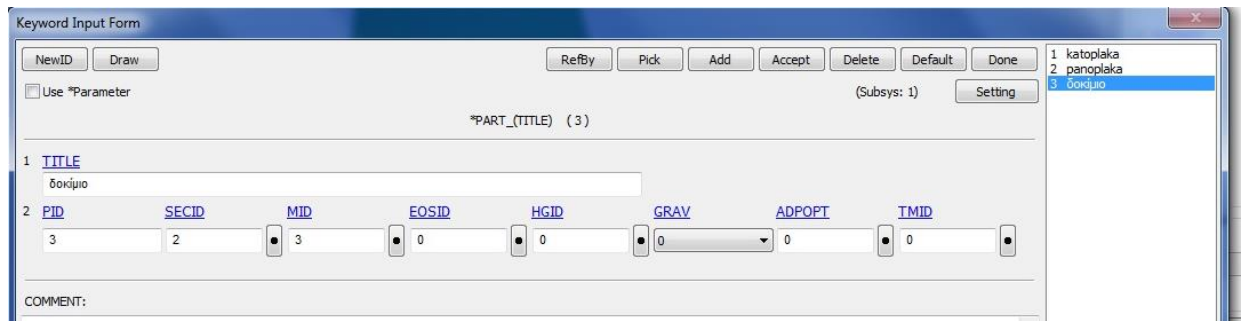
6. Ορισμός της ταχύτητας με την οποία θα κινηθεί η άνω πλάκα.



Εισάγουμε 2 ζεύγη τιμών A1 Και O1.Οι τιμές αυτές είναι αντίστοιχα ο χρόνος σε ms και η ταχύτητα σε mm/ms.Εδώ επειδή αναλύουμε το στατικό μας μοντέλο θέλουμε να σταματήσει σε 100ms και να κινείται σταθερά προς τα κάτω. Οπότε τοποθετούμε αρχικό και τελικό χρόνο στο A1και το βήμα κίνησης (ταχύτητα) στο O1.

7. Έπειτα θα συνδυάσουμε κάθε PART του μοντέλου μας με το αντίστοιχο SECTION και το αντίστοιχο υλικό (MAT) .
Σχεδιάζοντας το μοντέλο είχαμε 3 PART (δοκίμιο,άνω πλάκα και κάτω πλάκα).



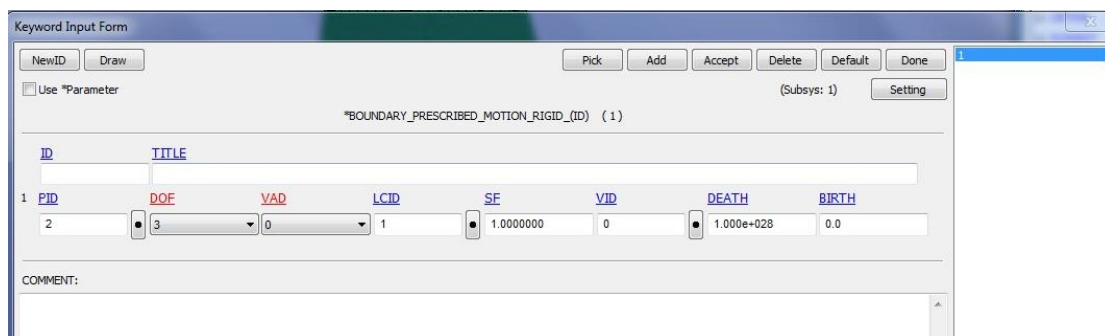


SECID: Το αντίστοιχο SECTION όπως το ορίσαμε πριν. Για τις 2 πλάκες δηλαδή βάζουμε το SOLID και για το δοκίμιο βάζουμε το SHELL.

MID: Το αντίστοιχο υλικό σε κάθε περίπτωση όπως το ορίσαμε πριν. Για τις 2 πλάκες βάζουμε το RIGID(20) και για το δοκίμιο το PICEWISE_LINEAR_PLASTICITY(24).

PID: Είναι ο αριθμός που αντιστοιχεί σε κάθε κομμάτι του μοντέλου μας

8. Ορισμός κίνησης της άνω πλάκας (KM>BOUNDARY>PRESCRIBED MOTION RIGID)



PID: Επιλέγουμε ποιο PART θέλουμε να κινηθεί. Στη δικιά μας περίπτωση επιλέγουμε το 2 που αντιστοιχεί στην πάνω πλάκα.

DOF: Επιλέγουμε το βαθμό ελευθερίας στον οποίο θα κινηθεί η πλάκα. Εδώ επιλέγω 3 που αντιστοιχεί σε κίνηση κατά το z άξονα.

LCID: Επιλέγουμε την καμπύλη που ορίσαμε στο βήμα 6.

9. Ορισμός επαφών μεταξύ δοκιμίου και πλακών (KM>CONTACT>NODES_TO_SURFACE)

Keyword Input Form

Use *Parameter (Subsys: 1) Setting

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

1	CID	TITLE
2	kato_shell	

2	IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPARMB
0	200			3	2	1.0005		0

3	UNUSED	CHKSEGS	PENSEF	GRPABLE
	0		1.0	0

4	SSSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
3	1	3	3	0	0	0	0	0

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
0.3000000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+020	

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

Θα βάλω σαν MASTER τις πλάκες και σαν SLAVE το δοκίμιο.

SSTYP:3 Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα η επιλογή του SSSID δηλαδή του slave να γίνει by PART

MSTYP:3 Ομοίως με πάνω αυτή τη φορά για το MASTER

SSID:3 Το PID της κάτω πλάκας

MSID:1 Το PID του δοκιμίου

FS:0.3 *συντελεστής στατικής τριβής μεταξύ πλάκας και δοκιμίου

FD:0.2 *συντελεστής δυναμικής τριβής

Σε ότι αναφορά την πάνω πλάκα και το δοκίμιο παίρνω αντίστοιχα

Keyword Input Form

Use *Parameter (Subsys: 1) Setting

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

1	CID	TITLE
0	pano_shell	

2	IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPARMB
0	200			3	2	1.0005		0

3	UNUSED	CHKSEGS	PENSEF	GRPABLE
	0		1.0	0

4	SSSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
3	2	3	3	0	0	0	0	0

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
0.3000000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+020	

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

Με μόνη διαφορά δηλαδή το MSID αφού αυτή τη φορά θέλω να έχω MASTER την άνω πλάκα.

*Οι τιμές των συντελεστών τριβής είναι προσεγγιστικές

10.Ορισμός επαφής μεταξύ των στοιχείων του δοκιμίου(KM>CONTACT>AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE)

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' window for defining contact parameters. The title bar reads 'Keyword Input Form'. The window contains several buttons: 'NewID', 'Draw', 'Pick', 'Add', 'Accept', 'Delete', 'Default', 'Done', and 'Setting'. A checkbox labeled 'Use *Parameter' is checked. The main area displays the keyword '*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_ID/TITLE/MPP (1)'. Below this, there are several rows of input fields and dropdown menus for various parameters. The parameters are organized into rows, with some having sub-parameters. The values entered are as follows:

Row	Parameter	Value
2	IGNORE	0
	BUCKET	200
	LCBUCKET	
	NS2TRACK	3
	INITITER	2
	PARMAX	1.0005
	UNUSED	
	CPARM8	0
3	UNUSED	
	CHKSEGS	0
	PENSP	1.0
	GRPABLE	0
4	SSID	3
	MSID	0
	SSTYP	3
	MSTYP	0
	SBOXID	0
	MBOXID	0
	SFR	0
	MPR	0
5	ES	0.2000000
	FD	0.1500000
	DC	0.0
	VC	0.0
	VDC	0.0
	PENCHK	0
	BT	0.0
	DT	1.000e+020
6	SFS	
	SFM	
	SST	
	MST	
	SFST	
	SFMT	
	FSF	
	VSF	

At the bottom of the window, it says 'Total Card: 1 Smallest ID: 3 Largest ID: 3 Total deleted card: 0'.

Η διαφορά με πριν έγκειται στους συντελεστές δυναμικής και στατικής τριβής όπου αυτή τη φορά επιλέγω 0.15 και 0.2 αντίστοιχα και στο ότι επειδή η επαφή αφορά μόνο κομμάτια του δοκιμίου δεν θα επιλέξω καν MASTER αλλά μόνο SLAVE.

11.Ορισμός χρόνου περάτωσης. (KM>CONTROL>TERMINATION)

Επιλέγω το χρόνο τερματισμού ENDTIM στα 100 ms

Keyword Input Form

Use *Parameter

*CONTROL_TERMINATION (1)

1	ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS
	100.000000	0	0.0	0.0	0.0

COMMENT:

12. Τέλος θα πρέπει να επιλέξω μέσω του προγράμματος τι θέλω αυτό να μου δώσει σαν αποτελέσματα. Οπότε πηγαίνω στο
 KM>DATABASE>ASCII_option και στο
 KM>CONTROL>BINARY_D3PLOT

Στο d3plot βάζω το dt :1 κάτι που σημαίνει ότι θα παίρνουμε αποτελέσματα κατάρευσης κάθε 1 ms ενώ ανάλογα τι θέλω κάνω τις επιλογές μου και στο ASCII.

Στη συγκεκριμένη έχω επιλέξει GLSTAT, MATSUM και RCFORCE όλα με χρονικό βήμα dt=0.1ms

ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΤΑΤΙΚΟΥ-ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε στα 2 μοντέλα που μελετήθηκαν σε στατική καταπόνηση. Για τα υπόλοιπα 7 που μελετήθηκαν δυναμικά είχαμε κάποιες μικρές διαφοροποιήσεις.

Αντί για παράδειγμα να έχω KM>DEFINE>CURVE την κίνηση της άνω πλάκας την όρισα μέσω του KM>INITIAL>VELOCITY_RIGID_BODY

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter (Subsys: 1) Setting

*INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY (1)

PID	VX	VY	VZ	VXR	VYR	VZR	ICID
2	0.0	0.0	-7.5000000	0.0	0.0	0.0	0

COMMENT:

PID:2 Το PART το οποίο θέλουμε να κινηθεί

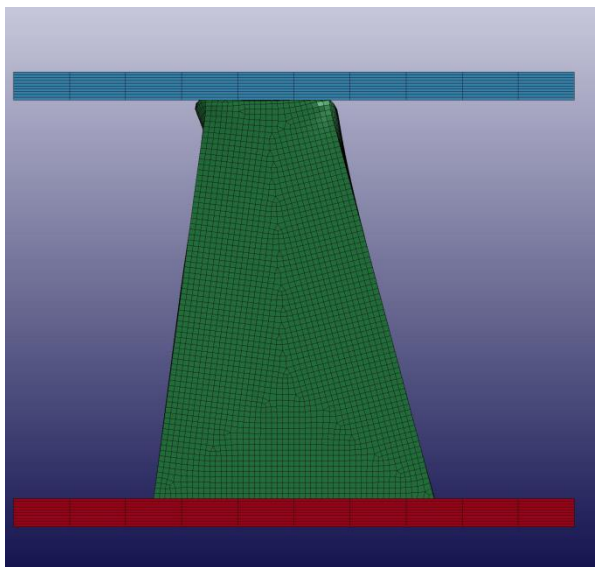
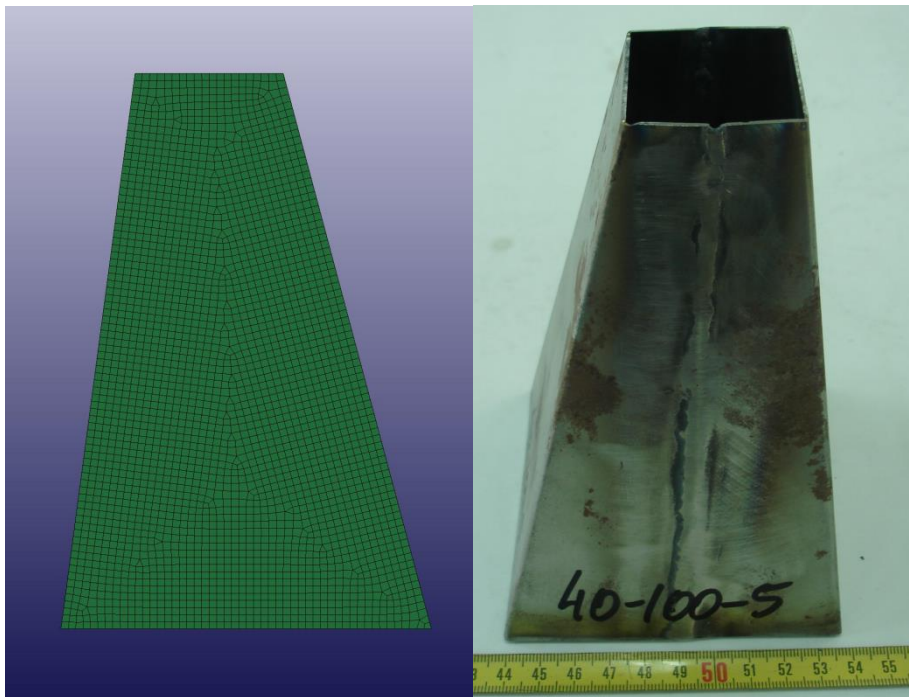
Μετά επιλέγουμε τον άξονα στον οποίο θέλουμε να κινηθεί ορίζοντας την ταχύτητα του και στην προκειμένη βάζω $V_z = -7.5 \text{ mm/ms}$. Η τιμή αυτή βγήκε μέσω Αρχής Διατήρησης της Ενέργειας με βάση τις τιμές του πειράματος της σφύρας. Είχαμε το ύψος στο οποίο την τοποθετήσαμε οπότε εύκολα μπορούσαμε να βρούμε την κινητική της ενέργεια και άρα την ταχύτητά της την ώρα που συγκρούονταν με το δοκίμιο μας.

Μια ακόμα μικρή αλλαγή είναι στο DATABASE των αποτελεσμάτων όπου εδώ επέλεξα και το RDBOUT έτσι ώστε να πάρω σαν αποτελέσματα τις μετατοπίσεις καθώς και τις ταχύτητες της σφύρας καθ όλη τη διάρκεια της διαδικασίας.

Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί και η διαφορά στο σχεδιαστικό κομμάτι αφού πλέον η άνω πλάκα θα πρέπει να έχει τις απαιτούμενες διαστάσεις, δηλ. τον κατάλληλο όγκο που -μέσω της πυκνότητας του υλικού της (χάλυβας)- θα προσδίδει σε αυτή την απαιτούμενη μάζα της πειραματικής διαδικασίας.

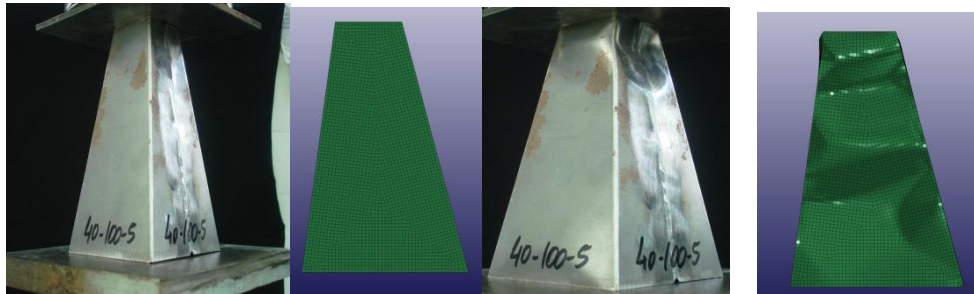
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ

3.1 Το δοκίμιο 40-100-5



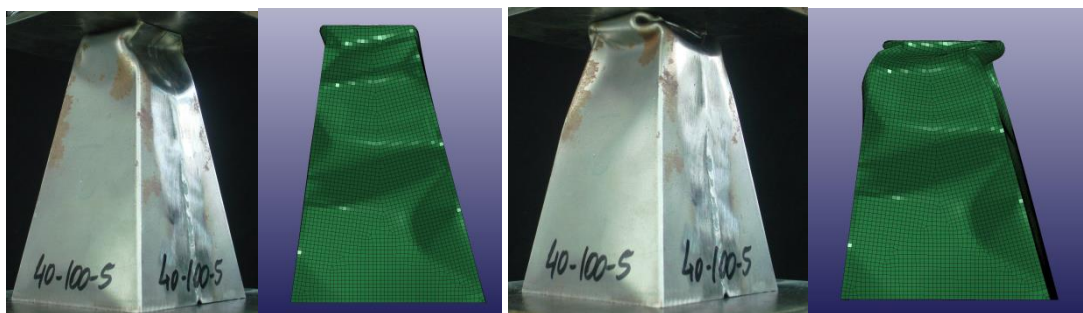
Εικόνα 16: Στιγμιότυπο κατάρρευσης του δοκίμιου 40-100-5 μέσω Ls-Dyna.

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



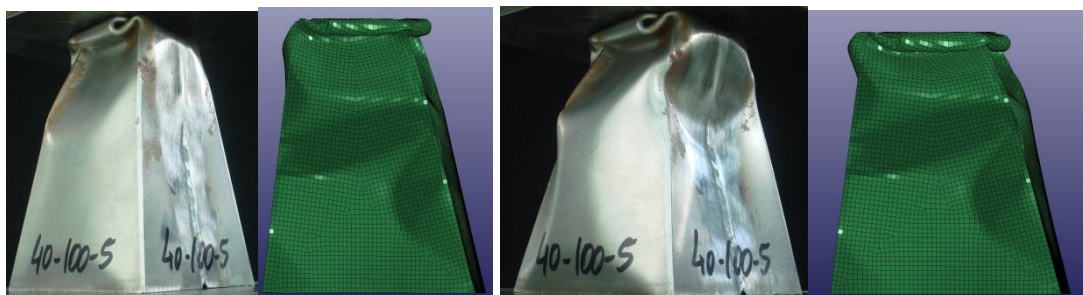
(1) D=0mm

(2) D=2.8 mm



(3) D=8.1 mm

(4) D=25.7 mm



(5) D=33.5 mm

(6) D=40.8 mm



(7) D=50.8 mm

(8) D=60.5 mm



(9) D=71.7 mm



(10) D=81.2 mm



(11) D=90.5 mm

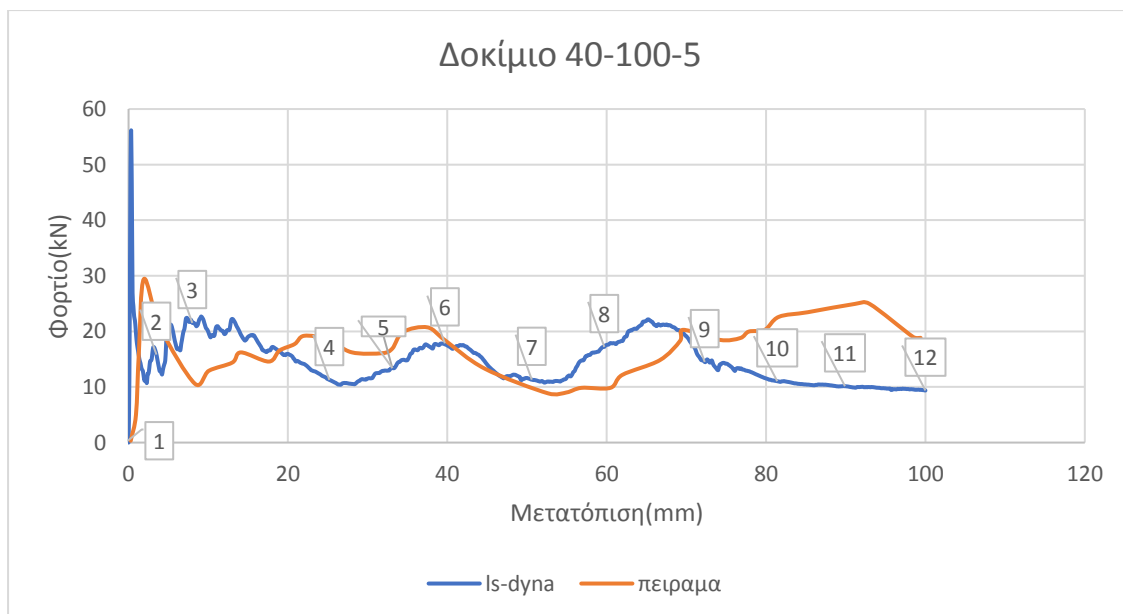


(12) D=100 mm

Εικόνα 17: Οι προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης του δοκίμιου 40-100-5 μέσα από 12 διαφορετικά σημεία μετατόπισης.

Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου μετατόπισης μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης

Διάγραμμα 1

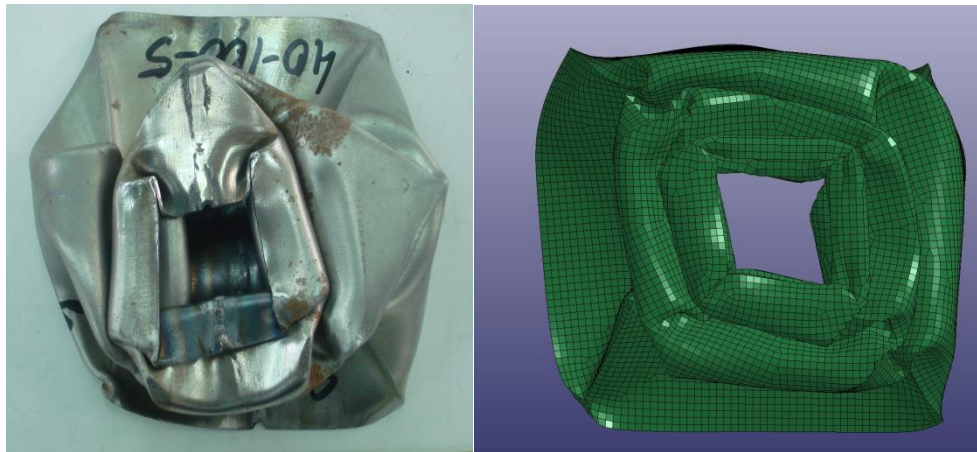


Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Πίνακας 2

	ΠΕΙΡΑΜΑ	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
Μέσο Φορτίο	16.6 kN	14.7 kN
Μέγιστο Φορτίο	29.45KN	56 kN
Ενέργεια Απορρόφησης	1.66 KJ	1.47 KJ
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης	6.76 J/g	5.99 J/g
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	56.36%	26.25 %

Τελικές όψεις





Εικόνα 18: Κατόψεις, ανόψεις και πλάγιες όψεις του δοκιμίου 40-100-5 με το πέρας του πειράματος και της προσομοίωσης αντίστοιχα.

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Το 1^ο πείραμα που αφορά τη στατική καταπόνηση έγινε στο δοκίμιο 40-100-5, το οποίο έχει μετατοπισμένο το κέντρο της άνω βάσης του προς τη διαγώνιο. Το δοκίμιο εμφάνισε προοδευτική κατάρρευση κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης και τελικά παρατηρούμε την εμφάνιση 3 πλαστικών αναδιπλώσεων κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων φορτίου-μετατόπισης τόσο του πειράματος όσο και της προσομοίωσης. Βλέπουμε την εμφάνιση 2 μη συμμετρικών πλαστικών λοβών και στη συνέχεια τη δημιουργία πλαστικού αρμού.

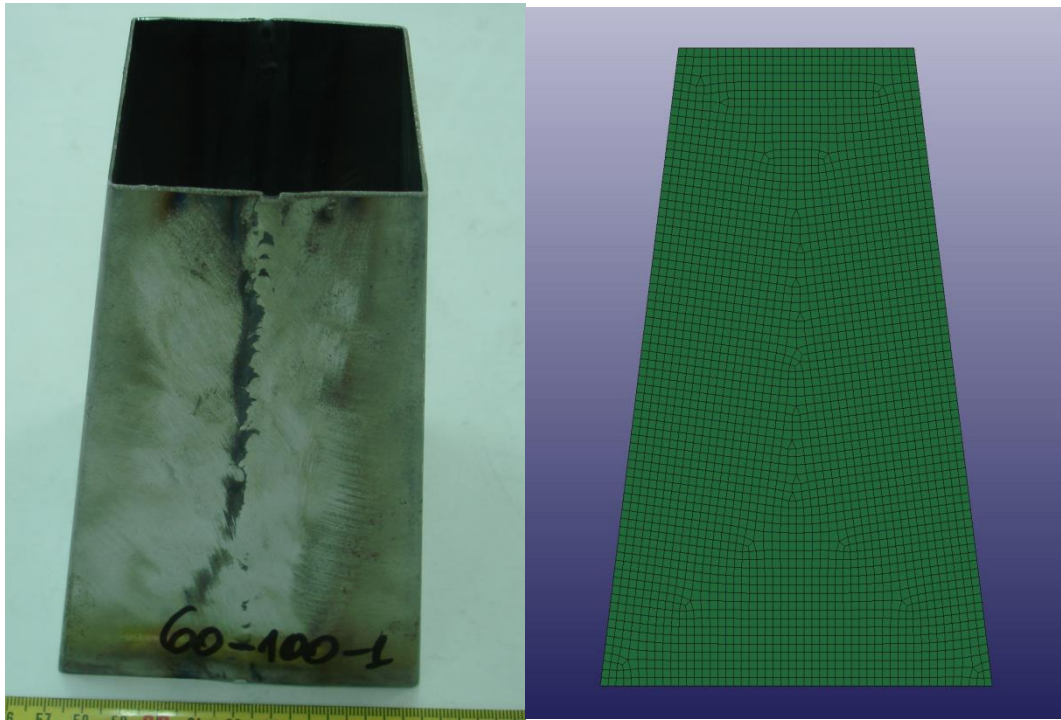
Παρατηρούμε ότι το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει από τη μικρότερη διατομή κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και σ αυτή υπάρχει λιγότερο υλικό οπότε απαιτείται λιγότερη ενέργεια παραμόρφωσης.

Το μέσο φορτίο καθώς και η συνολική ενέργεια απορρόφησης έχουνε αρκετά καλό βαθμό ταύτισης μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης. Στο μεν πείραμα είναι 16.6kN και 1.66 KJ αντίστοιχα ενώ στο Ls-Dyna βρήκαμε 14.7 kN και 1.47 KJ αντίστοιχα. Παρατηρούμε μια μεγάλη διαφορά στο συντελεστή ομοιομορφίας φορτίου αλλά αυτή είναι αναμενόμενη αφού όπως περιμέναμε το μέγιστο φορτίο στο μοντέλο μας ήτανε αρκετά μεγαλύτερο από αυτό του πειράματος. Επίσης στο τελευταίο στάδιο του πλαστικού λυγισμού, στο σχηματισμό του τελευταίου λοβού, η κάτω βάση του δοκιμίου κινείται προς τα έξω και πιο ειδικά προς τις πλευρές που έχουν μεγαλύτερη κωνικότητα (κλίση).

Μπορούμε από το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης να διακρίνουμε τις φάσεις στις οποίες αρχίζει ο σχηματισμός των νέων λοβών κάθε φορά.

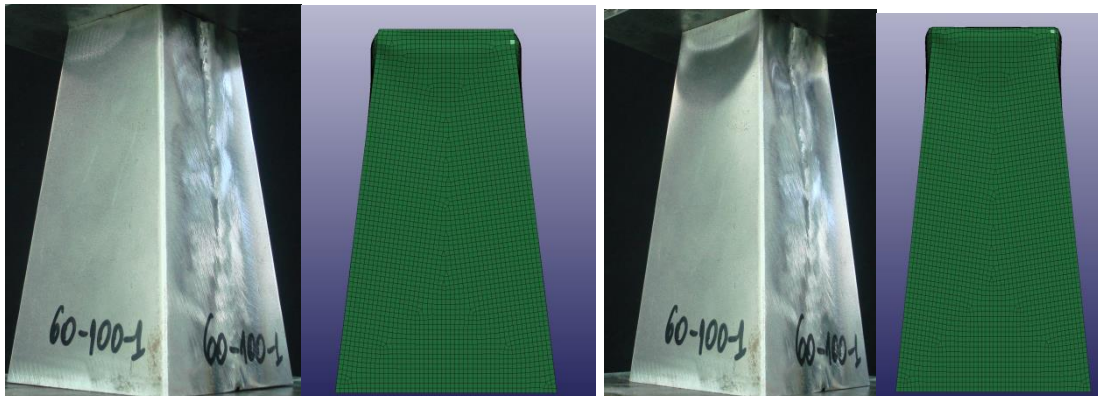
Τέλος η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη από αυτή του πειράματος όπως αναμενόταν επίσης αφού λόγω εξιδανικευμένου σχεδιασμού (γεωμετρία, συνοριακές συνθήκες), παρουσιάζει υψηλότερη στιβαρότητα.

3.2 Το δοκίμιο 60-100-1



Εικόνα 19: Το απαραμόρφωτο δοκίμιο 60-100-1 στο εργαστήριο και στο Dyna

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



(2) $D=2.3$ mm

(3) $D=6.3$ mm



(4) $D=11.7$ mm

(5) $D=20.8$ mm



(6) $D=30.3$ mm

(7) $D=40.8$ mm



(8) $D=50.8$ mm

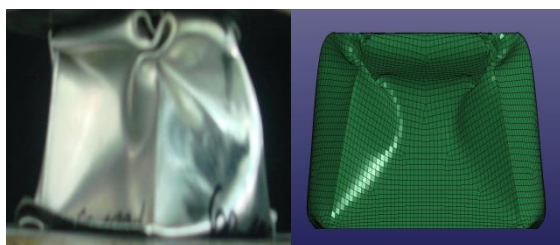
(9) $D=60.3$ mm



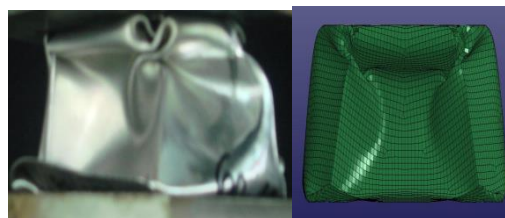
(10) $D=70.7$ mm



(11) $D=81.8$ mm



(12) $D=90.3$ mm



(13) $D=100$ mm

Εικόνα 20: Οι προδευτικές φάσεις κατάρρευσης του δοκιμίου 60-100-1 μέσα από 13 διαφορετικά σημεία μετατόπισης

Στο παρακάτω διάγραμμα η αρίθμηση μας πληροφορεί για τις θέσεις των στιγμιότυπων της εικόνας 9

Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου μετατόπισης μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης

Διάγραμμα 2

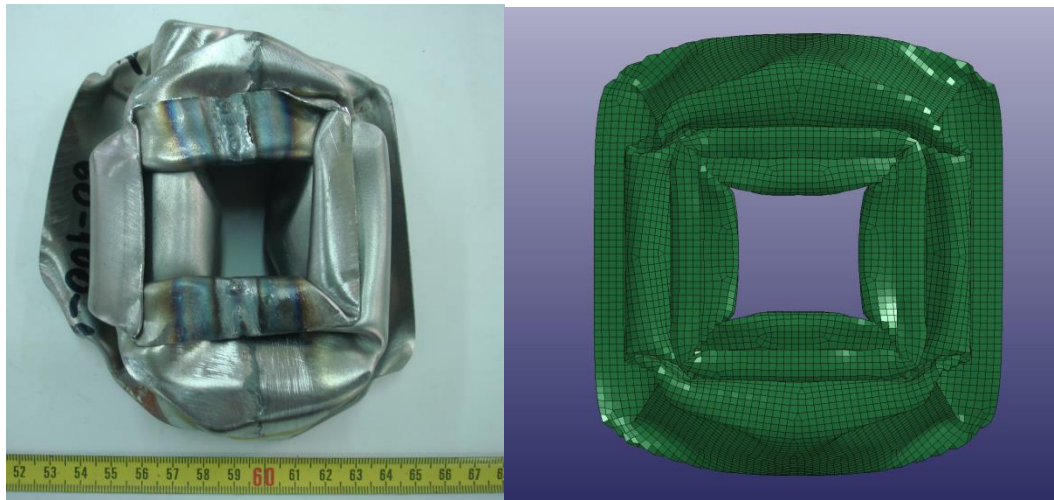


Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Πίνακας 3

	ΠΕΙΡΑΜΑ	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
Μέσο Φορτίο	22.2 kN	17.5 kN
Μέγιστο Φορτίο	50.8KN	85.8 kN
Ενέργεια Απορρόφησης	2.22 KJ	1.75 KJ
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης	7.9 J/g	6.23 J/g
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	43.7%	20.4 %

Τελικές όψεις



Εικόνα 21 : Κατόψεις, ανόψεις και πλάγιες όψεις του δοκιμίου 60-100-1 του πειράματος και της προσομοίωσης μετά το πέρας της δοκιμής θλίψης.

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η συμπίεση του δοκιμίου ολοκληρώνεται όταν η πλάκα θλίψης κατέλθει κατά 100 mm. Κατά τη συμπίεση παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση του δοκιμίου. Η λεπτότοιχη πυραμίδα εμφάνισε διαφορετική πλαστική συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης της. Το δοκίμιο κατέρρευσε προοδευτικά και ελεγχόμενα. Παρατηρούμε μια σειρά από πλαστικές παραμορφώσεις οι οποίες χωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα. Η ενέργεια που απορροφήθηκε είναι ίση με 2.22 KJ στο πείραμα και 1.75 KJ στην προσομοίωση. Κοιτάζοντας το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης παρατηρούμε μεγάλες αυξομειώσεις στο φορτίο. Δρώντας σαν απορροφητής ενέργειας το δοκίμιο δεν υπέστη ολική κατάρρευση (global buckling), ο οποίος είναι ένας μη επιθυμητός τρόπος κατάρρευσης αφού μας μειώνει την δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Συγκρίνοντας τον δείκτη ομοιομορφίας με το προηγούμενο δοκίμιο που μελετήσαμε παρατηρούμε μια διαφορά (56.36% το 40-100-5, 43.7% το 60-100-1).

Η δημιουργία των ατελών μη εκτατών λοβών όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα κατάρρευσης και τις τελικές όψεις αποτυπώνεται ανάγλυφα και στην καμπύλη φορτίου μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές αυξομειώσεις του φορτίου. Το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο ήταν 22.2 kN.

Η κατάρρευση τόσο στο πείραμα όσο και στην προσομοίωση ξεκινά από την μικρότερη διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο αφού εκεί υπάρχει λιγότερο υλικό με συνέπεια την απαίτηση λιγότερου ποσού ενέργειας για να καταρρεύσει. Η προσομοίωση βάσει τιμών και αποτελεσμάτων κρίνεται ικανοποιητική.

Στα στατικά μοντέλα-δοκίμια η σύγκριση μεταξύ μοντέλου και πειράματος είναι γενικά πιο 'ασφαλής', καθώς, πέρα των παραγόντων απόκλισης που έχουν αναφερθεί ή αναφέρονται στη συνέχεια, δεν τίθεται ο παράγοντας του υψηλού ρυθμού παραμόρφωσης που ενυπάρχει στην πειραματική διαδικασία, ενώ δεν έχει ληφθεί υπόψη (λόγω μη διαθέσιμων πειραματικών αποτελεσμάτων σε εφελκυσμό υψηλών ρυθμών παραμόρφωσης για την καμπύλη σ-ε του υλικού). Μια ενδιαφέρουσα παράμετρος, που ενυπάρχει στα πειραματικά δοκίμια, ενώ δεν έχει ληφθεί υπόψη στα μοντέλα (και στα στατικά και στα δυναμικά), είναι η κράτυνση που έχει υποστεί το υλικό των κελυφών στις ζώνες κάμψης (στραντζάρισμα) προκειμένου να τους δωθεί το τελικό τρισδιάστατο σχήμα (από αρχικά επίπεδα ελάσματα). Από την πειραματική καμπύλη

εφελκυσμού φαίνεται ότι το υλικό παρουσιάζει αρκετά υψηλή κράτυνση, καθώς στην περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης η απαιτούμενη τάση αυξάνεται σε υψηλό βαθμό σε σχέση με την πλαστική παραμόρφωση. Αυτό σημαίνει ότι το υλικό στις ζώνες στραντζαρίσματος (ακμές πυραμίδας) προβάλλει μεγαλύτερη αντίσταση κατά την κατάρρευσή του από ότι το υλικό στις επίπεδες έδρες, παράμετρος που δεν έχει εισαχθεί στα μοντέλα. Αυτός μπορεί να είναι και ένας βασικός λόγος (και στη στατική καταπόνηση) που το μέσο φορτίο και η ενέργεια απορρόφησης κατ'επέκταση των πειραμάτων, προκύπτουν μεγαλύτερα από εκείνα των προσομοιώσεων.

Ως ένας επιπλέον λόγος που στη στατική καταπόνηση, που όπως αναφέρθηκε δεν τίθεται θέμα strain rate ούτε στο πείραμα ούτε και προφανώς στο μοντέλο, παρουσιάζεται υψηλότερο μέσο φορτίο στο πείραμα σε σχέση με την προσομοίωση, παρόλο που υπάρχουν οι γνωστές γεωμετρικές και κατασκευαστικές ατέλειες και αποκλίσεις από τις ονομαστικές διαστάσεις και διάταξη, μπορεί να αναφερθεί και ο εξής: Ακριβώς αυτές οι "ατέλειες" που μπορεί από τη μία πλευρά να είναι "υπεύθυνες" για το μικρότερο αρχικό φορτίο του πειράματος σε σχέση με την προσομοίωση, είναι και εκείνες που οδηγούνε το κέλυφος -σε κάποιο βαθμό- σε διαφορετικό τρόπο κατάρρευσης σε σχέση με την προσομοίωση. Οπότε, προκύπτουν περισσότερες ζώνες (ή ζώνες εντονότερης) παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα να καταγράφεται μεγαλύτερο συνολικά μέσο φορτίο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ

Εισαγωγή

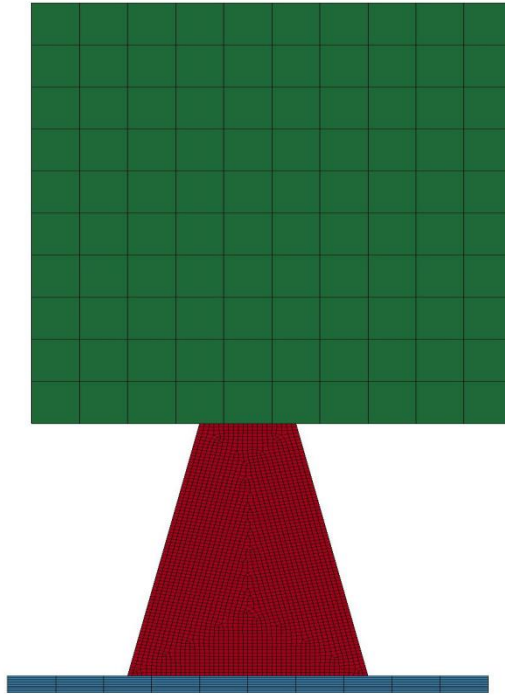
Αφού ολοκληρώσαμε με την ανάλυση των 2 δοκιμίων που τα μελετήσαμε σε συνθήκες στατικής καταπόνησης, θα συνεχίσουμε με την μελέτη των υπόλοιπων 7 όπου καταπονήθηκαν δυναμικά. Αυτό έγινε στη σφύρα του εργαστηρίου των Κατεργασιών των Υλικών της σχολής. Τοποθετήσαμε το δοκίμιο στη βάση της σφύρας και σε κάθε πείραμα φέραμε αυτή στο ύψος των 4 μέτρων από τη βάση. Έπειτα την αφήναμε να πέσει και στο τέλος της πτώσης παίρναμε αποτελέσματα στην οθόνη του παλμογράφου με τον οποίο την είχαμε συνδέσει. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν ένα διάγραμμα φορτίου-χρόνου τα οποία και εκτυπώσαμε. Τέλος υπολογίσαμε την τελική παραμόρφωση που υπέστη το δοκίμιο.

Στο κεφάλαιο αυτό λοιπόν θα δούμε τα αποτελέσματα που μας έδωσε η σφύρα του εργαστηρίου μέσω του διαγράμματος φορτίου-χρόνου, θα συγκρίνουμε το διάγραμμα αυτό με το αντίστοιχο διάγραμμα που μας έδωσε η προσομοίωση του Ls-Dyna για τις αντίστοιχες συνθήκες και στη συνέχεια αφού διαπιστώσουμε ότι αυτά έχουν μια παρόμοια συμπεριφορά θα φτιάξουμε το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για κάθε δοκίμιο για να μπορέσουμε να φτάσουμε σε αποτελέσματα ενέργειας.

Ο μέσος όρος της διάρκειας του φαινομένου τόσο στη σφύρα όσο και στο πρόγραμμα παρατηρήθηκε στα 30ms.

4.1 Το δοκίμιο 40-100-2

Το δοκίμιο 40-100-2 έχει ύψος 150 χιλιοστά. Η κάτω βάση του είναι 100 επί 100 και η πάνω βάση του είναι 40 επί 40, ενώ το κέντρο αυτής είναι μετατοπισμένο 10 χιλιοστά οριζόντια (κατά τον άξονα των x δηλαδή) σε σχέση με το κέντρο της κάτω βάσης.

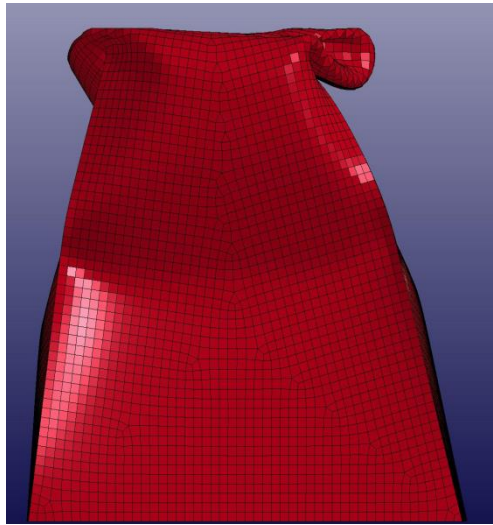


Εικόνα 22: Το μοντέλο 40-100-2 όπως σχεδιάστηκε σε περιβάλλον Ls-Dyna

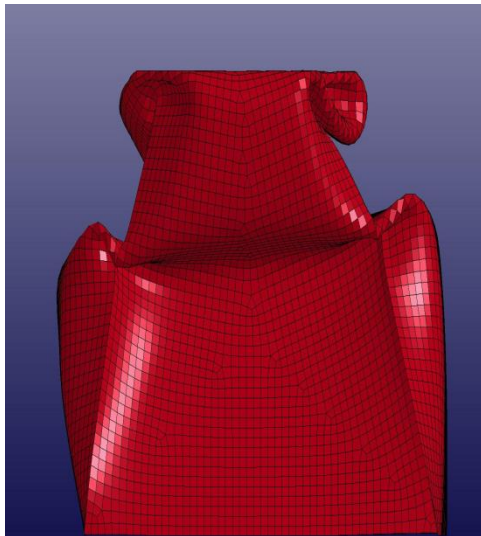
Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



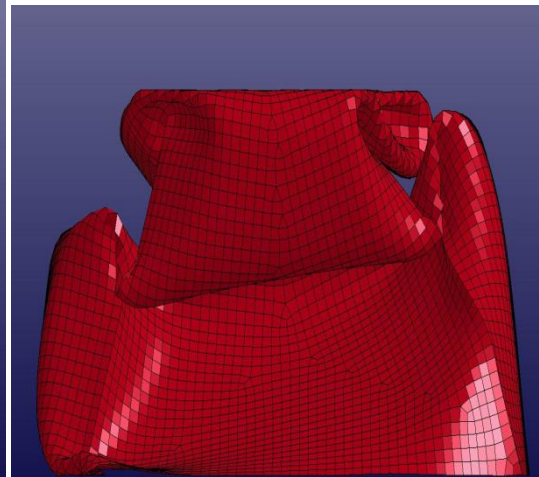
3 ms



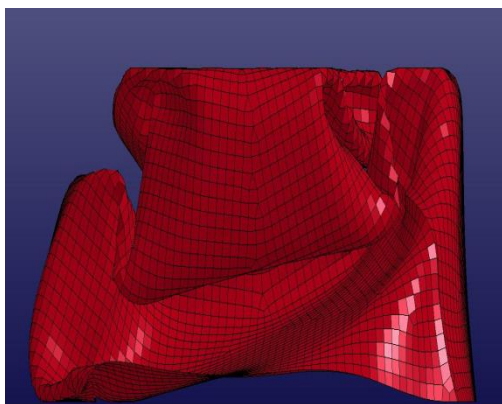
9 ms



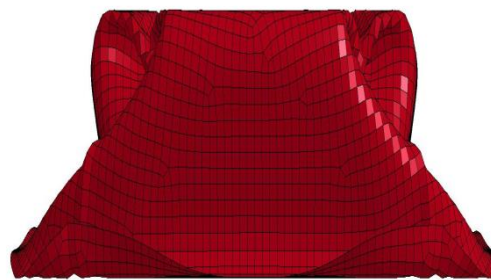
13 ms



19 ms



23 ms

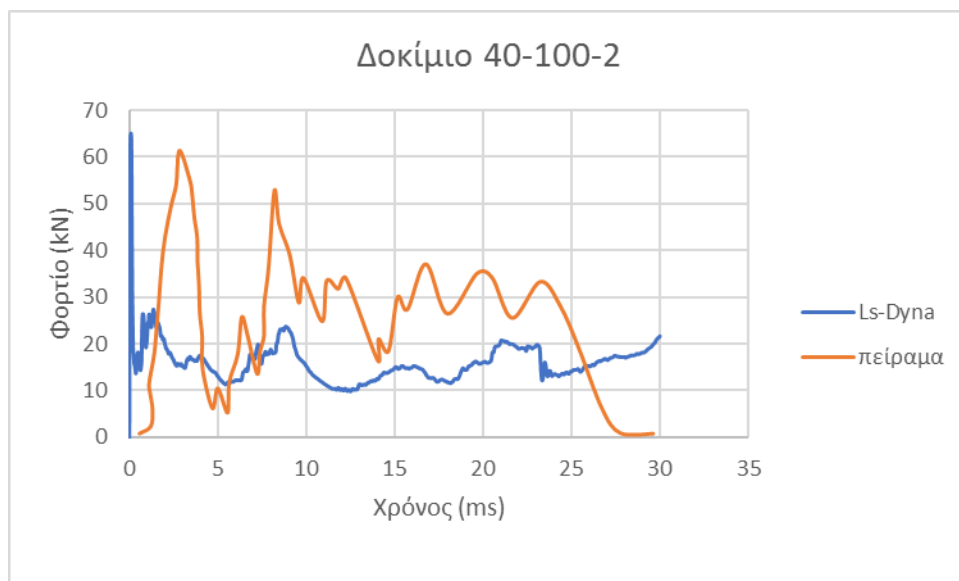


30 ms

Εικόνα 23: Το δοκίμιο 40-100-2 στα 3, 8, 13, 19, 23 ms και στην τελική του μορφή αντίστοιχα.

Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-χρόνου πειράματος και προσομοίωσης

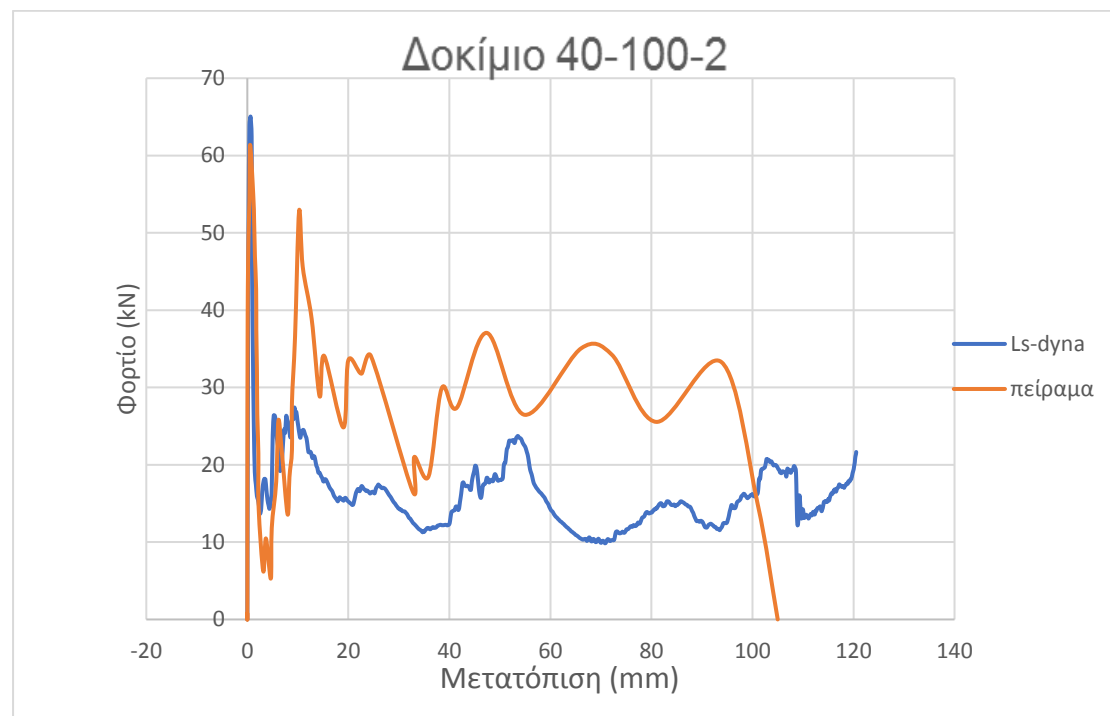
Διάγραμμα 3



Από αυτό το διάγραμμα μπορούμε να βρούμε εύκολα το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης στο Ls-Dyna απλά συνδυάζοντας τις τιμές απο το αντίστοιχο φορτίου χρόνου μέσω του rforce και του διαγράμματος μετατόπισης χρόνου απο το rdbout. Για να βρούμε το διάγραμμα φορτίου μετατόπισης του πειράματος αρχικά διαιρούμε όλες τις τιμές του φορτίου με τη μάζα της σφύρας. Αυτή η διαίρεση μας δίνει τιμές επιτάχυνσης σύμφωνα με το 2^ο νόμο του Νεύτωνα. Έχοντας τις τιμές τις επιτάχυνσης μέσω EXCEL και χρησιμοποιώντας τον κανόνα του τραπεζίου ολοκληρώνουμε 2 φορές τις τιμές αυτές τις επιτάχυνσης και καταλήγουμε σε τιμές μετατόπισης.

Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης

Διάγραμμα 4



Πίνακας αποτελεσμάτων

Πίνακας 4

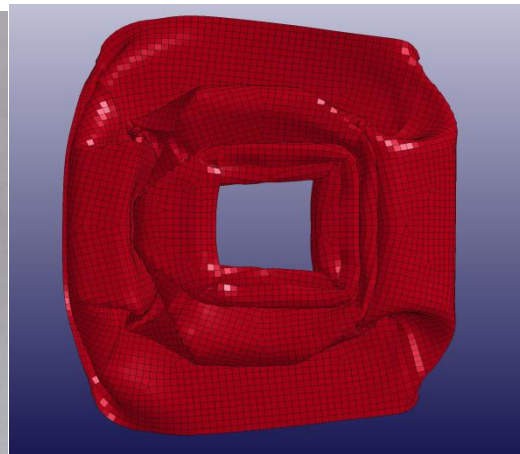
	Προσομοίωση	Πείραμα
Μέσο Φορτίο	16 kN	26.9
Μέγιστο Φορτίο	65.4 kN	61.4
Ενέργεια Απορρόφησης	1.93 KJ	2.66 KJ
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης	7.77 J/g	10.7 J/g
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	24.46%	43.8%

Το δοκίμιο στο πείραμα παραμορφώθηκε κατά 105 mm ενώ στο Ls-Dyna παραμορφώθηκε κατά 120 mm, ενώ η συμπίεση στο πείραμα διήρκεσε 28 ms ενώ στο Ls-Dyna 30 ms.

Τελικές όψεις



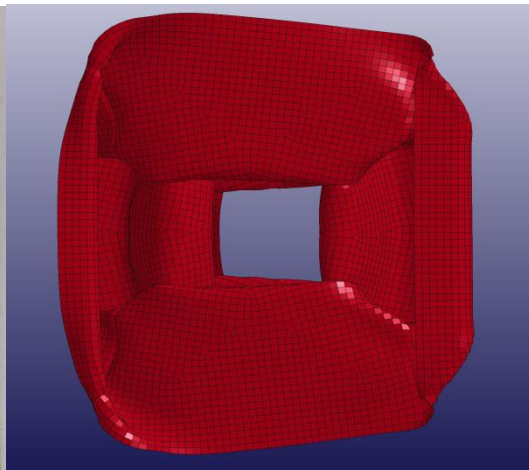
(1)



(2)



(3)



(4)



(5)



(6)

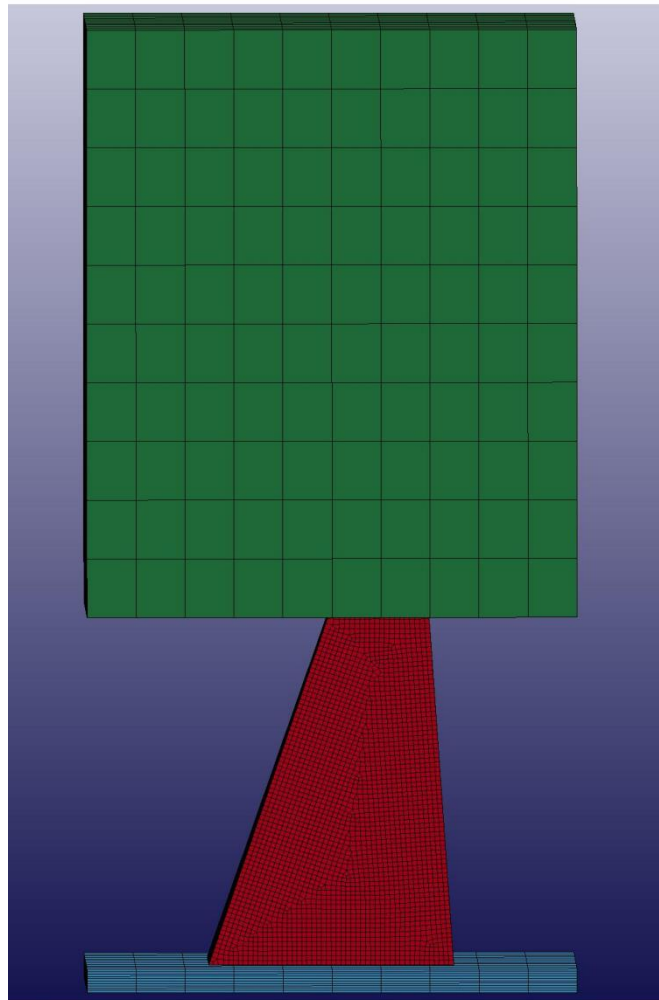
Εικόνα 24: Ανόψεις, κατόψεις και πλάγιες όψεις του δοκιμίου 40-100-2 μετά το τέλος του πειράματος και της προσομοίωσης αντίστοιχα.

Σχολιασμός

Στο μοντέλο δυναμικής καταπόνησης του δοκιμίου 40-100-2 καταγράφηκε μέγιστο φορτίο 65 KN σε βράχυνση 0.55 mm. Αντίστοιχα για το πείραμα είχαμε μέγιστο φορτίο στα 61.4 KN και για 0.4 mm βράχυνση. Η ενέργεια απορρόφησης για το πείραμα ήταν 2.66 KJ ενώ για την προσομοίωση 1.93 KJ. Όσον αφορά την κλίση των 2 καμπύλων αναμενόμενο είναι η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης να είναι μεγαλύτερη από αυτή του πειράματος, διότι το θεωρητικό δοκίμιο είναι πιο στιβαρό. Η κατάσταση αυτή επαληθεύεται από τα διαγράμματα. Μετά την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου, εισερχόμαστε στην πλαστική περιοχή όπου παρατηρούμε τις πλαστικές αναδιπλώσεις τόσο από τις εικόνες όσο και από τα διαγράμματα μέσω των αυξομειώσεων του φορτίου. Παρατηρούμε την εμφάνιση 2 μη εκτατών μη συμμετρικών λοβών και την εμφάνιση πλαστικών αρμών στη συνέχεια.

4.2 Το δοκίμιο 40-100-3

Το δοκίμιο 40-100-3 έχει ύψος 150 χιλιοστά. Η κάτω βάση του είναι 100 επί 100 και η πάνω βάση του είναι 40 επί 40, ενώ το κέντρο αυτής είναι μετατοπισμένο 20 χιλιοστά οριζόντια (κατά τον άξονα των x δηλαδή) σε σχέση με το κέντρο της κάτω βάσης.



Εικόνα 25: Το μοντέλο του 40-100-3 όπως σχεδιάστηκε στο περιβάλλον Ls-Dyna.

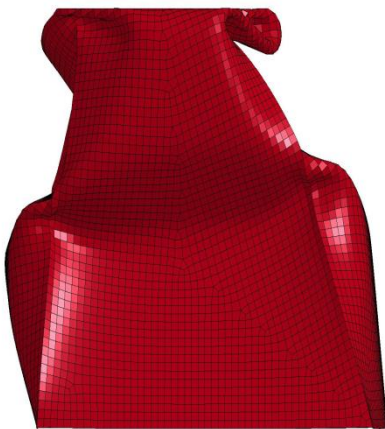
Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



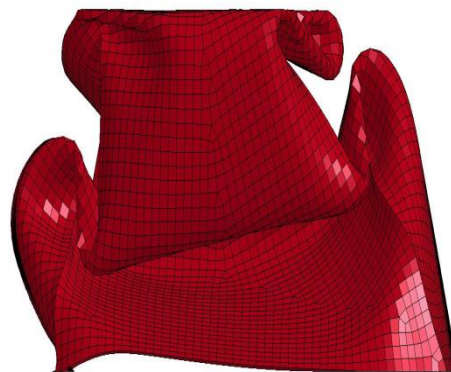
(1)



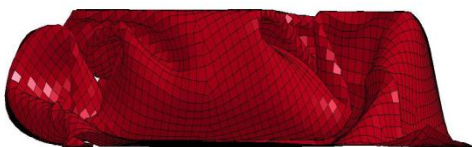
(2)



(3)



(4)

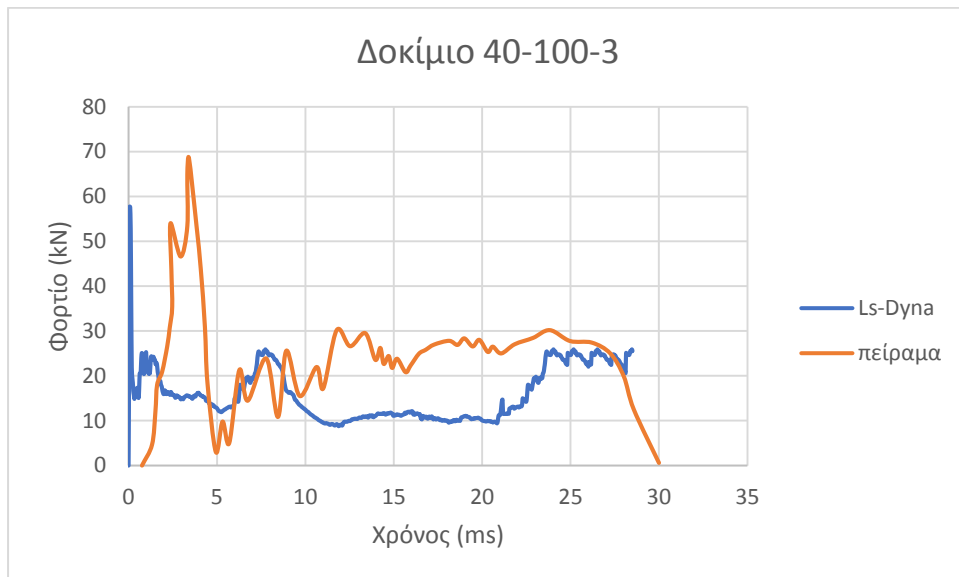


(5)

Εικόνα 26: Οι προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης του δοκιμίου 40-100-3 στα 0, 4, 10, 18 και 28.5 ms αντίστοιχα.

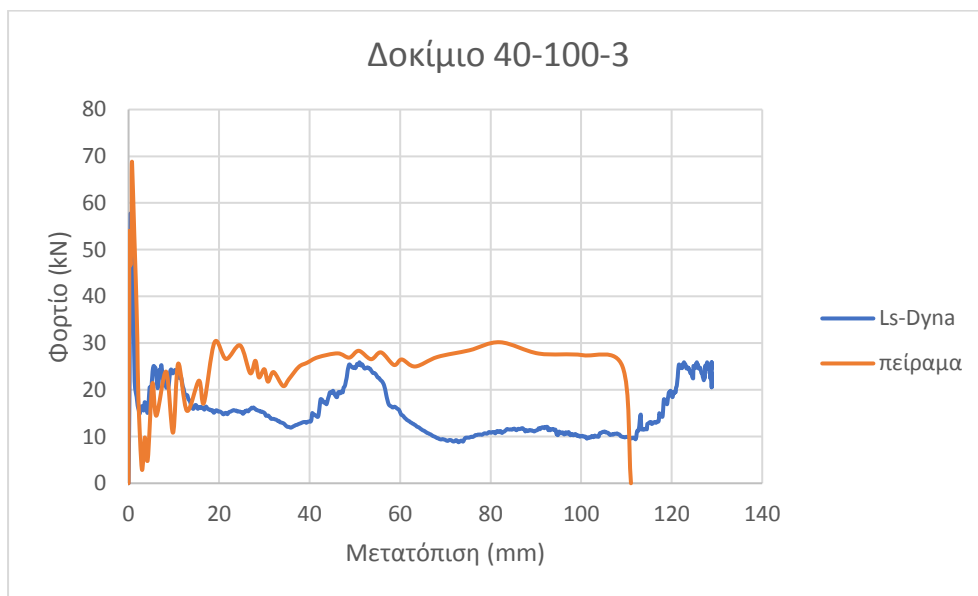
Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου χρόνου μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης.

Διάγραμμα 5



Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου μετατόπισης μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης.

Διάγραμμα 6



Πίνακας αποτελεσμάτων

Πίνακας 5

	Προσομοίωση	Πείραμα
Μέσο Φορτίο	15.98 kN	25.8 kN
Μέγιστο Φορτίο	57.7 kN	68.5 kN
Ενέργεια Απορρόφησης	2.05 KJ	2.86 KJ
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης	6.75 J/g	10.69 J/g
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	27.7%	37.6%

Το δοκίμιο στο πείραμα παραμορφώθηκε κατά 111 mm ενώ στο Ls-Dyna παραμορφώθηκε κατά 128.8 mm, ενώ η συμπίεση στο πείραμα διήρκησε 30 ms και στο Ls-Dyna 28.5 ms.

Τελικές όψεις



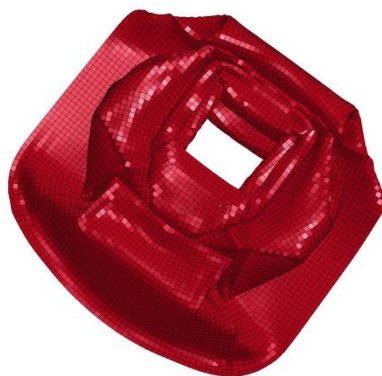
(1)



(2)



(3)



(4)

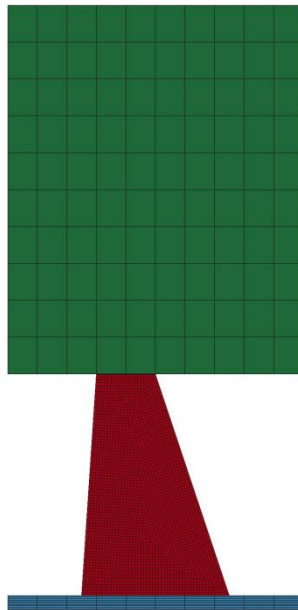
Εικόνα 27: Κατόψεις και πλάγιες όψεις του δοκίμιου 40-100-3 στο τέλος του πειράματος και της προσομοίωσης αντίστοιχα.

Σχολιασμός

Κατά τη δοκιμή δυναμικής άσκησης φορτίου στο δοκίμιο 40-100-3 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 57.7 KN και για την τιμή της βράχυνσης των 0.67 mm σε ότι αφορά την προσομοίωση. Αντίστοιχα για το πείραμα είχαμε μέγιστο φορτίο στα 68.5 KN και για 0.77 mm βράχυνση. Η ενέργεια απορρόφησης για το πείραμα ήταν 2.86 KJ ενώ για την προσομοίωση 2.05 KJ. Όσον αφορά την κλίση των 2 καμπύλων αναμενόμενο είναι η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης να είναι μεγαλύτερη από αυτή του πειράματος, διότι το θεωρητικό δοκίμιο είναι πιο στιβαρό. Η κατάσταση αυτή επαληθεύεται από τα διαγράμματα. Μετά την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου, εισερχόμαστε στην πλαστική περιοχή όπου παρατηρούμε τις πλαστικές αναδιπλώσεις τόσο από τις εικόνες όσο και από τα διαγράμματα μέσω των αυξομειώσεων του φορτίου. Παρατηρούμε την εμφάνιση 2 μη εκτατών μη συμμετρικών λοβών καθώς και πλαστικών αρμών χαμηλότερα τους στο δοκίμιο.

4.3 Το δοκίμιο 40-100-6

Το δοκίμιο 40-100-6 έχει ύψος 150 χιλιοστά. Η κάτω βάση του είναι 100 επί 100 και η πάνω βάση του είναι 40 επί 40, ενώ το κέντρο αυτής είναι μετατοπισμένο 20 χιλιοστά οριζόντια (κατά τον άξονα των χ δηλαδή) και 20 χιλιοστά κάθετα (κατά τον άξονα των ψ) σε σχέση με το κέντρο της κάτω βάσης.



Εικόνα 28: Το μοντέλο 40-100-6 όπως σχεδιάστηκε σε περιβάλλον Ls-Dyna.

Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης



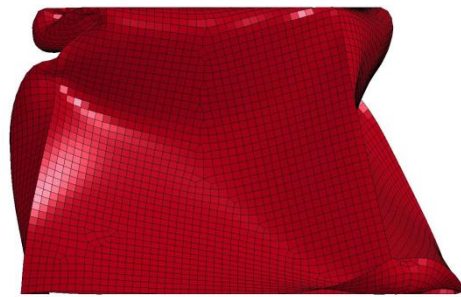
(1)



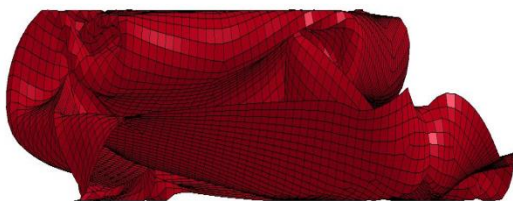
(2)



(2)



(4)

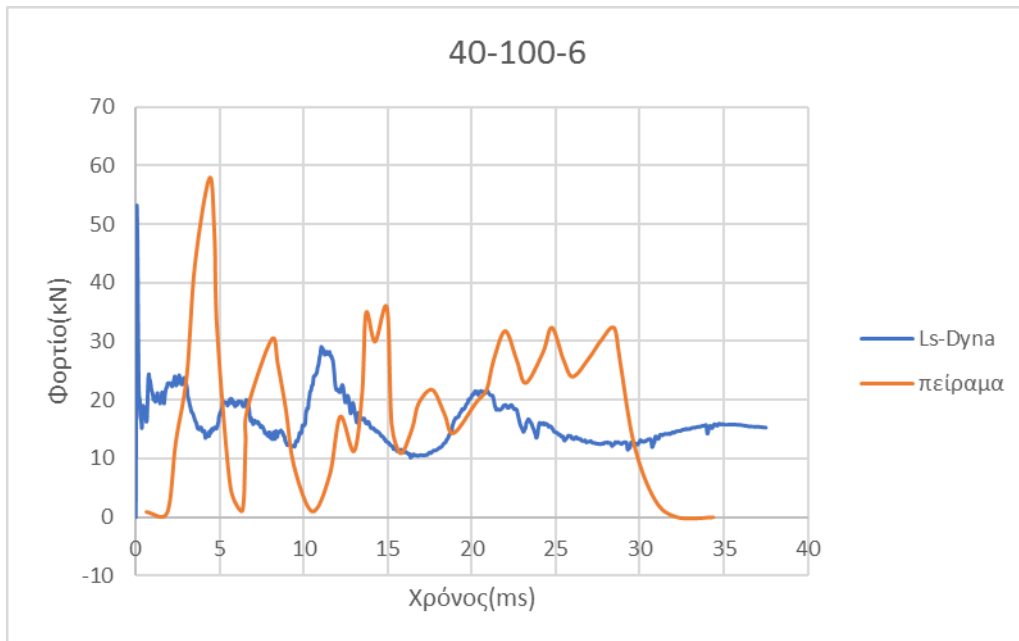


(5)

Εικόνα 29:: Οι προδευτικές φάσεις κατάρρευσης του δοκιμίου 40-100-3 στα 0, 4, 10, 18 και 37..5 ms αντίστοιχα.

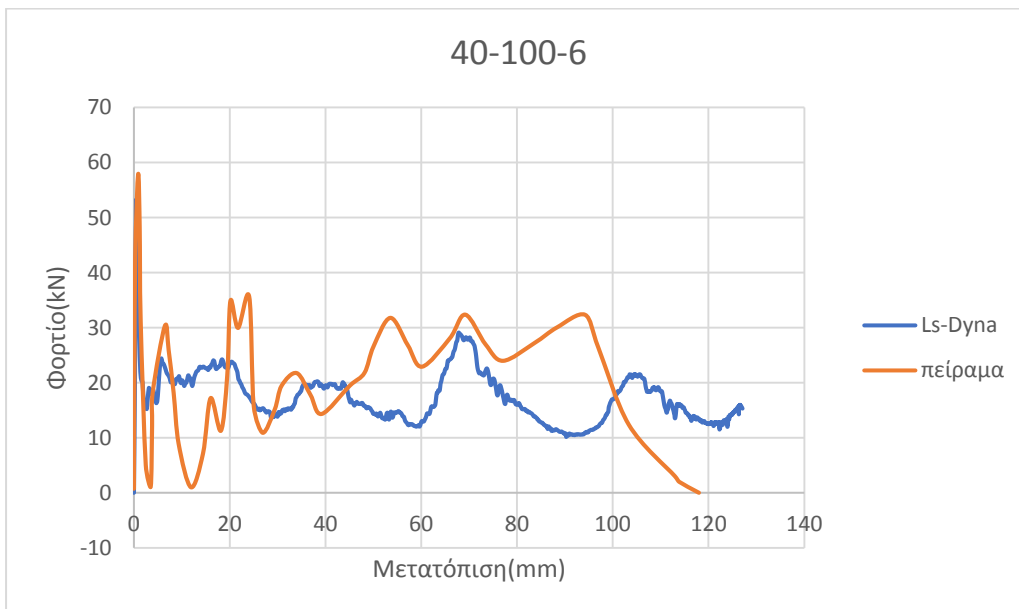
Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου χρόνου μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης.

Διάγραμμα 7



Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου μετατόπισης μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης.

Διάγραμμα 8



Πίνακας αποτελεσμάτων

Πίνακας 6

	Προσομοίωση	Πείραμα
Μέσο Φορτίο	16.35 kN	20.5 kN
Μέγιστο Φορτίο	52.7 kN	57.9 kN
Ενέργεια Απορρόφησης	2.08 KJ	2.31 KJ
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης	7.02 J/g	8.32 J/g
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	31 %	35.4

Το δοκίμιο στο πείραμα παραμορφώθηκε κατά 118 mm ενώ στο Ls-Dyna παραμορφώθηκε κατά 127.1 mm, ενώ η συμπίεση στο πείραμα διήρκησε 31 ms και στο Ls-Dyna 37.5 ms.

Τελικές όψεις



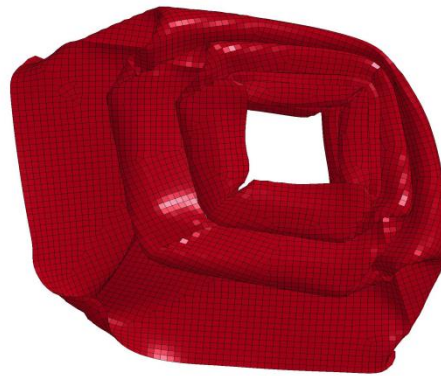
(1)



(2)



(3)



(4)



(5)



(6)

Εικόνα 30: Ανόψεις, κατόψεις και πλάγιες όψεις του δοκίμιου 40-100-6 μετά το τέλος του πειράματος και της προσομοίωσης αντίστοιχα.

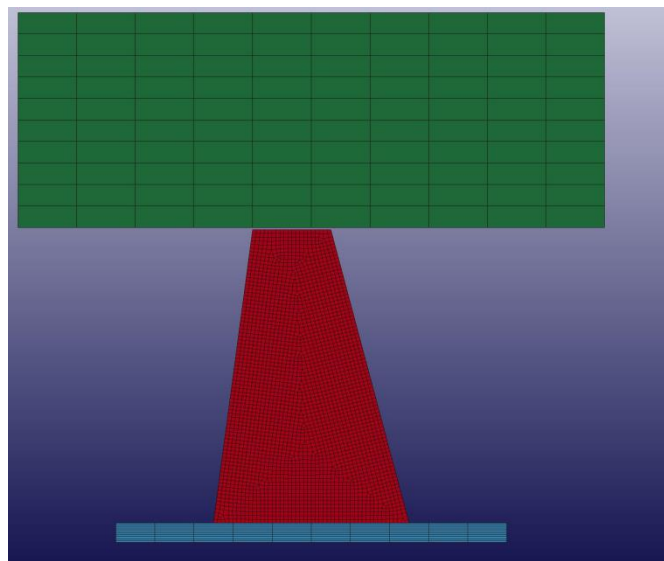
Σχολιασμός

Κατά τη δοκιμή δυναμικής άσκησης φορτίου στο δοκίμιο 40-100-6 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 57.7 KN και για την τιμή της βράχυνσης των 0.67 mm σε ότι αφορά την προσομοίωση. Αντίστοιχα για το πείραμα είχαμε μέγιστο φορτίο στα 68.5 KN και για 0.77 mm βράχυνση. Η ενέργεια απορρόφησης για το πείραμα ήταν 2.31 KJ ενώ για την προσομοίωση 2.08 KJ. Όσον αφορά την κλίση των 2 καμπύλων αναμενόμενο είναι η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης να είναι μεγαλύτερη από αυτή του πειράματος, διότι το θεωρητικό δοκίμιο είναι πιο στιβαρό. Η κατάσταση αυτή επαληθεύεται από τα διαγράμματα. Μετά την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου, εισερχόμαστε στην πλαστική περιοχή όπου παρατηρούμε τις πλαστικές αναδιπλώσεις τόσο από τις εικόνες όσο και από τα διαγράμματα μέσω των αυξομειώσεων του φορτίου. Παρατηρούμε την εμφάνιση 2 μη εκτατών μη συμμετρικών λοβών καθώς

και πλαστικών αρμών χαμηλότερα στο δοκίμιο. Τέλος παρατηρούμε "σκίσιμο" στου δοκιμίου μας σε μία απο τις 4 γωνίες τις κάτω βάσης, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης τάσεων.

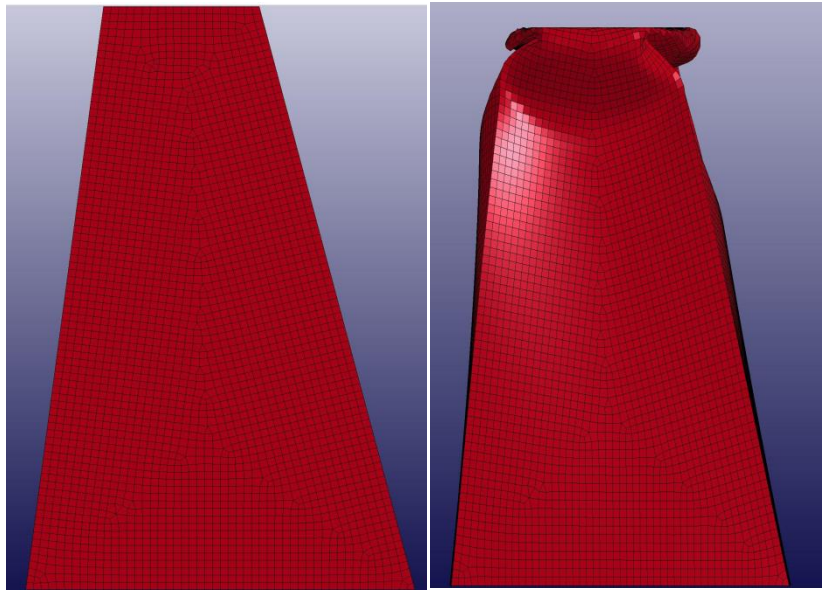
4.4 Το δοκίμιο 40-100-8

Το δοκίμιο 40-100-8 έχει ύψος 150 χιλιοστά. Η κάτω βάση του είναι 100 επι 100 και η πάνω βάση του είναι 40 επι 40, ενώ το κέντρο αυτής είναι μετατοπισμένο 20 χιλιοστά οριζόντια (κατά τον άξονα των x δηλαδή) και 10 χιλιοστά κάθετα (κατά τον άξονα των y) σε σχέση με το κεντρο της κάτω βάσης.



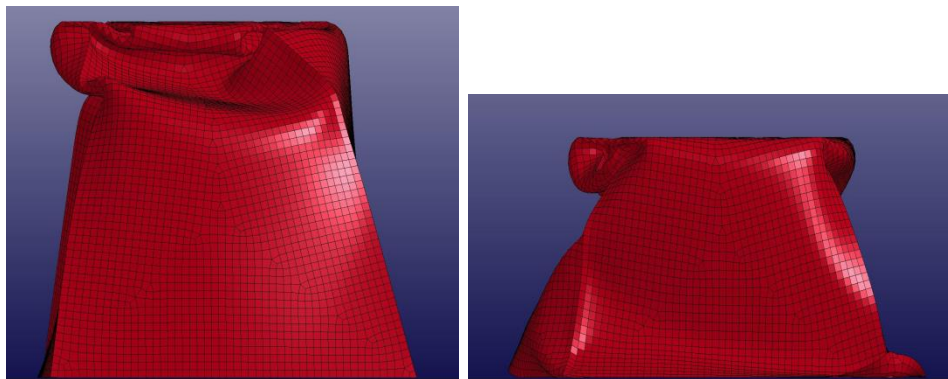
Εικόνα 31: Το μοντέλο 40-100-8 όπως σχεδιάστηκε σε περιβάλλον *LS-Dyna*.

Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης



(1)

(2)



(3)

(4)



(5)

Εικόνα 32: Οι προδευτικές φάσεις κατάρρευσης του δοκιμίου 40-100-3 στα 0, 4, 10, 18 και 30 ms αντίστοιχα.

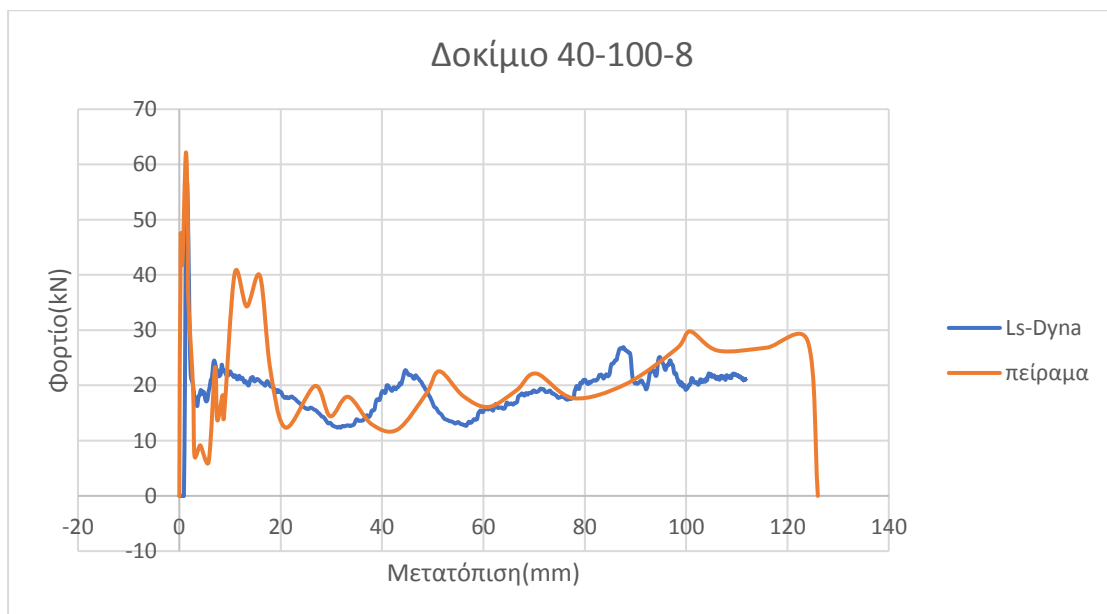
Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου χρόνου μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης.

Διάγραμμα 9



Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου μετατόπισης μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης.

Διάγραμμα 10



Πίνακας αποτελεσμάτων

Πίνακας 7

	Προσομοίωση	Πείραμα
Μέσο Φορτίο	19.58 kN	21.75 kN
Μέγιστο Φορτίο	57.38 kN	62.1 kN
Ενέργεια Απορρόφησης	2.18 KJ	2.74 KJ
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης	8.23 J/g	9.32 J/g
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	34.12 %	35%

Το δοκίμιο στο πείραμα παραμορφώθηκε κατά 126 mm ενώ στο Ls-Dyna παραμορφώθηκε κατά 111.7 mm, ενώ η συμπίεση στο πείραμα διήρκησε 31 ms και στο Ls-Dyna 28.6 ms.

Τελικές όψεις



(1)



(2)

(3)

Εικόνα 33 : Κάτοψη και πλάγιες όψεις του δοκίμιου μετά το πέρας του πειράματος.

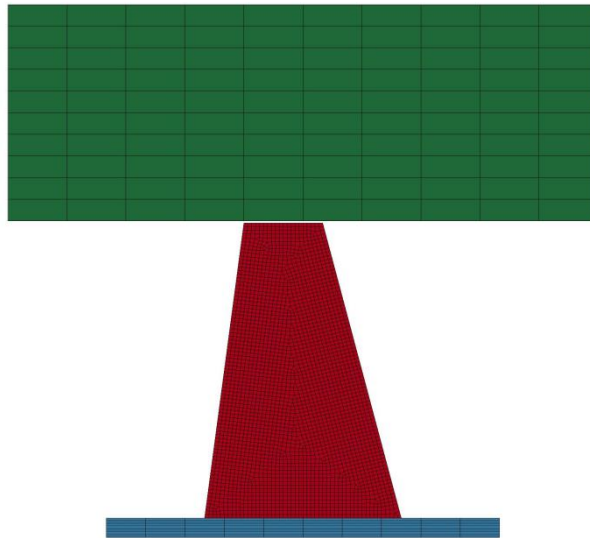
Σχολιασμός

Τα αποτελέσματα μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης συμφωνούν μεταξύ τους σημαντικά.

Κατά τη δοκιμή δυναμικής άσκησης φορτίου στο δοκίμιο 40-100-8 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 57.38 kN και για την τιμή της βράχυνσης των 1.35 mm σε ότι αφορά την προσομοίωση. Αντίστοιχα για το πείραμα είχαμε μέγιστο φορτίο στα 62.1 kN και για 1.3 mm βράχυνση. Η ενέργεια απορρόφησης για το πείραμα ήταν 2.74 KJ ενώ για την προσομοίωση 2.18 KJ. Όσον αφορά την κλίση των 2 καμπύλων αναμενόμενο είναι η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης να είναι μεγαλύτερη από αυτή του πειράματος, διότι το θεωρητικό δοκίμιο είναι πιο στιβαρό. Η κατάσταση αυτή επαληθεύεται από τα διαγράμματα. Μετά την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου, εισερχόμαστε στην πλαστική περιοχή όπου παρατηρούμε τις πλαστικές αναδιπλώσεις τόσο από τις εικόνες όσο και από τα διαγράμματα μέσω των αυξομειώσεων του φορτίου. Παρατηρούμε την εμφάνιση 2 μη εκτατών λοβών καθώς και την εμφάνιση πλαστικών αρμών στη συνέχεια πιο κοντά στη βάση του δοκίμιου, όπου παρατηρήθηκε "σκίσιμο" του στις πλευρές με μεγάλη κλίση ανάμεσα στην κάτω και την άνω βάση.

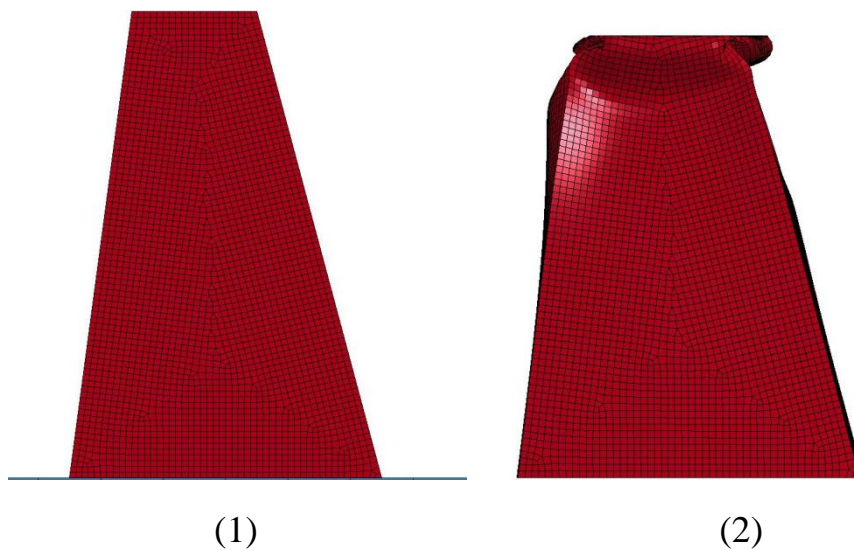
4.5 Το δοκίμιο 40-100-9

Το δοκίμιο 40-100-9 έχει ύψος 150 χιλιοστά. Η κάτω βάση του είναι 100 επί 100 και η πάνω βάση του είναι 40 επί 40, ενώ το κέντρο αυτής είναι μετατοπισμένο 30 χιλιοστά οριζόντια (κατά τον άξονα των χ δηλαδή) και 10 χιλιοστά κάθετα (κατά τον άξονα των ψ) σε σχέση με το κέντρο της κάτω βάσης.



Εικόνα 34: Το μοντέλο 40-100-9 όπως σχεδιάστηκε σε περιβάλλον Ls-Dyna.

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης





(3)



(4)

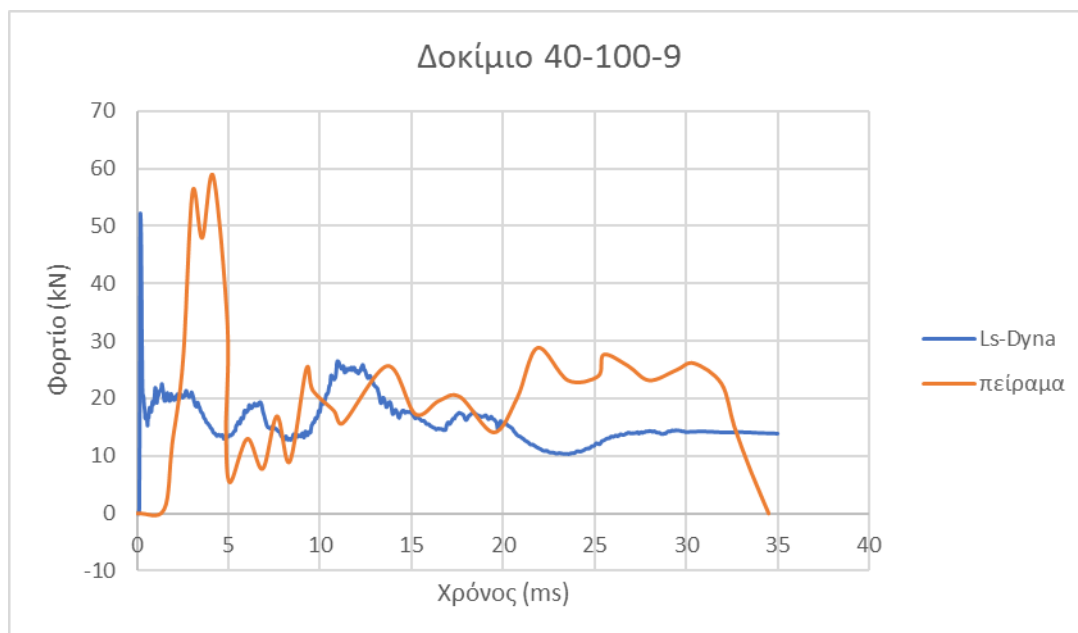


(5)

Εικόνα 35: Οι προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης του δοκιμίου 40-100-9 στα 0, 4, 8, 16 και 35 ms αντίστοιχα.

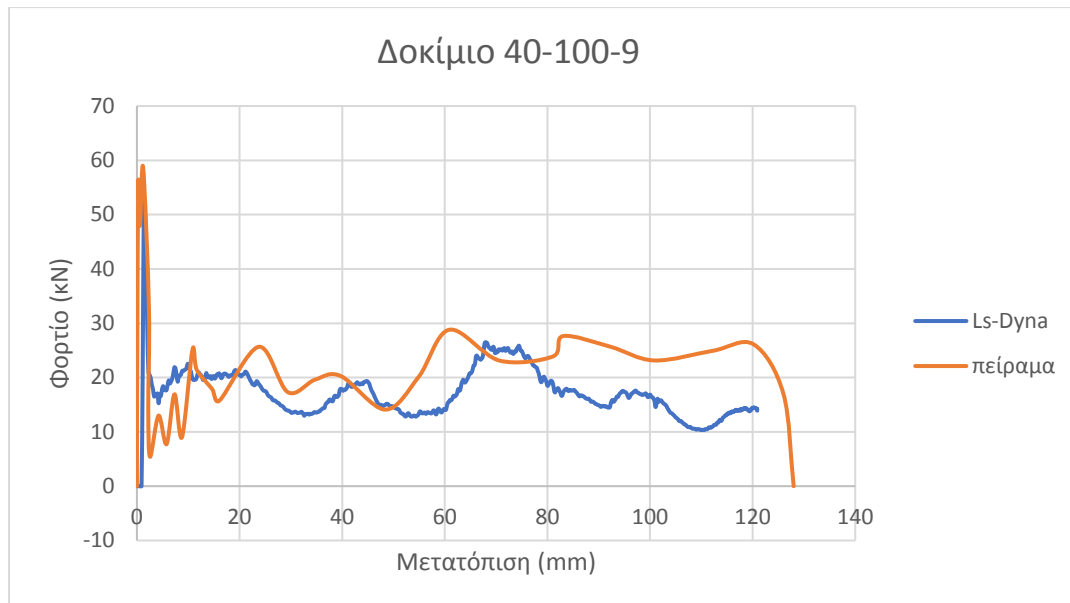
Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου χρόνου μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης.

Διάγραμμα 11



Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου μετατόπισης μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης.

Διάγραμμα 12



Πίνακας αποτελεσμάτων

Πίνακας 8

	Προσομοίωση	Πείραμα
Μέσο Φορτίο	16.19 kN	20.5 kN
Μέγιστο Φορτίο	52 kN	58.6 kN
Ενέργεια Απορρόφησης	1.96 KJ	2.61 KJ
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης	6.71 J/g	8.53 J/g
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	31.1 %	34.9 %

Το δοκίμιο στο πείραμα παραμορφώθηκε κατά 128 mm ενώ στο Ls-Dyna παραμορφώθηκε κατά 120.8 mm, ενώ η συμπίεση στο πείραμα διήρκησε 34 ms και στο Ls-Dyna 35 ms.

Τελικές όψεις



(1)



(2)



(3)

Εικόνα 36: Κάτοψη και πλάγιες όψεις του δοκιμίου 40-100-9 μετά το τέλος του πειράματος.

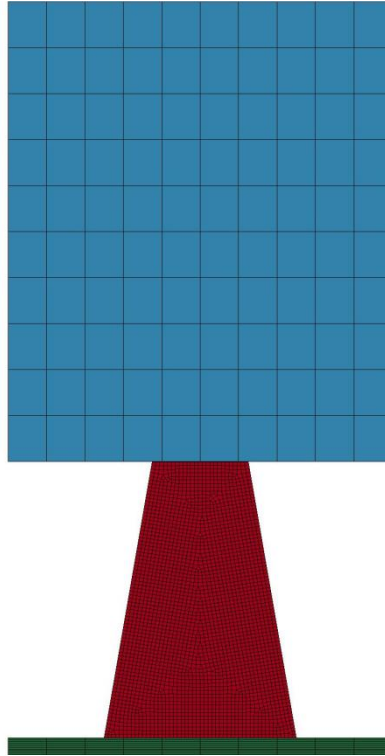
Σχολιασμός

Τα αποτελέσματα μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης συμφωνούν μεταξύ τους σημαντικά.

Κατά τη δοκιμή δυναμικής άσκησης φορτίου στο δοκίμιο 40-100-9 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 58.6 kN και για την τιμή της βράχυνσης των 1.2 mm σε ότι αφορά την προσομοίωση. Αντίστοιχα για το πείραμα είχαμε μέγιστο φορτίο στα 52 kN και για 1.34 mm βράχυνση. Η ενέργεια απορρόφησης για το πείραμα ήταν 2.61 KJ ενώ για την προσομοίωση 1.96 KJ. Όσον αφορά την κλίση των 2 καμπύλων αναμενόμενο είναι η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης να είναι μεγαλύτερη από αυτή του πειράματος, διότι το θεωρητικό δοκίμιο είναι πιο στιβαρό. Η κατάσταση αυτή επαληθεύεται από τα διαγράμματα. Μετά την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου, εισερχόμαστε στην πλαστική περιοχή όπου παρατηρούμε τις πλαστικές αναδιπλώσεις τόσο από τις εικόνες όσο και από τα διαγράμματα μέσω των αυξομειώσεων του φορτίου. Παρατηρούμε την εμφάνιση 2 μη εκτατών μη συμμετρικών λοβών και πλαστικών αρμών μετά την δημιουργία αυτών. Τέλος στη βάση του δοκιμίου παρατηρήθηκε "σκίσιμο" του στη μια από τις 2 πλευρές με μεγάλη κλίση ανάμεσα στην κάτω και την άνω βάση.

4.6 Το δοκίμιο 50-100-1

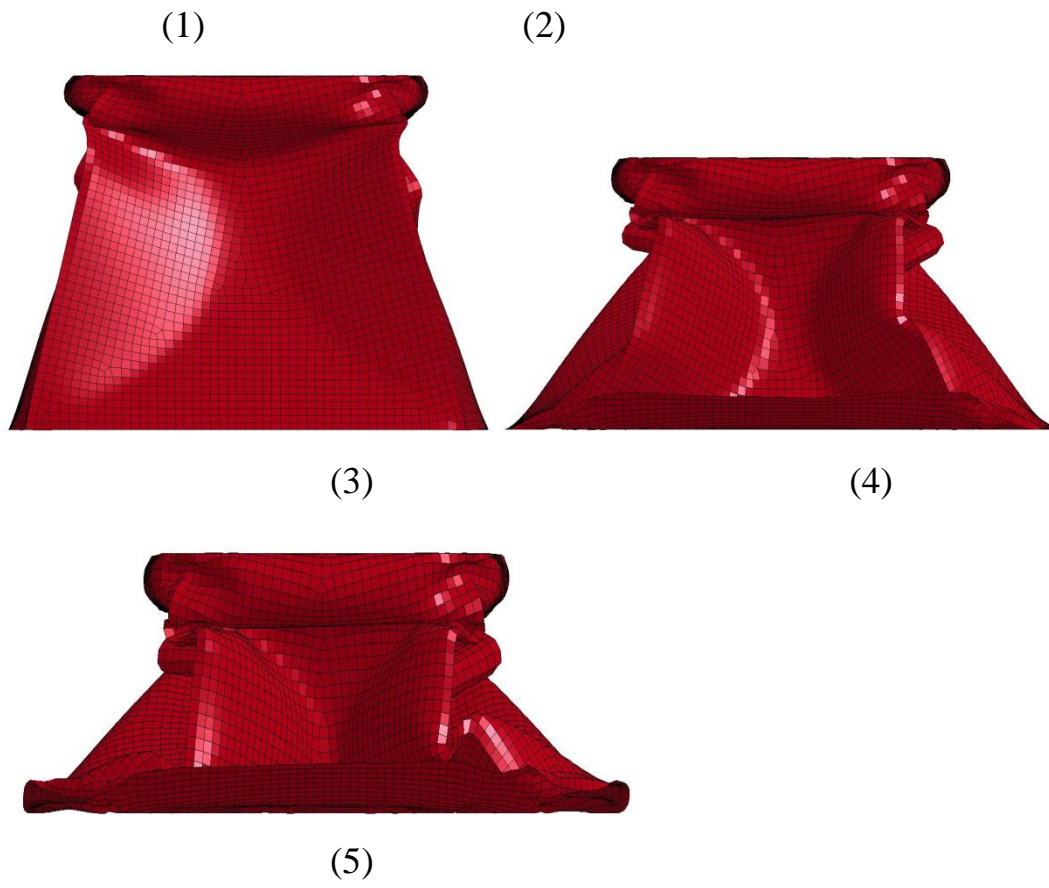
Το δοκίμιο 50-100-1 έχει ύψος 150 χιλιοστά. Η κάτω βάση του είναι 100 επί 100 και η πάνω βάση του είναι 50 επί 50, ενώ το κέντρο αυτής δεν είναι καθόλου μετατοπισμένο σε σχέση με το κέντρο της κάτω βάσης.



Εικόνα 37: Το μοντέλο 50-100-1 όπως σχεδιάστηκε σε περιβάλλον Ls-Dyna.

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης

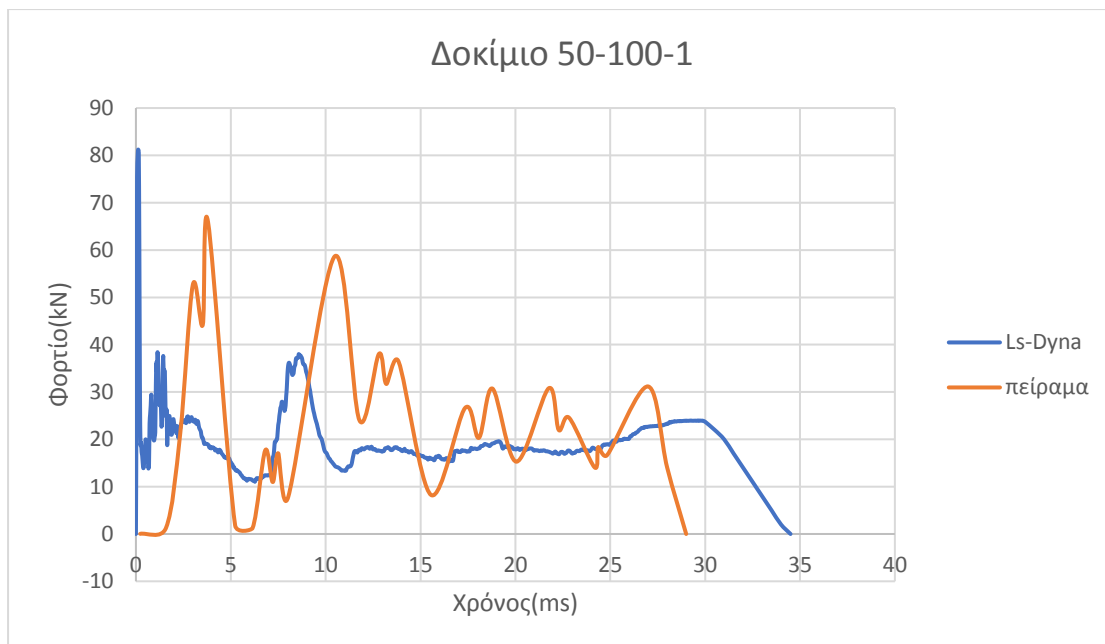




Εικόνα 38: Οι προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης του δοκιμίου 50-100-1 στα 0, 4, 12, 20 και 30 ms αντίστοιχα.

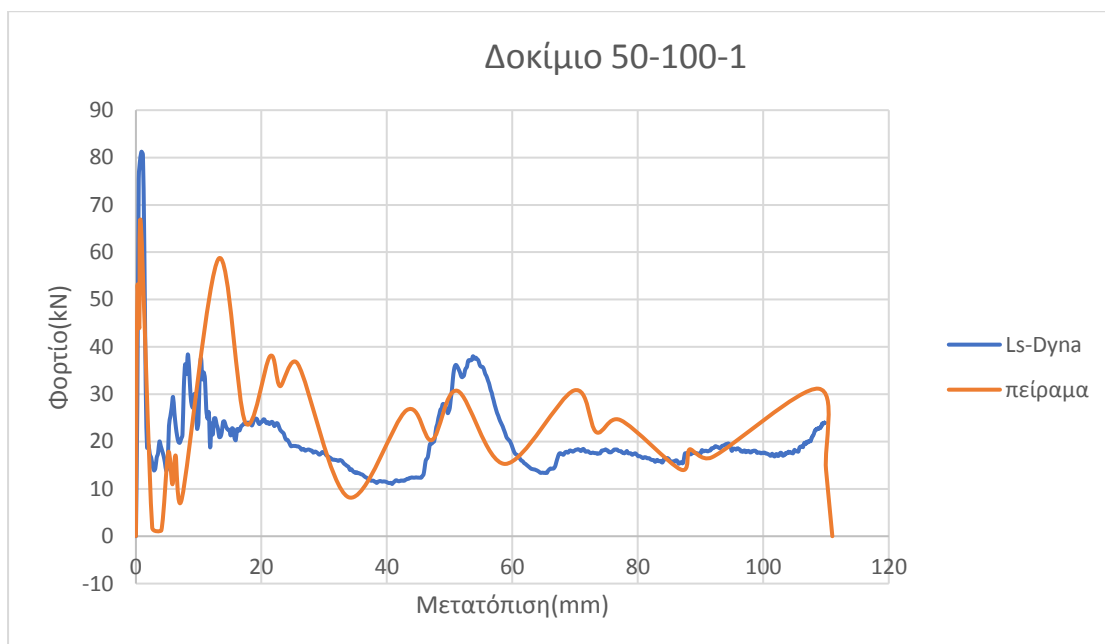
Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου χρόνου μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης.

Διάγραμμα 13



Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου μετατόπισης μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης.

Διάγραμμα 14



Πίνακας αποτελεσμάτων

Πίνακας 9

	Προσομοίωση	Πείραμα
Μέσο Φορτίο	19.37 kN	22.5 kN
Μέγιστο Φορτίο	81.2 kN	65.9 kN
Ενέργεια Απορρόφησης	2.12 KJ	2.5 KJ
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης	8 J/g	9.44 J/g
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	23.85 %	34.1%

Το δοκίμιο στο πείραμα παραμορφώθηκε κατά 111 mm και στο Ls-Dyna παραμορφώθηκε κατά 109.7 mm, ενώ η συμπίεση στο πείραμα διήρκησε 29 ms και στο Ls-Dyna 30 ms.

Τελικές όψεις



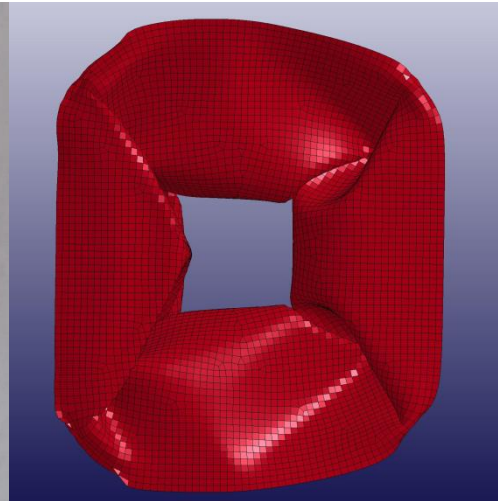
(1)



(2)



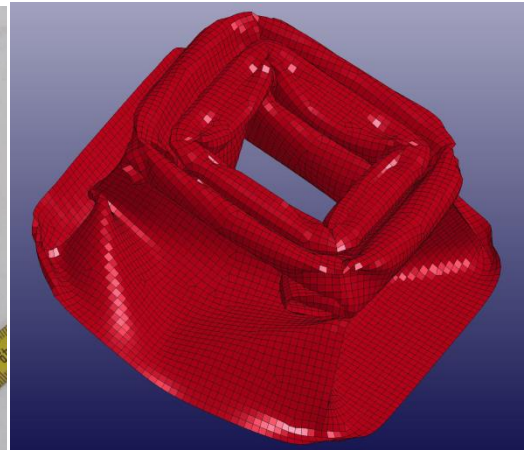
(3)



(4)



(5)



(6)

Εικόνα 39: Κατόψεις, ανόψεις και πλάγιες όψεις του δοκίμιου 50-100-1 μετά το τέλος του πειράματος και της προσομοίωσης αντίστοιχα.

Σχολιασμός

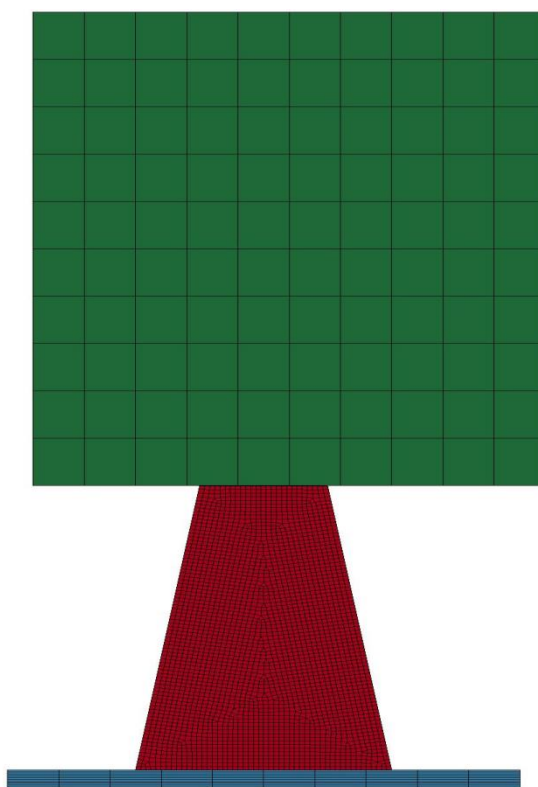
Τα αποτελέσματα μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης συμφωνούν μεταξύ τους .

Κατά τη δοκιμή δυναμικής άσκησης φορτίου στο δοκίμιο 50-100-1 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 81.2 kN και για την τιμή της βράχυνσης των 0.8 mm σε ότι αφορά την προσομοίωση. Αντίστοιχα για το πείραμα είχαμε μέγιστο φορτίο στα 65.9 kN και για 0.9 mm βράχυνση. Η ενέργεια απορρόφησης για το πείραμα ήταν 2.5 KJ ενώ για την προσομοίωση 2.12 KJ. Όσον αφορά την κλίση των 2 καμπύλων

αναμενόμενο είναι η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης να είναι μεγαλύτερη από αυτή του πειράματος, διότι το θεωρητικό δοκίμιο είναι πιο στιβαρό. Η κατάσταση αυτή επαληθεύεται από τα διαγράμματα. Η κατάρρευση του δοκιμίου και στις 2 περιπτώσεις ξεκινάει από την μικρότερη διατομή όπως ήταν αναμενόμενο αφού εκεί υπάρχει λιγότερο υλικό και άρα απαιτείται λιγότερη ενέργεια για να καταρρεύσει. Μετά την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου, εισερχόμαστε στην πλαστική περιοχή όπου παρατηρούμε τις πλαστικές αναδιπλώσεις τόσο από τις εικόνες όσο και από τα διαγράμματα μέσω των αυξομειώσεων του φορτίου. Παρατηρούμε την εμφάνιση 2 μη εκτατών λοβών και ενός πλαστικού αρμού στη συνέχεια πολύ χαμηλά στο δοκίμιο, τα σημεία εμφάνισης των οποίων μπορούν να ελεγχθούν μέσω των διαγραμμάτων. Τέλος παρατηρούμε "σκίσιμο" στο δοκίμιο μας σε μία από τις 4 γωνίες της κάτω βάσης, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης τάσεων.

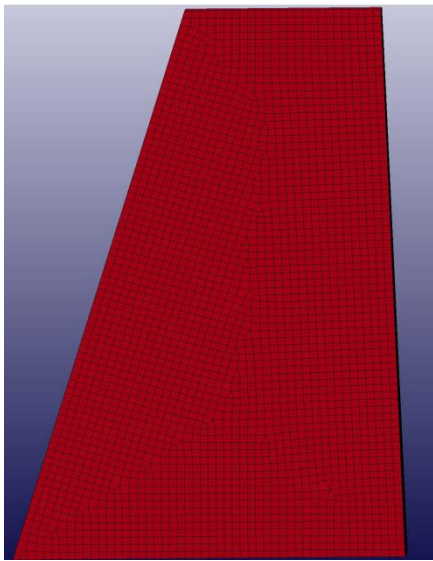
4.7 Το δοκίμιο 50-100-3

Το δοκίμιο 50-100-3 έχει ύψος 150 χιλιοστά. Η κάτω βάση του είναι 100 επί 100 και η πάνω βάση του είναι 50 επί 50, ενώ το κέντρο αυτής είναι μετατοπισμένο 20 χιλιοστά οριζόντια (κατά τον άξονα των x δηλαδή) σε σχέση με το κέντρο της κάτω βάσης.



Εικόνα 40: Το μοντέλο 50-100-3 όπως σχεδιάστηκε σε περιβάλλον Ls-Dyna.

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



(1)



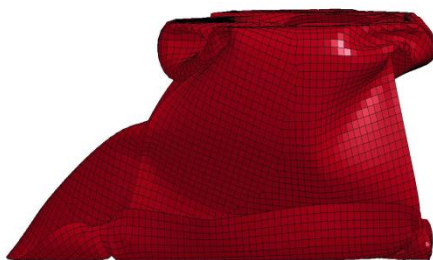
(2)



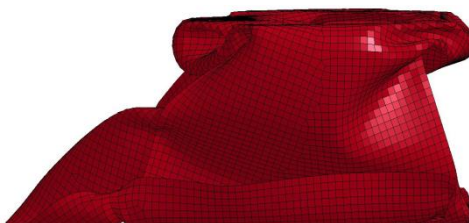
(3)



(4)



(5)

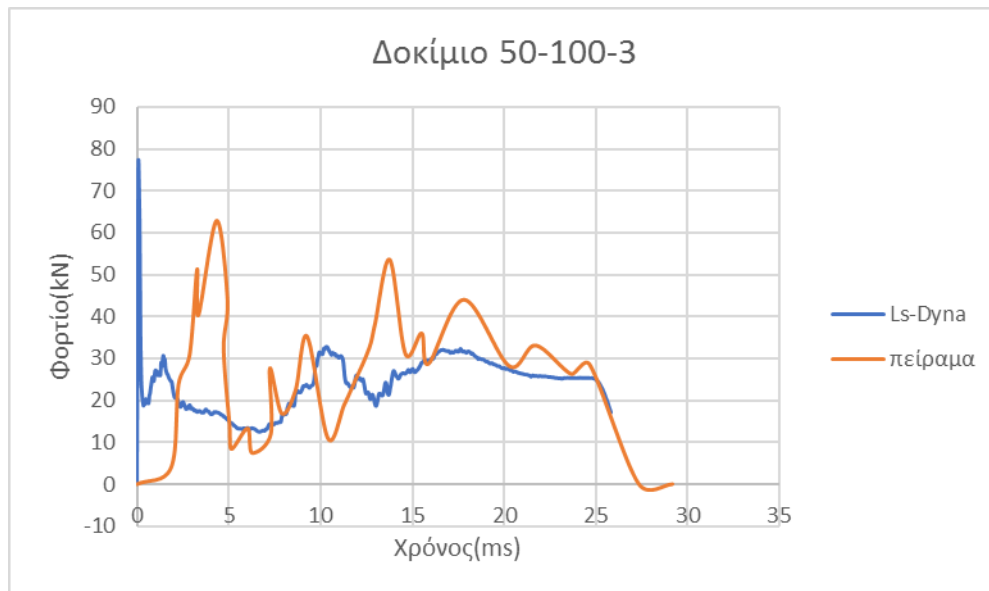


(6)

Εικόνα 41: Οι προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης του δοκιμίου 50-100-3 στα 0, 5, 9, 14, 20 και 26 ms αντίστοιχα.

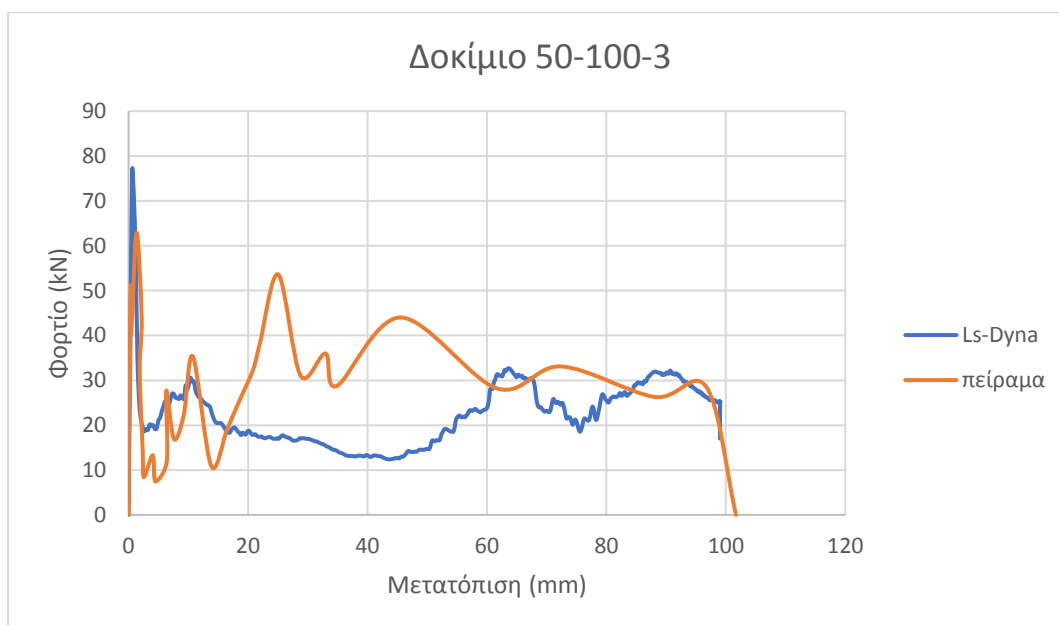
Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου χρόνου μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης.

Διάγραμμα 15



Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου μετατόπισης μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης.

Διάγραμμα 16



Πίνακας αποτελεσμάτων

Πίνακας 10

	Προσομοίωση	Πείραμα
Μέσο Φορτίο	23.91 kN	25.9 kN
Μέγιστο Φορτίο	76.56 kN	62.8 kN
Ενέργεια Απορρόφησης	2.37 KJ	2.63 KJ
Ειδική Ενέργεια παραμόρφωσης	9.34 J/g	10.4 J/g
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	31.23 %	41.2%

Το δοκίμιο στο πείραμα παραμορφώθηκε κατά 101.7 mm και στο Ls-Dyna παραμορφώθηκε κατά 99.7 mm, ενώ η συμπίεση στο πείραμα διήρκησε 27.3 ms και στο Ls-Dyna 25.9 ms.

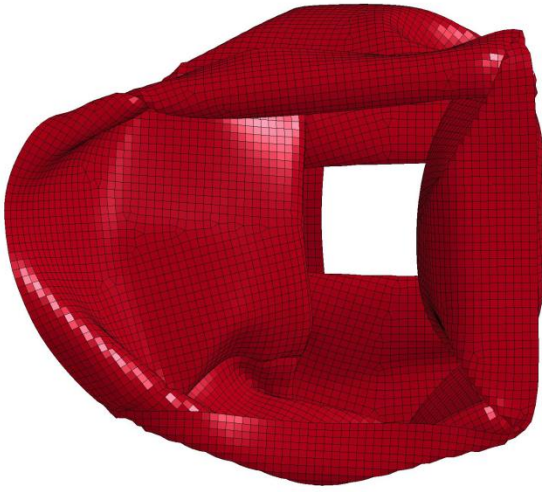
Τελικές όψεις



(1)



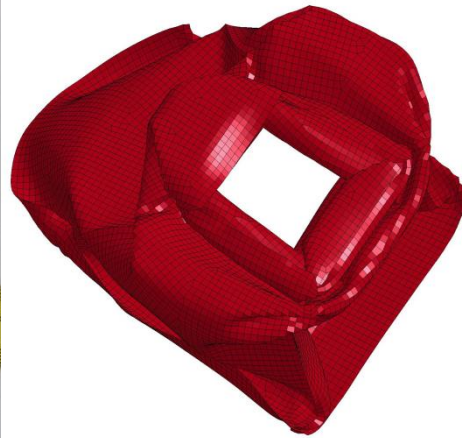
(2)



(3)



(4)



(5)

Εικόνα 42: Κατόψεις, ανόψεις και πλάγιες όψεις του δοκιμίου 50-100-3 μετά το τέλος του πειράματος και της προσομοίωσης αντίστοιχα.

Σχολιασμός

Τα αποτελέσματα μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης συμφωνούν μεταξύ τους σε μεγάλο βαθμό.

Κατά τη δοκιμή δυναμικής άσκησης φορτίου στο δοκίμιο 50-100-3 καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 76.56 kN και για την τιμή της βράχυνσης των 0.6 mm σε ότι αφορά την προσομοίωση. Αντίστοιχα για το πείραμα είχαμε μέγιστο φορτίο στα 62.8 kN και για 1.33 mm βράχυνση. Η ενέργεια απορρόφησης για το πείραμα ήταν 2.63 KJ ενώ για την προσομοίωση 2.37 KJ. Όσον αφορά την κλίση των 2 καμπύλων αναμενόμενο είναι η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης να είναι μεγαλύτερη από αυτή του πειράματος, διότι το θεωρητικό δοκίμιο είναι πιο στιβαρό. Η κατάσταση αυτή επαληθεύεται από τα διαγράμματα. Η κατάρρευση του δοκιμίου και στις 2 περιπτώσεις ξεκινάει από την μικρότερη διατομή όπως ήταν αναμενόμενο αφού εκεί υπάρχει λιγότερη υλική και άρα απαιτείται λιγότερη ενέργεια για να καταρρεύσει. Μετά την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου, εισερχόμαστε στην πλαστική περιοχή όπου παρατηρούμε τις πλαστικές αναδιπλώσεις τόσο από τις εικόνες όσο και από τα διαγράμματα μέσω των αυξομειώσεων του φορτίου. Παρατηρούμε την εμφάνιση 2 μη εκτατών λοβών και μιας αναστροφής υλικού στη βάση του δοκιμίου τα σημεία εμφάνισης των οποίων μπορούν να ελεγχθούν μέσω των διαγραμμάτων. Τέλος μετά τη δημιουργία των λοβών παρατηρούμε την εμφάνιση πλαστικών αρμών χαμηλότερα στο δοκίμιο.

4.8 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Πίνακας 11

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ $P_{max}(kN)$	ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ $P_m(kN)$	ΔΕΙΚΤΗΣ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ CFE (%)	ΒΡΑΧΥΝΣΗ ΚΑΤΑ ΤΟ P_{max} (mm)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ $E_{abs}(kJ)$
40-100-2	65.4	16	24.46	0.55	1.93
40-100-3	57.7	16	27.7	0.67	2.05
*40-100-5	56	14.7	26.25	0.3	1.47
40-100-6	52.7	16.35	31	0.67	2.08
40-100-8	57.4	19.58	34.12	1.35	2.18
40-100-9	52	16.19	31.1	1.2	1.96
50-100-1	81.2	19.37	23.85	0.8	2.12
50-100-3	76.6	23.91	31.23	0.6	2.37
*60-100-1	85.5	17.5	20.4	0.4	1.75

*Στον πίνακα περιλαμβάνονται και τα δοκίμια που δέχθηκαν στατική καταπόνηση. (40-100-5 και 60-100-1)

Συγκεντρωτικός πίνακας συνολικών μετατοπίσεων των δοκιμών που καταπονήθηκαν δυναμικά(αφορά την προσομοίωση)

Πίνακας 12

<u>ΔΟΚΙΜΙΟ</u>	<u>ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)</u>
40-100-2	120
40-100-3	128.8
40-100-6	127.1
40-100-8	111.7
40-100-9	120.8
50-100-1	109.7
50-100-3	99.7

4.9 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Πίνακας 13

Δοκίμιο	Μέγιστο Φορτίο (kN)	Μέσο Φορτίο (kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου CFE (%)	ΒΡΑΧΥΝΣΗ ΚΑΤΑ ΤΟ P _{max} (mm)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ E _{abs} (kJ)
40-100-2	61.4	26.9	43.8	0.4	2.66
40-100-3	68.5	25.8	37.6	0.77	2.86
40-100-5	29.45	16.6	56.36	0.93	1.66
40-100-6	57.9	20.5	35.4	0.77	2.31
40-100-8	62.1	21.75	35	1.3	2.74
40-100-9	58.6	20.5	34.9	1.34	2.61
50-100-1	65.9	22.5	34.1	0.9	2.5
50-100-3	62.8	25.9	41.2	1.33	2.63
60-100-1	50.8	22.2	43.7	2.25	2.22

Συγκεντρωτικός πίνακας συνολικών μετατοπίσεων των δοκιμών που καταπονήθηκαν δυναμικά(αφορά το πείραμα)

Πίνακας 14

<u>ΔΟΚΙΜΙΟ</u>	<u>ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)</u>
40-100-2	105
40-100-3	111
40-100-6	118
40-100-8	126
40-100-9	128.1
50-100-1	111
50-100-3	101.7

4.10 Σύγκριση πειράματος-μοντελοποίησης

Όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ακολουθούν με ιδιαίτερα ικανοποιητικό τρόπο εκείνα των πειραματικών δοκιμών. Οι χαρακτηριστικοί δείκτες Crashworthiness, καθώς και τα μοτίβα κατάρρευσης που προέκυψαν από τα μοντέλα, παρουσιάζουν εγγύτητα με τα πειραματικά.

Οι αποκλίσεις που διαπιστώνονται οφείλονται κυρίως στο ότι τα μοντέλα προσομοίωσης έναντι των πραγματικών δοκιμών, χαρακτηρίζονται από:

- Εξιδανικευμένες παραμέτρους σχεδιασμού (γεωμετρία, ονομαστικές διαστάσεις),
- Τυπικές, ομοιόμορφες και συμμετρικές συννοριακές συνθήκες,
- Ομοιογένεια υλικού και μηχανικών ιδιοτήτων του,
- Γενικές παραδοχές/υποθέσεις περί των βασικών παραμέτρων (κυρίως του υλικού) επιρροής στην απόκριση τους.

Οι βασικοί δείκτες/μεγέθη (Μέσο Φορτίο, Ενέργεια Απορρόφησης) είναι πάντα (από λίγο έως αρκετά) μεγαλύτεροι στο πείραμα σε σχέση με την αντίστοιχη προσομοίωση, παρόλο που στο πείραμα υπάρχουν οι προαναφερθείσες γεωμετρικές (απόκλιση από ονομαστικές διαστάσεις, συννοριακές συνθήκες κλπ) και κατασκευαστικές (ραφές συγκόλλησης κλπ) ατέλειες. Αυτό συμβαίνει γιατί στο μοντέλο έχουμε εισάγει ιδιότητες υλικού από στατική δοκιμή εφελκυσμού, ενώ στο πείραμα το υλικό του κελύφους ακολουθεί τη "φύση" του (την πραγματικότητα), αντιδρώντας πολύ πιο σθεναρά στην παραμόρφωσή του, καθώς καταπονείται με πολύ υψηλότερους (και σταδικά μειωμένους αφού η σφύρα "φρενάρει") ρυθμούς παραμόρφωσης. Οι υψηλότεροι ρυθμοί παραμόρφωσης στα μέταλλα απαιτούν υψηλότερες τάσεις πλαστικής παραμόρφωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρατηρώντας τόσο τα δοκίμια που μελετήθηκαν στατικά όσο και τα δυναμικά καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι όσο πιο έκκεντρα είναι αυτά τόσο μειώνεται το μέγιστο φορτίο που αυτά δέχονται. Χαρακτηριστικά το λιγότερο έκκεντρο 40-100-2 εμφάνισε μέγιστο φορτίο 65.4 kN στην προσομοίωση, η δεύτερη σειρά εκκεντρότητας (δηλαδή αυτά των οποίων το κέντρο ήτανε μετακινημένο κατά 20 χιλιοστά) που αφορά τα δοκίμια 40-100-3, 6 και 8 εμφάνισαν αντίστοιχα μέγιστα φορτία 57.7, 57.4 και 52.781 kN. Το 40-100-9 που ήτανε και το δοκίμιο με την μεγαλύτερη εκκεντρότητα εμφάνισε μέγιστο φορτίο στα 52 kN. Το 40-100-6 που είναι πιο κοντά σε μέγιστο φορτίο με το 40-100-9 είναι το δοκίμιο που ήτανε περισσότερο έκκεντρο απο την σειρά αυτή αφού το κέντρο του ήτανε μετατοπισμένο κατά 20 χιλιοστά σε πλάτος και 20 χιλιοστά σε μήκος. Το ίδιο παρατηρούμε και στη σειρά των 50-100 δοκιμίων όπου στο δοκίμιο 50-100-1 παρουσιάστηκε 81 kN μέγιστο φορτίο στην προσομοίωση ενώ στο 50-100-3 76.56 kN ενώ στο πείραμα 65.9 kN στο 50-100-1 και 62.8 kN στο 50-100-3 δοκίμιο. Φυσικά το μοντέλο που εμφάνισε το μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο είναι το μοναδικό της σειράς 60-100 (60-100-1), στα 85.84 kN.

Σε ότι αφορά την ενέργεια παραμόρφωσης δε μπορούμε να βγάλουμε τόσο ασφαλή συμπεράσματα για τα δοκίμια της 40-100 σειράς κοιτώντας απλά τα αποτελέσματα αυτής. Αυτό συμβαίνει γιατί διότι εξαιτίας της δυναμικής καταπόνησης των 7 δοκιμίων, το καθένα είχε διαφορετική παραμόρφωση στο τέλος. Οπότε με μεγαλύτερη ασφάλεια μπορούμε να εστιάσουμε στα μέσα φορτία P_{mean} και στους δείκτες ομοιομορφίας φορτίου.

Μεταξύ των δοκιμίων 50-100 φαίνεται πως το πιο έκκεντρο δοκίμιο λειτουργεί καλύτερα σαν απορροφητής ενέργειας. Το δοκίμιο 50-100-3 μάλιστα εμφάνισε τη μεγαλύτερη ενέργεια απορρόφησης ανάμεσα σε όλα τα δοκίμια που μελετήθηκαν μέσω προσομοίωσης ενώ είχε σχεδόν ίδια ενέργεια προσομοίωσης με όλα τα δοκίμια της 40-100 σειράς αλλά με αρκετά μικρότερη παραμόρφωση.

Ανάμεσα στα 2 δοκίμια που εξετάστηκαν στατικά, αυτό με τη μεγαλύτερη πάνω βάση και χωρίς εκκεντρότητα ήτανε αυτό που εμφάνισε τόσο μεγαλύτερη ενέργεια παραμόρφωσης όσο και μέγιστο φορτίο. Οι μικρές διαφορές όμως συνολικά ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο δοκιμίων, ο κακός δείκτης ομοιομορφίας φορτίου και το χαμηλό μέσο φορτίο μας προϊδεάζουν για έναν όχι και τόσο καλό απορροφητή ενέργειας.

Κατά την κατάρρευση των δοκιμίων παρατηρήθηκε ολίσθηση του υλικού προς την κατακόρυφη ή της κατακόρυφες πλευρές. Η συμπεριφορά αυτή σχετίζεται με τη συγκέντρωση περισσότερων τάσεων στην κατακόρυφη πλευρά, η οποία όπως φάνηκε από τα πειράματα 40-100-8, 50-100-1 και 50-100-3 μπορεί να οδηγήσει σε σχίσσιμο του υλικού. Η εξέλιξη αυτή μπορεί να παρουσιαστεί ακόμη ευκολότερα αν συμπέσει με κάποια ατέλεια του υλικού. Μια τέτοια συμπεριφορά μπορεί να αποφευχθεί μέσω κατάλληλης επιλογής του πάχους και της κλίσης των τοιχωμάτων του δοκιμίου.

Τα περισσότερα δοκίμια που καταπονήθηκαν δυναμικά εμφάνισαν 2 λοβούς. Αυτοί είναι ορατοί τόσο από τις εικόνες όσο και από τα διαγράμματα φορτίου μετατόπισης. Οι λοβοί αυτοί γίνονται εμφανείς από τις αυξομειώσεις των διαγραμμάτων φορτίου-μετατόπισης. Η αύξηση του φορτίου συμπίπτει με τη δημιουργία ενός λοβού, το τοπικό μέγιστο συμπίπτει με την ολοκλήρωση της δημιουργίας του κάθε λοβού και στη συνέχεια παρατηρούμε αποτομή πτώση του φορτίου(ειδικά αν αυτός είναι μη εκτατός). Όταν παρατηρούμε μεγάλες "κοιλιάδες" στο διάγραμμα, σημαίνει πως το εργαλείο συμπίεσης δε βρίσκει αντίσταση από το δοκίμιο για αρκετά μεγάλο διάστημα. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στην αρχική σημαντική καταπόνηση του υλικού είτε στη δημιουργία ενός δεύτερου λοβού πολύ χαμηλότερα από τον πρώτο.

Τέλος παρατηρώντας τόσο τα δοκίμια όσο και τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων μας βλέπουμε ότι σε αυτά της δυναμικής καταπόνησης έχουμε μεγαλύτερη συχνότητα αυξομειώσεων του φορτίου. Στα δοκίμια που καταπονήθηκαν στατικά παρατηρούμε πιο ομαλές καμπύλες και όχι τόσο απότομες ενώ στα δυναμικά πυκνές και απότομες αυξομειώσεις.

Μελετώντας τα παραχθέντα διαγράμματα λοιπόν, είναι σαφής η έντονη αυξομείωση του φορτίου σχετικά με την προκύπτουσα μετατόπιση κατά τη δημιουργία των πλαστικών αρμών. Το γεγονός οφείλεται στη δυναμική φύση της δοκιμής, η οποία εμπεριέχει εκτεταμένη παραμόρφωση του δοκιμίου σε απειροελάχιστο χρονικό διάστημα. Ένα ακόμα αποτέλεσμα αυτής είναι η απελευθέρωση ενέργειας με τη μορφή θερμότητας (γίνεται εύκολα αντιληπτό ακουμπώντας το δοκίμιο αμέσως μετά το πείραμα-η θερμοκρασία του έχει ανέβει κατακόρυφα).

Συνολικά τα μοντέλα προσομοίωσης αποδίδουν σε πολύ καλό βαθμό τη συμπεριφορά των αντίστοιχων πειραματικών δοκιμίων παρ'όλες τις μικρές διαφορές που οφείλονται κυρίως στις εξιδανικευμένες παραμέτρους σχεδιασμού. Τα μοτίβα κατάρρευσης και τα χαρακτηριστικά μεγέθη ταιριάζουν αρκετά με του πειράματος.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Οι καταστροφικές καταπονήσεις αποτελούν σημαντικότατο και ταχέως αναπτυσσόμενο κομμάτι της σύγχρονης βιομηχανίας. Οι απαιτήσεις για ασφάλεια καθιστούν την έρευνα και την μελέτη του crashworthiness αναγκαία. Παρακάτω παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση πάνω στο κομμάτι αυτό.

Ο βασικότερος παράγοντας σε τέτοιου είδους μελέτες είναι η επαναληψιμότητα. Για τους σκοπούς της εργασίας αυτής δεν υπήρχε δυνατότητα να γίνουν πάρα πολλά πειράματα. Για να έχουμε πιο ασφαλή συμπεράσματα λοιπόν θα πρέπει να γίνουν περισσότερα πειράματα σε κάθε τύπο δοκιμίου. Επίσης θα μπορούσαν να γίνουν μελέτες σε αντίστοιχα δοκίμια αλλάζοντας το πάχος τους και μελετώντας την απορρόφηση ενέργειας σε κάθε περίπτωση. Ακόμη θα μπορούσαμε να αλλάξουμε υλικό κατασκευής των δοκιμίων και να δούμε πως αυτό ανταποκρίνεται συγκριτικά με το χάλυβα της παρούσας εργασίας. Τέλος αλλαγές θα μπορούσαν να γίνουν τόσο στα μεγέθη και το σχήμα της διατομής, στο ύψος του δοκιμίου αλλά και γενικότερα στο σχήμα αυτού. Ενδιαφέρουσα παράμετρος προς διερεύνηση, επιπρόσθετα, είναι και η διεύθυνση της φόρτισης/καταπόνησης σε σχέση με τον κεντρικό διαμήκη άξονα του κελύφους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (Π.Ο.Υ). Παγκόσμια έκθεση για την οδική ασφάλεια 2018.

[2] astynomia.com

[3] europarl.eu

[4] Lu g, Yu T Energy Absorption of Structures and Materials. Cambridge: Woodhead Publishing;2003

[5] Jacobs G, Aeron-Thomas A. Εκτιμώντας τους παγκόσμιους θανάτους των δρόμων. Crowthorne, Ηνωμένο Βασίλειο: Labor Research Research Laboratory; 2000 (Έκθεση TLR 445)(αναφέρεται στις 4/11/2019).

[6] T Khalil and P. Du Bois, Finite element analytical techniques and applications to structural design, Vehicle crashworthiness and occupant protection, Michigan: American Iron and Steel Institute 2004.

[7] el.wikipedia.com/wiki/Μέθοδος_πεπερασμένων_στοιχείων.

[8] U. Seiffert and L. Wech, Automotive safety handbook, SAE International, Warrendale, Pa, 2007.

[9] lstc.com

[10] N. Jones, Structural Impact, Cambridge University Press, 1997.

[11] J. McQuaid and N. Jones, ‘‘A re-examination of Andrews research on impact of railway axles, ‘‘International Journal of Impact Engineering 22(7), pp. 727-738, 1999.

[12] N. Jones, ‘‘Several phenomena in structural crashworthiness’’ European Journal of Mechanics/ A Solids 22(5), pp 693-707, 2003.

[13] Βενετσάνος Ο, Πειραματική διερεύνηση διπλοκέλυφου συστήματος απορρόφησης ενέργειας έναντι κρουστικής φόρτισης, Αθήνα: Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ;2018

[14] Mamalis AG, Manolakos DE, Demosthenous GA and Ioannidis MB, Crashworthiness of Composite Thin-Walled Structural Components, Technomic Publishing Company, Lancaster, Pennsylvania, 1998

[15] Λεωνίδας Ε. Βουρεξιάκης: ‘Μελέτη της συμπεριφοράς μη κανονικών λεπτότοιχων πθραμίδων σε αξονική καταπόνηση’, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών ,ΑΘΗΝΑ 2015

[16] Λυκάκος Σταύρος: ‘Μελέτη των μηχανισμών κατάρευσης κελυφών υβριδικής γεωμετρίας’ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών , ΑΘΗΝΑ 2016