

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ



ΔΠΜΣ: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ, ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς μη κανονικών λεπτότοιχων πυραμίδων σε αξονική καταπόνηση.



ΤΣΕΡΤΟΥ ΕΙΡΗΝΗ

Επιβλέπων καθηγητής: Μανωλάκος Δημήτριος, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα ,Οκτώβριος 2016

Στον Αλέξανδρο

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Δ. Μανωλάκου στα πλαίσια του ΔΠΜΣ: «Συστήματα Αυτοματισμού».

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υπεύθυνο καθηγητή μου Δ. Μανωλάκο τόσο για την ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας όσο και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Ευχαριστώ θερμά τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον καθηγητή Γ.-Χ. Βοσνιάκο και τον λέκτορα Α. Μαρκόπουλο για την κριτική ανάγνωση του κειμένου και την τιμή που μου έκαναν να συμμετάσχουν στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Π.Κωστάζο, Δρ. Μηχ. και μέλος Ε.Δι.Π., για την άψογη συνεργασία και την ουσιαστική συνεισφορά του στην συγγραφή αυτής της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους μου που με στηρίζουν σε κάθε μου όνειρο.

«The analytical method approach is also known as the Scientists way to solve any problem while the Numerical method is the Engineers way to solve the problem».

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ABSTRACT.....	7
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	8
ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	8
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	12
1. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	12
2. Ο κώδικας Ls-Dyna και οι εφαρμογές του	12
3. Το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Αξιολόγησης Νέων Αυτοκινήτων: Μια ιστορική αναδρομή	13
3.1 Οι απαρχές των δοκιμών στην Ευρώπη	14
3.2 Η εξέλιξη της ασφάλειας των οχημάτων	15
4. Απορροφητές ενέργειας	15
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	18
1. Διαδικασία μοντελοποίησης στον κώδικα Ls-Dyna.....	18
2. Μονάδες μέτρησης.....	20
3. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών	20
4. Κριτήριο επιλογής για το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων	22
5. Παρουσίαση υπολογιστικών και πειραματικών δοκιμών.....	23
5.1 Δοκίμιο 40-100-1	23
5.2 Δοκίμιο 40-100-2	26
5.3 Δοκίμιο 40-100-3	29
5.4 Δοκίμιο 40-100-4	32
5.5 Δοκίμιο 40-100-5	35
5.6 Δοκίμιο 40-100-6	38
5.7 Δοκίμιο 40-100-7	41
5.8 Δοκίμιο 40-100-8	44
5.9 Δοκίμιο 40-100-9	47
5.10 Δοκίμιο 40-100-10	50
5.11 Δοκίμιο 50-100-1	53
5.12 Δοκίμιο 50-100-2	56
5.13 Δοκίμιο 50-100-3	59

5.14 Δοκίμιο 60-100-1	62
5.15 Δοκίμιο 60-100-2	65
5.16 Δοκίμιο 60-100-3	68
6 Συμπεράσματα.....	71
6.1 Γενική σύγκριση.....	71
6.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων για τα θεωρητικά δοκίμια.....	71
6.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων για τα πειραματικά δοκίμια.....	72
6.4 Σύγκριση πειράματος – προσομοίωσης	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	74

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο μελέτης της διεξαχθείσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων της αξονικής καταπόνησης 16 κόλουργων λεπτότοιχων μη κανονικών πυραμίδων τετραγωνικής διατομής. Η διαφοροποίηση των 16 δοκιμίων έγκειται στην γεωμετρία. Πιο συγκεκριμένα, οι διαστάσεις και η θέση του άνω άκρου σε σχέση με τη βάση των κόλουργων πυραμίδων είναι οι παράμετροι που αλλάζουν. Τα δοκίμια είναι κατασκευασμένα από μαλακό χάλυβα. Για την εξαγωγή των αριθμητικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

Λέξεις κλειδιά: Πεπερασμένα στοιχεία, Ls-Dyna, αξονική καταπόνηση, κόλουργες πυραμίδες, απορρόφηση ενέργειας, λεπτότοιχες μεταλλικές κατασκευές

ABSTRACT

The aim of this diplomatic thesis is the comparison between experiments and computer results of 16 thin-walled square frusta under axial loading. The 16 pieces have different geometry. Specifically, the pieces vary to the upper base length and the position of the center of the upper base. The pieces are made by mild steel. The deformation process of the pieces has been studied using the finite element code LS – DYNA.

Key words: Finite elements, Ls-Dyna, axial loading, taper, energy absorption, thin-walled metallic structures

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Η εξέλιξη των αξιολογήσεων των οχημάτων...15

Πίνακας 2: Μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν στο Ls-Prepost...20

Πίνακας 3: Συνοπτικός πίνακας σύγκρισης Μέσου Φορτίου και Ενέργεια Απορρόφησης προσομοίωσης και πειράματος...71

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-1...24

Διάγραμμα 2 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-2...27

Διάγραμμα 3 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-3...30

Διάγραμμα 4 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-4...33

Διάγραμμα 5 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-5...36

Διάγραμμα 6 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-6...39

Διάγραμμα 7 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-7...42

Διάγραμμα 8 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-8...45

Διάγραμμα 9 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-9...48

Διάγραμμα 10 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-10...51

Διάγραμμα 11 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 50-100-1...54

Διάγραμμα 12 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 50-100-2...57

Διάγραμμα 13 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 50-100-3...60

Διάγραμμα 14 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 60-100-1...63

Διάγραμμα 15 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 60-100-2...66

Διάγραμμα 16 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 60-100-3...69

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση της μετατροπής των βαθμών ελευθερίας από άπειρο σε πεπερασμένο αριθμό...12

Εικόνα 2: Δημιουργία της σχεδιαστικής οντότητας του μοντέλου με το πρόγραμμα Ls-prepost...18

Εικόνα 3: Δημιουργία πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο...18

- Εικόνα 4: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δύο ελασμάτων από μαλακό χάλυβα...19
- Εικόνα 5: Κάτοψη πυραμιδικού δοκιμίου 40-100 με απεικόνιση των θέσεων του κέντρου της άνω βάσης ...20
- Εικόνα 6: Κάτοψη πυραμιδικού δοκιμίου 50-100 με απεικόνιση των θέσεων του κέντρου της άνω βάσης...21
- Εικόνα 7: Κάτοψη πυραμιδικού δοκιμίου 60-100 με απεικόνιση των θέσεων του κέντρου της άνω βάσης...21
- Εικόνα 8: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-1...23
- Εικόνα 9: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-1...24
- Εικόνα 10: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-2...26
- Εικόνα 11: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-2...27
- Εικόνα 12: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-3...29
- Εικόνα 13: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-3...30
- Εικόνα 14: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-4...32
- Εικόνα 15: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-4...33
- Εικόνα 16: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-5...35
- Εικόνα 17: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-5...36
- Εικόνα 18: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-6...38
- Εικόνα 19: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-6...39
- Εικόνα 20: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-7...41
- Εικόνα 21: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-7...42
- Εικόνα 22: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-8...44
- Εικόνα 23: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-8...45
- Εικόνα 24: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-9...47
- Εικόνα 25: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-9...48
- Εικόνα 26: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-10...50
- Εικόνα 27: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-10...51
- Εικόνα 28: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 50-100-1...53
- Εικόνα 29: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 50-100-1...54

- Εικόνα 30: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 50-100-2...56
- Εικόνα 31: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 50-100-2...57
- Εικόνα 32: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 50-100-3...59
- Εικόνα 33: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 50-100-3...60
- Εικόνα 34: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 60-100-1...62
- Εικόνα 35: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 60-100-1...63
- Εικόνα 36: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 60-100-2...65
- Εικόνα 37: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 60-100-2...66
- Εικόνα 38: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 60-100-3...68
- Εικόνα 39: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 60-100-3...69

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δεκαετία του 90 θεωρείται η εποχή της «αναγέννησης» για την ασφάλεια των αυτοκινήτων. Κατά τη διάρκεια αυτής της δεκαετίας, η ασφάλεια των επιβατών καθιερώθηκε ως κορυφαίο προωθητικό χαρακτηριστικό εμπορίας για τα μηχανοκίνητα οχήματα. Η αντοχή στις συγκρούσεις του οχήματος, που μετράται με τυποποιημένες δοκιμές πρόσκρουσης, κατατάσσεται στο ίδιο επίπεδο με την ποιότητα, το στυλ, την οδηγική άνεση και συμπεριφορά, και την οικονομία καυσίμου. Τα χαρακτηριστικά ασφαλείας, όπως οι δομές εμπρόσθιας και πλευρικής απορρόφησης ενέργειας, οι αερόσακοι, τα καθίσματα με ενσωματωμένες ζώνες ασφαλείας, και διάφορες άλλες συσκευές αποφυγής σύγκρουσης είναι μερικά μόνο από τα χαρακτηριστικά ασφαλείας που προσφέρεται ως στάνταρ εξοπλισμός σε πολλά οχήματα. Μελλοντικές συσκευές ασφαλείας μπορεί να περιλαμβάνουν «έξυπνες» συσκευές ασφαλείας που θα προστατεύουν τους επιβαίνοντες με βάση την ηλικία, το φύλο, τη θέση στο όχημα, τη σφοδρότητα σύγκρουσης κ.ά. Η εστίαση στην ασφάλεια των οχημάτων, που σημαίνει κατασκευαστική αντοχή στις συγκρούσεις και μείωση των επιβαίνοντων θανάτων και βλαβών, είναι αναμφίβολα η απάντηση στις απαιτήσεις των καταναλωτών.

Η ιστορία της ανάλυσης της αντοχής στις συγκρούσεις μπορεί να χαρακτηριστεί καλύτερα από δύο περιόδους ιστορικής εξέλιξης: μια πρώτη περίοδο, που εκτείνεται από το 1970 έως περίπου το 1985 και μία δεύτερη περίοδο που ξεκινάει με την εισαγωγή των υπερυπολογιστών.

Ο όρος Crashworthiness (συμπεριφορά κατασκευών έναντι πρόσκρουσης) πρωτοεμφανίστηκε στην Αεροναυπηγική βιομηχανία και υποδηλώνει το μέτρο της ικανότητας μιας δομής, και οποιουδήποτε από τα επιμέρους στοιχεία της, για την προστασία των επιβαίνοντων σε συντριβές. Ομοίως, στην Αυτοκινητοβιομηχανία, η αντοχή στις συγκρούσεις υποδηλώνει το μέτρο της διαρθρωτικής ικανότητας του οχήματος για πλαστική παραμόρφωση και ταυτόχρονα διατήρηση επαρκούς χώρου επιβίωσης για τους επιβαίνοντες σε τροχαία που αφορούν λογικά φορτία επιβράδυνσης. Η αντοχή στις συγκρούσεις οχημάτων και η ασφάλεια των επιβατών παραμένουν μεταξύ των πιο σημαντικών προκλήσεων του σχεδιασμού στον τομέα της Αυτοκινητοβιομηχανίας. Αρχικά τα αμαξώματα κατασκευάζονταν από ξύλο και ο στόχος της αντοχής στις συγκρούσεις ήταν να αποφευχθεί η παραμόρφωση του οχήματος όσο το δυνατόν περισσότερο. Με τα χρόνια, οι δομές του αμαξώματος εξελίχθηκαν και πλέον στόχος είναι οι προοδευτικές ζώνες παραμόρφωσης για να απορροφηθεί μέρος της κινητικής ενέργειας της συντριβής με μορφή πλαστικής παραμόρφωσης.

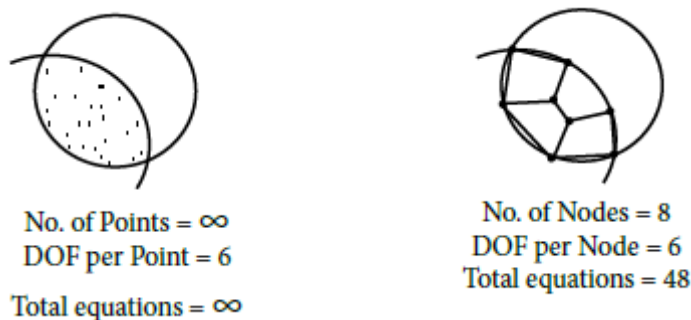
Πλέον, το εξελιγμένο λειτουργικό και λογισμικό των υπολογιστών δίνει τη δυνατότητα στους μηχανικούς σχεδιασμού να αξιοποιούν μεγάλη ποικιλία εργαλείων, που αφορά το σχεδιασμό σύγχρονων δομών, για την κάλυψη των αυξανόμενων απαιτήσεων. Τα εργαλεία αυτά περιλαμβάνουν απλά μοντέλα ελατηρίου-μάζας, μοντέλα στοιχείων δοκού, μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κ.ά. Επίσης, τα εργαλεία αυτά ποικίλουν σε πολυπλοκότητα, αλλά βασίζονται στις ίδιες αρχές της μηχανικής, στην διατήρηση της μάζας, ορμής και ενέργειας.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (**Finite Element Method**) είναι η πιο δημοφιλής αριθμητική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα των αριθμητικών μεθόδων είναι η προσεγγιστική λύση πραγματικών πολύπλοκων προβλημάτων. Λόγω των υποθέσεων που γίνονται, τα αποτελέσματα πρέπει να επιβεβαιώνονται πειραματικά ή ακόμη και αναλυτικά. Η κύρια χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η προσεγγιστική λύση μερικών διαφορικών εξισώσεων σε πολύπλοκα ορισμένα πεδία τα οποία μπορούν να αλλάζουν με τον χρόνο.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων κάνει υπολογισμούς σε περιορισμένο (πεπερασμένο) αριθμό σημείων και στη συνέχεια παρεμβάλλει τα αποτελέσματα για ολόκληρο το πεδίο (επιφάνεια ή όγκο). Κάθε συνεχές αντικείμενο έχει άπειρους βαθμούς ελευθερίας και δεν είναι δυνατόν να λυθεί το πρόβλημα σε αυτή τη μορφή. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μειώνονται οι βαθμοί ελευθερίας από το άπειρο στο πεπερασμένο, με τη βοήθεια της διακριτοποίησης (κόμβοι και στοιχεία).[1]



Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση της μετατροπής των βαθμών ελευθερίας από άπειρο σε πεπερασμένο αριθμό

2. Ο κώδικας Ls-Dyna και οι εφαρμογές του

Το LS-DYNA είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήσης και επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων ρεαλιστικών προβλημάτων. Χρησιμοποιείται στις βιομηχανίες οχημάτων, στην αεροναυπηγική, στην κατασκευή κτιρίων, στο στρατό, στην βιομηχανικές κατασκευές και στην βιοτεχνολογία.

Το LS-DYNA χρησιμοποιείται ευρέως στις αυτοκινητοβιομηχανίες με σκοπό την ανάλυση του σχεδιασμού των οχημάτων. Με το LS-DYNA μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια η συμπεριφορά του οχήματος κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης καθώς και η επίδραση της πρόσκρουσης στους επιβάτες του οχήματος.

Η σπουδαιότητα του LD-DYNA έγκειται στην εξοικονόμηση χρόνου και χρημάτων, καθώς οι εταιρείες οχημάτων και οι προμηθευτές τους μπορούν να αποφύγουν τη δοκιμή πρωτοτύπων οχημάτων.

Μερικές από τις εξειδικευμένες λειτουργίες της αυτοκινητοβιομηχανίας που μελετώνται είναι οι παρακάτω [2]:

- Ζώνες προστασίας οχημάτων
- Αισθητήρες
- Επιταχυνσιόμετρα
- Αερόσακοι

Μια άλλη πολύ ευρέως χρησιμοποιούμενη εφαρμογή του LS-DYNA είναι η μορφοποίηση των μετάλλων και κυρίως οι κατεργασίες επιπέδου ελάσματος. Το LS-DYNA προβλέπει με ακρίβεια τις τάσεις και τις παραμορφώσεις στο μέταλλο, και καθορίζει αν το μέταλλο θα αποτύχει. Επίσης, υποστηρίζει την προσαρμοστική διακριτοποίηση και βελτιώνει το πλέγμα κατά την ανάλυση, όπως απαιτείται, για να αυξηθεί η ακρίβεια και η εξοικονόμηση χρόνου.

Στις εφαρμογές για μορφοποίηση μετάλλων περιλαμβάνονται τα εξής:

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

Στις αεροναυπηγικές εφαρμογές περιλαμβάνονται τα παρακάτω:

- Λάμα συγκράτησης
- Προσκρούσεις πτηνών (παρμπρίζ, λεπίδα του κινητήρα)
- Ανάλυσης αστοχίας

Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν:

- Δοκιμή πίπτουσας μάζας
- Σχεδιασμός δοχείων αποθήκευσης και μεταφοράς
- Σχεδιασμός ηλεκτρονικών στοιχείων
- Μορφοποίηση γυαλιού
- Πλαστικά (σχηματισμός καλουπιού και μορφοποίηση με φύσημα)
- Εμβιομηχανική (καρδιακές βαλβίδες)
- Κοπή μετάλλων
- Σεισμική μηχανική
- Ανάλυσης αστοχίας
- Αθλητικός εξοπλισμός (μπαστούνια του γκολφ, μπάλες του γκολφ, ρόπαλα του μπέιζμπολ, κράνη)
- Πολιτικού μηχανικού (υπεράκτιες πλατφόρμες, κλπ)

3.Το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Αξιολόγησης Νέων Αυτοκινήτων: Μια ιστορική αναδρομή

Κατά την τελευταία δεκαετία, το πρόγραμμα Euro NCAP (European New Car Assessment Programme) έχει γίνει συνώνυμο των τεστ συγκρούσεων (crash test) και των αξιολογήσεων σχετικά

με την ασφάλεια. Κατά την ίδια περίοδο, το συνολικό ποσοστό των οδικών θανάτων στην ΕΕ των 28 έχει μειωθεί περίπου κατά το ένα τέταρτο, παρά τη σημαντική αύξηση του όγκου της οδικής κυκλοφορίας.[3] Ένας σημαντικός παράγοντας είναι ότι τα αυτοκίνητα στην Ευρώπη έχουν γίνει πολύ πιο ασφαλή, εν μέρει λόγω της απόκρισης του κλάδου της αυτοκινητοβιομηχανίας σε πρωτοβουλίες όπως το Euro NCAP.

Το Euro NCAP παρέχει στους καταναλωτές αυτοκίνησης μια ρεαλιστική και αντικειμενική αξιολόγηση των επιδόσεων ασφάλειας για τα πιο δημοφιλή αυτοκίνητα που πωλούνται στην Ευρώπη. Επί του παρόντος, η οργάνωση έχει 12 μέλη που εκπροσωπούν τους πολίτες και τους καταναλωτές σε ολόκληρη την Ευρώπη. Στα μέλη ανήκουν το Ηνωμένο Βασίλειο, η Γερμανία, η Γαλλία, η Σουηδία, η Ολλανδία, το Λουξεμβούργο και η περιφερειακή κυβέρνηση της Καταλονίας, η Διεθνής Ομοσπονδία Αυτοκινήτου, λέσχες αυτοκινήτων (Allgemeiner Deutscher Automobil-Club (ADAC) και Automobile Club d'Italia), η Διεθνής Ένωση καταναλωτών και το Κέντρο Έρευνας Ασφάλισης Αυτοκινήτων και Επισκευής Thatcham. Στα 18 χρόνια της ύπαρξής του, το Euro NCAP δημοσίευσε βαθμολογίες για πάνω από 500 διαφορετικά οχήματα: superminis, οικογενειακά αυτοκίνητα και οχήματα πολλαπλών χρήσεων, roadsters, οχήματα ελεύθερου χρόνου, pick-up φορτηγά, υβρίδια και, πρόσφατα, πλήρη ηλεκτρικά οχήματα. [4]

3.1Οι απαρχές των δοκιμών στην Ευρώπη

Από τις αρχές της δεκαετίας του εβδομήντα, μια σειρά από ευρωπαϊκές κυβερνήσεις, μέσω της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Πειραματικών Οχημάτων (EEVC) [5], συνεργάστηκαν για την ανάπτυξη των διαδικασιών και του εξοπλισμού για δοκιμές με στόχο την αξιολόγηση διαφόρων πτυχών της ασφάλειας κατά τη διάρκεια ενός αυτοκινητιστικού δυστυχήματος.

Έως τα μέσα του 1990, η έρευνα αυτή είχε ως αποτέλεσμα εντελώς νέες διαδικασίες των crash test για την προστασία των επιβατών σε μετωπικές και πλευρικές συγκρούσεις των οχημάτων, και μια διαδικασία δοκιμής για την αξιολόγηση της προστασίας των πεζών από τη μετωπική σύγκρουση με αυτοκίνητο. Εκείνη τη περίοδο, η μοναδική πλήρους κλίμακας δοκιμή πρόσκρουσης που απαιτούνταν από την ευρωπαϊκή νομοθεσία ήταν ένα πλήρους πλάτους άκαμπτου μπλοκ σχεδιασμένο μόνο για τον έλεγχο της διείσδυσης της κολόνας του τιμονιού σε μετωπική σύγκρουση.

Το 1979, η Εθνική Υπηρεσία Οδική Διοίκηση Ασφάλειας άρχισε το πρόγραμμα Αξιολόγησης Νέων Αυτοκινήτων (NCAP) [6], όπου τα αυτοκίνητα δοκιμάστηκαν στη μετωπική σύγκρουση με ταχύτητα πρόσκρουσης 35 μίλια ανά ώρα.

Την ίδια περίπου εποχή, δημοσιεύθηκαν μια ενιαία σειρά δοκιμών μετωπικής σύγκρουσης, που χρηματοδοτείται από κοινού από το Υπουργείο Μεταφορών του Ηνωμένου Βασιλείου (DFT) και του οργανισμού Διεθνών Δοκιμών (International Testing), χρησιμοποιώντας τη διαδικασία δοκιμής μετωπικής σύγκρουσης της επιτροπής EEVC. [7]

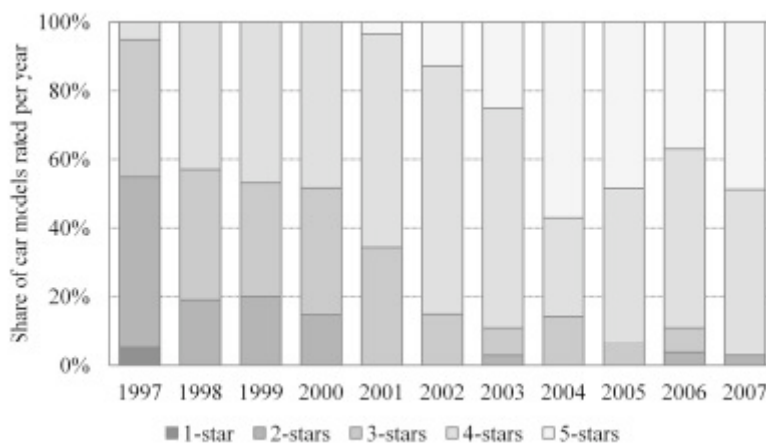
Τον Νοέμβριο του 1996, η Σουηδική Εθνική Οδική Διοίκηση (SNRA), η Ομοσπονδία Internationale de l'Automobile (FIA) [8] και ο οργανισμός Διεθνή Δοκιμές ήταν οι πρώτοι οργανισμοί που εντάχθηκαν στο Υπουργείο Μεταφορών του Ηνωμένου Βασιλείου (DFT) με το νεοσύστατο πρόγραμμα Ευρώ NCAP.[9] Οι ίδιες διαδικασίες της επιτροπής EEVC, θα αποτελέσουν τη βάση της μελλοντικής νομοθεσίας καθώς επίσης νέα πρωτόκολλα δοκιμής και αξιολόγησης αναπτύχθηκαν για εμπρόσθια και πλευρική πρόσκρουση όπως και για την προστασία των πεζών.

Τον Οκτώβριο του 1998, νέες οδηγίες, με βάση τις συστάσεις της επιτροπής ΕΕVC, σχετικά με τη μετωπική και πλευρική σύγκρουση των οχημάτων άρχισαν να εφαρμόζονται για όλα τα νέα οχήματα. Κατά το ίδιο έτος, το Euro NCAP αποκτά νομικό καθεστώς, όταν έγινε μια διεθνής ένωση βάσει του βελγικού δικαίου. Από το σχηματισμό του Euro NCAP, η FIA πήρε το προβάδισμα στην προώθηση του προγράμματος. Κατά συνέπεια, περισσότερες ευρωπαϊκές κυβερνήσεις, λέσχες αυτοκινήτων και εκπρόσωποι από τον ασφαλιστικό κλάδο έχουν ενταχθεί στο Euro NCAP όλα αυτά τα χρόνια. Ο Επιχειρησιακός έλεγχος του Euro NCAP μετακινήθηκε από το Ηνωμένο Βασίλειο σε μια πλήρους απασχόλησης γραμματεία με έδρα τις Βρυξέλλες το 1999.

3.2Η εξέλιξη της ασφάλειας των οχημάτων

Από το 1997 και μετά, οι νέες παρτίδες των αποτελεσμάτων των δοκιμών δημοσιεύονταν περίπου δύο φορές το χρόνο και οι κατασκευαστές αυτοκινήτων, πέρα από τις αρχικές τους επιφυλάξεις, άρχισαν να υποστηρίζουν τον έλεγχο των δικών τους οχημάτων. Τον Ιούνιο του 2001 ήταν η πρώτη φορά που απονεμήθηκαν 5 αστέρια για την προστασία των επιβατών. Μετά από αυτήν την επιτυχία, οι κατασκευαστές έθεταν στόχο τα 5 αστέρια για όλα τα νέα τους μοντέλα.

Πίνακας 1: Η εξέλιξη των αξιολογήσεων των οχημάτων



Από τον παραπάνω πίνακα μπορεί να διεξαχθεί το συμπέρασμα πώς οι απαιτήσεις για ασφαλή οχήματα τόσο των καταναλωτών όσο και των κατασκευαστών έχουν αυξηθεί στο έπακρο και συνεπώς όλο και περισσότερες μελέτες διεξάγονται πάνω στην βελτίωση της ασφάλειας. Οι απορροφητές ενέργειας είναι ένα από αυτά τα συστήματα που συμβάλλουν στην ασφάλεια ενός οχήματος και αποτελεί αντικείμενο μελέτης με ανεξάντλητο ενδιαφέρον.

4. Απορροφητές ενέργειας

Κατά το δεύτερο μισό του περασμένου αιώνα, ερευνήθηκε το αντίκτυπο ενός μεγάλου αριθμού μηχανικών προβλημάτων, ειδικά στον τομέα της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών στο πλαστικό εύρος παραμόρφωσης. Αυτό συνέβαλε στην καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας των μοντέλων διάχυσης της ενέργειας και της αποτυχίας κατά την πρόσκρουση τέτοιων δομών. Οι πληροφορίες αυτές είναι σημαντικές, προκειμένου να είναι δυνατή η κατασκευή ασφαλέστερων δομών καθώς επίσης να γίνει αξιολόγηση των υφισταμένων για συγκεκριμένες χρήσεις, μειώνοντας έτσι τις απώλειες στο ανθρώπινο δυναμικό και στους υλικούς πόρους. Η εφαρμογή αυτού του τομέα της μηχανικής είναι τώρα διαθέσιμη για χρήση σε μια ευρεία ποικιλία καταστάσεων, για παράδειγμα όπως είναι η αντοχή στις συγκρούσεις των οχημάτων (αυτοκινήτων, ανελκυστήρων,

αεροπλάνων, πλοίων, κ.ά.), στην κατάρρευση του σχεδιασμού φράγματος, στην ασφάλεια των πυρηνικών αντιδραστήρων, στη ζημία σύγκρουσης με τις οδικές γέφυρες, στις υπεράκτιες δομές, στα δεξαμενόπλοια υγρών καυσίμων κ.ά.

Οι απορροφητές ενέργειας είναι ένα σύστημα που μετατρέπει ολόκληρη ή μέρος της κινητικής ενέργειας σε μια άλλη μορφή ενέργειας. Η μετατρέπομενη ενέργεια είναι είτε αναστρέψιμη όπως η πίεση συμπιεστού υγρού ή η ενέργεια ελαστικής παραμορφώσεως σε στερεό, είτε αμετάκλητη, όπως στην πλαστική παραμόρφωση.

Κατά τον σχεδιασμό ενός καταρρεύσιμου απορροφητή, ο στόχος είναι η απορρόφηση της πλειοψηφίας της κινητικής ενέργειας από το στοιχείο με αμετάκλητο τρόπο. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ότι οι ανθρώπινοι τραυματισμοί και οι βλάβες του εξοπλισμού θα ελαχιστοποιηθούν. Η μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε πλαστική παραμόρφωση εξαρτάται από το μέγεθος και την μέθοδο εφαρμογής των φορτίων, τα ποσοστά μετάδοσης και τις ιδιότητες των υλικών.

Στα στοιχεία απορρόφησης ενέργειας περιλαμβάνονται διάφορες δομές όπως μεταλλικά τύμπανα, σωλήνες κυκλικής διατομής, τετραγωνικοί και κυματοειδείς σωλήνες, πολυγωνικές και κωνικές στήλες, κομβοελάσματα κλπ.. Επίσης, για την ενίσχυση αυτών των στοιχείων γίνεται πλήρωση με υγρά, ροκανίδια, άμμο και αφροί πολυμερών ή μετάλλων.

Κάθε σύστημα έχει τα δικά του χαρακτηριστικά συνεπώς επιβάλλεται ξεχωριστή μελέτη της απόκρισης του σε κρουστικά φορτία.

Η μελέτη της παραμόρφωσης των απορροφητών εστιάζει στις γεωμετρικές αλλαγές και στην αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων τρόπων παραμόρφωσης.[10]

Στη βιβλιογραφία, για την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού του απορροφητή ενέργειας, συναντά κανείς συνήθως σωλήνες από μαλακό χάλυβα. Ιδιαίτερα δημοφιλές είναι πλέον το αλουμίνιο το οποίο είναι ελαφρύτερο υλικό και συμβάλλει στην εξοικονόμηση του καυσίμου. [11]

Ως αποτέλεσμα της ανάγκης της αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών ζητημάτων, η έννοια «αλουμινοσκελετός» έχει γίνει όλο και πιο ελκυστική στο σχεδιασμό των οχημάτων για τους κατασκευαστές αυτοκινήτων. Κατά τη χρήση αλουμινίου στο σκελετό του οχήματος, η εξοικονόμηση βάρους φτάνει μέχρι και 25% σε σύγκριση με τις συμβατικές μεταλλικές κατασκευές. Αυτό έχει σαν συνέπεια την μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου και κατ'επέκταση χαμηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Επιπλέον, το αλουμίνιο έχει καλή αντοχή στη διάβρωση και μπορεί να ανακυκλωθεί. Η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί στην είσοδο είναι ίση με το 5% της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή πρωτογενούς αλουμινίου. [12]

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών σε πολλά άρθρα μελετάται η επίδοση στις συγκρούσεις πέρα των μεταλλικών δοκιμών και των σύνθετων ενισχυμένων με ίνες δοκιμών. Τα μεταλλικά δοκίμια απορροφούν ενέργεια συνήθως προσδεδυτικά με αναδίπλωση και κάμψη όσο χρόνο καταρρέουν τα τοιχώματα του δοκιμίου. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ενός τέτοιου μηχανισμού παραμόρφωσης είναι ότι ο ρυθμός απορρόφησης ενέργειας συγκεντρώνεται σε σχετικά στενές ζώνες, ενώ η υπόλοιπη δομή διατηρεί την ακαμψία. Σε σύγκριση με τα μέταλλα, τα περισσότερα σύνθετα καταρρέουν γενικά με ένα εύθραυστο τρόπο. «Αποτυγχάνουν» μέσω μιας

αλληλουχίας μηχανισμών κατάγματος που περιλαμβάνει κάταγμα ινών, ράγισμα μήτρας και πυρόλυση, αποσύνδεση των ινών-μήτρας, αποκόλληση και εσωτερικό διαχωρισμό. Οι υψηλές αναλογίες αντοχή προς βάρος και ακαμψία προς βάρος των σύνθετων υλικών αποτελεί κίνητρο στην αυτοκινητοβιομηχανία για την αντικατάσταση σταδιακά των μεταλλικών κατασκευών με κατασκευές από σύνθετα υλικά. [13] Η εισαγωγή των σύνθετων υλικών σε οχήματα όχι μόνο αυξάνει την απορρόφηση ενέργειας ανά μονάδα βάρους [14], αλλά επίσης ο θόρυβος και οι κραδασμοί μειώνονται, σε σύγκριση με τις δομές από χάλυβα ή αλουμίνιο. [15]

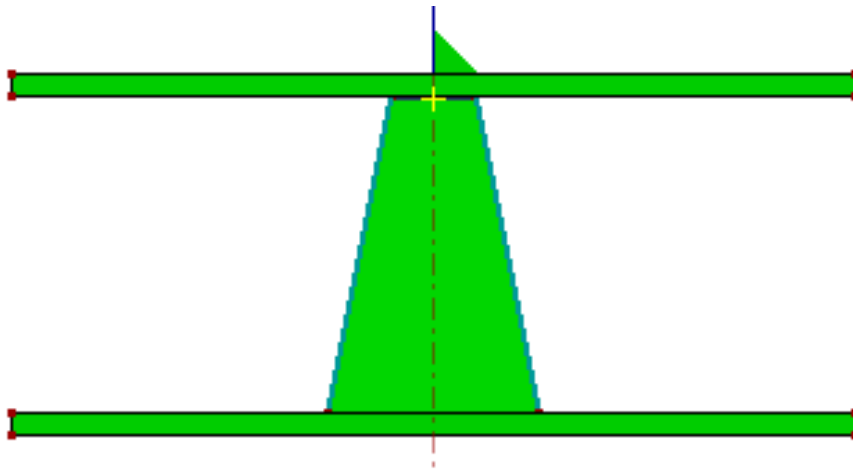
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Διαδικασία μοντελοποίησης στον κώδικα Ls-Dyna

Εν συντομία, η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

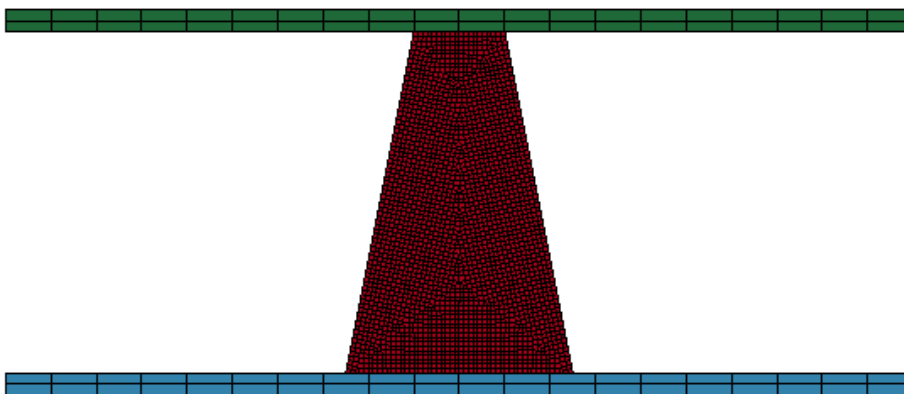
- Μοντελοποίηση (pre-processing)
- Επίλυση (solver)
- Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων (post-processing)

Αναλυτικότερα, η δημιουργία του μοντέλου ξεκινάει με την κατασκευή της Σχεδιαστικής Οντότητας. Η συγκεκριμένη γεωμετρία αποτελείται από τρία μέρη, την κόλουρη πυραμίδα και τις πλάκες συμπίεσης.



Εικόνα 2: Δημιουργία της σχεδιαστικής οντότητας του μοντέλου με το πρόγραμμα Ls-prepost

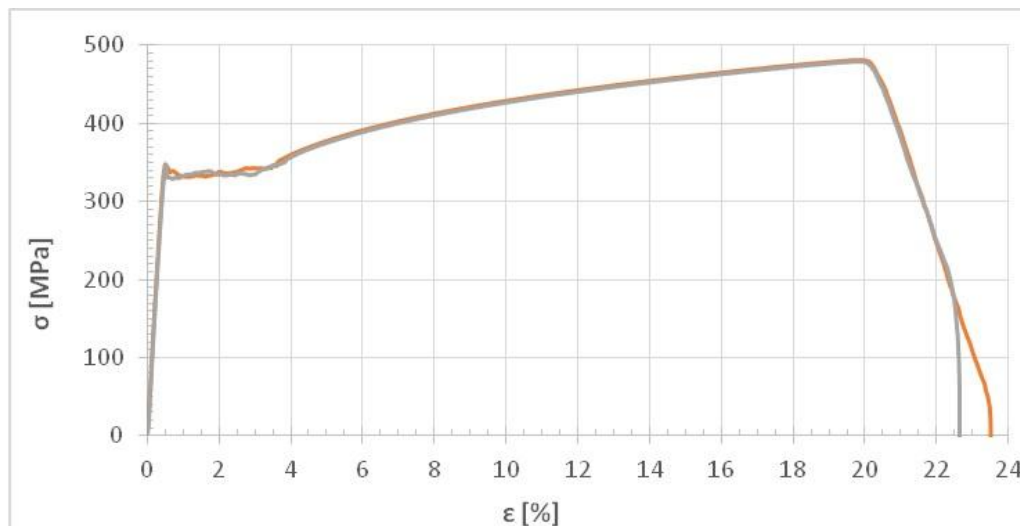
Εν συνεχεία, λαμβάνει χώρα η Διακριτοποίηση ή Πλεγματοποίηση (Meshing) της γεωμετρίας δηλαδή η δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 3: Δημιουργία πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο

Ακολουθεί ο ορισμός των υλικών (MATERIAL). Για τις πλάκες συμπίεσης χρησιμοποιήθηκε το υλικό MAT20_RIGID από την βιβλιοθήκη του Ls-Prepost και για την κόλουρη πυραμίδα το υλικό MAT24_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY. Η πάνω και η κάτω πλάκα συμπίεσης διαφοροποιούνται λόγω των βαθμών ελευθερίας (η κάτω πλάκα έχει περιορισμούς μετατόπισης και περιστροφής και

στις 3 κατευθύνσεις x,y,z, ενώ η πάνω πλάκα επιτρέπεται να μετατοπίζεται μόνο κατά z). Οι ιδιότητες του υλικού της κόλουρης πυραμίδας προσδιορίστηκαν πειραματικά (πυκνότητα μάζας-RO, μέτρο ελαστικότητας-E, λόγος Poisson-PR, όριο διαρροής-SIGY). Οι τιμές που εισήχθησαν στο μοντέλο προήλθαν από το διάγραμμα της εικόνας 4 . Το διάγραμμα κατασκευάστηκε μετά από δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού. Περιλαμβάνει δύο καμπύλες καθώς έγιναν δύο δοκιμές για επαλήθευση.



Εικόνα 4: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δύο ελασμάτων (για επιβεβαίωση επαναληψιμότητας) από μαλακό χάλυβα [16]

Το επόμενο στάδιο είναι ο ορισμός των ιδιοτήτων (SECTION) των πεπερασμένων στοιχείων. Για την κόλουρη πυραμίδα χρησιμοποιούνται στοιχεία κελύφους/SHELL ενώ για τις πλάκες συμπίεσης 3D στοιχεία/ SOLID. Στα στοιχεία κελύφους η προεπιλεγμένη διατύπωση κατά Belytschko-Tsay είναι ικανοποιητική και η πιο οικονομική επιλογή. Ο αριθμός των σημείων ολοκλήρωσης μέσω του πάχους του κελύφους ορίστηκε ίσος με 3 και επίσης ορίστηκε και το πάχος του στοιχείου κελύφους.

Στη συνέχεια, ορίζονται οι διεπιφάνειες επαφής (CONTACT) με σκοπό την αποφυγή της αλληλοδιείσδυσης. Σε αυτό το σημείο καταχωρούνται οι τιμές για τους συντελεστές τριβής. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ρεαλιστικές.

Έπειτα καθορίστηκαν οι συνθήκες κίνησης (BOUNDARY _PRESCRIBED MOTION RIGID) της πάνω πλάκας συμπίεσης. Η τιμή της ταχύτητας σύνθλιψης δόθηκε ίση με 1mm/ms (μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πειραματική, προκειμένου η ανάλυση να ολοκληρωθεί σε εύθετο χρόνο, λόγω της explicit αριθμητικής ανάλυσης του κώδικα).

Προτελευταίο βήμα είναι ο ορισμός του χρόνου διάρκειας του φαινομένου που αναλύεται (CONTROL_TERMINATION). Η τιμή που επιλέχθηκε ήταν 100 ms, που αντιστοιχεί σε συνολική βράχυνση του κελύφους (μετατόπιση της πλάκας συμπίεσης) κατά 100 mm.

Τέλος, ορίζονται η συχνότητα λήψης των φάσεων κατάρρευσης (DATABASE_BINARY D3 PLOT) και καταγραφής του φορτίου (DATABASE_RC-FORC).

2. Μονάδες μέτρησης

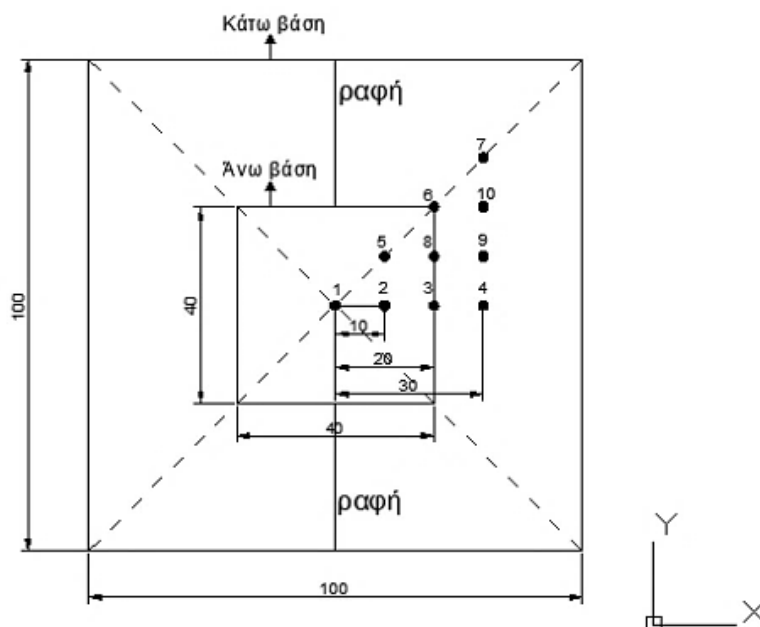
Ο ορισμός του συστήματος μονάδων για το Ls-Dyna είναι πρωτίστης σημασίας. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή γιατί εγκυμονεί κίνδυνος σύγχυσης κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στον πίνακα 2 :

Πίνακας 2: Μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν στο Ls-Prepost

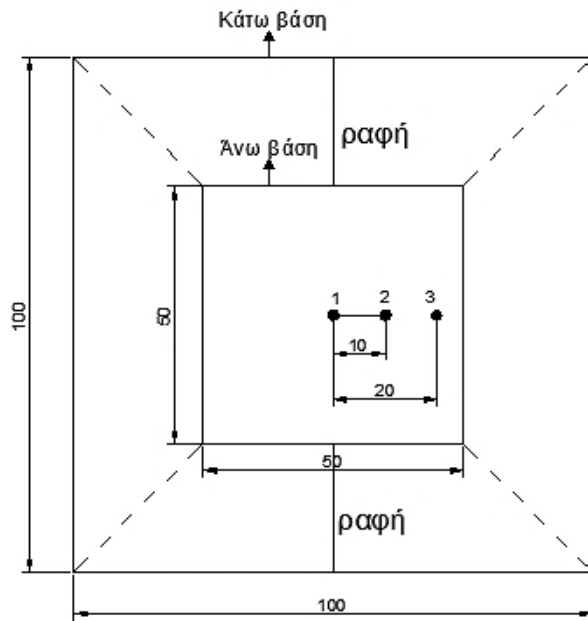
ΜΕΓΕΘΟΣ	ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
Μάζα	G
Μήκος	Mm
Χρόνος	Ms
Δύναμη	N
Πίεση	MPa
Ενέργεια	N*mm (mJ)

3. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών

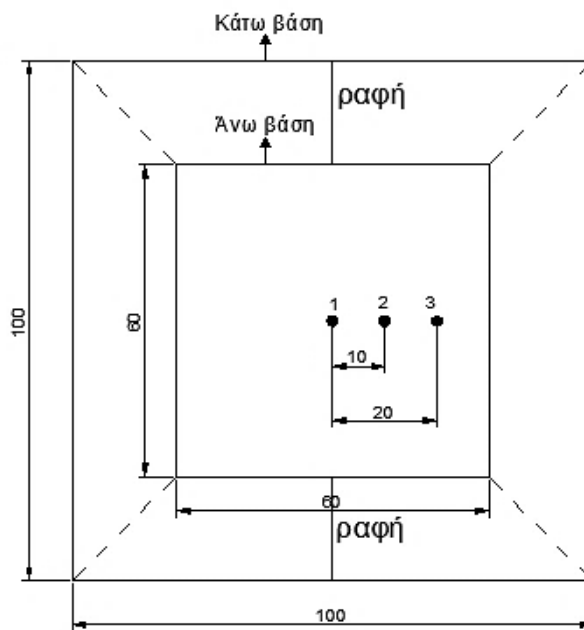
Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν ήταν τετραγωνικές πυραμίδες από χάλυβα (mild steel). Η διαφοροποίηση των δοκιμών που μελετούνται έγκειται στην αλλαγή του μεγέθους της πάνω βάσης και στην μεταβολή της εκκεντρότητας της πυραμίδας. Το κέντρο της άνω βάσης της πυραμίδας μετακινούνταν διαδοχικά στα σημεία 1-10 (Εικόνα 5), στα σημεία 1-3 (Εικόνα 6) και στα σημεία 1-3 (Εικόνα 7), τα οποία απέχουν μεταξύ τους κατά 10 mm είτε στην οριζόντια είτε στην κάθετη κατεύθυνση. Το ύψος των πυραμίδων είναι κοινό και ίσο με $L=150$ mm.



Εικόνα 5: Κάτοψη πυραμιδικού δοκιμίου 40-100 με απεικόνιση των θέσεων του κέντρου της άνω βάσης



Εικόνα 6: Κάτοψη πυραμιδικού δοκιμίου 50-100 με απεικόνιση των θέσεων του κέντρου της άνω βάσης



Εικόνα 7: Κάτοψη πυραμιδικού δοκιμίου 60-100 με απεικόνιση των θέσεων του κέντρου της άνω βάσης

4. Κριτήριο επιλογής για το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων

Σε εφαρμογές Crashworthiness (δηλαδή σε μεγάλες και πυκνές παραμορφώσεις), το ελάχιστο μέγεθος των στοιχείων και κατ' επέκταση η πυκνότητα του πλέγματος καθορίζεται βασικά από το πάχος του ελάσματος (αραιές ή πυκνές ζώνες μεγάλης παραμόρφωσης).

Στην προκειμένη περίπτωση το πάχος του ελάσματος ισούται με 1.5 mm γι' αυτό επιλέχθηκε το μέγεθος των στοιχείων ίσο με 2 mm.

Γενικά, αν επιλεγθεί μικρό μέγεθος τότε η διάταξη του πλέγματος θα είναι πιο πυκνή.

Επίσης, όσο πιο πυκνοί λοβοί αναμένονται τόσο πιο πυκνό πλέγμα απαιτείται.

5. Παρουσίαση υπολογιστικών και πειραματικών δοκιμών

5.1 Δοκίμιο 40-100-1



5.1.1 Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-1



$Dps_1=4\text{mm}$



$Dps_2=22\text{mm}$



$Dps_3=38\text{mm}$



$Dps_4=58\text{mm}$



$Dps_5=83.9\text{mm}$



$Dps_6=100\text{mm}$

Εικόνα 8: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-1

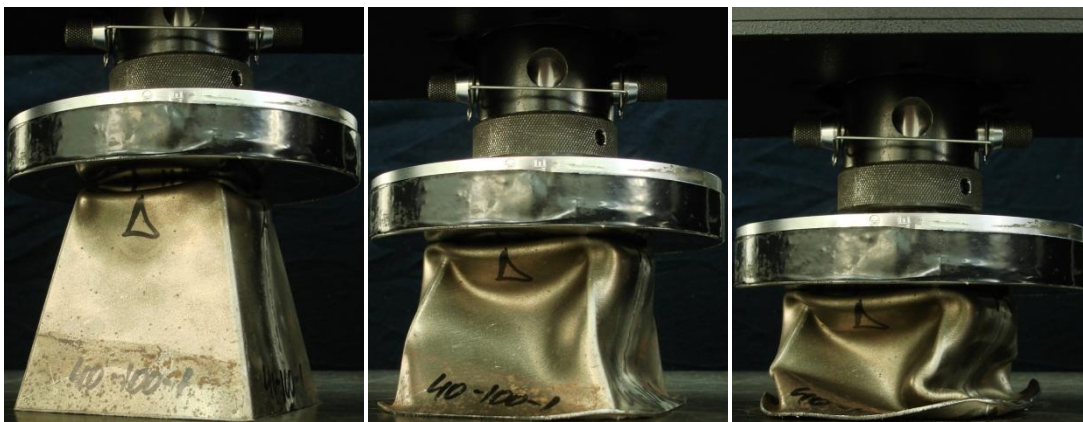
5.1.2 Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-1



$Dps_1 = 8.4\text{mm}$

$Dps_2 = 25.1\text{mm}$

$Dps_3 = 41.7\text{mm}$



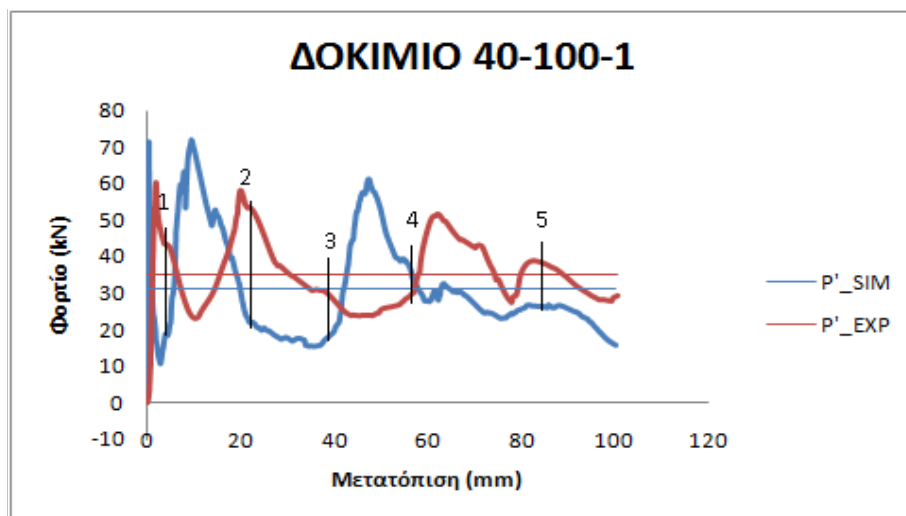
$Dps_4 = 59.1\text{mm}$

$Dps_5 = 76.1\text{mm}$

$Dps_6 = 100.4\text{mm}$

Εικόνα 9: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-1

5.1.3 Συγκριτικό διάγραμμα της απορρόφησης ενέργειας του υπολογιστικού και πειραματικού δοκιμίου 40-100-1



Διάγραμμα 1 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-1

5.1.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από το κοινό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης με ολοκλήρωση προκύπτει η ενέργεια που απορροφάται κατά την σύνθλιψη του δοκιμίου προσομοίωσης και του πειραματικού δοκιμίου.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν για το δοκίμιο 40-100-1 είναι τα εξής:

Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν η πλάκα συμπίεσης ή το έμβολο κατέλθει στα 100mm.

Η κατάρρευση των δοκιμίων είναι προοδευτική και ελεγχόμενη. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει από την μικρή διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και υπάρχει λιγότερο υλικό και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να καταρρεύσει.

Παρατηρούνται αυξομειώσεις του φορτίου με μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P'_{SIM}=31.10kN$ και $P'_{EXP}=35.2kN$.

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης για την προσομοίωση ($Eabs_{SIM}$) και για το πείραμα ($Eabs_{EXP}$) ανέρχεται στα **3110J** και **3500J** αντίστοιχα.

Η εξήγηση των αποκλίσεων αναλύεται διεξοδικά στην ενότητα 6.4.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο. Ο αριθμός των λοβών που σχηματίστηκαν είναι ίδιος τόσο για την προσομοίωση όσο και για το πείραμα.

Η ομοιότητα των δύο γραφημάτων είναι ικανοποιητική. Εμφανίζονται δύο μέγιστα φορτία και στα δύο γραφήματα. Το πρώτο μέγιστο σημείο και για τα δύο γραφήματα είναι υψηλότερο σε σχέση με το δεύτερο μέγιστο. Η εξήγηση είναι ότι στην αρχή της κατάρρευσης, όπου το δοκίμιο είναι άρτιο, απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια για τη σύνθλιψη του.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα κωνικά δοκίμια που μελετώνται έχουν ανομοιόμορφη διατομή (δηλαδή αυξανόμενη προς τα κάτω), συνεπώς - θεωρητικά - οι πρώτες κορυφές δεν θα αντιστοιχούν πάντα στο μέγιστο φορτίο, όπως συνηθίζεται να συμβαίνει με τις ομοιόμορφες διατομές, αφού, διαδοχικά όλο και μεγαλύτερες διατομές θα εμπλέκονται στην κατάρρευση. Όταν, παρόλα αυτά, οι επόμενες κορυφές δεν παρουσιάζονται υψηλότερες της αρχικής, οφείλεται στο ότι η διαφορά στο μέγεθος της διατομής είναι μικρή (μικρή λοξότητα πυραμίδας) σε συνδυασμό με το ότι το κέλυφος ήδη έχει υποστεί βλάβη (μόνιμη παραμόρφωση), οπότε δεν συμπεριφέρεται ως ακέραιο.

Όσον αφορά την αρχική κλίση των δύο καμπυλών, αναμενόμενο είναι η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης να είναι μεγαλύτερη από την κλίση της καμπύλης του πειράματος, διότι το θεωρητικό δοκίμιο είναι πιο στιβαρό. Η κατάσταση αυτή επαληθεύεται από το διάγραμμα.

5.2 Δοκίμιο 40-100-2



5.2.1 Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-2



$Dps_1=8\text{mm}$



$Dps_2=26\text{mm}$



$Dps_3=42\text{mm}$



$Dps_4=60\text{mm}$



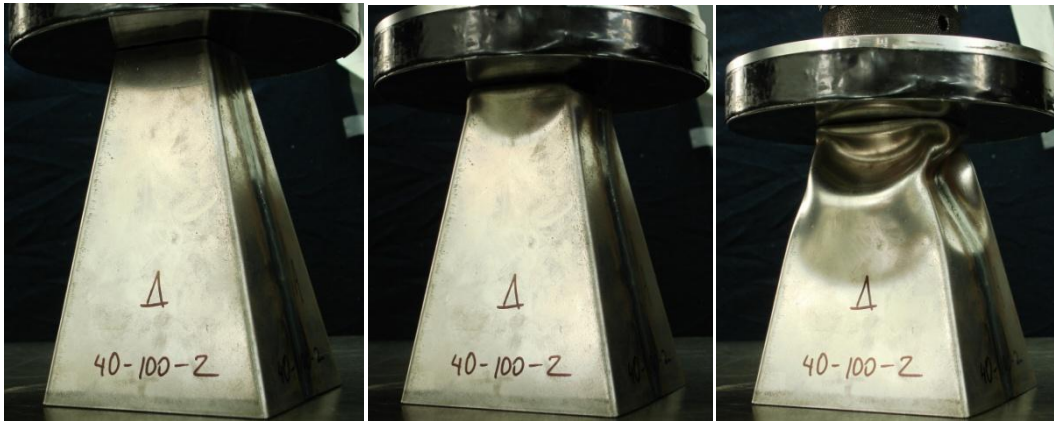
$Dps_5=78\text{mm}$



$Dps_6=100\text{mm}$

Εικόνα 10: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-2

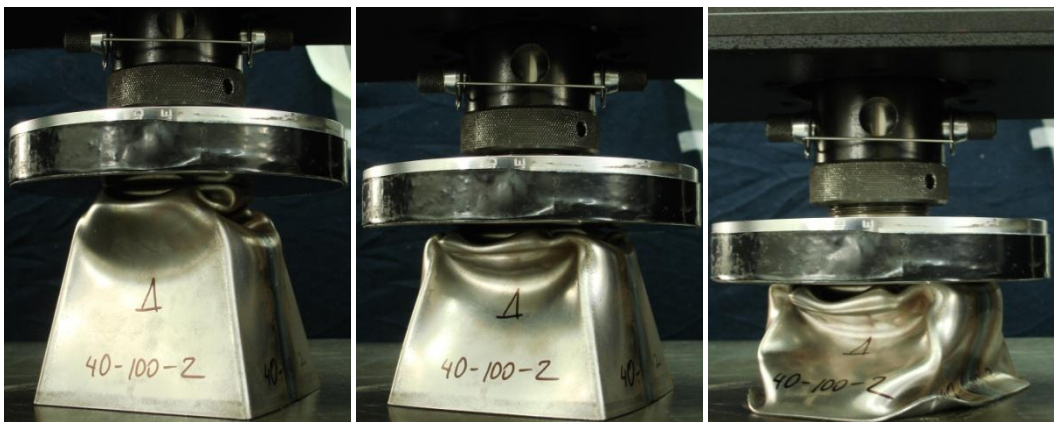
5.2.2 Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-2



$Dps_1=8.7\text{mm}$

$Dps_2=25.6\text{mm}$

$Dps_3=41.9\text{mm}$



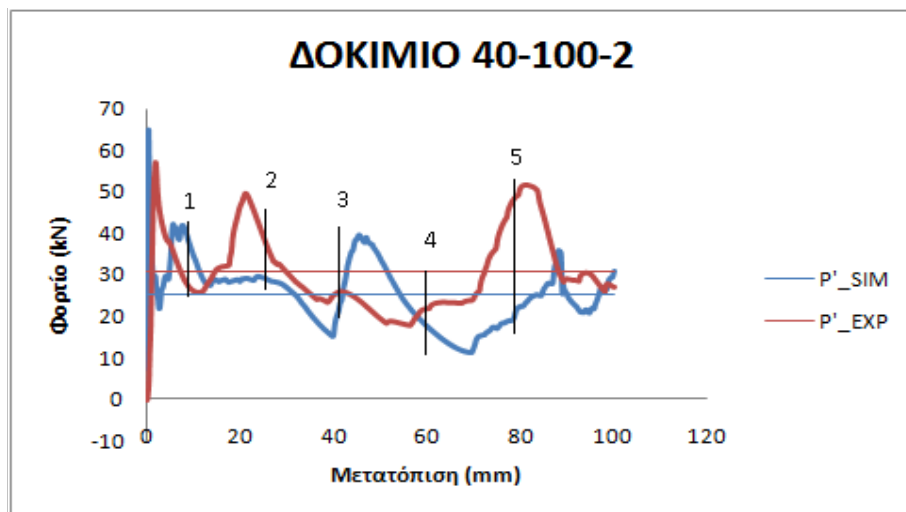
$Dps_4=59.1\text{mm}$

$Dps_5=78.8\text{mm}$

$Dps_6=100.1\text{mm}$

Εικόνα 11: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-2

5.2.3 Συγκριτικό διάγραμμα της απορρόφησης ενέργειας του υπολογιστικού και πειραματικού δοκιμίου 40-100-2



Διάγραμμα 2 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-2

5.2.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το δοκίμιο 40-100-2 είναι τα εξής:

Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν η πλάκα συμπίεσης ή το έμβολο κατέλθει στα 100mm.

Η κατάρρευση των δοκιμίων είναι προοδευτική και ελεγχόμενη. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει από την μικρή διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και υπάρχει λιγότερο υλικό και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να καταρρεύσει.

Παρατηρούνται αυξομειώσεις του φορτίου με μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο **P'_SIM=25.44kN** και **P'_EXP=30.7kN**.

Με ολοκλήρωση των καμπύλων προκύπτει η συνολική ενέργεια απορρόφησης για την προσομοίωση (**Eabs_SIM**) και για το πείραμα (**Eabs_EXP**), η οποία ανέρχεται στα **2544.43J** και **3100J** αντίστοιχα. Η μεγάλη διαφορά δεν οφείλεται σε λάθος του μοντέλου αλλά εμπίπτει στις αποκλίσεις που αναμένονται.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο.

Η ομοιότητα των δύο γραφημάτων δεν είναι ικανοποιητική. Εμφανίζονται τέσσερα και τρία μέγιστα φορτία στο διάγραμμα της προσομοίωσης και του πειράματος αντίστοιχα.

Η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη από την κλίση της καμπύλης του πειράματος όπως είναι αναμενόμενο.

5.3 Δοκίμιο 40-100-3



5.3.1 Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-3



$Dps_1=8\text{mm}$



$Dps_2=26\text{mm}$



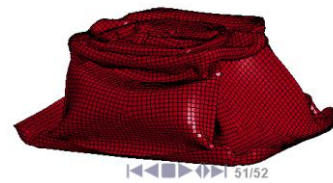
$Dps_3=42\text{mm}$



$Dps_4=58\text{mm}$



$Dps_5=84\text{mm}$



$Dps_6=100\text{mm}$

Εικόνα 12: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-3

5.3.2 Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-3



$Dps_1=8.4\text{mm}$

$Dps_2=25.5\text{mm}$

$Dps_3=42.1\text{mm}$



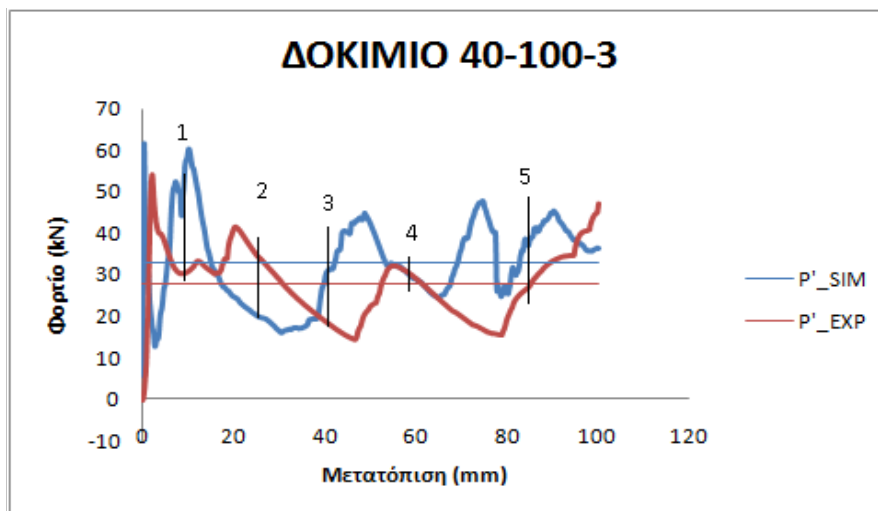
$Dps_4=58.7\text{mm}$

$Dps_5=83.7\text{mm}$

$Dps_6=100.1\text{mm}$

Εικόνα 13: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-3

5.3.3 Συγκριτικό διάγραμμα της απορρόφησης ενέργειας του υπολογιστικού και πειραματικού δοκιμίου 40-100-3



Διάγραμμα 3: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-3

5.3.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το δοκίμιο 40-100-3 είναι τα εξής:

Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν η πλάκα συμπίεσης ή το έμβολο κατέλθει στα 100mm.

Η κατάρρευση των δοκιμίων είναι προοδευτική και ελεγχόμενη. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει από την μικρή διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και υπάρχει λιγότερο υλικό και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να καταρρεύσει.

Παρατηρούνται αυξομειώσεις του φορτίου με μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο **P'_SIM=32.94kN** και **P'_EXP=27.8kN**.

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης για την προσομοίωση (**Eabs_SIM**) και για το πείραμα (**Eabs_EXP**) ανέρχεται στα **3294J** και **2800J** αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα αυτό είναι το αναμενόμενο μιας και το υπολογιστικό μοντέλο θεωρείται εξιδανικευμένο κατ' επέκταση η ενέργεια που θα απορροφήσει πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή του πειραματικού δοκιμίου. Η διαφορά στη τιμή είναι αποδεκτή. Οι αποκλίσεις στις τιμές μεταξύ υπολογιστικού και πειραματικού μοντέλου αναλύονται διεξοδικά στην ενότητα 6.4.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης διακρίνονται οι φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο.

Παρατηρούνται 5 μέγιστα φορτία κατά την σύνθλιψη του υπολογιστικού μοντέλου και 4 μέγιστα φορτία για το πειραματικό δοκίμιο.

Η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη από την κλίση της καμπύλης του πειράματος όπως είναι αναμενόμενο.

5.4 Δοκίμιο 40-100-4



5.4.1 Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-4



$Dps_1=8\text{mm}$



$Dps_2=26\text{mm}$



$Dps_3=42\text{mm}$



$Dps_4=60\text{mm}$



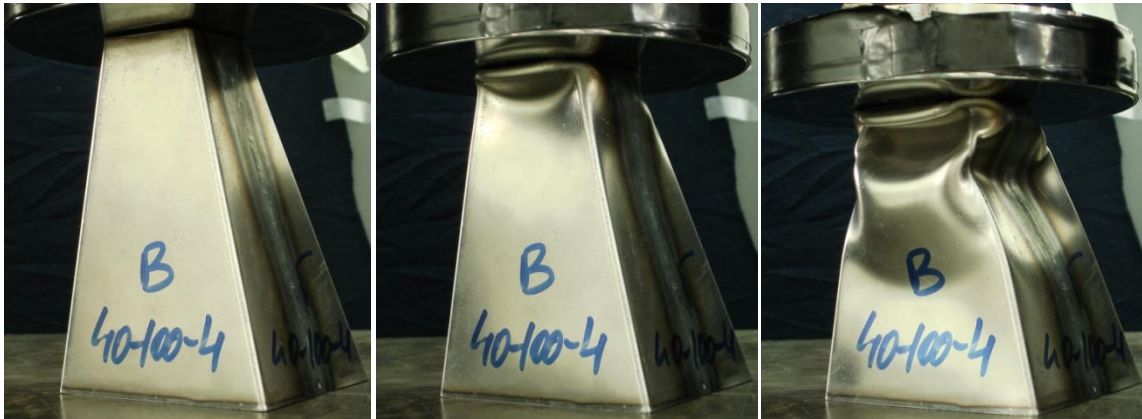
$Dps_5=76\text{mm}$



$Dps_6=100\text{mm}$

Εικόνα 14: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-4

5.4.2 Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-4



$Dps_1=8.4\text{mm}$

$Dps_2=25.1\text{mm}$

$Dps_3=41.7\text{mm}$



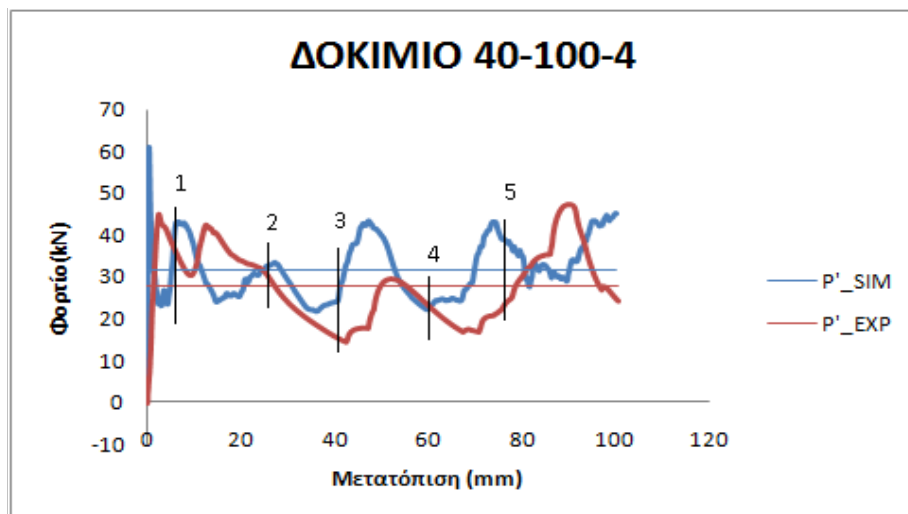
$Dps_4=59.1$

$Dps_5=76.1\text{mm}$

$Dps_6=100.4\text{mm}$

Εικόνα 15: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-4

5.4.3 Συγκριτικό διάγραμμα της απορρόφησης ενέργειας του υπολογιστικού και πειραματικού δοκιμίου 40-100-4



Διάγραμμα 4 : Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-4

5.4.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Το δοκίμιο 40-100-4, το οποίο έχει το κέντρο της άνω βάσης μετατοπισμένο προς τη μια πλευρά, σχηματίζοντας έτσι μια κατακόρυφη πλευρά στην πυραμίδα.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το δοκίμιο 40-100-4 είναι τα εξής:

Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν η πλάκα συμπίεσης ή το έμβολο κατέλθει στα 100mm.

Η κατάρρευση των δοκιμίων είναι προοδευτική και ελεγχόμενη. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει από την μικρή διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και υπάρχει λιγότερο υλικό και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να καταρρεύσει.

Παρατηρούνται αυξομειώσεις του φορτίου με μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο **P'_SIM=31.79 kN** και **P'_EXP=27.9 kN**.

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης για την προσομοίωση (**Eabs_SIM**) και για το πείραμα (**Eabs_EXP**) ανέρχεται στα **3179J** και **2800J** αντίστοιχα.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο.

Επίσης, η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη από την κλίση της καμπύλης του πειράματος όπως είναι αναμενόμενο.

Οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν είναι εντός φυσιολογικών ορίων, συνεπώς καταλήγουμε στο ότι το μοντέλο αποτελεί μια πολύ καλή προσομοίωση της πειραματικής δοκιμής.

5.5 Δοκίμιο 40-100-5



5.5.1 Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-5



$Dps_1=8\text{mm}$



$Dps_2=26\text{mm}$



$Dps_3=42\text{mm}$



$Dps_4=60\text{mm}$



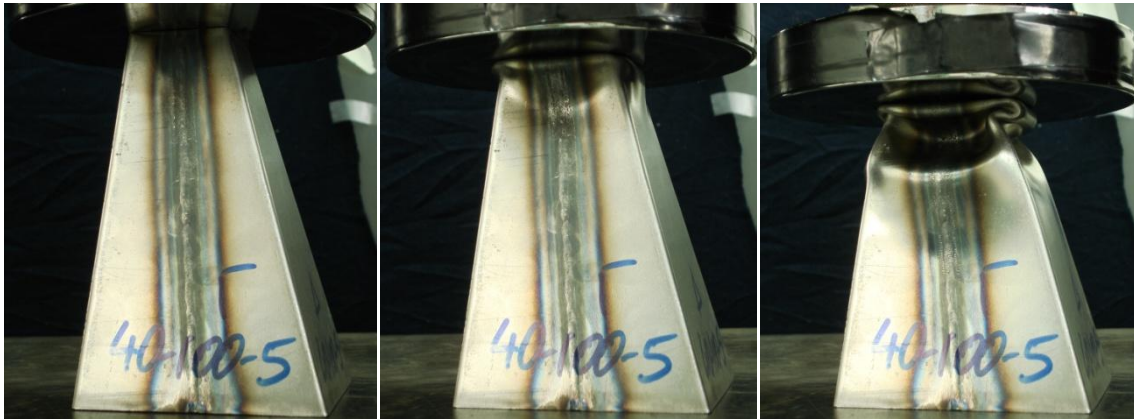
$Dps_5=76\text{mm}$



$Dps_6=100\text{mm}$

Εικόνα 16: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-5

5.5.2 Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-5



$Dps_1=8.4\text{mm}$

$Dps_2=25.6\text{mm}$

$Dps_3=41.8\text{mm}$



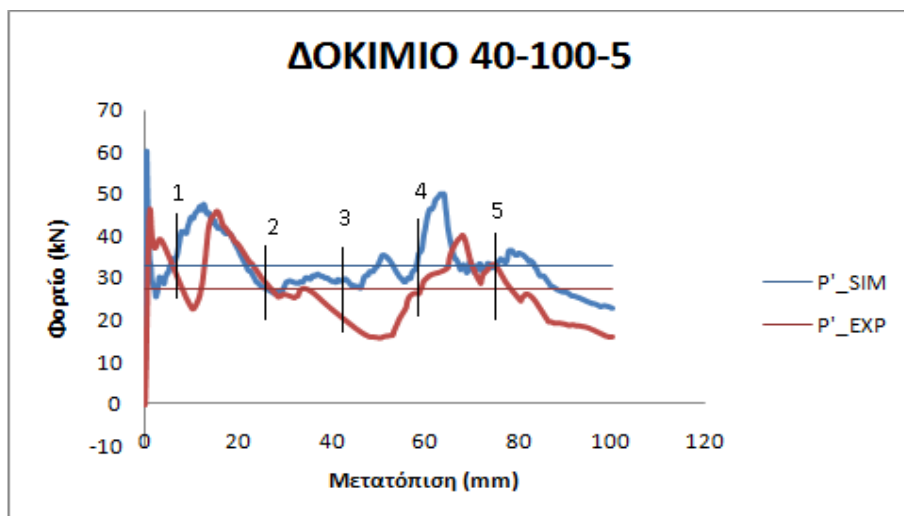
$Dps_4=58.7\text{mm}$

$Dps_5=76.1\text{mm}$

$Dps_6=100.1\text{mm}$

Εικόνα 17: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-5

5.5.3 Συγκριτικό διάγραμμα της απορρόφησης ενέργειας του υπολογιστικού και πειραματικού δοκιμίου 40-100-5



Διάγραμμα 5: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-5

5.5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Το δοκίμιο 40-100-5 έχει το κέντρο της άνω βάσης μετατοπισμένο προς τη διαγώνιο.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το δοκίμιο 40-100-5 είναι τα εξής:

Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν η πλάκα συμπίεσης ή το έμβολο κατέλθει στα 100mm.

Η κατάρρευση των δοκιμών είναι προσδευτική και ελεγχόμενη. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει από την μικρή διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και υπάρχει λιγότερο υλικό και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να καταρρεύσει.

Παρατηρούνται αυξομειώσεις του φορτίου με μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο **P'_SIM=32.9 kN** και **P'_EXP=27.2 kN**.

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης για την προσομοίωση (**Eabs_SIM**) και για το πείραμα (**Eabs_EXP**) ανέρχεται στα **3290 J** και **2700 J** αντίστοιχα.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο.

Η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη από την κλίση της καμπύλης του πειράματος όπως είναι αναμενόμενο.

Οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν είναι εντός φυσιολογικών ορίων, συνεπώς καταλήγουμε στο ότι το μοντέλο αποτελεί μια πολύ καλή προσομοίωση της πειραματικής δοκιμής.

5.6 Δοκίμιο 40-100-6



5.6.1 Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-6



$Dps_1=8\text{mm}$



$Dps_2=26\text{mm}$



$Dps_3=42\text{mm}$



$Dps_4=58\text{mm}$



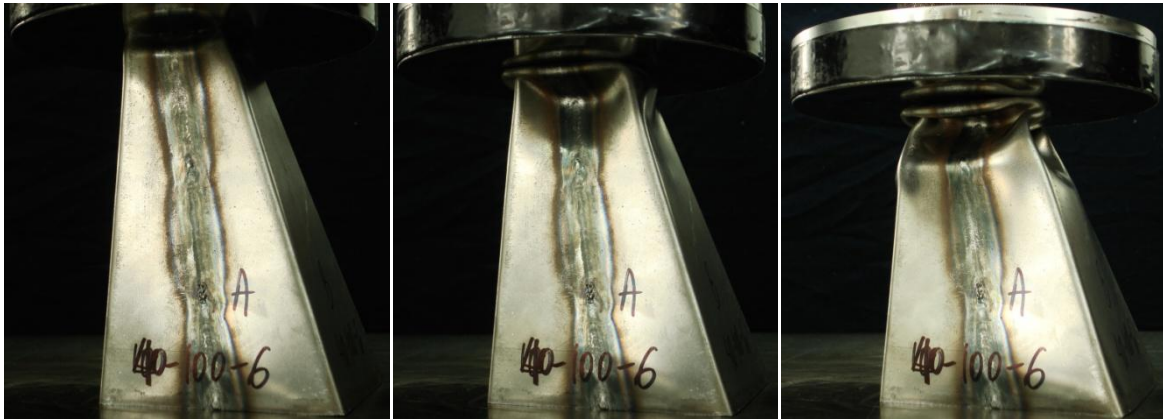
$Dps_5=76\text{mm}$



$Dps_6=92\text{mm}$

Εικόνα 18: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-6

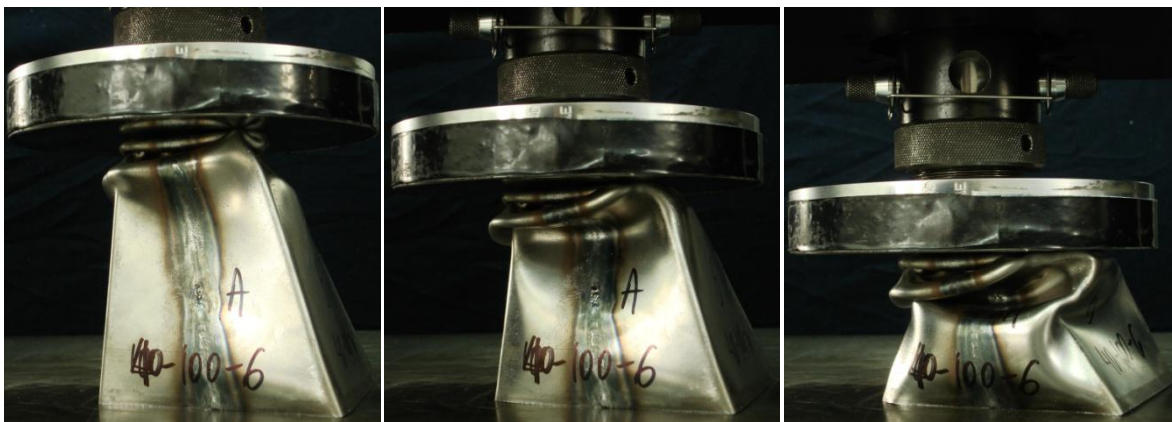
5.6.2 Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-6



Dps₁=8.3mm

Dps₂=25.1mm

Dps₃=41.7mm



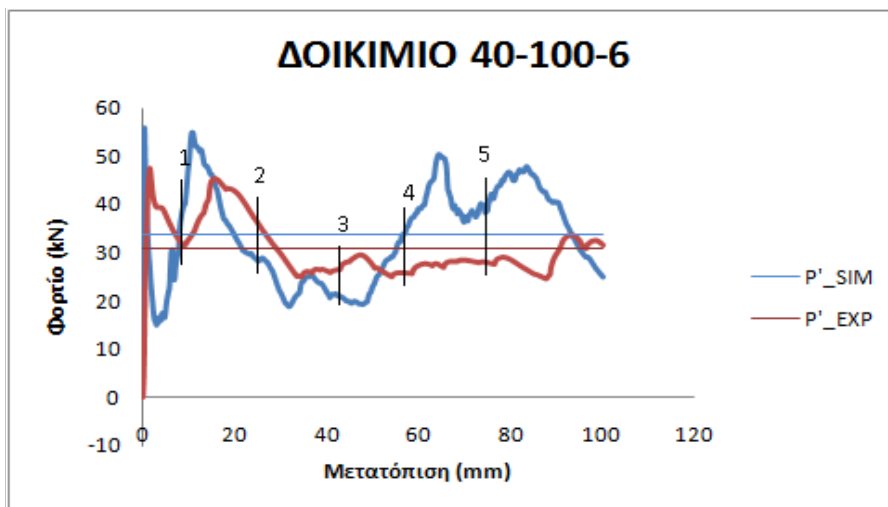
Dps₄=58.5mm

Dps₅=75.2mm

Dps₆=91.8mm

Εικόνα 19: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-6

5.6.3 Συγκριτικό διάγραμμα της απορρόφησης ενέργειας του υπολογιστικού και πειραματικού δοκιμίου 40-100-6



Διάγραμμα 6: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-6

5.6.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Το δοκίμιο 40-100-6 έχει ομοίως με το προηγούμενο το κέντρο της άνω βάσης μετατοπισμένο προς τη διαγώνιο.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το δοκίμιο 40-100-6 είναι τα εξής:

Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν η πλάκα συμπίεσης ή το έμβολο κατέλθει στα 100mm.

Η κατάρρευση των δοκιμών είναι προοδευτική και ελεγχόμενη. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει από την μικρή διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και υπάρχει λιγότερο υλικό και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να καταρρεύσει.

Παρατηρούνται αυξομειώσεις του φορτίου με μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P'_{SIM}=33.58 \text{ kN}$ και $P'_{EXP}=30.9 \text{ kN}$. Το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τις προηγούμενες δοκιμές τόσο για την προσομοίωση όσο και για το πείραμα.

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης για την προσομοίωση (E_{abs_SIM}) και για το πείραμα (E_{abs_EXP}) ανέρχεται στα 3358 J και 3100 J αντίστοιχα. Από όλα τα προηγούμενα δοκίμια αυτή είναι η καλύτερη συμπεριφορά από πλευράς απορρόφησης ενέργειας.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο.

Η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη από την κλίση της καμπύλης του πειράματος όπως είναι αναμενόμενο.

Οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν είναι εντός φυσιολογικών ορίων, συνεπώς καταλήγουμε στο ότι το μοντέλο αποτελεί μια πολύ καλή προσομοίωση της πειραματικής δοκιμής.

5.7 Δοκίμιο 40-100-7



5.7.1 Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-7



$Dps_1=8\text{mm}$



$Dps_2=26\text{mm}$



$Dps_3=42\text{mm}$



$Dps_4=58\text{mm}$



$Dps_5=76\text{mm}$



$Dps_6=92\text{mm}$

Εικόνα 20: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-7

5.7.2 Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-7



Dps₁=8.7mm

Dps₂=25.2mm

Dps₃=41.6mm



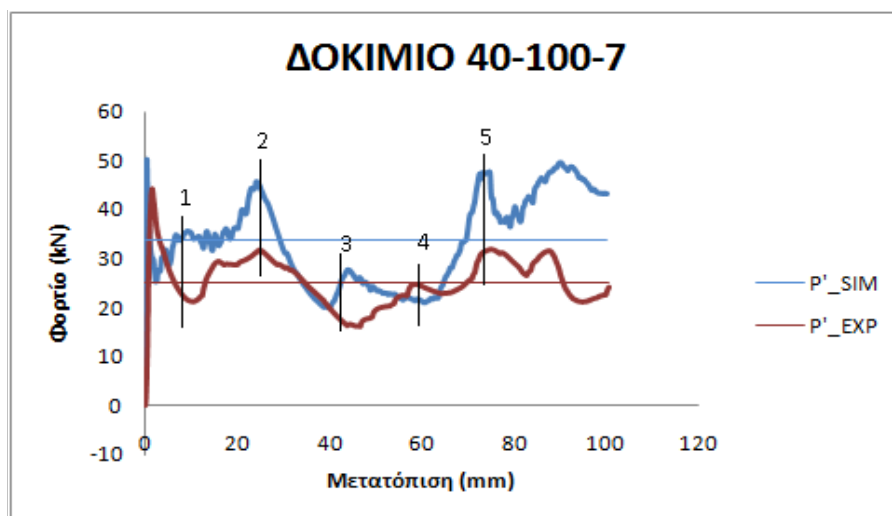
Dps₄=58.6mm

Dps₅=75.4mm

Dps₆=91.5mm

Εικόνα 21: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-7

5.7.3 Συγκριτικό διάγραμμα της απορρόφησης ενέργειας του υπολογιστικού και πειραματικού δοκιμίου 40-100-7



Διάγραμμα 7: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-7

5.7.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Το δοκίμιο 40-100-7 έχει το κέντρο της άνω βάσης πλήρως μετατοπισμένο ως προς τη διαγώνιο, δημιουργώντας έτσι δυο κατακόρυφες πλευρές στην πυραμίδα.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το δοκίμιο 40-100-7 είναι τα εξής:

Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν η πλάκα συμπίεσης ή το έμβολο κατέλθει στα 100mm.

Η κατάρρευση των δοκιμών είναι προοδευτική και ελεγχόμενη. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει από την μικρή διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και υπάρχει λιγότερο υλικό και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να καταρρεύσει.

Παρατηρούνται αυξομειώσεις του φορτίου με μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο **P'_SIM=33.74 kN** και **P'_EXP=25.2 kN**. Το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τις προηγούμενες δοκιμές για την προσομοίωση αλλά το μικρότερο για το πείραμα. Η διαφορά αυτή είναι μη αποδεκτή αλλά δικαιολογείται με το γεγονός ότι στο συγκεκριμένο πείραμα η κάτω βάση δεν είχε καλή επαφή με την πλάκα του μηχανήματος αξονικής σύνθλιψης.

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης για την προσομοίωση (**Eabs_SIM**) και για το πείραμα (**Eabs_EXP**) ανέρχεται στα **3374 J** και **2500 J** αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα αυτό αν εξεταστεί από τη σκοπιά ως απορροφητής ενέργειας, παρουσιάζει τη χειρότερη πειραματική συμπεριφορά.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο.

Η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη από την κλίση της καμπύλης του πειράματος όπως είναι αναμενόμενο.

5.8 Δοκίμιο 40-100-8



5.8.1 Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-8



Dps1=8mm



Dps2=26mm



Dps3=42mm



Dps4=58mm



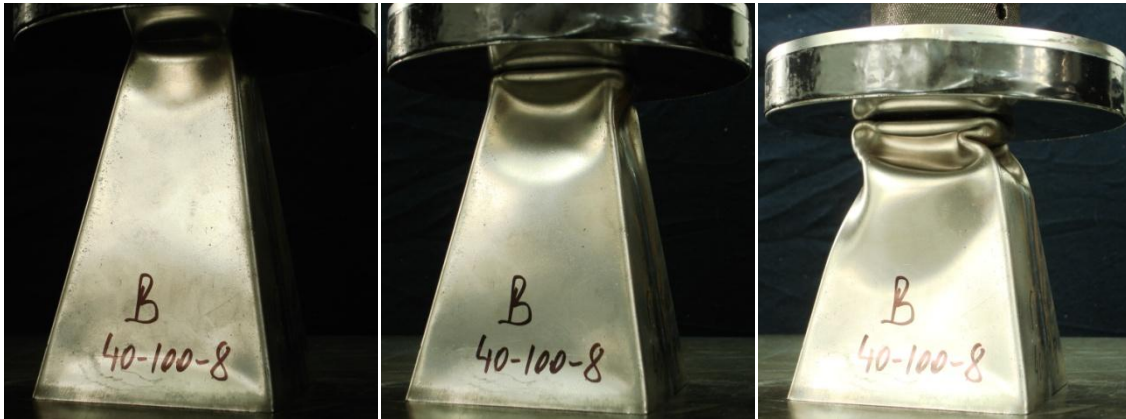
Dps5=74mm



Dps6=92mm

Εικόνα 22: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-8

5.8.2 Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-8



$Dps_1=8.4\text{mm}$

$Dps_2=25\text{mm}$

$Dps_3=42.1\text{mm}$



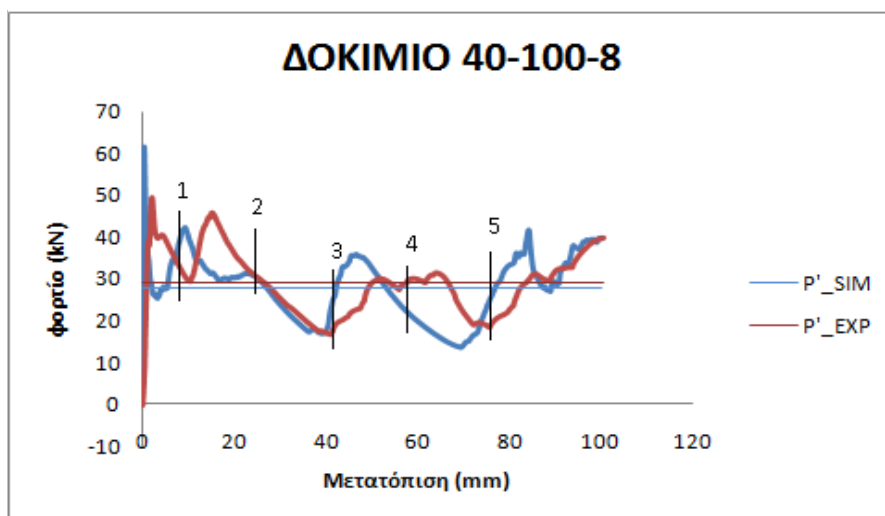
$Dps_4=58.4\text{mm}$

$Dps_5=75.2\text{mm}$

$Dps_6=91.7\text{mm}$

Εικόνα 23: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-8

5.8.3 Συγκριτικό διάγραμμα της απορρόφησης ενέργειας του υπολογιστικού και πειραματικού δοκιμίου 40-100-8



Διάγραμμα 8: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-8

5.8.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Το δοκίμιο 40-100-8 έχει μετατοπισμένο το κέντρο της άνω βάσης και προς τις δυο κάθετες πλευρές της κάτω βάσης.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το δοκίμιο 40-100-8 είναι τα εξής:

Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν η πλάκα συμπίεσης ή το έμβολο κατέλθει στα 100mm.

Η κατάρρευση των δοκιμών είναι προοδευτική και ελεγχόμενη. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει από την μικρή διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και υπάρχει λιγότερο υλικό και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να καταρρεύσει.

Παρατηρούνται αυξομειώσεις του φορτίου με μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο **P'_SIM=28 kN** και **P'_EXP=29.2 kN**.

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης για την προσομοίωση (**Eabs_SIM**) και για το πείραμα (**Eabs_EXP**) ανέρχεται στα **2801 J** και **2900 J** αντίστοιχα. Οι δύο καμπύλες μοιάζουν αρκετά.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο.

Η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη από την κλίση της καμπύλης του πειράματος όπως είναι αναμενόμενο.

5.9 Δοκίμιο 40-100-9



5.9.1 Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-9



$Dps_1=8\text{mm}$



$Dps_2=26\text{mm}$



$Dps_3=42\text{mm}$



$Dps_4=58\text{mm}$



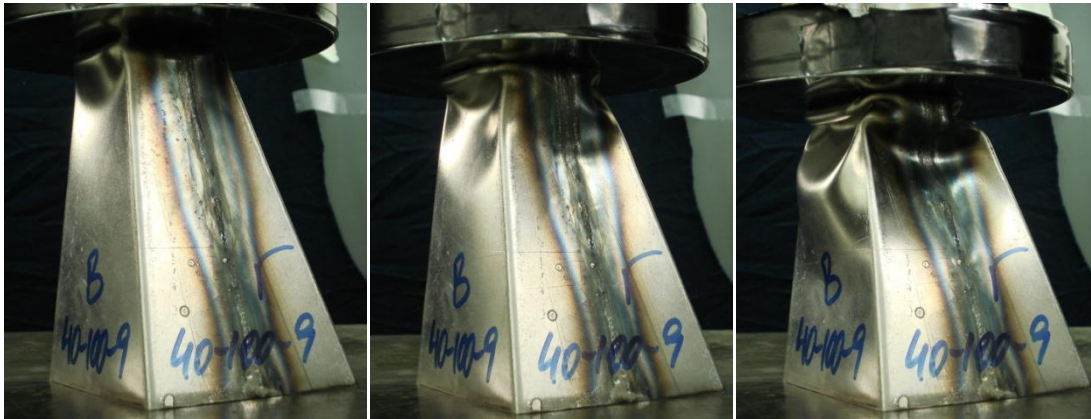
$Dps_5=76\text{mm}$



$Dps_6=92\text{mm}$

Εικόνα 24: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-9

5.9.2 Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-9



$Dps_1=8.8\text{mm}$

$Dps_2=25.5\text{mm}$

$Dps_3=41.7\text{mm}$



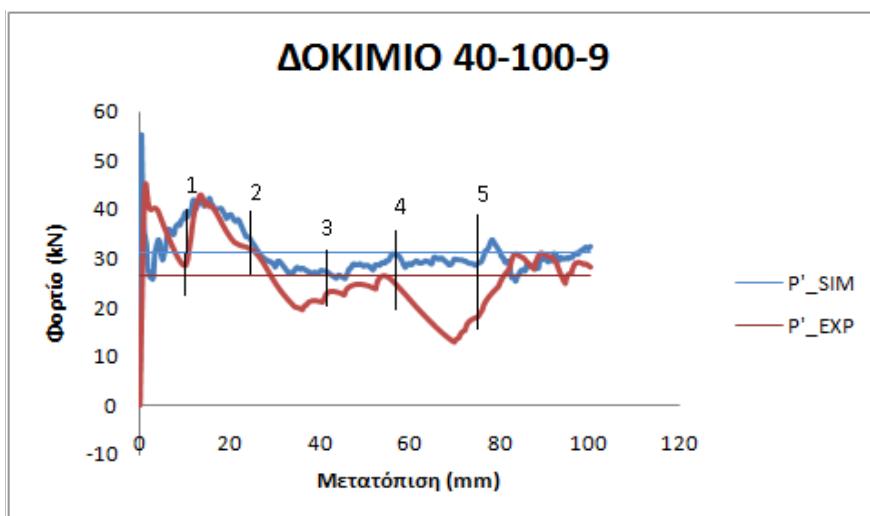
$Dps_4=58.7\text{mm}$

$Dps_5=75.1\text{mm}$

$Dps_6=91.6\text{mm}$

Εικόνα 25: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-9

5.9.3 Συγκριτικό διάγραμμα της απορρόφησης ενέργειας του υπολογιστικού και πειραματικού δοκιμίου 40-100-9



Διάγραμμα 9: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-9

5.9.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Το δοκίμιο 40-100-9 έχει μετατοπισμένο το κέντρο της άνω βάσης ως προς τις κάθετες πλευρές της κάτω βάσης, όπου σχηματίζει και μια κατακόρυφη πλευρά στην πυραμίδα.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το δοκίμιο 40-100-9 είναι τα εξής:

Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν η πλάκα συμπίεσης ή το έμβολο κατέλθει στα 100mm.

Η κατάρρευση των δοκιμών είναι προοδευτική και ελεγχόμενη. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει από την μικρή διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και υπάρχει λιγότερο υλικό και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να καταρρεύσει.

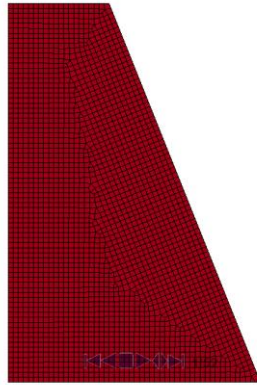
Παρατηρούνται αυξομειώσεις του φορτίου με μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P'_{SIM}=31.12 \text{ kN}$ και $P'_{EXP}=26.6 \text{ kN}$. Το μέσο πειραματικό αναπτυσσόμενο φορτίο, ύστερα από την τελευταία κοιλιάδα του διαγράμματος, αυξάνεται προοδευτικά και στη συνέχεια έχει πολύ μικρή διακύμανση μέχρι το πέρας του πειράματος. Αντίθετα, το μέσο θεωρητικό αναπτυσσόμενο φορτίο διατηρεί μια καθοδική και έπειτα σταθερή διακύμανση μετά τη δεύτερη κορυφή. Το δευτερεύον μέγιστο φορτίο είναι μικρότερο σε μέγεθος σε σχέση με το αρχικό τόσο στη προσομοίωση όσο και στο πείραμα.

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης για την προσομοίωση (**Eabs_SIM**) και για το πείραμα (**Eabs_EXP**) ανέρχεται στα **3112 J** και **2700 J** αντίστοιχα.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο.

Η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη από την κλίση της καμπύλης του πειράματος όπως είναι αναμενόμενο.

5.10 Δοκίμιο 40-100-10



5.10.1 Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-10



$Dps_1=8\text{mm}$



$Dps_2=26\text{mm}$



$Dps_3=42\text{mm}$



$Dps_4=60\text{mm}$



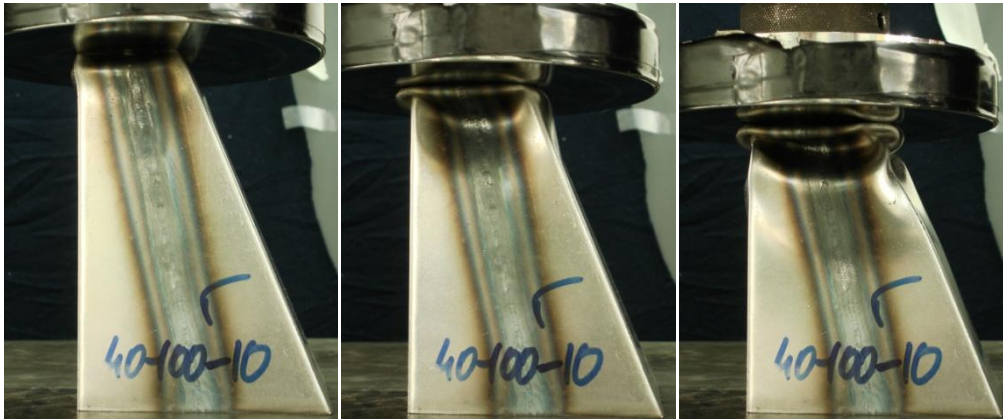
$Dps_5=78\text{mm}$



$Dps_6=100\text{mm}$

Εικόνα 26: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 40-100-10

5.10.2 Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-10



$Dps_1=8.7\text{mm}$

$Dps_2=25.1\text{mm}$

$Dps_3=41.9\text{mm}$



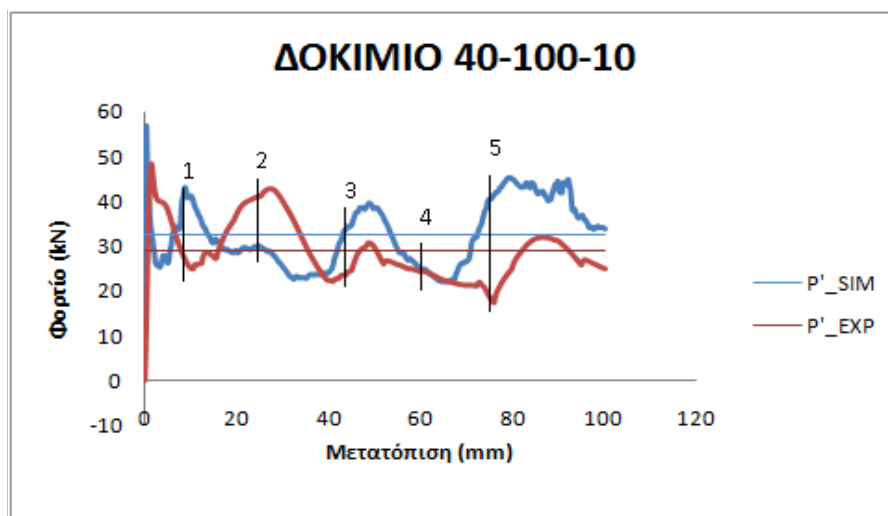
$Dps_4=59.5\text{mm}$

$Dps_5=77.6\text{mm}$

$Dps_6=100.2$

Εικόνα 27: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 40-100-10

5.10.3 Συγκριτικό διάγραμμα της απορρόφησης ενέργειας του υπολογιστικού και πειραματικού δοκιμίου 40-100-10



Διάγραμμα 10: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 40-100-10

5.10.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Το δοκίμιο 40- 100-10 έχει μετατοπισμένο το κέντρο της άνω βάσης ως προς τις κάθετες πλευρές της κάτω βάσης, όπου σχημάτισε και μια κατακόρυφη πλευρά στην πυραμίδα και ελαφρώς μετατοπισμένη προς την κάθετη γωνία της κάτω βάσης.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το δοκίμιο 40-100-10 είναι τα εξής:

Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν η πλάκα συμπίεσης ή το έμβολο κατέλθει στα 100mm.

Η κατάρρευση των δοκιμών είναι προοδευτική και ελεγχόμενη. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει από την μικρή διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και υπάρχει λιγότερο υλικό και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να καταρρεύσει.

Παρατηρούνται αυξομειώσεις του φορτίου με μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο **P'_SIM=32.47 kN** και **P'_EXP=28.8 kN**. Στην εμφάνιση των κορυφών παρατηρείται μια αύξηση του τέταρτου μέγιστου φορτίου τόσο στη προσομοίωση όσο και στο πείραμα, ενώ το πρώτο, δεύτερο και τρίτο μέγιστο φορτίο μειώνονται διαδοχικά.

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης για την προσομοίωση (**Eabs_SIM**) και για το πείραμα (**Eabs_EXP**) ανέρχεται στα **3247 J** και **2900 J** αντίστοιχα.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο.

Οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν είναι εντός φυσιολογικών ορίων, συνεπώς καταλήγουμε στο ότι το μοντέλο αποτελεί μια πολύ καλή προσομοίωση της πειραματικής δοκιμής.

5.11 Δοκίμιο 50-100-1



5.11.1 Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 50-100-1



$Dps_1=8\text{mm}$



$Dps_2=26\text{mm}$



$Dps_3=42\text{mm}$



$Dps_4=60\text{mm}$



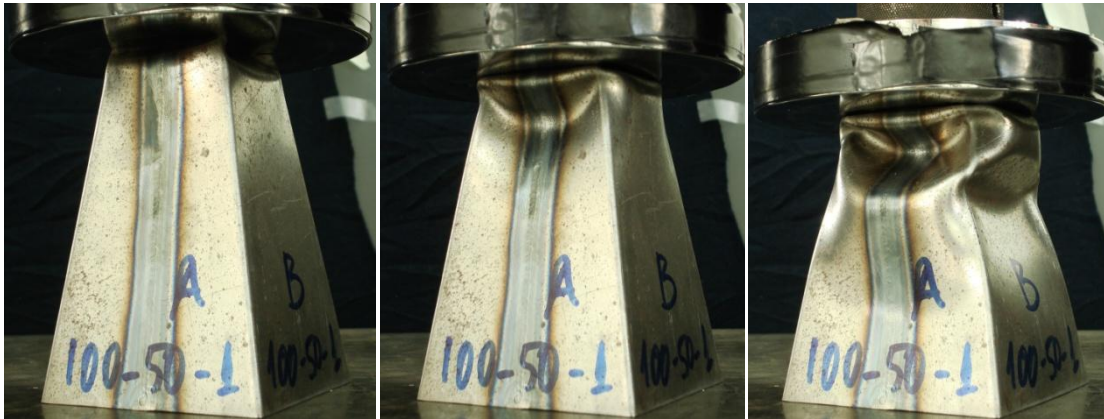
$Dps_5=76\text{mm}$



$Dps_6=84\text{mm}$

Εικόνα 28: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 50-100-1

5.11.2 Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 50-100-1



$Dps_1=8.7\text{mm}$

$Dps_2=25.4\text{mm}$

$Dps_3=42.4\text{mm}$



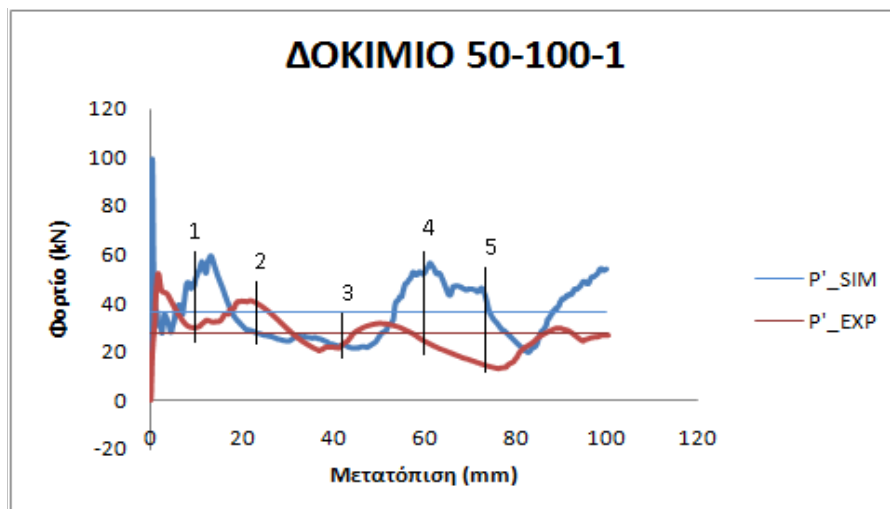
$Dps_4=59.1\text{mm}$

$Dps_5=75.4\text{mm}$

$Dps_6=83.8\text{mm}$

Εικόνα 29: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 50-100-1

5.11.3 Συγκριτικό διάγραμμα της απορρόφησης ενέργειας του υπολογιστικού και πειραματικού δοκιμίου 50-100-1



Διάγραμμα 11: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 50-100-1

5.11.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το δοκίμιο 50-100-1 είναι τα εξής:

Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν η πλάκα συμπίεσης ή το έμβολο κατέλθει στα 100mm.

Η κατάρρευση των δοκιμίων είναι προοδευτική και ελεγχόμενη. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει από την μικρή διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και υπάρχει λιγότερο υλικό και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να καταρρεύσει.

Παρατηρούνται αυξομειώσεις του φορτίου με μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο **P'_SIM=36.34 kN** και **P'_EXP=27.6 kN**.

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης για την προσομοίωση (**Eabs_SIM**) και για το πείραμα (**Eabs_EXP**) ανέρχεται στα **3634 J** και **2800 J** αντίστοιχα.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο.

Η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη από την κλίση της καμπύλης του πειράματος όπως είναι αναμενόμενο.

Οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν είναι εντός φυσιολογικών ορίων, συνεπώς καταλήγουμε στο ότι το μοντέλο αποτελεί μια πολύ καλή προσομοίωση της πειραματικής δοκιμής.

5.12 Δοκίμιο 50-100-2



5.12.1 Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 50-100-2



$Dps_1=8\text{mm}$



$Dps_2=26\text{mm}$



$Dps_3=50\text{mm}$



$Dps_4=68\text{mm}$



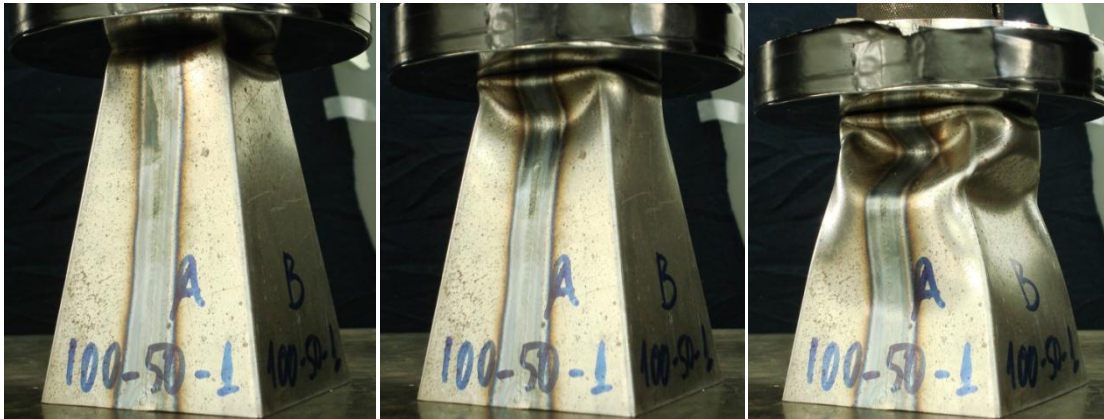
$Dps_5=84\text{mm}$



$Dps_6=100\text{mm}$

Εικόνα 30: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 50-100-2

5.12.2 Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 50-100-2



$Dps_1=8.5\text{mm}$

$Dps_2=25.8\text{mm}$

$Dps_3=50\text{mm}$



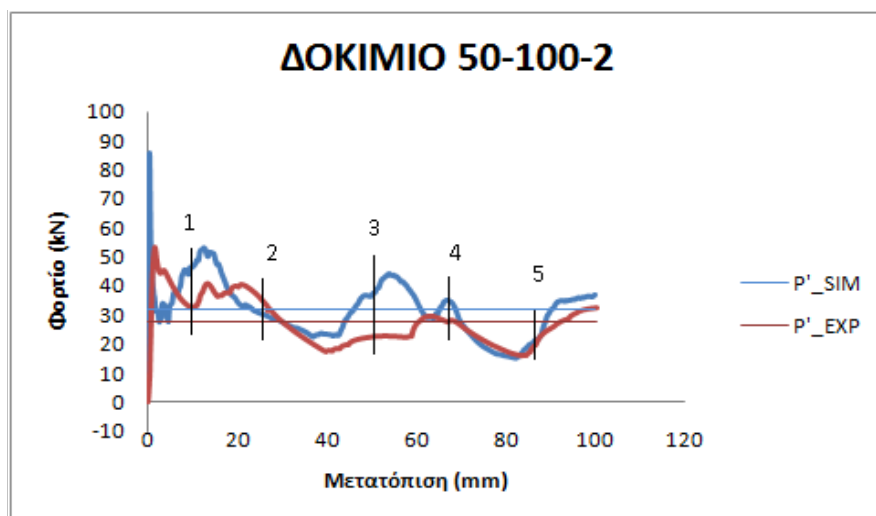
$Dps_4=67.1\text{mm}$

$Dps_5=83.5\text{mm}$

$Dps_6=100.2\text{mm}$

Εικόνα 31: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 50-100-2

5.12.3 Συγκριτικό διάγραμμα της απορρόφησης ενέργειας του υπολογιστικού και πειραματικού δοκιμίου 50-100-2



Διάγραμμα 12: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 50-100-2

5.12.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το δοκίμιο 50-100-2 είναι τα εξής:

Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν η πλάκα συμπίεσης ή το έμβολο κατέλθει στα 100mm.

Η κατάρρευση των δοκιμίων είναι προοδευτική και ελεγχόμενη. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει από την μικρή διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και υπάρχει λιγότερο υλικό και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να καταρρεύσει.

Παρατηρούνται αυξομειώσεις του φορτίου με μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P'_{SIM}=31.71 \text{ kN}$ και $P'_{EXP}=27.5 \text{ kN}$. Τόσο στη προσομοίωση όσο και στο πείραμα το δευτερεύον μέγιστο φορτίο είναι αισθητά μικρότερο σε μέγεθος σε σχέση με το αρχικό, και σημαντικά μειούμενου μεγέθους όσο προχωρά η συμπίεση. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται πολύ μικρότερο τοπικό μέγιστο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε ακόμα μεγαλύτερη μείωση του τοπικού μεγίστου.

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης για την προσομοίωση (E_{abs_SIM}) και για το πείραμα (E_{abs_EXP}) ανέρχεται στα **3171 J** και **2760 J** αντίστοιχα.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο.

Η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη από την κλίση της καμπύλης του πειράματος όπως είναι αναμενόμενο.

Οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν είναι εντός φυσιολογικών ορίων, συνεπώς καταλήγουμε στο ότι το μοντέλο αποτελεί μια πολύ καλή προσομοίωση της πειραματικής δοκιμής.

5.13 Δοκίμιο 50-100-3



5.13.1 Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 50-100-3



$Dps_1=8\text{mm}$



$Dps_2=26\text{mm}$



$Dps_3=58\text{mm}$



$Dps_4=76\text{mm}$



$Dps_5=92\text{mm}$



$Dps_6=100\text{mm}$

Εικόνα 32: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 50-100-3

5.13.2 Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκίμιου 50-100-3



$Dps_1=8.6\text{mm}$

$Dps_2=25.7\text{mm}$

$Dps_3=58.9\text{mm}$



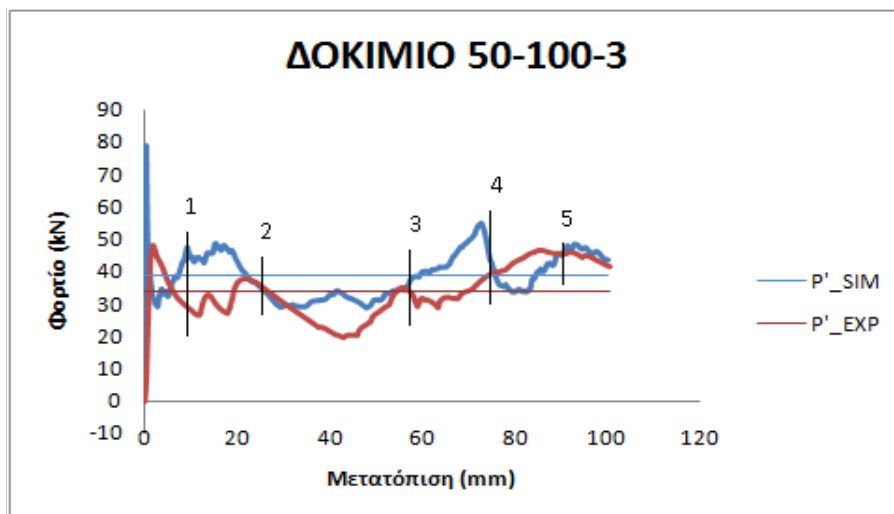
$Dps_4=75.7\text{mm}$

$Dps_5=91.9\text{mm}$

$Dps_6=100.4\text{mm}$

Εικόνα 33: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκίμιου 50-100-3

5.13.3 Συγκριτικό διάγραμμα της απορρόφησης ενέργειας του υπολογιστικού και πειραματικού δοκίμιου 50-100-3



Διάγραμμα 13: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 50-100-3

5.13.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Το δοκίμιο 50-100-3 λόγω της μετατόπισης του κέντρου της άνω βάσης είχε τις δύο πλευρές σχεδόν κατακόρυφες.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το δοκίμιο 50-100-3 είναι τα εξής:

Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν η πλάκα συμπίεσης ή το έμβολο κατέλθει στα 100mm.

Η κατάρρευση των δοκιμών είναι προοδευτική και ελεγχόμενη. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει από την μικρή διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και υπάρχει λιγότερο υλικό και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να καταρρεύσει.

Παρατηρούνται αυξομειώσεις του φορτίου με μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο **P'_{SIM}=38.67 kN** και **P'_{EXP}=34 kN**.

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης για την προσομοίωση (**Eabs_{SIM}**) και για το πείραμα (**Eabs_{EXP}**) ανέρχεται στα **3867 J** και **3410 J** αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε σύγκριση με τα προηγούμενα δύο δοκίμια 50-100-1 και 50-100-2 παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά ως απορροφητής ενέργειας.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο.

Η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη από την κλίση της καμπύλης του πειράματος όπως είναι αναμενόμενο.

Οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν είναι εντός φυσιολογικών ορίων, συνεπώς καταλήγουμε στο ότι το μοντέλο αποτελεί μια πολύ καλή προσομοίωση της πειραματικής δοκιμής.

5.14 Δοκίμιο 60-100-1



5.14.1 Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 60-100-1



$Dps_1=8\text{mm}$



$Dps_2=26\text{mm}$



$Dps_3=42\text{mm}$



$Dps_4=58\text{mm}$



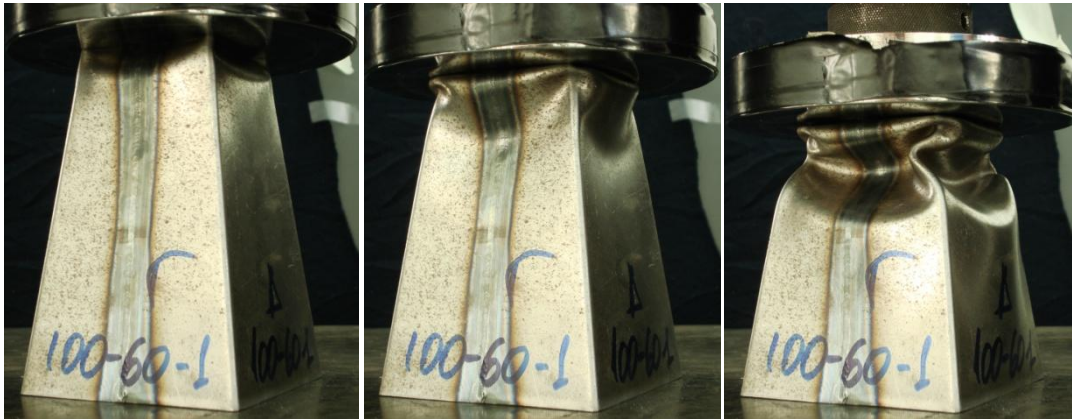
$Dps_5=76\text{mm}$



$Dps_6=100\text{mm}$

Εικόνα 34: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 60-100-1

5.14.2 Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκίμιου 60-100-1



$Dps_1=8.6\text{mm}$

$Dps_2=25.2\text{mm}$

$Dps_3=41.9\text{mm}$



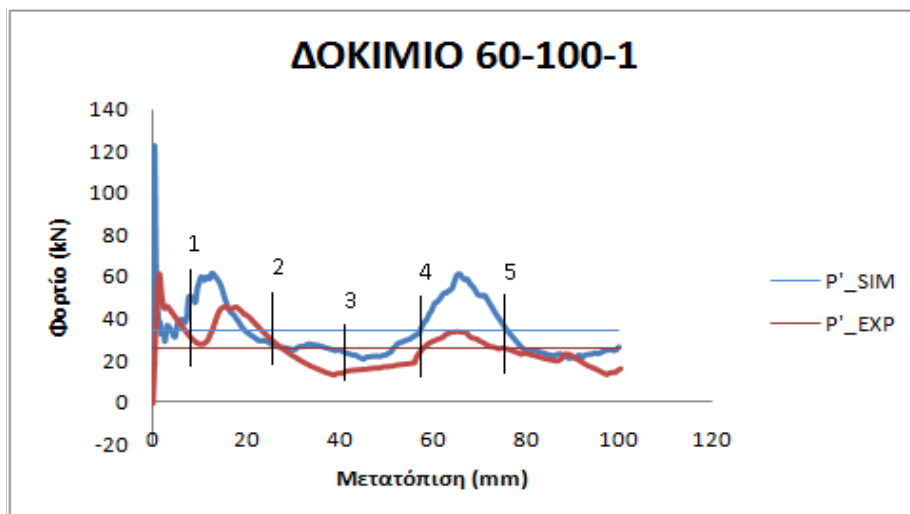
$Dps_4=58.4\text{mm}$

$Dps_5=75.7\text{mm}$

$Dps_6=100.3\text{mm}$

Εικόνα 35: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκίμιου 60-100-1

5.14.3 Συγκριτικό διάγραμμα της απορρόφησης ενέργειας του υπολογιστικού και πειραματικού δοκίμιου 60-100-1



Διάγραμμα 14: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 60-100-1

5.14.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το δοκίμιο 60-100-1 είναι τα εξής:

Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν η πλάκα συμπίεσης ή το έμβολο κατέλθει στα 100mm.

Η κατάρρευση των δοκιμίων είναι προοδευτική και ελεγχόμενη. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει από την μικρή διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και υπάρχει λιγότερο υλικό και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να καταρρεύσει.

Παρατηρούνται αυξομειώσεις του φορτίου με μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο **P'_{SIM}=34.14 kN** και **P'_{EXP}=26.1 kN**. Ο αριθμός των μέγιστων φορτίων είναι ίδιος για τη προσομοίωση και το πείραμα και ανάλογης διακύμανσης.

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης για την προσομοίωση (**Eabs_SIM**) και για το πείραμα (**Eabs_EXP**) ανέρχεται στα **3414 J** και **2620 J** αντίστοιχα.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο.

Η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη από την κλίση της καμπύλης του πειράματος όπως είναι αναμενόμενο.

Οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν είναι εντός φυσιολογικών ορίων, συνεπώς καταλήγουμε στο ότι το μοντέλο αποτελεί μια πολύ καλή προσομοίωση της πειραματικής δοκιμής.

5.15 Δοκίμιο 60-100-2



5.15.1 Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 60-100-2



$Dps_1=8\text{mm}$



$Dps_2=26\text{mm}$



$Dps_3=42\text{mm}$



$Dps_4=60\text{mm}$



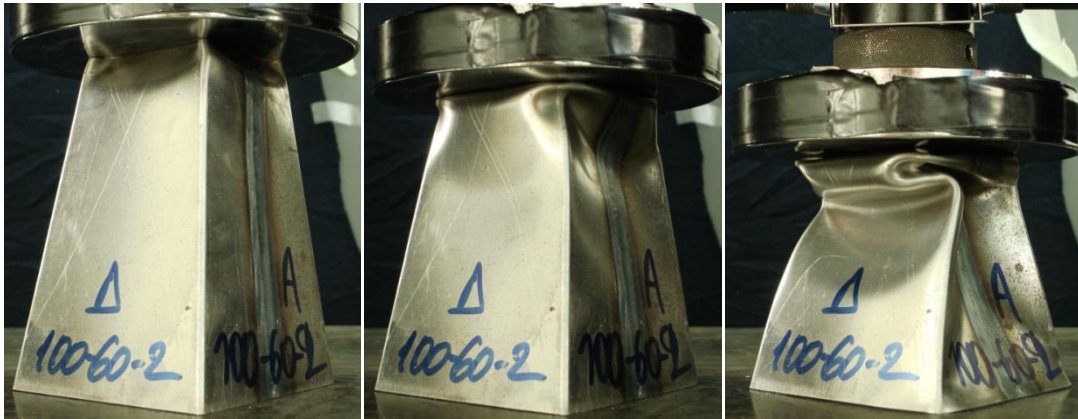
$Dps_5=76\text{mm}$



$Dps_6=100\text{mm}$

Εικόνα 36: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 60-100-2

5.15.2 Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 60-100-2



$Dps_1=8.7\text{mm}$

$Dps_2=25.5\text{mm}$

$Dps_3=42.1\text{mm}$



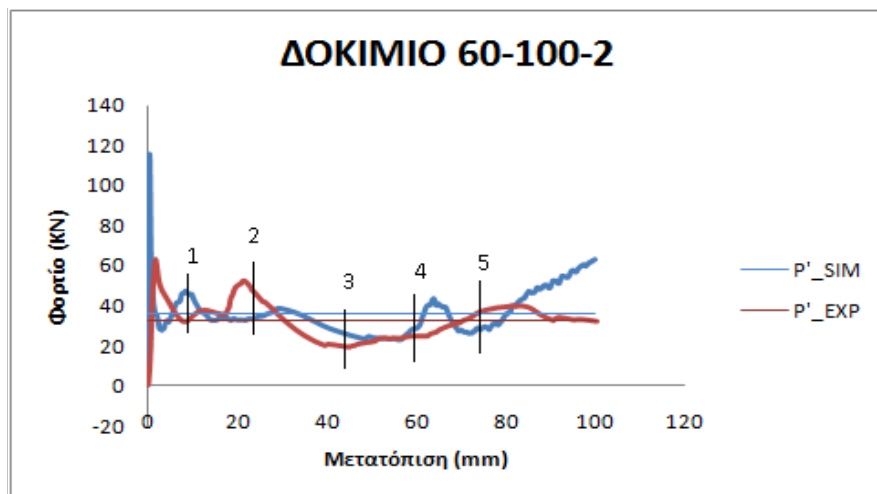
$Dps_4=59.1\text{mm}$

$Dps_5=75.8\text{mm}$

$Dps_6=100.1\text{mm}$

Εικόνα 37: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 60-100-2

5.15.3 Συγκριτικό διάγραμμα της απορρόφησης ενέργειας του υπολογιστικού και πειραματικού δοκιμίου 60-100-2



Διάγραμμα 15: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 60-100-2

5.15.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το δοκίμιο 60-100-2 είναι τα εξής:

Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν η πλάκα συμπίεσης ή το έμβολο κατέλθει στα 100mm.

Η κατάρρευση των δοκιμίων είναι προοδευτική και ελεγχόμενη. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει από την μικρή διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και υπάρχει λιγότερο υλικό και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να καταρρεύσει.

Παρατηρούνται αυξομειώσεις του φορτίου με μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο **P'_{SIM}=36.11 kN** και **P'_{EXP}=32.7 kN**. Επίσης, παρατηρούνται αρκετές διαφορές μεταξύ των δύο γραφημάτων όπως είναι ο αριθμός μέγιστων φορτίων και ο τρόπος διακύμανσης τους.

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης για την προσομοίωση (**Eabs_{SIM}**) και για το πείραμα (**Eabs_{EXP}**) ανέρχεται στα **3611 J** και **3270 J** αντίστοιχα.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο.

Η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη από την κλίση της καμπύλης του πειράματος όπως είναι αναμενόμενο.

5.16 Δοκίμιο 60-100-3



5.16.1 Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 60-100-3



$Dps_1=8\text{mm}$



$Dps_2=26\text{mm}$



$Dps_3=42\text{mm}$



$Dps_4=58\text{mm}$



$Dps_5=76\text{mm}$



$Dps_6=100\text{mm}$

Εικόνα 38: Φάσεις κατάρρευσης του υπολογιστικού δοκιμίου 60-100-3

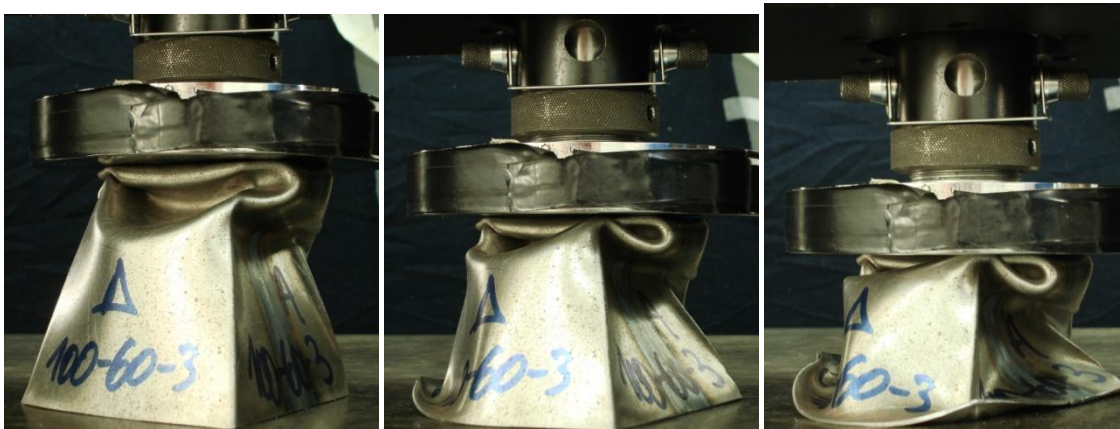
5.16.2 Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 60-100-3



$Dps_1=8.4\text{mm}$

$Dps_2=25.6\text{mm}$

$Dps_3=42.3\text{mm}$



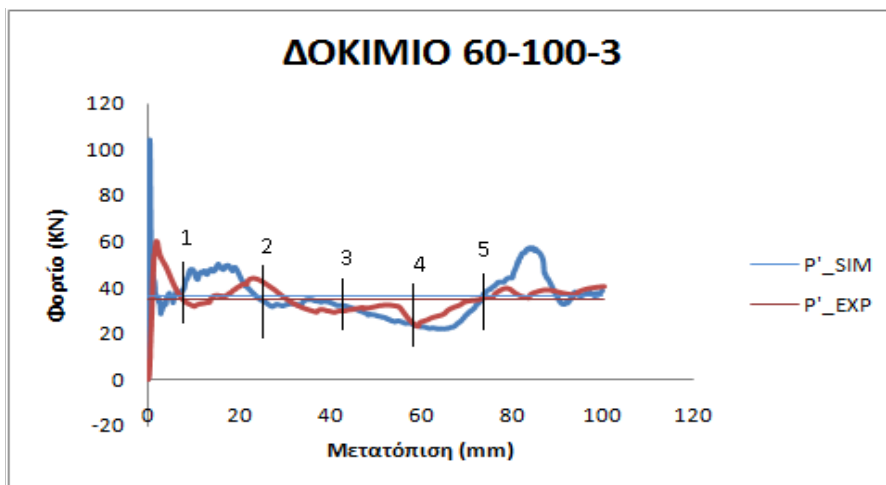
$Dps_4=58.7\text{mm}$

$Dps_5=75.7\text{mm}$

$Dps_6=100.3\text{mm}$

Εικόνα 39: Φάσεις κατάρρευσης του πειραματικού δοκιμίου 60-100-3

5.16.3 Συγκριτικό διάγραμμα της απορρόφησης ενέργειας του υπολογιστικού και πειραματικού δοκιμίου 60-100-3



Διάγραμμα 16: Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης για το δοκίμιο 60-100-3

5.16.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το δοκίμιο 60-100-3 είναι τα εξής:

Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν η πλάκα συμπίεσης ή το έμβολο κατέλθει στα 100mm.

Η κατάρρευση των δοκιμίων είναι προοδευτική και ελεγχόμενη. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει από την μικρή διατομή το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και υπάρχει λιγότερο υλικό και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ενέργεια για να καταρρεύσει.

Παρατηρούνται αυξομειώσεις του φορτίου με μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P'_{SIM}=36.14 \text{ kN}$ και $P'_{EXP}=35.1 \text{ kN}$. Στη πειραματική διαδικασία της συμπίεσης διακρίνουμε το δευτερεύον μέγιστο φορτίο να είναι αρκετά μικρότερο σε μέγεθος σε σχέση με το αρχικό, και στη συνέχεια σχεδόν σταθεροποιείται όσο προχωρά η συμπίεση. Στο θεωρητικό μοντέλο όμως διακρίνεται η ανοδική τάση του φορτίου πριν το πέρας του πειράματος.

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης για την προσομοίωση (E_{abs_SIM}) και για το πείραμα (E_{abs_EXP}) ανέρχεται στα 3614 J και 3520 J αντίστοιχα. Το δοκίμιο 60-100-3 θα μπορούσε να κριθεί ως ο καλύτερος απορροφητής ενέργειας σε σχέση με τα δοκίμια 60-100-1 και 60-100-2 τόσο για την προσομοίωση όσο και για το πείραμα.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο.

Η κλίση της καμπύλης προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη από την κλίση της καμπύλης του πειράματος όπως είναι αναμενόμενο.

Οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν είναι εντός φυσιολογικών ορίων, συνεπώς καταλήγουμε στο ότι το μοντέλο αποτελεί μια πολύ καλή προσομοίωση της πειραματικής δοκιμής.

6 Συμπεράσματα

6.1 Γενική σύγκριση

Ως απορροφητής ενέργειας τα λεπτότοιχα πυραμιδικά δοκίμια δεν υπέστησαν ολική (καταστροφική) κατάρρευση - μη επιθυμητός τρόπος παραμόρφωσης, καθώς μειώνει τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας – αλλά προοδευτική και ελεγχόμενη, με απότοκο τη μέγιστη δυνατή ενέργεια απορρόφησης.

Οι καμπύλες των διαγραμμάτων ήταν αρκετά ικανοποιητικές από σκοπιάς επαλήθευσης του τρόπου κατάρρευσης και της διακύμανσης του φορτίου.

Παρακάτω παρατίθεται ο συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 3: «Συνοπτικός πίνακας σύγκρισης Μέσου Φορτίου και Ενέργεια Απορρόφησης προσομοίωσης και πειράματος»

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (kN)	ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ (kN)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΠΡΟΣΟΜΕΙΩΣΗΣ(J)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ (J)
40-100-1	31.10	35.2	3110	3500
40-100-2	25.44	30.7	2544.4	3100
40-100-3	32.94	27.8	3293.7	2800
40-100-4	31.79	27.9	3179	2800
40-100-5	32.90	27.2	3290	2700
40-100-6	33.58	30.9	3358	3100
40-100-7	33.74	25.2	3374	2500
40-100-8	28.01	29.2	2801	2900
40-100-9	31.12	26.6	3112	2700
40-100-10	32.47	28.8	3247	2900
50-100-1	36.34	27.6	3634	2800
50-100-2	31.71	27.5	3171	2760
50-100-3	38.67	34	3867	3410
60-100-1	34.14	26.1	3414	2620
60-100-2	36.11	32.7	3611	3270
60-100-3	36.14	35.1	3614	3520

6.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων για τα θεωρητικά δοκίμια

Στα συγκεκριμένα θεωρητικά μοντέλα το πάχος των δοκιμών ήταν αμετάβλητο και ίσο με 1,5 mm για όλες τις περιπτώσεις. Αυτό που μεταβλήθηκε κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης είναι η γεωμετρία των δοκιμών. Συγκεκριμένα η κάτω βάση διατηρήθηκε σε όλα τα δοκίμια ίση με 100 mm, ενώ η άνω βάση είχε διαστάσεις 40 mm, 50 mm και 60 mm. Επίσης μεταβλήθηκε και η θέση του κέντρου της άνω βάσης, δημιουργώντας διαφορετικές κλίσεις τοιχωμάτων σε κάθε περίπτωση, οδηγώντας και στη δημιουργία δοκιμών με μία ή περισσότερες κατακόρυφες πλευρές.

Από τις προσομοιώσεις φάνηκε ότι τα περισσότερα δοκίμια σχημάτισαν τέσσερις λοβούς, πράγμα που απεικονιζόταν χαρακτηριστικά και στα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης, ανάλογα με το πλήθος των κορυφών και των κοιλάδων που δημιουργήθηκαν.

Σύγκριση δοκιμών της ομάδας δοκιμών 40-100

Στην ομάδα δοκιμών 40-100 όσο αλλάζει η εκκεντρότητα των δοκιμών (40-100-1, 40-100-3, 40-100-4) η ενέργεια παραμόρφωσης αυξάνει. Κατόπιν με την αλλαγή της κλίσης των τοιχωμάτων των δοκιμών παρατηρείται μείωση στην απορρόφηση ενέργειας όσο αυξάνεται η κλίση.

Σύγκριση δοκιμών της ομάδας δοκιμών 50-100

Στην ομάδα δοκιμών 50-100 η μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης παρατηρείται στο δοκίμιο 50-100-3 το οποίο παρουσιάζει την μεγαλύτερη εκκεντρότητα. Αυτό το αποτέλεσμα συμπίπτει και με το πείραμα.

Σύγκριση δοκιμών της ομάδας δοκιμών 60-100

Στην ομάδα δοκιμών 60-100 παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά για όλα τα δοκίμια. Τόσο το μέσο φορτίο όσο και η ενέργεια παραμόρφωσης βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και αρκετά υψηλό σε σχέση με τις άλλες ομάδες δοκιμών (40-100 και 50-100). Συνεπώς θα μπορούσε να βγει το συμπέρασμα ότι οι μικρότερες κλίσεις των τοιχωμάτων οφείλονται για την αυξημένη απορροφημένη ενέργεια. Αυτή η υπόθεση δεν γίνεται τυχαία, καθώς είναι γνωστό ότι όσο πιο μεγάλη κλίση έχει ένα δοκίμιο τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα υπάρχει να εμφανιστεί το φαινόμενο «triggering».

6.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων για τα πειραματικά δοκίμια

Από τα πειράματα φάνηκε ότι τα περισσότερα δοκίμια σχημάτισαν τρεις λοβούς, πράγμα που απεικονιζόταν χαρακτηριστικά και στα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης, ανάλογα με το πλήθος των κορυφών και των κοιλάδων που δημιουργήθηκαν.

Η εμφάνιση των κορυφών στο διάγραμμα μπορεί να συσχετιστεί και να αποδοθεί στο χρονικό στιγμιότυπο όπου το εργαλείο της πρέσας ασκούσε το μέγιστο φορτίο του στο δοκίμιο, ώστε να το παραμορφώσει και να δημιουργηθεί ο λοβός. Τα πτωτικά τμήματα της κάθε καμπύλης, δηλαδή οι κοιλάδες, μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύουν το χρονικό διάστημα δημιουργίας του λοβού, όπου το υλικό είναι πιο εύκολο να παραμορφωθεί και άρα, συγκριτικά με την υπόλοιπη διάρκεια καταπόνησης, δεν απαιτείται μεγάλο φορτίο. Αντιθέτως, όταν το εργαλείο συναντούσε απαραμόρφωτο υλικό, παρουσιαζόταν αύξηση του ασκούμενου φορτίου, ώστε να μπορέσει να προκαλέσει τον πλαστικό λυγισμό του υλικού.

Οι δευτερεύουσες κορυφές που εμφανίζονται (τα υπόλοιπα τοπικά μέγιστα της καμπύλης) αντικατοπτρίζουν το αν το υλικό που συναντούσε το εργαλείο ήταν απαραμόρφωτο.

Δεδομένου ότι σκοπός τέτοιων πειραμάτων είναι η μελέτη δοκιμών για χρήση τους σε συσκευές απορρόφησης ενέργειας, η επιθυμητή συμπεριφορά από ένα δοκίμιο είναι οι δευτερεύουσες κορυφές να είναι συγκρίσιμου μεγέθους με την αρχική, καθώς αυτό σημαίνει ότι το υλικό απαιτεί μεγαλύτερο φορτίο για να καμφθεί. Η συμπεριφορά αυτή σχετίζεται και με μεγαλύτερη ενέργεια παραμόρφωσης.

Σύγκριση δοκιμών της ομάδας δοκιμών 40-100

Όσον αφορά τη μετατόπιση του κέντρου της άνω βάσης παρατηρήθηκε ότι η κάθετη ευθεία των κέντρων της άνω βάσης που βρισκόταν σε μεγαλύτερη απόσταση από το αρχικό κέντρο της πυραμίδας (40-100-4, 40-100-9, 40-100-10), είχε μικρότερο μέγιστο φορτίο σε σύγκριση με τις εσωτερικές παράλληλες ευθείες (40-100-3, 40-100-8, 40-100-6), δηλαδή όσο πιο έκκεντρο ήταν το δοκίμιο, τόσο μικρότερο φορτίο μπορούσε να απορροφήσει.

Σύγκριση δοκιμών της ομάδας δοκιμών 50-100

Στην ομάδα δοκιμών 50-100, παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια 50-100-1 και 50-100-2 είχαν παρόμοιο μέγιστο φορτίο και μέσο φορτίο, καθώς και ενέργεια παραμόρφωσης, όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς. Από την άλλη, το πιο έκκεντρο δοκίμιο (50-100-3) είχε μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο από τα προηγούμενα. Η μεγαλύτερη ενέργεια παραμόρφωσης επιβεβαιώνεται από την καμπύλη φορτίου— μετατόπισης, όπου φαίνεται ότι η συμπεριφορά του δοκιμίου κατά την αξονική του καταπόνηση παρουσιάζει κορυφές συγκρίσιμου μεγέθους με το μέγιστο φορτίο που δέχτηκε.

Σύγκριση δοκιμών της ομάδας δοκιμών 60-100

Τα δοκίμια 60-100 με τη μεγαλύτερη άνω βάση, όπως προαναφέρθηκε, εμφάνισαν τα υψηλότερα μέγιστα φορτία, λόγω της μικρότερης κλίσης των τοιχωμάτων. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων αξονικής καταπόνησης, παρατηρήθηκε ότι με αύξηση της εκκεντρότητας των δοκιμών, παρατηρήθηκε αύξηση του μέσου φορτίου που δέχτηκε το κάθε δοκίμιο, και κατ' επέκταση αύξηση της ενέργειας παραμόρφωσης που δέχτηκε.

6.4 Σύγκριση πειράματος – προσομοίωσης

Το περιβάλλον ενός κώδικα πεπερασμένων στοιχείων είναι εξιδανικευμένο μιας και δεν λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη τυχόν ατελειών στο πραγματικό δοκίμιο, οι περισσότερες εκ των οποίων δεν μπορούν να μετρηθούν ή να προβλεφθούν. Κατά συνέπεια κατά τη σύγκριση των τιμών μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος παρατηρείται διαφοροποίηση. Τα αίτια για τις αποκλίσεις είναι κυρίως οι γεωμετρικές ατέλειες λόγω κατασκευής (παράλληλότητα μετώπων, ομοιομορφία άκρων, ακρίβεια διαστάσεων). Επίσης, είναι πιθανό να μην έχει επιτευχθεί ομοιόμορφη κατανομή των ιδιοτήτων. Όπως για παράδειγμα να υπάρχει ανισοκατανομή του πάχους ή ανισοτροπία λόγω του ελάσματος (στην ραφή συγκόλλησης το υλικό να είναι θερμικά επηρεασμένο).

Το μοντέλο του κώδικα προσομοίωσης θεωρεί το υλικό ιδεατό, δηλαδή ομοιογενές και ισότροπο σε όλη την έκτασή του. Οι ακμές μοντελοποιούνται τέλειες ορθές γωνίες και το πάχος είναι ίσο με το ονομαστικό σε όλα τα τοιχώματα και σημεία του δοκιμίου.

Τέλος, πολύ σημαντικό και αναγκαίο κρίνεται η επαναληψιμότητα της πειραματικής διαδικασίας ώστε να μπορεί να επιτραπεί η γενίκευση των αποτελεσμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Altair University, Practical Aspects of Finite Element Simulation, 3rd Edition, 2005
- [2] www.lstc.com
- [3] J. Jost, R. Allsop, M. Steriu, *et al.* 2010 Road Safety Target Outcome: 100,000 Fewer Deaths since 2001: 5th Road Safety PIN Report European Transport Safety Council, Brussels (2011)
- [4] www.euroncap.com
- [5] www.eevc.org
- [6] L.L. Hershman The U.S. New Car Assessment Program (NCAP): past, present and future Proceedings of the 17th Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Amsterdam (2001), p. 390
- [7] A. Hobbs United Kingdom [status report] – New Car Assessment Program Proceedings of 15th Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Melbourne (1996)
- [8] www.fia.com
- [9] C.A. Hobbs, P.J. McDonough Development of the European New Car Assessment Programme (EuroNCAP) Proceedings of the 16th Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Windsor (1998)
- [10] Alghamdi A.A.A., Collapsible impact energy absorbers: an overview, 2001, Thin-Walled Structures 39, 189–213.
- [11] Deb A, Mahendrakumar M, Chavan C, Karve J, Blankenburg D, Storen S., Design of an aluminium-based vehicle platform for front impact safety. International Journal of Impact Engineering. 2004;30:1055-79.
- [12] M. Langseth , O.S. Hopperstad, A.G. Hanssen, Crash behaviour of thin-walled aluminium members, Thin-Walled Structures 32 (1998) pp. 127–150
- [13] Hamidreza Zarei, Matthias Kröger, Henrik Albertsen, An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes, Compos Struct (2007) , pp. 245–257
- [14] S. Ramakrishna, Microstructural design of composite materials for crashworthy applications, Mater Des, 18 (1997), pp. 167–173
- [15] K.C. Shin, J.J. Lee, K.H. Kim, M.C. Song, J.S. Huh, Axial crash and bending collapse of an aluminum/GFRP hybrid square tube and its energy absorption capability, Compos Struct, 57 (2002), pp. 279–287

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

[17] Λεωνίδας Ε. Βουραξάκης: «Μελέτη της συμπεριφοράς μη κανονικών λεπτότοιχων πυραμίδων σε αξονική καταπόνηση», ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών, ΑΘΗΝΑ, 2015