



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διέλαση τριμεταλλικών ράβδων :
Πειραματική υλοποίηση και
Αριθμητική προσομοίωση

Ιωάννης Σ. Πρέσσας

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Δημήτριος Ε. Μανωλάκος

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

Η εργασία αυτή αφιερώνεται
σε όσους πίστεψαν
σε εμένα

Περίληψη

Το θέμα της παρούσας διπλωματική εργασίας είναι: «Διέλαση τριμεταλλικών ράβδων: Πειραματική υλοποίηση και αριθμητική προσομοίωση». Όπως υποδηλώνεται και από τον τίτλο, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας κατασκευάστηκαν κυλινδρικά, συμπαγή δοκίμια (ράβδοι), τα οποία αποτελούνταν από τρία διαφορετικά και διακριτά, στο όγκο του κάθε δοκιμίου, υλικά. Συνολικά κατασκευάστηκαν έξι (6) δοκίμια.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η διέλαση των έξι δοκιμίων, από την οποία, εκτός από τα κατεργασμένα δοκίμια, λήφθηκαν και στοιχεία της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης κάθε δοκιμίου, μέσω κατάλληλης διάταξης για τη λήψη των αποτελεσμάτων αυτών. Μετά, τα κατεργασμένα δοκίμια κόπηκαν εγκάρσια περίπου στο μέσο του ύψους τους, με τη βοήθεια κοπτικού τροχού. Η επιφάνεια κάθε δοκιμίου που αποκαλύφθηκε από την κοπή, υποβλήθηκε σε λείανση και στη συνέχεια παρατηρήθηκε με τη βοήθεια του μικροσκοπίου του εργαστηρίου μεταλλογραφίας του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

Αφού τελείωσε το πειραματικό μέρος της εργασίας, πραγματοποιήθηκε η κατασκευή των υπολογιστικών ανάλογων κάθε δοκιμίου. Τελικά, μετά και την επίλυση των υπολογιστικών μοντέλων, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων του πειραματικού και του υπολογιστικού μέρους.

Παρακάτω περιγράφεται η δομή της παρούσας εργασίας. Η περιγραφή αυτή γίνεται ανά κεφάλαιο:

- Κεφάλαιο 1: Θεωρητικό μέρος

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά παρατίθενται κάποιες βασικές πληροφορίες γύρω από την κατεργασία της διέλασης. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια ιστορική αναδρομή σχετική με τα διμεταλλικά δοκίμια, από τα οποία προέκυψε η ιδέα για τη μελέτη των τριμεταλλικών δοκιμίων.

- Κεφάλαιο 2: Πειραματικό μέρος

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αρχικά γίνεται περιγραφή των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια του πειραματικού μέρους. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα υλικά των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η πειραματική διάταξη που απαιτήθηκε

για τη διεξαγωγή του πειράματος και τη λήψη των αποτελεσμάτων.

Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διέλαση.

- Κεφάλαιο 3: Υπολογιστικό μέρος

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστηκαν τα υπολογιστικά μοντέλα, ενώ επίσης παρατίθενται και όλες οι απαραίτητες παράμετροι των μοντέλων, ώστε τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μέρους να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στα αντίστοιχα αποτελέσματα του πειραματικού μέρους.

- Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα υπολογιστικού μέρους

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την επίλυση των υπολογιστικών μοντέλων. Σε κάθε μοντέλο παρατίθενται τα αποτελέσματα μορφής, τάσεων και παραμορφώσεων αυτού, καθώς και η καμπύλη φορτίου – χρόνου που αποδόθηκε από το μοντέλο αυτό.

- Κεφάλαιο 5: Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στο τελευταίο κεφάλαιο πραγματοποιείται σύγκριση των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης, μεταξύ των αποτελεσμάτων του πειραματικού και του υπολογιστικού μέρους, καθώς επίσης και μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων διαφορετικών δοκιμίων, που όμως έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Επίσης, στην αρχή του κεφαλαίου περιγράφεται ο τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων που ήταν απαραίτητος, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ τους.

Στο τέλος της εργασίας παρουσιάζεται στο παράρτημα, η μορφή ενός χαρακτηριστικού αρχείου των υπολογιστικών μοντέλων που ήταν απαραίτητο για την επίλυσή τους.

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των μαθημάτων «Τεχνικά Υλικά», «Κατεργασίες Ι» και «Ειδικά Κεφάλαια Πλαστικής Ανάλυσης», κατά τη διάρκεια του 10^{ου} εξαμήνου των προπτυχιακών σπουδών, της κατεύθυνσης του Κατασκευαστή Μηχανολόγου Μηχανικού, της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας υποστηρίχτηκε από τον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου σε όλους τους συντελεστές που με βοήθησαν για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας μου. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου δρ. Δημήτριο Ε. Μανωλάκο, Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την έμπρακτη βοήθεια και υποστήριξή του σε ό,τι κι αν χρειάστηκα στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και για όσα με δίδαξε όλα αυτά τα χρόνια μέσα από τα μαθήματά του. Η κατάλληλη καθοδήγηση που μου πρόσφερε όλον αυτόν τον καιρό, καθώς και η εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου με βοήθησαν να επιτύχω τελικά το στόχο μου.

Επίσης, πολύ θερμές ευχές θα ήθελα να απευθύνω στον Υποψήφιο Διδάκτορα (Υ.Δ.) κ. Σωτήρη Γεωργιόπουλο, μαζί με τον οποίο συνεργάστηκα για να καταφέρω τελικά να ολοκληρώσω την παρούσα διπλωματική εργασία. Του εύχομαι ολόψυχα καλή επιτυχία στο Διδακτορικό του, με το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω και στο (μοναδικό) μέλος του Ειδικού και Επιστημονικού Διδακτικού Προσωπικού (Ε.Ε.ΔΙ.Π) του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο, η κατάλληλη καθοδήγηση του οποίου για την επίλυση των υπολογιστικών μοντέλων ήταν καθοριστικής σημασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους κ. Μίχα Γεώργιο (Ι.Δ.Α.Χ) και κ. Μελισσά Νικόλαο (Ι.Δ.Α.Χ.) για την αμέριστη συμβολή τους στην πραγματοποίηση των πειραμάτων αυτή της διπλωματικής εργασίας, καθώς και στον κ. Κερασιώτη Κωνσταντίνο (Ε.Τ.Ε.Π.) για τη βοήθεια που μου πρόσφερε, σε ό,τι χρειάστηκα από τον χώρο του εργαστηρίου.

Θερμότερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω επίσης, σε όλους τους φίλους μου και ιδιαίτερα, στην, μεταξύ άλλων, αριστεύσασα συνάδελφο κ. Γεωργία Τσιμπούκη, για την αμέριστη βοήθειά και υποστήριξη της όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να ξεχάσω να ευχαριστήσω και τους γονείς μου, που χάρις σε όλα όσα μου πρόσφεραν στη ζωή μου, κατάφερα να φτάσω εδώ που είμαι σήμερα. Πραγματικά από τα βάθη της καρδιάς μου σας ευχαριστώ πολύ.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

Ιωάννης Σ. Πρέσσας

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Θεωρητικό Μέρος	σελ.1
1.0 Εισαγωγή	σελ.3
1.1 Περί διέλασης	σελ.3
1.1.1 Γενικά	σελ.3
1.1.2 Ταξινόμηση μεθόδων διέλασης.....	σελ.3
1.1.3 Ροή μετάλλου	σελ.5
1.1.4 Φάσεις διέλασης	σελ.6
1.1.5 Τεχνολ. χαρακτηριστικά ψυχρής διέλασης	σελ.8
1.2 Ιστορική εξέλιξη πολυμεταλλικών τεμαχίων	σελ.8
1.2.1 Τα πρώτα χρόνια	σελ.8
1.2.2 Μετα-πολεμική άνθιση και διαφοροποίηση.....	σελ.9
1.2.3 Το νέο όνομα	σελ.10
1.2.4 Εξαγορά, κρίση και διάσπαση.....	σελ.10
1.2.5 Δύο εταιρείες Copperweld.....	σελ.11
1.2.6 Επάνοδος	σελ.12
1.2.7 Πώληση και χρεοκοπία	σελ.12
1.2.8 Αυστηρά διμεταλλικά.....	σελ.12
1.2.9 Είσοδος στη Fushi International.....	σελ.13
1.2.10 Προϊόντα.....	σελ.13
Κεφάλαιο 2: Πειραματικό Μέρος.....	σελ.15
2.0 Εισαγωγή	σελ.17
2.1 Περιγραφή των δοκιμίων του πειράματος	σελ.17
2.1.1 Γενικά για τα δοκίμια	σελ.17
2.1.2 Κατασκευή των δοκιμίων.....	σελ.19
2.2 Περιγραφή των υλικών	σελ.21
2.2.1 Ιδιότητες χάλυβα	σελ.21
2.2.2 Ιδιότητες αλουμινίου	σελ.22
2.2.3 Ιδιότητες χαλκού	σελ.23
2.3 Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	σελ.24
2.3.1 Πρέσα	σελ.24
2.3.2 Μήτρα και έμβολο.....	σελ.25
2.3.3 Διάταξη λήψης αποτελεσμάτων	σελ.29
2.4 Περιγραφή διάταξης παρατήρησης δοκιμίων	σελ.31
2.4.1 Κοπτικός τροχός.....	σελ.31
2.4.2 Λειαντικό μηχάνημα.....	σελ.32
2.4.3 Μικροσκόπιο	σελ.33
2.3 Αποτελέσματα πειράματος	σελ.34
2.5.1 Μορφή δοκιμίων μετά τη διέλαση	σελ.34
2.5.2 Λείανση δοκιμίων και παρατήρηση στο μικροσκόπιο	σελ.40

2.5.3 Γενικές παρατηρήσεις	σελ.67
Κεφάλαιο 3: Υπολογιστικό Μέρος	σελ.69
3.1 Γενικά για το LS – DYNA.....	σελ.71
3.1.1 Αλγόριθμος του LS – DYNA	σελ.71
3.1.2 Προ-επεξεργασία μοντέλου.....	σελ.73
3.2 Παρουσίαση μοντέλου.....	σελ.74
3.2.1 Μοντελοποίηση εμβόλου	σελ.75
3.2.2 Μοντελοποίηση μήτρας.....	σελ.77
3.2.3 Μοντελοποίηση δοκιμίων	σελ.83
3.3 Υλικά μοντέλων και ιδιότητες πεπερασμένων στοιχείων.....	σελ.99
3.3.1 Ορισμός υλικών.....	σελ.102
3.3.2 Ορισμός είδους πεπερασμένων στοιχείων.....	σελ.105
3.4 Συνθήκες επαφής	σελ.105
3.4.1 Ορισμός επιφανειών και κόμβων	σελ.107
3.4.2 Δημιουργία επαφών.....	σελ.108
3.5 Στοιχεία ελέγχου και οριακές συνθήκες	σελ.113
3.5.1 Οριακές συνθήκες.....	σελ.114
3.5.2 Στοιχεία ελέγχου.....	σελ.120
3.5.3 Εξαγωγή ειδικού αρχείου και επίλυση	σελ.121
3.6 Μονάδες μέτρησης μεγεθών	σελ.122
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Υπολογιστικού Μέρους	σελ.123
4.1 Γενικός σχολιασμός αποτελ. υπολογ. μέρους.....	σελ.125
4.2 Αποτελέσματα υπολ. μέρους για το δοκ. #1	σελ.126
4.2.1 Μορφή δοκιμίου	σελ.126
4.2.2 Τάσεις και παραμορφώσεις	σελ.130
4.2.3 Καμπύλη φορτίου	σελ.135
4.3 Αποτελέσματα υπολ. μέρους για το δοκ. #2.....	σελ.137
4.3.1 Μορφή δοκιμίου	σελ.137
4.3.2 Τάσεις και παραμορφώσεις	σελ.139
4.3.3 Καμπύλη φορτίου	σελ.144
4.4 Αποτελέσματα υπολ. μέρους για το δοκ. #3	σελ.144
4.4.1 Μορφή δοκιμίου	σελ.145
4.4.2 Τάσεις και παραμορφώσεις	σελ.146
4.4.3 Καμπύλη φορτίου	σελ.151
4.5 Αποτελέσματα υπολ. μέρους για το δοκ. #4.....	σελ.152
4.5.1 Μορφή δοκιμίου	σελ.152
4.5.2 Τάσεις και παραμορφώσεις	σελ.155
4.5.3 Καμπύλη φορτίου	σελ.159
4.6 Αποτελέσματα υπολ. μέρους για το δοκ. #5	σελ.160
4.6.1 Μορφή δοκιμίου	σελ.161
4.6.2 Τάσεις και παραμορφώσεις	σελ.163
4.6.3 Καμπύλη φορτίου	σελ.168

4.7 Αποτελέσματα υπολ. μέρους για το δοκ. #6.....	σελ.169
4.7.1 Μορφή δοκιμίου	σελ.169
4.7.2 Τάσεις και παραμορφώσεις	σελ.172
4.7.3 Καμπύλη φορτίου	σελ.177
4.8 Γενικά συμπεράσματα	σελ.178
4.8.1 Συμπεράσματα από τη μορφή των δοκιμίων.....	σελ.179
4.8.2 Συμπεράσματα από τις τάσεις	σελ.180
4.8.3 Συμπεράσματα από τις παραμορφώσεις.....	σελ.181
4.8.4 Συμπεράσματα από τις καμπύλες.....	σελ.181

Κεφάλαιο 5: Σύγκριση Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα σελ.183

5.1 Κατασκευή καμπυλών	σελ.185
5.1.1 Κατασκευή καμπύλης πειραματικών αποτελεσμάτων	σελ.186
5.1.2 Κατασκευή καμπύλης υπολογιστικών αποτελεσμάτων	σελ.194
5.2 Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων	σελ.204
5.2.1 Δοκίμιο #1	σελ.205
5.2.2 Δοκίμιο #2	σελ.207
5.2.3 Δοκίμιο #3	σελ.209
5.2.4 Δοκίμιο #4	σελ.211
5.2.5 Δοκίμιο #5	σελ.212
5.2.6 Δοκίμιο #6	σελ.214
5.2.7 Συμπεράσματα.....	σελ.216
5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκ. με ίδια αναλογία υλικών	σελ.217
5.3.1 Δοκίμια με αναλογία Al-66%, Cu-34%	σελ.217
5.3.2 Δοκίμια με αναλογία Al-50%, Cu-50%	σελ.218
5.3.3 Δοκίμια με αναλογία Al-34%, Cu-66%	σελ.219
5.3.4 Συμπεράσματα.....	σελ.221
5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκ. με ίδια ακολουθία υλικών	σελ.222
5.4.1 Δοκίμια με πυρήνα από αλουμίνιο	σελ.222
5.4.2 Δοκίμια με πυρήνα από χαλκό	σελ.224
5.4.3 Συμπεράσματα.....	σελ.225
5.5 Γενικά συμπεράσματα	σελ.225
5.6 Πιθ. εφαρμογές αποτελ. και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	σελ.227
5.6.1 Πιθανές εφαρμογές αποτελεσμάτων	σελ.227
5.6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	σελ.228

Βιβλιογραφία σελ.231

Παράρτημα σελ.235

Κεφάλαιο 1:

Θεωρητικό Μέρος

1.0 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται παράθεση ορισμένων θεωρητικών στοιχείων, που όμως είχαν άμεση σχέση με την παρούσα διπλωματική εργασία.

Στην πρώτη ενότητα παρουσιάζονται ορισμένα γενικά χαρακτηριστικά για την κατεργασία της διέλασης.

Τέλος, στην δεύτερη ενότητα παρατίθενται στοιχεία σχετικά με την ιστορία και την εξέλιξη των πολυμεταλλικών τεμαχίων.

1.1 Περί διέλασης^[3]

1.1.1 Γενικά

Η διέλαση ανήκει στις κατεργασίες διαμόρφωσης υλικού. Κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης κατεργασίας, το τεμάχιο συμπιέζεται μέσω ενός εμβόλου μέσα σε μεταλλικό θάλαμο, στο άλλο άκρο του οποίου ευρίσκεται κατάλληλα διαμορφωμένη μήτρα, και αναγκάζεται να εξέλθει από το άνοιγμα της μήτρας αποδίδοντας προϊόν με μικρότερη διατομή και μεγαλύτερο μήκος. Η διέλαση είναι γνωστή από τον 18ο αιώνα και εκτελείται είτε ως θερμή, είτε ως ψυχρή κατεργασία.

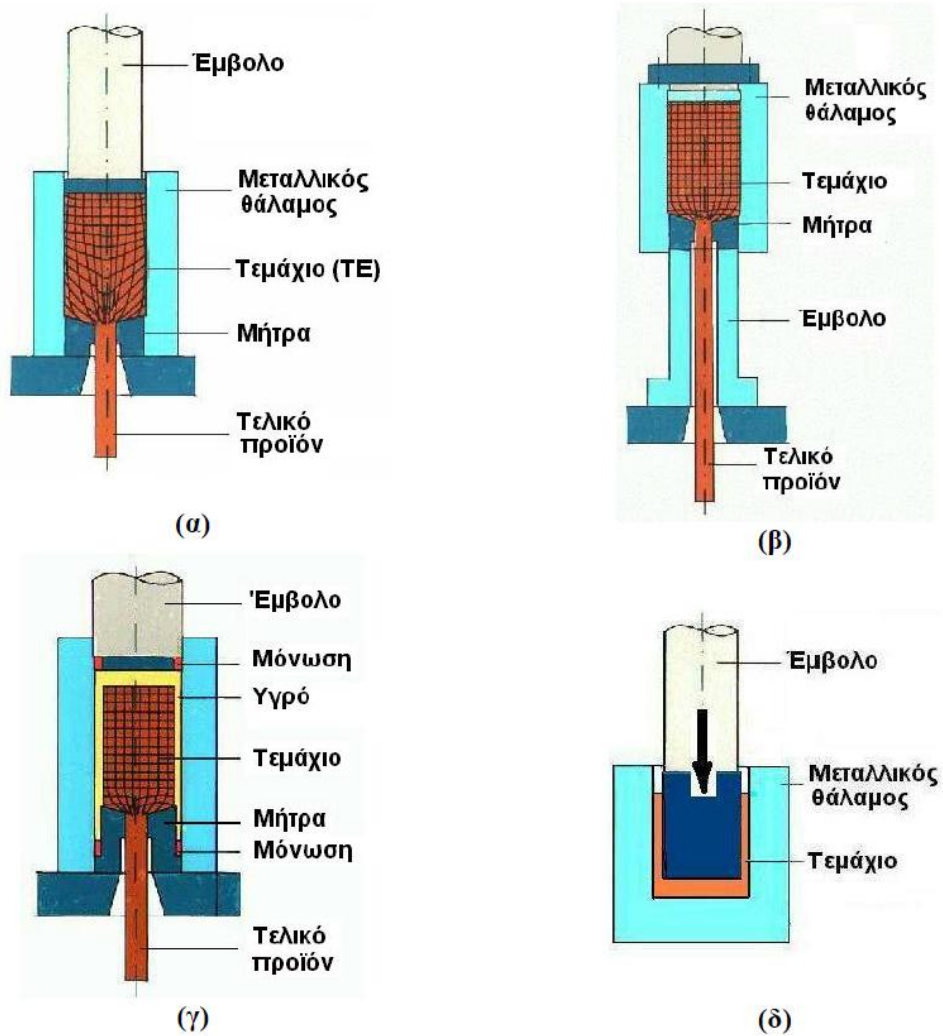
Η χρησιμοποιούμενη εργαλειομηχανή για την εκτέλεση της διέλασης είναι η πρέσα, συνήθως υδραυλική, οριζόντια για τη θερμή διέλαση και κατακόρυφη για τη ψυχρή διέλαση. Το εργαλείο που χρησιμοποιείται στη διέλαση περιλαμβάνει: α) το μεταλλικό θάλαμο, β) τη μήτρα, γ) το έμβολο και δ) το συμπληρωματικό εξοπλισμό (δακτυλίους συγκράτησης κλπ.). Σχετικά με την ταχύτητα του εμβόλου, οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες ταχύτητες φθάνουν μέχρι 0,5 m/s. Οι μικρότερες ταχύτητες προτιμούνται για την κατεργασία μαλακών υλικών (Al, Mg, Cu), ενώ οι μεγαλύτερες τιμές για τα σκληρότερα υλικά (χάλυβες, πυρίμαχα κράματα).

1.1.2 Ταξινόμηση των μεθόδων διέλασης

Ανάλογα με τη διαδικασία εκτέλεσης της διέλασης, διακρίνονται τα ακόλουθα είδη:

1. Άμεση διέλαση (Direct extrusion)
 - Είναι η κλασσική περίπτωση διέλασης.
 - Η ροή του υλικού έχει την κατεύθυνση της κίνησης του εμβόλου.
 - Το τεμάχιο «γλιστρά» στα τοιχώματα του μεταλλικού θαλάμου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, αναπτύσσοντας ισχυρές δυνάμεις τριβής.
2. Έμμεση διέλαση (Indirect extrusion)
 - Στο μέτωπο του εμβόλου έχει ενσωματωθεί η μήτρα.
 - Με την κίνηση του εμβόλου η μήτρα κινείται ως προς το τεμάχιο, ενώ το τελευταίο παραμένει ακίνητο μέσα στο θάλαμο. Το τελικό προϊόν εξέρχεται από κεντρική οπή στον άξονα του εμβόλου.
 - Η ροή του υλικού έχει αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της κίνησης του εμβόλου.
 - Οι τριβές στη διεπιφάνεια τεμαχίου/θαλάμου είναι αμελητέες.
3. Υδροστατική διέλαση (Hydrostatic extrusion)
 - Ο μεταλλικός θάλαμος πληρούται με υγρό, το οποίο συμπιέζεται από το έμβολο. Η αναπτυσσόμενη υδραυλική πίεση μεταφέρεται ομοιόμορφα στη μιγέτα, η οποία και διελάσσεται.
 - Δεν υπάρχει καθόλου τριβή του τεμαχίου με τα τοιχώματα του θαλάμου.
 - Προσοχή πρέπει να δίνεται στη στεγανότητα της εγκατάστασης.
4. Κρουστική διέλαση (Impact extrusion)
 - Πρόκειται για μια μορφή έμμεσης διέλαση και εκτελείται με μεγάλη ταχύτητα εμβόλου.
 - Ο θάλαμος έχει αντικατασταθεί από αβαθή κοιλότητα και το υλικό αναγκάζεται να περιρρέει το περίγραμμα του εμβόλου.
 - Εφαρμόζεται σε σχετικά μαλακά υλικά (Pb, Zn, Al, Cu) για την παραγωγή μικρού μήκους κυαθίων.

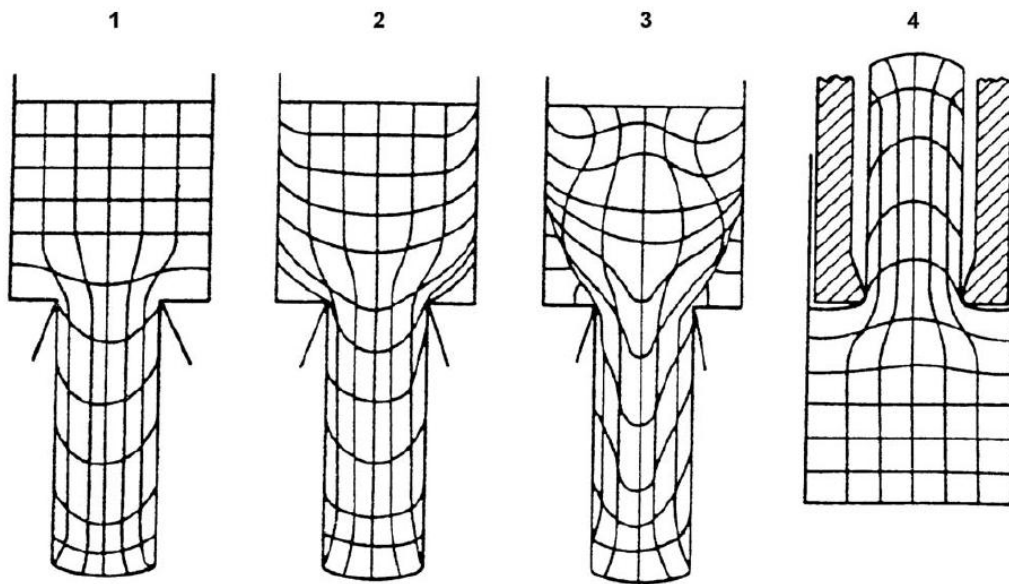
Οι τέσσερις παραπάνω μέθοδοι διέλασης, απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα.



Είδη διέλασης: (α) Ευθεία διέλαση, (β) Έμμεση διέλαση, (γ) Υδροστατική διέλαση και (δ) Κρουστική διέλαση

1.1.3 Ροή μετάλλου

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται χαρακτηριστικές περιπτώσεις της ροής του υλικού κατά τη διέλαση. Όπως είναι εμφανές με τη χρήση πλεγμάτων σε διαιρετές μιγέτες, χαρακτηριστική είναι η ανάπτυξη νεκρών ζωνών στην έξοδο, η εμφάνιση των οποίων ευνοείται από τις μεγάλες τριβές.



Ροή του υλικού κατά τη διέλαση: (1) Χαμηλή τριβή/πολύ καλή λίπανση στα τοιχώματα του θαλάμου, (2) Μεγαλύτερη τριβή/ανάπτυξη «νεκρής ζώνης» μετάλλου στην έξοδο της μήτρας, (3) Εντόνως μεγάλη τριβή/ανομοιογενής ροή μετάλλου, (4) Ροή υλικού στην έμμεση διέλαση (χαμηλή τριβή).

1.1.4 Φάσεις της διέλασης

Διακρίνουμε τις ακόλουθες φάσεις μιας άμεσης διέλασης μαζί με την επίδραση καθεμιάς στη διαμόρφωση του φορτίου κατεργασίας:

Φάση 1: Αρχική ή μεταβατική φάση

- Βαθμιαία πλήρωση του μεταλλικού θαλάμου με το κατεργαζόμενο υλικό του τεμαχίου.
- Απότομη αύξηση του φορτίου μέχρι μια μέγιστη τιμή, που αντιστοιχεί στην έναρξη εμφάνισης του πρώτου τμήματος προϊόντος στην έξοδο της μήτρας.

Φάση 2: Ευσταθής φάση

- Ομαλή διεξαγωγή της διέλασης με σταθερό ρυθμό.
- Ανάπτυξη νεκρής ζώνης (ακίνητο υλικό) στην έξοδο της μήτρας.
- Μείωση του μήκους της μπιγέτας μέσα στο θάλαμο με συνέπεια τη μείωση της αντίστασης τριβών.

- Βαθμιαία μείωση του φορτίου διέλασης, σε μικρότερο βαθμό στη θερμή διέλαση ή για μη κρατυνόμενα υλικά και σε μεγαλύτερο ρυθμό για την ψυχρή διέλαση κρατυνόμενων υλικών.

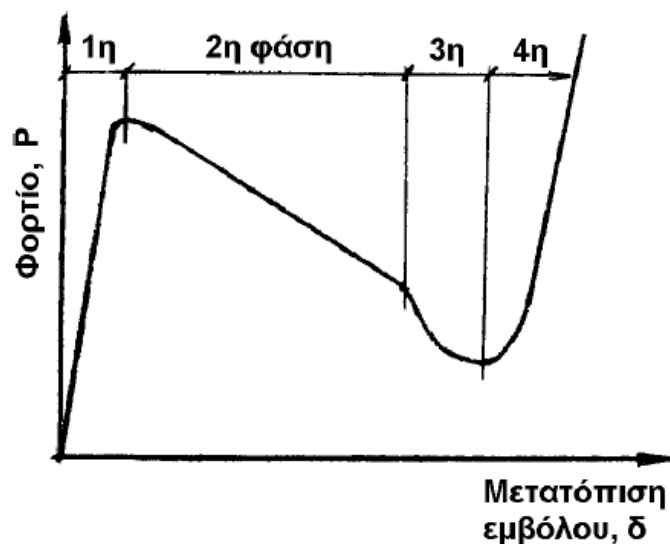
Φάση 3: Φάση αστάθειας

- Όταν το μήκος της μπιγέτας μέσα στο μεταλλικό θάλαμο γίνει πολύ μικρό (το έμβολο πλησιάζει τη νεκρή ζώνη), παρατηρείται τριγμός στο εργαλείο διέλασης και θόρυβος.
- Το φαινόμενο συνοδεύεται με απότομη μείωση του φορτίου μέχρι μια ελάχιστη τιμή.

Φάση 4: Ανάπτυξη ελαττώματος

- Περαιτέρω μείωση του μήκους της μπιγέτας οδηγεί σε απώλεια επαφής του κεντρικού τμήματος της μπιγέτας με την πιέζουσα επιφάνεια του εμβόλου, δημιουργείται κεντρική κοιλότητα στο τελικό προϊόν και το υπόλοιπο τμήμα της μπιγέτας παρασύρεται μέσα σ' αυτή την κοιλότητα.
- Το τμήμα του τελικού προϊόντος που φέρει τη σχηματιζόμενη κοιλότητα θεωρείται ελαττωματικό και αποκόπτεται.
- Κατά τη φάση αυτή σημειώνεται απότομη αύξηση του φορτίου κατεργασίας και συνιστάται η διακοπή της κατεργασίας.

Όλες οι φάσεις της διέλασης απεικονίζονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Φάσεις της διέλασης

1.1.5 Τεχνολογικά χαρακτηριστικά ψυχρής διέλασης

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε ψυχρή διέλαση των τριμεταλλικών δοκιμίων. Τα κυριότερα τεχνολογικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης κατεργασίας συνοψίζονται παρακάτω:

- Λόγω της κράτυνσης του υλικού του τεμαχίου που σημειώνεται σε κάθε ψυχρή κατεργασία, τα φορτία κατεργασίας είναι σχετικά υψηλά. Γι' αυτό πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην κατασκευή των διαφόρων μερών του εργαλείου διέλασης από απόψεως υλικών κατασκευής και αντοχής.
- Ιδιαίτερη σημασία για την απρόσκοπτη εκτέλεση της ψυχρής διέλασης έχει το σύστημα λίπανσης.
- Χρησιμοποιούνται υψηλής πίεσης λιπαντικά και σάπωνες.
- Για τους χάλυβες εφαρμόζεται χημική επιφανειακή επικάλυψη Zn (φωσφάτωση) σε συνδυασμό με σάπωνα.
- Προσοχή πρέπει να δίνεται στη ακριβή οδήγηση του εμβόλου προς αποφυγή λυγισμού ή θραύσης του. Για το λόγο αυτό προτιμούνται οι κατακόρυφες πρέσες.
- Παρατηρείται σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας της τάξης των 500-600°C, λόγω της πρόσδοσης πλαστικού έργου.

1.2 Ιστορική εξέλιξη πολυμεταλλικών τεμαχίων^[e1]

1.2.1 Τα πρώτα χρόνια

Η ιστορία των πολυμεταλλικών τεμαχίων ξεκίνησε από μια ομάδα μηχανικών (S. E. Bramer, Jacob Roth, F. R. S. Kaplan, Simon Loeb και William Smith, Sr.) στο Rankin της Pennsylvania, οι οποίοι ήταν οι πρώτοι που δημιούργησαν έναν μόνιμο μεταλλουργικό δεσμό μεταξύ του χαλκού και του χάλυβα, το 1915. Ο συγκεκριμένος δεσμός αρχικά δημιουργήθηκε από μια κατεργασία θερμικής συγκόλλησης. Το προϊόν τους, γνωστό ως CCS (copper-clad steel), το πατένταραν κάτω από τη φήρμα Copperweld[®]. Σύντομα το συγκεκριμένο προϊόν χρησιμοποιήθηκε ως υποκατάστατο του χάλκινου σύρματος ως αγωγού σε πολλές εφαρμογές. Η χρήση του ήταν

ενδεδειγμένη σε εφαρμογές όπου το κοινό χάλκινο σύρμα παραμορφωνόταν εύκολα ή δεν παρείχε το όριο θραύσης του χάλυβα. Η αρχική του, όμως, χρήση ήταν η κατασκευή ελατηρίων για ρολόγια, αφού το CCS εμπόδιζε το σχηματισμό σκουριάς. Η πρώτη εταιρεία δημιουργήθηκε με το όνομα Copper-Clad Steel Company, αλλά το 1924 μετονομάστηκε σε Copperweld Steel Company.

Το 1927, στην εταιρεία προσαρτήθηκε ένα πρώην εργοστάσιο κατασκευής τσεκουριών στο Glassport της Pennsylvania. Η εταιρεία βρήκε για πρώτη φορά στις αγορές το 1929, λίγο πριν το Μεγάλο Κραχ, και οι μετοχές της στο τέλος αποσύρθηκαν.

Ο σπουδαιότερος πελάτης της εταιρείας ήταν το κράτος των Η.Π.Α. σε όλη τη διάρκεια του Κραχ και του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου, ενώ η πατέντα που είχε δημιουργηθεί ήταν σε μεγάλο βαθμό ο λόγος που η εταιρεία κρατήθηκε ζωντανή εκείνο τον καιρό της οικονομικής κρίσης. Αργότερα, το 1937, η εταιρεία μπήκε στο New York Curb Exchange, και το 1940 η μετοχή της πωλούνταν στο Χρηματιστήριο της Νέας Υόρκης. Εκεί θα παρέμενε μέχρι το 1999.

Το 1939, η Copperweld θα άνοιγε το δεύτερο της εργοστάσιο στο Warren του Ohio, όπου θα κατεργαζόταν χαλύβδινες μπιγέτες.

1.2.2 Μετα-πολεμική άνθηση και διαφοροποίηση

Μετά τον πόλεμο, η αναβίωση της αμερικανικής οικονομίας βοήθησε την Copperweld να θριαμβεύσει. Τα γραφεία της εταιρεία μεταφέρθηκαν από το Glassport στο κέντρο του Pittsburgh, μέσα σε λίγο χρονικό διάστημα μετά από τον πόλεμο. Αν και οι επενδύσεις στα τμήματα που ήδη είχε η εταιρεία ήταν μεγάλες, η εξαγορά νέων τμημάτων έγινε σύντομα ένας από τους μεγαλύτερους αναπτυξιακούς στόχους της. Το 1951, η εταιρεία εξαγόρασε την Flexo Wire Co. στο Oswego της Νέας Υόρκης. Τον επόμενο χρόνο, η Copperweld άρχισε την παραγωγή χαλύβδινων σωλήνων, αφού εξαγόρασε την Seamless Tubing Company στο Shelby του Ohio. Το 1957 η εταιρεία συγχωνεύτηκε με την Superior Steel Company, μια εταιρεία η οποία ασχολούνταν με το φινίρισμα των ανοξείδωτων χάλυβων. Παρόλα αυτά, το συγκεκριμένο τμήμα πωλήθηκε μετά από πέντε χρόνια, λόγω χαμηλής αποδοτικότητας.

Σε συνεργασία με το Battelle Memorial Institute, η εταιρεία σχεδίασε τη γραμμή παραγωγής ενός δεύτερου διμεταλλικού προϊόντος, του επικαλυμμένου με αλουμίνιο, χαλύβδινου σύρματος, το οποίο πατένταρε κάτω από την ονομασία Alumoweld[®], το 1959. Το νέο αυτό προϊόν έκανε επιτυχία και η εταιρεία προσπάθησε να φτιάξει την πρώτη της πολυεθνική το 1966, την οποία ονόμασε Japan Alumoweld Company pf, με έδρα το Numazu της Ιαπωνίας. Οι μετοχές της Copperweld ήταν το 45% της συγκεκριμένης πολυεθνικής, ενώ το υπόλοιπο ανήκε στην εταιρεία Fujikura Ltd., η οποία κατασκεύαζε σύρματα και καλώδια.

Το 1972, η Copperweld Steel Co. εξαγόρασε το τμήμα κατασκευής σωλήνων της εταιρείας Lear – Siegler που είχε σαν έδρα το Chicago.

1.2.3 Το νέο όνομα

Πλέον πλήρως διαφοροποιημένη, η εταιρεία άλλαξε το όνομά της το 1973, σε Copperweld Corporation. Η εταιρεία τότε, επεκτάθηκε στις πρωτογενείς και δευτερογενείς αγορές μεταλλουργικών προϊόντων, προσφέροντας μια πληθώρα προϊόντων, ανάμεσα στα οποία ήταν και τα διμεταλλικά σύρματα και οι διμεταλλικές πλάκες. Επίσης, απασχολούσε χιλιάδες εργαζόμενους στις Η.Π.Α., τον Καναδά, την Ιαπωνία και τη Βρετανία. Η κατεργασία διμεταλλικών τεμαχίων δεν περιοριζόταν πλέον μόνο στο χαλκό και το χάλυβα, αλλά μπορούσαν να συνδυαστούν διάφορα μέταλλα και κράματα μεταξύ τους, όπως το αλουμίνιο, ο τσίγκος, ο μπρούτζος, ο χρυσός, το νικέλιο και το ασήμι.

Το 1974, παρουσιάστηκε η τρίτη γκάμα διμεταλλικών προϊόντων με το CCA (copper-clad aluminium), για την παραγωγή του οποίου άνοιξε ένα νέο εργοστάσιο στο Fayetteville του Tennessee. Το παράρτημα αυτό της εταιρείας, ή Copperweld Southern, όπως ήταν γνωστό, θα γινόταν το κέντρο της παραγωγής των διμεταλλικών συρμάτων.

1.2.4 Εξαγορά, κρίση και διάσπαση

Το 1975, η γαλλική εταιρεία Imétal S.A. (σήμερα γνωστή ως Imerys), η οποία ανήκε στην οικογένεια Rothschild, αγόρασε την πλειοψηφία των μετοχών της Copperweld Corporation. Αυτή η κίνηση ήταν η πρώτη εχθρική εξαγορά μιας

αμερικανικής εταιρείας από άλλη χώρα. Παρόλα αυτά, η Imétal αποφάσισε να μην επέμβει ξανά στην από εκεί και πέρα επιτυχημένη κατεύθυνση της εταιρείας.

Το 1978, η εταιρεία επέκτεινε την παραγωγή διμεταλλικών συρμάτων της στη Βραζιλία, όπου πραγματοποίησε μια σύμπραξη με την Erico International Corp. Μετά από μόλις τρία χρόνια, η Copperweld εξαγόρασε ολόκληρη την λειτουργία από τον συνεργάτη της.

Ένα νέο παράρτημα δημιουργήθηκε το 1980 με την εμφάνιση της Copperweld Energy, η οποία αγόρασε μετοχές της εταιρείας Guardian Oil Company. Ο μόνος λόγος της εμπλοκής της Copperweld με την αγορά της ενέργειας, ήταν ώστε να μπορεί να εξασφαλίσει σταθερή παροχή φυσικού αερίου για τα εργοστάσιά της στο Ohio και την Pennsylvania. Τον ίδιο χρόνο εξαγόρασε και την American Seamless Tubing.

Το 1984, το Ανώτατο Δικαστήριο των Η.Π., εκδίκασε υπέρ της Copperweld σε μια περίπτωση ονομαστικής αντιδικίας με την εταιρεία Copperweld Corp. v. Independence Tube Corp. Το δικαστήριο όρισε ότι μια γονεϊκή εταιρεία δεν μπορεί ποτέ να δράσει ενάντια μιας θυγατρικής την οποία κατέχει πλήρως.

Η ισχυρή κρίση του χάλυβα από τα τέλη της δεκαετίας του 70 έως και τις αρχές του 80, επηρέασε πολύ σοβαρά την Copperweld. Την περίοδο εκείνη τα εργοστάσια στο Glassport και το Oswego έκλεισαν και οι επιχειρηματικές τους δραστηριότητες μεταφέρθηκαν στο Copperweld Southern στο Fayetteville, αφού εκεί τα ημερομίσθια ήταν πιο φθηνά.

1.2.5 Δύο εταιρείες Copperweld

Σε μια προσπάθεια να αποκόψει ένα μέρος της εταιρείας από την κατεργασία του χάλυβα και να επικεντρωθεί στα προκατασκευασμένα χαλύβδινα προϊόντα, η Imétal απέκοψε το τμήμα του Ohio, και δημιούργησε μια νέα εταιρεία την CSC (Copperweld Steel Company) Industries. Το γεγονός αυτό προκάλεσε σύγχυση και για κάποιους οι δύο εταιρείες Copperweld συνυπήρχαν.

Παρόλα αυτά, η κίνηση της Imétal απέδωσε, αφού η Copperweld Companies ένα χρόνο μετά παρουσίασε κέρδη, σε αντίθεση με την CSC Industries η οποία χρεοκόπησε το 1993, αφού δεν κατάφερε ποτέ να αποφέρει κέρδη. Παρόλα αυτά, η

CSC Industries εξαγοράστηκε αργότερα από την εταιρεία Hamlin Holdings, το 1995, η οποία χρησιμοποιούσε άτυπα το όνομα της Copperweld για δικό της.

1.2.6 Επάνοδος

Στα τέλη της δεκαετίας του 80, η Copperweld Corporation επέστρεψε σαφώς πιο υγιής, με την απομάκρυνση των επιχειρήσεών της από την Βραζιλία και την πώληση των επιχειρήσεων παραγωγής σωλήνων στη Baltimore. Η επέκταση ήταν και πάλι στον επιχειρηματικό ορίζοντα της εταιρείας, όταν το 1988 ανακοίνωσε την αναβάθμιση των εργοστασίων της στο Shelby, το Ohio και την κατασκευή ενός ακόμα εργοστασίου παραγωγής σωλήνων στο Birmingham της Alabama, όπου όλα αυτά κόστισαν 90 εκατ. δολάρια. Επίσης, η εταιρεία αγόρασε το τμήμα Copperply της National Standard Company, στο οποίο ανέθεσε τον έλεγχο μιας ανταγωνιστικής επένδυσης πάνω στα διμεταλλικά σύρματα.

Το 1989, η Copperweld ανακοίνωσε μια ακόμα συνεργασία με την Fujikura, στην οποία το 1992 πούλησε και όλα τα δικαιώματα παραγωγής και πώλησης του Alumoweld®.

Η ίδια η εταιρεία συνέχισε την ανάπτυξή της και την ενασχόλησή της κυρίως στον τομέα παραγωγή σωλήνων. Τα διμεταλλικά σύρματα γνώρισαν επίσης άνθιση, όταν η ζήτησή τους ανέβηκε σημαντικά λόγω της χρήσης τους στην κατασκευή των δημόσιων καρτοτηλεφώνων.

1.2.7 Πώληση και χρεοκοπία

Το 1999 η εταιρεία LVT Steel εξαγόρασε την Copperweld Corp από την Iméтал, για το ποσό των 650 εκατ. δολαρίων, και την μετονόμασε σε LVT Copperweld. Παρόλα αυτά, η LVT χρεοκόπησε και αναγκάστηκε να πουλήσει όλα τα της τα περιουσιακά στοιχεία, μαζί και την Copperweld.

1.2.8 Αυστηρά διμεταλλικά

Η εταιρεία Dofasco, αγόρασε τα περισσότερα από τα μερίσματα της LVT Copperweld, μεταξύ των οποίων και το 50% του τμήματος διμεταλλικών συρμάτων.

Στη συνέχεια, το 2006 τα μερίσματα αυτά πέρασαν στα χέρια ενός ιδιώτη και λειτούργησαν πλέον κάτω από την ονομασία Copperweld Bimetallics LLC. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίστηκε και το δικαίωμα παραγωγής των CCS, εφόσον η επωνυμία της εταιρείας ήταν ακόμα Copperweld.

1.2.9 Είσοδος στην Fushi International

Τελικά, η εταιρεία Copperweld εφόσον λειτούργησε για λίγα χρόνια ως μικρή επιχείρηση, μπήκε στη κινέζικη πολυεθνική Fushi International. Η τελευταία προχώρησε σε μια μεγάλη επένδυση στα εργοστάσια που παρήγαγαν διμεταλλικά σύρματα. Πολύ σύντομα ήταν η μόνη προμηθεύτρια εταιρεία των προϊόντων CCS και CCA, αρχικά στην Κίνα και μετά σε παγκόσμια κλίμακα. Τρεις μήνες μετά την εξαγορά της Copperweld, η εταιρεία μετονομάστηκε σε Fushi Copperweld, διατηρώντας τα δικαιώματα των ομώνυμων προϊόντων.

1.2.10 Προϊόντα

Τα προϊόντα της Fushi Copperweld σήμερα περιλαμβάνουν μια ευρεία γκάμα διμεταλλικών συρμάτων, καλωδίων και πλακών. Οι συνδυασμοί των μετάλλων επιλέγονται έτσι ώστε να παρέχονται τα δύο υλικών ξεχωριστά. Έτσι, τα σύρματα CCS, συνδυάζουν την αγωγιμότητα του χαλκού με την αντοχή του χάλυβα. Το 1963, η μέθοδος παραγωγής με θερμική συγκόλληση εγκαταλείφτηκε και στη θέση της χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος πίεσης – έλασης, η οποία χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα.

Όσον αφορά στο προϊόν CCA, προσφέρει μεγαλύτερη ευκαμψία και λιγότερο βάρος, σε σχέση με τα μονομεταλλικά χαλύβδινα σύρματα. Το 2011 η Fushi Copperweld έδωσε άδεια στην εταιρεία Nexans, ώστε να ξεκινήσει την παραγωγή του CCA, με μια δική της αποκλειστική μέθοδο. Έτσι, έγινε δυνατή η παραγωγή διμεταλλικού σύρματος, διαμέτρου 0,03 mm, δηλαδή το 1/5 της διαμέτρου μιας ανθρώπινης τρίχας.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται κάποια διμεταλλικά σύρματα της εταιρείας Copperweld.



Διμεταλλικά σύρματα

Κεφάλαιο 2:

*Πειραματικό Μέρος – Διεξαγωγή Πειράματος και
Λήψη Αποτελεσμάτων*

2.0 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του πειράματος που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Στην πρώτη ενότητα του κεφαλαίου εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η κατασκευή των δοκιμίων. Στη δεύτερη ενότητα περιγράφονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμίων του πειράματος, από άποψη ιδιοτήτων. Στις ενότητες τρία και τέσσερα περιγράφεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση του πειράματος και για την παρατήρηση των δοκιμίων μετά το πείραμα, αντίστοιχα. Τέλος, στην πέμπτη ενότητα γίνεται η παράθεση των αποτελεσμάτων του πειράματος και της παρατήρησης των δοκιμίων στο μικροσκόπιο.

2.1 Περιγραφή των δοκιμίων του πειράματος

2.1.1 Γενικά για τα δοκίμια

Για την πραγματοποίηση του πειράματος έπρεπε αρχικά να γίνει η κατασκευή των τριμεταλλικών δοκιμίων. Έτσι, έπρεπε να αντιμετωπιστούν ορισμένα προβλήματα που είχαν παρατηρηθεί κατά την κατασκευή παλαιότερων διμεταλλικών δοκιμίων, καθώς και να αποφασιστεί η μορφή των τριμεταλλικών δοκιμίων, κυρίως σε σχέση με τη σειρά και την αναλογία των υλικών τους, καθώς και με τον αριθμό τους.

Από παλαιότερα πειράματα που είχαν γίνει με παρόμοια διμεταλλικά δοκίμια στην ίδια κατεργασία, είχε γίνει εμφανές το πρόβλημα της έντονης διαρροής του εσωτερικού υλικού πριν το πέρας της κατεργασίας. Το συγκεκριμένο πρόβλημα είχε ως συνέπεια την παραγωγή μη συμπαγών διμεταλλικών δοκιμίων (δοκιμίων με διάκενο ανάμεσα στα δύο υλικά). Για την αντιμετώπιση της έντονης αυτής διαρροής των εσωτερικών υλικών στα τριμεταλλικά τεμάχια, αποφασίστηκε ότι το εξωτερικό υλικό των δοκιμίων θα έπρεπε να περιλαμβάνει και πυθμένα, και άρα να είχε τη μορφή κυαθίου. Η προσθήκη του πυθμένα εμπόδισε τη διαρροή των εσωτερικών υλικών, δίνοντας έτσι ένα συμπαγές τελικό αντικείμενο (χωρίς διάκενα ενδιάμεσα στα υλικά).

Στη συνέχεια, έπρεπε να αποφασιστεί ο αριθμός των δοκιμίων. Αποφασίστηκε τελικά η κατασκευή έξι (6) δοκιμίων. Πιο συγκεκριμένα τα έξι δοκίμια χωρίστηκαν

σε δύο ομάδες των τριών (3) τεμαχίων. Κάθε ομάδα από τρία τεμάχια είχε ίδια αλληλουχία υλικών και διέφερε ως προς την αναλογία των δύο εσωτερικών υλικών.

Σε σχέση με τα υλικά, κάθε ομάδα από τρία δοκίμια είχε, είτε ενδιάμεσο υλικό χαλκό (Cu) και υλικό πυρήνα αλουμίνιο (Al), είτε το αντίστροφο. Το εξωτερικό υλικό ήταν σε όλα τα δοκίμια χάλυβας (St).

Τέλος, σε σχέση με την αναλογία των υλικών, αποφασίστηκε το ενδιάμεσο υλικό και το υλικό του πυρήνα να κυμαίνονται ανάμεσα στις παρακάτω αναλογίες όγκου:

- 34% όγκος ενδιάμεσου υλικού – 66% όγκος υλικού πυρήνα
- 50% όγκος ενδιάμεσου υλικού – 50% όγκος υλικού πυρήνα
- 66% όγκος ενδιάμεσου υλικού – 34% όγκος υλικού πυρήνα

Ο όγκος του εξωτερικού υλικού ήταν σε όλα τα δοκίμια περίπου ο ίδιος, με εξαίρεση ένα δοκίμιο που είχε λίγο πιο λεπτό πυθμένα.

Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά των έξι δοκιμίων που κατασκευάστηκαν, καθώς και ο αύξων αριθμός κάθε δοκιμίου. Στον πρώτο πίνακα βρίσκονται τα χαρακτηριστικά των υλικών των δοκιμίων, ενώ στον δεύτερο πίνακα βρίσκονται τα μεγέθη των δοκιμίων:

A/A δοκιμίου	Εξωτερικό υλικό	Ενδιάμεσο υλικό	Υλικό πυρήνα	Ποσοστό όγκου ενδιάμεσου υλικού	Ποσοστό όγκου υλικού πυρήνα
1	St	Cu	Al	34%	66%
2	St	Cu	Al	50%	50%
3	St	Cu	Al	66%	34%
4	St	Al	Cu	34%	66%
5	St	Al	Cu	50%	50%
6	St	Al	Cu	66%	34%

A/A δοκιμίου	Διάμετρος εξωτερικού υλικού (mm)	Διάμετρος ενδιάμεσου υλικού (mm)	Διάμετρος υλικού πυρήνα (mm)	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πάχος πυθμένα (mm)
1	25	22	18,7	42	2
2	25	22	15,6	42	2
3	25	22	11	42	2
4	25	22	18,7	41,5	1,5
5	25	22	15,6	42	2
6	25	22	11	42	2

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο δοκίμιο #4 πραγματοποιήθηκε η πρώτη δοκιμή σχετικά με το πάχος του πυθμένα. Επειδή για πάχος πυθμένα 1,5 mm αυτός κατέρρευσε, αποφασίστηκε τελικά ότι το πάχος του πυθμένα στα υπόλοιπα πέντε δοκίμια θα ήταν 2 mm. Επίσης, αποφασίστηκε αυθαίρετα ότι το ύψος όλων των δοκιμίων, αγνοώντας τον πυθμένα, θα ήταν 40 mm.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν υπήρχαν ελλειπείς συνθήκες λίπανσης, αφού η μήτρα δεν είχε κατάλληλη σχεδίαση για τη λίπανση του δοκιμίου, και το λιπαντικό έλαιο προστέθηκε στο δοκίμιο και το έμβολο με το χέρι. Βέβαια, λόγω της φύσης της κατεργασίας αυτό δεν επηρέασε σημαντικά την τελική μορφή των δοκιμίων, ενώ επίσης δεν προξένησε και προβλήματα στα εργαλεία.

2.1.2 Κατασκευή των δοκιμίων

Αφού αποφασίστηκε η μορφή, το μέγεθος και ο αριθμός των δοκιμίων, ξεκίνησε η κατασκευή τους. Ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστηκαν τα δοκίμια καθορίστηκε σε μεγάλο βαθμό από τα διαθέσιμα υλικά που υπήρχαν στο εργαστήριο.

Ο χάλυβας που υπήρχε διαθέσιμος ήταν κατάλληλος για τις περισσότερες συμβατικές κατεργασίες. Ως εκ τούτου, η κατασκευή των χαλύβδινων μερών των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στον τόρνο, στις ήδη αποφασισμένες διαστάσεις.

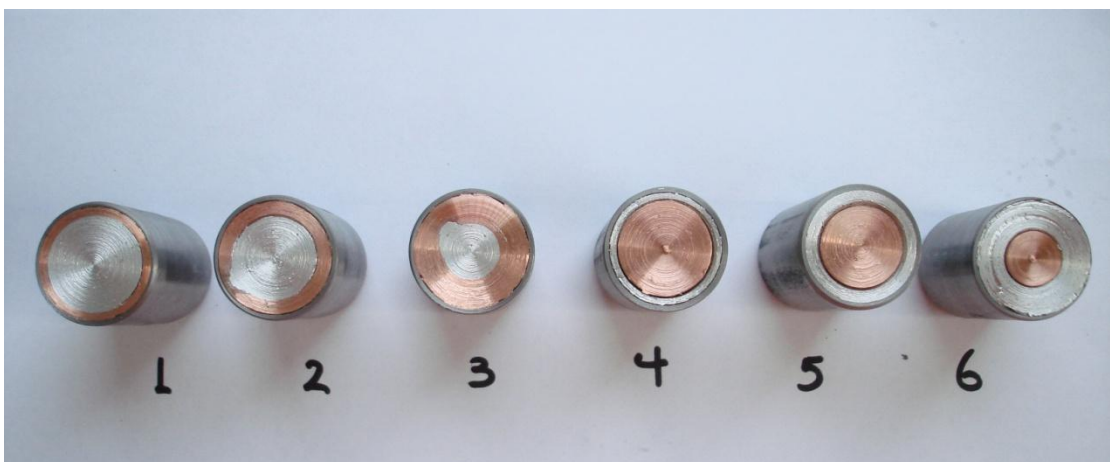
Ομοίως, και ο χαλκός που υπήρχε ήταν εύκολα κατεργάσιμος σε τόρνο, οπότε και τα χάλκινα μέρη κάθε δοκιμίου κατασκευάστηκαν με τη συγκεκριμένη κατεργασία.

Διαφορά παρατηρήθηκε στα μέρη από αλουμίνιο. Το διαθέσιμο αλουμίνιο του εργαστηρίου ήταν σε «χελώνα» και άρα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μόνο ως χυτό. Έτσι, αφού έγινε η κατασκευή των υπόλοιπων μερών στον τόρνο, καθώς και η κατάλληλη τοποθέτηση και ευθυγράμμισή τους (κυρίως στα δοκίμια #4, #5 και #6), πραγματοποιήθηκε τέλος η χύτευση του αλουμινίου.

Στις εικόνες που ακολουθούν εμφανίζονται τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν μέσω των προαναφερόμενων μεθόδων:



Πρόοψη των δοκιμίων



Κάτοψη των δοκιμίων

2.2 Περιγραφή των υλικών

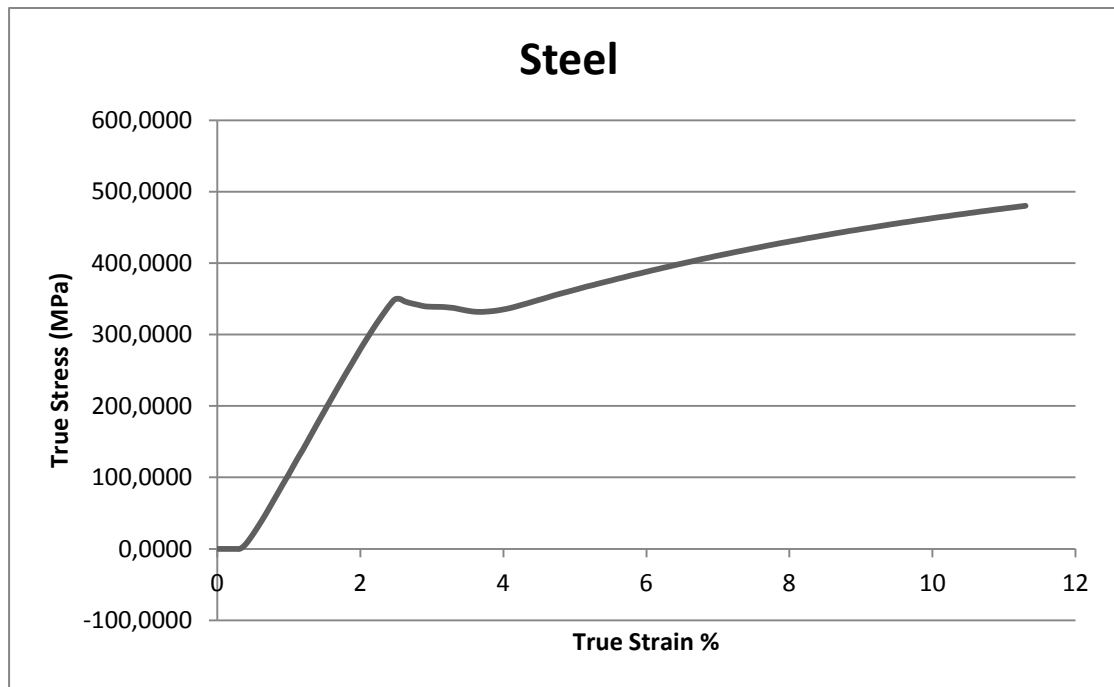
Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμίων είχαν υποβληθεί παλαιότερα σε κατάλληλες δοκιμές, ώστε να γίνουν γνωστές οι ιδιότητές τους. Οι δοκιμές αυτές ήταν δοκιμές θλίψης κυλινδρικών δοκιμίων. Το κάθε δοκίμιο αποτελούνταν από ένα υλικό, ενώ και οι διαστάσεις τους ήταν ξεχωριστές για κάθε δοκιμή. Από τις δοκιμές αυτές και με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού εξήχθησαν οι τιμές των ιδιοτήτων των υλικών, οι οποίες παρατίθενται στη συνέχεια για κάθε υλικό ξεχωριστά.

2.2.1 Ιδιότητες χάλυβα

Από τις δοκιμές των χαλύβδινων δοκιμίων εξήχθησαν οι παρακάτω ιδιότητες για το χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε:

Πυκνότητα, ρ	0,00785 gr/mm ³
Μέτρο ελαστικότητας, E	141704,7422 MPa
Λόγος Poisson, ν	0,3
Τάση διαρροής, Sig_y	349,7755 MPa

Επίσης, η καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων για το συγκεκριμένο υλικό προκύπτει ότι έχει την παρακάτω μορφή:



Καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων χάλυβα

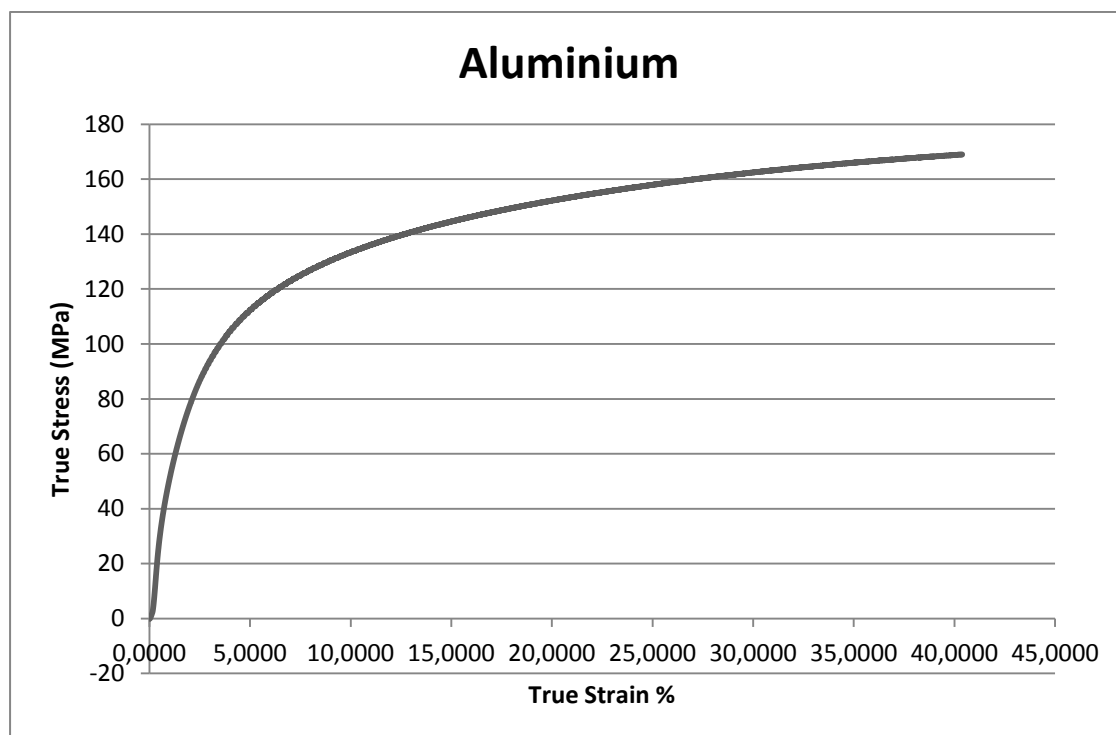
Αξίζει να αναφερθεί ότι οι πραγματικές τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων στο συγκεκριμένο λογισμικό, αναφέρονται ως true stress και true strain αντίστοιχα, και διαφέρουν από τις τιμές των μηχανολογικών τάσεων και παραμορφώσεων, που αναφέρονται ως stress και strain αντίστοιχα. Οι ονομασίες αυτές είναι οι ίδιες για όλα τα διαγράμματα των υλικών που ακολουθούν.

2.2.2 Ιδιότητες αλουμινίου

Από τις δοκιμές των δοκιμίων από αλουμίνιο εξήχθησαν τα ακόλουθα:

Πυκνότητα, ρ	0,0027 gr/mm ³
Μέτρο ελαστικότητας, E	54068,90157 MPa
Λόγος Poisson, ν	0,43
Τάση διαρροής, Sigy	63,33479 MPa

Η καμπύλη των τάσεων - παραμορφώσεων έχει την παρακάτω μορφή:



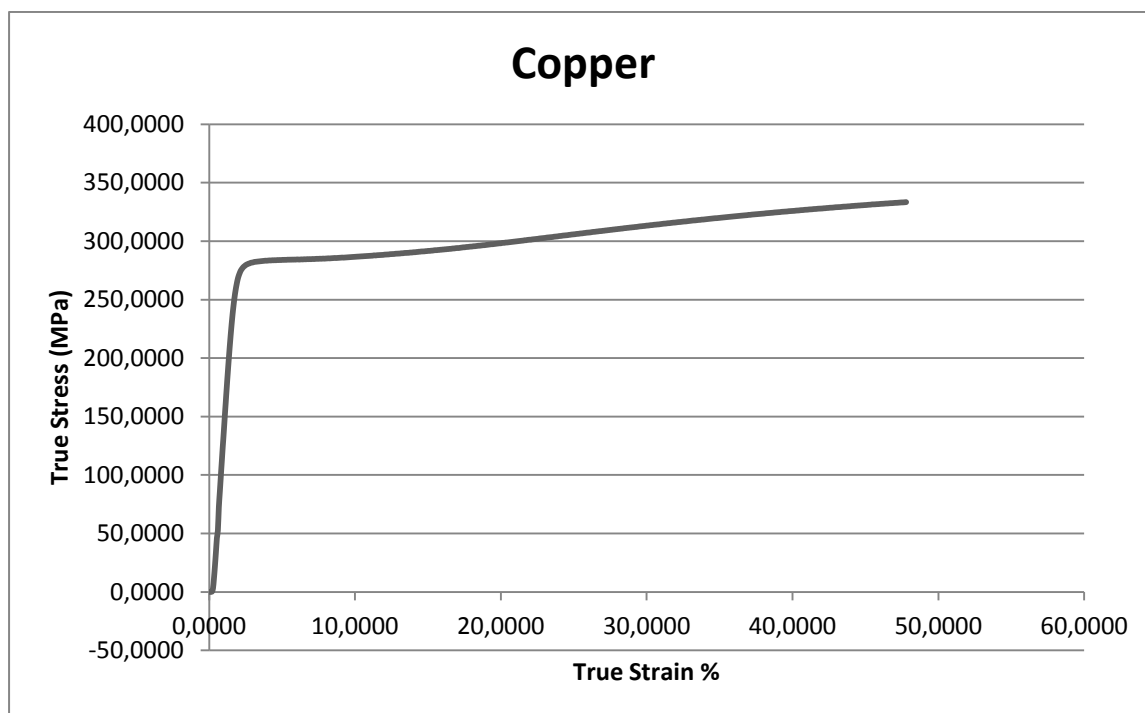
Καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων αλουμινίου

2.2.3 Ιδιότητες χαλκού

Από τις δοκιμές των χάλκινων δοκιμίων προέκυψαν τα παρακάτω στοιχεία για το συγκεκριμένο υλικό:

Πυκνότητα, ρ	0,0089 gr/mm ³
Μέτρο ελαστικότητας, E	130230,8496 MPa
Λόγος Poisson, ν	0,36
Τάση διαρροής, $Sigy$	258,1136 MPa

Η καμπύλη των τάσεων - παραμορφώσεων έχει την παρακάτω μορφή:



Καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων χαλκού

2.3 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Στην συγκεκριμένη ενότητα γίνεται περιγραφή των μηχανών που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση του πειράματος, καθώς και για τη λήψη των πειραματικών καμπυλών φορτίου – μετατόπισης κάθε δοκιμίου.

2.3.1 Πρέσα

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στην υδραυλική πρέσα του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Το ονομαστικό φορτίο της συγκεκριμένης μηχανής είναι 100 tn. Η συγκεκριμένη μηχανή είναι ανοικτού πλαισίου ή τύπου O, ενώ είναι διπλής ενέργειας. Το κύριο έμβολο της πρέσας βρίσκεται στο άνω μέρος του πλαισίου και πραγματοποιεί κατακόρυφη κίνηση (από επάνω προς τα κάτω), με μέγιστη διαδρομή 600 mm. Η ευθυγράμμιση της κίνησης του εμβόλου πραγματοποιείται από τέσσερις πείρους, οι οποίοι εξασφαλίζουν την κατακόρυφη και χωρίς αποκλίσεις κίνηση της πλάκας, πάνω στην οποία είναι προσδεμένο το έμβολο. Η πρέσα έχει και ένα δευτερεύον έμβολο στο κάτω μέρος του πλαισίου, το

οποίο χρησιμοποιείται, είτε ως μηχανικός εξολκέας, είτε για την κατεργασία της βαθείας κοίλανσης. Η συγκεκριμένη μηχανή κατασκευάστηκε στη Γερμανία από την εταιρεία SMG.



Υδραυλική πρέσα εργαστηρίου

Αξίζει να αναφερθεί ότι σε όλα τα πειράματα η ταχύτητα καθόδου του εμβόλου ήταν ρυθμισμένη στα 0,3 mm/s.

2.3.2 Μήτρα και Έμβολο

Η μήτρα που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα αποτελούνταν από πέντε μέρη. Το έμβολο ήταν ένα ενιαίο εργαλείο. Πιο συγκεκριμένα, το καθένα από τα τμήματα της μήτρας, αλλά και το έμβολο περιγράφονται παρακάτω:

1. Τμήμα εξόδου της μήτρας: Το τμήμα εξόδου της μήτρας είναι ένας κυλινδρικός δακτύλιος. Οι διαστάσεις του είναι:
 - Εξωτερική διάμετρος, $D = 90 \text{ mm}$

- Εσωτερική διάμετρος, $d = 21 \text{ mm}$
- Ύψος, $h = 57,74 \text{ mm}$

Το τμήμα αυτό της μήτρας φέρει και ειδική διαμόρφωση για την ορθή τοποθέτηση του κωνικού μέρους της μήτρας.

Ρόλος του τμήματος εξόδου είναι η διατήρηση των δοκιμίων στην επιθυμητή τελική διάμετρο, ώστε να αποφευχθούν μεταβολές στη διάμετρο του τελικού δοκιμίου, λόγω φαινομένων ελαστικής επαναφοράς των υλικών. Το συγκεκριμένο εργαλείο παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Τμήμα εξόδου της μήτρας

Το τμήμα εξόδου της μήτρας είναι κατασκευασμένο από εργαλειοχάλυβα.

2. Κωνικό τμήμα της μήτρας: Το κωνικό τμήμα της μήτρας είναι ένα κόλουρο κωνικό τμήμα. Οι διαστάσεις του τμήματος αυτού είναι:

- Μικρή διάμετρος, $D1 = 20 \text{ mm}$
- Μεγάλη διάμετρος, $D2 = 25 \text{ mm}$
- Ύψος τμήματος, $H = 24,7 \text{ mm}$
- Ύψος κόλουρου κώνου, $h = 9,26 \text{ mm}$
- Γωνία κωνικότητας, $\varphi = 15^\circ$

Το υλικό κατασκευής του τμήματος αυτού είναι χάλυβας CK 45. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι στο κάτω μέρος του συγκεκριμένου τμήματος υπάρχει κατάλληλη διαμόρφωση, ώστε να εφαρμόζει σωστά στο τμήμα εξόδου.

Το συγκεκριμένο εργαλείο αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα της μήτρας, αφού σε αυτό λαμβάνει χώρα η διαδικασία της διέλασης. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το κωνικό τμήμα της μήτρας.



Κωνικό τμήμα της μήτρας

3. Τμήμα εισόδου της μήτρας: Το τμήμα εισόδου της μήτρας είναι ένας μεταλλικός κυλινδρικός δακτύλιος, ο οποίος πλαισιώνει το κωνικό τμήμα με τη βοήθεια μιας κατάλληλης διαμόρφωσης. Οι διαστάσεις του τμήματος εισόδου της μήτρας είναι:

- Εξωτερική διάμετρος, $D = 35 \text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος, $d = 25 \text{ mm}$
- Ύψος τμήματος, $H = 70 \text{ mm}$

Μέσω του τμήματος εισόδου γίνεται η είσοδος των δοκιμίων στο κωνικό τμήμα, αλλά και η συγκράτησή τους κατά τη διάρκεια της διέλασης. Χάρη σε αυτό το τμήμα μπορούν να αποφευχθούν φαινόμενα βαρελοποίησης των δοκιμίων λόγω της πίεσης από το έμβολο, εξαναγκάζοντάς τα έτσι να περάσουν από το κωνικό τμήμα. Επίσης, το τμήμα εισόδου λειτουργεί και ως οδηγός για το έμβολο, ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος στρέβλωσής του κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

Το υλικό κατασκευής αυτού του εργαλείου είναι εργαλειοχάλυβας. Το τμήμα εισόδου της μήτρας παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα σε συνδυασμό με το τμήμα εξόδου και το κωνικό τμήμα.



Τμήμα εισόδου, τμήμα εξόδου και κωνικό τμήμα (όχι άμεσα ορατό) της μήτρας

4. Κύλινδρος υποστήριξης τμήματος εισόδου: Αυτό το τμήμα της μήτρας είναι ένας κυλινδρικός δακτύλιος. Οι διαστάσεις του είναι:

- Εξωτερική διάμετρος, $D = 90 \text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος, $d = 35 \text{ mm}$
- Ύψος, $h = 67 \text{ mm}$

Βασικός ρόλος του κυλίνδρου υποστήριξης του τμήματος εισόδου είναι να προσδώσει στιβαρότητα στο τμήμα εισόδου της μήτρας. Επίσης, επειδή δεν είναι ενιαίος με το τμήμα εισόδου, δεν απαιτείται αντικατάστασή του σε περίπτωση που καταστραφεί το τμήμα εισόδου της μήτρας.

Ο κύλινδρος υποστήριξης είναι κατασκευασμένος από εργαλειοχάλυβα. Το συναρμολογημένο σύνολο των τεσσάρων τμημάτων που αναφέρθηκαν φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Συναρμολογημένο σύνολο των τεσσάρων πρώτων τμημάτων της μήτρας

5. Κύλινδρος υποστήριξης άνω τμήματος μήτρας: Το τελευταίο αυτό τμήμα προσδίδει στιβαρότητα στο άνω τμήμα της μήτρας. Από άποψη γεωμετρίας είναι και αυτό ένας κυλινδρικός δακτύλιος. Οι διαστάσεις του είναι:

- Εξωτερική διάμετρος, $D = 90 \text{ mm}$
- Εσωτερική διάμετρος, $d = 35 \text{ mm}$
- Ύψος, $h = 25 \text{ mm}$

Το τμήμα αυτό είναι κατασκευασμένο από εργαλειοχάλυβα. Το πλήρες συναρμολογημένο σύνολο της μήτρας παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Πλήρες συναρμολογημένο σύνολο μήτρας

6. Έμβολο: Το έμβολο μεταφέρει την ισχύ από τη μηχανή (πρέσα) στο εκάστοτε δοκίμιο, ώστε να πραγματοποιηθεί η κατεργασία. Η γεωμετρία του είναι αυτή ενός συμπαγούς κυλίνδρου. Οι διαστάσεις του εμβόλου είναι:

- Διάμετρος, $D = 25 \text{ mm}$
- Ύψος, $h = 80 \text{ mm}$

Το έμβολο κατασκευάστηκε από κοινό χάλυβα. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το έμβολο ενώ είναι προσδεμένο στην πρέσα.



Έμβολο προσδεμένο στην πρέσα

2.3.3 Διάταξη λήψης αποτελεσμάτων

Η διάταξη λήψης αποτελεσμάτων αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Τους αισθητήρες λήψης σημάτων: Πρόκειται για έναν αισθητήρα μέτρησης φορτίου και έναν αισθητήρα μέτρησης της μετατόπισης του εμβόλου. Ο αισθητήρας μέτρησης φορτίου είναι τοποθετημένος ανάμεσα στην πλάκα της πρέσας και στο έμβολο, και μετρά την αντίδραση από την πίεση που εφαρμόζει το έμβολο. Με άλλα λόγια, μετρώνται οι τιμές των δυνάμεων που απαιτούνται για την

πραγματοποίηση της κατεργασίας. Ο αισθητήρας μέτρησης της μετατόπισης βρίσκεται τοποθετημένος στον κορμό της πρέσας και μετράει την μετατόπιση της πλάκας της πρέσας, μέσω ενός κανόνα που είναι προσδεμένος στον κορμό.

- Το σύστημα μετατροπής σημάτων: Το σύστημα αυτό αποτελείται από μια σειρά μηχανημάτων, τα οποία λαμβάνουν τα σήματα από τους αισθητήρες, τα ενισχύουν και τέλος τα μετατρέπουν σε ψηφιακή μορφή, ώστε να μπορούν να μεταφερθούν σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το σύστημα αυτό παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Σύστημα μετατροπής σημάτων

- Ηλεκτρονικός υπολογιστής: Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού, καταγράφει τις τιμές των δυνάμεων και τη μετατόπιση του εμβόλου, τα οποία εξάγει σε επεξεργάσιμη μορφή.



Ηλεκτρονικός υπολογιστής

2.4 Περιγραφή διάταξης παρατήρησης των δοκιμίων

Μετά το τέλος του πειράματος έπρεπε να παρατηρηθεί το εσωτερικό των δοκιμίων, ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί η επίδραση του πειράματος σε αυτά. Για το λόγο αυτό, τα δοκίμια θα έπρεπε να κοπούν σε κάποιο ύψος, να λειανθεί η προς παρατήρηση επιφάνεια και να παρατηρηθεί η μικροδομή της επιφάνειας, με τη βοήθεια του μικροσκοπίου. Τέλος, από την επιφάνεια των δοκιμίων έπρεπε να ληφθούν φωτογραφίες, ώστε να μπορέσουν να εξαχθούν συμπεράσματα. Παρακάτω περιγράφεται όλος ο απαραίτητος εξοπλισμός για τη συγκεκριμένη φάση του πειράματος.

2.4.1 Κοπτικός τροχός

Ο κοπτικός τροχός του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκε για την κοπή των δοκιμίων. Έχει δυνατότητα ανάπτυξης στροφών έως περίπου 4000 rpm. Τόσο η πρόσδεση των δοκιμίων, όσο και η κάθοδος του κοπτικού τροχού, ώστε να πραγματοποιηθεί η κοπή, γίνονται χειροκίνητα. Για το λόγο αυτό, η επιφάνεια που παράχθηκε από την κοπή δεν ήταν κατάλληλη και χρειάστηκε να ακολουθήσει λείανση των δοκιμίων. Ο κοπτικός τροχός κατασκευάστηκε από την εταιρεία Struers. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ο κοπτικός τροχός του εργαστηρίου.



Κοπτικός τροχός εργαστηρίου

2.4.2 Λειαντικό μηχάνημα

Το λειαντικό μηχάνημα του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκε για την βελτίωση της ποιότητας επιφάνειας που προέκυψε από την κοπή των δοκιμίων, ώστε αυτή να είναι εύκολα παρατηρήσιμη με το μικροσκόπιο.

Το μηχάνημα αποτελείται από έναν αποσπώμενο περιστρεφόμενο δίσκο, οι στροφές του οποίου ρυθμίζονται από το χρήστη του μηχανήματος, μεταξύ 0 – 600 rpm. Η φορά περιστροφής είναι ανθρωπολογιακή. Το ρόλο του ψυκτικού υγρού παίζει το νερό το οποίο εγχέεται στον περιστρεφόμενο δίσκο μέσω στομίου. Ο περιστρεφόμενος δίσκος μπορεί να αφαιρεθεί και στην θέση του να μπει άλλος δίσκος επικαλυμμένος με βελούδο, ειδικός για την κατεργασία της στίλβωσης.

Για τη λείανση των δοκιμίων του πειράματος χρησιμοποιήθηκε πληθώρα λειαντικών δίσκων (γυαλόχαρτων), σε διάφορες τιμές τραχύτητας. Για κάθε λειαντικό δίσκο οι τιμές των στροφών του μηχανήματος και της πίεσης των δοκιμίων πάνω στο δίσκο, ήταν διαφορετικές.

Τέλος, το λειαντικό μηχάνημα φέρει και έναν μύλο πρόσδεσης των δοκιμίων. Για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μύλος πρέπει πρώτα τα δοκίμια να εγκιβωτιστούν. Ο μύλος περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα 100 rpm, ανθρωπολογιακής φοράς.

Επίσης, στις θέσεις πρόσδεσης των δοκιμών υπάρχουν και ελατήρια προέντασης, ώστε να ρυθμίζεται η πίεση των δοκιμών πάνω στο δίσκο.

Η τριβή των δοκιμών επιτυγχάνεται από τη σχετική κίνηση των δύο περιστρεφόμενων μερών του μηχανήματος. Οι δύο περιστροφές είναι έκκεντρες, ενώ για τις περισσότερες εφαρμογές, η ταχύτητα περιστροφής του περιστρεφόμενου δίσκου είναι διαφορετική και του μύλου είναι διαφορετικές.

Το λειαντικό μηχάνημα του εργαστηρίου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Λειαντικό μηχάνημα εργαστηρίου

2.4.3 Μικροσκόπιο

Το μικροσκόπιο χρησιμοποιήθηκε για την παρατήρηση της μεταλλογραφικής δομής των επιφανειών των δοκιμών που διελάθηκαν. Η ονομαστική τιμή μεγέθυνσης του μικροσκοπίου είναι 10X οποιαδήποτε φυσική διάσταση. Επιπλέον μπορούν να τοποθετηθούν φακοί μεγέθυνσης τιμών: 5X, 10X, 20X, 50X, 100X και 200X, επιπλέον της ονομαστικής τιμής μεγέθυνσης.

Η εικόνα του μικροσκοπίου λαμβάνεται από μια κάμερα στο επάνω μέρος του μικροσκοπίου. Στη συνέχεια, τα δεδομένα από την κάμερα περνούν μέσω καλωδίου σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου μπορούν να μετατραπούν σε επεξεργάσιμη μορφή. Τέλος, υπάρχει και η δυνατότητα προβολής των αποτελεσμάτων σε τηλεόραση για καλύτερη εποπτεία κατά τη διάρκεια της εργασίας στο μικροσκόπιο.

Το μικροσκόπιο καθώς και οι υπόλοιπες συσκευές παρατήρησης φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί.



Διάταξη παρατήρησης δοκιμίων

2.5 Αποτελέσματα πειράματος

Στο σημείο αυτό και αφού περιγράφηκε ολόκληρη η πειραματική διάταξη, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των πειραμάτων.

2.5.1 Μορφή δοκιμίων μετά τη διέλαση

Τα δοκίμια αφού πέρασαν μέσα από τη μήτρα κατά τη φάση της διέλασης κατέληξαν σε ένα παρόμοιο κυλινδρικό σχήμα, με εξωτερική διάμετρο $D = 20 \text{ mm}$ και μεγαλύτερο ύψος που ποίκιλε ανάλογα με το δοκίμιο. Λόγω του ότι το έμβολο είχε διάμετρο $D = 25 \text{ mm}$, τα δοκίμια δεν πέρασαν ολόκληρα μέσα από το κωνικό τμήμα της μήτρας. Έτσι, το ανοικτό μέρος των δοκιμίων (το αντίθετο του μέρους όπου υπήρχε ο πυθμένας) είχε κωνική μορφή, σε ένα ύψος ίσο με το ύψος του αντίστοιχου τμήματος της μήτρας. Επίσης, μετά το τέλος της κατεργασίας τα δοκίμια παρέμειναν μέσα στη μήτρα και χρειάστηκε να πιεστούν με το έμβολο κατά την αντίθετη φορά (αντιστρέφοντας τη μήτρα), ώστε να βγουν από αυτή.

Η μορφή των περισσότερων δοκιμίων παρουσίαζε μια ημισφαιρική διαμόρφωση στο σημείο του πυθμένα τους, μετά τη διέλαση. Εξάιρεση αποτέλεσε το δοκίμιο #4, όπου ο πυθμένας αστόχησε πριν το πέρας της κατεργασίας και τα εσωτερικά υλικά διέρρευσαν ελεύθερα. Η ημισφαιρική αυτή διαμόρφωση μπορεί να δικαιολογηθεί βάσει της αύξησης της πίεσης στην περιφέρεια του πυθμένα κατά τη

διέλαση του δοκιμίου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία της διαμόρφωσης αυτής. Το μέγεθος της συγκεκριμένης διαμόρφωσης ήταν συνάρτηση και άλλων παραμέτρων, όπως το ποσοστό κάθε υλικού (από τα εσωτερικά υλικά) στο δοκίμιο, καθώς και κάποιων ιδιοτήτων των υλικών αυτών, όπως της πυκνότητας και του μέτρου ελαστικότητάς τους. Η ημισφαιρική διαμόρφωση του πυθμένα των δοκιμίων αλλοιώθηκε, όταν κατά την εξόλκευση των δοκιμίων από τη μήτρα, χρειάστηκε να εφαρμοστεί πίεση πάνω στα ημισφαίρια.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ημισφαιρικές διαμορφώσεις των πέντε δοκιμίων (πλην του δοκιμίου #4, δηλαδή), όπως ήταν πριν την εξόλκευση των δοκιμίων από τη μήτρα.



(Αριστερά) Διαμόρφωση δοκιμίου #1 μετά τη διέλαση



(Δεξιά) Διαμόρφωση δοκιμίου #2 μετά τη διέλαση



(Αριστερά) Διαμόρφωση δοκιμίου #3 μετά τη διέλαση



(Δεξιά) Διαμόρφωση δοκιμίου #5 μετά τη διέλαση



Διαμόρφωση δοκιμίου #6 μετά τη διέλαση

Η αύξηση του ύψους των δοκιμίων είναι αποτέλεσμα της αρχής διατήρησης του όγκου των δοκιμίων, εφόσον από την κατεργασία υπήρξε μείωση της διαμέτρου τους. Η αύξηση του ύψους ήταν διαφορετική για κάθε δοκίμιο, αν και γενικά οι διαφορές ήταν μικρές. Υπενθυμίζεται ότι τα δοκίμια δεν πέρασαν ολόκληρα από την κωνική μήτρα, αφού το έμβολο είχε διάμετρο $D = 25 \text{ mm}$, και άρα δεν μπορούσε να διέλθει από το εσωτερικό του κωνικού τμήματος.

Στις εικόνες που ακολουθούν εμφανίζονται τα δοκίμια όπως προέκυψαν μετά την εξόλκευση, καθώς και το τελικό μήκος των δοκιμίων όπως αυτό μετρήθηκε με τη βοήθεια μετρητικής ταινίας.

- Δοκίμιο #1:



(Αριστερά) Δοκίμιο #1 μετά την εξόλκευση

(Δεξιά) Μήκος δοκιμίου #1 μετά τη διέλαση και την εξόλκευση από τη μήτρα

- Δοκίμιο #2:



(Αριστερά) Δοκίμιο #2 μετά την εξόλκευση

(Δεξιά) Μήκος δοκιμίου #2 μετά τη διέλαση και την εξόλκευση από τη μήτρα

- Δοκίμιο #3:



(Αριστερά) Δοκίμιο #3 μετά την εξόλκευση

(Δεξιά) Μήκος δοκιμίου #3 μετά τη διέλαση και την εξόλκευση από τη μήτρα

- Δοκίμιο #4:



(Αριστερά) Δοκίμιο #4 μετά την εξόλκευση και τμήματα αυτού που αποκόπηκαν

(Δεξιά) Μήκος δοκιμίου #4 μετά τη διέλαση και την εξόλκευση από τη μήτρα

- Δοκίμιο #5:



(Αριστερά) Δοκίμιο #5 μετά την εξόλκευση

(Δεξιά) Μήκος δοκιμίου #5 μετά τη διέλαση και την εξόλκευση από τη μήτρα

- Δοκίμιο #6:



(Αριστερά) Δοκίμιο #6 μετά την εξόλκευση

(Δεξιά) Μήκος δοκιμίου #6 μετά τη διέλαση και την εξόλκευση από τη μήτρα

Ανάμεσα στα δοκίμια του πειράματος, το δοκίμιο #4 αποτελεί μια εξαίρεση. Όπως προαναφέρθηκε το συγκεκριμένο δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε ώστε να προσδιοριστεί πειραματικά το βέλτιστο πάχος του πυθμένα των δοκιμίων. Εφόσον στο συγκεκριμένο δοκίμιο το πάχος του πυθμένα δεν ήταν βέλτιστο, αυτός κατέρρευσε, με αποτέλεσμα τα εσωτερικά υλικά να διαρρεύσουν.

Στη συνέχεια, κατά τη φάση της εξόλκευσης όταν το δοκίμιο πιάστηκε κατά την αντίθετη φορά, κάποιο ποσοστό του αλουμινίου που είχε διαρρεύσει, αποτμήθηκε. Η αιτία ήταν η γεωμετρική διαφορά που υπήρξε ανάμεσα στην διάμετρο του τμήματος εξόδου της μήτρας και στη μικρή διάμετρο του κωνικού τμήματος. Έτσι, όταν το έμβολο εφάρμοσε πίεση στο δοκίμιο από την αντίθετη φορά της διέλασης, το ποσοστό εκείνο του αλουμινίου που βρισκόταν εκτός της μικρής

διαμέτρου του κωνικού τμήματος, εγκλωβίστηκε μεταξύ του εμβόλου και του κωνικού τμήματος, με αποτέλεσμα την απότμησή του.

Ένα άλλο αποτέλεσμα της εξόλκευσης ήταν και η οπισθοχώρηση του χάλκινου τμήματος του δοκιμίου. Όταν το δοκίμιο πιάστηκε αντίθετα, ο χαλκός είχε ήδη διαρρεύσει προς την φορά που γινόταν η διέλαση, και το ύψος του ήταν μεγαλύτερο από αυτό του χαλύβδινου περιβλήματος. Η πίεση που εφαρμόστηκε ήταν αρκετά μεγάλη ώστε να σπάσει ο δεσμός που είχε σχηματιστεί ανάμεσα στο χαλκό και το αλουμίνιο κατά τη διέλαση, και άρα αυτός να οπισθοχωρήσει, μέχρις ότου φτάσει στο σημείο όπου βρισκόταν το αλουμίνιο (το οποίο είχε υπερκαλύψει το χάλυβα, βλ. παρακάτω εικόνα). Έτσι απαιτήθηκε και μία συμπληρωματική εφαρμογή πίεσης στο δοκίμιο, ώστε να αναστραφεί η οπισθοχώρηση, και το δοκίμιο να πάρει τη μορφή που είχε στο τέλος της διέλασης. Το τελικό αποτέλεσμα μετά και από την επιπλέον εφαρμογή πίεσης, φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Τελική μορφή δοκιμίου #4

Στην εικόνα αυτή μπορεί κανείς να παρατηρήσει, ότι στο σώμα του χαλκού φαίνονται υπολείμματα αλουμινίου. Τα υπολείμματα αυτά ήταν κομμάτια αλουμινίου που είχαν σχηματίσει δεσμό με το χαλκό κατά τη διέλαση. Στα συγκεκριμένα σημεία ο δεσμός αυτός αποδείχθηκε ισχυρότερος από το ίδιο το αλουμίνιο, και για το λόγο αυτό, κατά την εφαρμογή της πίεσης από το έμβολο για την εξόλκευση του δοκιμίου, ήταν το αλουμίνιο αυτό που κατέρρευσε και όχι ο δεσμός. Η ιδιαιτερότητα στην κατεργασία του δοκιμίου αυτού, επηρέασε σημαντικά τα οπτικά αποτελέσματα στο

συγκεκριμένο δοκίμιο, γεγονός που επιβεβαιώθηκε από την παρατήρηση με το μικροσκόπιο. Μετά το τέλος της κατεργασίας βρέθηκε και συλλέχθηκε ο πυθμένα του δοκιμίου, καθώς και μερικά από τα κομμάτια του αλουμινίου που αποτμήθηκαν.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ακόμα, η εμφάνιση μικρών «αυτιών» στην περιφέρεια της ημικυκλικής διαμόρφωσης του δοκιμίου #6, τα οποία παρουσιάστηκαν μετά την εξόλκευση. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η διάμετρος του συγκεκριμένου δοκιμίου μετά τη διέλαση ήταν ελαφρός μεγαλύτερη από 20 mm, και έτσι κατά την εξόλκευση του δοκιμίου από τη μήτρα, το δοκίμιο αναγκάστηκε να συμπιεστεί στην περιφέρεια της κωνικής μήτρας. Αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία της συγκεκριμένης διαμόρφωσης.

2.5.2 Λείανση δοκιμίων και παρατήρηση στο μικροσκόπιο

Μετά την κατεργασία τα δοκίμια κόπηκαν σε κάποιο μέσο ύψος τους, με τη χρήση του κοπτικού τροχού. Στη συνέχεια, τα μέρη που λήφθηκαν, εγκιβωτίστηκαν μέσα σε ειδική ρητίνη και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε λείανσή τους.

Για τη λείανση ακολουθήθηκε συγκεκριμένη μεθοδολογία, όπου περιελάμβανε διαδοχική λείανση των δοκιμίων με γυαλόχαρτα μειούμενης τραχύτητας (από πιο χοντρόκοκκα, σε πιο λεπτόκοκκα γυαλόχαρτα). Για κάθε γυαλόχαρτο εφαρμόστηκε συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής του δίσκου του λειαντικού, συγκεκριμένη πίεση στα ελατήρια του μύλου, ενώ η κατεργασία πραγματοποιήθηκε για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Η εφαρμογή της πίεσης των ελατηρίων στο μύλο, έγινε με ποιοτικό τρόπο, μέσω ενός δείκτη και πέντε οριζοντίων ευθειών, τα οποία υπήρχαν πάνω από κάθε ελατήριο. Όταν ο δείκτης πάνω από κάθε ελατήριο ήταν στην πρώτη ευθεία, στο δοκίμιο εφαρμοζόταν η ελάχιστη δυνατή πίεση. Αντίθετα, όταν ο δείκτης ήταν στην πέμπτη ευθεία, στο δοκίμιο εφαρμοζόταν η μέγιστη δυνατή πίεση. Η αυξομείωση της πίεσης που ασκούσαν τα ελατήρια (και το ταυτόχρονο ανεβοκατέβασμα του δείκτη) ρυθμιζόταν μέσω του δακτυλίου προέντασης κάθε ελατηρίου του μύλου.

Τα χαρακτηριστικά της διαδικασίας λείανσης που πραγματοποιήθηκε περιγράφονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Σειρά διαδοχής	Αριθμός γυαλόχαρτου (grit/mm ²)	Ταχύτητα περιστροφή (rpm)	Πίεση ελατηρίου (ποιοτική προσέγγιση)	Χρόνος λείανσης (min)
1	220	100	5	3
2	500	200	4,5	3
3	800	250	4	3
4	1200	450	2,5	5
5	2400	500	1,5	5
6	4000	600	1	5

Μετά από τη λείανση τα δοκίμια παρατηρήθηκαν στο μικροσκόπιο. Έμφαση δόθηκε κυρίως στην κατάσταση της διεπιφάνειας κάθε ζεύγους μετάλλου. Στις διεπιφάνειες των μετάλλων αναζητήθηκαν ελαττώματα που τυχόν δημιουργήθηκαν κατά τη διέλαση, ενώ σημασία δόθηκε επίσης και στη γενικότερη μορφή της διεπιφάνειας.

Τα αποτελέσματα της παρατήρησης στο μικροσκόπιο, καθώς και τα συμπεράσματα από την παρατήρηση παρουσιάζονται για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Σημειώνεται ότι κάτω από τις εικόνες που πάρθηκαν με το μικροσκόπιο αναφέρεται τόσο η επεξήγηση της εικόνας, όσο και ο φακός του μικροσκοπίου με τον οποίο λήφθηκε η εικόνα. Έτσι, αν μια εικόνα λήφθηκε με το φακό 50X, τα εικονιζόμενα μεγέθη είναι 500 φορές μεγαλύτερα από τα φυσικά, αφού το μικροσκόπιο έχει ονομαστική μεγέθυνση 10X.

- *Δοκίμιο #1:*

Αρχικά παρατηρήθηκαν οι επιφάνειες σε κάθε ένα από τα υλικά του δοκιμίου. Ο λόγος ήταν ώστε να μπορέσουν να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της λείανσης και άρα και να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία των οπτικών αποτελεσμάτων στις διεπιφάνειες των μετάλλων.



(Αριστερά) Αλουμίνιο – 20X

(Δεξιά) Χαλκός – 20X



Χάλυβας – 20X

Από τις εικόνες αυτές εύκολα παρατηρείται η διαφορά στην ποιότητα επιφάνειας μεταξύ του αλουμινίου και των άλλων δύο μετάλλων. Ο λόγος της πιο κακής επιφανειακής ποιότητας του αλουμινίου, σε σχέση με τα άλλα δύο μέταλλα, έγκειται στο γεγονός ότι το αλουμίνιο ήταν χυτό. Αποτέλεσμα αυτού ήταν ότι το αλουμίνιο απέκτησε ελαττώματα, όπως εγκλείσματα και διακενώσεις, σε όλο το σώμα του. Παρόλα αυτά, ως επιφάνεια είναι αρκετά καθαρή και άρα τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρατήρηση θεωρούνται αξιόπιστα.

Εφόσον οι επιφάνειες των υλικών ήταν αρκετά καθαρές, έγινε αναζήτηση πιθανών ελαττωμάτων στη διεπιφάνεια των μετάλλων. Ο λόγος είναι ότι βασικό χαρακτηριστικό οποιασδήποτε εφαρμογής των συγκεκριμένων δοκιμίων πρέπει να είναι η συμπαγής δομή των δοκιμίων, η οποία έγκειται στη μη ύπαρξη μεγάλων διακενώσεων ανάμεσα στα μέταλλα.

Στη συνέχεια, γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων για κάθε διεπιφάνεια ξεχωριστά:

Διεπιφάνεια χάλυβα – χαλκού: Στη διεπιφάνεια των συγκεκριμένων μετάλλων παρατηρήθηκαν επαναλαμβανόμενα ελαττώματα. Οι εικόνες των χαρακτηριστικότερων επαναλαμβανόμενων ελαττωμάτων, παρουσιάζονται παρακάτω.



(Αριστερά) Εισχώρηση χάλυβα στο χαλκό και γραμμικό πορώδες πάνω στη διεπιφάνεια – 20X

(Δεξιά) Διακένωση πάνω στη διεπιφάνεια και μικροεισχωρήσεις – 20X



(Αριστερά) Μεγέθυνση πορώδους – 50X

(Δεξιά) Μεγέθυνση διακενώσεων – 50X

Από την παρατήρηση φάνηκε ότι μεταξύ του χάλυβα και του χαλκού εμφανίστηκε γραμμικό πορώδες σε αρκετά σημεία της διεπιφάνειας. Σε ορισμένα σημεία το πορώδες αυτό τελείωνε (ή ξεκινούσε) από μία μεγαλύτερη διακένωση.

Μετά από μεγέθυνση των πόρων, φάνηκε ότι αυτοί ήταν αρκετά μικροί σε βάθος, ενώ συγκριτικά το πλάτος τους ήταν μεγαλύτερο.

Εάν ληφθεί υπ' όψιν ότι κατά την κατασκευή του δοκιμίου δεν υπήρξε κάποιου είδους συγκόλληση μεταξύ των δύο μετάλλων, τότε το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η ύπαρξη του γραμμικού πορώδους δεν είναι παρά το διάκενο μεταξύ των δύο μετάλλων που έχει κλείσει σε μεγάλο ποσοστό. Με άλλα λόγια, κατά τη συμπίεση των δύο μετάλλων το διάκενο αυτό έκλεινε, όχι όμως ομοιόμορφα, αφήνοντας έτσι μικρά ανοίγματα, τα οποία στην επιφάνεια φαίνονται ως πόροι.

Επίσης, η ύπαρξη διακενώσεων μπορεί να θεωρηθεί ως τοπικό ελάττωμα, αφ' ενός από το γεγονός ότι υπήρχε σε πολύ μικρό ποσοστό και αφ' ετέρου από το γεγονός ότι συνοδευόταν από αρκετές ατέλειες στην περιοχή. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι πιθανώς να δημιουργήθηκε, είτε κατά την κοπή του δοκιμίου (η οποία ήταν αρκετά ακανόνιστη, αφού έγινε χειροκίνητα), είτε κατά τη λείανσή του. Σε κάθε περίπτωση οι διακενώσεις που δημιουργήθηκαν ήταν μικρού βάθους και έκτασης.

Τέλος, οι εισχωρήσεις που παρατηρήθηκαν, ήταν σχετικά μικρές σε έκταση και στις περισσότερες περιπτώσεις ο χάλυβας εισχώρησε στον χαλκό. Αυτό καθίσταται λογικό συγκρίνοντας τα δύο υλικά, όπου και φαίνεται καθαρά ότι ο χάλυβας είναι ισχυρότερος από το χαλκό. Έτσι, με την αύξηση της πίεσης κατά τη διέλαση, ο χαλκός υποχώρησε και ο χάλυβας εισχώρησε στο εσωτερικό του. Αντίθετης φοράς εισχωρήσεις έγιναν μάλλον κατά τη διάρκεια της λείανσης, συμπέρασμα που προκύπτει από το ακανόνιστο σχήμα τους, καθώς και από το γεγονός ότι δεν ήταν πάντα πάνω στη διεπιφάνεια αλλά σε μια περιοχή γύρω από αυτήν.

Διεπιφάνεια χαλκού – αλουμινίου: Από αυτή τη διεπιφάνεια λήφθηκαν οι παρακάτω εικόνες.



(Αριστερά) Εισχωρήσεις – 20X

(Δεξιά) διακένωση – 20X



(Αριστερά) Ρηγμάτωση – 50X

(Δεξιά) Μεγέθυνση πόρων – 50X



(Αριστερά) Εισχώρηση και πόρος – 50X

(Δεξιά) Πόροι και γραμμικό πορώδες – 50X

Στη συγκεκριμένη διεπιφάνεια, παρατηρήθηκαν πολλά μεμονωμένα ελαττώματα. Σε μεγέθυνση 20 φορές επί την ονομαστική μεγέθυνση του μικροσκοπίου, τα μόνα ορατά ελαττώματα ήταν μερικές μικρές σε εύρος εισχωρήσεις, καθώς και ελάχιστες διακενώσεις. Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση (50 φορές

επί την ονομαστική μεγέθυνση του μικροσκοπίου) παρουσιάστηκαν μερικά ακόμα μεμονωμένα ελαττώματα, όπως μερικοί ρηχοί πόροι παρόμοιοι με αυτούς της άλλης διεπιφάνειας του δοκιμίου, καθώς και κάποιες μικρές ρηγματώσεις. Ακόμα, φάνηκαν μερικές μικρές εισχωρήσεις και σε ορισμένα σημεία γραμμικό πορώδες πολύ κοντά στην διεπιφάνεια των δύο μετάλλων.

Το γεγονός ότι στη διεπιφάνεια αυτή δεν υπάρχει μεγάλη παρουσία πορώδους, μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι το αλουμίνιο ήταν χυτό, και άρα ότι είναι πολύ πιθανή η δημιουργία δεσμών μεταξύ του χαλκού και του αλουμινίου κατά τη χύτευση του τελευταίου. Στην χύτευση του αλουμινίου μπορεί να αποδοθεί και η ύπαρξη των διακενώσεων, αφού είναι πολύ πιθανή η δημιουργία ορισμένων κραμάτων, τα οποία στη συνέχεια απομακρύνθηκαν κατά την κοπή ή τη λείανση του δοκιμίου.

Συγκρίνοντας τους πόρους που παρατηρήθηκαν στις δύο διεπιφάνειες του δοκιμίου, φαίνεται ότι στη διεπιφάνεια αυτή οι πόροι ήταν αρκετά πλατύτεροι και πιο ρηχοί. Σε μερικές περιπτώσεις μάλιστα, το σχήμα τους ήταν ελλειπτικό. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι στην περίπτωση αυτή οι πόροι οφείλονται, είτε σε μικρά κράματα που δημιουργήθηκαν κατά τη χύτευση, είτε σε εγκλείσματα ή παγίδευση αερίων κατά την ίδια φάση. Σε κάθε περίπτωση η απομάκρυνση των συγκεκριμένων υλικών (κραμάτων, εγκλεισμάτων ή αερίων) έγινε κατά τη φάση της κοπής ή της λείανσης.

Τέλος, σχολιάζοντας τα υπόλοιπα ελαττώματα, φαίνεται ότι τόσο οι εισχωρήσεις, όσο και οι ρηγματώσεις ή το πορώδες, συνέβησαν κατά τη φάση της διέλασης. Το μέγεθός τους όμως, καθώς και ο αριθμός τους στη συγκεκριμένη διεπιφάνεια, ήταν πολύ μικρά και άρα όχι επικίνδυνα.

Συμπέρασμα: Γενικά σχολιάζοντας το δοκίμιο αυτό, προκύπτει ότι τα ελαττώματα που υπήρχαν, δεν ήταν ιδιαίτερα επικίνδυνα. Το εύρος των περισσοτέρων έγινε ορατό σε μεγέθυνση 50 φορές επί την ονομαστική μεγέθυνση του μικροσκοπίου (500 φορές μεγαλύτερη από τη φυσική τους διάσταση), οπότε δεν μπορούν να θεωρηθούν ιδιαίτερος απειλητικά. Σημαντικό είναι να παρατηρηθεί ακόμα, ότι υπήρξε και δημιουργία δεσμών μεταξύ των μετάλλων, κάτι που ενισχύει ακόμα περισσότερο την αντοχή και την συμπαγή δομή του δοκιμίου. Έτσι, σε γενικές γραμμές, το

συγκεκριμένο δοκίμιο, βάσει της μεταλλογραφικής του δομής, μπορεί να χαρακτηριστεί ως ασφαλές.

- Δοκίμιο #2:

Στο δοκίμιο αυτό, οι εικόνες που πήραμε για την ποιότητα της λείανσης κάθε υλικού, φαίνονται παρακάτω.



(Αριστερά) Αλουμίνιο – 20X



(Δεξιά) Χαλκός – 20X



Χάλυβας – 20X

Συγκρίνοντας τις επιφάνειες των υλικών αυτού του δοκιμίου, με εκείνες του δοκιμίου #1, προκύπτει ότι στο συγκεκριμένο δοκίμιο η λείανση ήταν σχετικά καλύτερη. Έτσι, τα αποτελέσματα της παρατήρησης θεωρήθηκαν ασφαλή. Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες των ελαττωμάτων που παρατηρήθηκαν σε κάθε διεπιφάνεια:

Διεπιφάνεια χάλυβα – χαλκού: Στην περίπτωση αυτή τα ελαττώματα έγιναν ορατά σε μεγέθυνση 50 φορές επί την ονομαστική μεγέθυνση του μικροσκοπίου. Οι εικόνες που λήφθηκαν ήταν οι εξής.



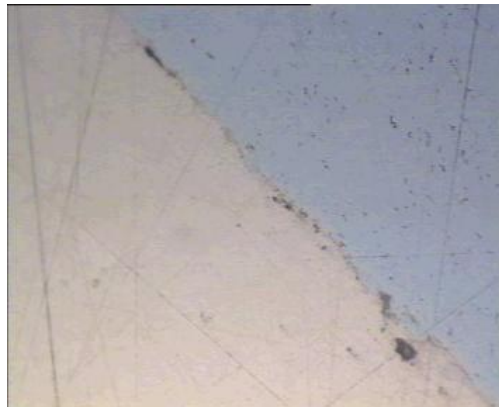
(Αριστερά) Εισχώρηση υλικού – 50X



(Δεξιά) Ρηγματώση και πολλαπλή διακένωση – 50X



(Αριστερά) Ρηγματώση – 50X



(Δεξιά) Γραμμικό πορώδες και διακενώσεις – 50X

Και σε αυτό το δοκίμιο παρατηρήθηκε πορώδες ανάμεσα στο χάλυβα και το χαλκό. Βέβαια η έκτασή του ήταν σχετικά μικρή, ενώ και σε μεγέθυνση 50 φορές επί την ονομαστική μεγέθυνση, το μέγεθος των πόρων ήταν πολύ μικρό. Επίσης, όπως και πριν, παρατηρήθηκαν διακενώσεις εκεί όπου τελείωνε ή εκκινούσε το πορώδες.

Σε πολύ μεγαλύτερη έκταση από ότι προηγουμένως, στο δοκίμιο αυτό παρατηρήθηκαν ρηγματώσεις. Οι ρηγματώσεις αυτές βρίσκονταν στο μεγαλύτερο μέρος της διεπιφάνειας των δύο μετάλλων. Το βάθος τους ήταν σχετικά μικρό, όπως και το μήκος τους. Αντίθετα, σε πολύ μικρότερη κλίμακα παρατηρήθηκε το γραμμικό

πορώδες, το οποίο είχε περίπου μήκος και πλάτος ίδιας τάξης με τις ρηγματώσεις. Το συμπέρασμα που προκύπτει, λοιπόν, είναι ότι τόσο το γραμμικό πορώδες, όσο και οι ρηγματώσεις, δεν ήταν παρά το διάκενο που υπήρχε πριν τη διέλαση ανάμεσα στα δύο μέταλλα, το οποίο όμως δεν έκλεισε ομοιόμορφα κατά μήκος της διεπιφάνειας.

Ένα χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης διεπιφάνειας ήταν η ύπαρξη πολλαπλών διακενώσεων. Αυτές, αν και λίγες σε αριθμό, παρουσιάστηκαν σε όλη την περιφέρεια της διεπιφάνειας. Διέφεραν από τις ρηγματώσεις κυρίως ως προς το μέγεθος του διακένου, αλλά και το σχήμα που παρέκλινε από αυτό της ρηγματώσεως. Η ύπαρξη αυτών των διακενώσεων πιθανώς είναι αποτέλεσμα της απομάκρυνσης κάποιου ποσοστού υλικού, ή κάποιου ενδιάμεσου υλικού που παράχθηκε κατά τη διέλαση. Η απομάκρυνση αυτή συνέβη είτε κατά τη φάση της κοπής του δοκιμίου, είτε κατά τη φάση της λείανσης.

Τέλος, και σε αυτήν τη διεπιφάνεια υπήρξε η εισχώρηση χάλυβα στο χαλκό, σε αρκετά σημεία της διεπιφάνειας. Η εισχώρηση οφείλεται στην αύξηση της πίεσης κατά τη διέλαση.

Διεπιφάνεια χαλκού – αλουμινίου: Από την συγκεκριμένη διεπιφάνεια λήφθηκαν οι παρακάτω εικόνες.



(Αριστερά) Ρηγματώση – 50X

(Δεξιά) Γραμμικό πορώδες και πόρος – 50X



(Αριστερά) Εισχώρηση υλικού – 50X

(Δεξιά) Πόροι σε διακενώσεις – 50X

Στη διεπιφάνεια αυτή ήταν ορατές ορισμένες ρηγματώσεις. Αν και ήταν μικρές σε πλάτος και βάθος, υπήρχαν σε αρκετά σημεία της διεπιφάνειας. Ο λόγος ήταν ότι, όπως και προηγουμένως, σε ορισμένα σημεία τα δύο υλικά, είτε δεν κατόρθωσαν να έρθουν σε επαφή μετά τη διέλαση, είτε αν είχε δημιουργηθεί κάποιος δεσμός ανάμεσα στα δύο υλικά (από τη χύτευση), αυτός έσπασε μετά την αύξηση της πίεσης. Επίσης, σε πολύ λίγα σημεία υπήρξε και η εμφάνιση γραμμικού πορώδους, η οποία αποδίδεται στους ίδιους λόγους. Το εύρος του γραμμικού πορώδους ήταν και αυτό πολύ μικρό.

Ένα φαινόμενο της διεπιφάνειας αυτής ήταν η εμφάνιση ρηχών και πλατιών πόρων, και μάλιστα πάνω ή δίπλα σε διακενώσεις. Οι διακενώσεις ήταν εμφανείς στον πυθμένα των πόρων, πράγμα που μπορεί να συνδέεται με την πιθανή δημιουργία κάποιου κράματος, το οποίο απομακρύνθηκε κατά την κοπή ή τη λείανση. Λιγότερο πιθανό είναι το ενδεχόμενο οι πόροι αυτοί να εμφανίστηκαν λόγω της παγίδευσης αερίων, αφού στην περίπτωση αυτή οι πόροι δεν θα συνδέονταν με βαθύτερες διακενώσεις. Σε λίγες περιπτώσεις, οι πόροι εμφανίστηκαν και πάνω από ρηγματώσεις.

Τέλος, όπως και παραπάνω, παρατηρήθηκε και η ύπαρξη εισχώρησης χαλκού στο αλουμίνιο, λόγω της αύξησης της πίεσης κατά τη διέλαση.

Συμπέρασμα: Στο δοκίμιο αυτό παρατηρήθηκαν κάποιες δομές που δεν υπήρχαν στο δοκίμιο #1. Παρόλα αυτά, όσον αφορά ελαττώματα που υπήρχαν και στα δύο δοκίμια, το δοκίμιο #2 ήταν σαφώς σε καλύτερη κατάσταση, αφού συγκριτικά τόσο το εύρος των ελαττωμάτων, όσο και ο αριθμός τους ήταν μικρότερα. Έτσι, όπως και

το δοκίμιο #1, η κατάσταση του συγκεκριμένου δοκιμίου χαρακτηρίζεται ως ασφαλής.

- Δοκίμιο #3:

Οι εικόνες που λήφθηκαν για την ποιότητα των μεταλλικών επιφανειών φαίνονται παρακάτω.



(Αριστερά) Αλουμίνιο – 50X



(Δεξιά) Χαλκός – 50X



Χάλυβας – 50X

Στο δοκίμιο αυτό παρατηρούμε ότι γενικά οι επιφάνειες αν και σαφείς μεταξύ τους, παρουσιάζουν ορισμένες ιδιαιτερότητες. Έτσι, είναι εμφανής η ύπαρξη νησίδων χαλκού τόσο πάνω στο αλουμίνιο, όσο και πάνω στο χάλυβα. Η μετακίνηση τμημάτων χαλκού στα άλλα μέταλλα, μάλλον συνέβη κατά τη φάση της κοπής του τεμαχίου. Λόγω του ότι στο συγκεκριμένο δοκίμιο ο χαλκός ήταν σε μεγαλύτερο ποσοστό από τα άλλα δύο μέταλλα, υπήρχε πληθώρα υλικού για να πραγματοποιηθεί

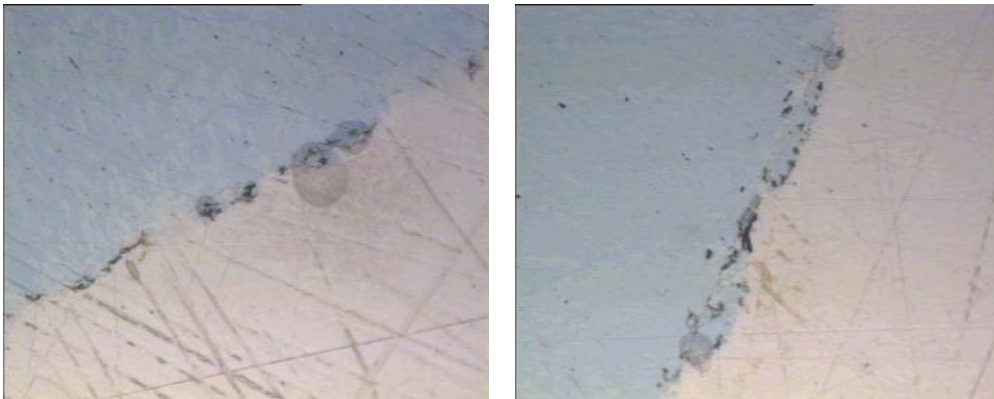
αυτό. Συνδυάζοντας το μεγάλο ποσοστό χαλκού στο δοκίμιο, με το γεγονός ότι η κοπή του δοκιμίου ήταν προβληματική, αφού ο τροχός έπρεπε να διεισδύει τμηματικά στο εσωτερικό του τεμαχίου, ενώ ταυτόχρονα απομακρυνόταν από το σημείο κοπής πριν από κάθε επαναδιείσδυση, μπορεί να δικαιολογηθεί το συγκεκριμένο φαινόμενο.

Στη δύσκολη κοπή του τεμαχίου αποδίδονται και κάποιες άλλες ατέλειες της επιφάνειας του δοκιμίου, όπως οι έντονες γραμμές που εμφανίζονταν (κυρίως στον χαλκό), καθώς και το υψηλό ποσοστό πορώδους στο σώμα του χάλυβα.

Αξίζει να αναφερθεί ότι τα δύο αυτά ελαττώματα περιορίστηκαν με τη λείανση, αλλά δεν εξαλείφθηκαν εντελώς.

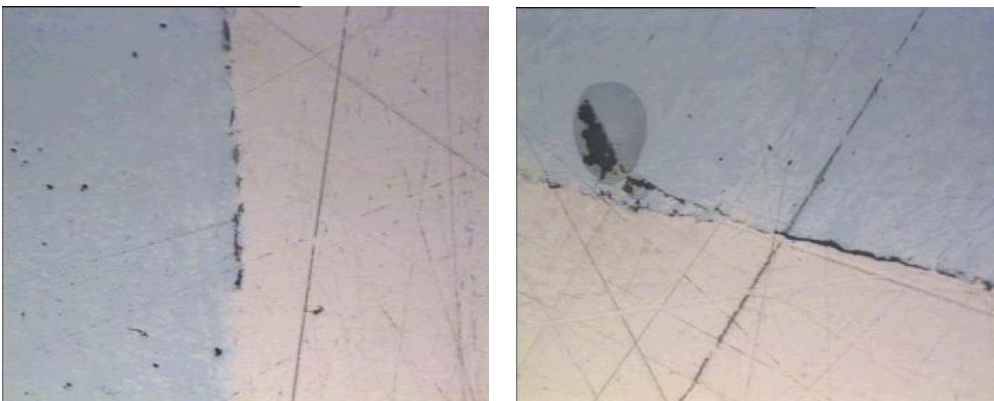
Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες των ελαττωμάτων που παρατηρήθηκαν σε κάθε διεπιφάνεια:

Διεπιφάνεια χάλυβα – χαλκού: Από τη διεπιφάνεια αυτή λήφθηκαν οι παρακάτω εικόνες.



(Αριστερά) Πόροι, διακενώσεις, ρηγματώσεις – 50X

(Δεξιά) Εισχώρηση, γραμμικό πορώδες, πόροι και διακενώσεις – 50X



(Αριστερά) Ρηγματώσεις και γραμμικό πορώδες – 50X

(Δεξιά) Πόροι, διακενώσεις και ρηγματώσεις – 50X

Σχεδόν σε ολόκληρη την έκταση αυτής της διεπιφάνειας υπήρξε ένας συνδυασμός γραμμικού πορώδους και ρηγματώσεων. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα ελαττώματα αυτά, είτε ξεκινούσαν, είτε τελείωναν σε διακενώσεις. Η αιτιολόγηση αυτού του φαινομένου είναι παρόμοια με αυτήν των προηγούμενων δοκιμίων.

Αυτό που ήταν διαφορετικό στην περίπτωση αυτή ήταν ότι παρουσιάστηκε το φαινόμενο των ρηχών και πλατιών πόρων πάνω από τις διακενώσεις και σε αυτή τη διεπιφάνεια. Υπενθυμίζεται ότι το φαινόμενο αυτό εμφανίστηκε στο δοκίμιο #2, αλλά στη διεπιφάνεια του χαλκού με το αλουμίνιο. Λόγω της ιδιαιτερότητας στην κοπή του δοκιμίου, είναι ασφαλής η υπόθεση ότι το συγκεκριμένο φαινόμενο πραγματοποιήθηκε, από την απομάκρυνση κάποιου ενδιάμεσου υλικού. Το ενδιάμεσο αυτό υλικό είναι πιθανό να δημιουργήθηκε κατά την κοπή και να απομακρύνθηκε κατά τη λείανση. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται και από τη μορφή της ίδιας της διεπιφάνειας, όπου σε πολλά σημεία δεν υπάρχει σαφές σύνορο ανάμεσα στα δύο μέταλλα, αλλά φαίνεται πως ο χαλκός έχει εισχωρήσει στο χάλυβα. Βέβαια, οι εισχωρήσεις αυτές, δεν είναι παρόμοιες με τις εισχωρήσεις του χάλυβα στο χαλκό (που και αυτές εμφανίζονται), αλλά είναι μάλλον επιφανειακές ατέλειες.

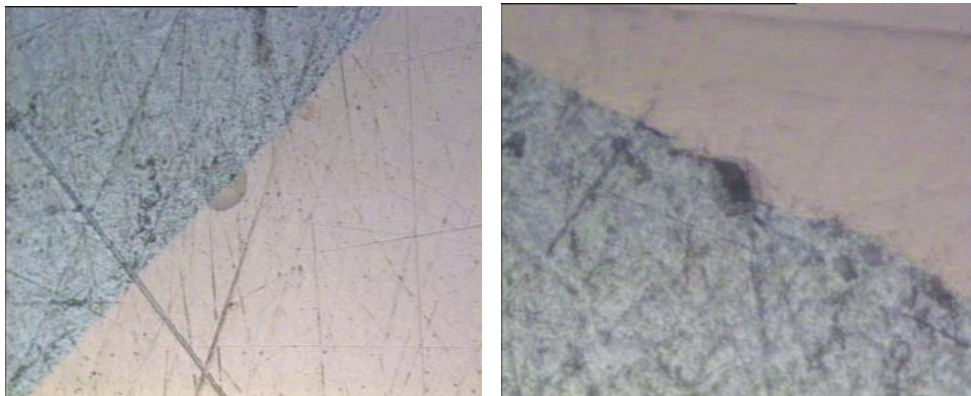
Τέλος, όπως προαναφέρθηκε, υπήρξε και η εμφάνιση εισχωρήσεων του χάλυβα στο χαλκό, φαινόμενο το οποίο οφείλεται στην αύξηση της πίεσης κατά τη διέλαση.

Διεπιφάνεια χαλκού – αλουμινίου: Από τη συγκεκριμένη διεπιφάνεια λήφθηκαν οι παρακάτω εικόνες.



(Αριστερά) Ρηγματώσεις, πόροι και διακενώσεις – 50X

(Δεξιά) Εισχώρηση χαλκού στο αλουμίνιο – 50X



(Αριστερά) Πόροι – 50X

(Δεξιά) Πόροι πάνω από διακενώσεις – 100X

Σε αντίθεση με την άλλη διεπιφάνεια του ίδιου δοκιμίου, η συγκεκριμένη διεπιφάνεια παρουσίασε πολύ λίγα ελαττώματα.

Γενικά, τα μόνα ελαττώματα που παρουσιάστηκαν στην συγκεκριμένη διεπιφάνεια ήταν μερικές πολύ μικρές (από άποψη μήκους και βάθους) ρηγματώσεις, και πολύ λίγες διακενώσεις. Οι διακενώσεις μάλιστα συνοδεύονταν από πόρους στο άνω μέρος τους, αλλά ήταν ορατές μόνο σε μεγέθυνση 100X. Παρόλα αυτά ο αριθμός και των δύο ελαττωμάτων ήταν πολύ μικρός. Η δημιουργία των ρηγματώσεων οφείλεται στον ίδιο μηχανισμό που περιγράφηκε στα προηγούμενα δοκίμια. Από την άλλη οι διακενώσεις με τους αντίστοιχους πόρους οφείλονται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στην απομάκρυνση κάποιου δημιουργημένου κράματος, είτε κατά την κοπή του δοκιμίου, είτε κατά τη λείανσή του.

Παρατηρήθηκαν ακόμα πόροι, οι οποίοι δεν ήταν κοντά σε διακενώσεις. Στην περίπτωση αυτή η αιτία και πάλι μπορεί να αποδοθεί στη δημιουργία κραμάτων τα οποία απομακρύνθηκαν κατά την κοπή ή τη λείανση.

Τέλος, στη διεπιφάνεια αυτή παρατηρήθηκαν και εισχωρήσεις χαλκού στο αλουμίνιο. Οι εισχωρήσεις αυτές ήταν μεγάλης κλίμακας, και οφείλονται μάλλον στην αύξηση της πίεσης κατά τη φάση της διέλαση.

Συμπέρασμα: Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρήθηκαν σημαντικές αντιθέσεις. Ενώ η εξωτερική διεπιφάνεια (χάλυβα – χαλκού) ήταν η χειρότερη από όλα τα μέχρι τώρα δοκίμια, η εσωτερική διεπιφάνεια (χαλκού – αλουμινίου) ήταν η καλύτερη. Γεγονός λοιπόν είναι, ότι με βάση τα οπτικά στοιχεία που λήφθηκαν, ενώ το δοκίμιο αυτό

ίσως παρουσίαζε αμφίβολη σύνδεση του χάλυβα με το χαλκό, η σύνδεση του χαλκού με το αλουμίνιο καθιστούσε το δοκίμιο αρκετά πιο στιβαρό.

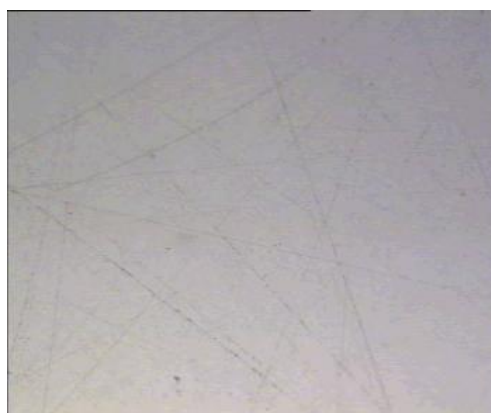
Στο σημείο αυτό πρέπει να ανακληθεί και το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της κοπής του δοκιμίου αυτού, η επιφάνεια υπέστη σοβαρές φθορές από τον κοπτικό τροχό, κάτι που επηρέασε το τελικό οπτικό αποτέλεσμα. Έτσι, τα συμπεράσματα που αφορούν τη διεπιφάνεια χάλυβα – χαλκού καθίστανται αμφισβητήσιμα. Για πιο μεγάλη σιγουριά θα έπρεπε να επαναληφθεί το πείραμα με το συγκεκριμένο δοκίμιο και να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην κοπή του τεμαχίου.

- *Δοκίμιο #4:*

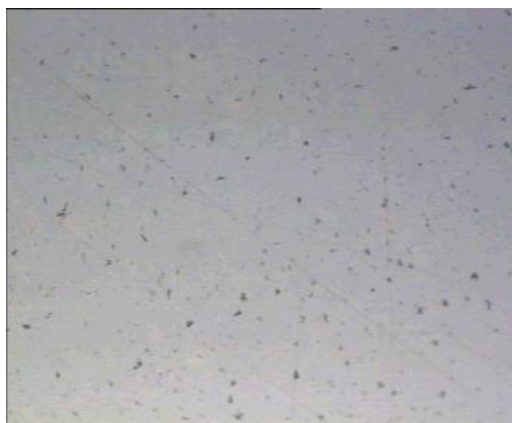
Το συγκεκριμένο δοκίμιο δεν ολοκλήρωσε με επιτυχία το πείραμα της διέλασης, αφού πριν ολοκληρωθεί η κατεργασία, ο πυθμένας του δοκιμίου αστόχησε και τα εσωτερικά υλικά διέρρευσαν. Στη συνέχεια, κατά την εξόλκευση του δοκιμίου από τη μήτρα, ο δεσμός του χαλκού με το αλουμίνιο που είχε δημιουργηθεί, έσπασε από την πίεση του εμβόλου (που εκτελούσε χρέος εξολκεία), κάνοντας τον χαλκό να μπορεί να κινείται ελεύθερα μέσα στο αλουμίνιο. Το γεγονός αυτό κατέστρεψε τα οπτικά αποτελέσματα της διεπιφάνειας χαλκού – αλουμινίου, απαγορεύοντας έτσι την εξαγωγή κάποιου συμπεράσματος για το δοκίμιο. Επίσης, τα αποτελέσματα ήταν γενικά αμφίβολα, αφού κανονικά θα έπρεπε να επαναληφθεί η διέλαση του δοκιμίου με παχύτερο πυθμένα. Παρόλα αυτά, για λόγους πληρότητας της εργασίας παρατίθενται τα αποτελέσματα της παρατήρησης για το δοκίμιο #4. Στις εικόνες που ακολουθούν εμφανίζεται η επιφάνεια κάθε υλικού του δοκιμίου αυτού.



(Αριστερά) Αλουμίνιο – 50X



(Δεξιά) Χαλκός – 50X



Χάλυβας - 50X

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο οι επιφάνειες των υλικών εμφανίστηκαν πολύ καθαρές, και άρα η λείανση του δοκιμίου ήταν τέτοια ώστε, σε περίπτωση που το πείραμα είχε πραγματοποιηθεί σωστά, τα συμπεράσματα να θεωρούνται αξιόπιστα.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες των ελαττωμάτων που παρατηρήθηκαν σε κάθε διεπιφάνεια:

Διεπιφάνεια χάλυβα – αλουμινίου: Από τη συγκεκριμένη επιφάνεια λήφθηκαν οι παρακάτω εικόνες.



(Αριστερά) Ρηγμάτωση και καψίματα – 50X



(Δεξιά) Εισχώρηση χάλυβα, ρηγματώσεις και κάψιμο – 50X



(Αριστερά) Εισχώρηση χαλύβα – 50X

(Δεξιά) Διακένωση – 50X

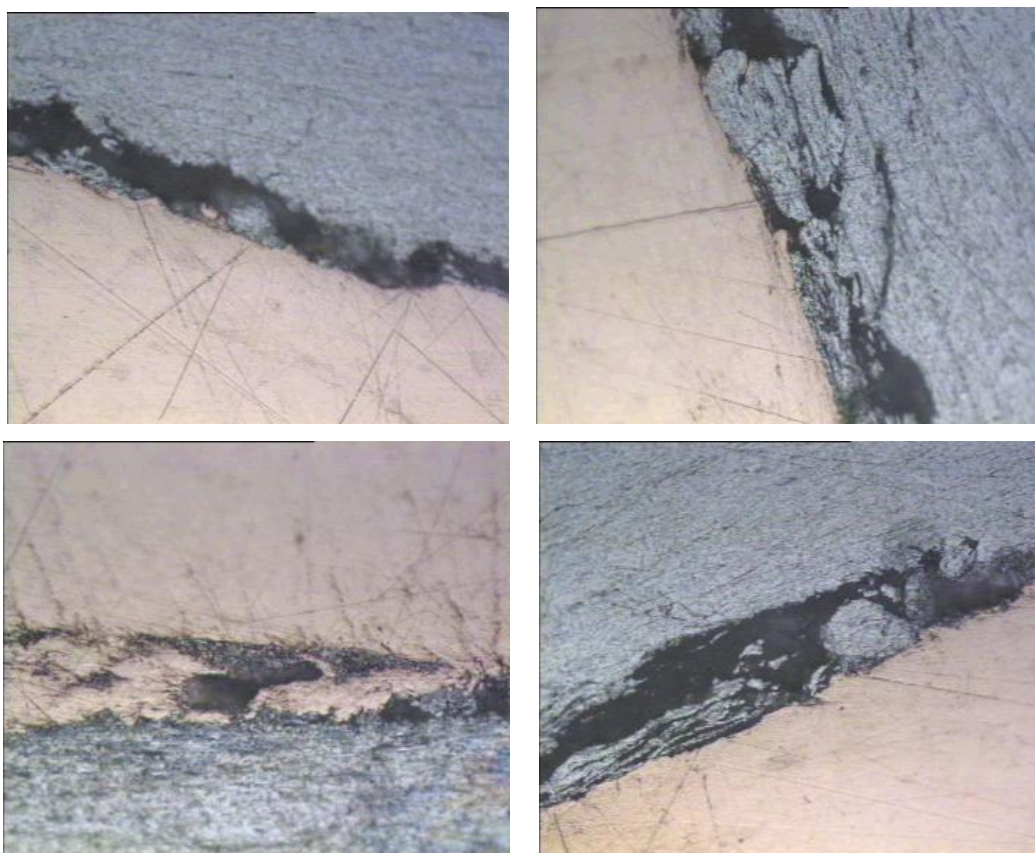
Στην περίπτωση αυτή, το μεγαλύτερο ποσοστό της διεπιφάνειας ήταν σταθερά συνδεδεμένο. Μόνο σε λίγα σημεία της διεπιφάνειας φάνηκαν ρηγματώσεις, οι οποίες ήταν μικρές σε έκταση και βάθος. Χαρακτηριστικό των διακενώσεων ήταν ότι ακολουθούσαν στις περισσότερες περιπτώσεις τη διεπιφάνεια (ακόμα και σε περιπτώσεις εισχωρήσεων του ενός υλικού στο άλλο), ενώ σε λίγες περιπτώσεις οι ρηγματώσεις είχαν προχωρήσει και στο εσωτερικό του αλουμινίου. Στις περιπτώσεις αυτές, ένα μικρό μέρος του αλουμινίου είχε σχηματίσει ισχυρό δεσμό με τον χαλύβα, με αποτέλεσμα η ρηγματώση να προχωρήσει στο εσωτερικό του αλουμινίου, το οποίο επειδή ήταν χυτό, πιθανώς να ήταν και λιγότερο ανθεκτικό. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι τα δύο υλικά μάλλον σχημάτισαν δεσμό κατά τη διάρκεια της χύτευσης, ο οποίος έσπασε σε ορισμένα σημεία κατά τη διέλαση, λόγω της μεγάλης αύξησης πίεσης.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό της διεπιφάνειας αυτής ήταν οι εισχωρήσεις του χαλύβα στο αλουμίνιο, οι οποίες παρατηρήθηκαν σε πολλά σημεία. Αυτό το γεγονός είναι λογικό από τη φύση της κατεργασίας. Επίσης, ο αριθμός των εισχωρήσεων χαλύβα ήταν μεγαλύτερος στην περίπτωση αυτή από ότι στα δοκίμια #1, #2 και #3, αφού το αλουμίνιο αφ' ενός ήταν χυτό και άρα είχε αρκετές αδυναμίες στην κρυσταλλική του δομή, και αφ' ετέρου σαν υλικό έχει μικρότερη πυκνότητα από τον χαλκό, άρα η διείσδυση είναι πιο εύκολη σε αυτό.

Ακόμα, σε λίγα σημεία της διεπιφάνειας παρατηρήθηκαν καψίματα. Τα καψίματα αυτά οφείλονται στην απότομη αύξηση της θερμοκρασίας μιας περιοχής, η οποία προφανώς έλαβα χώρα κατά τη χύτευση.

Τέλος, υπήρξαν και ορισμένες διακενώσεις, οι οποίες δικαιολογούνται όπως και στα προηγούμενα δοκίμια από τη δημιουργία κραμάτων κατά τη χύτευση και την απομάκρυνσή τους κατά την κοπή ή τη λείανση.

Διεπιφάνεια αλουμινίου – χαλκού: Η συγκεκριμένη διεπιφάνεια δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως προς την παρατήρησή της. Παρόλα αυτά, για λόγους πληρότητας παρατίθενται οι παρακάτω εικόνες.



(Και οι τέσσερις εικόνες) Ρηγματώσεις – 50X

Από την παρατήρηση της διεπιφάνειας αυτής προέκυψε ότι σε ολόκληρο το μήκος αυτής εμφανίστηκαν ρηγματώσεις. Οι ρηγματώσεις αυτές είχαν μεγάλο εύρος, πλάτος και βάθος. Η πορεία τους ήταν γενικά ακανόνιστη (δεν διατρέχει πάντοτε την διεπιφάνεια) και πολλές φορές προχωρούσαν είτε μέσα από τον χαλκό, είτε μέσα από το αλουμίνιο. Γενικά, από αυτή τη διεπιφάνεια δεν μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα.

Συμπέρασμα: Όπως φάνηκε και από την παρατήρηση για το συγκεκριμένο δοκίμιο τα συμπεράσματα είναι ασφαλή μόνο στη διεπιφάνεια μεταξύ του αλουμινίου και του χάλυβα. Στη δεύτερη διεπιφάνεια του δοκιμίου δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή κανενός συμπεράσματος. Έτσι, το δοκίμιο αυτό θεωρείται επισφαλές, ενώ το πείραμα θα έπρεπε να επαναληφθεί με παχύτερο πυθμένα στο δοκίμιο.

- *Δοκίμιο #5:*

Από το δοκίμιο αυτό λήφθηκαν οι παρακάτω εικόνες, σχετικά με την ποιότητα των επιφανειών των υλικών.



(Αριστερά) Αλουμίνιο – 50X

(Δεξιά) Χαλκός – 50X



Χάλυβας – 50X

Η ποιότητα των επιφανειών όπως αποδόθηκε από το μικροσκόπιο ήταν αρκετά καθαρή. Έτσι, τα οπτικά αποτελέσματα θεωρήθηκαν αξιόπιστα.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες των ελαττωμάτων που παρατηρήθηκαν σε κάθε διεπιφάνεια:

Διεπιφάνεια χάλυβα – αλουμινίου: Από τη διεπιφάνεια αυτή λήφθηκαν οι εξής εικόνες.



(Αριστερά) Ρηγματώση – 50X



(Δεξιά) Κάψιμο και μικρή διακένωση – 50X



(Αριστερά) Εισχώρηση χάλυβα – 50X



(Δεξιά) Μεγάλη διακένωση – 50X

Το πιο χαρακτηριστικό ελάττωμα της συγκεκριμένης διεπιφάνειας ήταν οι πολλές μικρές ρηγματώσεις, οι οποίες παρατηρήθηκαν σε όλο το μήκος της διεπιφάνειας. Το εύρος αλλά και το βάθος τους ήταν μικρό και μάλλον δημιουργήθηκαν από την κατάρρευση των δεσμών μεταξύ των δύο μετάλλων, κατά

τη φάση της διέλασης. Οι δεσμοί αυτοί δημιουργήθηκαν πιθανότατα κατά τη χύτευση του αλουμινίου.

Επίσης, σε πολλά σημεία παρατηρήθηκαν εισχωρήσεις του χάλυβα στο αλουμίνιο. Το γεγονός αυτό πραγματοποιήθηκε κατά τη φάση της διέλασης και, όπως περιγράφηκε και παραπάνω, οφείλεται στις ιδιότητες του χυτού αλουμινίου σε συνδυασμό με την αύξηση της πίεσης κατά τη φάση της κατεργασίας.

Σε λίγες περιπτώσεις παρατηρήθηκε η ύπαρξη καψιμάτων σε ορισμένα σημεία. Τα καψίματα αυτά είναι αποτέλεσμα της απότομης αύξησης της θερμοκρασίας στο εκάστοτε σημείο, και πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της χύτευσης του αλουμινίου.

Τέλος, σε μερικά σημεία παρατηρήθηκαν διακενώσεις διαφόρων μεγεθών. Οι διακενώσεις αυτές, όπως έχει περιγραφεί είναι μάλλον αποτέλεσμα της απομάκρυνση κραμάτων, τα οποία δημιουργήθηκαν κατά τη χύτευση του αλουμινίου, και απομακρύνθηκαν είτε κατά την κοπή του τεμαχίου, είτε κατά τη λείανσή του.

Διεπιφάνεια αλουμινίου – χαλκού: Στη συγκεκριμένη διεπιφάνεια παρουσιάστηκαν τα παρακάτω.



(Αριστερά) Διακένωση – 50X

(Δεξιά) Ρηγμάτωση – 50X



(Αριστερά) Κραματοποιήσεις – 50X

(Δεξιά) Εισχώρηση χαλκού στο αλουμίνιο – 50X

Όπως και στα προηγούμενα δοκίμια, χαρακτηριστική ήταν η ύπαρξη ρηγματώσεων μικρού εύρους και βάθους, καθώς και διακενώσεων. Και τα δύο αυτά φαινόμενα εξηγήθηκαν παραπάνω.

Κάτι που παρατηρήθηκε σε αυτό το δοκίμιο και δεν είχε παρατηρηθεί στα υπόλοιπα, ήταν η ύπαρξη κραμάτων ανάμεσα στα δύο μέταλλα, που όμως δεν είχαν απομακρυνθεί. Προφανώς αυτά τα κράματα δημιουργήθηκαν κατά τη φάση της χύτευσης του αλουμινίου. Το χρώμα του είναι πολύ κοντά σε αυτό του αλουμινίου, αν και έχουν πολύ διαφορετική επιφανειακή μορφή από αυτό.

Τέλος, σε αρκετά σημεία της διεπιφάνειας παρατηρήθηκε εισχώρηση του χαλκού στο αλουμίνιο. Η συγκεκριμένη μορφή της εισχώρησης είναι λογική, αφού από τη σύγκριση των δύο μετάλλων (βλ. ενότητα 2.2) προκύπτει η υπεροχή του χαλκού έναντι στο αλουμίνιο. Έτσι, με την αύξηση της πίεσης κατά τη διέλαση, ο χαλκός επικράτησε και εισχώρησε στο ασθενέστερο αλουμίνιο.

Συμπέρασμα: Γενικά, το συγκεκριμένο δοκίμιο είχε την καλύτερη μορφή από όλα τα άλλα, μέχρι τώρα. Ο λόγος είναι κυρίως η ύπαρξη ισχυρών δεσμών μεταξύ των μετάλλων, οι οποίοι αστόχησαν σε σχετικά λίγα σημεία. Επίσης, και τα υπόλοιπα προβλήματα που οφείλονται στη χύτευση του αλουμινίου, ήταν περιορισμένα σε αριθμό, και σε μικρή έκταση.

Έτσι, το συγκεκριμένο δοκίμιο αναμένεται να έχει μία από τις καλύτερες συμπεριφορές κατά τη σύγκρισή του με τα υπόλοιπα δοκίμια.

- Δοκίμιο #6:

Για τις επιφάνειες των μετάλλων αυτού του δοκιμίου, λήφθηκαν οι παρακάτω εικόνες.



(Αριστερά) Αλουμίνιο – 50X



(Δεξιά) Χαλκός – 50X



Χάλυβας – 50X

Και στην περίπτωση αυτή οι επιφάνειες των μετάλλων ήταν καθαρές, οπότε και τα οπτικά αποτελέσματα θεωρήθηκαν ασφαλή.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες των ελαττωμάτων που παρατηρήθηκαν σε κάθε διεπιφάνεια:

Διεπιφάνεια χάλυβα – αλουμινίου: Από τη συγκεκριμένη διεπιφάνεια λήφθηκαν οι εξής εικόνες.



(Αριστερά) Ρηγματώση – 50X

(Δεξιά) Κάψιμο – 50X



(Αριστερά) Εισχώρηση χάλυβα στο αλουμίνιο – 50X

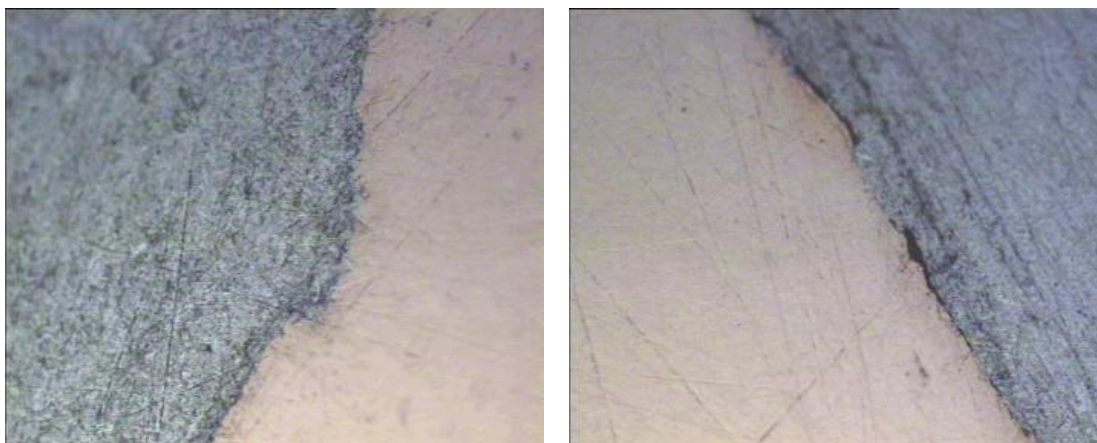
(Δεξιά) Ρωγή στο εσωτερικό του αλουμινίου – 50X

Στο δοκίμιο αυτό, όπως και στα προηγούμενα, παρουσιάστηκαν ρηγματώσεις στη διεπιφάνεια. Αυτές ήταν πολύ μικρού εύρους, ενώ ο αριθμός τους ήταν περιορισμένος. Σε ελάχιστες περιπτώσεις οι ρηγματώσεις επεκτάθηκαν στο εσωτερικό του αλουμινίου, όπου και πάλι όμως είχαν πολύ μικρό βάθος. Ο τρόπος δημιουργίας των ρηγματώσεων αυτών περιγράφηκε αναλυτικά παραπάνω.

Επίσης, σε πολύ μικρή κλίμακα υπήρχαν και εισχωρήσεις του χάλυβα στο εσωτερικό του αλουμινίου. Αυτές αν και παρουσιάστηκαν σε όλο το μήκος της διεπιφάνειας, ήταν πολύ μικρές σε μέγεθος. Από τη μορφή τους προκύπτει το συμπέρασμα ότι, η εμφάνισή τους πρέπει να έγινε μόνο στα σημεία εκείνα όπου το αλουμίνιο ήταν ασθενέστερο.

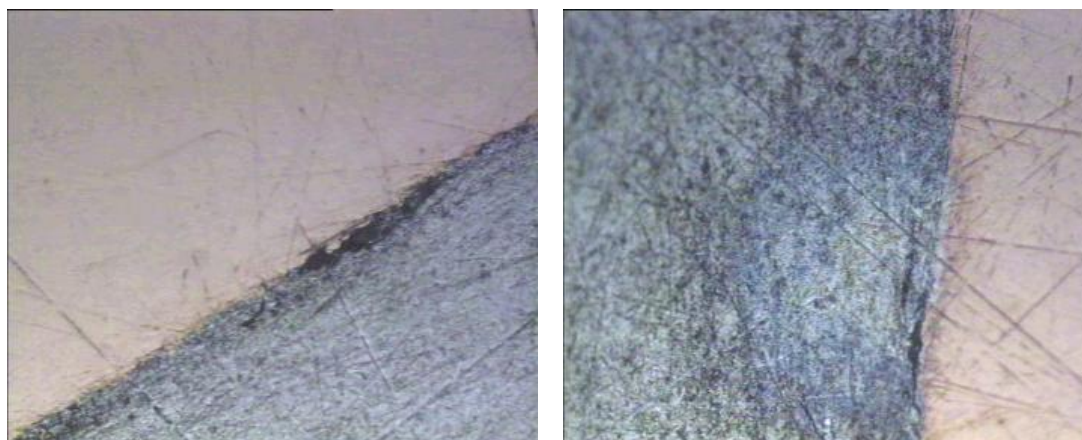
Το φαινόμενο που ήταν αυξημένο σε ανησυχητικό βαθμό στη συγκεκριμένη διεπιφάνεια, ήταν η ύπαρξη πολλών καψίμάτων. Τα καψίματα που εμφανίστηκαν ήταν αρκετά μεγάλα σε έκταση (με εστίαση 50 φορές επί την ονομαστική μεγέθυνση), ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις παρατηρήθηκαν και στα δύο μέταλλα. Ήταν εύκολα παρατηρήσιμα σαν φαινόμενο, αφού τα μέταλλα στην περιοχή του καψίματος παρουσίασαν μια έντονη αλλαγή χρώματος. Τα καψίματα αυτά δημιουργήθηκαν κατά τη χύτευση του αλουμινίου με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω.

Διεπιφάνεια αλουμινίου – χαλκού: Από τη συγκεκριμένη διεπιφάνεια λήφθηκαν οι παρακάτω εικόνες.



(Αριστερά) Εισχώρηση αλουμινίου στο χαλκό – 50X

(Δεξιά) Ρηγματώσεις – 50X



(Αριστερά) Διακένωση – 50X

(Δεξιά) Κάψιμο – 50X

Και σε αυτή τη διεπιφάνεια παρατηρήθηκε η ύπαρξη ρηγματώσεων. Αυτές ήταν γενικά λίγες σε αριθμό, ενώ το μήκος και το βάθος του ήταν επίσης μικρά. Η δημιουργία τους έχει ήδη περιγραφεί παραπάνω.

Κατά μήκος της διεπιφάνειας παρατηρήθηκαν, ακόμα, λίγες περιοχές όπου τα μέταλλα είχαν καεί. Τα καψίματα αυτά έγιναν ορατά κυρίως από τη μεταβολή του χρώματος των μετάλλων στην περιοχή αυτή. Η ύπαρξή τους είναι απόρροια της χύτευσης του αλουμινίου.

Αυτό που προκάλεσε εντύπωση σε αυτή τη διεπιφάνεια ήταν οι εισχωρήσεις. Ενώ σε όλα τα προηγούμενα δοκίμια παρουσιάστηκε εισχώρηση του χαλκού στο αλουμίνιο, στο συγκεκριμένο δοκίμιο το αλουμίνιο ήταν αυτό που εισχωρούσε στο χαλκό. Το φαινόμενο αυτό, αν και περίεργο, μπορεί να εξηγηθεί αν υποθεθεί ότι κοντά στο χαλκό, η απόψυξη του αλουμινίου κατά τη χύτευση έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε το τελικό υλικό που προέκυψε να ήταν σκληρότερο και πιο ισχυρό από το χαλκό. Πιθανή είναι επίσης και μια εξασθένιση του χαλκού, λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας κατά τη χύτευση. Πάντως σε κάθε περίπτωση η διείσδυση ως φαινόμενο ήταν αποτέλεσμα της αύξησης της πίεσης, κατά τη διέλαση.

Συμπέρασμα: Γενικά, το συγκεκριμένο δοκίμιο παρουσίασε σε πολύ μικρό βαθμό προβλήματα όπως διακενώσεις και ρηγματώσεις, και σε μεγαλύτερο βαθμό προβλήματα που είχαν σχέση με τη χύτευση, με κυρίαρχο πρόβλημα αυτό των καψιμάτων. Τα καψίματα γενικά σαν πρόβλημα μπορεί να εγκυμονούν κινδύνους για την αντοχή των μετάλλων. Ο λόγος είναι ότι τα καψίματα υποδηλώνουν απότομη αύξηση της θερμοκρασίας σε μια περιοχή του μετάλλου, με αποτέλεσμα την πιθανή μεταβολή της κρυσταλλικής τους δομής. Στην μεταβολή αυτή οφείλεται και η αλλαγή του χρώματος των μετάλλων. Έτσι, το μέταλλο παρουσιάζει άγνωστη συμπεριφορά ως προς την αντοχή του, κάτι που το καθιστά επισφαλές. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την αλλαγή της φοράς εισχώρησης μεταξύ του αλουμινίου και του χαλκού, αφού ήταν το μόνο δοκίμιο στο οποίο παρατηρήθηκε το φαινόμενο αυτό.

Όλα τα παραπάνω υποδηλώνουν κάποιο πρόβλημα κατά τη χύτευση του αλουμινίου, όπως για παράδειγμα αύξηση της θερμοκρασίας του μετάλλου πάνω από την ιδανική. Θα προτεινόταν η επανακατασκευή του δοκιμίου, όπου θα δινόταν μεγαλύτερη προσοχή στις συνθήκες χύτευσης του αλουμινίου. Προαιρετικά θα

μπορούσε να γίνει και επανάληψη της διέλαση, αν και τα προβλήματα που οφείλονταν σε αυτήν, φάνηκε ότι ήταν μηδαμινά.

2.5.3 Γενικές παρατηρήσεις

Μετά και την παρατήρηση των δοκιμίων με το μικροσκόπιο, και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή μπορούν να γίνουν οι συγκρίσεις μεταξύ των δοκιμίων, ώστε να προκύψει το ανθεκτικότερο, όπως αυτό φάνηκε από τη μεταλλογραφική του δομή. Από τη σύγκριση αυτή πρέπει να εξαιρεθεί το δοκίμιο #4, αφ' ενός γιατί δεν μπόρεσαν να εξαχθούν συμπεράσματα για την εσωτερική του διεπιφάνεια, και αφ' ετέρου γιατί το πείραμα της διέλασης του συγκεκριμένου δοκιμίου δεν πραγματοποιήθηκε με τον ίδιο τρόπο με τα άλλα δοκίμια.

Συγκρίνοντας τις ομάδες με την ίδια αλληλουχία υλικών μεταξύ τους προκύπτει ότι από την πρώτη τριάδα καλύτερα οπτικά αποτελέσματα λήφθηκαν από το δοκίμιο #2, ενώ από τη δεύτερη τριάδα καλύτερα οπτικά αποτελέσματα λήφθηκαν από το δοκίμιο #5.

Το δοκίμιο #2 παρουσίαζε την καλύτερη συμπεριφορά στην διεπιφάνεια μεταξύ του χάλυβα και του χαλκού, αφού είχε τα λιγότερα σε αριθμό και μικρότερα σε μέγεθος ελαττώματα στην συγκεκριμένη διεπιφάνεια. Όσο για τη διεπιφάνεια μεταξύ του χαλκού και του αλουμινίου, και τα τρία δοκίμια παρουσίασαν ελαττώματα περίπου της ίδιας κλίμακας, με ένα πολύ μικρό προβάδισμα της διεπιφάνειας του δοκιμίου #3, η οποία εμφάνισε λιγότερα σε αριθμό ελαττώματα. Η γενική εικόνα πάντως, της επιφάνειας του δοκιμίου #2 ήταν αρκετά καλύτερη από ότι των δοκιμίων #1 και #3.

Συγκρίνοντας τα δοκίμια #5 και #6 μεταξύ τους, εύκολα φαίνεται η υπεροχή του #5. Το συγκεκριμένο δοκίμιο και στις δύο διεπιφάνειες παρουσίασε πολύ λίγα ελαττώματα, το μέγεθος των οποίων ήταν επίσης μικρό. Ακόμα, αν και υπήρχαν, τα ελαττώματα που οφείλονταν στη χύτευση του αλουμινίου ήταν και αυτά λίγα, ενώ το μέγεθός τους δεν ήταν ανησυχητικό. Από την άλλη μεριά, τα ελαττώματα που εμφανίστηκαν στο δοκίμιο #6 ήταν περισσότερα. Επισημαίνονται ιδιαίτερα τα ελαττώματα λόγω χύτευσης, τα οποία ήταν μεγάλα σε μέγεθος, ενώ παράλληλα παρουσιάζονταν σε ένα μεγάλο μέρος της διεπιφάνειας χάλυβα –αλουμινίου.

Μεταξύ των δοκιμίων #2 και #5, η σύγκριση δείχνει ότι και τα δύο δοκίμια εμφανίζουν πολύ καλή συμπεριφορά.

Στο δοκίμιο #5, λόγω του ισχυρού δεσμού του χάλυβα και του χαλκού με το αλουμίνιο, που προστέθηκε μέσω χύτευσης, τα τρία μέταλλα είναι καλύτερα συνδεδεμένα. Μάλιστα ο δεσμός αυτός δεν παρουσίασε παρά ελάχιστα προβλήματα από τη διέλαση, κάτι που αποδεικνύει ότι γενικά είναι ανθεκτικός. Από την άλλη μεριά, η χύτευση του αλουμινίου ανάμεσα το χαλκό και το χάλυβα προκάλεσε προβλήματα καυσιμάτων και στα δύο μέταλλα. Εισήχθηκε έτσι ένας παράγοντας αβεβαιότητας γύρω από την ποιότητα των μετάλλων αυτών, μετά τη χύτευση. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα προβλήματα αυτά ήταν περισσότερο εμφανή στο χάλυβα, παρά στο χαλκό.

Αντίθετα, στο δοκίμιο #2 πραγματοποιήθηκε χύτευση μόνο μεταξύ του αλουμινίου και του χαλκού. Το γεγονός, αυτό από τη μία δεν οδήγησε στο σχηματισμό ενός πιο ανθεκτικού δεσμού μεταξύ του χάλυβα και του χαλκού, αλλά από την άλλη δεν εισήγαγε και τα προβλήματα της χύτευσης στο χάλυβα, που από ότι φάνηκε ήταν και πιο ευαίσθητος σε αυτά. Κατά τα άλλα, ο δεσμός που δημιουργήθηκε μεταξύ του χαλκού και του χάλυβα εμφάνιζε κάποιες μικρές ατέλειες, όπως ρηγματώσεις και διακενώσεις, που όμως δεν ήταν σοβαρές.

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι μεταλλογραφικά, τα δοκίμια #2 και #5 είναι τα καλύτερα, χωρίς να υπάρχει σαφής υπεροχή ανάμεσα στα δύο. Έτσι, φαίνεται ότι η καλύτερη αναλογία υλικών στα συγκεκριμένα δοκίμια που δοκιμάστηκαν, ήταν αυτή όπου ο χαλκός και το αλουμίνιο ήταν σε ίση αναλογία. Από την άλλη, η ιδανική αλληλουχία μεταξύ των μετάλλων ποικίλει ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή και της απαιτήσεις αυτής.

Κεφάλαιο 3:

*Υπολογιστικό Μέρος – Προσομοίωση της
Κατεργασίας με το Λογισμικό LS-DYNA*

3.1 Γενικά για το LS - DYNA

Μετά την υλοποίηση του πειράματος, επιδιώχθηκε να γίνει η αριθμητική του προσομοίωση, με χρήση του λογισμικού LS – DYNA. Με τον τρόπο αυτό θα ήταν δυνατή η επαλήθευση των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν από το πείραμα. Παράλληλα θα μπορούσε να εξακριβωθεί και η δυνατότητα χρήσης του συγκεκριμένου προγράμματος για την προσομοίωση της διέλαση τριμεταλλικών ράβδων, ώστε να μην είναι απαραίτητη η διεξαγωγή δαπανηρών πειραμάτων στα πλαίσια κάποιας παραγωγικής δραστηριότητας.

Το συγκεκριμένο λογισμικό εντάσσεται στην κατηγορία λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων. Τα λογισμικά τέτοιου τύπου είναι ιδανικά για την προσομοίωση διαφόρων πειραματικών εφαρμογών, λόγω του τρόπου επίλυσης των μοντέλων των εκάστοτε εφαρμογών. Πιο συγκεκριμένα, για την επίλυση κάποιου μοντέλου, γίνεται κατακερματισμός του σε απλούστερες γεωμετρίες. Οι γεωμετρίες αυτές ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Κάθε πεπερασμένο στοιχείο δέχεται και ασκεί επίδραση στα γειτονικά του πεπερασμένα στοιχεία. Έτσι, οι επιδράσεις από το περιβάλλον του μοντέλου, παραλλάσσουν τόσο τη μορφή, όσο και τις ιδιότητες των πεπερασμένων στοιχείων, δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη του προγράμματος να έχει καλύτερη εποπτεία σε όλα τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας.

Η χρήση των προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων έχει γίνει τα τελευταία χρόνια όλο και πιο απαραίτητη σε βιομηχανικές και ερευνητικές εφαρμογές, λόγω της μεγάλης ανάπτυξης των Η/Υ. Τα παλαιότερα χρόνια δεν μπορούσε να υπάρξει τέτοιος βαθμός αξιοποίησης των προγραμμάτων αυτών, αφού η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται είναι πολύ μεγάλη.

3.1.1 Αλγόριθμος επίλυσης του LS – DYNA

Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι ιδανικό για περιπτώσεις μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης, κυρίως σε περιπτώσεις όπου υπάρχει πλαστική παραμόρφωση (ξεπερνιέται το όριο της ελαστικής συμπεριφοράς των υλικών). Για την επίλυση των δυναμικών φαινομένων, το λογισμικό αυτό επιλύει διαφορικές εξισώσεις της μορφής:

$$M \cdot \ddot{U} + B \cdot \dot{U} + K \cdot U = F \quad (1)$$

όπου στην εξίσωση αυτή είναι:

- M: Γενικευμένο μητρώο μάζας
- B: Γενικευμένο μητρώο απόσβεσης
- K: Γενικευμένο μητρώο δυσκαμψίας
- F: Διάνυσμα εξωτερικών επιβαλλόμενων επιδράσεων
- U, \dot{U} , \ddot{U} : Μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση αντίστοιχα

Στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων ο τρόπος επίλυση των αντιδράσεων σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο γίνεται μέσω μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα η επίλυση γίνεται μέσω επαναληπτικών αριθμητικών αλγορίθμων, οι οποίοι διαφέρουν ανάλογα με το προς υπολογισμό μέγεθος, το είδος του προβλήματος και το ίδιο το λογισμικό. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται μπορεί να μην είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά που λαμβάνονται από το πείραμα, αλλά με την κατάλληλη προσαρμογή των συνθηκών κάθε μοντέλου, μπορεί να επιτευχθεί ένας πολύ ικανοποιητικός βαθμός ακρίβειας. Στην περίπτωση του LS – DYNA, ο κώδικας επίλυσης βασίζεται στην αριθμητική μέθοδο της «Κεντρικής Διαφοράς» (explicit code).

Στη μέθοδο της «Κεντρικής Διαφοράς», για την μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση πρέπει να ισχύουν οι σχέσεις:

$$\ddot{U}_t = \frac{1}{\Delta t^2} \cdot (U_{t-\Delta t} - 2 \cdot U_t + U_{t+\Delta t}) \quad (2)$$

και

$$\dot{U}_t = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \cdot (-U_{t-\Delta t} + U_{t+\Delta t}) \quad (3)$$

Στις εξισώσεις αυτές Δt είναι το χρονικό βήμα (timestep) αριθμητικής ολοκλήρωσης. Στη συνέχεια, αντικαθιστώντας τις (2) και (3) στην (1), μπορεί να εξαχθεί η παρακάτω εξίσωση:

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} \cdot M + \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \cdot C \right) \cdot U_{t+\Delta t} = F - \left(K - 2 \cdot \frac{1}{\Delta t^2} \cdot M \right) \cdot U_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2} \cdot M - \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \cdot C \right) \cdot U_{t-\Delta t} \quad (4)$$

Από τις συνθήκες ισορροπίας για χρόνο t που ισχύουν σε κάθε μοντέλο, εξάγεται η τιμή του $U_{t+\Delta t}$, η οποία στη συνέχεια ανατροφοδοτείται στο πρόγραμμα για την επίλυση του επόμενου χρονικού βήματος.

Χαρακτηριστικό του κώδικα αυτού, όπως φαίνεται και από την εξίσωση (4) είναι ότι κατά την επίλυση δεν πραγματοποιείται αποσύνθεση του ενεργού μητρώου δυσκαμψίας, το οποίο ορίζεται από τη σχέση:

$$\hat{K} = K + \frac{1}{\Delta t^2} \cdot M + \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \cdot C \quad (5)$$

αφού αυτό δεν εμφανίζεται ως παράγοντας, και άρα παρουσιάζεται μικρότερος υπολογιστικός φόρτος. Αυτό που απαιτείται είναι μόνο ο υπολογισμός του ενεργού μητρώου μάζας:

$$\hat{M} = \frac{1}{\Delta t^2} \cdot M + \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \cdot C \quad (6)$$

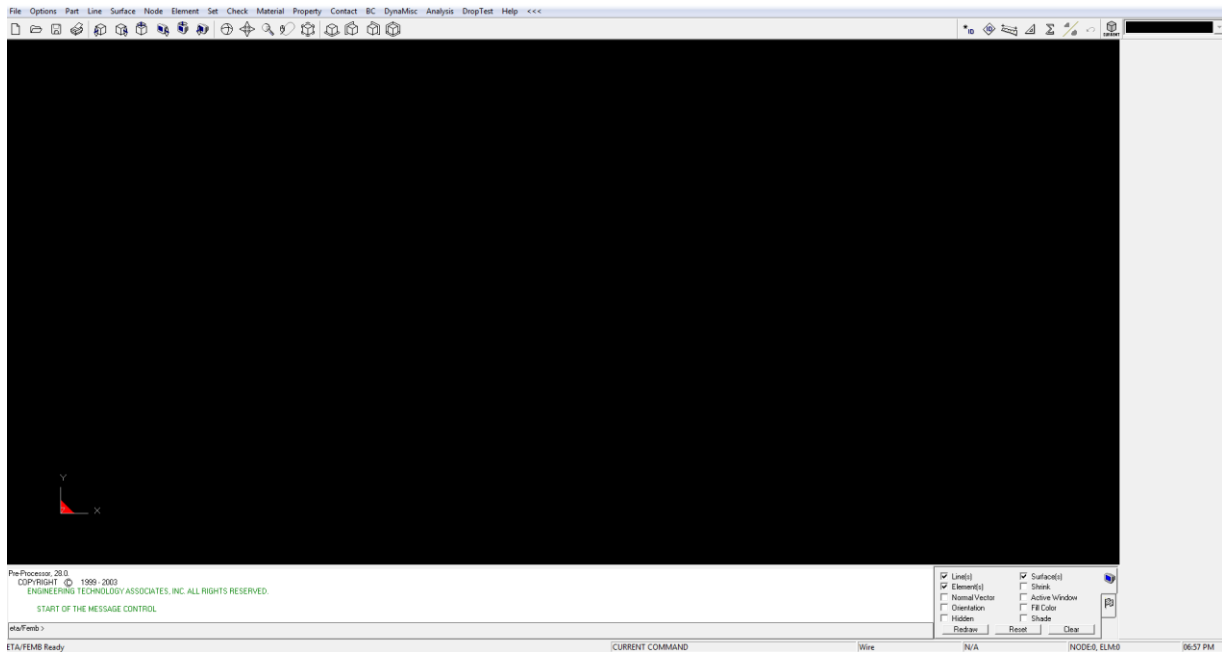
καθώς και του ενεργού μητρώου εξωτερικών επιδράσεων (γενικευμένων δυνάμεων):

$$\hat{F} = F - \left(K - 2 \cdot \frac{1}{\Delta t^2} \cdot M \right) \cdot U_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2} \cdot M - \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \cdot C \right) \cdot U_{t-\Delta t} \quad (7)$$

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι για τον χρόνο $t = 0$, οι συνθήκες είναι γνωστές και άρα η επίλυση δεν παρουσιάζει κανένα πρόβλημα. (βλ. πηγή [4])

3.1.2 Προ-επεξεργασία μοντέλου

Η προετοιμασία του μοντέλου πριν την επίλυση πραγματοποιείται στον προ-επεξεργαστή (pre-processor). Ο προ-επεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του συγκεκριμένου μοντέλου ήταν ο FEMB (Finite Element Model Builder) Pre-Processor v.28.0 για PC της εταιρείας ETA. Η επιφάνεια εργασίας του συγκεκριμένου προ-επεξεργαστή παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Επιφάνεια εργασίας του Femb Pre-Processor

Όπως παρουσιάζεται από την εικόνα αυτή, ο προ-επεξεργαστής έχει στο μεγαλύτερο μέρος του την επιφάνεια σχεδίασης. Στο πάνω μέρος του έχει τα κουμπιά επιλογής των μενού λειτουργιών, ενώ αμέσως από κάτω έχει τα κουμπιά βασικών λειτουργιών και τα κουμπιά ελέγχου όψεων του μοντέλου. Στο δεξί μέρος της οθόνης εμφανίζεται μια κενή στήλη. Στην περιοχή αυτή εμφανίζονται τα διάφορα μενού και υπομενού των λειτουργιών του προγράμματος. Τέλος, στο κάτω μέρος της οθόνης εμφανίζονται η οθόνη μηνυμάτων, η γραμμή εντολών και ο πίνακας ρύθμισης των απεικονίσεων της επιφάνειας σχεδιασμού. Η λειτουργία των διαφόρων εργαλείων του προ-επεξεργαστή θα γίνει περισσότερο κατανοητή κατά την επεξήγηση των μοντέλων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

3.2 Παρουσίαση μοντέλου

Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν όλες οι λειτουργίες που πραγματοποιήθηκαν, ώστε να κατασκευαστούν τα μοντέλα που επιλύθηκαν στα πλαίσια του υπολογιστικού μέρους. Η περιγραφή των μοντέλων θα γίνει με την ίδια σειρά με την οποία πραγματοποιήθηκαν.

Στην ενότητα αυτή γίνεται περιγραφή των γεωμετριών που σχεδιάστηκαν, καθώς και του χωρισμού των γεωμετριών αυτών σε πεπερασμένα στοιχεία. Για κάθε

ένα από τα μοντέλα θα περιγραφούν ακριβώς τα βήματα και οι επιλογές που έγιναν, ώστε να είναι δυνατή η κατασκευή τους.

Ολόκληρος ο σχεδιασμός των δοκιμών βασίστηκε στις πραγματικές διαστάσεις της πειραματικής διάταξης. Μοναδικές εξαιρέσεις σε αυτό ήταν η παραλλαγή στο εξωτερικό σχήμα της μήτρας, όπου αντί για κύλινδρος μοντελοποιήθηκε ως ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, καθώς και το ύψος του τμήματος εισόδου, όπου μοντελοποιήθηκε μικρότερο επειδή δεν υπήρχε απαίτηση για την μοντελοποίηση ολόκληρου του ύψους του. Παρόλα αυτά, οι συγκεκριμένες παραλλαγές δεν είχαν καμία συνέπεια στα τελικά αποτελέσματα του υπολογιστικού μέρους.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι, για να είναι δυνατή η επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού μέρους, όλα τα γεωμετρικά στοιχεία του μοντέλου σχεδιάστηκαν μόνο κατά το ένα τεταρτημόριο του φυσικού μοντέλου. Με τον τρόπο αυτό ήταν δυνατός ο χωρισμός του μοντέλου σε περισσότερα πεπερασμένα στοιχεία ανά τεταρτημόριο, επιτυγχάνοντας έτσι μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων, χωρίς όμως το μοντέλο να γίνει ιδιαίτερα ογκώδες και άρα να απαιτείται περισσότερος χρόνος για την επίλυσή του. Επίσης, τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν σωστά, εφόσον στο μοντέλο προστέθηκαν οριακές συνθήκες συμμετρίας, στα όρια του τεταρτημορίου.

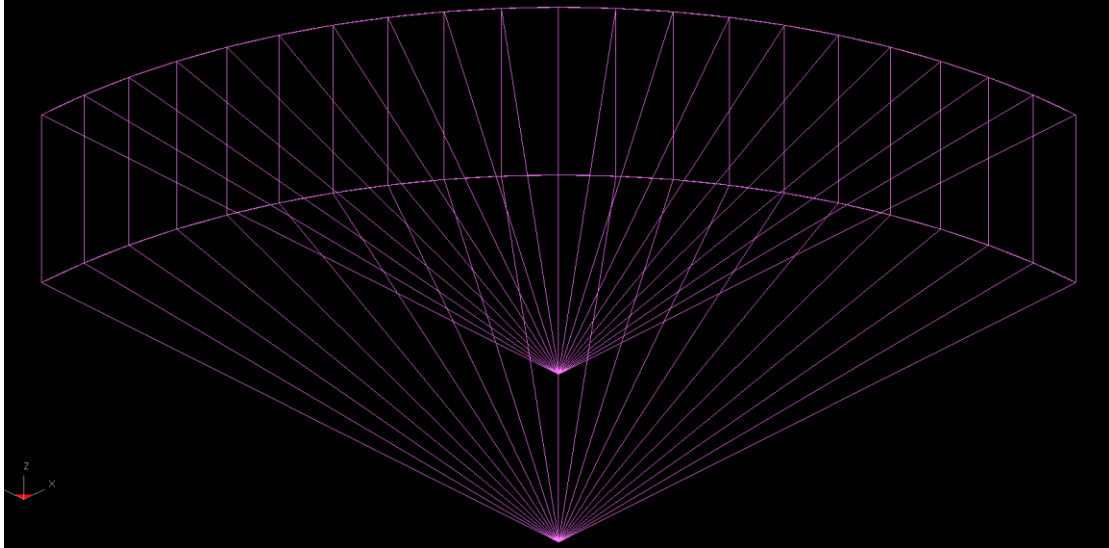
Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η δυνατότητα του σχεδιασμού ενός τεταρτημορίου ήταν διαθέσιμη, μόνο επειδή οι γεωμετρικές των μοντέλων μπορούσαν να προκύψουν από την περιστροφή μια συγκεκριμένης γεωμετρίας. Σε διαφορετική περίπτωση ίσως αυτό να μην ήταν εφικτό.

3.2.1 Μοντελοποίηση εμβόλου

Η μοντελοποίηση του εμβόλου ήταν η ίδια για όλα τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν. Αν και είναι ένα από τα πιο σημαντικά μέρη του μοντέλου, η μοντελοποίησή του δεν είναι ιδιαίτερα απαιτητική. Μοντελοποιήθηκε ως τεταρτημόριο ενός κυλίνδρου. Οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του εμβόλου ήταν:

- Δημιουργία τεμαχίου:
 - *Part* → *Create Part* → *Εισαγωγή ονόματος (Plate)* → *OK* → *Apply* → *OK*
- Κατασκευή γεωμετρίας:
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,66.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,70)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Line(s)* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,66.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,66,7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,12.5,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,70)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,70)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,70)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,12.5,70)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,66.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,70)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,66.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,70)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,12.5,66.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,12.5,70)* → *Create* → *End*
- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία:
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *9-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας)* → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών)* → *Tria. at corner* → *Εισαγωγή δεδομένων (1,20,1)* → *OK* → *Yes*
- Έλεγχος πεπερασμένων στοιχείων:
 - *Check* → *Auto Orient. Solid*

Έτσι με την εισαγωγή των παραπάνω εντολών, κατασκευάστηκε το έμβολο σε κάθε ένα από τα μοντέλα της εργασίας. Η μορφή του στο πρόγραμμα παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Μοντελοποίηση εμβόλου

3.2.2 Μοντελοποίηση μήτρας

Σε όλα σχεδόν τα μοντέλα, η μήτρα κατασκευάστηκε από τέσσερα διακριτά μέρη: α) τον κύλινδρο εξόδου, β) το κωνικό τμήμα, γ) το τμήμα εισόδου και δ) το καμπύλο τμήμα εξόδου από το κωνικό τμήμα, στον κύλινδρο εξόδου. Εξαιρέση αποτελούν τα μοντέλα των δοκιμών #4 και #6, όπου χρειάστηκε να προστεθεί ένα επιπλέον κυλινδρικό τμήμα κάτω από τον κύλινδρο εξόδου της μήτρας. Για τα περισσότερα μοντέλα, οι εντολές που εισήχθησαν στο πρόγραμμα για την κατασκευή του συγκεκριμένου κομματιού, ήταν οι εξής:

- Δημιουργία τεμαχίου:
 - *Part* → *Create Part* → *Εισαγωγή ονόματος (Matrix)* → *OK* → *Apply* → *OK*
- Κατασκευή γεωμετρίας κυλίνδρου εξόδου:
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,0)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (10,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,15.45)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (10,0,90,1)* → *OK* → *End*

- *Line* → *Create* → *Line(s)* → *Εισαγωγή δεδομένων (10,0,0)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,0,0)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,0,0)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,20,0)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,20,0)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,20,0)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,10,0)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (10,0,15.45)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,0,15.45)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,0,15.45)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,20,15.45)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,20,15.45)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,20,15.45)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,10,15.45)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (10,0,0)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (10,0,15.45)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,0,0)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,0,15.45)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,20,0)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,20,15.45)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,10,0)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,10,15.45)* → *Create* → *End*
- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του κυλίνδρου εξόδου:
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *12-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας)* → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών)* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,1,1)* → *OK* → *Yes*
- Κατασκευή γεωμετρίας καμπύλου τμήματος εξόδου:
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,18.0382)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (10.3407,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (20,0,15.45)* → *Define* → *Y->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (10,270,285,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,20,15.45)* → *Define* → *X->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (10,165,180,1)* → *OK* → *End*

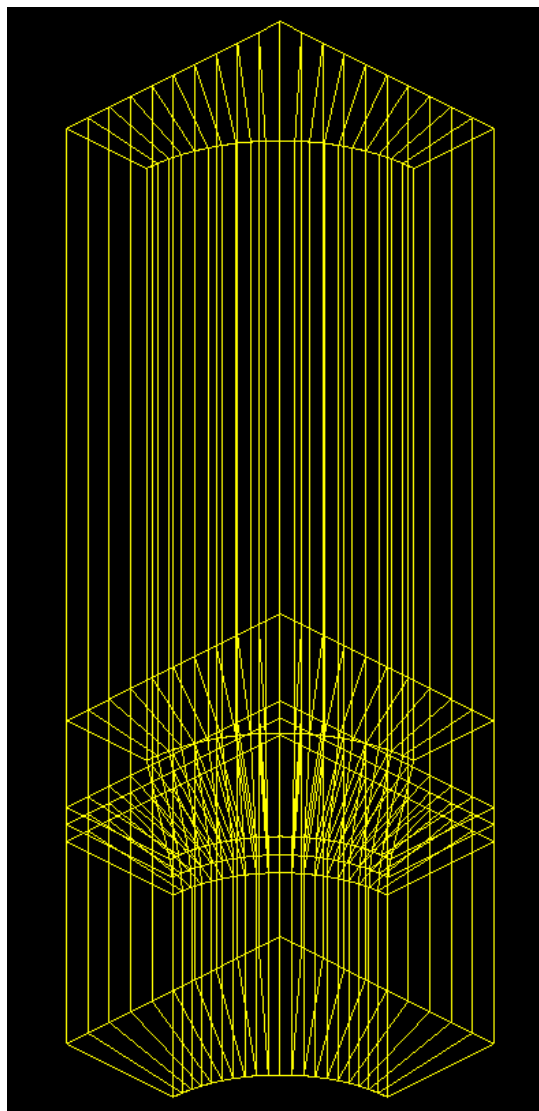
- *Line* → *Create* → *Line(s)* → *Εισαγωγή δεδομένων* (10.3407,0,18.0382) → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων* (20,0,18.0382) → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων* (20,0,18.0382) → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων* (20,20,18.0382) → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων* (0,20,18.0382) → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων* (0,20,18.0382) → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων* (0,10.3407,18.0382) → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων* (20,0,15.45) → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων* (20,0,18.0382) → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων* (0,20,15.45) → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων* (0,20,18.0382) → *Create* → *End*
- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του καμπύλου τμήματος εξόδου:
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *12-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας* (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας) → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών* (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών) → *Εισαγωγή δεδομένων* (20,1,2) → *OK* → *Yes*
- Κατασκευή γεωμετρίας κωνικού τμήματος:
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου* (0,0,24.7) → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων* (12.5,0,90,1) → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Line(s)* → *Εισαγωγή δεδομένων* (12.5,0,24.7) → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων* (20,0,24.7) → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων* (20,0,24.7) → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων* (20,20,24.7) → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων* (0,20,24.7) → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων* (0,20,24.7) → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων* (0,12.5,24.7) → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων* (10.3407,0,18.0382) → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων* (12.5,0,24.7) → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων* (0,10.3407,18.0382) → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων* (0,12.5,24.7) → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων* (20,0,18.0382) → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων* (20,0,24.7) → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων* (0,20,18.0382) → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων* (0,20,24.7) → *Create* → *End*

- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του κωνικού τμήματος:
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *12-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας)* → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών)* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,1,1)* → *OK* → *Yes*
- Κατασκευή γεωμετρίας τμήματος εισόδου:
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,70)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Line(s)* → *Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,70)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,0,70)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,0,70)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,20,70)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,20,70)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,20,70)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,12.5,70)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,24.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,70)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,12.5,24.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,12.5,70)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,0,24.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,0,70)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,20,24.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,20,70)* → *Create* → *End*
- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του τμήματος εισόδου:
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *12-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας)* → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών)* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,1,1)* → *OK* → *Yes*
- Έλεγχος των πεπερασμένων στοιχείων:
 - *Check* → *Auto Orient. Solid*
- Σύνδεση των επιμέρους τμημάτων σε ένα ενιαίο τμήμα:
 - *Node* → *Check Coincident* → *Εισαγωγή τιμής (0.01)* → *OK* → *Current Part* → *Check* → *Merge & Delete* → *Cancel*

Αν αντιστοιχιστούν τα τμήματα της μήτρας, με τα αντίστοιχα τμήματα της μήτρας του πειράματος, προκύπτει ότι:

- Ο κύλινδρος εξόδου, το καμπύλο τμήμα εξόδου και το κωνικό μέρος αποτελούν το κωνικό τμήμα της πειραματικής μήτρας.
- Το τμήμα εισόδου αντιστοιχεί στο ομόνυμο τμήμα της πειραματικής μήτρας.

Το τμήμα εξόδου της πειραματικής μήτρας δεν χρειάστηκε να μοντελοποιηθεί για τα περισσότερα μοντέλα, αφού η διάμετρός του ήταν κατά 1 mm μεγαλύτερη από τον κύλινδρο εξόδου και άρα δεν ερχόταν σε επαφή με το δοκίμιο, κατά την έξοδό του από το κωνικό τμήμα. Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Μοντελοποίηση μήτρας

Με τις εντολές που αναφέρθηκαν, πραγματοποιήθηκε η κατασκευή της μήτρας για τα περισσότερα μοντέλα. Όπως προαναφέρθηκε εξαίρεση αποτελούν τα

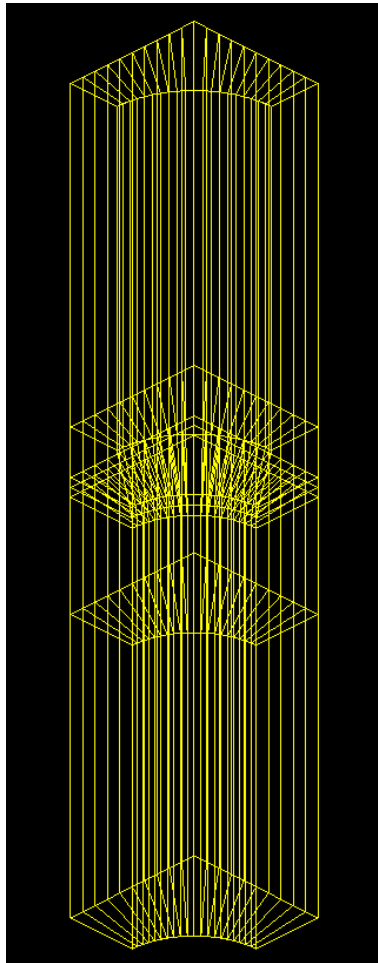
μοντέλα #4 και #6. Για τα δοκίμια αυτά παρατηρήθηκε από τα πειραματικά δεδομένα ότι υπήρξε επαφή τους με μεγαλύτερο μέρος της μήτρας, από ότι στα υπόλοιπα. Έτσι, προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα συγκεκριμένα δοκίμια ήρθαν σε επαφή και με το τμήμα εξόδου της μήτρας κατά την έξοδό τους από το κωνικό τμήμα. Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώνεται και από το γεγονός, ότι αφ' ενός στο δοκίμιο #4 κατέρρευσε ο πυθμένας και τα εσωτερικά υλικά διέρρευσαν, ενώ αφ' ετέρου το δοκίμιο #6 εμφάνισε «αυτιά» στην περιφέρεια της ημικυκλικής διαμόρφωσης, σημάδι ότι πριν την εξόλκευσή του είχε μεγαλύτερη διάμετρο. Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης προτρέπεται στην ανάγνωση της ανάλυσης του πειραματικού μέρους (Κεφάλαιο 2).

Για την κατάλληλη παραλλαγή των μοντέλων στις περιπτώσεις των δοκιμίων #4 και #6, προστέθηκαν στη μοντελοποίηση της μήτρας οι παρακάτω εντολές. Οι εντολές αυτές πραγματοποιήθηκαν πριν τον έλεγχο των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ η συνέχεια από εκεί και πέρα ήταν ακριβώς η ίδια:

- Κατασκευή γεωμετρίας τμήματος εξόδου της μήτρας:
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,-40)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (10,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Line(s)* → *Εισαγωγή δεδομένων (10,0,-40)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,0,-40)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,0,-40)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,20,-40)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,20,-40)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,20,-40)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,10,-40)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (10,0,-40)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (10,0,0)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,10,-40)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,10,-40)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,0,-40)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,0,0)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,20,-40)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,20,0)* → *Create* → *End*
- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία:
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *12-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας)* → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με*

την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών) → Εισαγωγή δεδομένων
(20,1,1) → OK → Yes

Το τελικό αποτέλεσμα των εντολών για τη μοντελοποίηση της μήτρας, συμπεριλαμβανομένου και του τμήματος εξόδου, παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Μοντελοποίηση μήτρας με το τμήμα εξόδου

Έτσι, με την προσθήκη των συγκεκριμένων γραμμών έχει αναλυθεί πλήρως η μοντελοποίηση της μήτρας.

3.2.3 Μοντελοποίηση δοκιμίων

Για την μοντελοποίηση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός των τριών βασικών μερών τους. Το εξωτερικό χαλύβδινο περίβλημα σχεδιάστηκε το ίδιο

για όλα τα δοκίμια. Οι εντολές που εισήχθησαν για το σχεδιασμό του χαλύβδινου περιβλήματος ήταν οι εξής:

- Δημιουργία τεμαχίου:
 - *Part* → *Create Part* → *Εισαγωγή ονόματος (Outer)* → *OK* → *Apply* → *OK*
- Κατασκευή γεωμετρίας χαλύβδινου περιβλήματος:
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,24.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (11,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,24.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,26.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (11,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,26.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,66.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (11,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,66.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Line(s)* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,24.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,24.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,24.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,12.5,24.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,26.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,12.5,26.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (5,0,24.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (5,5,24.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (5,5,24.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,5,24.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων*

(5,0,26.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (5,5,26.7) → Create →
 Εισαγωγή δεδομένων (5,5,26.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων
 (0,5,26.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (0,0,24.7) → Key-In →
 Εισαγωγή δεδομένων (0,0,26.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων
 (5,0,24.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (5,0,26.7) → Create →
 Εισαγωγή δεδομένων (5,5,24.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων
 (5,5,26.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (0,5,24.7) → Key-In →
 Εισαγωγή δεδομένων (0,5,26.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων
 (11,0,24.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (11,0,26.7) → Create
 → Εισαγωγή δεδομένων (0,11,24.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων
 (0,11,26.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,24.7) → Key-In
 → Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,26.7) → Create → Εισαγωγή
 δεδομένων (0,12.5,24.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων
 (0,12.5,26.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (11,0,26.7) → Key-In
 → Εισαγωγή δεδομένων (11,0,66.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων
 (0,11,26.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (0,11,66.7) → Create
 → Εισαγωγή δεδομένων (12.5,0,26.7) → Key-In → Εισαγωγή
 δεδομένων (12.5,0,66.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων
 (0,12.5,26.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (0,12.5,66.7) →
 Create → Εισαγωγή δεδομένων (11,0,66.7) → Key-In → Εισαγωγή
 δεδομένων (12.5,0,66.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (0,11,66.7)
 → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (0,12.5,66.7) → Create → End

Από τις εντολές αυτές φαίνεται ότι στο χαλύβδινο περίβλημα έχουν
 σχεδιαστεί τέσσερις περιοχές. Ο χωρισμός αυτός έγινε ώστε να επιτευχθεί
 μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την επίλυση του μοντέλου, καθώς και να υπάρχει
 μικρότερη πιθανότητα λάθους. Ο λόγος είναι ότι στο LS – DYNA η επίλυση σταματά
 εάν η παραμόρφωση των πεπερασμένων στοιχείων υπερβεί μια συγκεκριμένη τιμή.
 Έτσι, όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων, τόσο πιο μικρή η
 μέγιστη δυνατή του παραμόρφωση. Για να αποφευχθεί το ελάττωμα αυτό, στην
 περιοχή κοντά στο κέντρο του πυθμένα, σχεδιάστηκε μια περιοχή με ορθογωνικά
 πεπερασμένα στοιχεία ίδιου μεγέθους. Παρόλα αυτά, ο συγκεκριμένος τρόπος
 σχεδίασης εισήγαγε κάποιες δυσκολίες στο χωρισμό του χαλύβδινου περιβλήματος σε

πεπερασμένα στοιχεία. Για το λόγο αυτό οι εντολές που ακολουθούν, διαφέρουν σε σχέση με τις εντολές σχεδίασης των τμημάτων της μήτρας που περιγράφηκαν παραπάνω:

- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του ορθογωνικού τμήματος:
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *12-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας)* → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών)* → *Εισαγωγή δεδομένων (10,10,2)* → *OK* → *Yes*
- Συνένωση ευθειών (5,0,Z)-(5,5,Z) και (5,5,Z)-(0,5,Z):
 - *Line* → *Combine* → *Επιλογή των αντίστοιχων ευθειών για Z = 24.7* → *Combine* → *Επιλογή των αντίστοιχων ευθειών για Z = 26.7* → *Combine* → *End*
- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του ενδιάμεσου τμήματος του πυθμένα:
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *12-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας)* → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών)* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,5,2)* → *OK* → *Yes*
- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του ακραίου τμήματος του πυθμένα:
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *12-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας)* → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών)* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,2,2)* → *OK* → *Yes*
- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του κορμού (κυλινδρικού τμήματος):
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *12-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας)* → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών)* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,2,40)* → *OK* → *Yes*
- Έλεγχος πεπερασμένων στοιχείων:
 - *Check* → *Auto Orient. Solid*

- Σύνδεση των επιμέρους τμημάτων σε ένα ενιαίο τμήμα:
 - *Node → Check Coincident → Εισαγωγή τιμής (0.01) → OK → Current Part → Check → Merge & Delete → Cancel*

Μετά τη μοντελοποίηση του χαλύβδινου περιβλήματος έπρεπε να μοντελοποιηθούν τα εσωτερικά υλικά. Επειδή γεωμετρικά τα δοκίμια #1 και #4, #2 και #5, και #3 και #6 ήταν ίδια, η ανάλυση που θα ακολουθήσει θα περιγράφει την κατασκευή των εσωτερικών υλικών καθενός από τα τρία ζεύγη (1-4, 2-5 και 3-6).

Δοκίμια #1 και #4:

Οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για τη σχεδίαση του ενδιάμεσου επιστρώματος, ήταν οι παρακάτω:

- Δημιουργία τεμαχίου:
 - *Part → Create Part → Εισαγωγή ονόματος (Middle) → OK → Apply → OK*
- Κατασκευή γεωμετρίας ενδιάμεσου υλικού:
 - *Line → Create → Arc → About a Center → Define → Εισαγωγή κέντρου (0,0,26.7) → Define → Z->Local W → Εισαγωγή δεδομένων (11,0,90,1) → OK → End*
 - *Line → Create → Arc → About a Center → Define → Εισαγωγή κέντρου (0,0,26.7) → Define → Z->Local W → Εισαγωγή δεδομένων (9.35,0,90,1) → OK → End*
 - *Line → Create → Arc → About a Center → Define → Εισαγωγή κέντρου (0,0,66.7) → Define → Z->Local W → Εισαγωγή δεδομένων (11,0,90,1) → OK → End*
 - *Line → Create → Arc → About a Center → Define → Εισαγωγή κέντρου (0,0,66.7) → Define → Z->Local W → Εισαγωγή δεδομένων (9.35,0,90,1) → OK → End*
 - *Line → Create → Line(s) → Εισαγωγή δεδομένων (9.35,0,26.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (11,0,26.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (0,9.35,26.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (0,11,26.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (11,0,66.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (9.35,0,66.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (0,11,66.7)*

→ *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,9.35,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (9.35,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (9.35,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,9.35,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,9.35,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (11,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (11,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,11,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,11,66.7)* → *Create* → *End*

- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του ενδιάμεσου υλικού:
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *12-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας)* → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών)* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,2,40)* → *OK* → *Yes*
- Έλεγχος των πεπερασμένων στοιχείων:
 - *Check* → *Auto Orient. Solid*

Για την κατασκευή του εσωτερικού υλικού (πυρήνα), έπρεπε και πάλι να δημιουργηθούν δύο διακριτές περιοχές, ώστε να αποφευχθεί παύση της επίλυσης του μοντέλου, λόγω μεγάλης παραμόρφωσης των στοιχείων. Οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν:

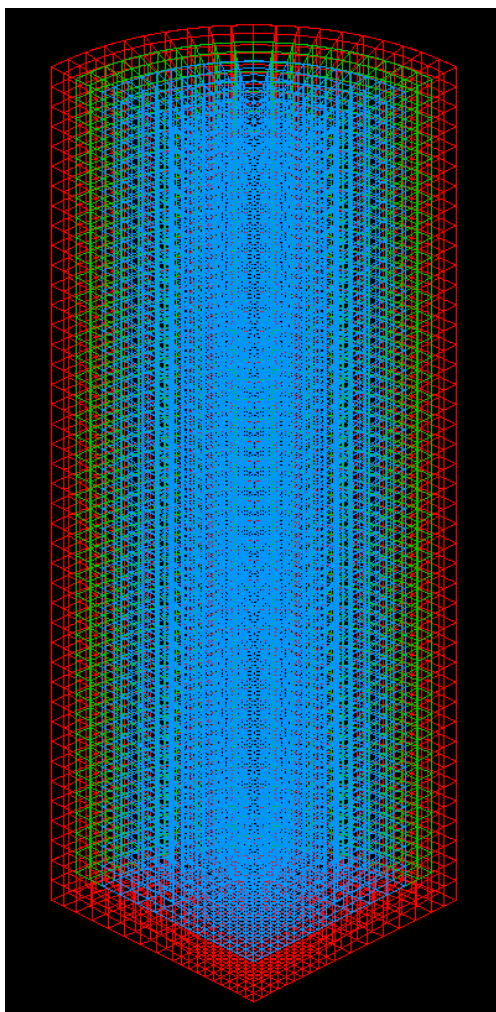
- Δημιουργία τεμαχίου:
 - *Part* → *Create Part* → *Εισαγωγή ονόματος (Inner)* → *OK* → *Apply* → *OK*
- Κατασκευή γεωμετρίας πυρήνα:
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,26.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (9.35,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,66.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (9.35,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Line(s)* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (9.35,0,26.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,9.35,26.7)*

→ Create → Εισαγωγή δεδομένων (5,0,26.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (5,5,26.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (5,5,26.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (0,5,26.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (0,0,66.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (9.35,0,66.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (0,0,66.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (0,9.35,66.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (5,0,66.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (5,5,66.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (5,5,66.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (0,5,66.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (0,0,26.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (0,0,66.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (5,0,26.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (5,0,66.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (5,5,26.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (5,5,66.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (0,5,26.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (0,5,66.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (9.35,0,26.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (9.35,0,66.7) → Create → Εισαγωγή δεδομένων (0,9.35,26.7) → Key-In → Εισαγωγή δεδομένων (0,9.35,66.7) → Create → End

- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του ορθογωνικού τμήματος:
 - Element → Plate/Solid Mesh → 12-Line (Solid) → Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας → Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας) → Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών) → Εισαγωγή δεδομένων (10,10,40) → OK → Yes
- Συνένωση ευθειών (5,0,Z)-(5,5,Z) και (5,5,Z)-(0,5,Z):
 - Line → Combine → Επιλογή των αντίστοιχων ευθειών για Z = 26.7 → Combine → Επιλογή των αντίστοιχων ευθειών για Z = 66.7 → Combine → End
- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του εξωτερικού τμήματος του πυρήνα:
 - Element → Plate/Solid Mesh → 12-Line (Solid) → Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας → Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας) → Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών) → Εισαγωγή δεδομένων (20,3,40) → OK → Yes

- Έλεγχος πεπερασμένων στοιχείων:
 - *Check* → *Auto Orient. Solid*
- Σύνδεση των επιμέρους τμημάτων σε ένα ενιαίο τμήμα:
 - *Node* → *Check Coincident* → *Εισαγωγή τιμής (0.01)* → *OK* → *Current Part* → *Check* → *Merge & Delete* → *Cancel*

Το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης των δοκιμίων #1 και #4 παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Μοντελοποίηση δοκιμίων #1 και #4

Δοκίμια #2 και #5:

Για την μοντελοποίηση του ενδιάμεσου υλικού χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές:

- Δημιουργία τεμαχίου:
 - *Part* → *Create Part* → *Εισαγωγή ονόματος (Middle)* → *OK* → *Apply* → *OK*

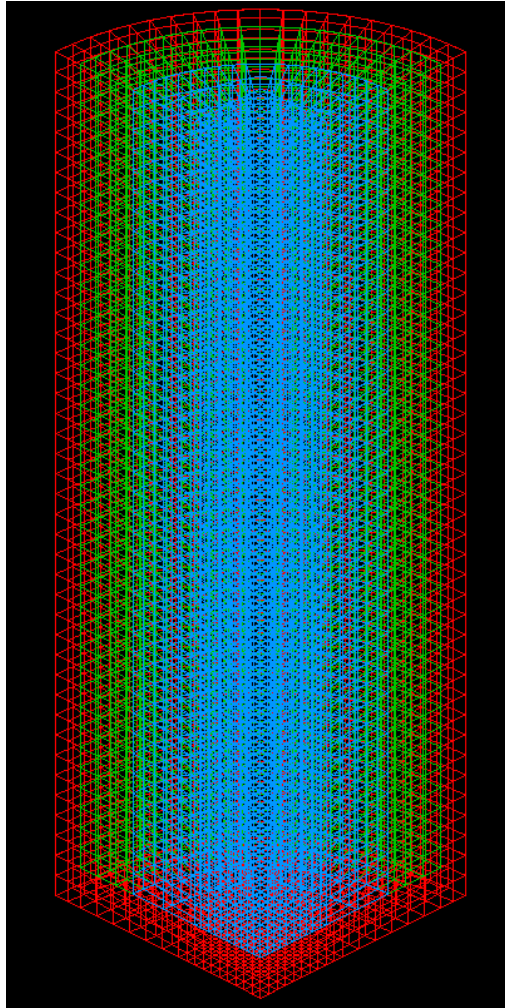
- Κατασκευή γεωμετρίας ενδιάμεσου υλικού:
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,26.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (11,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,26.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (7.8,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,66.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (11,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,66.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (7.8,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Line(s)* → *Εισαγωγή δεδομένων (7.8,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (11,0,26.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,7.8,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,11,26.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (11,0,66.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (7.8,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,11,66.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,7.8,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (7.8,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (7.8,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,7.8,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,7.8,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (11,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (11,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,11,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,11,66.7)* → *Create* → *End*
- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του ενδιάμεσου υλικού:
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *12-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας)* → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών)* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,3,40)* → *OK* → *Yes*
- Έλεγχος των πεπερασμένων στοιχείων:
 - *Check* → *Auto Orient. Solid*

Στη συνέχεια, για τη μοντελοποίηση του εσωτερικού υλικού (πυρήνα) χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές:

- Δημιουργία τεμαχίου:
 - *Part* → *Create Part* → *Εισαγωγή ονόματος (Inner)* → *OK* → *Apply* → *OK*
- Κατασκευή γεωμετρίας πυρήνα:
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,26.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (7.8,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,66.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (7.8,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Line(s)* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (7.8,0,26.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,7.8,26.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (4,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (4,4,26.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (4,4,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,4,26.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,66.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (7.8,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,66.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,7.8,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (4,0,66.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (4,4,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (4,4,66.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,4,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (4,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (4,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (4,4,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (4,4,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,4,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,4,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (7.8,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (7.8,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,7.8,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,7.8,66.7)* → *Create* → *End*

- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του ορθογωνικού τμήματος:
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *12-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας)* → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών)* → *Εισαγωγή δεδομένων (10,10,40)* → *OK* → *Yes*
- Συνένωση ευθειών (4,0,Z)-(4,4,Z) και (4,4,Z)-(0,4,Z):
 - *Line* → *Combine* → *Επιλογή των αντίστοιχων ευθειών για Z = 26.7* → *Combine* → *Επιλογή των αντίστοιχων ευθειών για Z = 66.7* → *Combine* → *End*
- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του εξωτερικού τμήματος του πυρήνα:
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *12-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας)* → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών)* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,3,40)* → *OK* → *Yes*
- Έλεγχος πεπερασμένων στοιχείων:
 - *Check* → *Auto Orient. Solid*
- Σύνδεση των επιμέρους τμημάτων σε ένα ενιαίο τμήμα:
 - *Node* → *Check Coincident* → *Εισαγωγή τιμής (0.01)* → *OK* → *Current Part* → *Check* → *Merge & Delete* → *Cancel*

Το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης των δοκιμίων #2 και #5 παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Μοντελοποίηση δοκιμών #2 και #5

Δοκίμια #3 και #6:

Τέλος, για τα τεμάχια αυτά, για την κατασκευή του ενδιάμεσου υλικού χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές:

- Δημιουργία τεμαχίου:
 - *Part* → *Create Part* → *Εισαγωγή ονόματος (Middle)* → *OK* → *Apply* → *OK*
- Κατασκευή γεωμετρίας ενδιάμεσου υλικού:
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,26.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (11,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,26.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (5.5,0,90,1)* → *OK* → *End*

- *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,66.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (5.5,0,90,1)* → *OK* → *End*
- *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,66.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (5.5,0,90,1)* → *OK* → *End*
- *Line* → *Create* → *Line(s)* → *Εισαγωγή δεδομένων (5.5,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (11,0,26.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,5.5,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,11,26.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (11,0,66.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (5.5,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,11,66.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,5.5,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (5.5,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (5.5,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,5.5,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,5.5,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (11,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (11,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,11,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,11,66.7)* → *Create* → *End*
- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του ενδιάμεσου υλικού:
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *12-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας)* → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών)* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,4,40)* → *OK* → *Yes*
- Έλεγχος των πεπερασμένων στοιχείων:
 - *Check* → *Auto Orient. Solid*

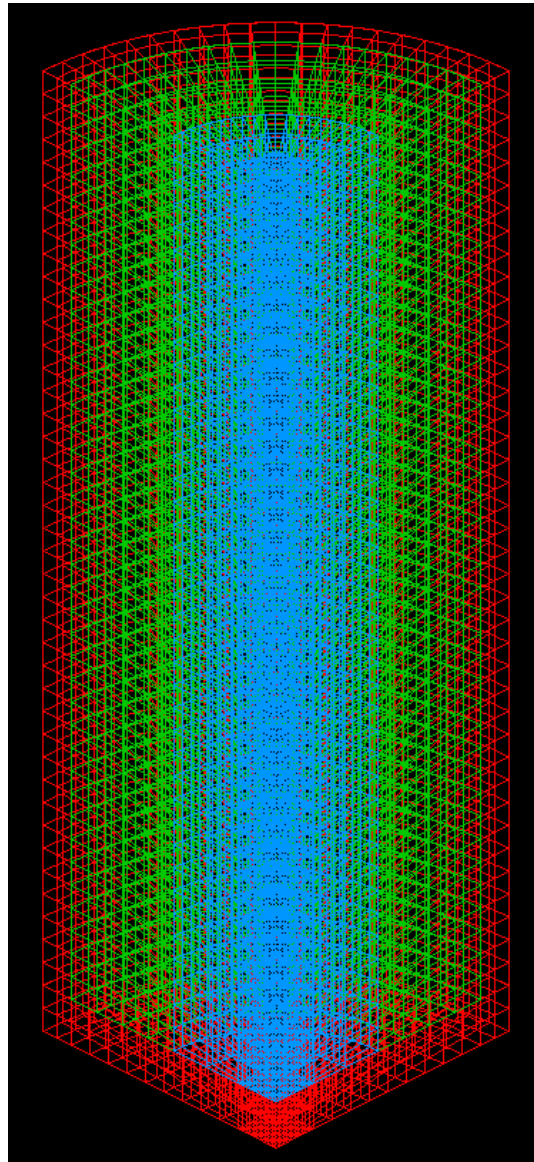
Για τη μοντελοποίηση του εσωτερικού υλικού, εισήχθησαν οι ακόλουθες εντολές στο πρόγραμμα:

- Δημιουργία τεμαχίου:
 - *Part* → *Create Part* → *Εισαγωγή ονόματος (Inner)* → *OK* → *Apply* → *OK*

- Κατασκευή γεωμετρίας πυρήνα:
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,26.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (5.5,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Arc* → *About a Center* → *Define* → *Εισαγωγή κέντρου (0,0,66.7)* → *Define* → *Z->Local W* → *Εισαγωγή δεδομένων (5.5,0,90,1)* → *OK* → *End*
 - *Line* → *Create* → *Line(s)* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (5.5,0,26.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,5.5,26.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (3,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (3,3,26.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (3,3,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,3,26.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,66.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (5.5,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,66.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,5.5,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (3,0,66.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (3,3,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (3,3,66.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,3,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (3,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (3,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (3,3,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (3,3,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,3,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,3,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (5.5,0,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (5.5,0,66.7)* → *Create* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,5.5,26.7)* → *Key-In* → *Εισαγωγή δεδομένων (0,5.5,66.7)* → *Create* → *End*
- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του ορθογωνικού τμήματος:
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *12-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας)* → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών)* → *Εισαγωγή δεδομένων (10,10,40)* → *OK* → *Yes*

- Συνένωση ευθειών (3,0,Z)-(3,3,Z) και (3,3,Z)-(0,3,Z):
 - *Line* → *Combine* → *Επιλογή των αντίστοιχων ευθειών για Z = 26.7* → *Combine* → *Επιλογή των αντίστοιχων ευθειών για Z = 66.7* → *Combine* → *End*
- Χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία του εξωτερικού τμήματος του πυρήνα:
 - *Element* → *Plate/Solid Mesh* → *12-Line (Solid)* → *Επιλογή γραμμών κάτω επιφάνειας* → *Επιλογή γραμμών άνω επιφάνειας (με την ίδια σειρά με της κάτω επιφάνειας)* → *Επιλογή παράπλευρων γραμμών (με την ίδια σειρά με των άλλων δύο επιφανειών)* → *Εισαγωγή δεδομένων (20,2,40)* → *OK* → *Yes*
- Έλεγχος πεπερασμένων στοιχείων:
 - *Check* → *Auto Orient. Solid*
- Σύνδεση των επιμέρους τμημάτων σε ένα ενιαίο τμήμα:
 - *Node* → *Check Coincident* → *Εισαγωγή τιμής (0.01)* → *OK* → *Current Part* → *Check* → *Merge & Delete* → *Cancel*

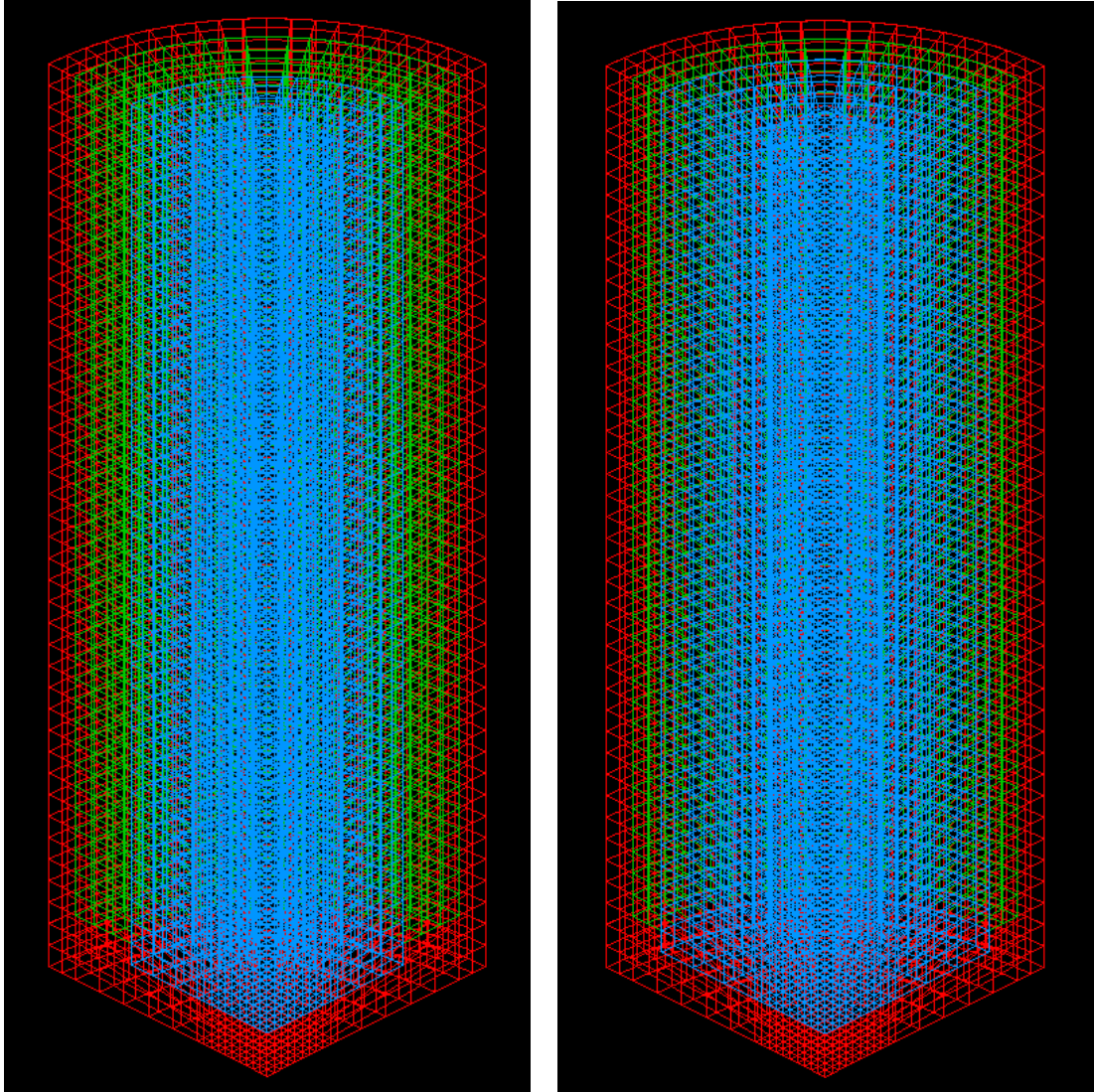
Το αποτέλεσμα της μοντελοποίηση των δοκιμίων #3 και #6 παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα.



Μοντελοποίηση δοκιμίων #3 και #6

Αξίζει να αναφερθεί ότι για τα μοντέλα των δοκιμίων #4 και #5, πραγματοποιήθηκε μια τροποποίηση. Ο λόγος ήταν ότι, επειδή κατά την επίλυση των συγκεκριμένων μοντέλων το ενδιαμέσο υλικό διέρρηε γρηγορότερα από τον πυρήνα, η χαμηλότερη συστάδα πεπερασμένων στοιχείων παγιδευόταν μεταξύ του πυθμένα της χαλύβδινης επίστρωσης και του πυρήνα. Αποτέλεσμα ήταν η έντονη παραμόρφωση των συγκεκριμένων στοιχείων, και άρα η παύση της επίλυσης του μοντέλου. Για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο, αφαιρέθηκε η συστάδα αυτή των στοιχείων. Μετά από συζήτηση με τους τεχνίτες του εργαστηρίου, επισημάνθηκε ότι αυτή η τροποποίηση ίσως και να συνέβη πραγματικά, αφού στα συγκεκριμένα δοκίμια ο χώρος μεταξύ του χάλυβα και του χαλκού, όπου θα εισερχόταν το χυτό

αλουμίνιο, ήταν πολύ μικρός. Έτσι, είναι πιθανό το αλουμίνιο να ψύχθηκε πριν προλάβει να έρθει σε επαφή με τον πυθμένα, αφήνοντας έτσι ένα κενό. Ο συγκεκριμένος προβληματισμός επιδέχεται περαιτέρω έρευνα. Οι μοντελοποιήσεις των δύο αυτών δοκιμίων μετά την τροποποίηση, παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



(Αριστερά) Τελική μοντελοποίηση δοκιμίου #5

(Δεξιά) Τελική μοντελοποίηση δοκιμίου #4

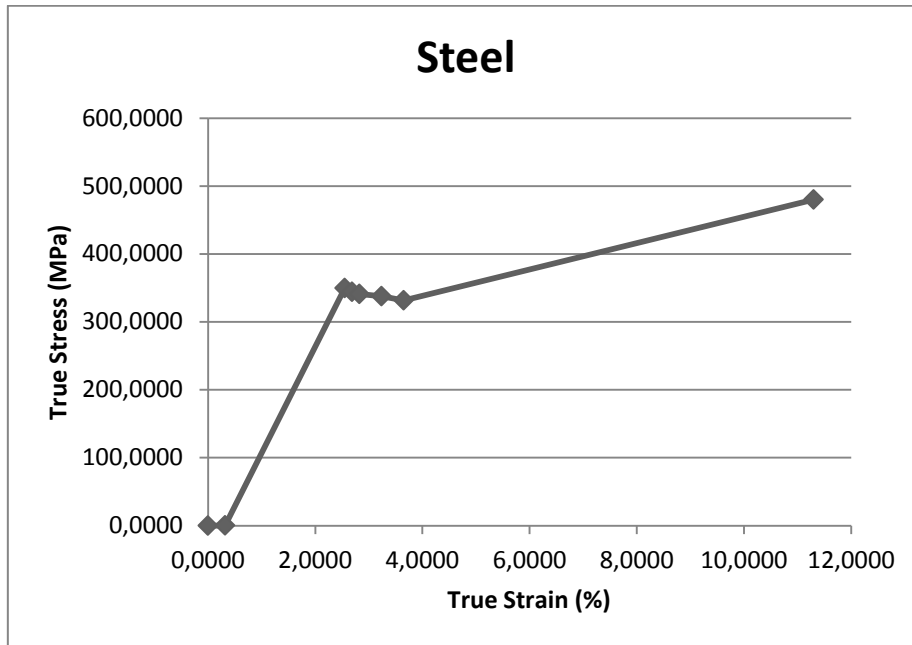
3.3 Υλικά μοντέλων και ιδιότητες πεπερασμένων στοιχείων

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο εισήχθησαν στο LS – DYNA τα δεδομένα που αφορούν στα υλικά των μοντέλων, καθώς και οι ιδιότητες των πεπερασμένων στοιχείων.

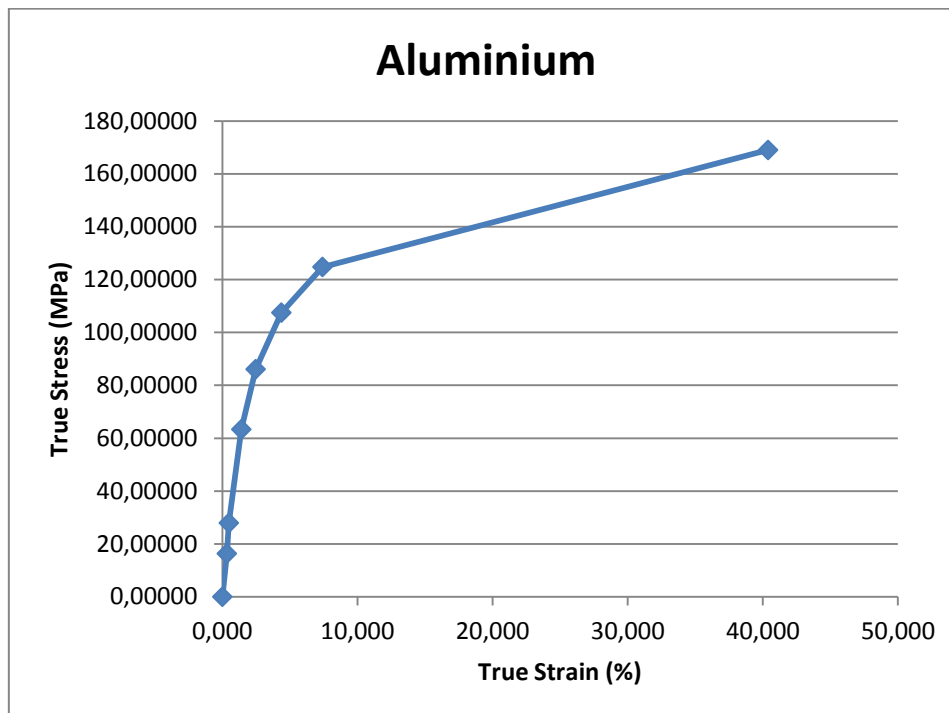
Οι ιδιότητες των πεπερασμένων στοιχείων, αφορούν στο είδος των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν. Ανάλογα με το είδος των στοιχείων, μεταβάλλονται οι διάφορες παράμετροι της επίλυσης των μοντέλων. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις διαφορές επίλυσης των πεπερασμένων στοιχείων, ο αναγνώστης παραπέμπεται στην πηγή [4]. Για τα μοντέλα που επιλύθηκαν στα πλαίσια της εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν στερεά οκτακομβικά πεπερασμένα στοιχεία πλήρους ολοκλήρωσης, γνωστά και ως brick elements.

Για να ληφθούν τα ακριβέστερα δυνατά αποτελέσματα από τα μοντέλα, επιλέχθηκαν τα υλικά της μήτρας και του εμβόλου να είναι άκαμπτα. Με τον τρόπο αυτό τα αποτελέσματα που λήφθηκαν μετά την επίλυση για κάθε μοντέλο, αντιπροσώπευαν τις τάσεις που απαιτήθηκαν μόνο για την κατεργασία του δοκιμίου. Η συγκεκριμένη παραδοχή δεν υπερβαίνει τη φύση του πειράματος, αφού και στην πράξη τα υλικά των εργαλείων είναι σκληρυμένα, ώστε να μην απορροφούν μεγάλο ποσοστό της δοθείσας, από τη μηχανή, ισχύος, και το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής να καταλήγει στο κατεργαζόμενο δοκίμιο.

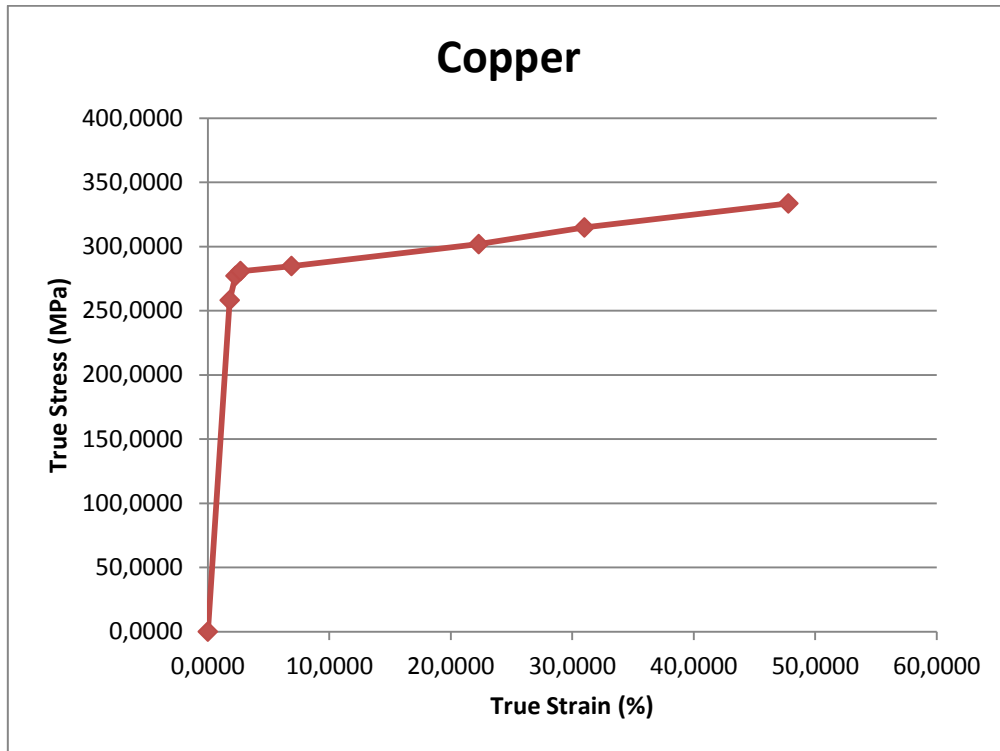
Από την άλλη μεριά, τα υλικά των δοκιμίων βασίστηκαν στα πραγματικά υλικά του πειράματος. Επειδή στο πρόγραμμα είναι δυνατή η εισαγωγή έως οκτώ (8) σημείων από την καμπύλη των τάσεων – παραμορφώσεων κάθε υλικού, έγινε επιλογή των οκτώ σημείων που αντιπροσώπευαν καλύτερα κάθε καμπύλη. Τελικά, οι καμπύλες που χρησιμοποιήθηκαν, με τα αντίστοιχα σημεία παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Προσεγγιστικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων χάλυβα



Προσεγγιστικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων αλουμινίου



Προσεγγιστικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων χαλκού

3.3.1 Ορισμός υλικών

Όπως προαναφέρθηκε για τα εργαλεία χρησιμοποιήθηκε άκαμπτο υλικό (Rigid), το οποίο εισάχθηκε στο μοντέλο από τις εξής εντολές:

- Άκαμπτο υλικό (Rigid) για τη μήτρα:
 - *Material* → *Create* → *Structural...* → *20.1.*MAT_RIGID* → *1.1* → *MID/MATERIAL ID = 1* → *RO/MASS DENSITY = 0.00785* → *E/YOUNG'S MODULUS = 207000* → *PR/POISSON'S RATIO = 0.3* → *2.1* → *CMO/CENTER OF MASS CONSTRAINT = 1* → *Apply* → *CON1/FIRST CONSTRAINT PARAMETER = 7* → *CON2/SECOND CONSTRAINT PARAMETER = 7* → *Apply* → *CON1/FIRST CONSTRAINT PARAMETER = 7* → *OK*
- Άκαμπτο υλικό (Rigid) για το έμβολο:
 - *Material* → *Create* → *Structural...* → *20.1.*MAT_RIGID* → *1.1* → *MID/MATERIAL ID = 5* → *RO/MASS DENSITY = 0.00785* → *E/YOUNG'S MODULUS = 207000* → *PR/POISSON'S RATIO = 0.3* → *2.1* → *CMO/CENTER OF MASS CONSTRAINT = 1* → *Apply* →

CON1/FIRST CONSTRAINT PARAMETER = 4 → CON2/SECOND CONSTRAINT PARAMETER = 7 → Apply CON1/FIRST CONSTRAINT PARAMETER = 7 → OK

- Ορισμός υλικού στη μήτρα:
 - *Material → Assign → 1 M-1 → Επιλογή του τεμαχίου Matrix → Apply*
- Ορισμός υλικού στο έμβολο:
 - *Material → Assign → 5 M-5 → Επιλογή του τεμαχίου Plate → Apply*

Για τα υλικά των δοκιμίων αντίθετα, επιλέχθηκε υλικό που να μπορεί να παραμορφωθεί πλαστικά (Piecewise linear plasticity). Στο πρόγραμμα εισάχθηκαν οι ακόλουθες εντολές:

- Ορισμός υλικού για το χαλύβδινο περίβλημα:
 - *Material → Create → Structural... → 24.1.*MAT_PIECEWISE LINEAR_PLASTICITY → 1.1 → MID/MATERIAL ID = 2 → RO/MASS DENSITY = 0.00785 → E/YOUNG'S MODULUS = 135115.373 → PR/POISSON'S RATIO = 0.3 → SIGY/YIELD STRESS = 270 → 3.1 → EPS1 = 0 → EPS2 = 0.3205131 → EPS3 = 2.552706 → EPS4 = 2.689443 → EPS5 = 2.826368 → EPS6 = 3.239097 → EPS7 = 3.652707 → EPS8 = 11.30254 → 4.1 → ES1 = 0 → ES2 = 0.3331418 → ES3 = 349.7755 → ES4 = 344.2696 → ES5 = 341.1403 → ES6 = 337.8233 → ES7 = 331.7421 → ES8 = 480.1645 → Apply → OK*
- Ορισμός υλικού για το αλουμινένιο επίστρωμα:
 - *Material → Create → Structural... → 24.1.*MAT_PIECEWISE LINEAR_PLASTICITY → 1.1 → MID/MATERIAL ID = 3 → RO/MASS DENSITY = 0.0027 → E/YOUNG'S MODULUS = 54068.90157 → PR/POISSON'S RATIO = 0.33 → SIGY/YIELD STRESS = 63.7 → 3.1 → EPS1 = 0 → EPS2 = 0.3321124 → EPS3 = 0.4818901 → EPS4 = 1.404501 → EPS5 = 2.465698 → EPS6 = 4.367767 → EPS7 = 7.410082 → EPS8 = 40.39248 → 4.1 → ES1 = 0 → ES2 = 16.34238 → ES3 = 27.92645 → ES4 = 63.33479 → ES5 = 86.07416 → ES6 = 107.4771 → ES7 = 124.7579 → ES8 = 168.9998 → Apply → OK*

- Ορισμός υλικού για το χάλκινο επίστρωμα:
 - *Material* → *Create* → *Structural...* → *24.1.*MAT_PIECEWISE LINEAR_PLASTICITY* → *1.1* → *MID/MATERIAL ID = 4* → *RO/MASS DENSITY = 0.0089* → *E/YOUNG'S MODULUS = 130230.8496* → *PR/POISSON'S RATIO = 0.36* → *SIGY/YIELD STRESS = 264* → *3.1* → *EPS1 = 0* → *EPS2 = 1.80316* → *EPS3 = 2.279109* → *EPS4 = 2.68917* → *EPS5 = 6.885359* → *EPS6 = 22.29811* → *EPS7 = 30.99777* → *EPS8 = 47.78369* → *4.1* → *ES1 = 0* → *ES2 = 258.1136* → *ES3 = 277.0827* → *ES4 = 280.8290* → *ES5 = 284.7455* → *ES6 = 301.8096* → *ES7 = 314.7695* → *ES8 = 333.4857* → *Apply* → *OK*
- Ανάθεση υλικού στο εξωτερικό περίβλημα:
 - *Material* → *Assign* → *2 M-2* → *Επιλογή του τεμαχίου Outer* → *Apply*
- Ανάθεση υλικού στο ενδιάμεσο επίστρωμα:
 - *Για τα δοκίμια #1, #2 και #3: Material* → *Assign* → *4 M-4* → *Επιλογή του τεμαχίου Middle* → *Apply*
 - *Για τα δοκίμια #4, #5 και #6: Material* → *Assign* → *3 M-3* → *Επιλογή του τεμαχίου Middle* → *Apply*
- Ανάθεση υλικού στον πυρήνα:
 - *Για τα δοκίμια #1, #2 και #3: Material* → *Assign* → *3 M-3* → *Επιλογή του τεμαχίου Inner* → *Apply*
 - *Για τα δοκίμια #4, #5 και #6: Material* → *Assign* → *4 M-4* → *Επιλογή του τεμαχίου Inner* → *Apply*

Αξίζει να αναφερθεί ότι ο συγκεκριμένος τύπος υλικού δεν επιδέχεται το ενδεχόμενο κατάρρευσης. Εάν οι τιμές τάσεων υπερβούν αυτές που ορίστηκαν, τότε η επίλυση σταματά. Βέβαια, σε κανένα από τα δοκίμια δεν αναμένεται να συμβεί αυτό, αφού ακόμα και στο δοκίμιο #4, ο πυθμένας σχεδιάστηκε με πάχος 2 mm, όσο δηλαδή έπρεπε να είναι και στο πείραμα. Βέβαια, αυτό επηρέασε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συγκεκριμένου μοντέλου. Έτσι, για να μην υπάρξει ασυμφωνία μεταξύ αυτών και των πειραματικών αποτελεσμάτων, η αλλαγή αυτή αναιρέθηκε από την κατάλληλη αντιστάθμιση των συντελεστών τριβής στο μοντέλο. Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστη παραπέμπεται στην ενότητα 3.4.2.

3.3.2 Ορισμός είδους πεπερασμένων στοιχείων

Για τον ορισμό του είδους των πεπερασμένων στοιχείων που θα είχε το μοντέλο, εισάχθηκαν στο LS – DYNA οι παρακάτω εντολές:

- Ορισμός είδους πεπερασμένων στοιχείων:
 - *Property* → *Create* → *Solids* → *1.1* → *SECID/Section ID = 1* → *ELFORM/ELEMENT FORMULATION = 2* → *Apply* → *OK*
- Ανάθεση είδους πεπερασμένων στοιχείων στα τεμάχια:
 - *Property* → *Assign* → *1 P-1* → *Επιλογή όλων των τεμαχίων (Matrix, Outer, Middle, Inner, Plate)* → *Apply*

Στο στάδιο αυτό τα μοντέλα ήταν ολοκληρωμένα από άποψη ιδιοτήτων. Μπορούσε να γίνει πλέον ο ορισμός των συνθηκών επαφής μεταξύ των διαφόρων τεμαχίων.

3.4 Συνθήκες Επαφής

Εφόσον έγινε η πλήρης κατασκευή των μοντέλων, έπρεπε να οριστούν συνθήκες επαφής μεταξύ των διαφόρων κομματιών αυτού. Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η μεταφορά της εικονικής ισχύος από το ένα τεμάχιο στο άλλο, δηλαδή από το έμβολο στο δοκίμιο, κατά την επίλυση του μοντέλου. Επίσης, χάρη στην επαφή μεταξύ του δοκιμίου και της μήτρας κατέστη δυνατή η προσομοίωση της διέλασης. Εύκολα συμπεραίνει κανείς, λοιπόν, ότι ο ορισμός των επαφών μεταξύ των διαφόρων μερών του μοντέλου, είναι η καρδιά της προσομοίωσης της κατεργασίας.

Στο LS – DYNA, οι πιο συνηθισμένες τύποι επαφής μεταξύ στερεών είναι οι εξής:

- Επαφή *επιφάνειας* του ενός τεμαχίου με την *επιφάνεια* του άλλου (Surface to surface).
- Επαφή των *κόμβων* μιας επιφάνειας με την *επιφάνεια* του άλλου (Nodes to surface).

Κατά την επίλυση των μοντέλων, η εύρεση του σωστού τρόπου επαφής μεταξύ των διαφόρων μερών των μοντέλων ήταν ένα από τα πιο δύσκολα μέρη. Έτσι, μετά από πολλές δοκιμές, προσδιορίστηκαν οι παρακάτω τύποι επαφής:

Επαφή \ Τύπος επαφής	Κόμβοι με επιφάνεια	Επιφάνεια με επιφάνεια
Μήτρα – Εξωτερικό περίβλημα	✓	
Εξωτερικό περίβλημα – Ενδιάμεσο επίστρωμα		✓
Ενδιάμεσο επίστρωμα – Πυρήνας		✓
Εξωτερικό περίβλημα – Πυρήνας		✓
Άνω επιφάνεια δοκιμίου – Έμβολο		✓
(Δοκίμια #4 και #6) Τμήμα εξόδου μήτρας – Εξωτερικό περίβλημα	✓	

Από τον πίνακα αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι στην επαφή του δοκιμίου με το έμβολο, μέρος παίρνει ολόκληρη η άνω επιφάνεια του δοκιμίου, δηλαδή οι άνω επιφάνειες και από τα τρία υλικά.

Από τα παραπάνω γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η δημιουργία μιας επαφής στο LS – DYNA περιλαμβάνει δύο στάδια. Έτσι, σε πρώτο στάδιο πρέπει να οριστούν οι επιφάνειες ή οι κόμβοι που θα λάβουν μέρος σε μια επαφή. Σε δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται ο ορισμός κάθε επαφής στο μοντέλο. Στις υποενότητες που ακολουθούν περιγράφονται λεπτομερώς τα δύο αυτά στάδια της μοντελοποίησης.

3.4.1 Ορισμός επιφανειών και κόμβων

Προτού γίνει δυνατός ο ορισμός των επαφών, έπρεπε να οριστούν οι επιφάνειες και οι κόμβοι που θα λάβουν μέρος στις επαφές αυτές.

Για τον ορισμό των κόμβων εισήχθησαν οι παρακάτω εντολές:

- Ορισμός κόμβων εξωτερικού περιβλήματος:
 - *Set* → *Node* → *Create* → *Εισαγωγή ονόματος (Outer) και ID (4)* → *OK* → *Επιλογή της εξωτερική συστάδας κόμβων του εξωτερικού περιβλήματος (περιφερειακοί κόμβοι και κάτω κόμβοι πυθμένα)* → *Apply*

Με τον τρόπο αυτό ορίστηκε η ομάδα των κόμβων που μπορούσε να λάβει μέρος στις διάφορες επαφές. Στη συνέχεια, ακολουθούν οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για τον ορισμό των επιφανειών που έλαβαν μέρος στις επαφές του LS – DYNA:

- Ορισμός επιφάνειας μήτρας:
 - *Set* → *Segment* → *Create* → *Εισαγωγή ονόματος (Matrix) και ID (1)* → *By elements* → *Επιλογή της εσωτερικής επιφάνειας της μήτρας* → *Apply* → *End*
- Ορισμός εσωτερικής επιφάνειας εξωτερικού περιβλήματος:
 - *Set* → *Segment* → *Create* → *Εισαγωγή ονόματος (Outer-Middle/Inner) και ID (2)* → *By elements* → *Επιλογή της εσωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού περιβλήματος (τμήματα περιφέρειας και άνω επιφάνεια πυθμένα)* → *Apply* → *End*
- Ορισμός εξωτερικής επιφάνειας ενδιάμεσου επιστρώματος:
 - *Set* → *Segment* → *Create* → *Εισαγωγή ονόματος (Middle-Outer) και ID (3)* → *By elements* → *Επιλογή της εξωτερικής επιφάνειας του ενδιάμεσου περιβλήματος (τμήματα περιφέρειας και κάτω επιφάνεια επιστρώματος)* → *Apply* → *End*
- Ορισμός εσωτερικής επιφάνειας ενδιάμεσου επιστρώματος:
 - *Set* → *Segment* → *Create* → *Εισαγωγή ονόματος (Middle-Inner) και ID (4)* → *By elements* → *Επιλογή της εσωτερικής επιφάνειας του*

ενδιάμεσου περιβλήματος (τμήματα περιφέρειας και κάτω επιφάνεια επιστρώματος) → Apply → End

- Ορισμός επιφάνειας πυρήνα:
 - Set → Segment → Create → Εισαγωγή ονόματος (Inner-Middle/Outer) και ID (5) → By elements → Επιλογή της εξωτερικής επιφάνειας του πυρήνα (τμήματα περιφέρειας και κάτω επιφάνεια πυρήνα) → Apply → End
- Ορισμός άνω επιφάνειας δοκιμίου:
 - Set → Segment → Create → Εισαγωγή ονόματος (Item) και ID (6) → By elements → Επιλογή της άνω επιφάνειας του δοκιμίου (και τα τρία υλικά) → Apply → End
- Ορισμός επιφάνειας εμβόλου:
 - Set → Segment → Create → Εισαγωγή ονόματος (Plate) και ID (7) → By elements → Επιλογή της κάτω επιφάνειας του εμβόλου → Apply → End
- (Μόνο για τα δοκίμια #4 και #6) Ορισμός επιφάνειας τμήματος εξόδου μήτρας:
 - Set → Segment → Create → Εισαγωγή ονόματος (Matrix Down) και ID (8) → By elements → Επιλογή της περιφερειακής επιφάνειας του τμήματος εξόδου → Apply → End

Έτσι, ορίστηκαν όλες οι απαραίτητες επιφάνειες και κόμβοι, ώστε να μπορούν να οριστούν οι επαφές στο μοντέλο.

3.4.2 Δημιουργία επαφών

Οι επαφές, όπως προαναφέρθηκε, είναι η καρδιά της προσομοίωσης της κατεργασίας. Εφόσον, πλέον έχουν οριστεί πλήρως όλες οι ομάδες κόμβων και τμημάτων επιφάνειας, υπάρχει η δυνατότητα ορισμού των επαφών μεταξύ των διαφόρων μερών του μοντέλου.

Κατά τη δημιουργία μιας επαφής στο LS – DYNA, πρέπει να οριστούν τρεις παράμετροι: α) Ο τύπος επαφής, β) οι ομάδες που θα συμμετέχουν στην επαφή και γ) οι συντελεστές τριβής μεταξύ των επιφανειών αυτών. Από τα τρία αυτά στοιχεία, οι

συντελεστές τριβής ήταν το μόνο στοιχείο δεν μπορούσε να βρεθεί με ακρίβεια. Ο λόγος είναι ότι υπάρχουν περιορισμένες πηγές που να περιέχουν το συγκεκριμένο στοιχείο, και όσες από αυτές βρέθηκαν δεν περιείχαν πληροφορίες για όλα τα ζεύγη υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Έτσι, για όσα ζεύγη υλικών δεν υπήρχε το συγκεκριμένο στοιχείο, πραγματοποιήθηκε σειρά από επιλύσεις μέχρι να προσδιοριστεί με ικανοποιητική ακρίβεια ο συντελεστής τριβής. Ο λόγος που αυτό ήταν δυνατό, είναι επειδή κάθε ζεύγος επαφής επηρέαζε με διαφορετικό τρόπο τα τελικά αποτελέσματα, και άρα μεταβολή του συντελεστή τριβής διαφορετικών επαφών έφερε διακριτά αποτελέσματα. Πάντως, για την εύρεση του ακριβούς συντελεστή τριβής κάθε επαφής υπάρχει περιθώριο για περαιτέρω έρευνα.

Οι συντελεστές τριβής που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε επαφή και σε κάθε δοκίμιο παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα. Η μορφή των αποτελεσμάτων του πίνακα είναι: *συντελεστής στατικής τριβής / συντελεστής τριβής ολίσθησης*:

Επαφή\Δοκίμιο	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Matrix – Outer^[1]	0.235 / 0.184	0.265 / 0.215	0.195 / 0.145	0.12 / 0.07	0.2175 / 0.1675	0.215 / 0.165
Outer – Middle^[2]	0.53 / 0.36	0.53 / 0.36	0.53 / 0.36	0.61 / 0.47	0.61 / 0.47	0.61 / 0.47
Middle – Inner^[2]	0.57 / 0.48	0.57 / 0.48	0.57 / 0.48	0.57 / 0.48	0.57 / 0.48	0.57 / 0.48
Outer – Inner^[2]	0.61 / 0.47	0.61 / 0.47	0.61 / 0.47	0.53 / 0.36	0.53 / 0.36	0.53 / 0.36
Item – Plate^[3]	0.2705 / 0.2163	0.2774 / 0.2197	0.2852 / 0.2235	0.3028 / 0.2834	0.3351 / 0.2697	0.3723 / 0.2991
(Δοκίμια #4 και #6) Matrix Down – Outer^[1]	-	-	-	0.165 / 0.115	-	0.215 / 0.165

[1]: Λήφθηκαν μετά από διαδοχικές επιλύσεις του αντίστοιχου μοντέλου

[2]: Λήφθηκαν από τη σχετική βιβλιογραφία. Για περισσότερες πληροφορίες βλ. πηγή [2]

[3]: Λήφθηκε μετά από υπολογισμό. Η ανάλυση του υπολογισμού ακολουθεί παρακάτω

Από τις τιμές αυτού του πίνακα μπορούν να γίνουν ορισμένες παρατηρήσεις. Αρχικά, στον πίνακα σημειώνεται ότι οι τιμές των συντελεστών τριβής μεταξύ του δοκιμίου και του εμβόλου, προήλθαν από υπολογισμό. Πράγματι για την εύρεση των συγκεκριμένων τιμών, χρησιμοποιήθηκαν δύο εμπειρικοί τύποι, οι οποίοι προέκυψαν από τη γεωμετρία των δοκιμίων και τους αντίστοιχους συντελεστές τριβής μεταξύ των υλικών των δοκιμίων, όπως αυτοί λήφθηκαν από τη σχετική βιβλιογραφία^[2]. Οι τύποι αυτοί ήταν οι εξής:

$$f_s = \frac{\pi \cdot [(D_o^2 - d_o^2) \cdot f_{o,s} + (D_M^2 - d_M^2) \cdot f_{M,s} + D_I^2 \cdot f_{I,s}]}{\pi \cdot D_o^2} \quad (8)$$

και ομοίως:

$$f_d = \frac{\pi \cdot [(D_o^2 - d_o^2) \cdot f_{o,d} + (D_M^2 - d_M^2) \cdot f_{M,d} + D_I^2 \cdot f_{I,d}]}{\pi \cdot D_o^2} \quad (9)$$

όπου στους παραπάνω τύπους:

- f_s : συντελεστής στατικής τριβής
- f_d : συντελεστής τριβής ολίσθησης
- $f_{X,s}$: συντελεστής στατικής τριβής αντίστοιχου υλικού
- $f_{X,d}$: συντελεστής τριβής ολίσθησης αντίστοιχου υλικού
- D_X : εξωτερική διάμετρος υλικού
- d_X : εσωτερική διάμετρος υλικού

και με τους αντίστοιχους δείκτες να δηλώνουν:

- O: εξωτερικό περίβλημα (Outer)
- M: ενδιάμεσο επίστρωμα (Middle)
- I: πυρήνας (Inner)

Επίσης, όσον αφορά στις τιμές του δοκιμίου #4 παρατηρείται διαφορά μεταξύ των συντελεστών τριβής στις επαφές της μήτρας με το δοκίμιο, και του τμήματος εξόδου με το δοκίμιο. Ο λόγος έγκειται στο γεγονός ότι, ενώ στο πείραμα ο πυθμένας του δοκιμίου αστόχησε και τα εσωτερικά υλικά διέρρευσαν, αυτό δεν συνέβη στην προσομοίωση, αφού ο πυθμένας σχεδιάστηκε να έχει το ίδιο πάχος όπως και τα υπόλοιπα δοκίμια. Αυτή η μετατροπή πιθανώς να οδήγησε στο συγκεκριμένο αποτέλεσμα. Έτσι, η επιπλέον πίεση που υπήρξε μεταξύ των τοιχωμάτων του τμήματος εξόδου και του δοκιμίου, λόγω της διαρροής των υλικών αυτών στο πείραμα, δεν μπορούσε να υπάρξει στην προσομοίωση. Για να είναι δυνατή λοιπόν η προσομοίωση αυτής της μεγαλύτερης πίεσης, πραγματοποιήθηκε αύξηση του

συντελεστή τριβής στην επαφή με το τμήμα εξόδου. Η συγκεκριμένη μετατροπή δεν απαιτήθηκε για το δοκίμιο #6, όπου ο πυθμένας του δοκιμίου δεν αστόχησε.

Προτού παρατεθούν οι εντολές που εισήχθησαν για τη δημιουργία των επαφών, πρέπει να επεξηγηθεί ο τρόπος που το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται τις επαφές. Οι δύο ομάδες που λαμβάνουν μέρος στην εκάστοτε επαφή, χωρίζονται στην ομάδα – αφέντη (Master) και στην ομάδα – υπηρέτη (Slave). Η φύση των ομάδων αυτών είναι τέτοια, ώστε η οποιαδήποτε ενέργεια να επιβάλλεται από την ομάδα – αφέντη στην ομάδα – υπηρέτη. Για το λόγο αυτό συνήθως η διαλογή των ομάδων σε αφέντη και υπηρέτη γίνεται με βάση ένα χαρακτηριστικό τους, σχετικό πάντα με τη φύση της κατεργασίας. Στα μοντέλα που έγιναν, προκρίθηκαν σε αφέντες οι ομάδες εκείνες που προέρχονταν από το πιο άκαμπτο υλικό. Έτσι, οι ομάδες της μήτρας και του εμβόλου ήταν πάντα αφέντες στις αντίστοιχες επαφές που δημιουργήθηκαν. Στις επαφές μεταξύ των μερών του δοκιμίου η σειρά διαλογή των ομάδων – αφεντών ήταν βάσει πάλι της δυσκαμψίας του υλικού, δηλαδή πρώτα οι ομάδες του χαλύβδινου περιβλήματος και μετά οι ομάδες του χάλκινου μέρους. Οι ομάδες του αλουμινένιου μέρους ήταν πάντα ομάδες – υπηρέτες.

Μετά και από τον προσδιορισμό των συντελεστών τριβής κάθε επαφής, μπορούσε πλέον να γίνει η δημιουργία των επαφών. Οι εντολές που εισήχθησαν στο LS – DYNA, ήταν οι ακόλουθες:

- Δημιουργία επαφής μήτρας – εξωτερικού περιβλήματος:
 - *Contact* → *Create* → *3 Dimension...* → **CONACT_NODES_TO_SURFACE* → *Εισαγωγή ονόματος (Ma-O)* και *ID (1)* → *OK* → *Next* → *2.1* → *MSTYP/MASTER TYPE = 0* → *SSTYP/SLAVE TYPE = 4* → *MSID/MASTER ID = 1* → *SSID/SLAVE ID = 4* → *3.1* → *FS = (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο)* → *FD = (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο)* → *Apply (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο)* → *OK*
- Δημιουργία επαφής εξωτερικού περιβλήματος – ενδιάμεσου επιστρώματος:
 - *Contact* → *Create* → *3 Dimension...* → **CONACT_SURFACE_TO_SURFACE* → *Εισαγωγή ονόματος (O-M)* και *ID (2)* → *OK* → *Next* → *2.1* → *MSTYP/MASTER TYPE = 0* → *SSTYP/SLAVE TYPE = 0* → *MSID/MASTER ID = 2* → *SSID/SLAVE*

$ID = 3 \rightarrow 3.1 \rightarrow FS =$ (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο) $\rightarrow FD =$ (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο) $\rightarrow Apply$ (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο) $\rightarrow OK$

- Δημιουργία επαφής ενδιάμεσου επιστρώματος – πυρήνα:
 - *Contact* \rightarrow *Create* \rightarrow *3 Dimension...* \rightarrow **CONACT_SURFACE_TO_SURFACE* \rightarrow Εισαγωγή ονόματος (M-I) και *ID (3)* $\rightarrow OK$ \rightarrow *Next* \rightarrow *2.1* \rightarrow *MSTYP/MASTER TYPE = 0* \rightarrow *SSTYP/SLAVE TYPE = 0* \rightarrow *MSID/MASTER ID = 4* ή *5* \rightarrow *SSID/SLAVE ID = 4* ή *5* \rightarrow *3.1* $\rightarrow FS =$ (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο) $\rightarrow FD =$ (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο) $\rightarrow Apply$ (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο) $\rightarrow OK$
- Δημιουργία επαφής εξωτερικού περιβλήματος – πυρήνα:
 - *Contact* \rightarrow *Create* \rightarrow *3 Dimension...* \rightarrow **CONACT_SURFACE_TO_SURFACE* \rightarrow Εισαγωγή ονόματος (O-I) και *ID (4)* $\rightarrow OK$ \rightarrow *Next* \rightarrow *2.1* \rightarrow *MSTYP/MASTER TYPE = 0* \rightarrow *SSTYP/SLAVE TYPE = 0* \rightarrow *MSID/MASTER ID = 2* \rightarrow *SSID/SLAVE ID = 5* \rightarrow *3.1* $\rightarrow FS =$ (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο) $\rightarrow FD =$ (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο) $\rightarrow Apply$ (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο) $\rightarrow OK$
- Δημιουργία επαφής δοκιμίου – εμβόλου:
 - *Contact* \rightarrow *Create* \rightarrow *3 Dimension...* \rightarrow **CONACT_SURFACE_TO_SURFACE* \rightarrow Εισαγωγή ονόματος (It-Pl) και *ID (5)* $\rightarrow OK$ \rightarrow *Next* \rightarrow *2.1* \rightarrow *MSTYP/MASTER TYPE = 0* \rightarrow *SSTYP/SLAVE TYPE = 0* \rightarrow *MSID/MASTER ID = 7* \rightarrow *SSID/SLAVE ID = 6* \rightarrow *3.1* $\rightarrow FS =$ (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο) $\rightarrow FD =$ (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο) $\rightarrow Apply$ (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο) $\rightarrow OK$

- (Για τα δοκίμια #4 και #6) Δημιουργία επαφής τμήματος εξόδου – εξωτερικού περιβλήματος:
 - *Contact* → *Create* → *3 Dimension...* → **CONACT_NODES_TO_SURFACE* → *Εισαγωγή ονόματος (MaD-O)* και *ID (6)* → *OK* → *Next* → *2.1* → *MSTYP/MASTER TYPE = 0* → *SSTYP/SLAVE TYPE = 4* → *MSID/MASTER ID = 8* → *SSID/SLAVE ID = 4* → *3.1* → *FS = (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο)* → *FD = (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο)* → *Apply (Αντίστοιχη τιμή από τον παραπάνω πίνακα για κάθε δοκίμιο)* → *OK*

Αξίζει να αναφερθεί ότι, στην επαφή μεταξύ του ενδιάμεσου επιστρώματος και του πυρήνα, οι ομάδες αφέντης και υπηρέτης εναλλάσσονται μεταξύ τους στα διάφορα μοντέλα, έτσι ώστε η ομάδα του χάλκινου μέρους να είναι πάντα ομάδα – αφέντης.

Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι μεταξύ της μήτρας και του εμβόλου δεν δημιουργήθηκε επαφή, αφού και στην πειραματική διάταξη, το ένα τεμάχιο κινούνταν ελεύθερα ως προς το άλλο, και άρα και η τριβή ήταν μειωμένη μεταξύ τους.

Μετά και τη δημιουργία επαφών, τα μοντέλα είναι σχεδόν έτοιμα. Το μόνο που απομένει είναι ο ορισμός των οριακών συνθηκών και των στοιχείων ελέγχου.

3.5 Στοιχεία ελέγχου και οριακές συνθήκες

Τα μοντέλα που περιγράφηκαν μέχρι αυτό το σημείο, σχεδιάστηκαν κατά το ένα τέταρτο των πειραματικών μοντέλων. Έτσι, για να είναι δυνατή η επίλυση τους πρέπει να οριστούν οριακές συνθήκες. Επίσης, στα πλαίσια των οριακών συνθηκών πρέπει να οριστεί και η ταχύτητα καθόδου του εμβόλου. Τέλος, για να μπορέσει να γίνει η επίλυση των μοντέλων έπρεπε να οριστούν ορισμένα στοιχεία ελέγχου, όπως ο χρόνος της κατεργασίας και μερικοί άλλοι παράγοντες που είχαν σχέση με τα εξαγόμενα αποτελέσματα του προγράμματος.

3.5.1 Οριακές συνθήκες

Για τον ορισμό των οριακών συνθηκών, έπρεπε αρχικά να οριστούν οι ομάδες εκείνες των κόμβων του δοκιμίου, πάνω στις οποίες θα επιβάλλονταν οι συγκεκριμένοι περιορισμοί. Βάσει του σχεδιασμού που είχε προηγηθεί, ως επίπεδα συμμετρίας είχαν επιλεγεί τα επίπεδα XZ και YZ. Έτσι, έπρεπε οριστούν τρεις ομάδες κόμβων: α) οι κόμβοι του XZ, β) οι κόμβοι του YZ και γ) οι κόμβοι εκεί που συναντιόνταν τα επίπεδα XZ και YZ (οι κεντρικοί κόμβοι του δοκιμίου). Ο ορισμός των παραπάνω ομάδων κόμβων έγινε με τις ακόλουθες εντολές:

- Ορισμός ομάδας κόμβων επιπέδου XZ:
 - *Set* → *Node* → *Create* → *Εισαγωγή ονόματος (XZ) και ID (1)* → *OK*
→ *Επιλογή των κόμβων του δοκιμίου που είναι στο επίπεδο XZ, πλην των κεντρικών κόμβων (και από τα τρία υλικά του δοκιμίου)* → *Apply*
- Ορισμός ομάδας κόμβων επιπέδου YZ:
 - *Set* → *Node* → *Create* → *Εισαγωγή ονόματος (YZ) και ID (2)* → *OK*
→ *Επιλογή των κόμβων του δοκιμίου που είναι στο επίπεδο YZ, πλην των κεντρικών κόμβων (και από τα τρία υλικά του δοκιμίου)* → *Apply*
- Ορισμός ομάδας κόμβων στο κέντρο του δοκιμίου:
 - *Set* → *Node* → *Create* → *Εισαγωγή ονόματος (Cntr) και ID (3)* → *OK*
→ *Επιλογή των κεντρικών κόμβων του δοκιμίου (και από τα τρία υλικά του δοκιμίου)* → *Apply*

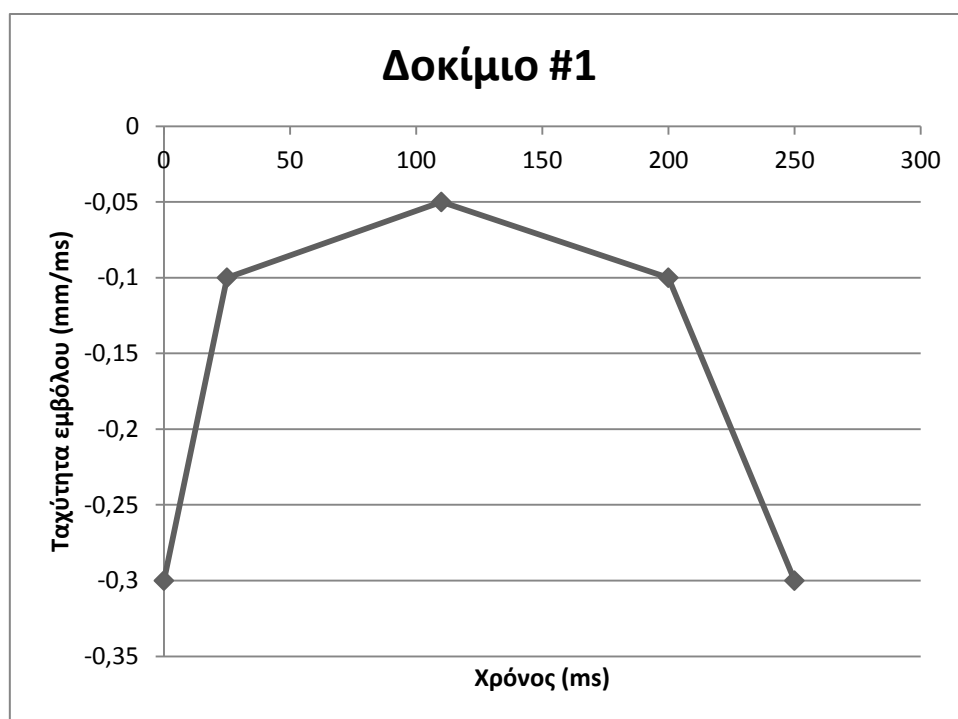
Αφού ορίστηκαν και οι τρεις απαιτούμενες ομάδες κόμβων, έπρεπε να οριστούν οι οριακές συνθήκες. Αυτό πραγματοποιήθηκε με τις παρακάτω εντολές:

- Ορισμός οριακών συνθηκών για το επίπεδο XZ:
 - *BC* → *BOUNDARY* → *SPC* → *Create* → *Node Set* → *XZ* → *1.1* → *ID*
= *1* → *2.1* → *DOFX = 0* → *DOFY = 1* → *DOFZ = 0* → *DOFRX = 1*
→ *DOFRY = 0* → *DOFRZ = 1* → *Apply* → *OK*
- Ορισμός οριακών συνθηκών για το επίπεδο YZ:
 - *BC* → *BOUNDARY* → *SPC* → *Create* → *Node Set* → *YZ* → *1.1* → *ID*
= *2* → *2.1* → *DOFX = 1* → *DOFY = 0* → *DOFZ = 0* → *DOFRX = 0*
→ *DOFRY = 1* → *DOFRZ = 1* → *Apply* → *OK*

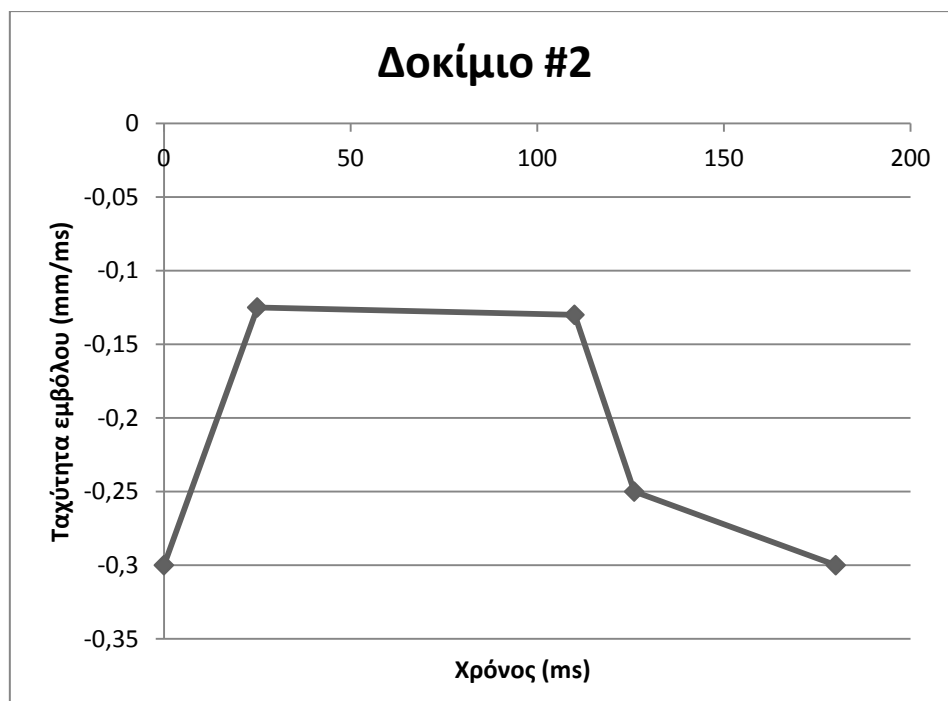
- Ορισμός οριακών συνθηκών για τους κεντρικούς κόμβους:
 - $BC \rightarrow BOUNDARY \rightarrow SPC \rightarrow Create \rightarrow Node Set \rightarrow XZ \rightarrow 1.1 \rightarrow ID$
 $= 3 \rightarrow 2.1 \rightarrow DOFX = 1 \rightarrow DOFY = 1 \rightarrow DOFZ = 0 \rightarrow DOFRX = 0$
 $\rightarrow DOFRY = 0 \rightarrow DOFRZ = 1 \rightarrow Apply \rightarrow OK$

Για να είναι δυνατός ορισμός της ταχύτητας του εμβόλου, έπρεπε πρώτα να οριστεί το προφίλ αυτής της ταχύτητας. Το προφίλ της ταχύτητας του εμβόλου στην πειραματική διάταξη γενικά δεν ήταν σταθερό. Έτσι, αν και η ταχύτητα καθόδου του εμβόλου ήταν σταθερά ρυθμισμένη σε 0,3 mm/s, παρόλα αυτά η ταχύτητα καθόδου του εμβόλου δεν παρέμεινε αυτή. Μια πιθανή εξήγηση είναι ότι επειδή η πρέσσα του εργαστηρίου είναι υδραυλικής ισχύος, η μετάδοση της ισχύος αυτής δεν είναι πάντα 1:1 στο έμβολο. Επειδή λοιπόν, ο ακριβής προσδιορισμός του προφίλ ταχύτητας του εμβόλου ήταν αδύνατος στα πλαίσια του πειράματος, έπρεπε να χρησιμοποιηθεί και πάλι η μέθοδος δοκιμής – λάθους στα μοντέλα, ώστε να προσδιοριστεί ένα ικανοποιητικό τέτοιο προφίλ. Και στη περίπτωση αυτή ο τομέας του προσδιορισμού του προφίλ ταχύτητας του εμβόλου επιδέχεται περαιτέρω έρευνα.

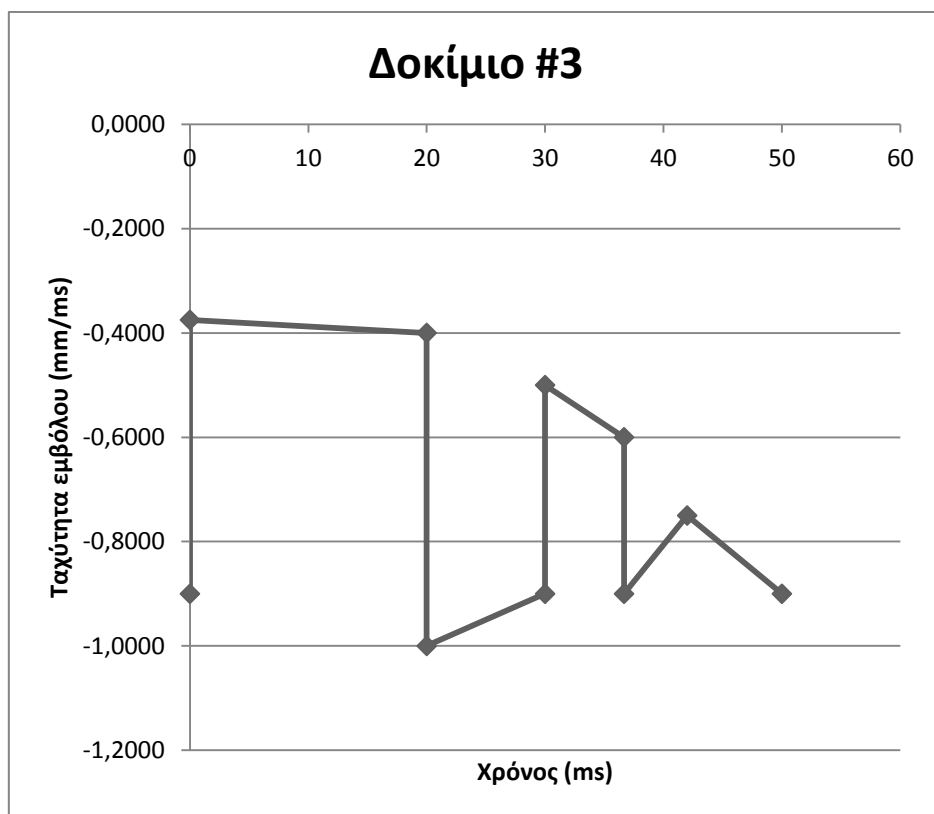
Μετά από διαδοχικές δοκιμές, προέκυψαν διαφορετικά προφίλ ταχύτητας για κάθε μοντέλο. Ο άξονας αναφοράς των συγκεκριμένων προφίλ ήταν ο χρόνος στον οποίο πραγματοποιήθηκε η μετατόπιση του εμβόλου. Οι τιμές της ταχύτητας του διαγράμματος ταχύτητας – χρόνου του εμβόλου ήταν αρνητικές, αφού η επιθυμητή μετατόπιση του εμβόλου στο μοντέλο, ήταν προς τα αρνητικά του άξονα των Z. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα προφίλ των ταχυτήτων που εισήχθησαν σε κάθε μοντέλο.



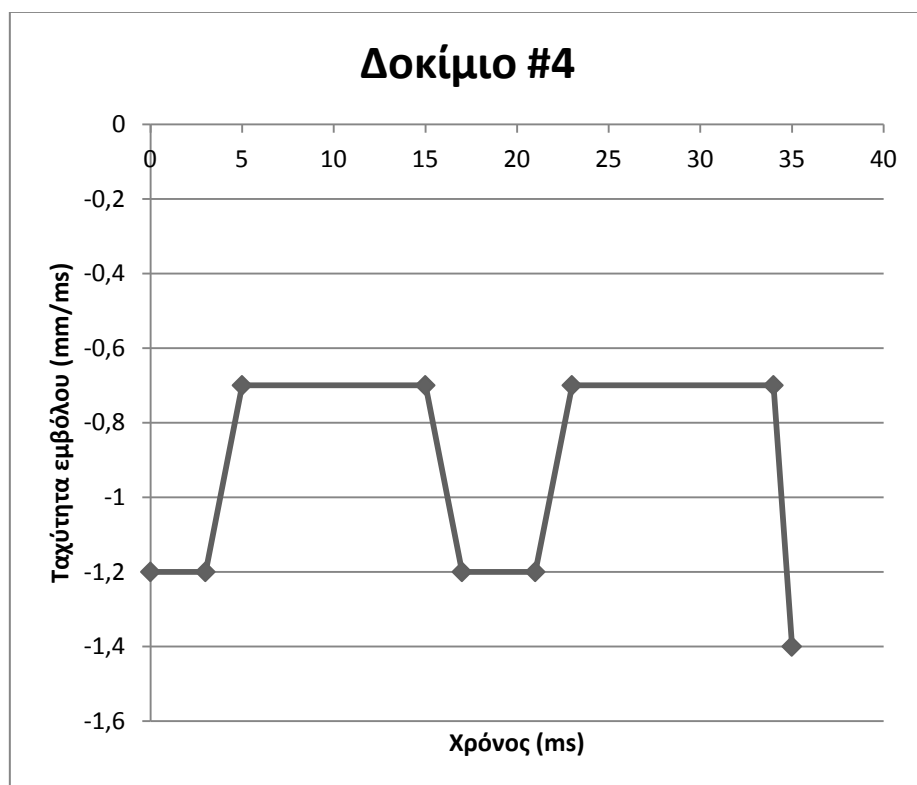
Προφίλ ταχύτητας εμβόλου για το μοντέλου του δοκιμίου #1



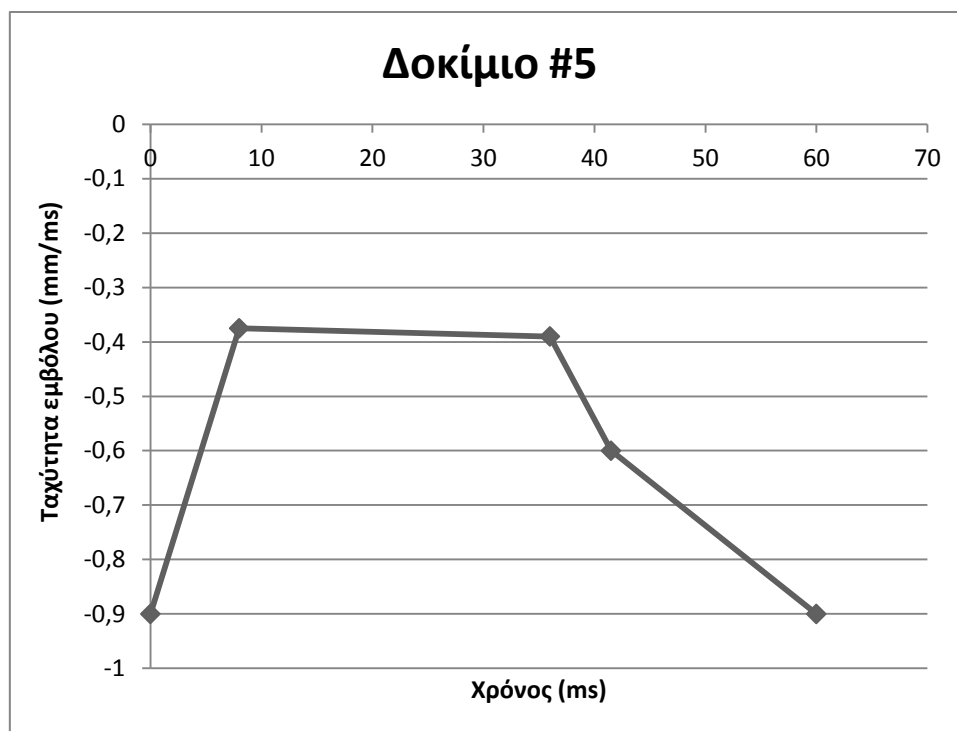
Προφίλ ταχύτητας εμβόλου για το μοντέλου του δοκιμίου #2



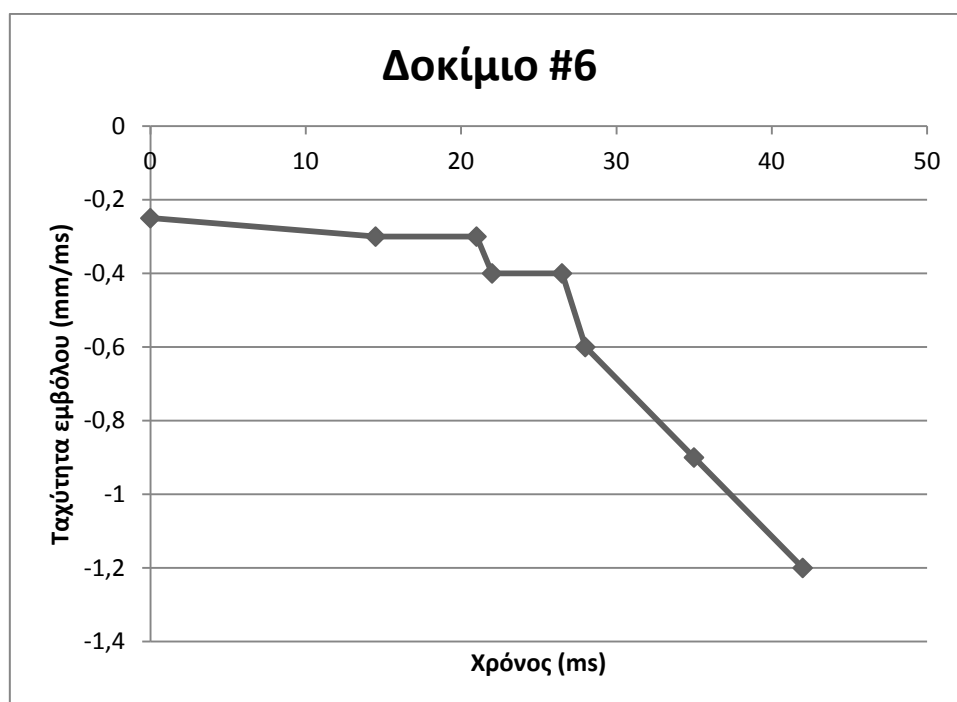
Προφίλ ταχύτητας εμβόλου για το μοντέλο του δοκιμίου #3



Προφίλ ταχύτητας εμβόλου για το μοντέλο του δοκιμίου #4



Προφίλ ταχύτητας εμβόλου για το μοντέλου του δοκιμίου #5



Προφίλ ταχύτητας εμβόλου για το μοντέλου του δοκιμίου #6

Από τα προφίλ παρατηρείται ότι γενικά οι τιμές δεν έχουν την ίδια τάξη μεγέθους σε όλα τα δοκίμια. Αυτό το γεγονός οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο

έγιναν οι διάφορες δοκιμές. Έτσι, ενώ στα αρχικά δοκίμια οι δοκιμές έγιναν με μικρές τιμές ταχύτητας σε μεγάλο χρονικό διάστημα, σταδιακά οι τιμές της ταχύτητας αυξάνονταν και το χρονικό διάστημα μειωνόταν. Με τον τρόπο αυτό η επίλυση ήταν πιο σύντομη, ενώ τα αποτελέσματα μπορούσαν, κατόπιν κατάλληλης τροποποίηση τους, να έχουν την ίδια μορφή με τα πειραματικά, χωρίς κανένα πρόβλημα. Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης παραπέμπεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο της σύγκρισης των αποτελεσμάτων (Κεφάλαιο 5).

Επίσης, από τα διαγράμματα φαίνεται ότι ο χρόνος μετράται σε ms. Αυτό γενικά δεν ανταποκρίνεται στις μονάδες χρόνου του πειράματος. Παρόλα αυτά η επίδρασή του εξαλείφεται από το γεγονός ότι οι μονάδες της ταχύτητας του εμβόλου είναι σε mm/ms.

Τέλος, στα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν φαίνονται τα σημεία τα οποία εισήχθησαν και στα μοντέλα, και άρα η αναφορά τους δεν θα πραγματοποιηθεί ξανά, κατά την παράθεση των εντολών του προγράμματος.

Οι εντολές που απαιτήθηκαν για να οριστούν οι καμπύλες ταχυτήτων ήταν οι εξής:

- Ορισμός καμπύλης ταχύτητας του εμβόλου:
 - *DynaMisc* → *Load Curve* → *Create* → *Εισαγωγή ονόματος (LCur_1)* → *OK* → *OK* → *Insert* → *Key-In* → *Εισαγωγή ενός ζεύγους τιμών* → *OK* → *Insert* → ... → *OK* → *OK*

Εφόσον ορίστηκε και η καμπύλη ταχύτητας του εμβόλου σε κάθε μοντέλο, πρέπει να τεθεί στο αντίστοιχο τεμάχιο του μοντέλου. Αυτό πραγματοποιείται με τις ακόλουθες εντολές:

- Ορισμός καμπύλης ταχύτητας στο έμβολο:
 - *BC* → *BOUNDARY* → *PRESCRIBED MOTION* → *Create* → *Rigid* → *2.1* → *PID/PART ID (RIGID BODY) = 5* → *DOF/DEGREE OF FREEDOM = 3* → *LCID/LOAD CURVE FOR MOTION = 1* → *Apply* → *OK*

Με τον τρόπο αυτό ολοκληρώθηκε η εισαγωγή των οριακών συνθηκών. Το μόνο που απομένει, ώστε να είναι δυνατή η επίλυση του μοντέλου, είναι ο ορισμός των στοιχείων ελέγχου κάθε μοντέλου.

3.5.2 Στοιχεία ελέγχου

Το πρώτο στοιχείο ελέγχου του μοντέλου που πρέπει να εισαχθεί είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο θα ολοκληρωθεί η προσομοίωση. Όπως προαναφέρθηκε ο συγκεκριμένος παράγοντας καθορίστηκε μετά από δοκιμές, από την καμπύλη του προφίλ της ταχύτητας του εμβόλου. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα χρονικά διαστήματα επίλυσης για κάθε μοντέλο:

	Δοκίμιο #1	Δοκίμιο #2	Δοκίμιο #3	Δοκίμιο #4	Δοκίμιο #5	Δοκίμιο #6
Χρόνος (ms)	250	180	56	35	60	42

Ο ορισμός του χρονικού διαστήματος επίλυσης στο μοντέλο, πραγματοποιήθηκε με τις παρακάτω εντολές:

- Ορισμός χρονικού διαστήματος επίλυσης:
 - *DynaMisc* → *Control* → *Termination Time* → *Define* → *1.1* → *END TIM/ TERMINATION TIME = (Τιμή από τον παραπάνω πίνακα στο αντίστοιχο μοντέλο)* → *Apply* → *OK* → *Close*

Επιπλέον του χρονικού διαστήματος προσομοίωση απαιτήθηκαν και άλλα δύο στοιχεία. Αυτά είναι οι φορές στη μονάδα του χρόνου όπου θα γίνει καταγραφή των τάσεων, και οι φορές στη μονάδα του χρόνου όπου θα καταγραφούν τα χαρακτηριστικά του μοντέλου, ώστε να είναι δυνατή η απεικόνιση του σε μορφή ταινίας κατά τη μετα-επεξεργασία.

Για το πρώτο στοιχείο ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω εντολές:

- Ορισμός στοιχείου για την καταγραφή των τάσεων:
 - *DynaMisc* → *Database* → *ASCII* → *RCFORCE* → *Define* → *1.1* → *DT/TIME INTERVAL OF OUTPUT = 0.1* → *Apply* → *OK* → *Close*

Για το δεύτερο στοιχείο ελέγχου, οι απαιτούμενες εντολές που πρέπει να εισαχθούν στο πρόγραμμα είναι:

- Ορισμός στοιχείου για την καταγραφή της ταινίας:
 - *DyanMisc* → *Database* → *BINARY* → *D3PLOT* → *Define* → *1.1* → *DT/CYCL = 1* → *Apply* → *OK* → *Close*

Με την εισαγωγή και των τελευταίων αυτών εντολών, τα μοντέλα είναι πλέον έτοιμα για επίλυση.

3.5.3 Εξαγωγή ειδικού αρχείου και επίλυση

Για την πραγματοποίηση της επίλυσης, πρέπει να εξαχθεί από το προς επίλυση μοντέλο, ένα αρχείο με κατάληξη *.dyn*. Το συγκεκριμένο αρχείο εξάγεται από τον προ-επεξεργαστή, με τον ακόλουθο τρόπο:

- Εξαγωγή αρχείου *.dyn*:
 - *File* → *Export* → *Εισαγωγή ονόματος* → *Save*

Το αρχείο *.dyn* περιέχει συνεπτυγμένες όλες εκείνες τις παραμέτρους που ορίστηκαν σε κάθε μοντέλο. Η μορφή ενός αρχείου *.dyn* παρουσιάζεται στο Παράρτημα της παρούσας εργασίας.

Μετά και την εξαγωγή του συγκεκριμένου αρχείου, μπορεί να γίνει η επίλυσή του, με τη βοήθεια του επιλύτη (Solver) του LS – DYNA. Ο επιλύτης του LS – DYNA που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *ls971_s_7600_win32_p*. Ο επιλύτης, χρησιμοποιώντας την υπολογιστική δύναμη του εκάστοτε H/Y, υπολογίζει τα μητρώα που προαναφέρθηκαν σε ένα χρονικό βήμα. Στη συνέχεια, καταγράφει τα αποτελέσματα και συνεχίζει στο επόμενο χρονικό βήμα, όπου χρησιμοποιεί τις καταγεγραμμένες λύσεις ως αρχικές συνθήκες. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το τελευταίο χρονικό βήμα που έχει οριστεί.

Μετά την επίλυση κάθε μοντέλου, ο επιλύτης εξήγαγε τα αρχεία αποτελεσμάτων τα οποία διαβάστηκαν με τη χρήση του μετα-επεξεργαστή. Η ανάλυση του συγκεκριμένου βήματος γίνεται στο Κεφάλαιο 4.

3.6 Μονάδες μέτρησης μεγεθών

Πριν το τέλος του παρόντος κεφαλαίου θεωρήθηκε καλό να γίνει μια αναφορά στις μονάδες των μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν. Γενικά, το LS – DYNA έχει διάφορα συστήματα μονάδων, ανάλογα με την επιθυμητή εφαρμογή. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, το σύστημα μονάδων που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης
Χρόνος	millisecond (ms)
Μάζα	grammar (gr)
Δύναμη	Newton (N)
Μήκος	millimeter (mm)
Τάσεις / Πιέσεις	MegaPascal (MPa)

Κεφάλαιο 4:

Αποτελέσματα Υπολογιστικού Μέρους

4.1 Γενικός σχολιασμός αποτελεσμάτων υπολογιστικού μέρους

Μετά την επίλυση κάθε μοντέλου, ο επιλύτης δημιούργησε κάποια αρχεία. Ανάμεσα στα αρχεία αυτά, βρίσκονταν και τα αρχεία των αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα τα αρχεία των αποτελεσμάτων ήταν τα αρχεία d3plot (d3plot, d3plot01, d3plot02 κ.λπ. ανάλογα με το μοντέλο) και rforc. Το αρχείο d3plot είναι εκείνο που περιλαμβάνει τις πληροφορίες του εκάστοτε δοκιμίου σε κάθε χρονικό βήμα (timestep), έτσι ώστε να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η αναπαραγωγή της κατεργασίας σε μορφή ταινίας. Το αρχείο rforc περιλαμβάνει τις συντεταγμένες των σημείων του διαγράμματος φορτίου – χρόνου για κάθε επαφή των μοντέλων, έτσι ώστε να είναι δυνατή η κατασκευή των συγκεκριμένων διαγραμμάτων. Από τα συγκεκριμένα διαγράμματα, τελικά εξήχθησαν τα διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης, τα οποία συγκρίθηκαν στη συνέχεια με τα αντίστοιχα πειραματικά διαγράμματα.

Η επεξεργασία των αρχείων των αποτελεσμάτων γίνεται με τη βοήθεια του μετα-επεξεργαστή (Post-Processor). Ο μετα-επεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο POST-GL 1.0 της εταιρείας ETA. Με τη βοήθεια του προσομοιώθηκε η κατεργασία της διέλασης. Επίσης, ο μετα-επεξεργαστής χρησιμοποιήθηκε και για την παρουσίαση πληροφοριών, όπως οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

Για την ανάγνωση και την κατασκευή των διαγραμμάτων, χρησιμοποιήθηκε ο επεξεργαστής γραφικών της ίδιας εταιρείας (ETA graph-processor). Ο επεξεργαστής γραφικών χρησιμοποιείται κυρίως μέσω του μετα-επεξεργαστή. Γενικά, χρησιμοποιεί τις πληροφορίες από το αρχείο rforc και παρουσιάζει με λεπτομερή τρόπο τα δεδομένα του συγκεκριμένου αρχείου σε μορφή διαγράμματος, τόσο από τη μεριά της ομάδας – αφέντη μιας επαφής, όσο και από τη μεριά της ομάδας – υπηρέτη της επαφής.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από το μοντέλο κάθε δοκιμίου. Θα παρουσιαστούν με τη σειρά:

- a) Πληροφορίες για τη μορφή του δοκιμίου, σε μια τυχαία χρονική στιγμή της κατεργασίας.
- b) Πληροφορίες για τις τιμές των τάσεων (κατά von Mises) και των παραμορφώσεων, την ίδια τυχαία χρονική στιγμή της κατεργασίας.

c) Η καμπύλη φορτίου – χρόνου που λήφθηκε από την προσομοίωση κάθε μοντέλου, στην διεπιφάνεια μεταξύ δοκιμίου και εμβόλου (από το μέρος της ομάδας – αφέντη).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθούν δύο πολύ σημαντικοί παράγοντες της παρουσίας των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού μέρους.

Αρχικά, η επιλογή της παρουσίας των αποτελεσμάτων σε κάποια τυχαία χρονική στιγμή έγινε, ώστε ο αναγνώστης να μπορεί να διακρίνει την καταπόνηση του δοκιμίου, την ώρα που αυτό υποβάλλεται στην όλη διαδικασία, και όχι στο τέλος της κατεργασίας όπου το τασικό πεδίο θα έχει εξομαλυνθεί. Η απόφαση αυτή πάρθηκε μετά από την επίλυση κάποιων δοκιμαστικών μοντέλων, όπου προσομοιώθηκε το πείραμα μέχρι και τη στιγμή που το έμβολο σταματούσε να κατεβαίνει. Κατά την παρατήρηση των αποτελεσμάτων των μοντέλων αυτών φάνηκε ότι το τασικό πεδίο εξομαλυνόταν την ώρα που το έμβολο σταματούσε την κάθοδο, και άρα τα αποτελέσματα δεν ήταν αρκετά κατατοπιστικά. Επίσης, τα αποτελέσματα σε κάποια τυχαία χρονική στιγμή παρουσιάζουν ταυτόχρονα την κατάσταση που επικρατεί πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τη διέλαση ενός τμήματος του δοκιμίου.

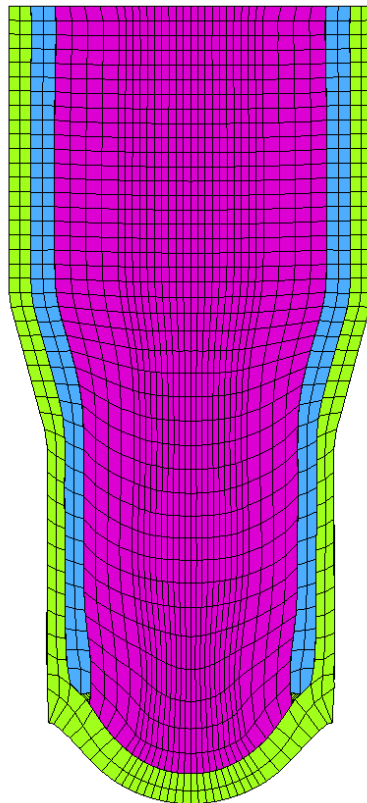
Δεύτερον, η καμπύλη του φορτίου συναρτήσει του χρόνου λήφθηκε στην επιφάνεια που προαναφέρθηκε, ώστε τα αποτελέσματα να είναι τα ίδια με αυτά που λήφθηκαν από το πείραμα. Ο λόγος είναι ότι και ο αισθητήρας της πρέσσας στο πείραμα λάμβανε τις τιμές του φορτίου στο έμβολο, και άρα θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων και από τις δύο πηγές (το πείραμα και το υπολογιστικό μοντέλο).

4.2 Αποτελέσματα υπολογιστικού μέρους για το δοκίμιο #1

Το μοντέλο του δοκιμίου #1, παρουσίασε γενικά παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του αντίστοιχου δοκιμίου στο πείραμα.

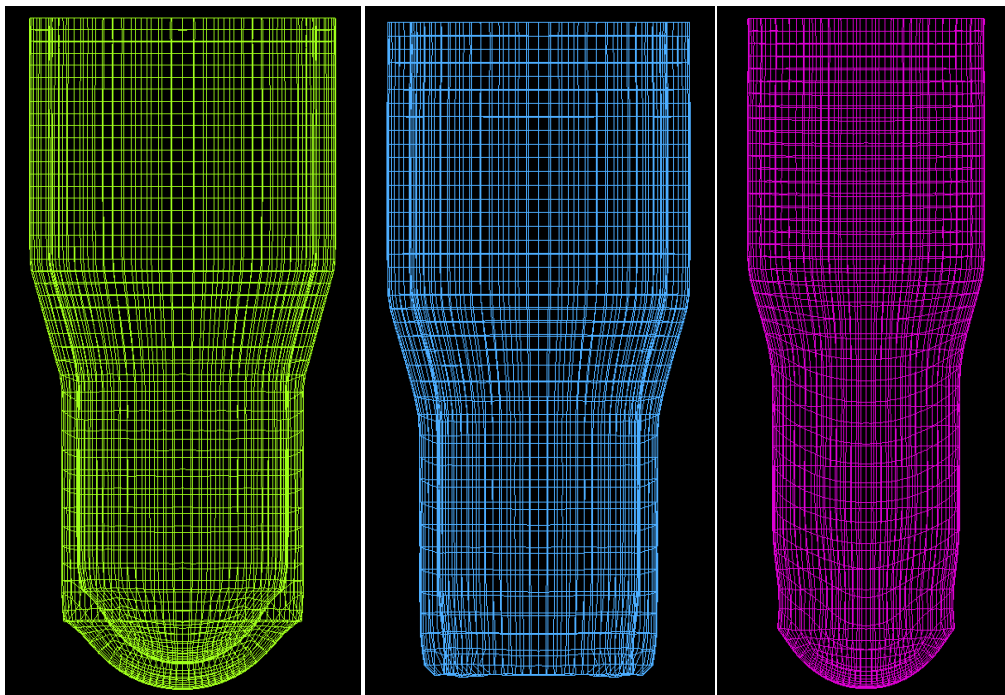
4.2.1 Μορφή δοκιμίου

Η μορφή του δοκιμίου σε ένα τυχαίο χρονικό βήμα της προσομοίωσης (χρονικό βήμα 140 από τα 252), παρουσιάζεται σε τομή, στην εικόνα που ακολουθεί:



Τομή της μορφής του δοκιμίου σε τυχαίο χρονικό βήμα (δοκίμιο #1)

Από την άλλη, η απεικόνιση κάθε υλικού ξεχωριστά, φαίνεται και για τα τρία υλικά στην παρακάτω εικόνα:



(Από αριστερά προς τα δεξιά) Απεικόνιση χαλύβδινου περιβλήματος, χάλκινου επιστρώματος και αλουμινένιου πυρήνα (δοκίμιο #1)

Από την παραπάνω εικόνα διακρίνονται διάφορες λεπτομέρειες σχετικά με τη μορφή των τριών διαφορετικών υλικών πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το πέρασμα από το κωνικό τμήμα της μήτρας.

Αυτό που αξίζει να παρατηρηθεί ιδιαίτερα είναι οι διαμορφώσεις κάθε τμήματος του δοκιμίου στην περιοχή κοντά στον πυθμένα του εξωτερικού περιβλήματος. Στο εξωτερικό περίβλημα διακρίνεται καθαρά η δημιουργία του ημισφαιρικού τμήματος, όπως ακριβώς αυτή παρουσιάστηκε και μετά τη διέλαση.

Αυτό που δεν μπορούσε να παρατηρηθεί από το πείραμα, ήταν οι μορφές των άλλων δύο υλικών. Έτσι, παρατηρείται ότι, από άποψη μορφής, το κάτω μέρος του ενδιάμεσου επιστρώματος σχημάτισε κάποιες πτυχώσεις στο ελεύθερο άκρο του, οι οποίες ακολουθήθηκαν από μια διόγκωση του υλικού. Η διόγκωση αυτή είναι το αποτέλεσμα της ελαστικής επαναφοράς του υλικού του ενδιάμεσου επιστρώματος. Πιο συγκεκριμένα ο χαλκός, που στην περίπτωση αυτή είναι το υλικό του ενδιάμεσου επιστρώματος, χαρακτηρίζεται από μεγάλο μέτρο ελαστικότητας. Έτσι, όταν το τασικό πεδίο λόγω της κατεργασίας εξομαλύνθηκε, το υλικό επιχείρησε να επανέλθει ελαστικά στο αρχικό του μέγεθος. Βέβαια, αυτό δεν ήταν εύκολο να πραγματοποιηθεί από τη μεριά του χαλύβδινου περιβλήματος, λόγω της αυξημένης στιβαρότητας του τελευταίου. Αντίθετα, ο χαλκός μπόρεσε να συμπιέσει το πιο μαλακό αλουμίνιο, και άρα να δημιουργηθεί διόγκωση του επιστρώματος, κυρίως από την πλευρά του αλουμινένιου πυρήνα. Το γεγονός ότι το συγκεκριμένο φαινόμενο πραγματοποιήθηκε από την ελαστική επαναφορά του χαλκού, δηλώνεται και από το προφίλ που έχουν τα πεπερασμένα στοιχεία στην περιοχή αυτή (της διόγκωσης του υλικού). Έτσι, ενώ τα πεπερασμένα στοιχεία έχουν ένα παραβολικό προφίλ κατά την έξοδό τους από το κωνικό τμήμα της μήτρας, το προφίλ αυτό σταδιακά εξομαλύνεται, ώσπου στην περιοχή της διόγκωσης είναι ξανά μια ευθεία γραμμή. Το ευθύγραμμο προφίλ των πεπερασμένων στοιχείων δείχνει ότι το πάχος του συγκεκριμένου τμήματος του περιβλήματος έχει περίπου το ίδιο πάχος, με αυτό που είχε το υλικό πριν τη διέλαση. Ο λόγος σχηματισμού του παραβολικού προφίλ στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι η περιφερειακή συμπίεση του δοκιμίου κατά τη διέλαση του και η γρηγορότερη διαρροή του πυρήνα σε σχέση με το περίβλημα. Έτσι, και με δεδομένο ότι οι τριβές ήταν αρκετά μεγάλες στις διεπιφάνειες μεταξύ των τριών τμημάτων, το εσωτερικό μέρος του επιστρώματος διέρρευσε γρηγορότερα (λόγω της επίδρασης από τον πυρήνα) από το εξωτερικό μέρος του επιστρώματος, το οποίο ακολούθησε τη

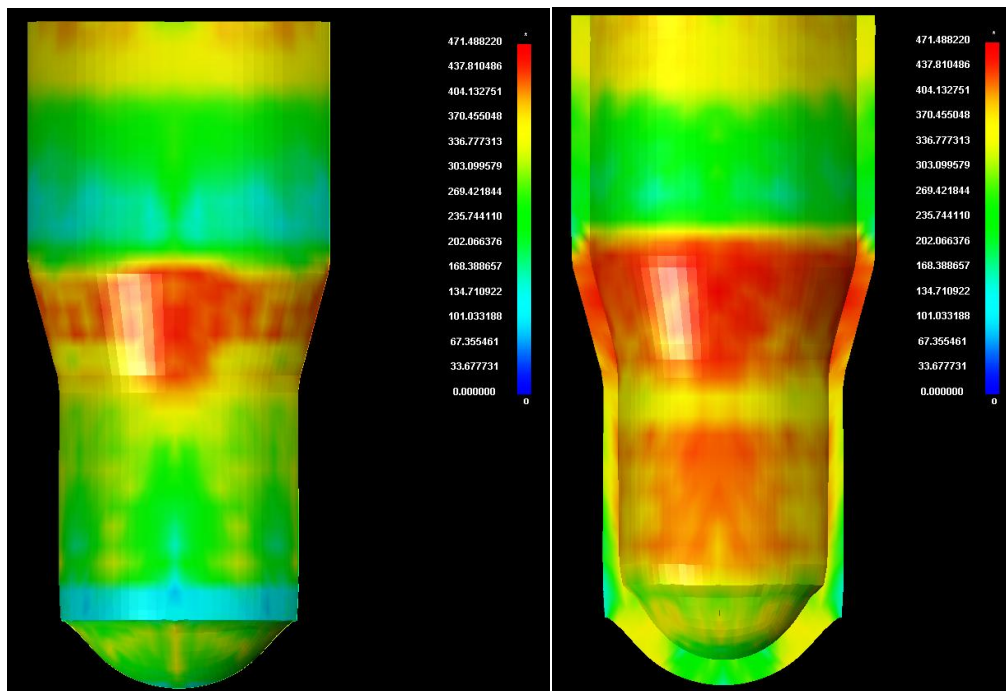
διαρροή του πυθμένα (ίδια με την κάθοδο του δοκιμίου). Βέβαια, αυτό το φαινόμενο δεν ακολουθήθηκε απόλυτα, αφού υπήρξε σχετική κίνηση μεταξύ των τμημάτων του δοκιμίου, η οποία όμως ήταν συγκριτικά μικρή. Τέλος, όσον αφορά στις πτυχώσεις στο κάτω μέρος του επιστρώματος, φαίνεται ότι δημιουργήθηκαν λόγω της ύπαρξης μικρών εφαπτομενικών θλιπτικών τάσεων στην περιοχή, οι οποίες όμως δεν αντισταθμίστηκαν, αφού στη συγκεκριμένη περιοχή το επίστρωμα δεν έρχεται σε επαφή με κάποιο άλλο τμήμα του δοκιμίου.

Στον πυρήνα του τεμαχίου παρατηρήθηκε μια ελαφρά διαρροή πέρα από τα όρια του ενδιάμεσου επιστρώματος, η οποία σταμάτησε χάρις στον πυθμένα. Επίσης, διακρίνεται μια στένωση του πυρήνα, η οποία συμπίπτει με το σημείο όπου παρατηρείται η διόγκωση του ενδιάμεσου επιστρώματος. Χαρακτηριστική, ακόμα, είναι η διαμόρφωση του κάτω μέρους του πυθμένα, η οποία παρομοιάζεται με το σχήμα του μανιταριού. Πρέπει να αναφερθεί ακόμα, ότι κατά τη διαρροή του πυρήνα, το προφίλ των πεπερασμένων στοιχείων κοντά στον πυθμένα, παρουσιάζει και αυτό μια παραβολική μορφή, κάτι που μπορεί να προσομοιαστεί με το προφίλ ενός ρευστού, κατά την έξοδό του από στένωση. Παρατηρείται δηλαδή, μια μορφή που θυμίζει την παραβολική μορφή των ταχυτήτων του ρευστού, στην προαναφερθείσα περίπτωση. Το προφίλ αυτό των στοιχείων πληροφορεί τον παρατηρητή για την πορεία της διαρροής του συγκεκριμένου τμήματος. Έτσι, ενώ έως το σημείο πριν την διόγκωση του ενδιάμεσου επιστρώματος, τα παραβολικά προφίλ των στοιχείων είναι σταθερά, από εκεί και μετά αυτά γίνονται πιο έντονα. Αυτό υποδηλώνει ότι η ελαστική επαναφορά του χαλκού, δημιουργεί μια δεύτερη στένωση για το αλουμίνιο, με αποτέλεσμα η διαρροή αυτού του ποσοστού του πυρήνα που είχε διαρρεύσει πιο γρήγορα από το ενδιάμεσο επίστρωμα, να επιταχύνεται ακόμα περισσότερο και άρα να δημιουργηθεί και η προαναφερθείσα μορφή μανιταριού.

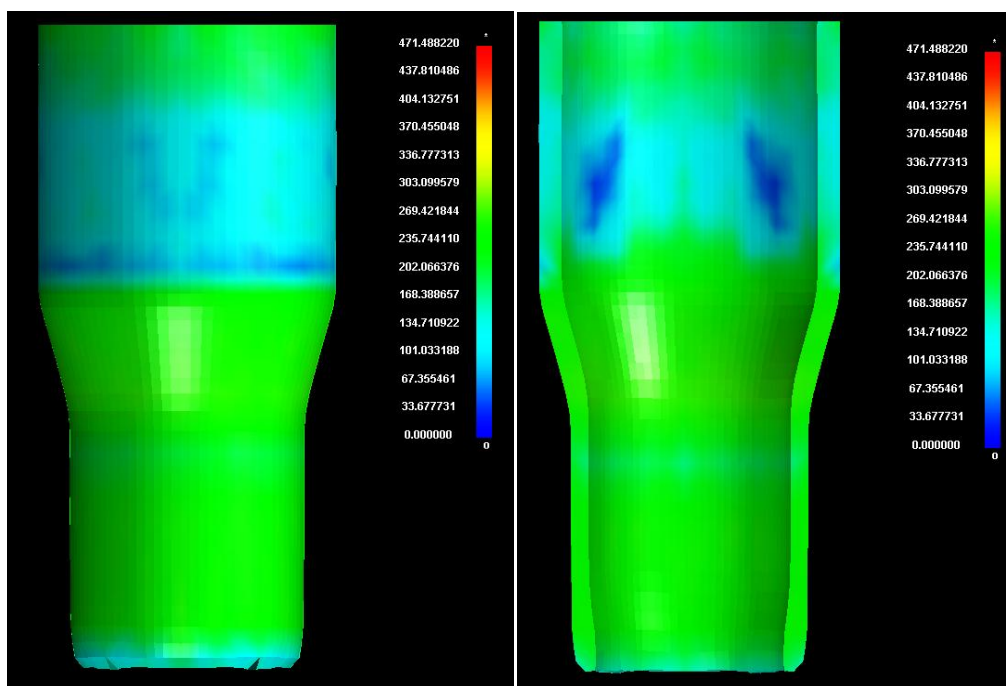
Γενικά, όσον αφορά στις συγκεκριμένες διαμορφώσεις των τμημάτων του δοκιμίου και τη σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα, υπάρχει περιθώριο για επιβεβαίωση μέσα από περαιτέρω πειραματική έρευνα.

4.2.2 Τάσεις και παραμορφώσεις

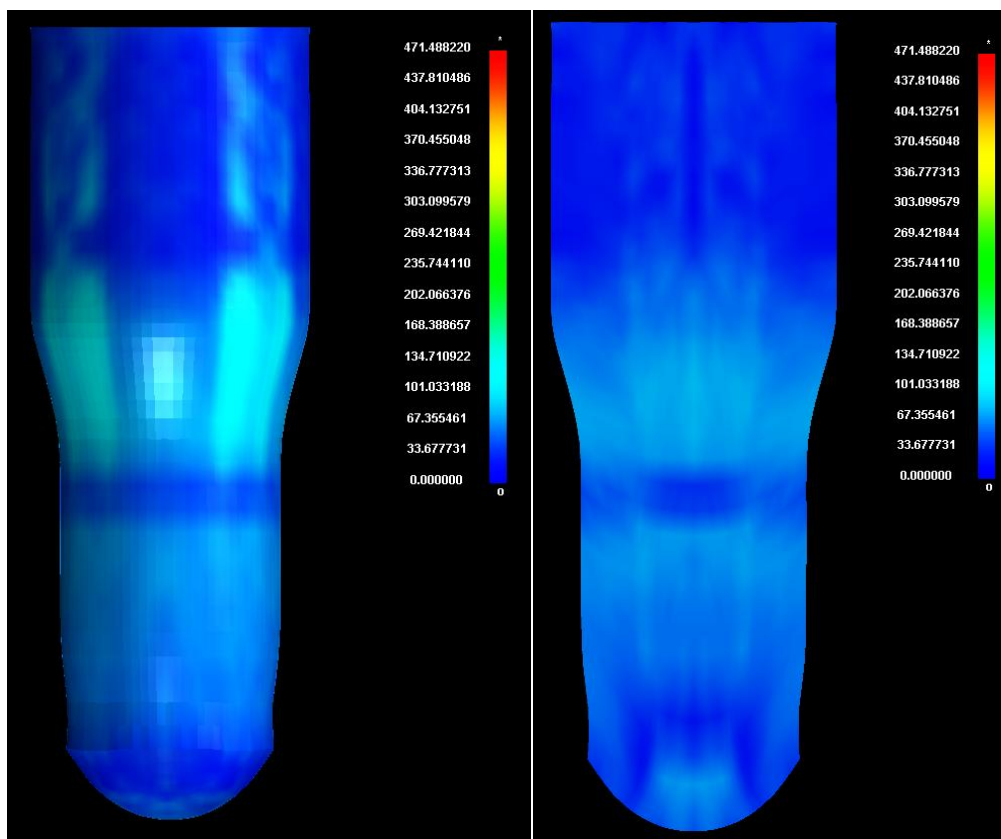
Από τον μετα-επεξεργαστή λαμβάνεται το τασικό και παραμορφωσιακό πεδίο που επικρατεί στο δοκίμιο. Αυτά, για κάθε ένα από τα τρία υλικά, παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του εξωτερικού περιβλήματος (δοκίμιο #1)



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του ενδιάμεσου επιστρώματος (δοκίμιο #1)



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό μέρος και στην τομή του πυρήνα (δοκίμιο #1)

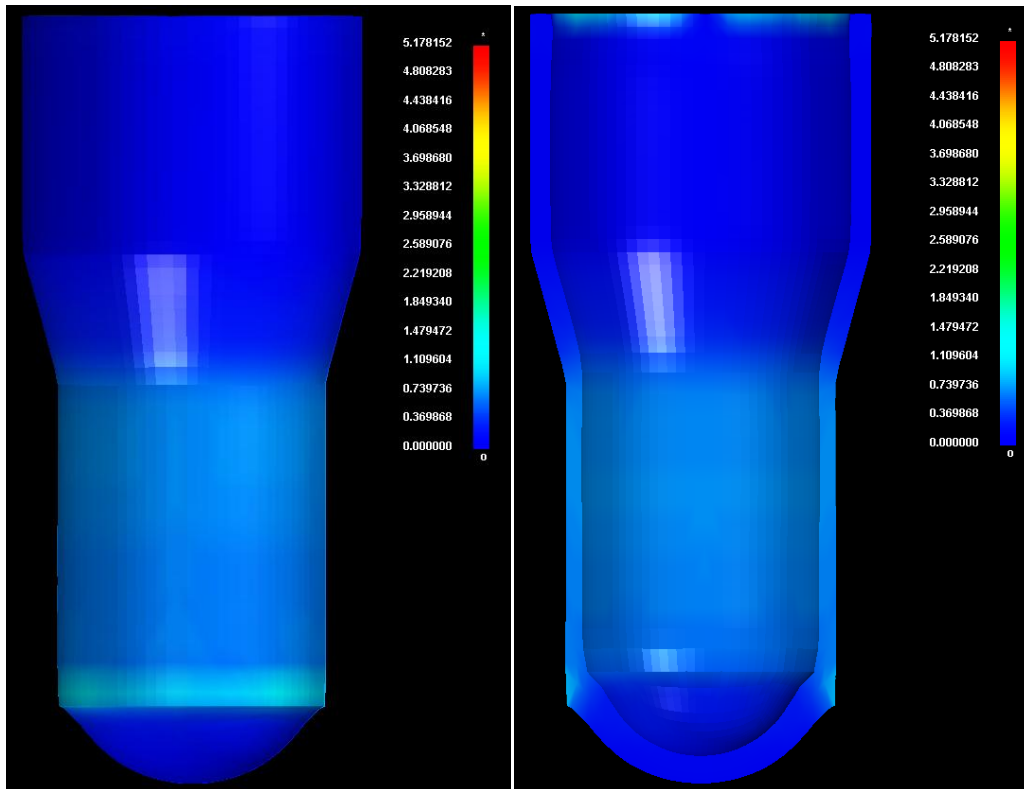
Από τις παραπάνω εικόνες είναι εύκολα παρατηρήσιμο ότι οι μεγαλύτερες τιμές των ισοδύναμων τάσεων, εμφανίζονται στο εξωτερικό περίβλημα. Μάλιστα, η μεγαλύτερη συγκέντρωση των τάσεων αυτών είναι στο εσωτερικό μέρος του εξωτερικού περιβλήματος, όταν αυτό διέρχεται από το κωνικό τμήμα της μήτρας. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται από τη δομή του δοκιμίου και τη φύση της κατεργασίας, αφού το περίβλημα αυτό είναι που έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα της μήτρας, και άρα δέχεται και την μεγαλύτερη καταπόνηση κατά την συμπίεση του δοκιμίου. Επίσης, στο εσωτερικό του περιβλήματος αναμενόταν μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων, αφού εκεί ο συντελεστής τριβής είναι μεγαλύτερος από ότι μεταξύ του εξωτερικού περιβλήματος και της μήτρας (βλ. 3.4), κάτι που συνεισφέρει στις ισοδύναμες τάσεις von Mises. Εκτός, όμως από την περιοχή όπου πραγματοποιείται η διέλαση, το συγκεκριμένο τμήμα παρουσιάζει αυξημένες τιμές τάσεων και στο άνω μέρος του, εκεί δηλαδή όπου πιέζεται από το έμβολο. Τέλος, το κομμάτι εκείνο του εξωτερικού περιβλήματος που έχει περάσει από το κωνικό τμήμα της μήτρας παρουσιάζει αυξημένες τάσεις στο εσωτερικό του, καθώς και σε έναν δακτύλιο του πυθμένα. Και τα δύο αυτά τασικά πεδία, πιθανών δημιουργήθηκαν λόγω της

αυξημένης τάσης που δέχεται το εξωτερικό περίβλημα από τα δύο εσωτερικά υλικά. Έτσι, το παράπλευρο τασικό πεδίο δημιουργείται λόγω της συμπίεσης από τα εσωτερικά υλικά, τα οποία έχουν την τάση να διαρρεύσουν, ενώ η θέση του τασικού δακτυλίου στον πυθμένα προκαλείται μάλλον από την αύξηση πίεσης, που προκαλούν σε αυτόν τα εσωτερικά υλικά κατά τη διαρροή τους.

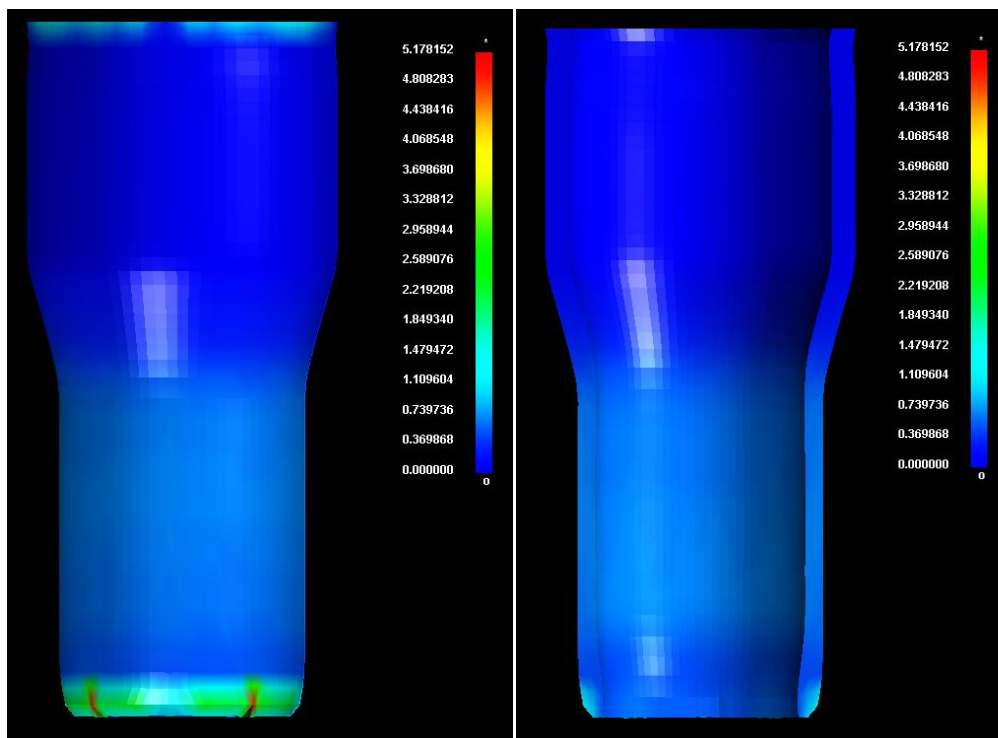
Το ενδιάμεσο περίβλημα από την άλλη, παρουσιάζει μέσες τιμές τάσεων σχεδόν σε ολόκληρο τον όγκο του. Στο συγκεκριμένο τμήμα του δοκιμίου, οι τάσεις που το καταπονούν είναι όσες πέρασαν διαμέσου του εξωτερικού περιβλήματος. Οι τιμές αυτές των τάσεων συγκεντρώνονται κυρίως στο σημείο όπου το έμβολο σπρώχνει το κομμάτι αυτό, στο σημείο όπου πραγματοποιείται η διέλαση, και στο σημείο εκείνο που πιέζεται από τον πυρήνα. Από την άλλη, χαμηλότερες τιμές τάσης παρουσιάζονται λίγο πριν το κωνικό τμήμα, όπου η επίδραση από το έμβολο δεν είναι τόσο μεγάλη, και στο κατώτερο σημείο του επιστρώματος, όπου το τασικό πεδίο έχει εξομαλυνθεί σχετικά (σημείο εμφάνισης της διόγκωση, λόγω ελαστικής επαναφοράς του υλικού).

Για τον πυρήνα, τέλος, οι τιμές των τάσεων είναι γενικά χαμηλές. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση εμφανίζεται στα ίδια σημεία που παρουσιάστηκε και στα άλλα υλικά του δοκιμίου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον πυρήνα παρουσιάζει η τομή του. Όπως, φαίνεται και στην εικόνα, το προφίλ των τάσεων κατά την έξοδο από το κωνικό τμήμα της μήτρας, έχει παραβολική μορφή. Αυτό το γεγονός μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι το υλικό του πυρήνα κατά τη διέλαση του, παρουσιάζει συμπεριφορά παρόμοια με αυτή ενός ρευστού. Έτσι, παρατηρείται ότι το υλικό τείνει να διαρρεύσει με κάποια ταχύτητα, η μεγαλύτερη τιμή της οποίας εμφανίζεται στο κέντρο του πυρήνα, για αυτό και το προφίλ των τάσεων είναι παρόμοιο με το προφίλ διαρροής του υλικού. Συγκριτικά, όμως με τα άλλα τμήματα, ο πυρήνας εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές τάσεων. Επίσης, παρουσιάζει μια μικρή αύξηση τάσης στη διαμόρφωση μανιταριού, προφανώς λόγω της αντίδρασης του πυθμένα στη διαρροή του πυρήνα.

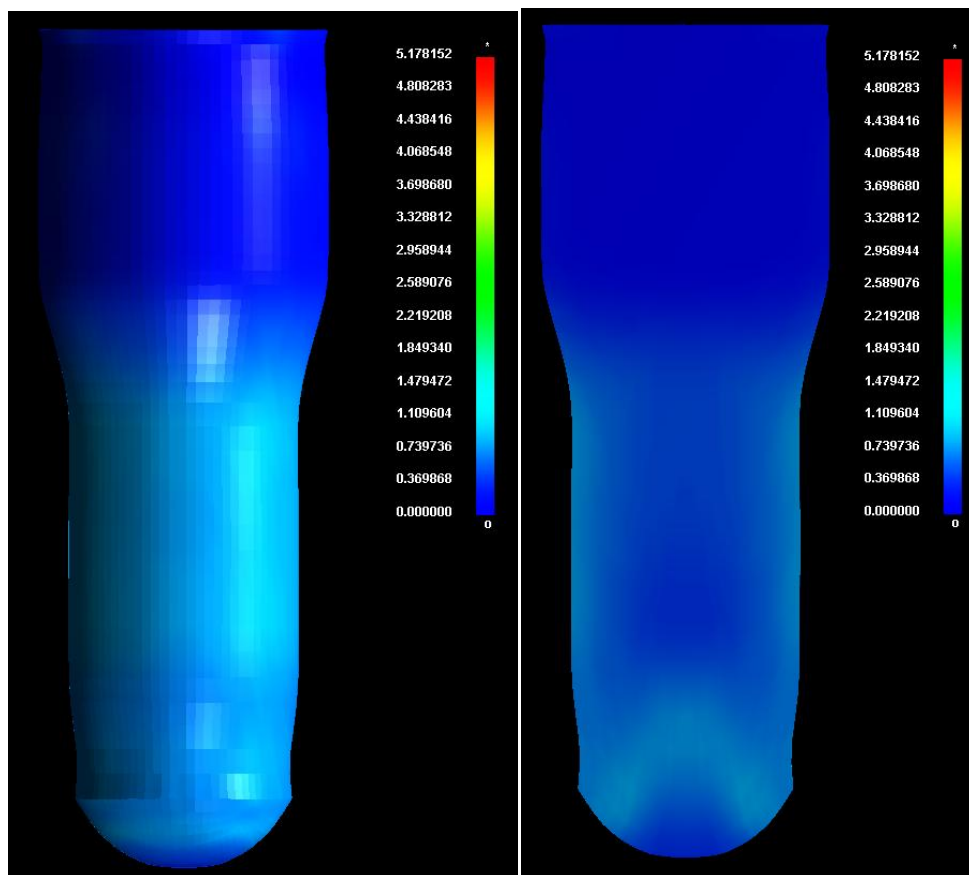
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το παραμορφωσιακό πεδίο για κάθε ένα από τα τμήματα του δοκιμίου.



Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του εξωτερικού περιβλήματος
(δοκίμιο #1)



Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του ενδιάμεσου επιστρώματος
(δοκίμιο #1)



Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό μέρος και στην τομή του πυρήνα (δοκίμιο #1)

Για το παραμορφωσιακό πεδίο των τμημάτων του δοκιμίου δεν μπορούν να γίνουν πολλά σχόλια. Γενικά, όλα τα τμήματα παρουσιάζουν περίπου την ίδια παραμόρφωση στο τμήμα εκείνο του δοκιμίου, που έχει διέλθει από το κωνικό τμήμα της μήτρας ή βρίσκεται στο κατώτερο σημείο αυτού. Αυτό το γεγονός είναι απολύτως δικαιολογημένο, από την άποψη ότι, λόγω της αρχής διατήρησης του όγκου, όλα τα μέρη του δοκιμίου επιμηκύνονται ως αποτέλεσμα της μείωση της διαμέτρου τους, καθώς διέρχονται από το κωνικό τμήμα της μήτρας. Επίσης, το εξωτερικό περίβλημα και το ενδιάμεσο επίστρωμα του δοκιμίου, παρουσιάζουν κάποια παραμόρφωση και στο σημείο όπου πιέζονται από το έμβολο.

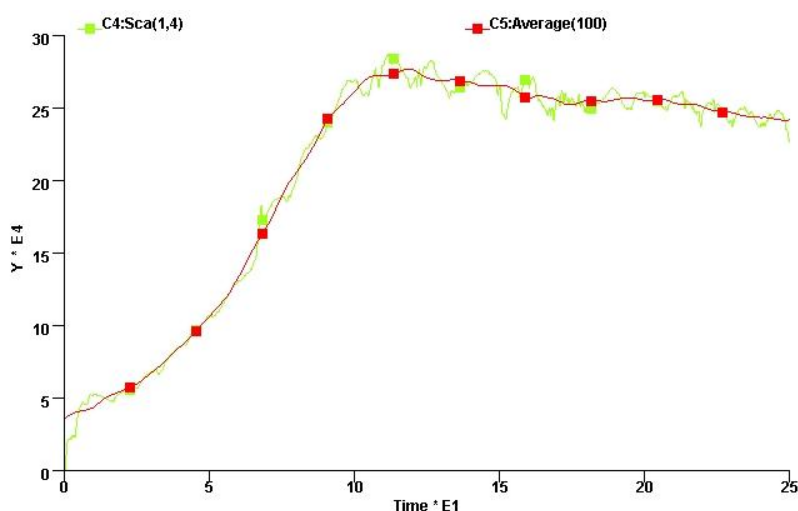
Τα σημεία που δημιουργούν κάποιο επιπλέον ενδιαφέρον από την παρατήρηση των παραπάνω εικόνων, εστιάζονται περισσότερο σε τμήματα που δεν αναμενόταν τόσο μεγάλη παραμόρφωση. Πιο συγκεκριμένα, οι μέγιστες τιμές παραμόρφωσης παρουσιάζονται στο κάτω μέρος του ενδιάμεσου επιστρώματος. Παρατηρώντας τη μορφή του συγκεκριμένου τμήματος στο σημείο των υψηλών αυτών τάσεων, φαίνεται πως το φαινόμενο αυτό είναι μάλλον αποτέλεσμα κάποιου

τοπικού σφάλματος, που δεν αναμένεται να συμβεί στην πραγματικότητα. Μια ακόμη παρατήρηση γίνεται στο εξωτερικό περίβλημα, στην περιοχή γύρω από τον πυθμένα. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή της γωνίας το τμήμα αυτό παρουσιάζει έντονη παραμόρφωση, πράγμα λογικό βάσει της στρέβλωση του πυθμένα στη συγκεκριμένη περιοχή, ώστε να σχηματιστεί η ημισφαιρική διαμόρφωση. Παρόμοια παρατήρηση γίνεται και στον πυρήνα του δοκιμίου, για τον ίδιο λόγο, αν και το παραμορφωσιακό πεδίο στην περίπτωση αυτή είναι λίγο εκτενέστερο. Τέλος, σημαντικό είναι να παρατηρηθεί ότι από την τομή του πυρήνα φαίνεται πως το κέντρο του όγκου του πυρήνα, δεν έχει επιδεχθεί σχεδόν καθόλου παραμόρφωση (με εξαίρεση την περιοχή της στένωσης), και μόνο η περιφέρεια του έχει παραμορφωθεί.

Γενικά, η ύπαρξη των μεγάλων παραμορφώσεων του ενδιάμεσου επιστρώματος, επηρεάζει τα εξαγόμενα αριθμητικά αποτελέσματα, έτσι ώστε να αποκρύπτονται πιθανώς πληροφορίες, οι οποίες σε άλλη περίπτωση θα ήταν ορατές. Βέβαια, οι τάσεις αυτές δεν θα ήταν οι μέγιστες και άρα δεν θα ήταν οι πλέον επικίνδυνες για τη δημιουργία κάποιου πιθανού ελαττώματος.

4.2.3 Καμπύλη φορτίου

Από την επίλυση του μοντέλου λήφθηκε η καμπύλη του φορτίου συναρτήσει του χρόνου. Η συγκεκριμένη καμπύλη, για την επαφή μεταξύ δοκιμίου και εμβόλου, από τη μεριά της ομάδας – αφέντη, καθώς και η καμπύλη των μέσων τιμών αυτής, παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Καμπύλη φορτίου – χρόνου και καμπύλη μέσων τιμών αυτής (δοκίμιο #1)

Για το διάγραμμα αυτό πρέπει να σημειωθούν δύο σημεία. Αρχικά, η πράσινη καμπύλη αποτελεί το τετραπλάσιο της καταγεγραμμένης, στο αρχείο rcforc, καμπύλης. Ο λόγος είναι ότι η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο ένα τέταρτο του πραγματικού δοκιμίου. Έτσι, τετραπλασιάζοντας τις τιμές του άξονα Y, λήφθηκε η καμπύλη για ολόκληρο το δοκίμιο. Το δεύτερο στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν, είναι ότι οι τιμές του συγκεκριμένου διαγράμματος ανταποκρίνονται στα φορτία κατά τον άξονα των Z, αφού αυτά τα φορτία αντιστοιχούν σε εκείνα που λήφθηκαν κατά το πείραμα.

Αξίζει, ακόμα, να σημειωθεί ότι η καμπύλη των μέσων τιμών, κατασκευάστηκε για εκατοντάδες τιμές, δηλαδή κάθε τιμή είναι ο μέσος όρος των εκατό γειτονικών της τιμών.

Παρατηρώντας την καμπύλη αυτή, διακρίνονται μόνο οι δύο από τις τέσσερις φάσεις της διέλασης (για τις φάσεις της διέλασης βλ. *Κεφάλαιο 1*). Πιο συγκεκριμένα παρατηρούνται η μεταβατική φάση και η φάση ευστάθειας.

Κατά τη μεταβατική φάση, διακρίνονται τρία σημεία, όπου στο δοκίμιο εμφανίζεται μια οριζοντίωση της καμπύλης. Στις δύο από τις τρεις περιπτώσεις, η καμπύλη συνέχισε να ανεβαίνει μετά την οριζοντίωση, ενώ μετά την τρίτη η κατεργασία πέρασε στη δεύτερη φάση της. Όπως και στη θεωρητική καμπύλη της διέλασης, όπου η μέγιστη τιμή της μεταβατικής φάσης παρουσιάζεται στο τέλος της, γίνεται η εικασία ότι και στην περίπτωση αυτή, οι οριζοντιώσεις της καμπύλης έχουν άμεση σχέση με το μέγιστο φορτίο που απαιτήθηκε για τη διαρροή κάθε υλικού. Η εικασία αυτή έχει λογική βάση, παρόλα αυτά όμως, επειδή δεν υπάρχει αντίστοιχη βιβλιογραφία, δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί, και έτσι απαιτείται επιπλέον έρευνα σχετικά με τη μορφή αυτής της καμπύλης.

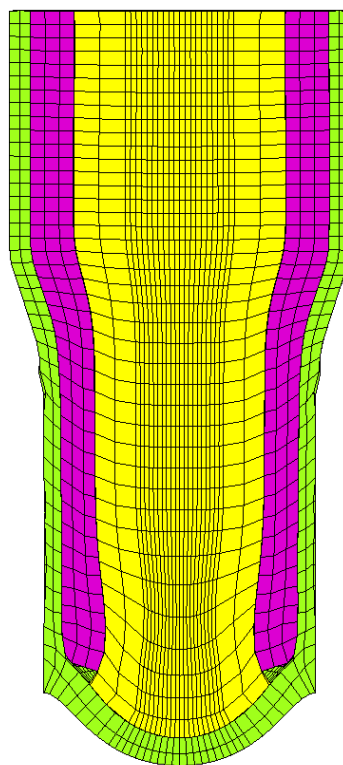
Τέλος, η φάση της ευστάθειας δεν παρουσιάζει κάτι ιδιαίτερο, και αρά η κατεργασία συνεχίζει και ολοκληρώνεται στη συγκεκριμένη φάση.

4.3 Αποτελέσματα υπολογιστικού μέρους για το δοκίμιο #2

Για το δοκίμιο #2, παρατηρήθηκε συμπεριφορά παρόμοια με του αυτή του αντίστοιχου πειράματος.

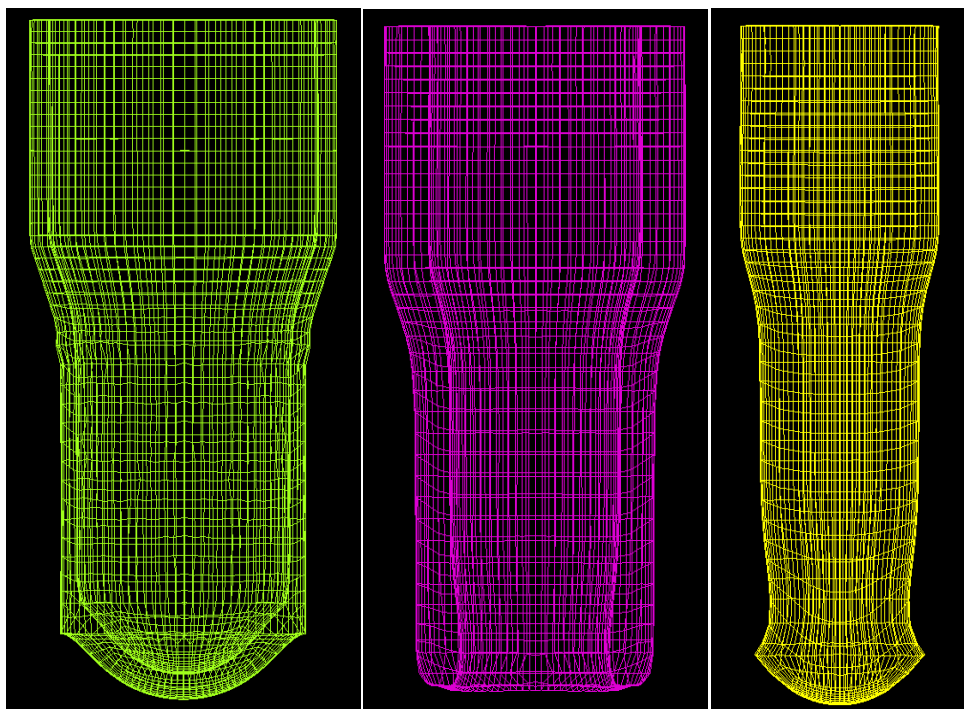
4.3.1 Μορφή δοκιμίου

Από τον μετα-επεξεργαστή, λαμβάνονται οι παρακάτω εικόνες σχετικά με τη μορφή του δοκιμίου σε ένα τυχαίο χρονικό βήμα (115 από τα 182).



Τομή της μορφής του δοκιμίου σε τυχαίο χρονικό βήμα (δοκίμιο #2)

Για κάθε ένα από τα δοκίμια ξεχωριστά, η μορφή του παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



(Από αριστερά προς τα δεξιά) Απεικόνιση χαλύβδινου περιβλήματος, χάλκινου επιστρώματος και αλουμινένιου πυρήνα (δοκίμιο #2)

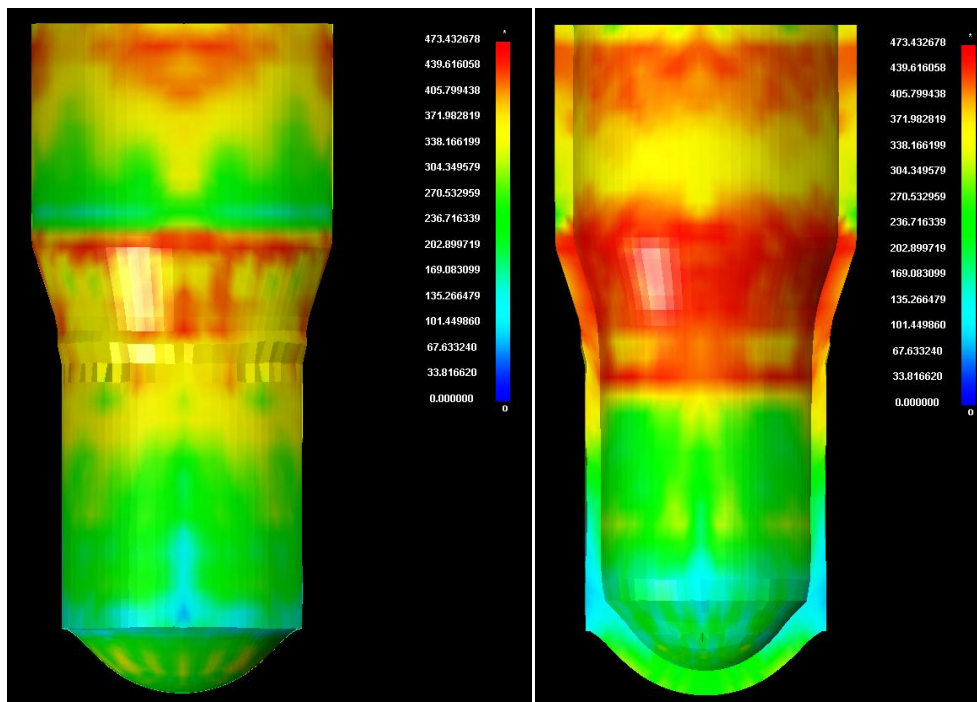
Και για το δοκίμιο αυτό τα συμπεράσματα είναι παρόμοια με εκείνα του δοκιμίου #1. Βέβαια, το μέγεθος των διαφόρων διαμορφώσεων στην περίπτωση αυτού του δοκιμίου, είναι σαφώς μεγαλύτερο (κυρίως των δύο εσωτερικών υλικών).

Στο εξωτερικό περίβλημα παρατηρείται και πάλι η ημισφαιρική διαμόρφωση, η οποία προκλήθηκε εξαιτίας της αυξημένης πίεσης στην περιφέρεια του περιβλήματος, κατά τη διάρκεια της διέλασης. Παρατηρείται επίσης, και μια περίεργη διαμόρφωση του τμήματος αυτού, αμέσως μετά το κωνικό τμήμα της μήτρας. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση είναι αποτέλεσμα του τύπου επαφής κόμβων με επιφάνεια σε συνεργασία με το καμπύλο τμήμα εξόδου της μήτρας, και αποτελεί σφάλμα της επίλυσης. Το σφάλμα αυτό εξομαλύνεται στη συνέχεια, κατά το μεγαλύτερο ποσοστό του, από το κυλινδρικό τμήμα, και άρα δεν παρουσιάζεται κανένα πρόβλημα.

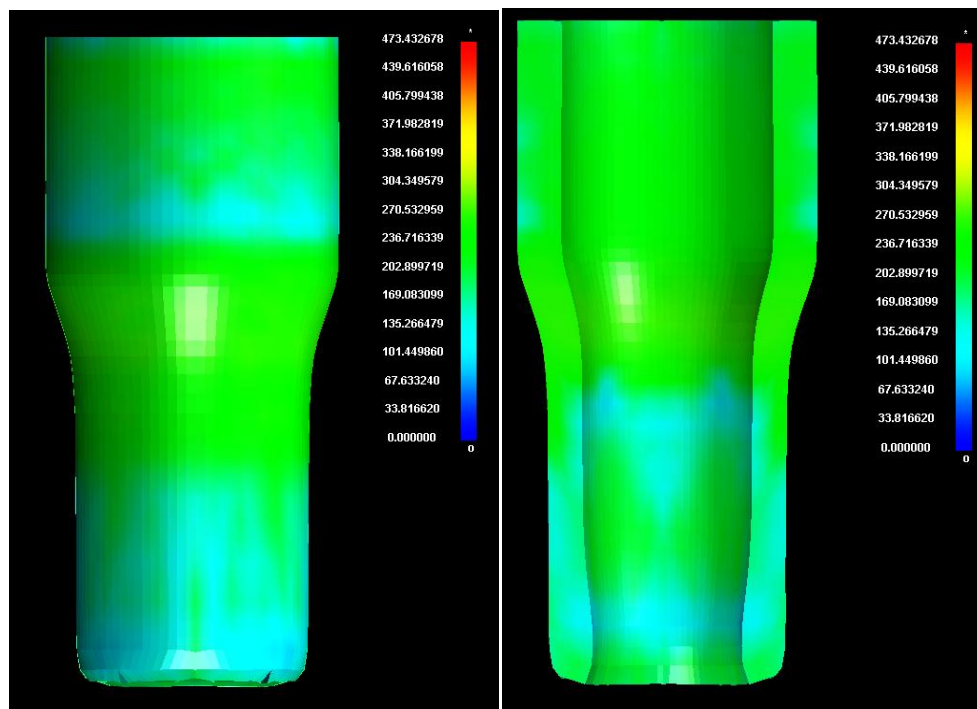
Για τα άλλα δύο τμήματα του δοκιμίου, παρουσιάζονται οι ίδιες διαμορφώσεις όπως και πριν (διόγκωση κάτω μέρους ενδιάμεσου επιστρώματος, διαμόρφωση μανιταριού κάτω μέρους πυρήνα ακολουθούμενη από στένωση), μόνο που στη συγκεκριμένη περίπτωση το μέγεθος αυτών των διαμορφώσεων είναι σαφώς μεγαλύτερο. Γενικά, τα συμπεράσματα περί του σχηματισμού αυτών είναι τα ίδια.

4.3.2 Τάσεις και παραμορφώσεις

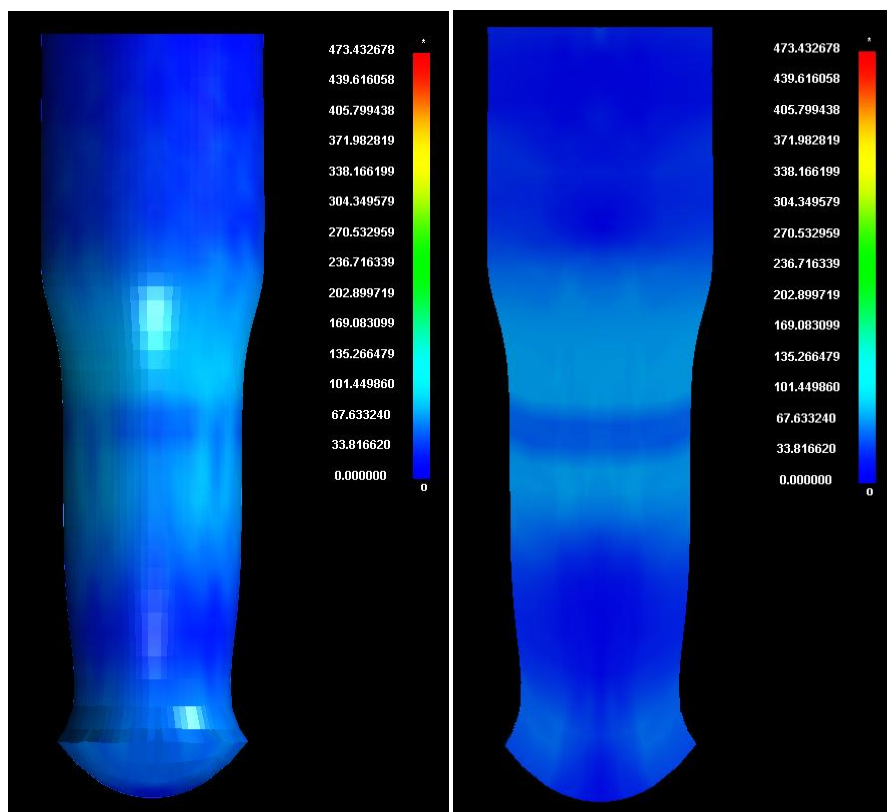
Το τασικό πεδίο κάθε υλικού ξεχωριστά παρουσιάζεται στις εικόνες που ακολουθούν.



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του εξωτερικού περιβλήματος (δοκίμιο #2)



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του ενδιάμεσου επιστρώματος (δοκίμιο #2)



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό μέρος και στην τομή του πυρήνα (δοκίμιο #2)

Και στην περίπτωση του τασικού πεδίου, παρατηρούνται παρόμοιες συμπεριφορές με αυτές του προηγούμενου δοκιμίου. Έτσι, και στην περίπτωση αυτή τις μεγαλύτερες τάσεις δέχεται το εξωτερικό περίβλημα, μέσες τάσεις δέχεται το ενδιάμεσο επίστρωμα, ενώ τις μικρότερες τάσεις δέχεται ο πυρήνας. Οι μέγιστες τιμές των τάσεων σε σχέση με αυτές του προηγούμενου δοκιμίου, παρουσιάζουν μια ελαφρά αύξηση.

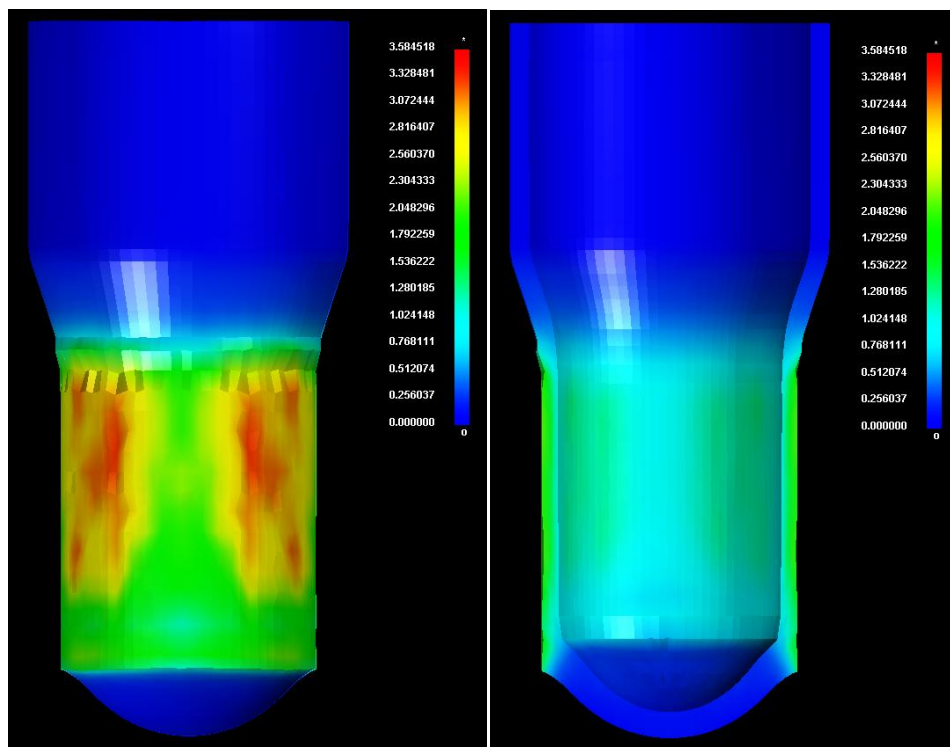
Από την άποψη της κατανομής των τάσεων, ο πυρήνας παρουσιάζει σχεδόν ίδια μορφή με αυτή του δοκιμίου #1, για αυτό και δεν χρήζει περεταίρω ανάλυσης. Διαφορές παρουσιάζονται στα άλλα δύο υλικά.

Το εξωτερικό περίβλημα παρουσιάζει και πάλι τη συγκέντρωση των μέγιστων τάσεων στο εσωτερικό του, μόνο που στην περίπτωση αυτή οι μέγιστες τάσεις δεν εμφανίζονται (μεταξύ άλλων) στο τμήμα που έχει μόλις βγει από το κωνικό τμήμα της μήτρας. Φαίνεται πως ο λόγος για αυτό, είναι ότι την επίδραση της πίεσης του πυρήνα, την απορροφά το ενδιάμεσο επίστρωμα, και άρα αυτή δεν καταπονεί το εξωτερικό περίβλημα. Αντί αυτού, οι τιμές στο συγκεκριμένο σημείο, είναι περίπου οι ίδιες στο εσωτερικό και το εξωτερικό του περιβλήματος. Μια ακόμα διαφορά, είναι

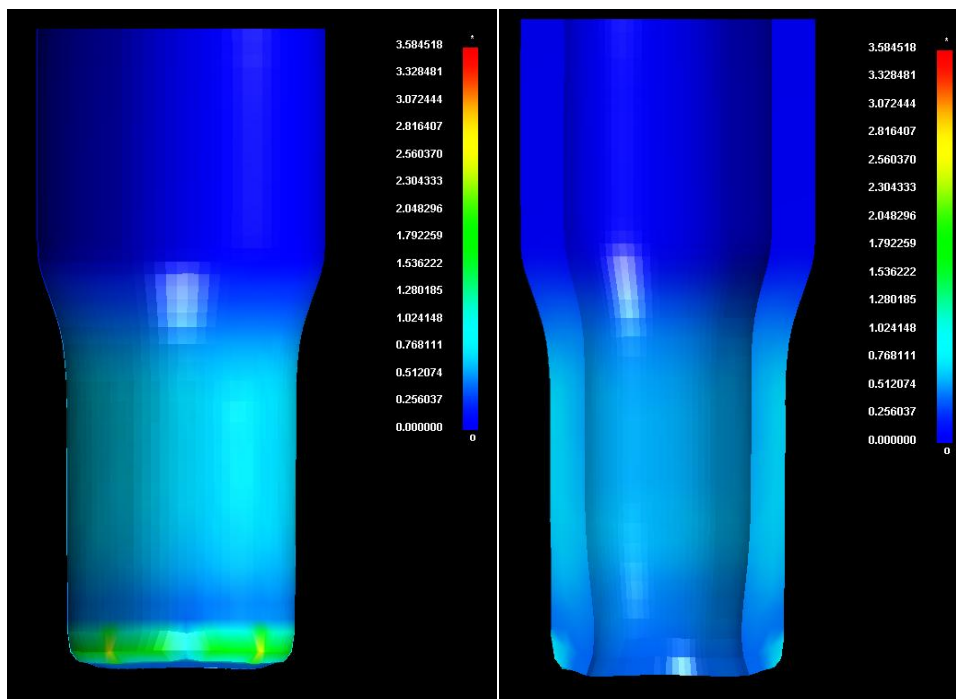
ότι παρατηρείται αύξηση των τάσεων στο σημείο πριν το κωνικό τμήμα. Το φαινόμενο αυτό πιθανώς να οφείλεται στην επίδραση των εσωτερικών υλικών στο περίβλημα, τα οποία πιέζουν το τμήμα αυτό σε μια περιοχή γύρω από την έναρξη της διέλασης, ως αντίδραση στην αλλαγή της μορφής τους. Μεγαλύτερη φαίνεται ότι είναι η επίδραση του ενδιάμεσου επιστρώματος στο συγκεκριμένο φαινόμενο. Τέλος, στο σημείο που το έμβολο πιέζει το δοκίμιο και στο σημείο της ημισφαιρικής διαμόρφωσης, οι τιμές και οι κατανομές των τάσεων είναι περίπου οι ίδιες με πριν.

Το ενδιάμεσο επίστρωμα και στην περίπτωση αυτή παρουσιάζει τις μέγιστες τάσεις στο εσωτερικό του. Βέβαια, σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζονται μεγαλύτερες τάσεις στο σημείο πριν από το κωνικό τμήμα και μικρότερες στο σημείο μετά από αυτό. Ο λόγος για αυτό είναι, αφ' ενός ότι οι τάσεις είναι μεγαλύτερες στο τμήμα πριν τη διέλαση ως αντίδραση του πυρήνα στην αλλαγή της μορφής του, ενώ οι τάσεις είναι μικρότερες μετά από το κωνικό τμήμα, αφού το ποσοστό του πυρήνα στο συγκεκριμένο δοκίμιο είναι μικρότερο από πριν, και άρα και οι τάσεις που αυτός ασκεί (ως αποτέλεσμα της ελαστικής επαναφοράς του) είναι μικρότερες. Είναι εμφανές επίσης, ότι στην περίπτωση αυτή το τασικό πεδίο γύρω από την διόγκωση του επιστρώματος έχει πιο εξομαλυμένες τιμές τάσεων, κάτι που υποδηλώνει μεγαλύτερη ελαστική επαναφορά του υλικού από πριν. Τέλος, παρατηρείται και μια μικρή αύξηση των τάσεων στο κατώτερο μέρος του συγκεκριμένου υλικού, μάλλον λόγω της πιο έντονης διαμόρφωσης μανιταριού στην συγκεκριμένη περίπτωση.

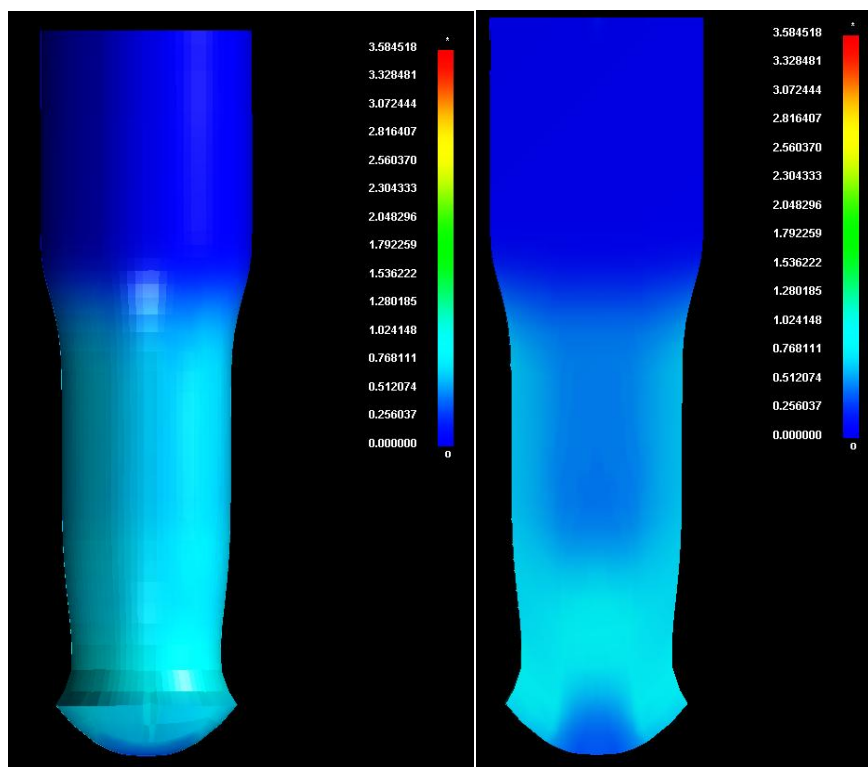
Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται το παραμορφωσιακό πεδίο κάθε υλικού.



Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του εξωτερικού περιβλήματος
(δοκίμιο #2)



Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του ενδιάμεσου επιστρώματος
(δοκίμιο #2)



Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό μέρος και στην τομή του πυρήνα (δοκίμιο #2)

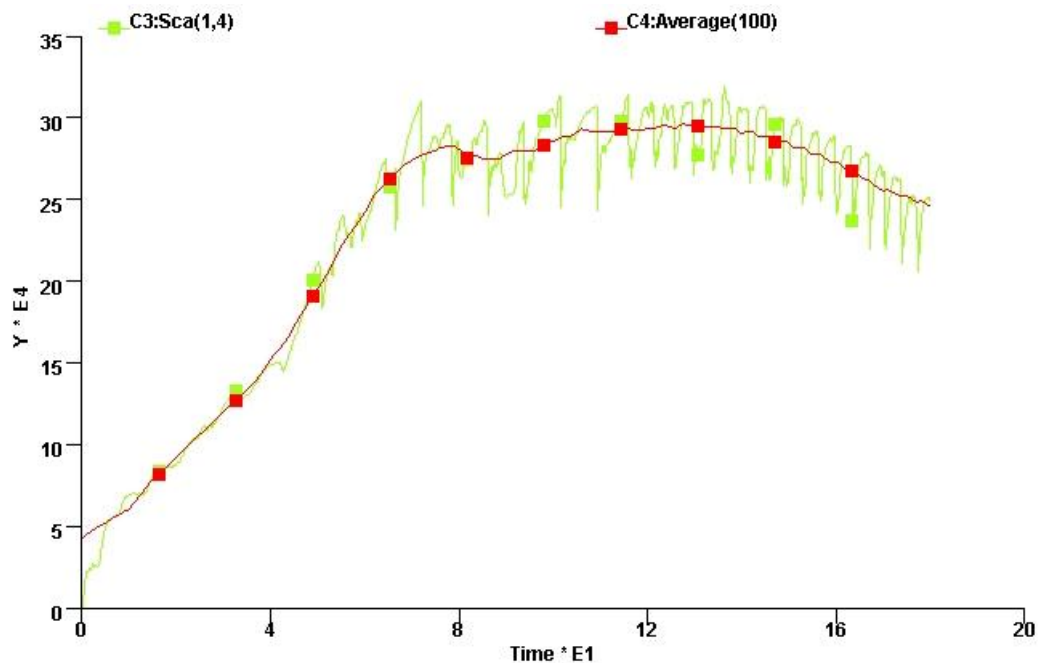
Από τις παραπάνω εικόνες φαίνεται ότι και το παραμορφωσιακό πεδίο είναι περίπου ίδιο με αυτό που υπήρχε στο παραπάνω δοκίμιο. Γενικά, οι μέγιστες τιμές παραμορφώσεων είναι μικρότερες από πριν. Και πάλι όμως, όλο το παραμορφωσιακό πεδίο είναι συγκεντρωμένο στο τμήμα που βρίσκεται μέσα και αμέσως μετά το κωνικό τμήμα, πράγμα λογικό αφού από το σημείο αυτό αρχίζει να πραγματοποιείται η ισοδύναμη παραμόρφωση του δοκιμίου.

Εξαιρέση παρατηρείται στο εξωτερικό περίβλημα, όπου παρατηρείται μεγάλη παραμόρφωση στην εξωτερική επιφάνειά του. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο σφάλμα που προέκυψε κατά την επίλυση, λόγω του τύπου επαφής κόμβων με επιφάνεια και του καμπύλου τμήματος σύνδεσης της μήτρας. Εξαιτίας του συγκεκριμένου σφάλματος τα επιφανειακά στοιχεία παραμορφώθηκαν αρκετά. Παρόλα αυτά, το συγκεκριμένο σφάλμα δεν αποτελεί σημαντικό παράγοντα, όπως προαναφέρθηκε, αφού δεν επηρεάζει τα εξαγόμενα αποτελέσματα του φορτίου.

Όσον αφορά στα άλλα δύο μέρη του δοκιμίου, παρατηρούνται τα ίδια παραμορφωσιακά πεδία, με λίγο διαφορετικές τιμές. Αξίζει να παρατηρηθεί ιδιαίτερα, η αύξηση της ισοδύναμης παραμόρφωσης στο σημείο της στένωσης του πυρήνα. Πάντως γενικά, δεν υπάρχει λόγος για περαιτέρω ανάλυσή τους.

4.3.3 Καμπύλη φορτίου

Από το πρόγραμμα λήφθηκε η παρακάτω καμπύλη φορτίου – χρόνου καθώς και η καμπύλη μέσων τιμών.



Καμπύλη φορτίου – χρόνου και καμπύλη μέσων τιμών αυτής (δοκίμιο #2)

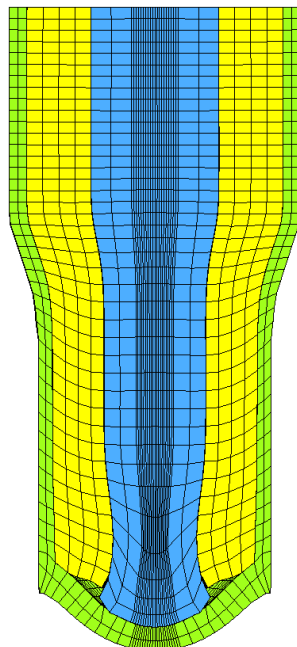
Και για τη συγκεκριμένη καμπύλη μπορεί και πάλι να παρατηρηθεί, ότι είναι ορατές μόνο οι δύο από τις τέσσερις φάσεις της διέλασης. Επίσης, και στην καμπύλη αυτή παρατηρούνται οι τρεις οριζοντιώσεις, μάλλον αποτέλεσμα της διαρροής για κάθε ένα από τα τρία υλικά του δοκιμίου. Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι για την κατασκευή των καμπυλών αυτών, τετραπλασιάστηκαν οι τιμές της καμπύλης που λήφθηκε από το πρόγραμμα (πράσινη καμπύλη), ενώ για τις μέσες τιμές χρησιμοποιήθηκαν οι εκατό γειτονικές τιμές κάθε σημείου.

4.4 Αποτελέσματα υπολογιστικού μέρους για το δοκίμιο #3

Το συγκεκριμένο μοντέλο παρουσίασε παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του αντίστοιχου πειράματος.

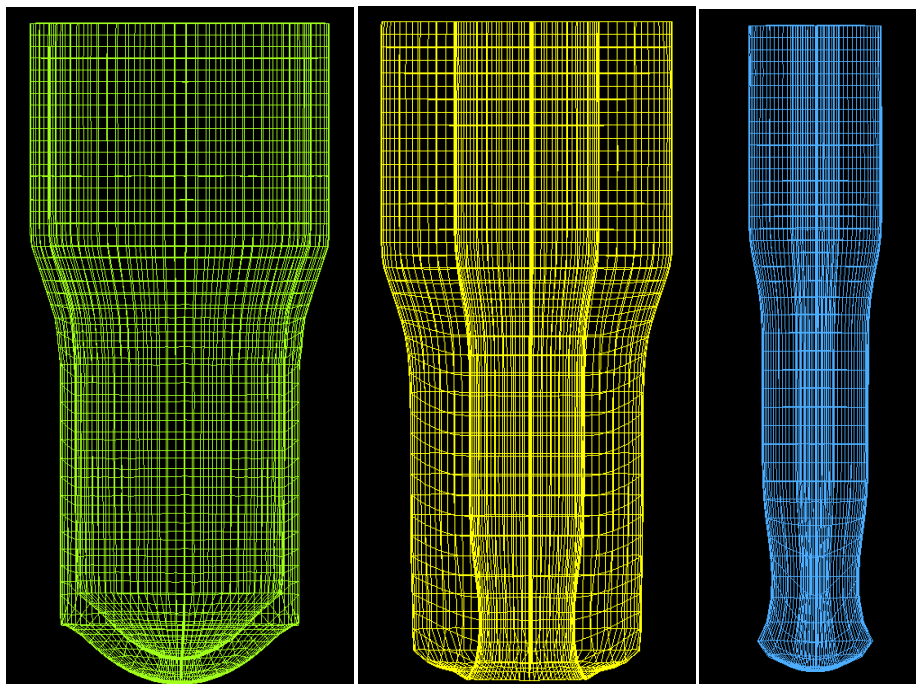
4.4.1 Μορφή δοκιμίου

Από τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου δοκιμίου λήφθηκε η παρακάτω εικόνα σε σχέση με τη μορφή του δοκιμίου (χρονικό βήμα 27 από τα 52).



Τομή της μορφής του δοκιμίου σε τυχαίο χρονικό βήμα (δοκίμιο #3)

Ενώ για κάθε τμήμα ξεχωριστά, λήφθηκαν οι εξής εικόνες.



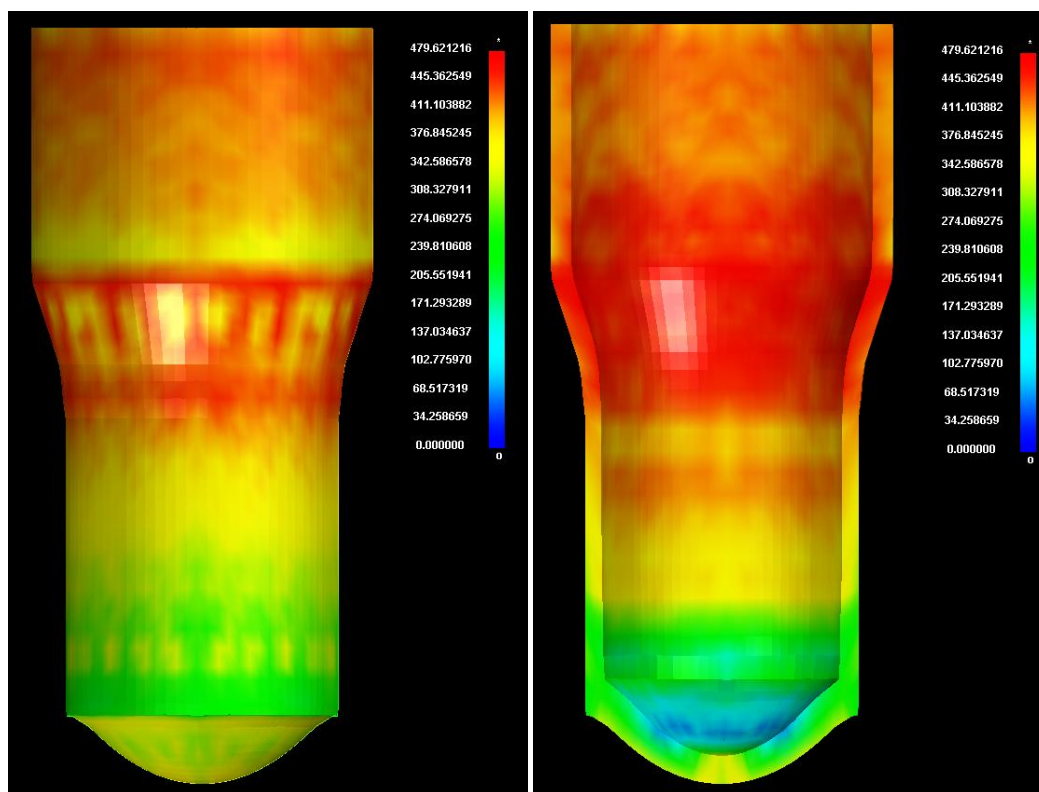
(Από αριστερά προς τα δεξιά) Απεικόνιση χαλύβδινου περιβλήματος, χάλκινου επιστρώματος και αλουμινένιου πυρήνα (δοκίμιο #3)

Και στην περίπτωση αυτή τα συμπεράσματα είναι κοινά όπως και στα προηγούμενα δοκίμια. Χαρακτηριστικό είναι ότι στην περίπτωση αυτή, το σφάλμα που υπήρξε λόγω του συνδυασμού της επαφής κόμβων – επιφανειών και του καμπύλου τμήματος εξόδου της μήτρας, ήταν αισθητά πιο ομαλό. Επίσης, οι διαμορφώσεις του ενδιάμεσου επιστρώματος ήταν μεγαλύτερες σε μέγεθος, προφανώς λόγω της μεγαλύτερης αναλογίας του συγκεκριμένου υλικού στο δοκίμιο. Ακόμα, στο ίδιο τμήμα εμφανίστηκε και το παραβολικό προφίλ στα πεπερασμένα στοιχεία, κάτι που και πάλι έγινε ορατό επειδή το συγκεκριμένο τμήμα ήταν το πιο μεγάλο κατ' όγκο στο δοκίμιο. Τέλος, έντονες διαμορφώσεις υπήρχαν και στον πυρήνα, αν και το μικρό μέγεθος του τμήματος αυτού στον όγκο του δοκιμίου, οδήγησε στο να έχουν (συγκριτικά με το δοκίμιο #2) μικρότερο μέγεθος.

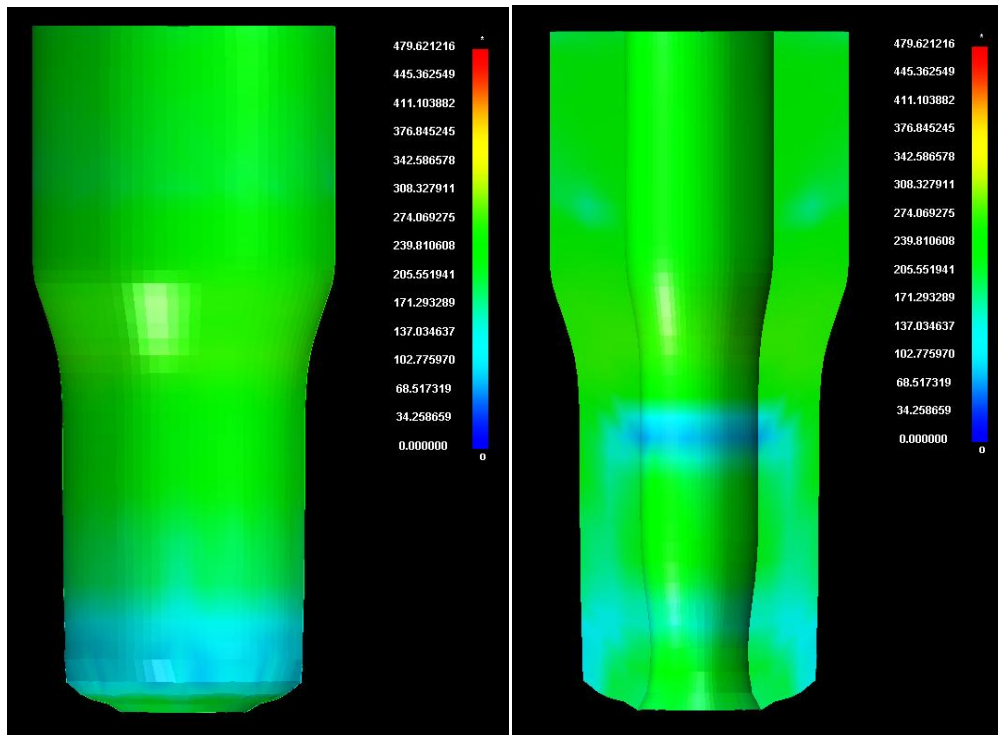
Τα συμπεράσματα περί της δημιουργίας των διαμορφώσεων που παρατηρήθηκαν, σχολιάστηκαν αναλυτικά παραπάνω.

4.4.2 Τάσεις και παραμορφώσεις

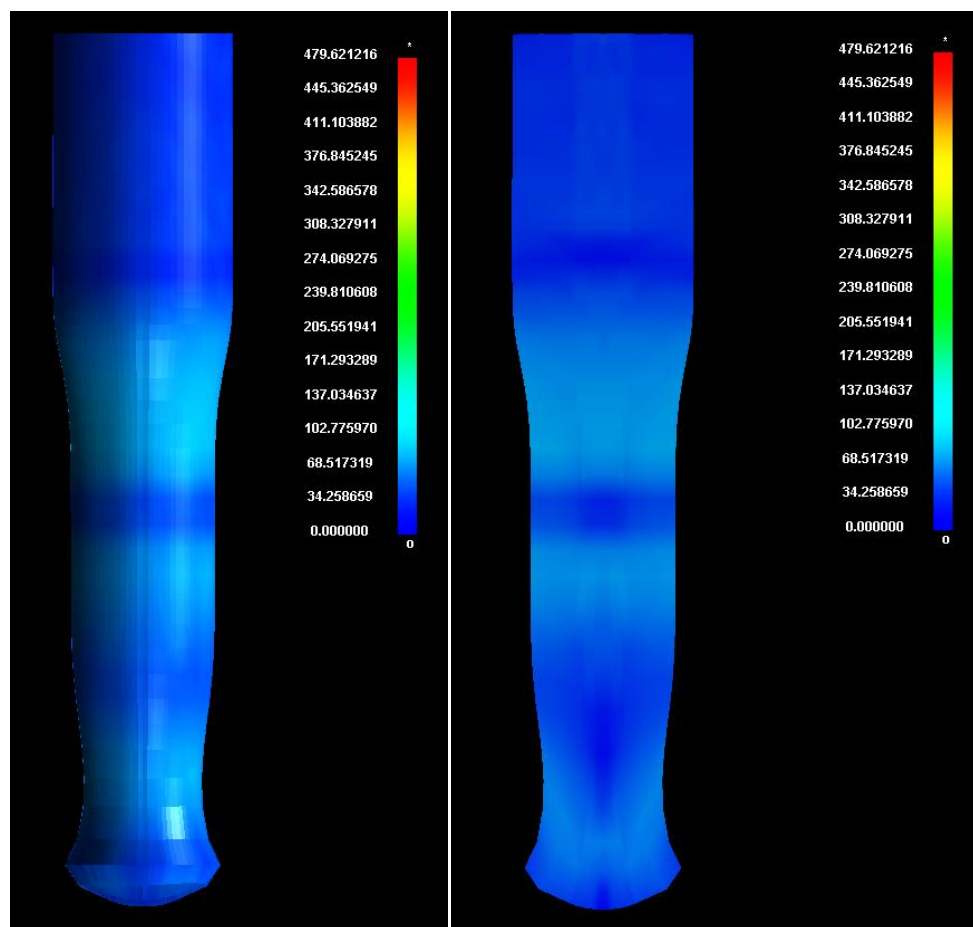
Οι εικόνες των τασικών πεδίων για κάθε ένα από τα τρία υλικά, παρουσιάζονται παρακάτω.



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του εξωτερικού περιβλήματος (δοκίμιο #3)



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του ενδιάμεσου επιστρώματος (δοκίμιο #3)



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό μέρος και στην τομή του πυρήνα (δοκίμιο #3)

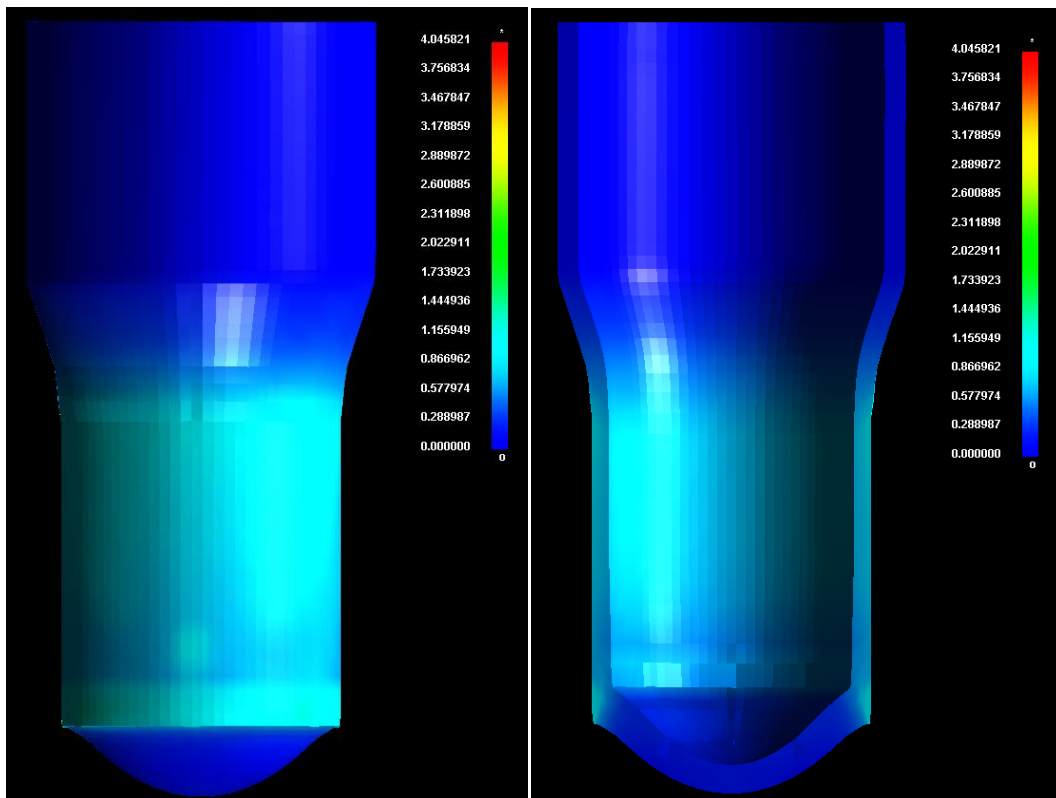
Στα τασικά πεδία, στο μοντέλο αυτό, παρουσιάστηκαν πολλές ομοιότητες με αυτά των προηγούμενων μοντέλων. Στην περίπτωση αυτή βέβαια, οι μέγιστες τιμές των τάσεων σε όλα τα τμήματα ήταν ελαφρά αυξημένες από ότι στην περίπτωση του μοντέλου του δοκιμίου #2. Και πάλι όμως, οι μέγιστες τάσεις παρουσιάστηκαν στο εξωτερικό περίβλημα, οι μέσες τάσεις στο ενδιάμεσο επίστρωμα και οι μικρότερες τάσεις στον πυρήνα του δοκιμίου.

Για το τασικό πεδίο του εξωτερικού περιβλήματος, και πάλι παρατηρήθηκε ότι η μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων βρισκόταν στο εσωτερικό του τμήματος. Επίσης, όπως και στα προηγούμενα μοντέλα οι μέγιστες τάσεις παρατηρήθηκαν στο κωνικό τμήμα, καθώς και λίγο πιο πάνω από το σημείο έναρξης της διέλασης. Αυξημένες ήταν οι τάσεις όμως, και στην περιοχή κοντά στην επαφή του δοκιμίου με το έμβολο, αλλά και στο τμήμα που είχε βγει από το κωνικό τμήμα, αν και οι τιμές δεν ήταν το ίδιο μεγάλες με αυτές του κωνικού τμήματος. Παρόλα αυτά, στην περιοχή κοντά στον πυθμένα, οι τάσεις του περιβλήματος δεν ήταν οι ίδιες. Πιο συγκεκριμένα, ενώ στο εξωτερικό μέρος του πυθμένα παρατηρείται ξανά ένα αυξημένο τασικό πεδίο, στο εσωτερικό του οι τάσεις είναι μικρότερες, και μόνο στο κέντρο του και στην ένωσή του με το κυλινδρικό τμήμα εμφανίζονται μεγαλύτερες τάσεις. Η ύπαρξη τάσεων στα σημεία αυτά είναι δικαιολογημένη, αφού μόνο στα σημεία αυτά υπήρχε επαφή του πυθμένα με τα άλλα δύο υλικά. Έτσι, μπορεί γενικά να ειπωθεί ότι, ενώ οι κατανομές των τάσεων στο εξωτερικό περίβλημα είναι όμοιες με τις αντίστοιχες κατανομές των προηγούμενων μοντέλων, εντούτοις οι τιμές αυτών των τάσεων είναι λίγο μεγαλύτερες. Αυτό μπορεί πιθανώς να δικαιολογηθεί, από τη μεγαλύτερη αναλογία χαλκού του συγκεκριμένου δοκιμίου, ο οποίος ασκούσε μεγαλύτερη πίεση, μετά την παραμόρφωσή του, στο εξωτερικό περίβλημα. Η υπόθεση αυτή φαίνεται να έχει βάση, αν παρατηρηθούν και τα τρία αυτά μοντέλα στη σειρά. Έτσι, παρατηρείται ότι, ενώ οι κατανομές των αυξημένων τάσεων είναι στα ίδια περίπου σημεία, οι τιμές των τάσεων αυτών αυξάνονται όσο αυξάνεται και η αναλογία του χαλκού στο δοκίμιο.

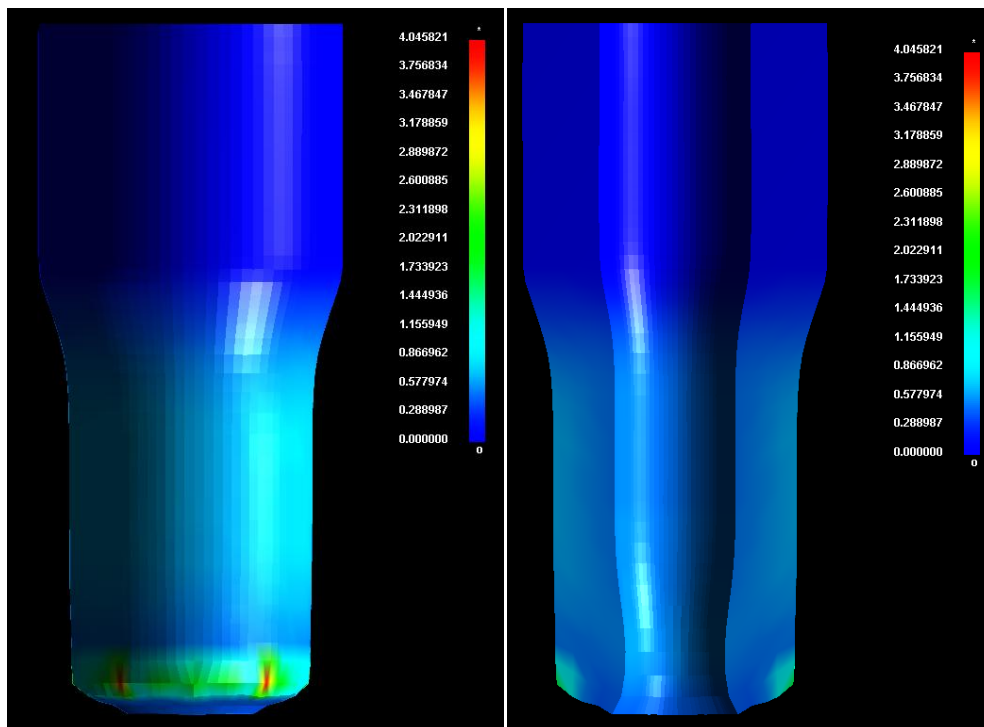
Όσον αφορά στις κατανομές και τις τιμές των τάσεων στο ενδιάμεσο περίβλημα και τον πυρήνα, οι διαφορές είναι πολύ μικρές σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα. Μοναδική ίσως διαφορά που παρουσιάζεται στην τομή του πυρήνα, είναι ότι το προφίλ των τάσεων κατά την έξοδο από το κωνικό τμήμα δεν παρουσίαζε παραβολική μορφή όπως προηγουμένως. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η

διαρροή του πυρήνα δεν ήταν τόσο έντονη στην περίπτωση αυτή, μάλλον λόγω του ότι η αναλογία του πυρήνα ήταν σχετικά μικρή. Παρόλα αυτά, το συγκεκριμένο παραβολικό προφίλ εμφανίστηκε και πάλι στη διαμόρφωση μανιταριού του πυρήνα, όπου ο ρυθμός διαρροής του πυρήνα ήταν αυξημένος, λόγω της στένωσης του αλουμινίου (του πυρήνα) από την ελαστική επαναφορά του χαλκού (του ενδιάμεσου υλικού) λίγο πριν τη συγκεκριμένη διαμόρφωση.

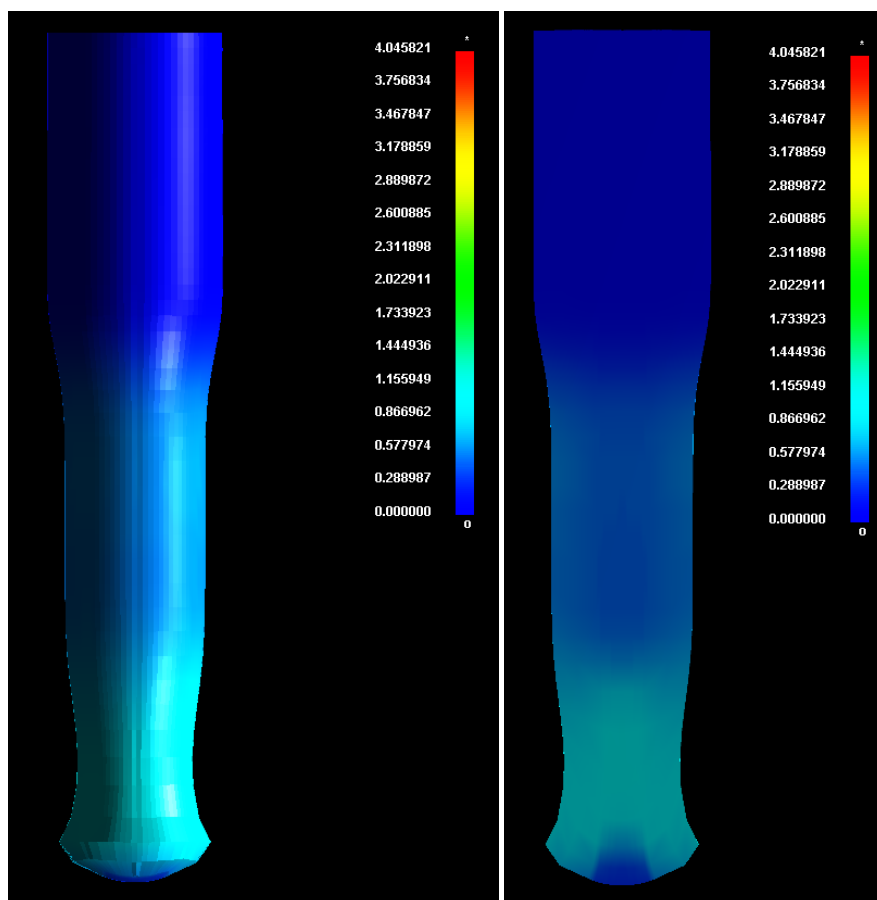
Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζεται το παραμορφωσιακό πεδίο κάθε υλικού.



Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του εξωτερικού περιβλήματος (δοκίμιο #3)



Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του ενδιάμεσου επιστρώματος (δοκίμιο #3)

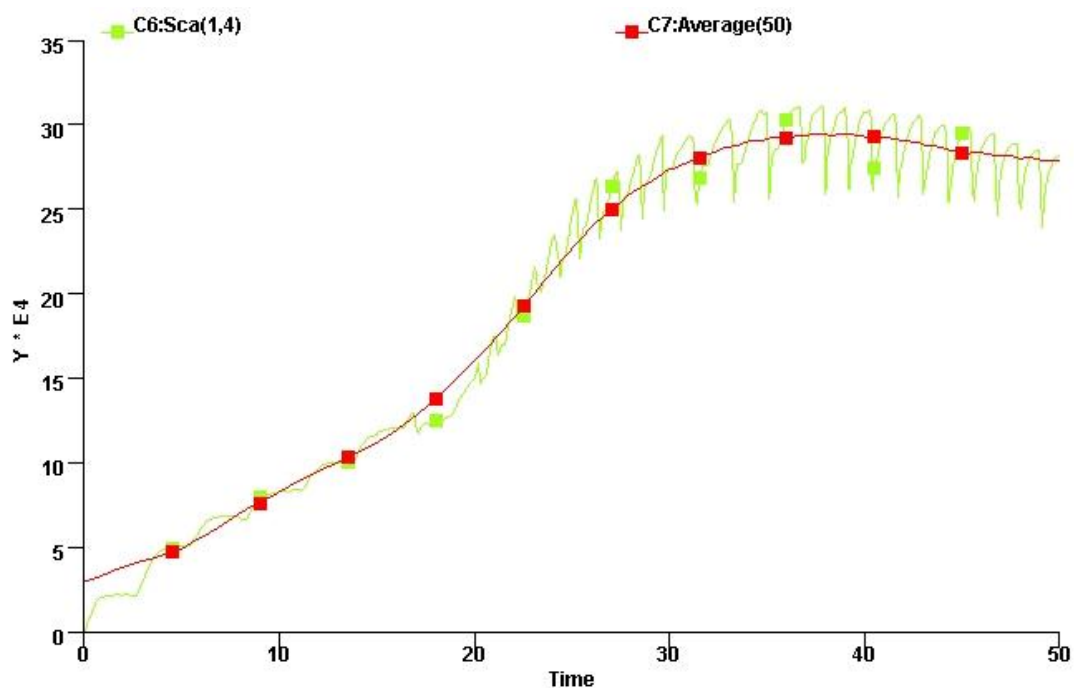


Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό μέρος και στην τομή του πυρήνα (δοκίμιο #3)

Και σε αυτό το μοντέλο, τα παραμορφωσιακά πεδία είναι παρόμοια με των προηγούμενων μοντέλων, και δεν παρουσιάζουν κάτι το διαφορετικό ως προς τη μορφή τους. Για το λόγο αυτό δεν θα αναλυθούν περαιτέρω.

4.4.3 Καμπύλη φορτίου

Για το συγκεκριμένο μοντέλο, η καμπύλη του φορτίου με το χρόνο παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Καμπύλη φορτίου – χρόνου και καμπύλη μέσων τιμών αυτής (δοκίμιο #3)

Από τη συγκεκριμένη καμπύλη, γίνονται και πάλι ορατές μόνο οι δύο από τις τέσσερις φάσεις της διέλασης. Επίσης, και στην περίπτωση του διαγράμματος αυτού, παρουσιάζονται οι τρεις οριζοντιώσεις της καμπύλης. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι η καμπύλη φορτίου – χρόνου κατασκευάστηκε μετά από τον τετραπλασιασμό των τιμών του φορτίου που εξήχθησαν από τον επιλύτη, ενώ η καμπύλη μέσων τιμών, κατασκευάστηκε από τις τιμές των πενήντα γειτονικών σημείων της καμπύλης, και όχι από τις εκατό γειτονικές τιμές, όπως στα προηγούμενα μοντέλα.

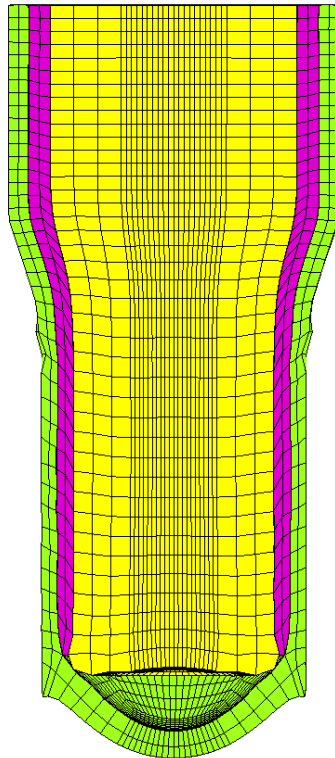
4.5 Αποτελέσματα υπολογιστικού μέρους για το δοκίμιο #4

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί το συγκεκριμένο δοκίμιο δεν παρουσίασε την ίδια συμπεριφορά με τα υπόλοιπα. Συγκεκριμένα, στο συγκεκριμένο δοκίμιο ο πυθμένας αστόχησε, και τα εσωτερικά υλικά διέρρευσαν εκτός των ορίων του περιβλήματος.

Όσον αφορά το μοντέλο του συγκεκριμένου δοκιμίου, αν και πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε συνθήκες παρόμοιες με αυτές του πειράματος (πυθμένα 1,5 mm και υλικό που να μπορεί να αστοχήσει), παρόλα αυτά στα συγκεκριμένα μοντέλα ο πυθμένας δεν αστόχησε. Έτσι, υποτέθηκε ότι η αστοχία του πυθμένα προκλήθηκε από κάποια τοπική ατέλεια του υλικού του περιβλήματος (π.χ. τοπική εργοσκλήρυνση του χάλυβα μετά την κατεργασία του πυθμένα σε τόρνο). Αποφασίστηκε, λοιπόν, το μοντέλο να κατασκευαστεί σε παρόμοια μορφή με αυτή των άλλων δοκιμίων. Ο λόγος ήταν, ότι έπρεπε να μπορέσει να υπάρξει κάποιας μορφής σύγκριση μεταξύ των μοντέλων των διαφόρων δοκιμίων, και έτσι να είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων. Αξίζει να αναφερθεί ότι, παρόλο που δεν υπάρχει σύμπτωση μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και του πειράματος, παρόλα αυτά στα μοντέλα πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές, ώστε η πειραματική καμπύλη με την καμπύλη των υπολογιστικών αποτελεσμάτων να προσεγγίσουν η μία την άλλη. Με άλλα λόγια, χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο όλες οι απαραίτητες συνθήκες που θα απέδιδαν αποτέλεσμα παρόμοια με το πειραματικό, σε περίπτωση που η διέλαση του δοκιμίου αυτού είχε γίνει χωρίς πρόβλημα.

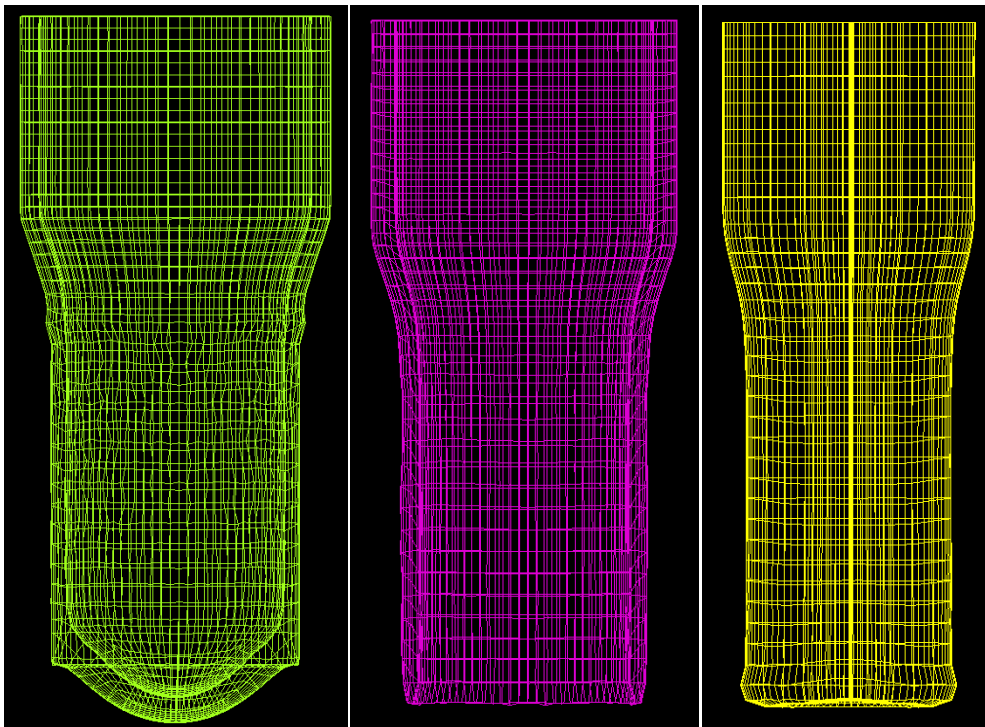
4.5.1 Μορφή δοκιμίου

Η μορφή του δοκιμίου σε ένα τυχαίο χρονικό βήμα (26 στα 37), παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Τομή της μορφής του δοκιμίου σε τυχαίο χρονικό βήμα (δοκίμιο #4)

Επίσης, η μορφή καθενός από τα τρία υλικά ξεχωριστά, φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



(Από αριστερά προς τα δεξιά) Απεικόνιση χαλύβδινου περιβλήματος, αλουμινένιου επιστρώματος και χάλκινου πυρήνα (δοκίμιο #4)

Το εξωτερικό περίβλημα στο μοντέλο αυτό θυμίζει σε μεγάλο βαθμό το αντίστοιχο τμήμα του μοντέλου του δοκιμίου #2. Έτσι, παρατηρείται και εδώ η ύπαρξη του σφάλματος λόγω του τρόπου επαφής των επιφανειών σε συνδυασμό με το καμπύλο τμήμα εξόδου της μήτρας. Βέβαια, η εξομάλυνση αυτού στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν έχει πραγματοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό. Το αποτέλεσμα αυτού είναι, ότι η επιφάνεια του περιβλήματος στην περιοχή που έχει περάσει από το κωνικό τμήμα είναι αισθητικά χειρότερη από τα προηγούμενα μοντέλα. Αυτό το γεγονός θα επηρεάσει τα αποτελέσματα του παραμορφωσιακού πεδίου του περιβλήματος, όπου στη συγκεκριμένη επιφάνεια αναμένονται μεγάλες τιμές παραμορφώσεων, κάτι που δεν συνάδει με τα (οπτικά) αποτελέσματα του πειράματος.

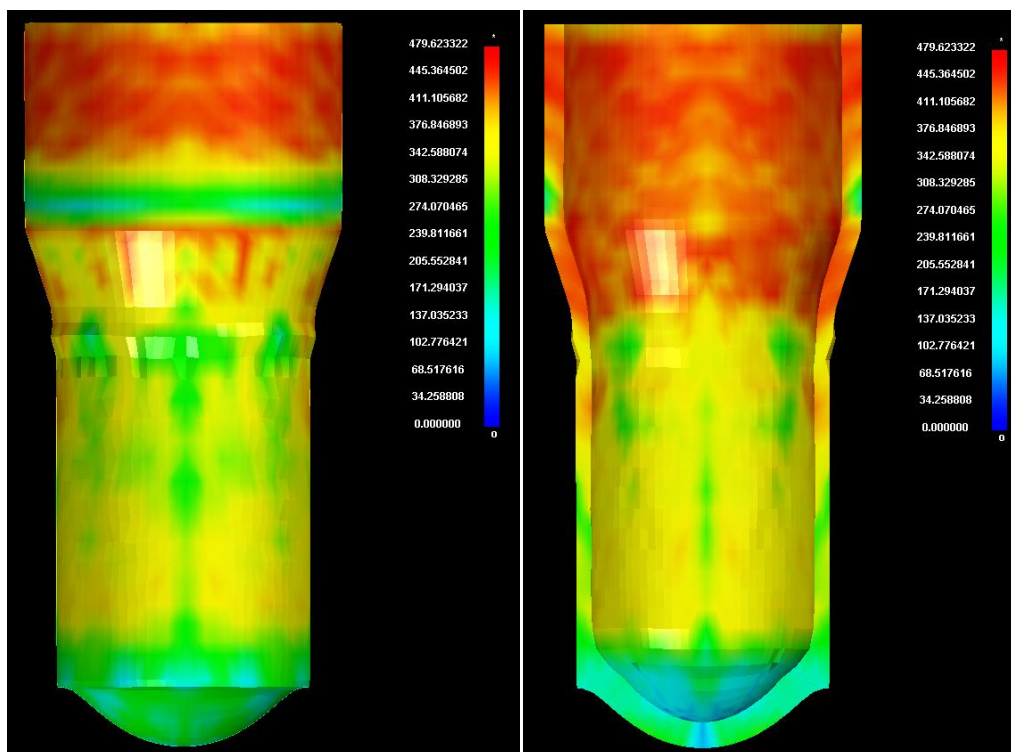
Η συμπεριφορά του ενδιάμεσου επιστρώματος είναι παρόμοια με τη συμπεριφορά του αντίστοιχου τμήματος στο μοντέλο του δοκιμίου #1. Μοναδική διαφορά των δύο αυτών τμημάτων, αποτελεί το κάτω μέρος του τμήματος του συγκεκριμένου μοντέλου, όπου δεν παρατηρείται διόγκωση του. Ο λόγος στον οποίο οφείλεται αυτό το γεγονός, είναι ότι στην περίπτωση αυτή το υλικό του επιστρώματος ήταν αλουμίνιο, το οποίο δεν είχε την τάση για ελαστική επαναφορά. Επίσης, παρατηρείται μια λέπτυνση του κατώτατου σημείου του επιστρώματος, μάλλον εξαιτίας της αντίστοιχης πλευρικής διαρροής του πυρήνα στο σημείο αυτό.

Αντίθετα με τα άλλα δύο τμήματα του δοκιμίου, ο πυρήνας δεν διαμορφώθηκε με τον ίδιο τρόπο με τα προηγούμενα μοντέλα. Έτσι, αν και στο συγκεκριμένο τμήμα παρατηρήθηκαν τα παραβολικά προφίλ μετά το κωνικό τμήμα της μήτρας, αυτά δεν ήταν μεγάλα και εξομαλύνθηκαν από τη, μικρή στην περίπτωση αυτή, ελαστική επαναφορά του υλικού. Βέβαια, δεν θα ήταν δυνατό να ενισχυθούν όπως στα δοκίμια #1, #2 και #3, αφού το αλουμίνιο δεν δημιούργησε στένωση στον πυρήνα. Αποτέλεσμα ήταν να μην παρουσιαστεί στη συγκεκριμένη περίπτωση το προφίλ μανιταριού των προηγούμενων δοκιμίων. Παρατηρήθηκε επίσης, μια μικρή πλευρική διαρροή του πυρήνα έξω από τα όρια του ενδιάμεσου επιστρώματος. Λόγω αυτής της πλευρικής διαρροής και σύμφωνα με την αρχή διατήρησης του όγκου, δημιουργήθηκε ένας μικρός κρατήρας στο κέντρο πυρήνα. Έτσι, ο όγκος του υλικού που διέφυγε από τον κρατήρα, ήταν αυτός που διέρρευσε πλευρικά. Τέλος, σε σχέση με την ελαστική επαναφορά του χαλκού στην προκειμένη περίπτωση, φαίνεται ότι διατηρήθηκε σε μικρό βαθμό, λόγω του ότι το αλουμίνιο ήταν σε μικρή αναλογία στο δοκίμιο. Έτσι ο χαλκός έπρεπε να υπερνικήσει στη συνέχεια τον χάλυβα για να

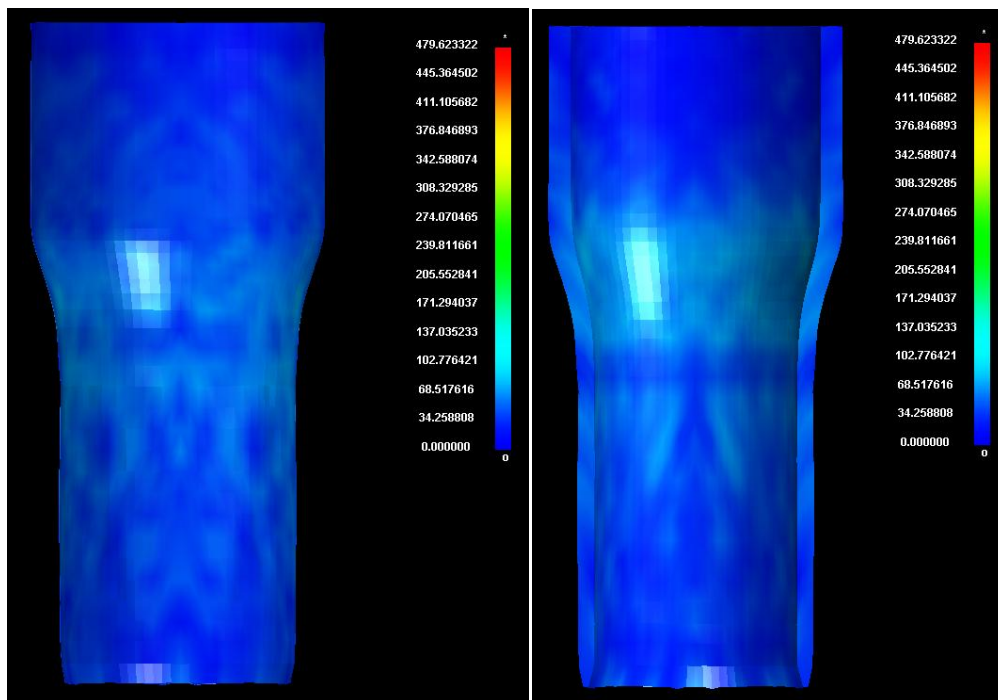
συνεχίσει την επαναφορά του, κάτι που όμως δεν ήταν εφικτό. Για το λόγο αυτό, η επαναφορά σταμάτησε στα πλαίσια που το αλουμίνιο στο ενδιάμεσο επίστρωμα μπορούσε να συμπιεστεί.

4.5.2 Τάσεις και παραμορφώσεις

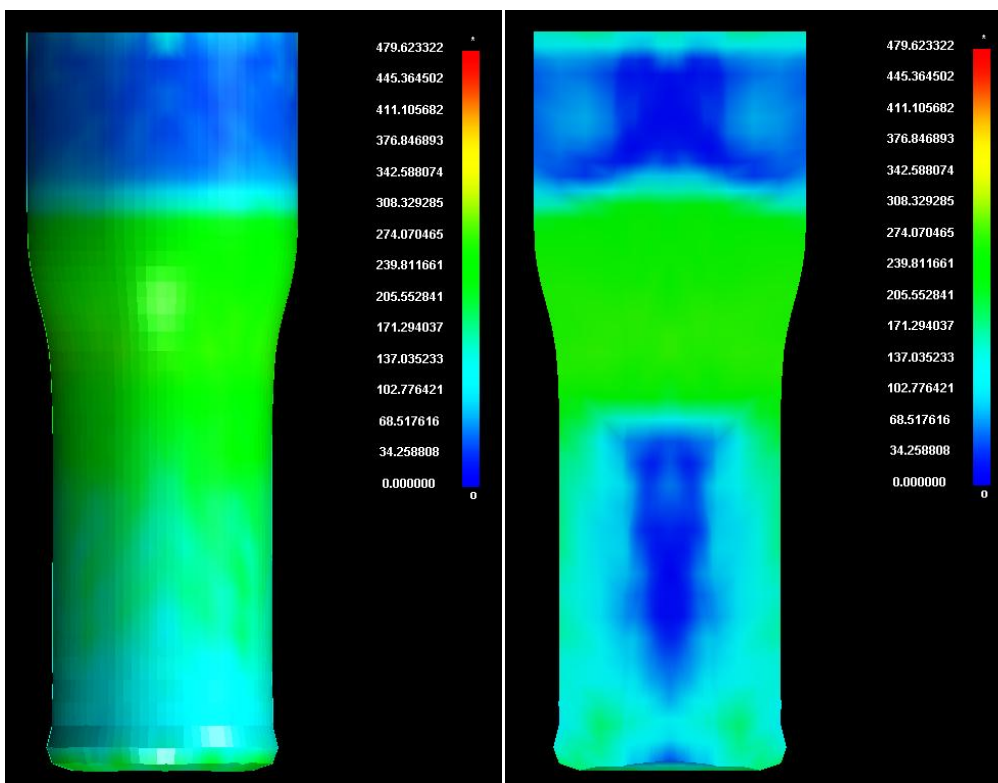
Οι εικόνες των τασικών πεδίων των μερών του δοκιμίου που πάρθηκαν από το πρόγραμμα, παρουσιάζονται παρακάτω.



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του εξωτερικού περιβλήματος (δοκίμιο #4)



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του ενδιάμεσου επιστρώματος (δοκίμιο #4)



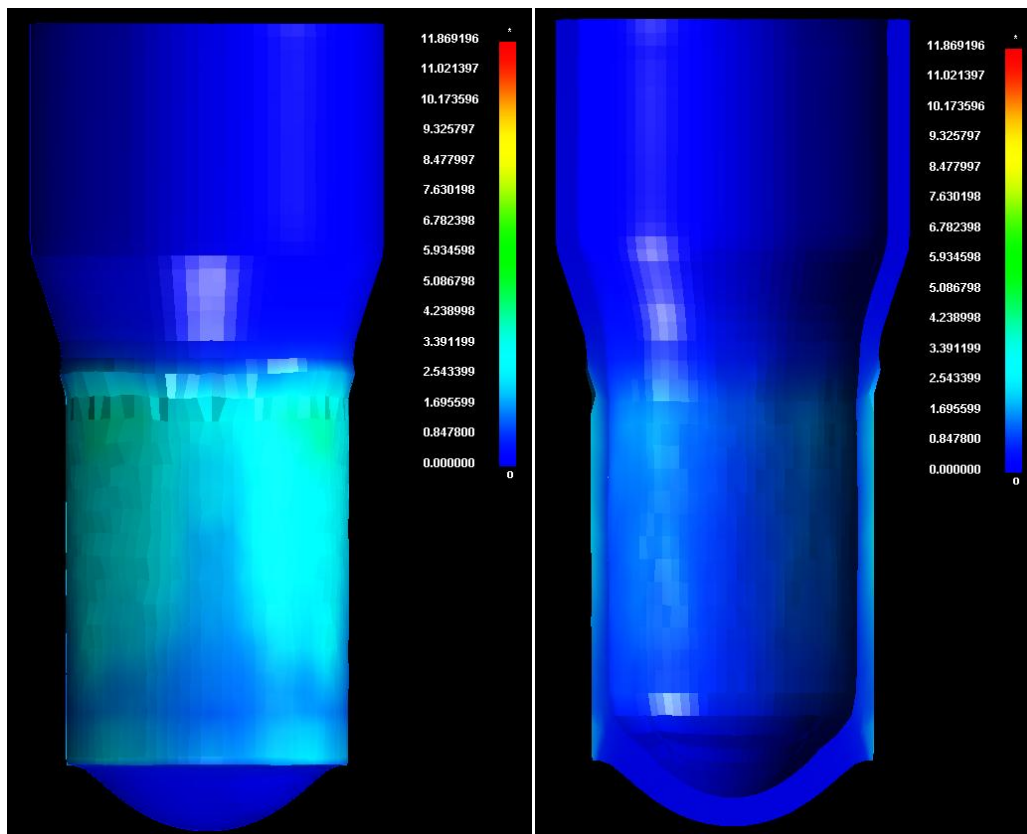
Τασικό πεδίο στο εξωτερικό μέρος και στην τομή του πυρήνα (δοκίμιο #4)

Το τασικό πεδίο του εξωτερικού περιβλήματος, μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με αυτό του μοντέλου του δοκιμίου #3. Οι μέγιστες τάσεις σε αυτό παρουσιάζονται

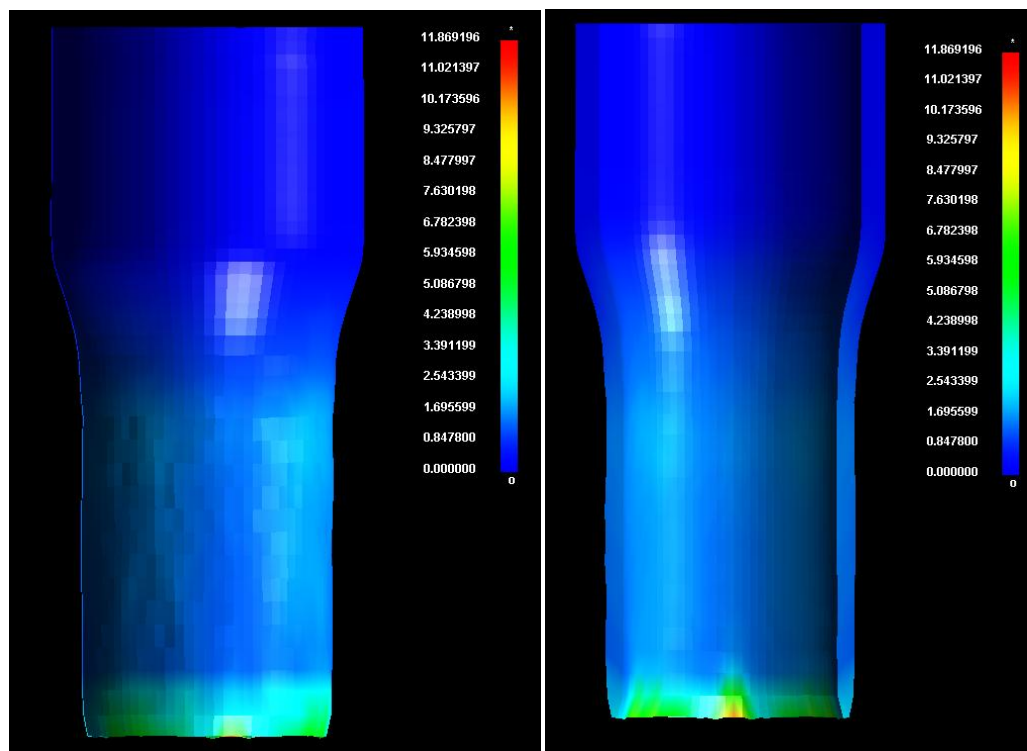
κυρίως στο κωνικό τμήμα της μήτρας, στη περιοχή πάνω από αυτό και στην περιοχή κοντά στην επαφή με το έμβολο. Αυξημένες τάσεις παρατηρούνται και στο τμήμα του περιβλήματος μετά το κωνικό τμήμα της μήτρας. Επίσης, η συγκέντρωση τάσεων είναι πιο έντονη στο εσωτερικό μέρος του περιβλήματος από ότι στο εξωτερικό. Παρόλα αυτά, παρατηρείται ότι σε αντίθεση με το μοντέλο του δοκιμίου #3, οι μέγιστες συγκεντρώσεις τάσεων είναι διάσπαρτες στις προαναφερθείσες περιοχές (σε αντίθεση με του #3 όπου ήταν σε μεγάλο βαθμό συνεχόμενες), ενώ υπάρχει και μια ζώνη χαμηλών τάσεων στο εξωτερικό μέρος του περιβλήματος πάνω από το κωνικό τμήμα, κάτι που δεν παρατηρήθηκε προηγουμένως. Επίσης, ο πυθμένας έχει χαμηλότερο τασικό πεδίο, προφανώς λόγω της μικρότερης επαφής του με τα εσωτερικά μέρη. Πάντως, και στα δύο αυτά μοντέλα, οι τιμές των μέγιστων τάσεων είναι σχεδόν οι ίδιες.

Στα άλλα δύο τμήματα του δοκιμίου, φαίνεται πως τα τασικά πεδία είναι παρόμοια με τα πεδία των αντίστοιχων υλικών (όχι τμημάτων) των προηγούμενων μοντέλων. Έτσι, στην περίπτωση αυτή ο πυρήνας καταπονείται από μέσης τιμής ισοδύναμες τάσεις, ενώ το ενδιάμεσο επίστρωμα καταπονείται από χαμηλής τιμής ισοδύναμες τάσεις. Το τασικό πεδίο του ενδιάμεσου επιστρώματος παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές στο κωνικό τμήμα της μήτρας, κάτι το οποίο όπως προαναφέρθηκε είναι λογικό. Επίσης, και ο πυρήνας εμφανίζει τις μέγιστες τιμές των τάσεων του στην ίδια περιοχή. Κατά τα άλλα, και τα δύο τμήματα εμφανίζουν μικρή συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή μετά το κωνικό τμήμα της μήτρας, γεγονός που, για τον μεν πυρήνα, οφείλεται στην εξομάλυνση του αντίστοιχου πεδίου μετά την κατεργασία (κάτι που είχε ως αποτέλεσμα την ελαστική επαναφορά του υλικού), ενώ για το δε ενδιάμεσο επίστρωμα, οφείλεται στην πίεση από την μικρή ελαστική επαναφορά του υλικού του πυρήνα. Τέλος, παρατηρείται και ένα σχετικά αυξημένο πεδίο, στην επαφή του εμβόλου με το δοκίμιο, καθώς και στην περιφέρεια του κρατήρα του πυρήνα, εκεί δηλαδή που υπάρχει επαφή με τον πυθμένα.

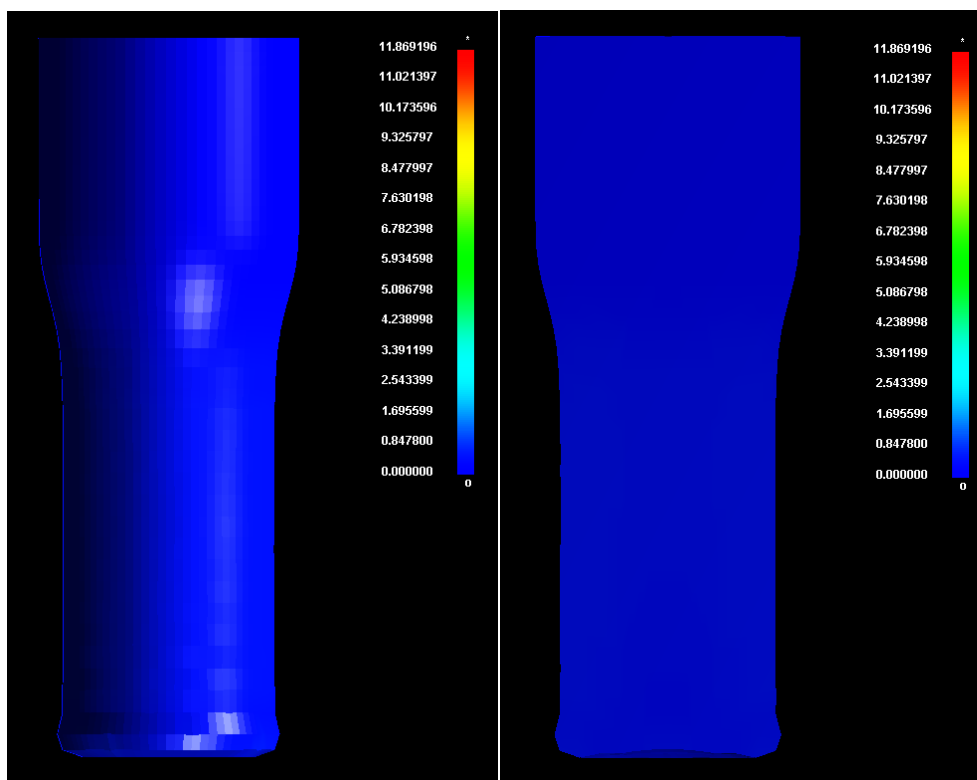
Στη συνέχεια, ακολουθούν οι εικόνες των παραμορφωσιακών πεδίων κάθε υλικού.



Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του εξωτερικού περιβλήματος
(δοκίμιο #4)



Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του ενδιάμεσου επιστρώματος
(δοκίμιο #4)

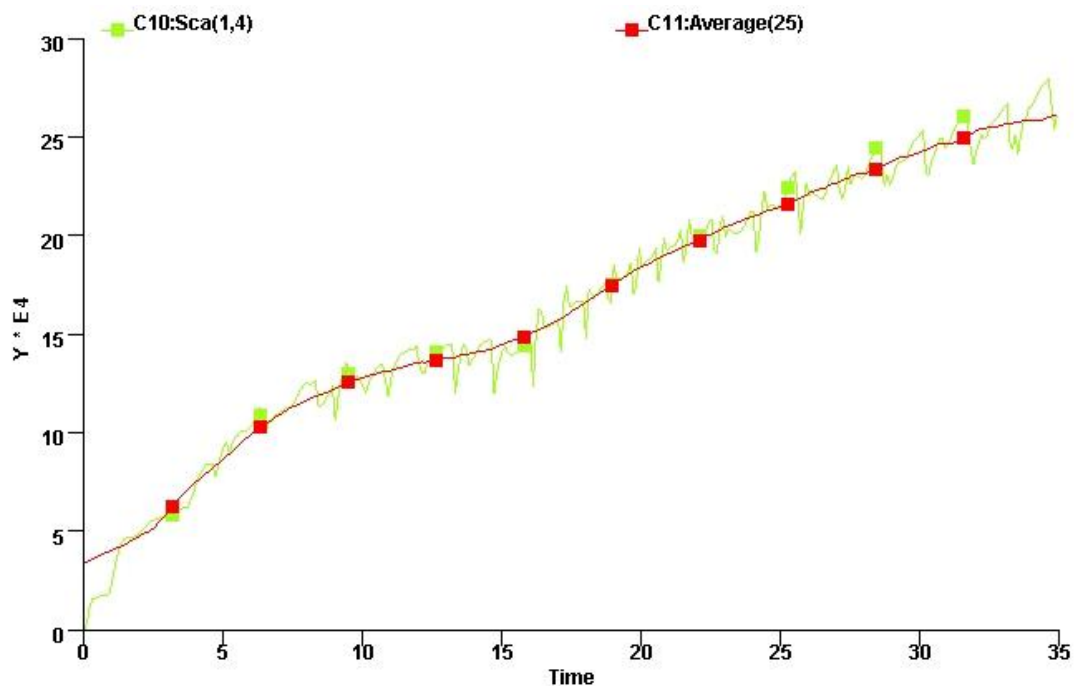


Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό μέρος και στην τομή του πυρήνα (δοκίμιο #4)

Από τα παραπάνω παραμορφωσιακά πεδία, οι πληροφορίες που λαμβάνονται είναι αρκετά παραπλανητικές. Ο λόγος είναι ότι, όπως φαίνεται από τον χρωματικό κώδικα, οι μέγιστες παραμορφώσεις του δοκιμίου έχουν πολύ υψηλές τιμές. Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι οι μέγιστες παραμορφώσεις των υλικών πραγματοποιήθηκαν, είτε στο κάτω μέρος του ενδιάμεσου επιστρώματος, κάτι το οποίο φαίνεται ότι είναι ένα συστηματικό σφάλμα της επίλυσης, είτε στην εξωτερική επιφάνεια του εξωτερικού περιβλήματος, όπου και πάλι λόγω σφάλματος αναμένονταν υψηλές τιμές των παραμορφώσεων. Αποτέλεσμα αυτών είναι ότι οι πραγματικές παραμορφώσεις των υλικών, οι οποίες είναι αρκετά χαμηλότερες, χάνονται και δεν απεικονίζονται. Έτσι, τα συγκεκριμένα αποτελέσματα δεν θα ληφθούν υπ' όψιν.

4.5.3 Καμπύλη φορτίου

Η καμπύλη φορτίου – χρόνου στην προκειμένη περίπτωση, καθώς και η καμπύλη των μέσων τιμών του φορτίου, παρουσιάζονται παρακάτω.



Καμπύλη φορτίου – χρόνου και καμπύλη μέσων τιμών αυτής (δοκίμιο #4)

Η συγκεκριμένη καμπύλη εσφαλμένα παρουσιάζει μόνο τη μία από τις φάσεις της διέλασης. Το σφάλμα αυτό πραγματοποιήθηκε εξαιτίας των ρυθμίσεων που έγιναν στο μοντέλο, ώστε η συγκεκριμένη καμπύλη να πλησιάσει σε αυτήν των πειραματικών αποτελεσμάτων. Έτσι, επειδή η καμπύλη των πειραματικών αποτελεσμάτων είχε παρόμοια μορφή, επιλέχθηκε το τμήμα εξόδου της μήτρας στο μοντέλο να επεκταθεί, έτσι ώστε η πρώτη φάση της διέλασης να μην λάβει τέλος και η καμπύλη να πάρει την παραπάνω μορφή.

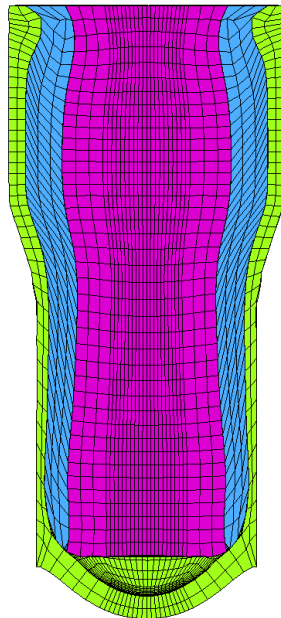
Χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης καμπύλης είναι η εμφάνιση μόνο δύο οριζοντιώσεων. Η τρίτη οριζοντίωση δεν πραγματοποιήθηκε, αφού η συγκεκριμένη φάση της διέλασης δεν έλαβε τέλος. Πάντως, παρουσιάζεται μια μορφή κοντινή σε αυτή μιας οριζοντίωσης, περίπου στην τιμή φορτίου των $20 \cdot 10^4$ N, η οποία όμως συνεχίζει μετά από λίγο χρόνο να αυξάνεται ξανά.

4.6 Αποτελέσματα υπολογιστικού μέρους για το δοκίμιο #5

Η συμπεριφορά του δοκιμίου στο μοντέλο αυτό ήταν παρόμοια με εκείνη του δοκιμίου στο αντίστοιχο πείραμα.

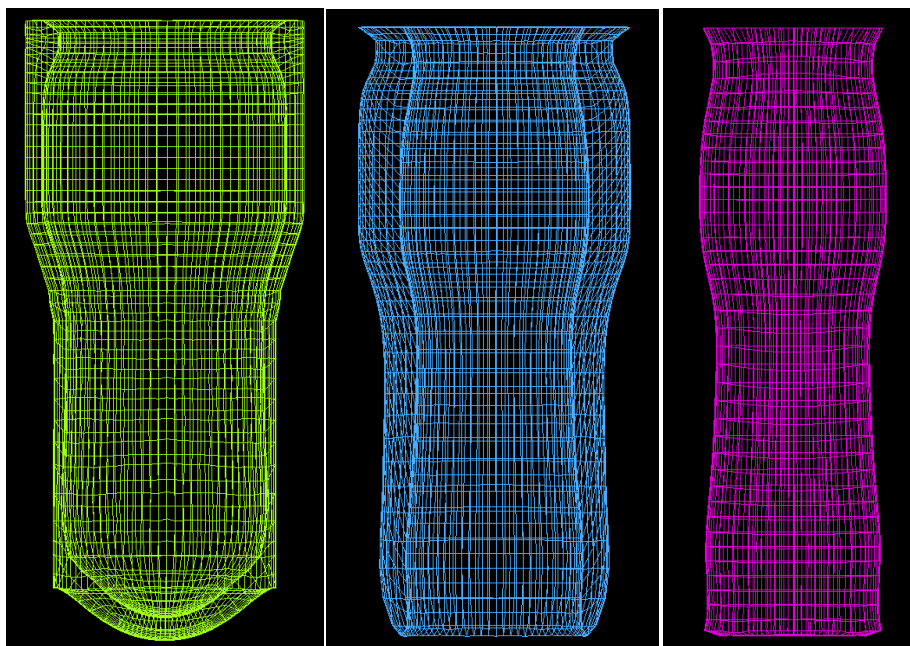
4.6.1 Μορφή δοκιμίου

Η μορφή του δοκιμίου στην περίπτωση αυτή παρουσιάζεται για ένα τυχαίο χρονικό βήμα (40 από 62), στην παρακάτω εικόνα.



Τομή της μορφής του δοκιμίου σε τυχαίο χρονικό βήμα (δοκίμιο #5)

Επίσης, η μορφή κάθε υλικού ξεχωριστά παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες.



(Από αριστερά προς τα δεξιά) Απεικόνιση χαλύβδινου περιβλήματος, αλουμινένιου επιστρώματος και χάλκινου πυρήνα (δοκίμιο #5)

Η μορφοποίηση του συγκεκριμένου μοντέλου παρουσίασε στοιχεία, τα οποία δεν είχαν παρουσιαστεί σε προγενέστερο μοντέλο.

Το εξωτερικό περίβλημα είχε στο μεγαλύτερο ποσοστό του, παρόμοια μορφή με αυτήν των αντίστοιχων τμημάτων, των προηγούμενων μοντέλων. Οι διαφοροποιήσεις που παρατηρήθηκαν ήταν μια ελαφρά στένωση του περιβλήματος λίγο πιο πάνω από τον πυθμένα του δοκιμίου και μια διόγκωση αυτού κοντά στο σημείο επαφής με το έμβολο. Η πρώτη διαφοροποίηση συμπίπτει γεωμετρικά με μια διόγκωση που παρατηρήθηκε στον πυρήνα, η οποία εκτός από τη συγκεκριμένη παραμόρφωση του περιβλήματος, προκάλεσε και μια παραμόρφωση του ενδιάμεσου επιστρώματος. Η δεύτερη διαφοροποίηση φαίνεται πως είναι αποτέλεσμα της αυξημένης πίεσης του εμβόλου σε κάποιο σημείο της κατεργασίας. Ο λόγος για την ύπαρξη αυξημένης πίεσης από μεριάς εμβόλου, πιθανώς να οφείλεται σε κάποια αύξηση τριβών κατά την κατεργασία, αφού ο συγκεκριμένος παράγοντας μπορεί να μεταβληθεί κατά τη διάρκειά της. Το πιο πιθανό (χρονικό) σημείο αύξησης των τριβών, φαίνεται να ήταν κατά την φάση της διόγκωσης του πυρήνα του δοκιμίου, ο οποίος αύξησε την πίεση στο εξωτερικό περίβλημα. Αυτό το γεγονός επιβεβαιώνεται από την εμφάνιση λέπτυνσης του εξωτερικού περιβλήματος στην ίδια περιοχή. Έτσι, προκλήθηκε παράλληλα και αύξηση της πίεσης μεταξύ του εξωτερικού περιβλήματος και της μήτρας, κάτι που αύξησε την κάθετη αντίδραση στη συγκεκριμένη επαφή και άρα και την τριβή. Η διόγκωση του εξωτερικού περιβλήματος, από την άλλη, διείσδυσε εύκολα στα άλλα δύο τμήματα του δοκιμίου, αφού ο χάλυβας ήταν πιο ισχυρός από τα άλλα δύο υλικά. Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι και στην περίπτωση αυτή παρατηρήθηκε το σφάλμα λόγω του συνδυασμού του τύπου επαφής κόμβων – επιφανειών και του καμπύλου τμήματος εξόδου της μήτρας, το οποίο είχε μορφή αντίστοιχη με αυτή του μοντέλου #3.

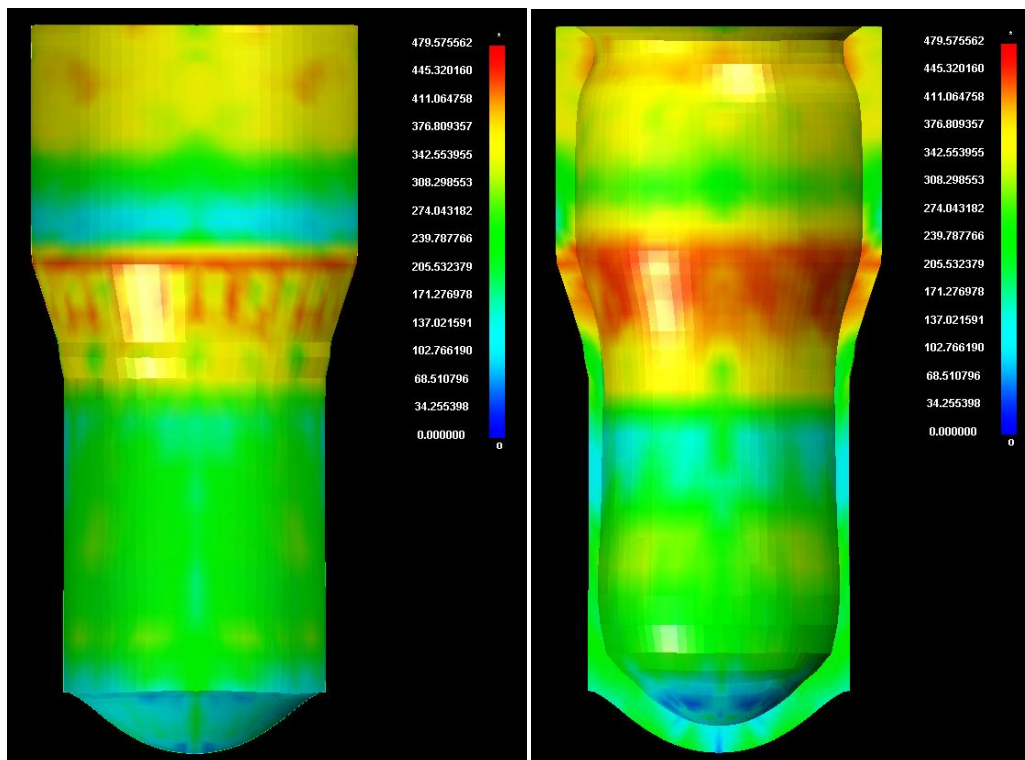
Το ενδιάμεσο επίστρωμα είχε γενικά παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του αντίστοιχου τμήματος στο μοντέλο του δοκιμίου #4. Οι μόνες διαφοροποιήσεις που παρατηρήθηκαν σε αυτήν την περίπτωση, οφείλονται στις διογκώσεις των άλλων δύο τμημάτων του δοκιμίου. Έτσι, το ενδιάμεσο επίστρωμα παραμορφώθηκε στο άνω μέρος του, λόγω της διόγκωσης του εξωτερικού περιβλήματος και στο κάτω μέρος το, λόγω της διόγκωσης του πυρήνα. Μάλιστα, η διαμόρφωση του πυρήνα, προκάλεσε και διάνοιξη της διαμέτρου του ενδιάμεσου επιστρώματος στο κάτω τμήμα του. Αντίστοιχα, η διαμόρφωση του εξωτερικού περιβλήματος προκάλεσε

σμίκρυνση της διαμέτρου του επιστρώματος. Αξίζει να αναφερθεί ότι το προφίλ των πεπερασμένων στοιχείων στην περίπτωση αυτή, ήταν πιο έντονο από αυτό των αντίστοιχων τμημάτων των προηγούμενων μοντέλων. Έτσι, η παραβολική μορφή των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάστηκε στο σημείο της διείσδυσης του χάλυβα, στη συνέχεια αυτή ενισχύθηκε μετά το κωνικό τμήμα της μήτρας, ενώ μετά το σημείο της διόγκωσης του χαλκού άρχισε να εξομαλύνεται.

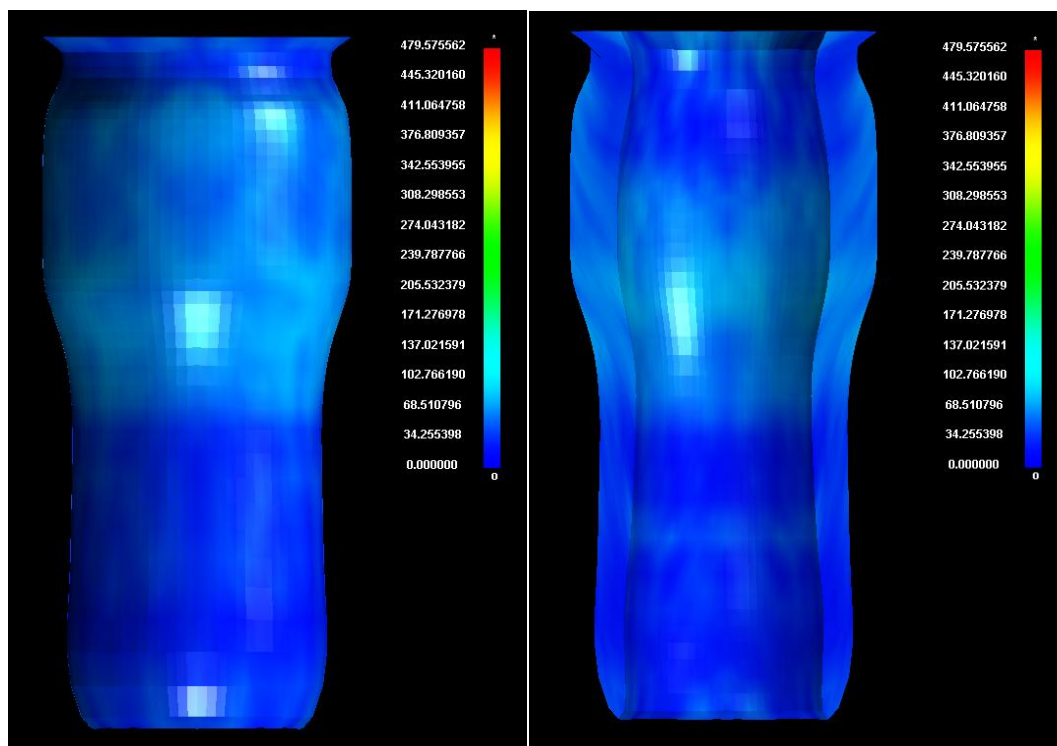
Ο πυρήνας σε αντίθεση με όλα τα προηγούμενα μοντέλα, παρουσίασε μια έντονη διόγκωση στο κάτω μέρος του. Η διόγκωση αυτή μπορεί να παρομοιαστεί με αντίστοιχες διαμορφώσεις που παρουσίαζε ο χαλκός σε προηγούμενα δοκίμια, αν και στις περιπτώσεις αυτές το χάλκινο τμήμα του δοκιμίου ήταν το ενδιάμεσο επίστρωμα. Το φαινόμενο αυτό πιθανώς οφείλεται στην ελαστική επαναφορά του υλικού μετά την κατεργασία, η οποία στην προκειμένη περίπτωση κατάφερε να διεισδύσει μέσα στον χάλυβα, ενώ παραμόρφωσε και το ενδιάμεσο επίστρωμα. Αυτό σημαίνει ότι η ελαστική επαναφορά του υλικού στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν πολύ πιο ισχυρή από πριν. Ο λόγος για αυτό, πιθανώς έγκειται αφ' ενός στην αρκετά υψηλή αναλογία του χαλκού στο δοκίμιο (δυνατότητα μεγαλύτερης ελαστικής επαναφοράς και άρα μεγαλύτερη άσκηση πίεσης), και αφ' ετέρου στο ότι ο χαλκός είχε τη θέση του πυρήνα του δοκιμίου (ελαστική επαναφορά προς μία μόνο κατεύθυνση σε κάθε σημείο της περιμέτρου του πυρήνα). Τέλος, στο άνω μέρος του πυρήνα, παρουσιάστηκε σμίκρυνση της διαμέτρου του, κάτι το οποίο οφείλεται στη διείσδυση του εξωτερικού περιβλήματος στη συγκεκριμένη περιοχή.

4.6.2 Τάσεις και παραμορφώσεις

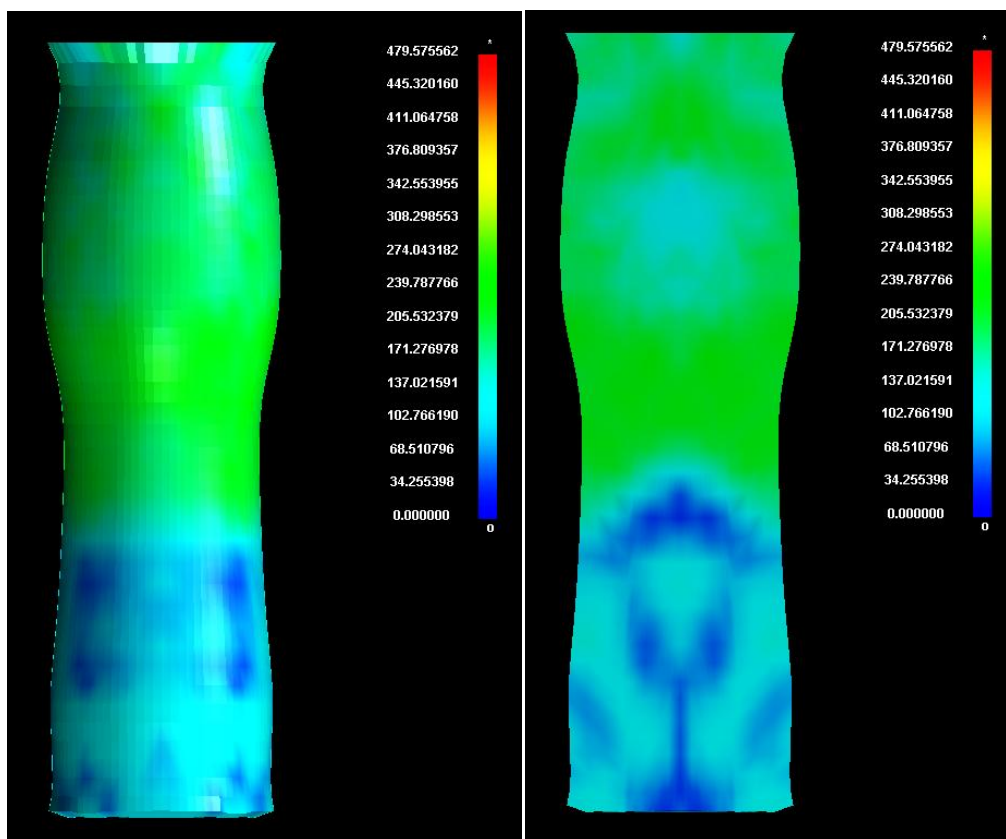
Σχετικά με τα τασικά πεδία κάθε υλικού, λήφθηκαν οι παρακάτω εικόνες από το πρόγραμμα.



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του εξωτερικού περιβλήματος (δοκίμιο #5)



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του ενδιάμεσου επιστρώματος (δοκίμιο #5)



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό μέρος και στην τομή του πυρήνα (δοκίμιο #5)

Γενικά και σε αυτό το μοντέλο οι υψηλές τάσεις εμφανίζονται στο εξωτερικό περίβλημα, οι μέσες τάσεις στον πυρήνα και οι μικρότερες τάσεις στο ενδιάμεσο επίστρωμα. Οι τιμές των μεγαλύτερων τάσεων είναι περίπου ίδιες με αυτές του δοκιμίου #4.

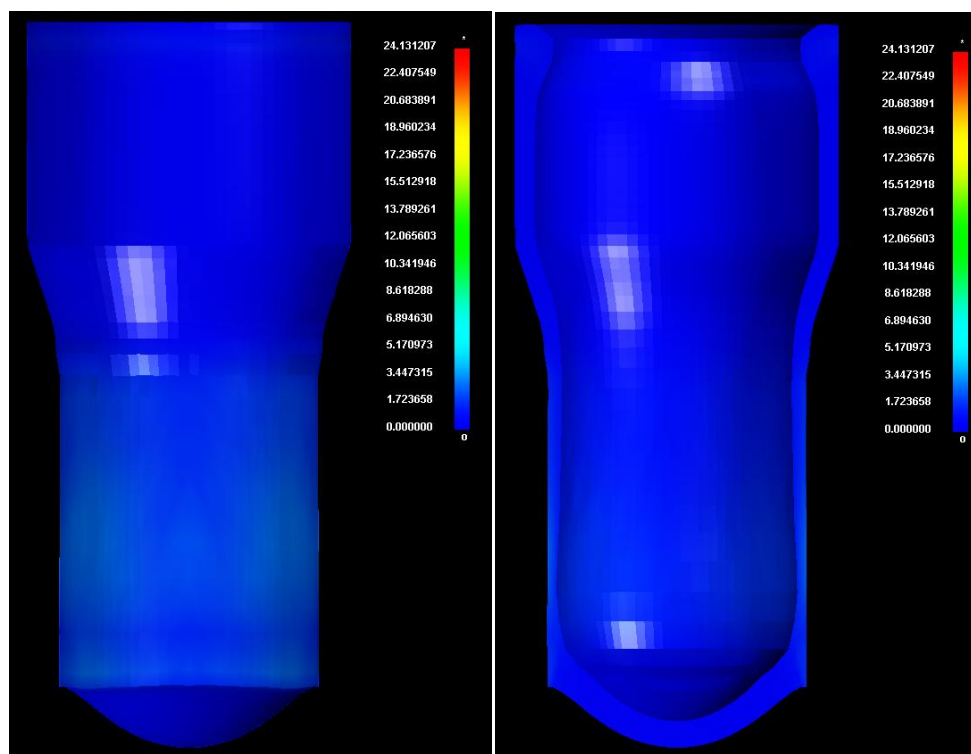
Το τασικό πεδίο του εξωτερικού περιβλήματος, θυμίζει σε μεγάλο βαθμό αυτό του δοκιμίου #2. Βασικές διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των δύο αυτών πεδίων είναι η μικρότερη συγκέντρωση τάσεων που παρατηρείται στο τμήμα πριν, μέσα και λίγο μετά το κωνικό τμήμα της μήτρας, καθώς και η μεγαλύτερη αύξηση των τάσεων στο τμήμα πριν τον πυθμένα. Αυτό το τελευταίο τασικό πεδίο είναι προφανώς αποτέλεσμα της διόγκωσης του πυρήνα του δοκιμίου. Τέλος, στην περίπτωση του πυθμένα, οι τιμές των τάσεων που εμφανίζονται είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες του πυθμένα στο δοκίμιο #2. Γενικά, οι μέγιστες τιμές των τάσεων στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του μοντέλου του δοκιμίου #2.

Για τα άλλα δύο τμήματα του δοκιμίου τα συμπεράσματα σχετικά με το τασικό τους πεδίο είναι παρόμοια με του προηγούμενου μοντέλου.

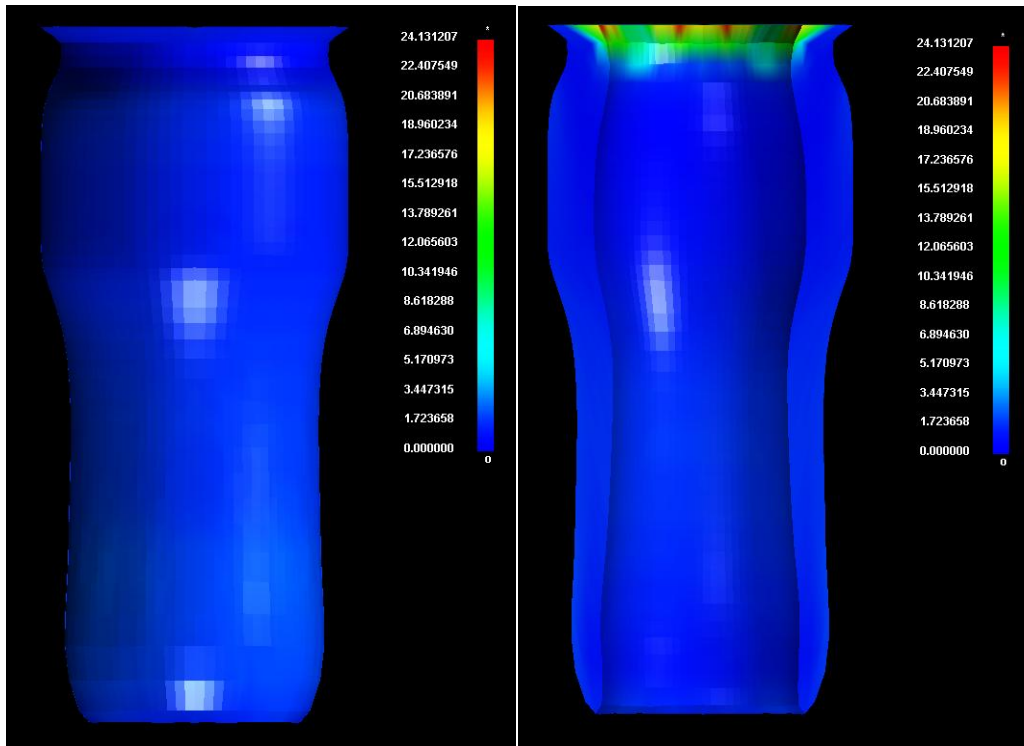
Στο ενδιάμεσο επίστρωμα, διαφορές παρατηρούνται κυρίως στο άνω μέρος του τμήματος αυτού, όπου παρατηρείται αύξηση των τάσεων, πιθανώς λόγω της διόγκωσης του περιβλήματος στην περιοχή αυτή. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ένα δαχτυλίδι με λίγο μεγαλύτερες τάσεις στην περιοχή κάτω από το κωνικό τμήμα της μήτρας. Μάλιστα, οι τάσεις αυτού του δαχτυλιδιού συμπίπτουν με το σημείο πριν αρχίσει η διάνοιξη της διαμέτρου του τμήματος αυτού, ως αποτέλεσμα της διόγκωσης του πυρήνα.

Και στην περίπτωση του πυρήνα, παρατηρούνται αισθητά αυξημένες τάσεις στο άνω μέρος του συγκεκριμένου τμήματος, λόγω της διόγκωσης του πυρήνα στην περιοχή αυτή. Επίσης, σε σύγκριση με το προηγούμενο μοντέλο, οι τάσεις μετά το κωνικό τμήμα είναι μεγαλύτερες, αν και συγκρινόμενο με τον εαυτό του, το συγκεκριμένο τμήμα παρουσιάζει μικρότερες τάσεις στο σημείο που εμφάνισε την διόγκωση. Το γεγονός αυτό όπως προαναφέρθηκε είναι λογικό, αφού εφόσον πραγματοποιήθηκε η ελαστική επαναφορά του υλικού, πρέπει το τασικό πεδίο στην αντίστοιχη περιοχή να μειώθηκε, σε σχέση με αυτό που εφαρμόστηκε για την πραγματοποίηση της κατεργασίας.

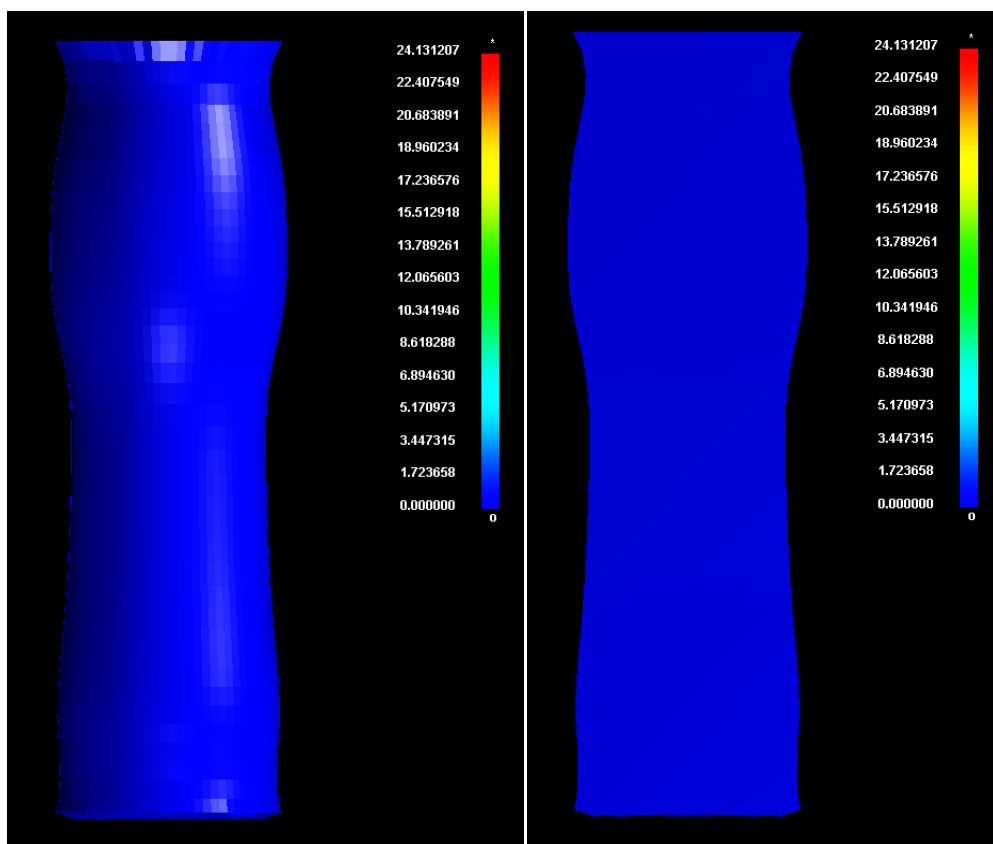
Στη συνέχεια, οι εικόνες που λήφθηκαν για τις παραμορφώσεις κάθε τμήματος του δοκιμίου, φαίνονται παρακάτω.



Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του εξωτερικού περιβλήματος (δοκίμιο #5)



Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του ενδιάμεσου επιστρώματος (δοκίμιο #5)

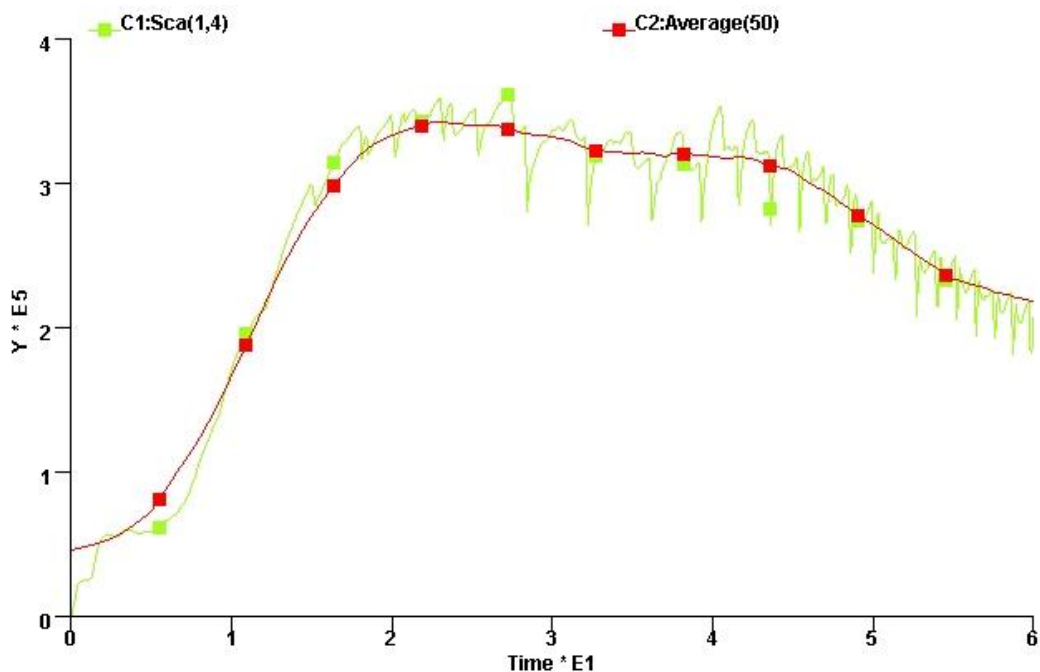


Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό μέρος και στην τομή του πυρήνα (δοκίμιο #5)

Και στην περίπτωση αυτού του μοντέλου παρατηρήθηκε η ύπαρξη ενός σφάλματος. Το σφάλμα εδώ παρουσιάστηκε στο άνω μέρος του ενδιάμεσου επιστρώματος. Παρατηρήθηκε, λοιπόν, μεγάλη παραμόρφωση σε ορισμένα, μεμονωμένα σημεία της περιοχής αυτής, κάτι που γενικά δεν ήταν αναμενόμενο, ενώ δεν έχει και λογική σημασία. Αποτέλεσμα και εδώ ήταν η συγκάλυψη ορισμένων σημαντικών παραμορφώσεων του μοντέλου, και άρα η αλλοίωση των αποτελεσμάτων. Πρέπει να αναφερθεί βέβαια ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις όπου η παραμόρφωση κάποιου τμήματος ήταν μεγάλη, παρατηρήθηκε μια ελαφριά αλλαγή στο χρώμα των πεδίων που εξήγαγε το πρόγραμμα. Έτσι, παρατηρήθηκε ότι στο σημείο όπου παρουσιάστηκε η διόγκωση του πυρήνα, οι παραμορφώσεις των άλλων δύο τμημάτων ήταν μεγαλύτερες και σχετικά εμφανείς. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα αυτά είναι σχετικά επίφοβα και άρα δεν πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν.

4.6.3 Καμπύλη φορτίου

Η καμπύλη φορτίου – χρόνου στην περίπτωση αυτή, καθώς και η καμπύλη των μέσων τιμών του φορτίου, παρουσιάζονται παρακάτω.



Καμπύλη φορτίου – χρόνου και καμπύλη μέσων τιμών αυτής (δοκίμιο #5)

Στην περίπτωση αυτή το διάγραμμα παρουσίασε τις τρεις χαρακτηριστικές οριζοντιώσεις, που συναντήθηκαν και σε προηγούμενες περιπτώσεις. Από αυτές, η

δεύτερη οριζοντίωση ήταν σχετικά μικρή (παρουσιάστηκε σε φορτίο περίπου 20000 N), ενώ η τρίτη και τελευταία οριζοντίωση παρουσίασε ένα σχετικά μεγάλο ευθύγραμμο τμήμα. Στη συνέχεια, η κατεργασία μπήκε στη δεύτερη φάση της, οπότε και άρχισε να παρουσιάζει κάθοδο, στην αρχή πιο ομαλά και στη συνέχεια πιο γρήγορα.

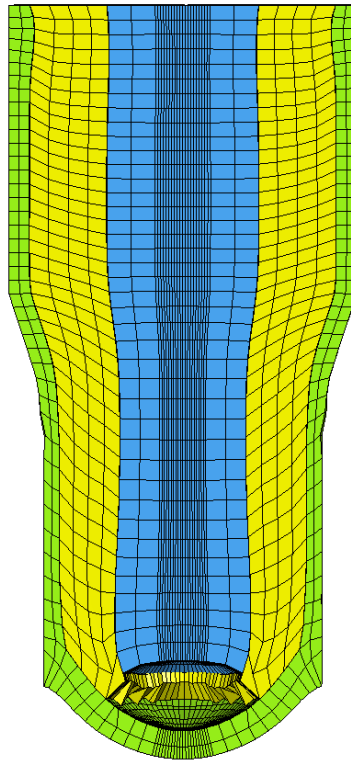
Για την κατασκευή της καμπύλης φορτίου – χρόνου, έπρεπε να τετραπλασιαστούν τα αποτελέσματα, αφού λήφθηκαν για το ένα τεταρτημόριο, ενώ για την καμπύλη των μέσων τιμών, σε κάθε σημείο χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των γειτονικών 50 σημείων της πρώτης καμπύλης.

4.7 Αποτελέσματα υπολογιστικού μέρους για το δοκίμιο #6

Η συμπεριφορά του δοκιμίου στο μοντέλο αυτό ήταν παρόμοια με εκείνη του δοκιμίου στο αντίστοιχο πείραμα.

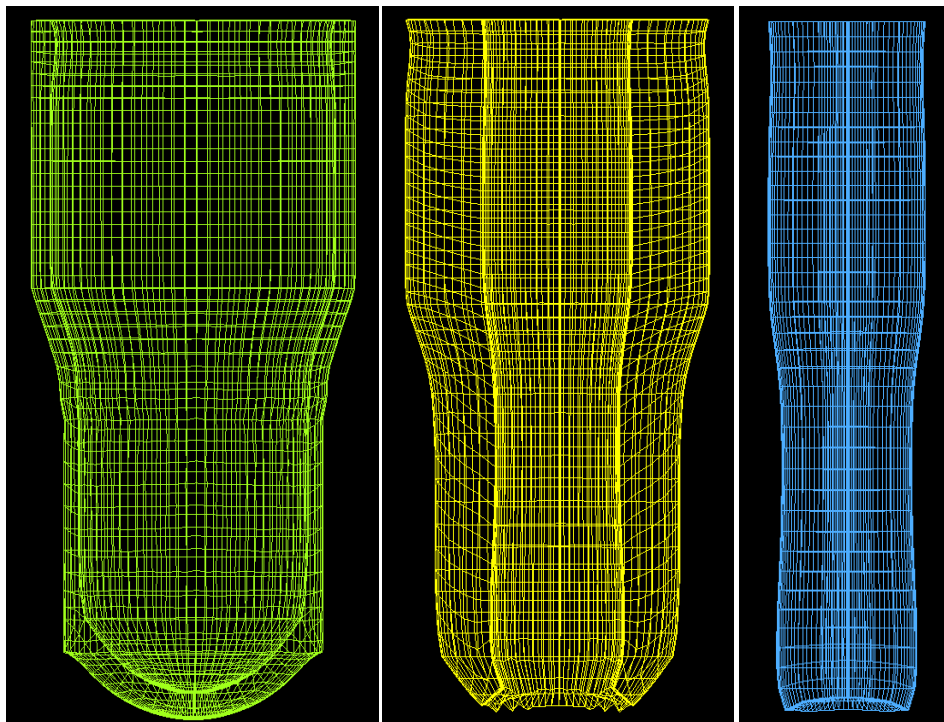
4.7.1 Μορφή δοκιμίου

Η μορφή του δοκιμίου στην περίπτωση αυτή παρουσιάζεται για ένα τυχαίο χρονικό βήμα (20 από 44), στην παρακάτω εικόνα.



Τομή της μορφής του δοκιμίου σε τυχαίο χρονικό βήμα (δοκίμιο #6)

Αντίστοιχα, η μορφή κάθε υλικού ξεχωριστά παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες.



(Από αριστερά προς τα δεξιά) Απεικόνιση χαλύβδινου περιβλήματος, αλουμινένιου επιστρώματος και χάλκινου πυρήνα (δοκίμιο #6)

Στην περίπτωση αυτού του μοντέλου παρατηρήθηκαν φαινόμενα που δεν παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

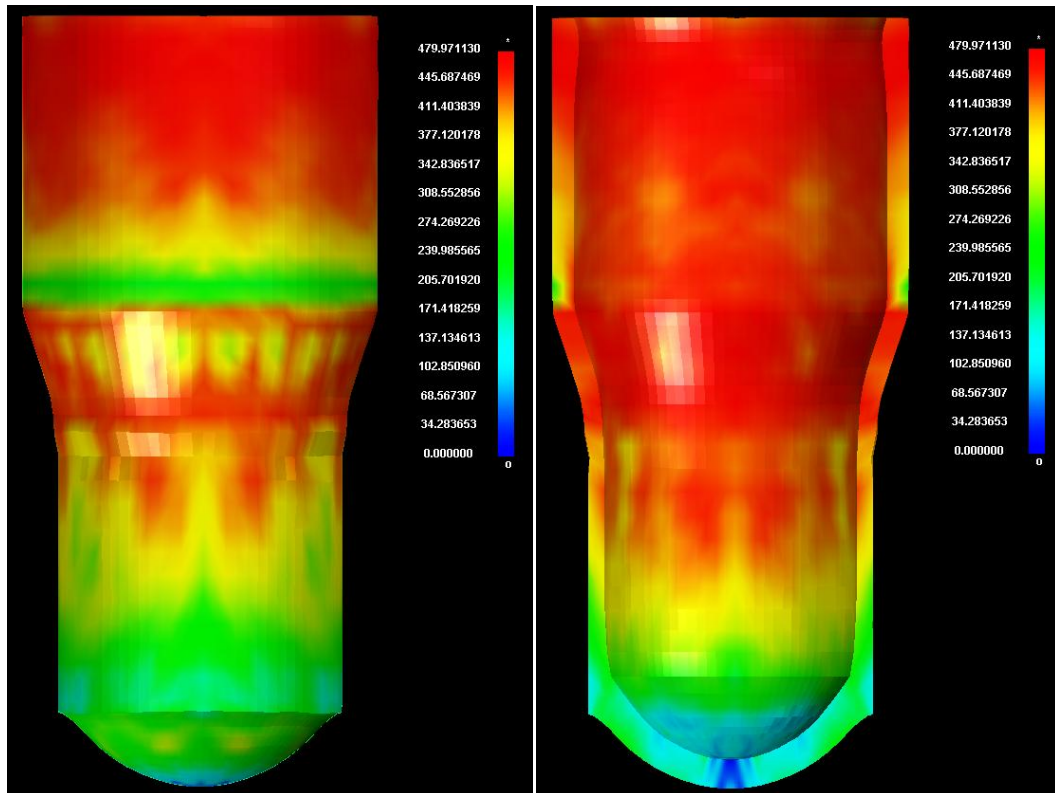
Το εξωτερικό περίβλημα, παρουσίασε παρόμοια συμπεριφορά με αυτή των δοκιμίων των προηγούμενων μοντέλων (εκτός του μοντέλου του δοκιμίου #5). Έτσι, παρατηρήθηκε η ύπαρξη της ημισφαιρικής διαμόρφωσης, ακριβώς όπως και στο πείραμα. Επίσης, παρατηρήθηκε μια ελαφρά διόγκωση του συγκεκριμένου τμήματος, παρόμοιας φύσης με εκείνη που παρατηρήθηκε και στο μοντέλο του δοκιμίου #5. Τέλος, παρατηρήθηκε και το σφάλμα στην περιοχή του καμπύλου τμήματος εξόδου της μήτρας, το οποίο είχε παρόμοια μορφή με το αντίστοιχο σφάλμα του μοντέλου του δοκιμίου #3.

Το ενδιάμεσο επίστρωμα από την άλλη πλευρά, παρουσίασε μια συμπεριφορά διαφορετική σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα. Συγκεκριμένα, στο μοντέλο αυτό, το ενδιάμεσο επίστρωμα διέρρευσε γρηγορότερα σε σχέση με τον πυρήνα. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται με βάση την αυξημένη αναλογία του συγκεκριμένου τμήματος στο σύνολο του δοκιμίου. Παρόλα αυτά, το φαινόμενο ενισχύθηκε και από το γεγονός ότι ο πυρήνας διέρρευσε προς τα πίσω (backflow), όταν το δοκίμιο πέρασε αρχικά από το κωνικό τμήμα της μήτρας. Η αιτία της πίσω διαρροής του πυρήνα αναλύεται παρακάτω. Επίσης, παρατηρήθηκε η ύπαρξη μιας μικρής λέπτυνσης στο άνω μέρος του τμήματος, απόρροια της αντίστοιχης διόγκωσης του εξωτερικού περιβλήματος, ενώ παρατηρήθηκε άλλη μία μικρή λέπτυνση στο κάτω μέρος του τμήματος, απόρροια της αντίστοιχης διόγκωσης του πυρήνα. Ακόμα, παρατηρήθηκαν ορισμένες πτυχώσεις στην κατάληξη του επιστρώματος. Αυτές δημιουργήθηκαν λόγω των εφαπτομενικών θλιπτικών τάσεων που αναπτύχθηκαν από την κωνική μήτρα, κατά τη μείωση της διαμέτρου του επιστρώματος. Στα προηγούμενα μοντέλα, η ύπαρξη του πυρήνα στο ίδιο σημείο κατά τη φάση της διέλασης μπορούσε να αντισταθμίσει τις θλιπτικές αυτές τάσεις, μέσω της εφαρμογής εφαπτομενικών εφελκυστικών τάσεων. Παρόλα αυτά, στο συγκεκριμένο μοντέλο, ο πυρήνας δεν διέρρευσε πέρα από το άκρο του επιστρώματος και άρα οι θλιπτικές τάσεις δεν μπόρεσαν να αντισταθμιστούν. Για τον λόγο αυτό, οι εφαπτομενικές θλιπτικές τάσεις που εφαρμόστηκαν, οδήγησαν στην εμφάνιση πτυχώσεων στην επιφάνεια του ενδιάμεσου επιστρώματος. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι και στην περίπτωση αυτή, το προφίλ των πεπερασμένων στοιχείων ήταν παραβολικό και παρόμοιο με αυτό που παρατηρήθηκε και στο μοντέλο του δοκιμίου #5.

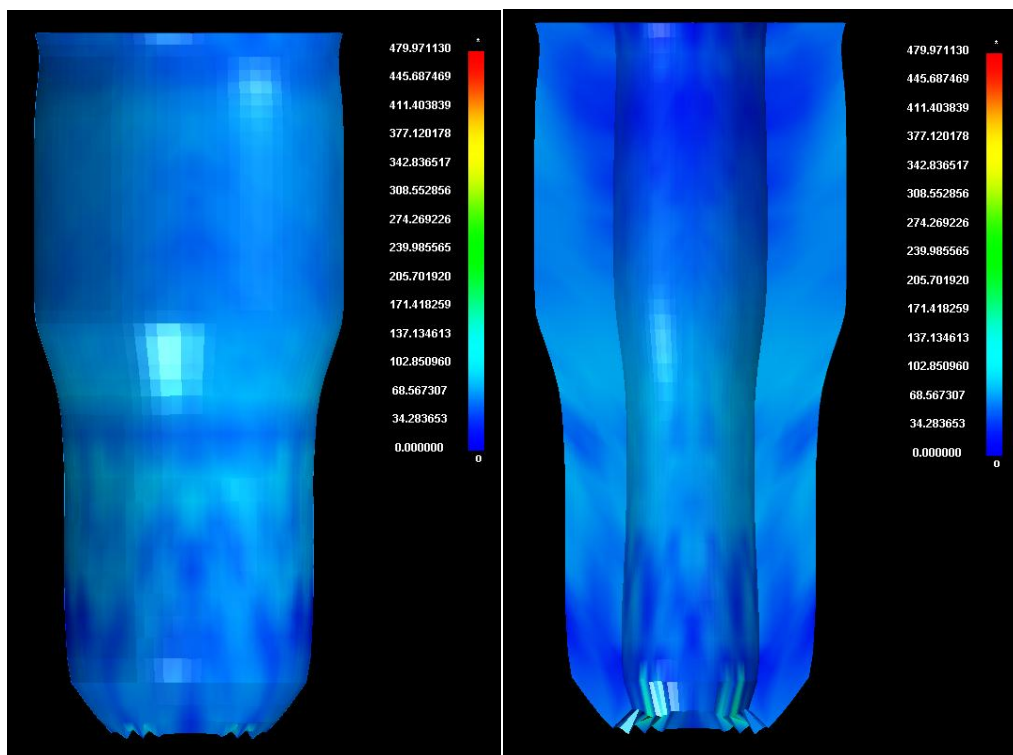
Ο πυρήνας παρουσίασε και εδώ την λέπτυνση στο άνω τμήμα του εξαιτίας της διείσδυσης του χαλύβδινου περιβλήματος. Επίσης, παρουσιάστηκε και η διόγκωση του πυρήνα, λόγω της ελαστικής επαναφοράς του υλικού αυτού του τμήματος. Αυτό που δεν παρουσιάστηκε σε κάποιο από τα προηγούμενα δοκίμια ήταν το γεγονός της πίσω διαρροής του πυρήνα, όπως υποδηλώνεται από τα αντίστροφα παραβολικά προφίλ στο κάτω μέρος αυτού. Η αιτία του συγκεκριμένου φαινομένου έχει άμεση σχέση με τη διαρροή του ενδιάμεσου επιστρώματος, αφού αυτό διέρρευσε γρηγορότερα από τον πυρήνα. Έτσι, κατά τη διαρροή του επιστρώματος, αυτό συμπίεσε περιμετρικά το κάτω μέρος του πυρήνα, σχηματίζοντας αρχικά έναν κρατήρα. Στη συνέχεια, η διαρροή συνεχίστηκε και άρα και η συμπίεση του κάτω μέρους του πυρήνα αυξήθηκε, σχηματίζοντας μια στένωση για τον πυρήνα, η οποία μειωνόταν σε διάμετρο. Έτσι, ο πυρήνας που δεν είχε διαρρεύσει πέρα από το ενδιάμεσο επίστρωμα αναγκάστηκε να διαρρεύσει προς τα πίσω. Το φαινόμενο αυτό, αν και γίνεται ορατό κυρίως στο κάτω μέρος του δοκιμίου, εντούτοις εμφανίζεται κιόλας από το κομμάτι του πυρήνα που βρίσκεται στο κωνικό τμήμα της μήτρας, αφού και εκεί εμφανίζονται ορισμένα αντίστροφα παραβολικά προφίλ στα πεπερασμένα στοιχεία, που όμως πιο μετά εξομαλύνονται με την διόγκωση του τμήματος αυτού του δοκιμίου. Αξίζει να αναφερθεί ότι το συγκεκριμένο φαινόμενο πιθανώς να εμφανιζόταν και στα μοντέλα των δοκιμίων #4 και #5, αν υπήρχε η τελευταία συστάδα πεπερασμένων στοιχείων του ενδιάμεσου επιστρώματος σε κάθε μοντέλο. Βέβαια, αυτή έπρεπε να αφαιρεθεί αφού μόνο με τον τρόπο αυτό ήταν δυνατή η επίλυση των συγκεκριμένων μοντέλων. Ο προβληματισμός αυτός επιδέχεται περαιτέρω έρευνα.

4.7.2 Τάσεις και παραμορφώσεις

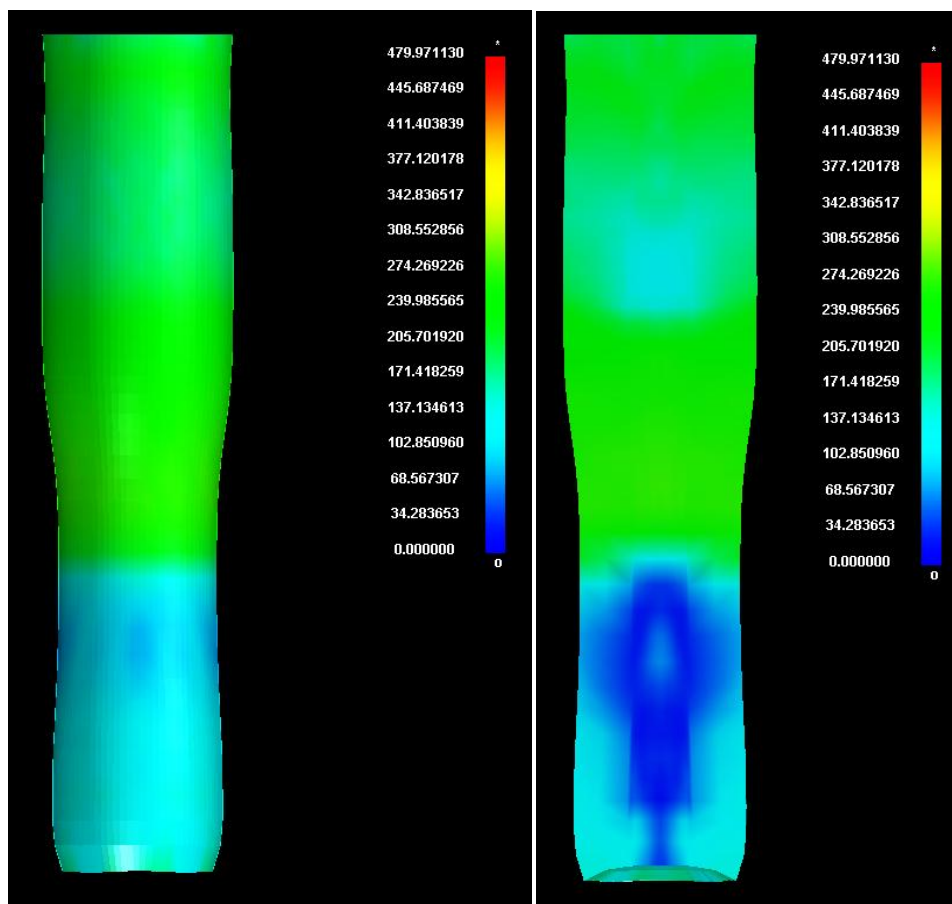
Τα τασικά πεδία κάθε τμήματος του μοντέλου αυτού παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες.



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του εξωτερικού περιβλήματος (δοκίμιο #6)



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του ενδιάμεσου επιστρώματος (δοκίμιο #6)



Τασικό πεδίο στο εξωτερικό μέρος και στην τομή του πυρήνα (δοκίμιο #6)

Το τασικό πεδίο των διαφόρων τμημάτων αυτού του μοντέλου ήταν γενικά το πιο έντονο που παρουσιάστηκε σε όλα τα δοκίμια. Αυτό ισχύει τόσο από την άποψη της κατανομής των τάσεων (μεγαλύτερη συγκέντρωση υψηλών τάσεων), όσο και από την άποψη των τιμών αυτών (ελαφρά μεγαλύτερες από όλα τα προηγούμενα μοντέλα).

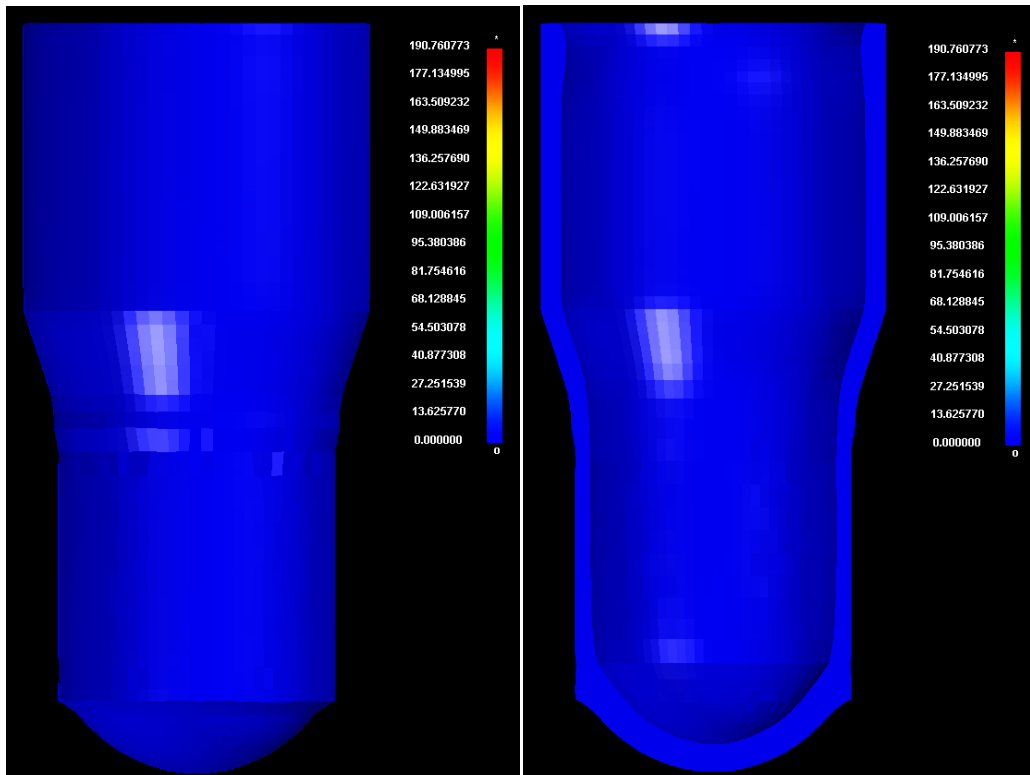
Το πεδίο των τάσεων στο εξωτερικό περίβλημα θυμίζει το πεδίο του αντίστοιχου τμήματος του μοντέλου του δοκιμίου #3, μόνο που οι συγκεντρώσεις τάσεων είναι αρκετά μεγαλύτερες στα τμήματα του περιβλήματος που αναλύθηκαν και στο ανωτέρω μοντέλο. Εξαίρεση σε αυτό αποτελεί η ύπαρξη μικρών τάσεων σε ένα μεγάλο μέρος του πυθμένα του περιβλήματος. Το γεγονός αυτό είναι λογικό αφού με τον πυθμένα του δοκιμίου ερχόταν σε επαφή μόνο το αλουμίνιο, το οποίο δεν ασκούσε μεγάλες τάσεις στον πυθμένα. Η συγκεκριμένη επαφή συνέβαινε σε ένα μέρος μόνο του πυθμένα, ενώ στο υπόλοιπο δεν υπήρχε επαφή με κανένα άλλο υλικό.

Και το τασικό πεδίο του ενδιάμεσου επιστρώματος παρουσίασε ομοιότητες ως προς την κατανομή των τάσεων, με το αντίστοιχο τμήμα του μοντέλου του δοκιμίου

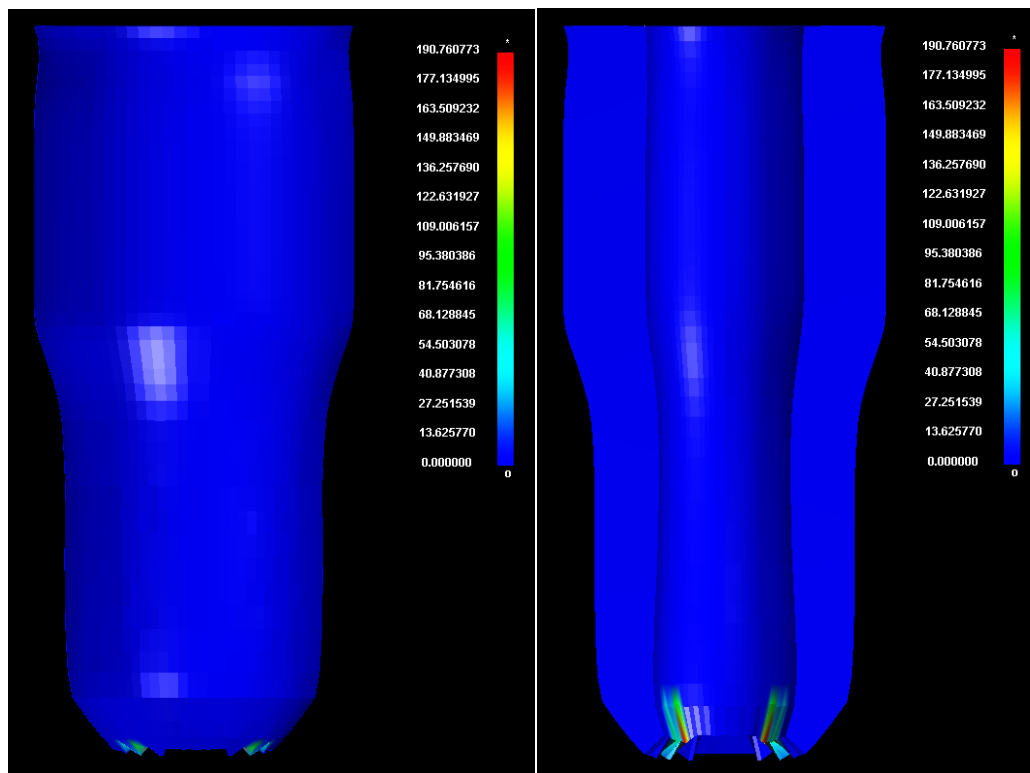
#3. Μοναδική διαφορά, ως προς τις κατανομές των τάσεων, παρατηρήθηκε στην περιοχή που εμφανίστηκαν οι πτυχώσεις. Έτσι, ενώ στο αντίστοιχο τμήμα του δοκιμίου #3 οι τάσεις ήταν συγκεντρωμένες στην ίδια διάμετρο του εσωτερικού του επιστρώματος, στην περίπτωση αυτή εμφανίζουν ένα πριονωτό προφίλ, προφανώς λόγω του σχηματισμού των πτυχώσεων. Από την άποψη των τιμών των τάσεων στο συγκεκριμένο τμήμα, αυτές ήταν ίδιες περίπου με τις αντίστοιχες των μοντέλων των δοκιμίων #4 και #5.

Το πεδίο του πυρήνα παρουσιάζει και αυτό ομοιότητες με το αντίστοιχο του μοντέλου του δοκιμίου #3, ως προς τις κατανομές των τάσεων. Τα δύο πεδία είναι σχεδόν ίδια από πλευράς κατανομής των τάσεων στην περιοχή του κωνικού τμήματος της μήτρας και γύρω από αυτό. Βέβαια, ο πυρήνας σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζει αυξημένη συγκέντρωση τάσεων πάνω από το κωνικό τμήμα, εκεί όπου το δοκίμιο πιέζεται από το έμβολο, καθώς και στην επιφάνεια μεταξύ των δύο περιοχών, κυρίως λόγω της εμφάνισης τριβών. Επίσης, στο σημείο όπου ξεκίνησε η διόγκωση του πυρήνα εμφανίστηκαν μειωμένες τάσεις, οι οποίες ήταν μεγαλύτερες στην επιφάνεια (λόγω της ύπαρξης τριβών) και μικρότερες στο εσωτερικό του πυρήνα. Χαρακτηριστική είναι η μορφή του εσωτερικού του πυρήνα στο σημείο αυτό, όπου φαίνεται πως οι τάσεις σταματούν σε κάποια διάμετρο. Αυτό το φαινόμενο της απομόνωσης των τασικών πεδίων, ίσως οφείλεται στην πίσω ολίσθηση του πυρήνα που εμφανίστηκε στο συγκεκριμένο μοντέλο, ως αποτέλεσμα της επαγωγής των δύο ροϊκών πεδίων, του πρόσω από το κωνικό τμήμα της μήτρας και του πίσω από την πίεση του ενδιάμεσου επιστρώματος. Έτσι, στο σημείο που η συνισταμένη των ταχυτήτων διαρροής έγινε μηδέν (σημείο ανακοπής), έγινε απότομος μηδενισμός και των τάσεων του πυρήνα. Αυτή η θεωρία βασίστηκε στην αντίστοιχη θεωρία της επαγωγής δύο αντίθετων ροών από τη μηχανική των ρευστών, και έτσι η γενίκευσή της στην περίπτωση αυτή χρήζει περαιτέρω έρευνας. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι, στο χείλος του κρατήρα του πυρήνα εμφανίζονται αυξημένες τάσεις, σημάδι της συμπίεσης αυτού από το διαρρέον ενδιάμεσο επίστρωμα.

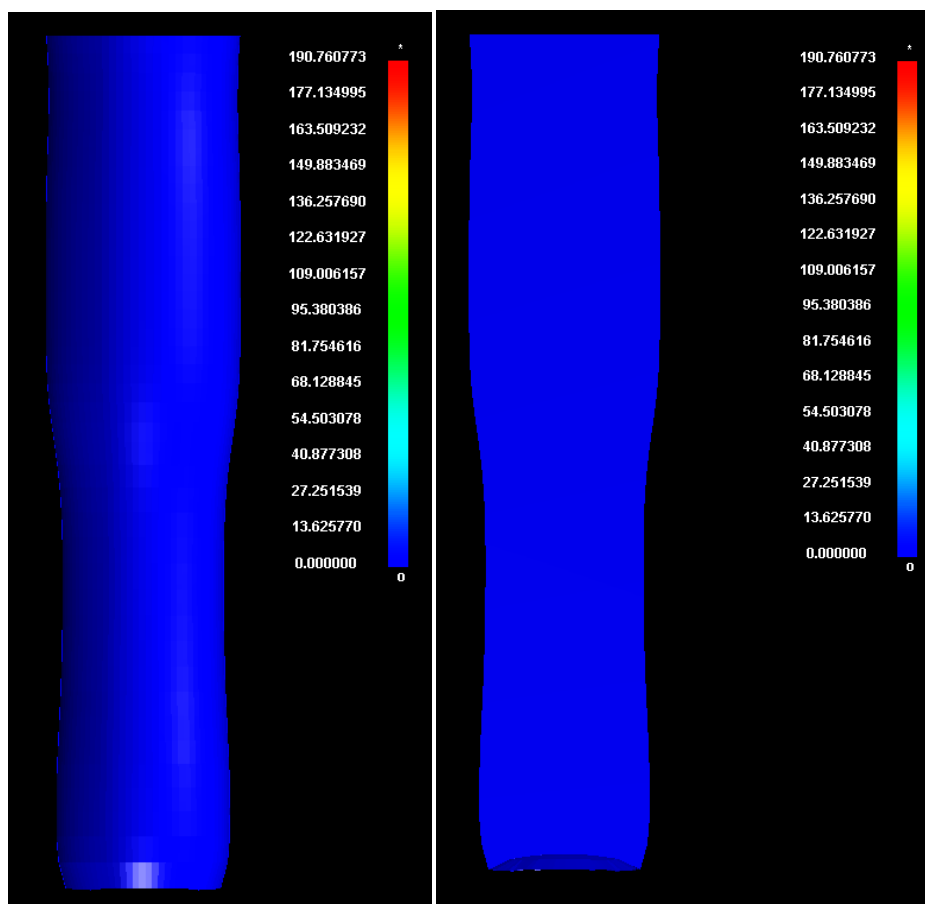
Για τα παραμορφωσιακά πεδία κάθε τμήματος του συγκεκριμένου μοντέλου, παρουσιάζονται οι παρακάτω εικόνες.



Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του εξωτερικού περιβλήματος
(δοκίμιο #6)



Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος του ενδιάμεσου επιστρώματος
(δοκίμιο #6)

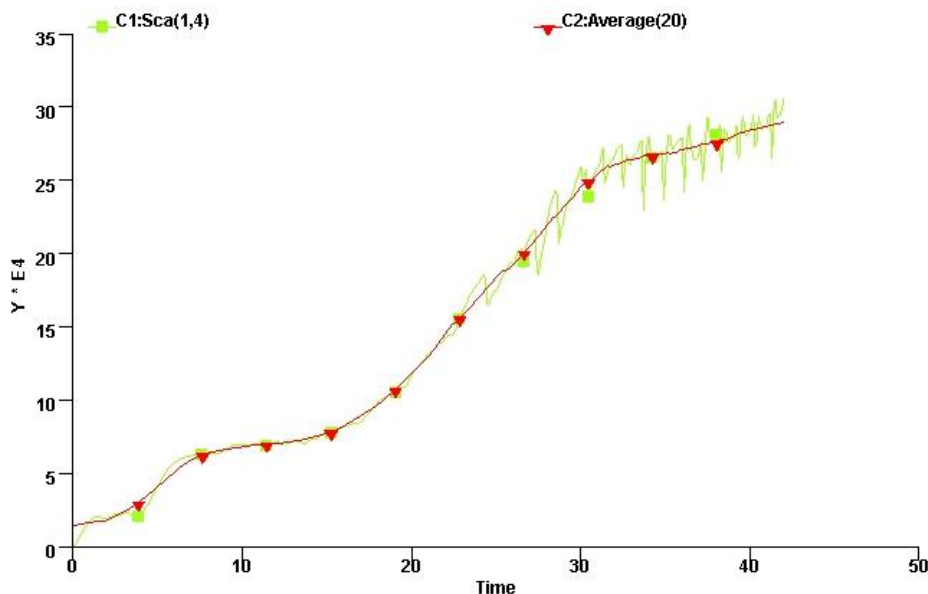


Παραμορφωσιακό πεδίο στο εξωτερικό μέρος και στην τομή του πυρήνα (δοκίμιο #6)

Στην περίπτωση αυτή τα παραμορφωσιακά πεδία δίνουν πληροφορίες μόνο για ένα φαινόμενο. Το φαινόμενο αυτό είναι ο σχηματισμός των πτυχώσεων που έγινε στο ενδιάμεσο περίβλημα. Μάλιστα, οι παραμορφώσεις εκεί ήταν τόσο υψηλές που έφτασαν το 191% περίπου σε σχέση με τις αρχικές διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό το παραμορφωσιακό πεδίο επισκίασε όλα τα υπόλοιπα που τυχόν να εμφανίστηκαν. Έτσι, τα συγκεκριμένα αποτελέσματα δεν δίνουν πληροφορίες σχετικά με την γενική παραμόρφωση των δοκιμίων, οπότε και δεν θα ληφθούν υπ' όψιν.

4.7.3 Καμπύλη φορτίου

Η καμπύλη φορτίου – χρόνου του συγκεκριμένου μοντέλου, καθώς και η καμπύλη των μέσων τιμών του φορτίου, παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Καμπύλη φορτίου – χρόνου και καμπύλη μέσων τιμών αυτής (δοκίμιο #6)

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνονται ορατές δύο καθαρές οριζοντιώσεις της καμπύλης φορτίου, και μια μορφή που παρομοιάζεται με οριζοντίωση. Η συγκεκριμένη μορφή εμφανίζεται στο τέλος της καμπύλης. Το συμπέρασμα που προκύπτει από τη μορφή αυτής της καμπύλης είναι ότι στο διάγραμμα εμφανίζεται μόνο η πρώτη φάση της κατεργασίας. Αυτό το γεγονός προέκυψε επειδή, όπως και με τα πειραματικά δεδομένα, υπήρξε επαφή μεταξύ του δοκιμίου και του τμήματος εξόδου της μήτρας, κάτι που είχε σαν αποτέλεσμα τη συνεχόμενη ύπαρξη (και άρα ανάγκη για υπερνίκηση) τριβών, μεταξύ των δύο μερών.

Για την κατασκευή της καμπύλης φορτίου – χρόνου, τετραπλασιάστηκαν τα αποτελέσματα του ενός τεταρτημορίου του δοκιμίου, ενώ για τη λήψη της καμπύλης των μέσων τιμών, χρησιμοποιήθηκαν τα είκοσι γειτονικά σημεία κάθε τιμής του διαγράμματος φορτίου – χρόνου.

4.8 Γενικά συμπεράσματα

Από όλα τα αριθμητικά μοντέλα των πειραμάτων που έγιναν, προκύπτουν ορισμένες ομοιότητες μεταξύ τους, σε όλες τις κατηγορίες αναλύσεων που προηγήθηκαν. Αυτές οι ομοιότητες για κάθε κατηγορία ανάλυσης, περιγράφονται παρακάτω.

4.8.1 Συμπεράσματα από τη μορφή των δοκιμίων

Από τη μορφή των δοκιμίων προκύπτουν γενικά συμπεράσματα κυρίως σχετικά με τη συμπεριφορά κάθε υλικού κατά τη διέλαση.

Ο χάλυβας παρουσίασε σε γενικές γραμμές την ίδια συμπεριφορά σε όλα τα δοκίμια. Μοναδικό σημείο διαφοροποίηση αποτελεί η διόγκωση του άνω μέρους του χαλύβδινου εξωτερικού περιβλήματος που παρουσιάστηκε σε περιπτώσεις αυξημένης πίεσης από το έμβολο, στα μοντέλα #5 και #6. Κατά τα άλλα, σε όλα τα μοντέλα ανεξαιρέτως, παρουσιάστηκε η ημισφαιρική διαμόρφωση του πυθμένα, η αιτία δημιουργίας της οποίας αναλύθηκε εκτενώς.

Ο χαλκός στα δοκίμια εμφάνισε κυρίως το χαρακτηριστικό της ελαστικής επαναφοράς του, όταν το τασικό πεδίο από την κατεργασία εξομαλυνόταν. Η ελαστική επαναφορά στα τρία πρώτα μοντέλα συνέβαινε τόσο προς τα έξω, όσο και προς τα μέσα, αφού το χάλκινο τμήμα στα μοντέλα αυτά ήταν το ενδιάμεσο επίστρωμα. Από την άλλη, στα τρία τελευταία μοντέλα η ελαστική επαναφορά πραγματοποιήθηκε μόνο προς τα έξω, αφού ο χαλκός στα μοντέλα αυτά ήταν το υλικό του πυρήνα. Αποτέλεσμα ήταν η πίεση που ασκούσε ο χαλκός στα άλλα υλικά, στη δεύτερη περίπτωση, να είναι μεγαλύτερη από ότι στην πρώτη περίπτωση, όπου η άσκηση πίεσης συνέβαινε ταυτόχρονα προς δύο κατευθύνσεις. Ήταν μάλιστα τόσο μεγάλη η πίεση αυτή σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου ο χαλκός κατάφερε να παραμορφώσει ακόμα και τον ισχυρότερο από αυτόν χάλυβα (μοντέλο δοκιμίου #5). Πάντως πριν τη διέλασή του, ο χαλκός δεν παρουσίαζε ιδιαίτερη αντίσταση στην αλλαγή της μορφής του, αφού ο χάλυβας στις περιπτώσεις των μοντέλων των δοκιμίων #5 και #6 που διογκώθηκε τοπικά, κατάφερε εύκολα να διεισδύσει στο χαλκό. Ως προς την ταχύτητα της διαρροής του, ο χαλκός δεν εμφανίζει ιδιαίτερα την τάση να διαρρεύσει προς τη φορά της διέλασης. Αντίθετα, παρατηρήθηκε ότι όπου ήταν δυνατό, ο χαλκός διέρρευσε προς τα πλάγια, αφήνοντας στο κέντρο έναν μικρό κρατήρα.

Το αλουμίνιο αντίθετα με τα άλλα δύο υλικά, δεν παρουσίασε την τάση για διόγκωση σε καμία περίπτωση. Αντίθετα, ήταν το υλικό αυτό που σε κάθε μοντέλο παραμορφωνόταν από τα άλλα δύο υλικά. Αυτό το γεγονός μπορεί να δικαιολογηθεί από τις ιδιότητες του συγκεκριμένου υλικού, οι οποίες είναι οι χαμηλότερες σε σχέση με τις ιδιότητες των άλλων δύο υλικών. Παρόλα αυτά, το αλουμίνιο ήταν το υλικό

που διέρρευε πιο γρήγορα σε όλα τα μοντέλα. Το γεγονός αυτό οδήγησε και στο σχηματισμό διαφόρων χαρακτηριστικών διαμορφώσεων, όπως της μορφή μανιταριού στα τρία πρώτα μοντέλα και των πτυχώσεων στο τελευταίο μοντέλο (δεν επιβεβαιώθηκε από τα μοντέλα #4 και #5, αφού δεν είχε το ίδιο ύψος με αυτό του πυρήνα).

Τέλος, από τα αποτελέσματα μορφής των μοντέλων, λήφθηκαν σημαντικά συμπεράσματα σε σχέση με τον τρόπο διαρροής των διαφόρων υλικών. Ο τρόπος διαρροής των υλικών σε κάθε μία από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, θύμιζε την συμπεριφορά που θα εμφάνιζε ένα ρευστό σε παρόμοιες περιπτώσεις. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να ερευνηθεί και περεταίρω, έτσι ώστε να μπορέσουν να επαληθευτούν τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων αριθμητικών μοντέλων, με αντίστοιχα πειραματικά.

4.8.2 Συμπεράσματα από τις τάσεις

Από τα τασικά πεδία κάθε τμήματος, έγινε εμφανές πως το πεδίο των εφαρμοζόμενων τάσεων έχει άμεση σχέση με το υλικό κάθε τμήματος. Έτσι, παρατηρήθηκε ότι από τα τρία υλικά των μοντέλων, ο χάλυβας δεχόταν πάντα τις υψηλότερες τάσεις, ο χαλκός τις μέσες τάσεις και το αλουμίνιο τις μικρότερες τάσεις. Αυτό το γεγονός επιβεβαιώθηκε όταν αντιστράφηκαν τα υλικά του πυρήνα και του ενδιάμεσου επιστρώματος, όπου και τα τασικά πεδία φάνηκε ότι ακολούθησαν κάθε υλικό.

Επίσης, συγκρίνοντας τα τασικά πεδία των μοντέλων αντίστοιχης γεωμετρίας (με ίδια διάμετρο πυρήνα), έγινε εμφανές ότι η κατανομή των τάσεων σε κάθε τμήμα του μοντέλου ήταν παρόμοια. Μόνο σε ελάχιστες περιπτώσεις δεν ίσχυε το γεγονός αυτό και ήταν κυρίως στις περιοχές τις ελαστικής επαναφοράς του χαλκού, που στην περίπτωση των τριών τελευταίων δοκιμών ήταν μεγαλύτερη (από τα μοντέλα αντίστοιχης γεωμετρίας). Αξίζει να αναφερθεί ότι, μικροδιαφορές σε σχέση με τις τιμές των διαφόρων περιοχών τάσεων παρατηρήθηκαν, αλλά οι κατανομές, για παράδειγμα, των υψηλών τάσεων στο εξωτερικό περίβλημα των μοντέλων #2 και #5, βρίσκονταν περίπου στις ίδιες περιοχές.

Τέλος, όσον αφορά στις τιμές των μέγιστων τάσεων ήταν περίπου οι ίδιες σε όλα τα δοκίμια και ήταν μεταξύ των 470 και των 480 MPa.

4.8.3 Συμπεράσματα από τις παραμορφώσεις

Για τις παραμορφώσεις δυστυχώς δεν μπόρεσαν να ληφθούν αξιόπιστα αποτελέσματα στα τρία τελευταία δοκίμια. Ο λόγος ήταν η εμφάνιση τοπικών μεγάλων παραμορφώσεων, οι οποίες δεν κατέστησαν παρατηρήσιμη τη γενική εικόνα της παραμόρφωσης των συγκεκριμένων μοντέλων. Αντίθετα, στα τρία πρώτα μοντέλα, αν και παρουσιάστηκαν τοπικές μεγάλες παραμορφώσεις, εντούτοις ήταν αρκετά μικρότερες από αυτές στα τρία τελευταία, και έτσι από τα αντίστοιχα παραμορφωσιακά πεδία εξήχθησαν συμπεράσματα. Τα συμπεράσματα αυτά, παρουσίασαν την αναμενόμενη υψηλή παραμόρφωση στα σημεία μέσα στο κωνικό τμήμα της μήτρας καθώς και στο κομμάτι μετά από αυτό. Επίσης, μικρή παραμόρφωση εμφανίστηκε και στην περιοχή όπου το έμβολο πίεζε το δοκίμιο.

4.8.4 Συμπεράσματα από τις καμπύλες

Για αυτό το κομμάτι θα πραγματοποιηθεί λεπτομερής ανάλυση στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 5:

Σύγκριση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται σύγκριση των καμπυλών που λήφθηκαν από το πειραματικό και το υπολογιστικό μέρος της εργασίας.

Στην πρώτη ενότητα του κεφαλαίου, γίνεται περιγραφή του τρόπου με τον οποίο έγινε η επεξεργασία των δεδομένων του πειράματος και των μοντέλων, ώστε να μπορέσουν να παρουσιαστούν με τη μορφή διαγραμμάτων φορτίου – μετατόπισης, τα οποία θα είναι μεταξύ τους συγκρίσιμα.

Στη συνέχεια στη δεύτερη ενότητα του κεφαλαίου, πραγματοποιείται σύγκριση των καμπυλών που εξήχθησαν για κάθε ένα από τα δοκίμια του πειράματος, όπως αυτές προέκυψαν μετά την επεξεργασία των αντίστοιχων δεδομένων. Στη συνέχεια, εξάγονται τα συμπεράσματα από τη σύγκριση.

Στην τρίτη ενότητα του κεφαλαίου, πραγματοποιείται σύγκριση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμίων εκείνων που έχουν ίδιες αναλογίες υλικού. Ακολουθούν τα συμπεράσματα από τη σύγκριση.

Στην τέταρτη ενότητα, συγκρίνονται οι πειραματικές καμπύλες των δοκιμίων με ίδια ακολουθία υλικών και εξάγονται τα συμπεράσματα από τη σύγκριση αυτή.

Στην πέμπτη ενότητα, παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της εργασίας και γίνονται προτάσεις βελτίωσης του πειράματος.

Τέλος στην έκτη ενότητα, παρατίθενται ιδέες εφαρμογών των πειραματικών αποτελεσμάτων, καθώς και προτάσεις για περεταίρω έρευνα πάνω στην παρούσα εργασία.

5.1 Κατασκευή καμπυλών

Για την κατασκευή των καμπύλων σε κατάλληλη μορφή ώστε να είναι συγκρίσιμες, αλλά και για να αντιπροσωπεύεται όσο γίνεται καλύτερα η κατεργασία μέσα από αυτές, έπρεπε αρχικά να γίνει επεξεργασία των δεδομένων τόσο του πειράματος, όσο και των υπολογιστικών μοντέλων. Παρακάτω περιγράφονται όλες οι απαραίτητες ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν για την εξαγωγή των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης.

5.1.1 Κατασκευή καμπύλης πειραματικών αποτελεσμάτων

Για την κατασκευή της πειραματικής καμπύλης λήφθηκαν από τη διάταξη λήψης αποτελεσμάτων της πειραματικής διάταξης, δύο αρχεία για κάθε μέτρηση. Για την εξαγωγή των δεδομένων αυτών έπρεπε πρώτα να ρυθμιστούν ορισμένες παράμετροι του εκάστοτε πειράματος. Οι παράμετροι αυτές για κάθε ένα από τα πειράματα, συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Αριθμός δοκιμίου	Χρόνος δειγματοληψίας (s)	Χρόνος ωφέλιμων μετρήσεων (s)	Συχνότητα δειγματοληψίας (Hz)
1	260	225	10
2	250	185	10
3	240	210	10
4	300	230	10
5	220	210	10
6	220	220	10

Από τα δεδομένα αυτού του πίνακα, το μέγεθος του χρόνου των ωφέλιμων μετρήσεων δεν εισάχθηκε στο πρόγραμμα για την εξαγωγή των αρχείων των αποτελεσμάτων, αλλά προέκυψε κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Ο λόγος ήταν ότι στα πειράματα εισήχθη μεγαλύτερος χρόνος δειγματοληψίας από τον απαιτούμενο για λόγους ασφάλειας. Έτσι, τα αποτελέσματα που λήφθηκαν δεν χαρακτηρίζαν όλα την κατεργασία, με αποτέλεσμα τα πλεονάζοντα στοιχεία να απορριφθούν. Ο τρόπος διαλογής των αποτελεσμάτων περιγράφεται παρακάτω. Αξίζει να αναφερθεί ότι, η συχνότητα δειγματοληψίας για όλα τα δοκίμια ήταν 10 Hz. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε s του χρόνου δειγματοληψίας, γίνονταν 10 μετρήσεις των απαιτούμενων μεγεθών.

Τα αρχεία που εξήχθησαν από το πρόγραμμα είχαν την ονομασία disp_1.lvm και load_1.lvm. Για την ανάγνωση των αρχείων αυτών χρησιμοποιήθηκε το notepad.exe των Windows, αν και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε editor, αφού η κωδικοποίηση των δεδομένων ήταν σε κώδικα ASCII. Το αρχείο

disp_1.lvm περιείχε κάποιες πληροφορίες σχετικά με τις ρυθμίσεις του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και δύο στήλες. Η πρώτη από τις στήλες περιείχε τον αύξοντα αριθμό των τιμών που λήφθηκαν από το πρόγραμμα και η δεύτερη τις τιμές της μετατόπισης σε κάθε μέτρηση. Το αρχείο load_1.lvm από την άλλη είχε παρόμοια μορφή με το disp_1.lvm, με τη μόνη διαφορά ότι στη δεύτερη στήλη αυτού του αρχείου περιέχονταν οι τιμές του φορτίου κάθε μέτρησης, και όχι τη μετατόπιση.

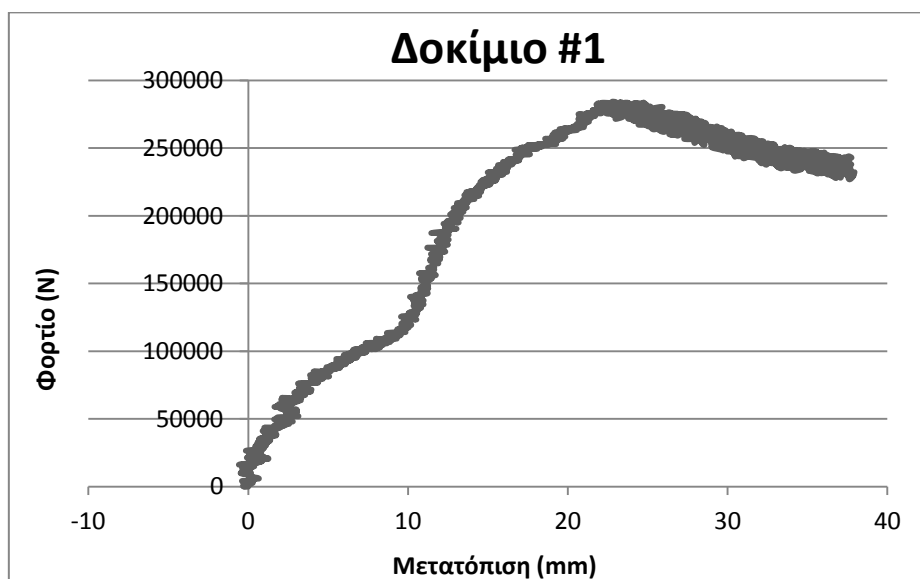
Τα δεδομένα από τα αρχεία του προγράμματος εισήχθησαν στη συνέχεια σε πίνακες, ώστε η επεξεργασία τους να είναι πιο εύκολη. Για τον λόγο αυτό έγινε χρήση του προγράμματος Microsoft Excel.

Για τα δεδομένα της μετατόπισης απαιτήθηκε μια αρχικοποίηση των τιμών, αφού οι μετρήσεις από πλευράς του προγράμματος έγιναν με βάση το ήδη ρυθμισμένο σύστημα συντεταγμένων του αντίστοιχου αισθητήρα. Έτσι, το έμβολο μετατοπίστηκε πριν το πείραμα, ώστε να υπάρχει επαφή μεταξύ αυτού και του δοκιμίου. Από το σημείο εκείνο ξεκίνησε η κάθοδος του εμβόλου στα πλαίσια του πειράματος, και άρα με βάση την τιμή της πρώτης μέτρησης της μετατόπισης έγινε η αρχικοποίηση των αντίστοιχων τιμών, δηλαδή από όλες τις τιμές αφαιρέθηκε η τιμή της πρώτης μέτρησης της μετατόπισης.

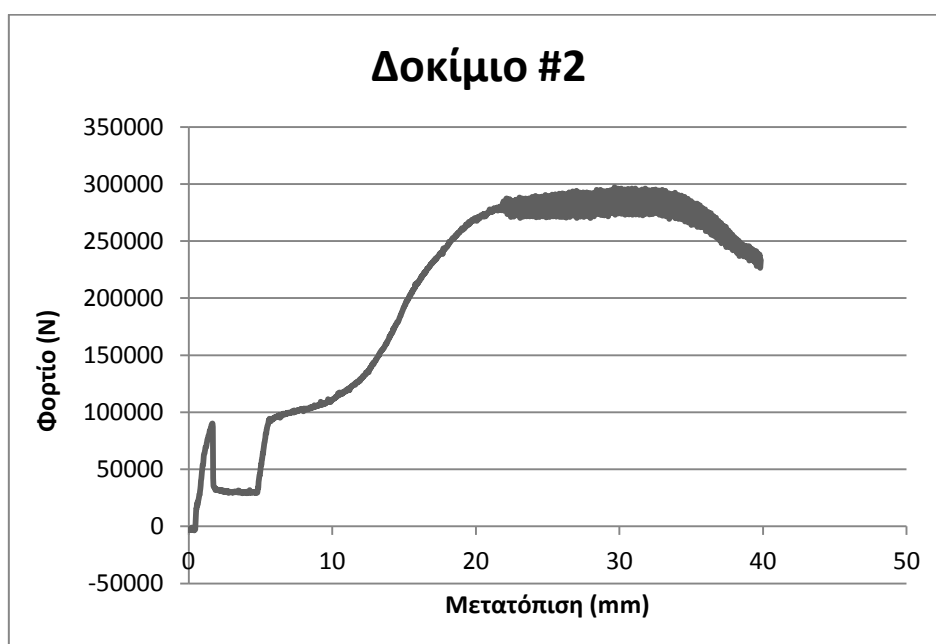
Αρχικοποίηση απαιτήθηκε όμως και στις τιμές του φορτίου. Ο λόγος ήταν ότι, ακόμα και χωρίς να υπάρχει επαφή του εμβόλου με το δοκίμιο, ο αισθητήρας διάβαζε μια μικρή τιμή για το φορτίο. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε διάφορους λόγους, όπως σε δονήσεις της μηχανής ή του χώρου εργασίας που διάβαζε ο αισθητήρας κ.λπ.. Για το λόγο αυτό, από το αρχείο των φορτίων διαβάστηκαν μερικές αρχικές τιμές του φορτίου, οι οποίες αντιστοιχούσαν στον χρόνο πριν την έναρξη του πειράματος, και από αυτές βγήκε ένας μέσος όρος, ο οποίος στη συνέχεια αφαιρέθηκε από όλες τις τιμές φορτίου. Με τον τρόπο αυτό τα δεδομένα για το φορτίο αρχικοποιήθηκαν και η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης είχε λογική μορφή.

Εφόσον όλα τα αποτελέσματα ήταν πλέον σε κατάλληλη μορφή, κατασκευάστηκαν οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης των πειραμάτων. Όπως όμως προαναφέρθηκε στις καμπύλες αυτές απεικονίζονταν και τιμές που δεν αντιστοιχούσαν στην κατεργασία. Η έναρξη των πλεοναζόντων τιμών γινόταν αισθητή από τη μορφή της εκάστοτε καμπύλης, αφού από το σημείο που σταματούσαν τα ωφέλιμα αποτελέσματα του πειράματος, οι τιμές του φορτίου έπεφταν απότομα σε

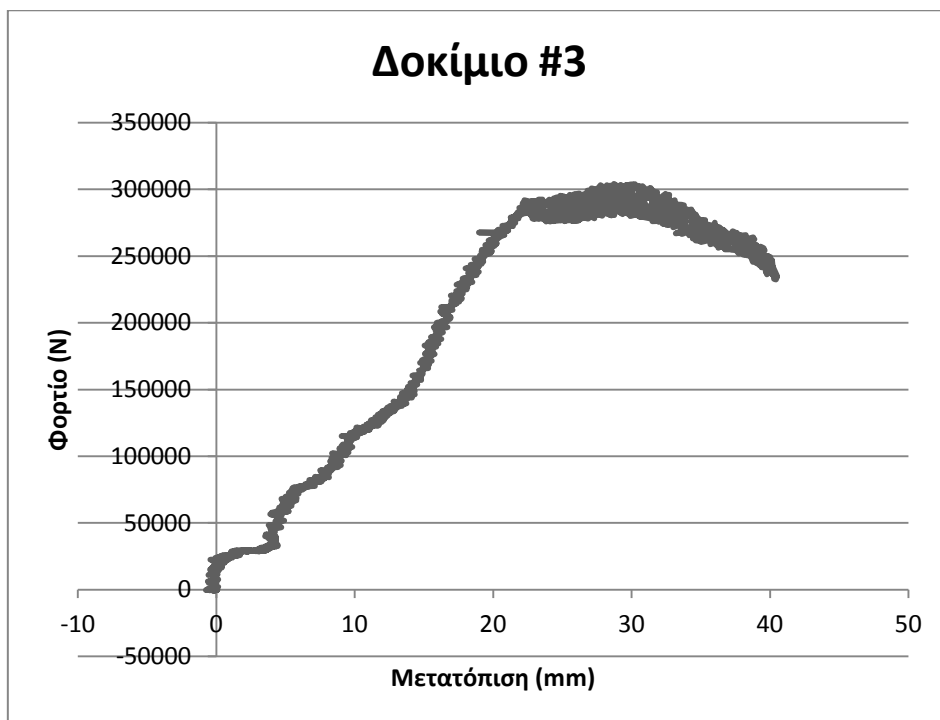
τιμές κοντά στο μηδέν ή ακόμα και αρνητικές. Έτσι, μετά από παρατήρηση κάθε καμπύλης ξεχωριστά, προσδιορίστηκε ο χρόνος των ωφέλιμων μετρήσεων, ο οποίος και παρουσιάστηκε για κάθε δοκίμιο στον παραπάνω πίνακα. Όλες οι τιμές του φορτίου και της μετατόπισης μετά το πέρας της συγκεκριμένης χρονικής στιγμής απορρίφθηκαν. Τελικά, οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για κάθε δοκίμιο, παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



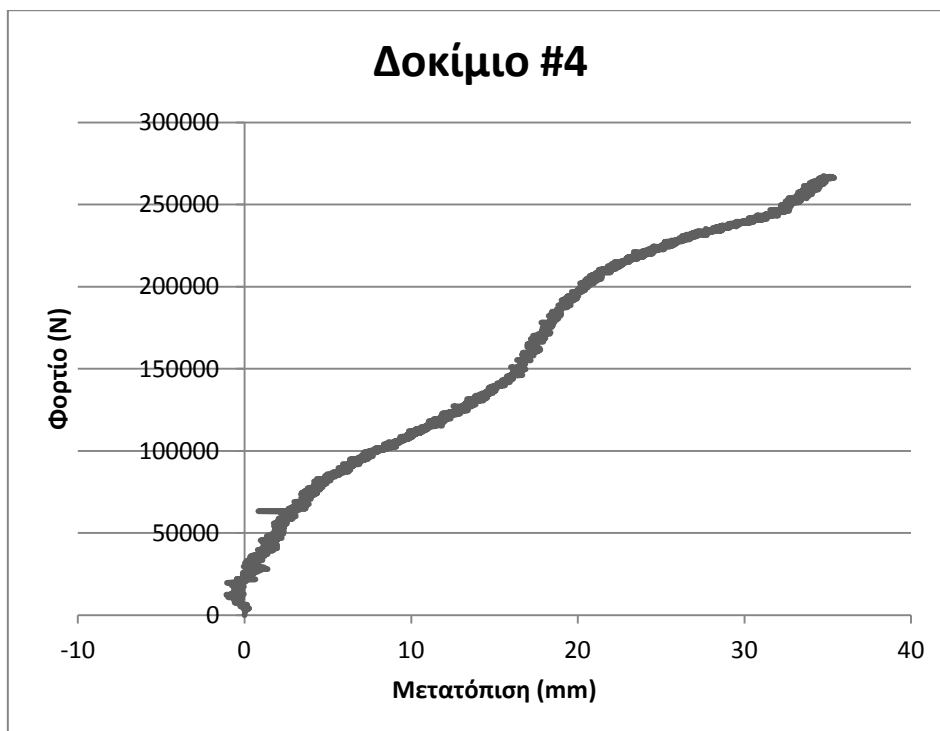
Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου #1



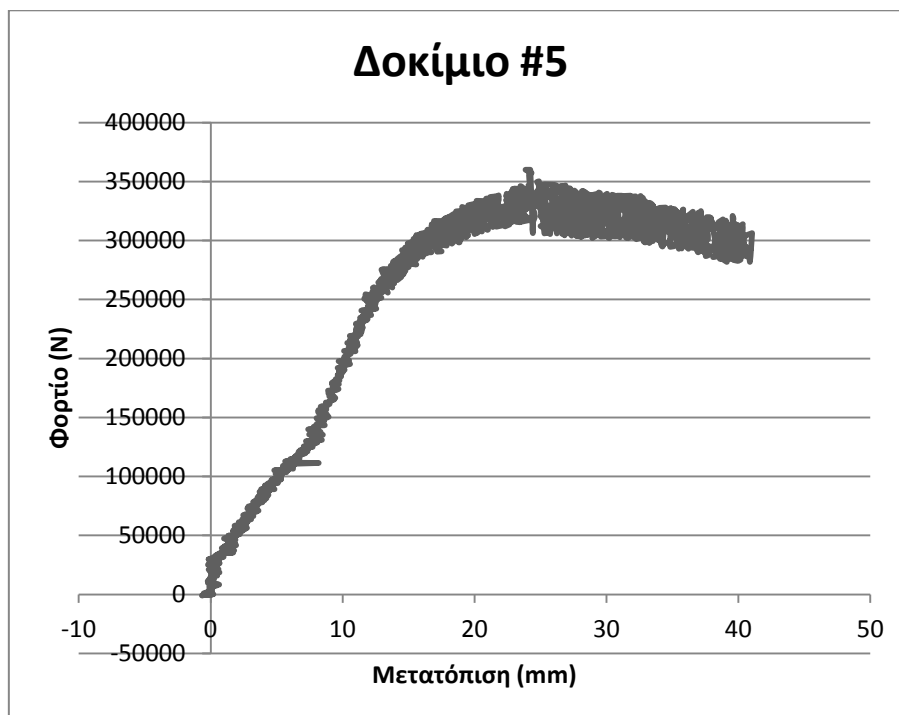
Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου #2



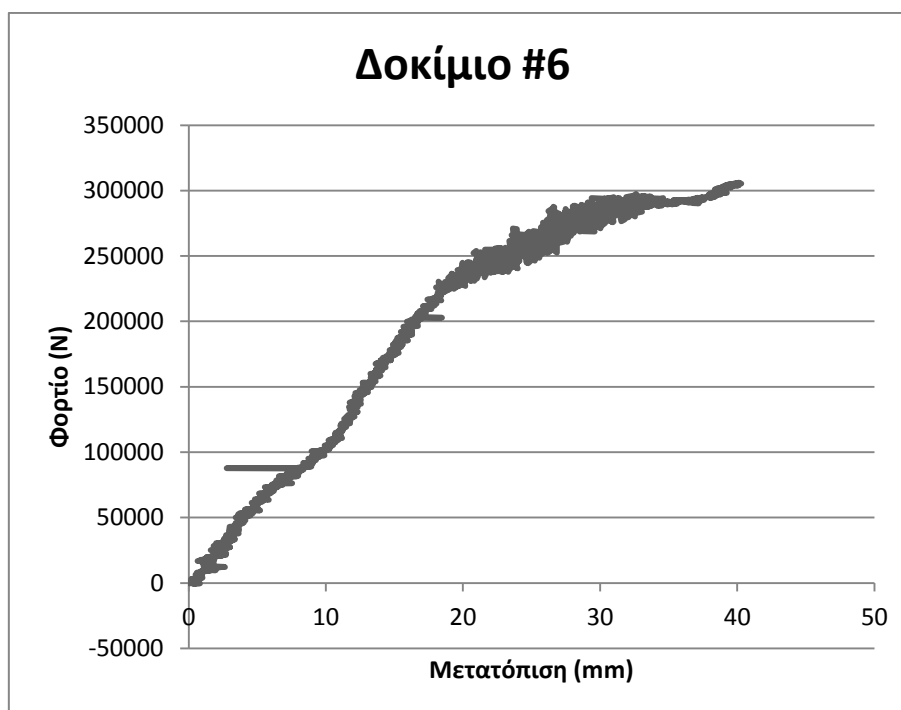
Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου #3



Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου #4



Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου #5



Πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου #6

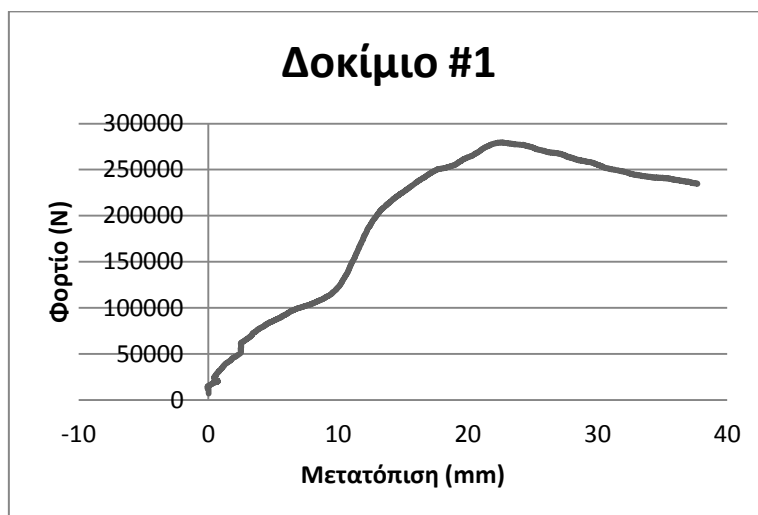
Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα αυτά, ο τρόπος με τον οποίο έγιναν οι λήψεις των αποτελεσμάτων από τον αισθητήρα, δεν ήταν ο πλέον κατάλληλος για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Έτσι, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη των μέσων τιμών για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις. Για την κατασκευή της καμπύλης των μέσων τιμών χρησιμοποιήθηκαν οι μέσοι όροι των γειτονικών 50 σημείων κάθε τιμής φορτίου και των γειτονικών 50 σημείων κάθε τιμής της μετατόπισης. Ο λόγος για τη χρήση και των δύο μέσων όρων είναι ότι οι πειραματικές καμπύλες όπως αποτυπώθηκαν, παρουσιάζουν ταλαντωτική συμπεριφορά τόσο κατά την αύξηση των τιμών του φορτίου, όσο και κατά την αύξηση των τιμών των μετατοπίσεων. Η διπλή αυτή ταλάντωση των τιμών είναι που προκαλεί την ασάφεια των παραπάνω διαγραμμάτων.

Μελετώντας τις πειραματικές καμπύλες που παρουσιάστηκαν παραπάνω, μπορούμε να διακρίνουμε όλες εκείνες τις λεπτομέρειες που παρατηρήθηκαν και στις καμπύλες των υπολογιστικών μοντέλων. Έτσι, και στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι στα περισσότερα δοκίμια παρουσιάζονται τρεις χαρακτηριστικές οριζοντιώσεις, καθώς και οι δύο πρώτες φάσεις της διέλασης. Εξαιρέση αποτελούν οι καμπύλες των δοκιμίων #4 και #6, όπου παρατηρούνται καθαρά μόνο οι δύο οριζοντιώσεις της εκάστοτε καμπύλης (αν και υπάρχουν και άλλες μορφές που παραπέμπουν στην τρίτη οριζόντιωση), ενώ εμφανίζεται μόνο η πρώτη φάση της διέλασης. Γενικά, τα συμπεράσματα που μπορούν να γίνουν για τις καμπύλες αυτές είναι τα ίδια με τα αντίστοιχα των υπολογιστικών καμπυλών, αφού η κατασκευή των υπολογιστικών μοντέλων έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε τα αποτελέσματα να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στις αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες.

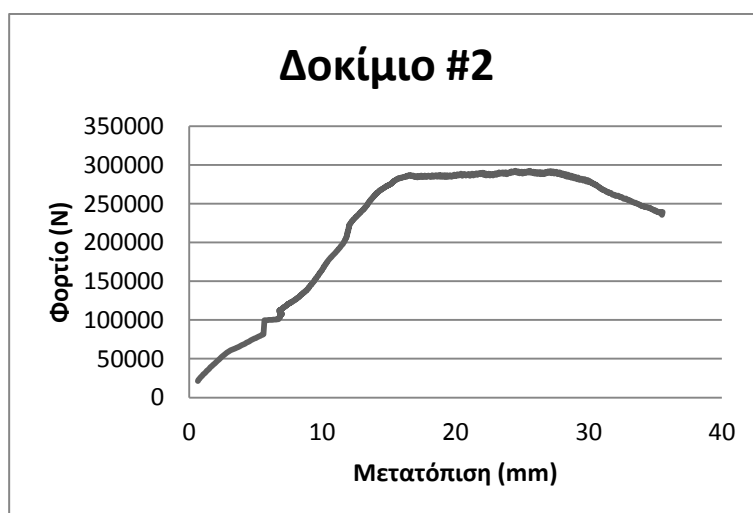
Από την παρατήρηση των παραπάνω, η καμπύλη του δοκιμίου #2 φαίνεται ότι παρουσιάζει μια ιδιαίτερη διαμόρφωση. Έτσι, στο διάστημα 1,5 έως 4,5 mm περίπου, παρατηρείται μια απότομη πτώση στο φορτίο που διαβάζει ο αισθητήρας. Η ατέλεια αυτή της καμπύλης οφείλεται σε ένα λάθος που πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος. Ο λόγος ήταν ότι η ταχύτητα καθόδου του εμβόλου δεν είχε ρυθμιστεί σωστά πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας, αλλά είχε μεγαλύτερη τιμή. Έτσι, έπρεπε το έμβολο να ανασηκωθεί κατά λίγα χιλιοστά και η ταχύτητα να ρυθμιστεί στη σωστή τιμή (0,3 mm/s). Το αποτέλεσμα αυτής της επιλοκής έγινε ορατό στην καμπύλη. Παρόλα αυτά, κατά την κατασκευή της μέσης

τιμής για τη συγκεκριμένη καμπύλη, οι τιμές αυτές εξαιρέθηκαν και άρα το σφάλμα αυτό δε λήφθηκε υπ' όψιν.

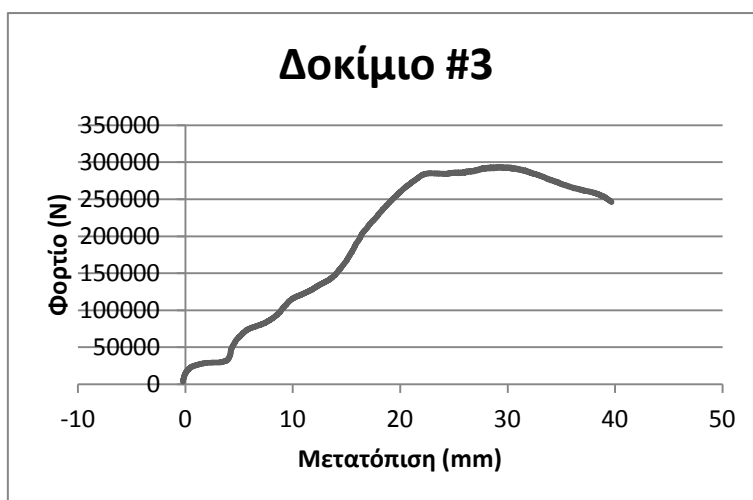
Οι καμπύλες των μέσων τιμών του φορτίου συναρτήσει της μετατόπισης, απεικονίζονται για όλα τα δοκίμια στις παρακάτω εικόνες.



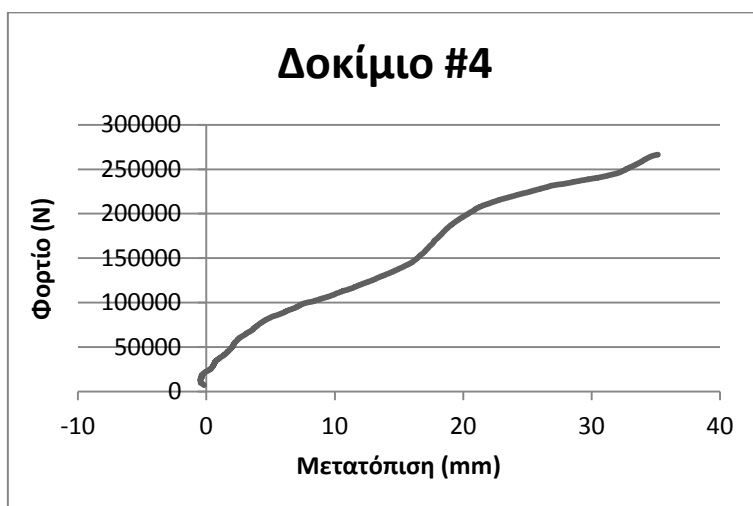
Καμπύλη μέσων τιμών δοκιμίου #1



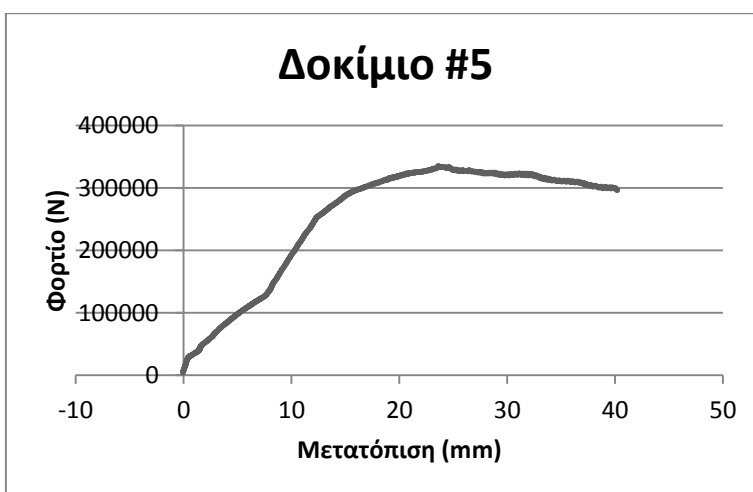
Καμπύλη μέσων τιμών δοκιμίου #2



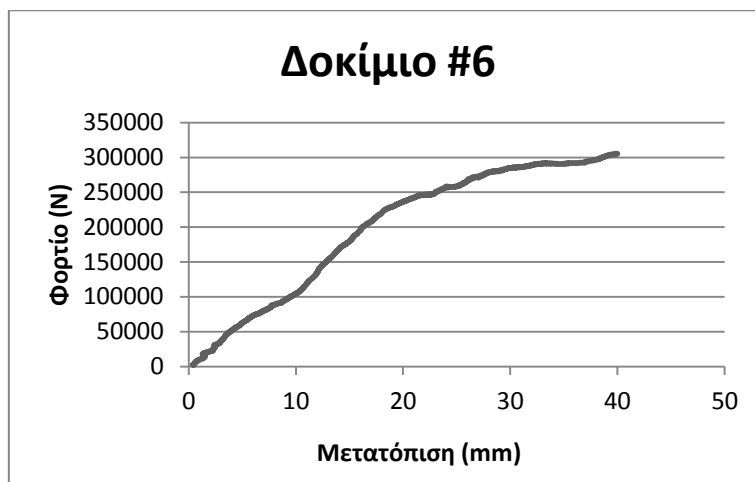
Καμπύλη μέσων τιμών δοκιμίου #3



Καμπύλη μέσων τιμών δοκιμίου #4



Καμπύλη μέσων τιμών δοκιμίου #5



Καμπύλη μέσων τιμών δοκιμίου #6

Μετά την κατασκευή των καμπυλών των μέσων τιμών, φαίνεται ότι πολλά από τα σημεία που παρατηρήθηκαν προηγουμένως έχουν εξομαλυνθεί σε μεγάλο βαθμό, ενώ άλλα έχουν σχεδόν εξαφανιστεί. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη μορφή των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι καταλληλότερη για τη σύγκριση με άλλες καμπύλες, αφού οι διαφορές μεταξύ τους είναι πιο εύκολα παρατηρήσιμες.

5.1.2 Κατασκευή καμπύλης υπολογιστικών αποτελεσμάτων

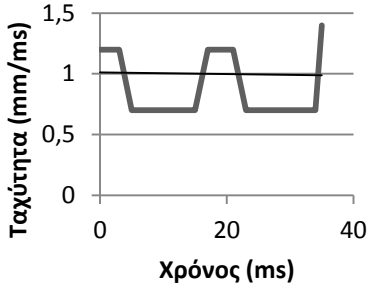
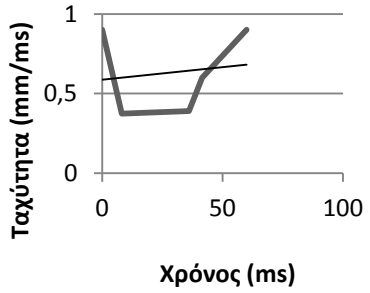
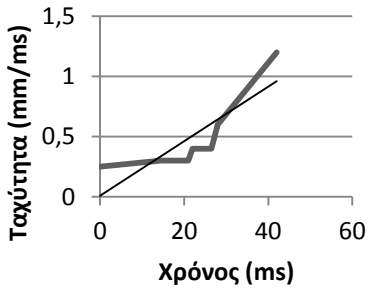
Για την κατασκευή της καμπύλης των υπολογιστικών αποτελεσμάτων, προαπαιτούμενη είναι η ύπαρξη των καμπυλών φορτίου – χρόνου που εξήχθησαν κατά την επίλυση των μοντέλων από το LS – DYNA. Οι καμπύλες αυτές μπορούν να αποδοθούν με τη βοήθεια του μετα-επεξεργαστή και του επεξεργαστή γραφικών, τόσο σε μορφή γραφίματος, όσο και ως υπολογιστικά δεδομένα. Το γεγονός αυτό είναι πολύ χρήσιμο, αφού με τον τρόπο αυτό μπορούν να ληφθούν απευθείας τα στοιχεία με τη μορφή υπολογιστικών δεδομένων και έτσι να συγκριθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του πειραματικού μέρους. Για την αποθήκευση των υπολογιστικών δεδομένων των προς επεξεργασία καμπυλών, ο επεξεργαστής γραφικών εξάγει αρχεία τύπου .cur, τα οποία είναι επεξεργάσιμα με έναν οποιονδήποτε editor (έχουν κωδικοποίηση ASCII).

Από τις καμπύλες φορτίου – χρόνου, έπρεπε να γίνει κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων του χρόνου, ώστε οι καμπύλες να μετατραπούν στις αντίστοιχες καμπύλες φορτίου – μετατόπισης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα προφίλ των ταχυτήτων του εμβόλου που εισήχθησαν κατά την κατασκευή των μοντέλων. Το προφίλ των ταχυτήτων του εμβόλου συμπίπτει στα μοντέλα αυτά, με το αντίστοιχο προφίλ των ταχυτήτων του δοκιμίου, αφού από την αρχή της προσομοίωσης της κατεργασίας το έμβολο είναι σε επαφή με το δοκίμιο.

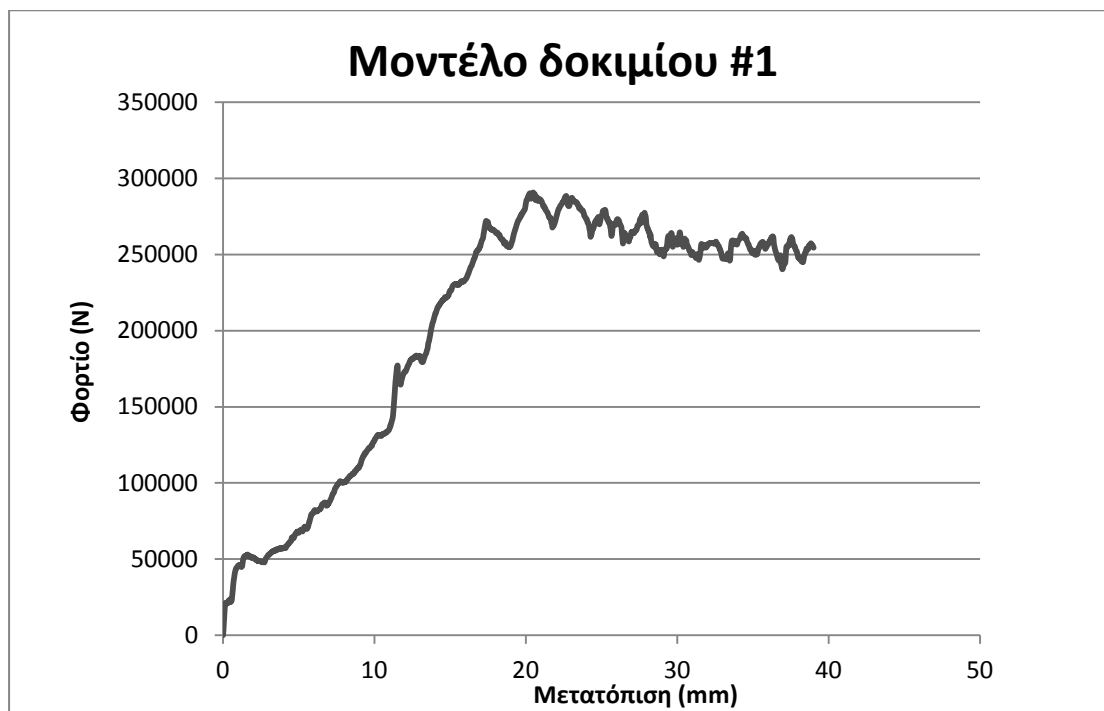
Από το προφίλ των ταχυτήτων χρησιμοποιήθηκε, με βάση τους νόμους της στατιστικής, η μέθοδος της προσαρμογής σε ευθεία^[1]. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή από το κάθε γράφημα εξάγεται μια ισοδύναμη σε αυτό ευθεία. Η ευθεία αυτή συνδέει την ταχύτητα καθόδου του εμβόλου με το χρόνο στον οποίο πραγματοποιείται. Έτσι, προκύπτει η ταχύτητα που θα έχει το έμβολο σε κάθε χρονική στιγμή. Η ταχύτητα από το LS – DYNA δίνεται σε μονάδες mm/ms. Έτσι, εάν στη συνέχεια πολλαπλασιαστεί η ταχύτητα καθόδου του εμβόλου με τον χρόνο του μοντέλου (οι μονάδες του χρόνου είναι σε ms), προκύπτει η μετατόπιση του εμβόλου που ισοδυναμεί με την μετατόπιση του δοκιμίου. Όπως φαίνεται από τα προηγούμενα, οι μονάδες της μετατόπισης του δοκιμίου προκύπτουν σε mm.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα προφίλ των ταχυτήτων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των μοντέλων, καθώς και η ευθεία που προσαρμόστηκε σε κάθε ένα. Επίσης, παρουσιάζονται οι συναρτήσεις των προσαρμοσμένων ευθειών κάθε περίπτωσης και οι συναρτήσεις των μετατοπίσεων για κάθε μοντέλο. Στις συναρτήσεις αυτές u είναι η ταχύτητα του δοκιμίου, t είναι ο χρόνος και x είναι η μετατόπιση. Ο πίνακας με τα στοιχεία αυτά είναι ο εξής:

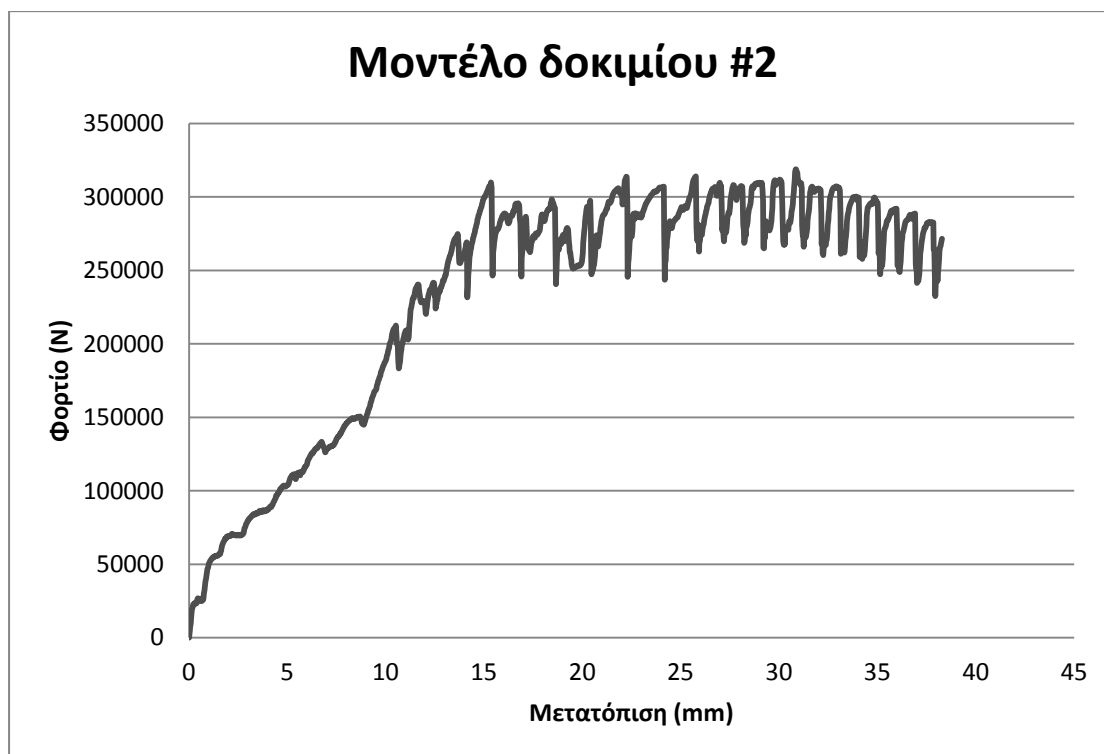
Αριθμός δοκιμίου	Συνάρτηση ισοδύναμης ευθείας	Συνάρτηση μετατόπισης	Προφίλ ταχύτητας και ισοδύναμη ευθεία
1	$u = 8 \cdot 10^{-5} \cdot t + 0,1611$	$x = 8 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,1611 \cdot t$	<p>Δοκίμιο #1</p>
2	$u = 0,0002 \cdot t + 0,1992$	$x = 0,0002 \cdot t^2 + 0,1992 \cdot t$	<p>Δοκίμιο #2</p>
3	$u = 0,0039 \cdot t + 0,6191$	$x = 0,0039 \cdot t^2 + 0,6191 \cdot t$	<p>Δοκίμιο #3</p>

4	$u = -0,0007 \cdot t + 1,0118$	$x = -0,0007 \cdot t^2 + 1,0118 \cdot t$	<p style="text-align: center;">Δοκίμιο #4</p> 
5	$u = 0,0016 \cdot t + 0,5874$	$x = 0,0016 \cdot t^2 + 0,5874 \cdot t$	<p style="text-align: center;">Δοκίμιο #5</p> 
6	$u = 0,0227 \cdot t + 0,0078$	$x = 0,0227 \cdot t^2 + 0,0078 \cdot t$	<p style="text-align: center;">Δοκίμιο #6</p> 

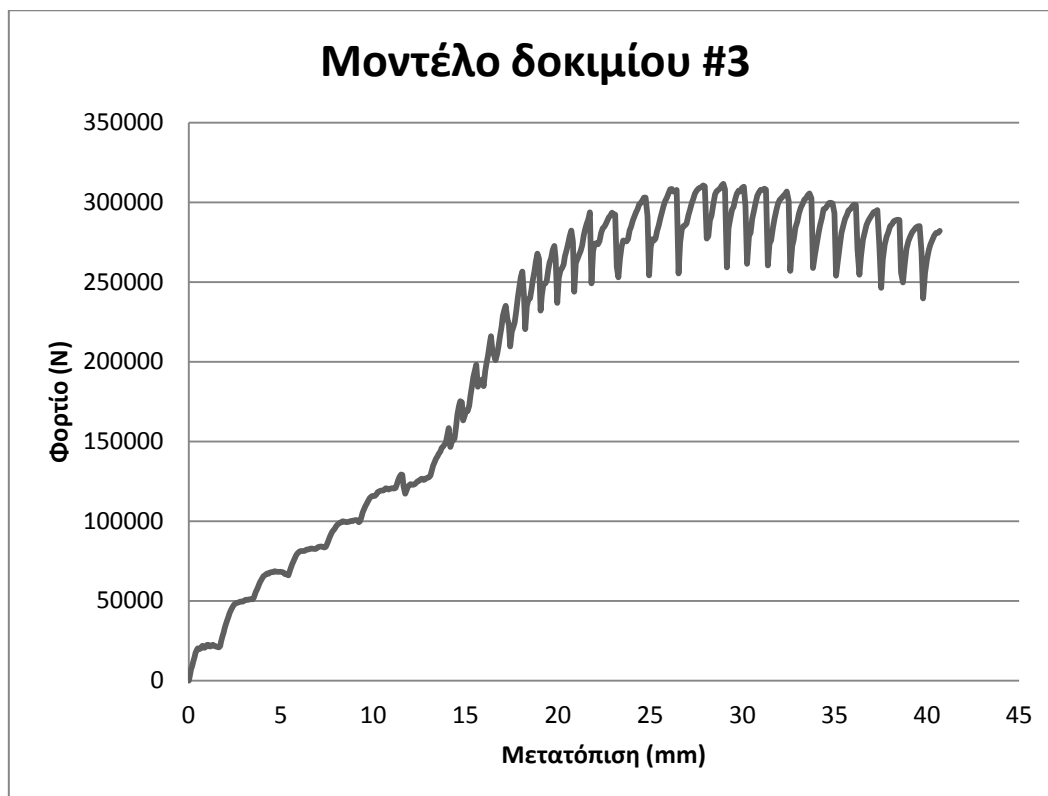
Με τον τρόπο αυτό προέκυψαν τα διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης, για κάθε υπολογιστικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



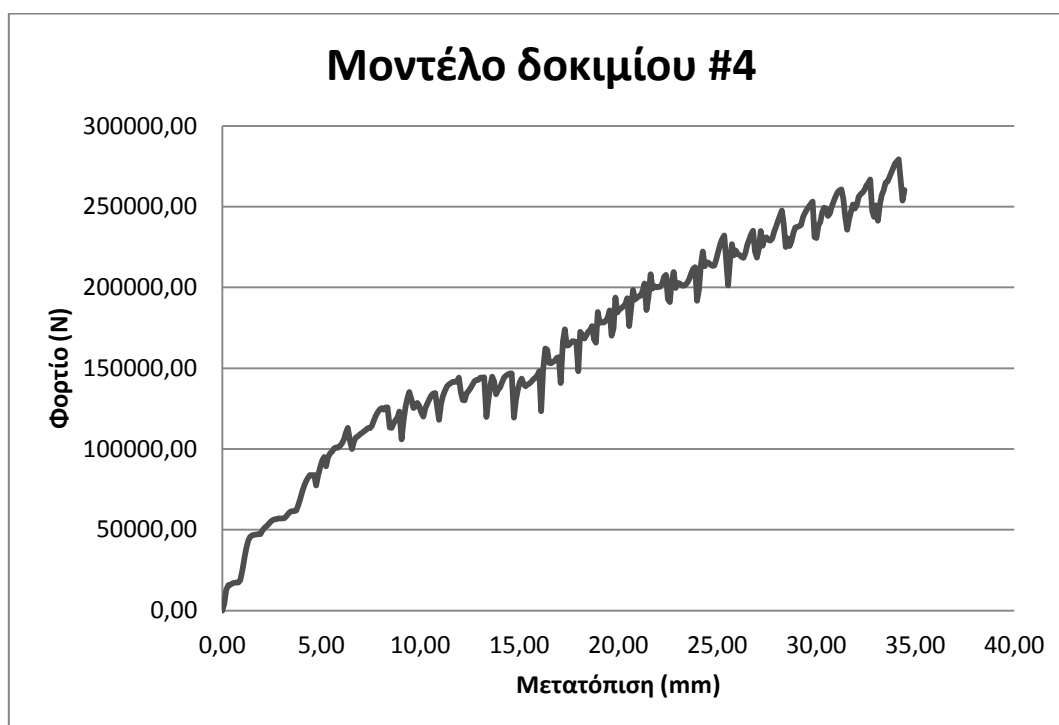
Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης του μοντέλου του δοκιμίου #1



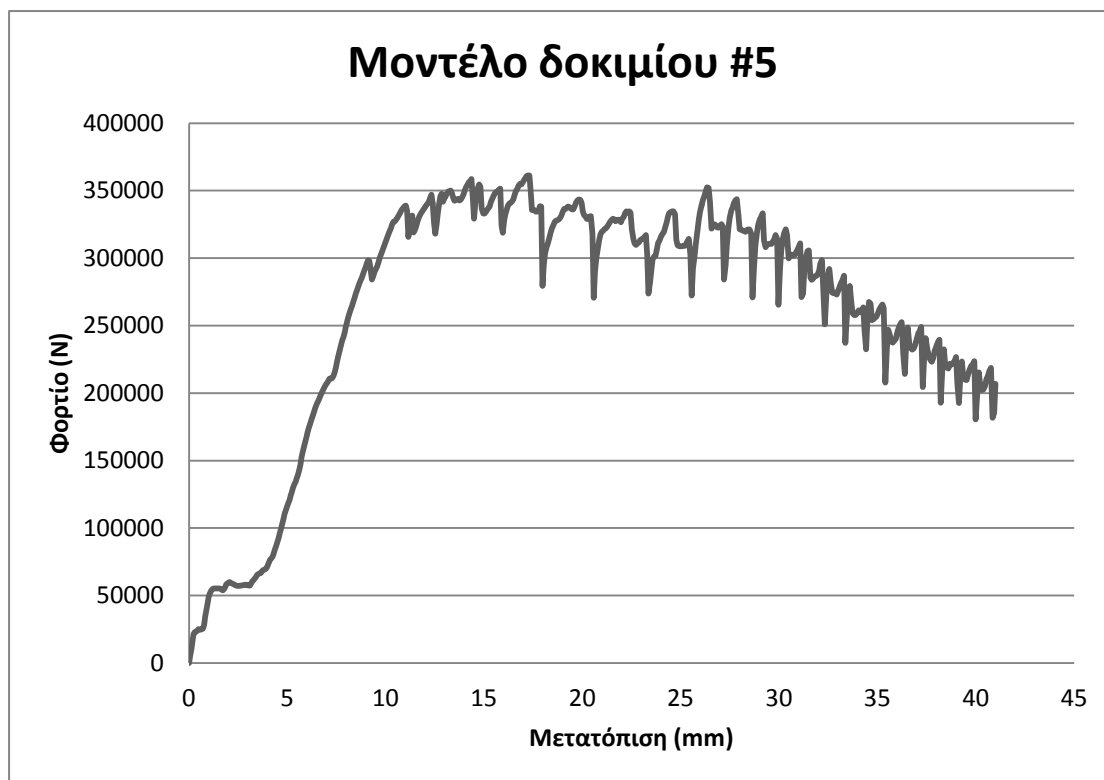
Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης του μοντέλου του δοκιμίου #2



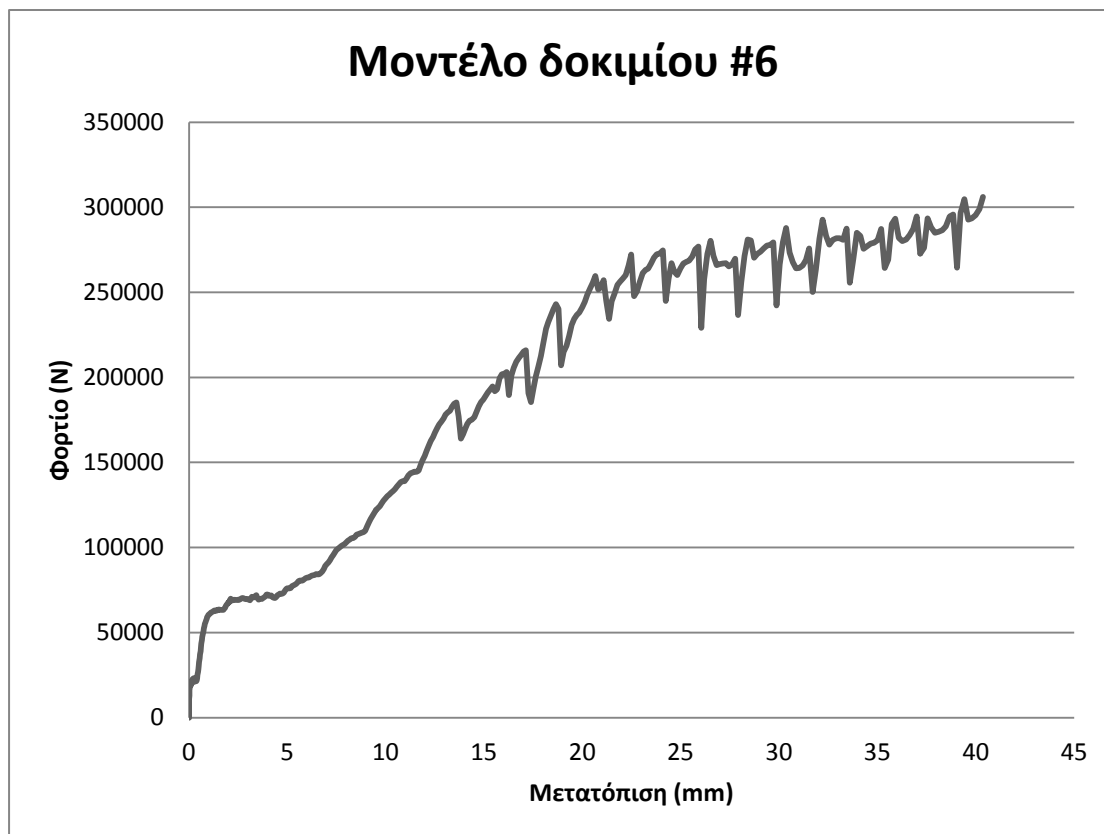
Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης του μοντέλου του δοκιμίου #3



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης του μοντέλου του δοκιμίου #4



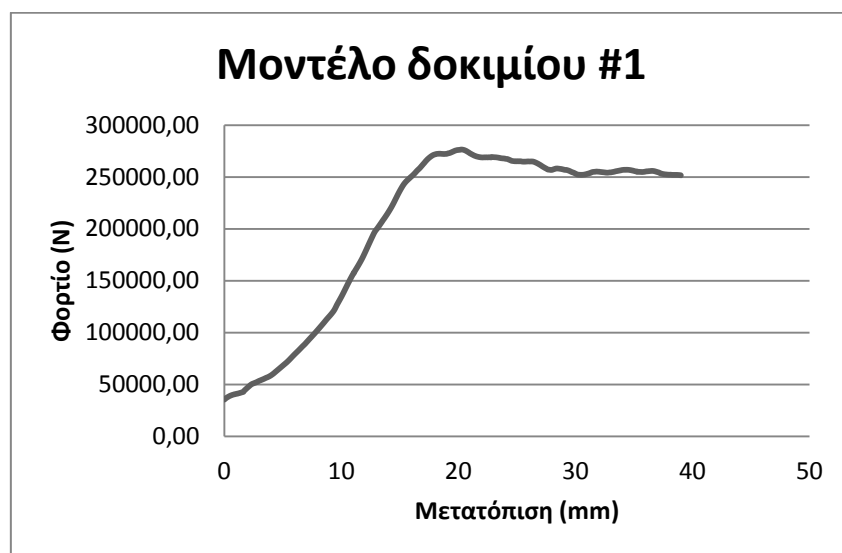
Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης του μοντέλου του δοκιμίου #5



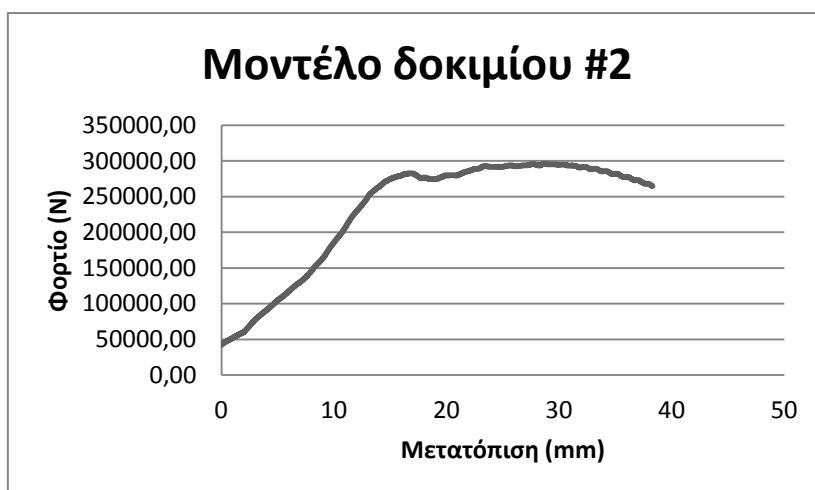
Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης του μοντέλου του δοκιμίου #6

Όπως και τα διαγράμματα των πειραματικών αποτελεσμάτων, οι καμπύλες των αποτελεσμάτων των μοντέλων δεν έχουν την κατάλληλη μορφή, ώστε να μπορεί να γίνει σύγκρισή τους με κάποια άλλη καμπύλη. Για το λόγο αυτό, από τον μετα-επεξεργαστή του LS – DYNA εξήχθησαν και τα δεδομένα των καμπυλών των μέσων τιμών, για κάθε ένα από τα υπολογιστικά μοντέλα. Οι μέσες τιμές του φορτίου σε κάθε διάγραμμα, όπως παρουσιάστηκαν και στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 4), προέκυψαν για κάθε τιμή του διαγράμματος, από το μέσο όρο των αντίστοιχων τιμών κάποιου αριθμού γειτονικών σημείων. Ο αριθμός των γειτονικών σημείων που χρησιμοποιήθηκε ήταν διαφορετικός για κάθε μοντέλο, και παρατέθηκε στο αντίστοιχο διάγραμμα κάθε μοντέλου.

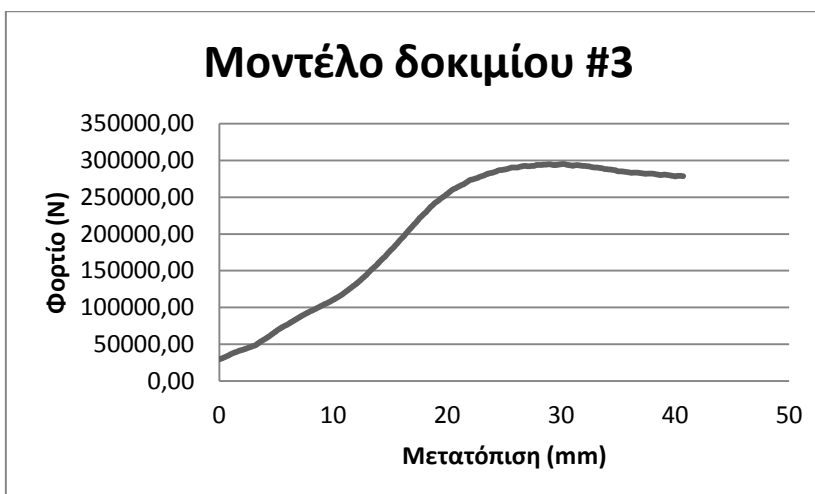
Τα δεδομένα για τις καμπύλες των μέσων τιμών σε κάθε μοντέλο, στη συνέχεια διήλθαν από παρόμοια επεξεργασία, με εκείνη των υπολογιστικών καμπυλών φορτίου – μετατόπισης. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας, παρατίθενται στις παρακάτω εικόνες.



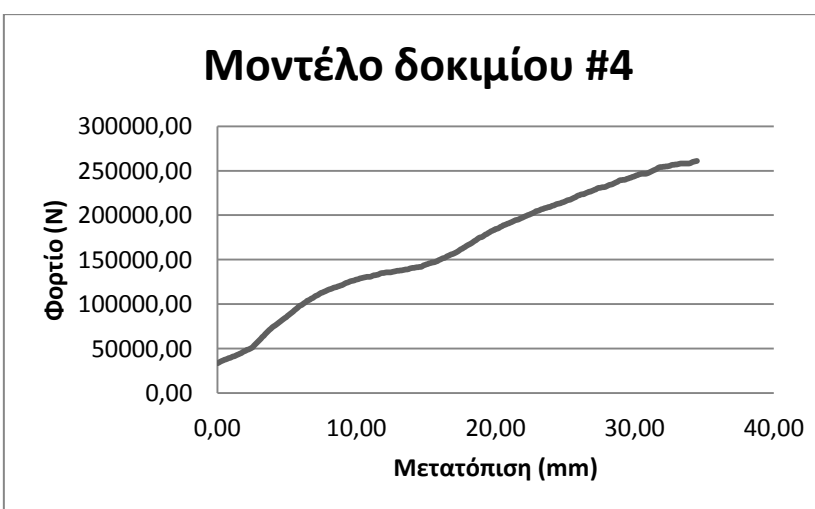
Διάγραμμα μέσων τιμών του μοντέλου του δοκιμίου #1



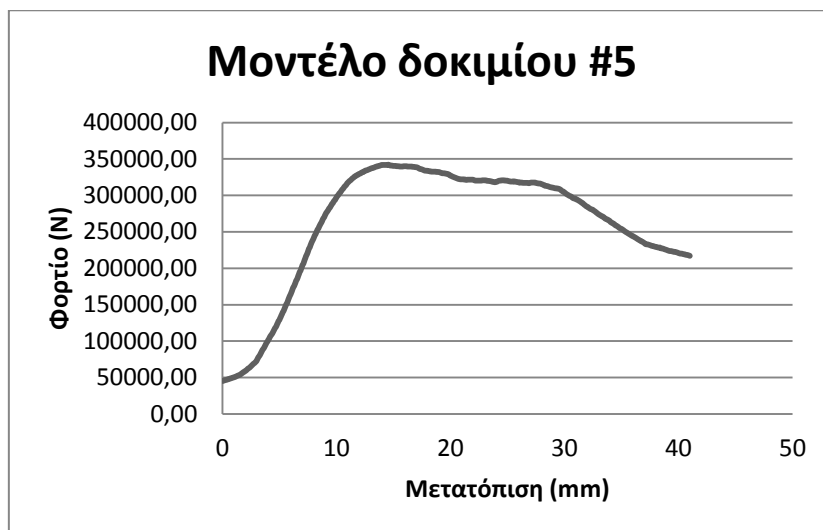
Διάγραμμα μέσων τιμών του μοντέλου του δοκιμίου #2



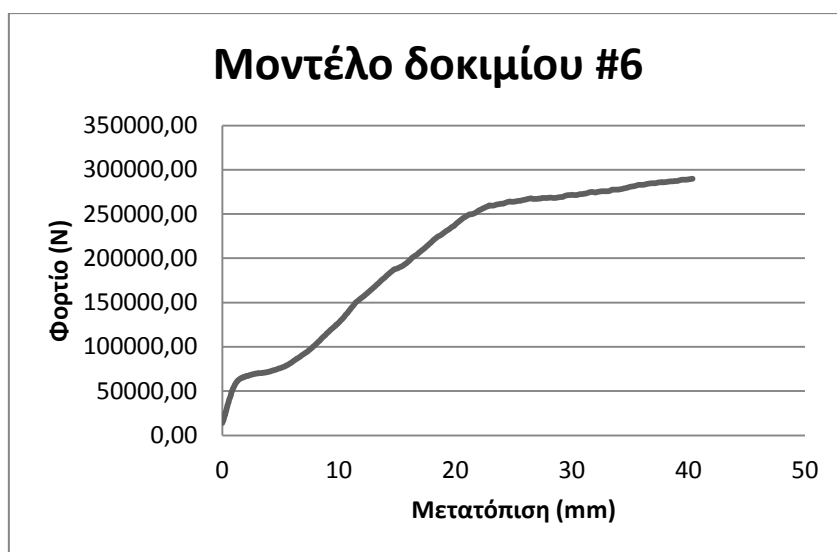
Διάγραμμα μέσων τιμών του μοντέλου του δοκιμίου #3



Διάγραμμα μέσων τιμών του μοντέλου του δοκιμίου #4



Διάγραμμα μέσων τιμών του μοντέλου του δοκιμίου #5



Διάγραμμα μέσων τιμών του μοντέλου του δοκιμίου #6

Μετά την κατασκευή όλων των καμπυλών των πειραματικών και των υπολογιστικών μοντέλων, είναι πλέον δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων, ώστε να εξαχθούν τα συμπεράσματα από ολόκληρη την εργασία.

5.2 Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων

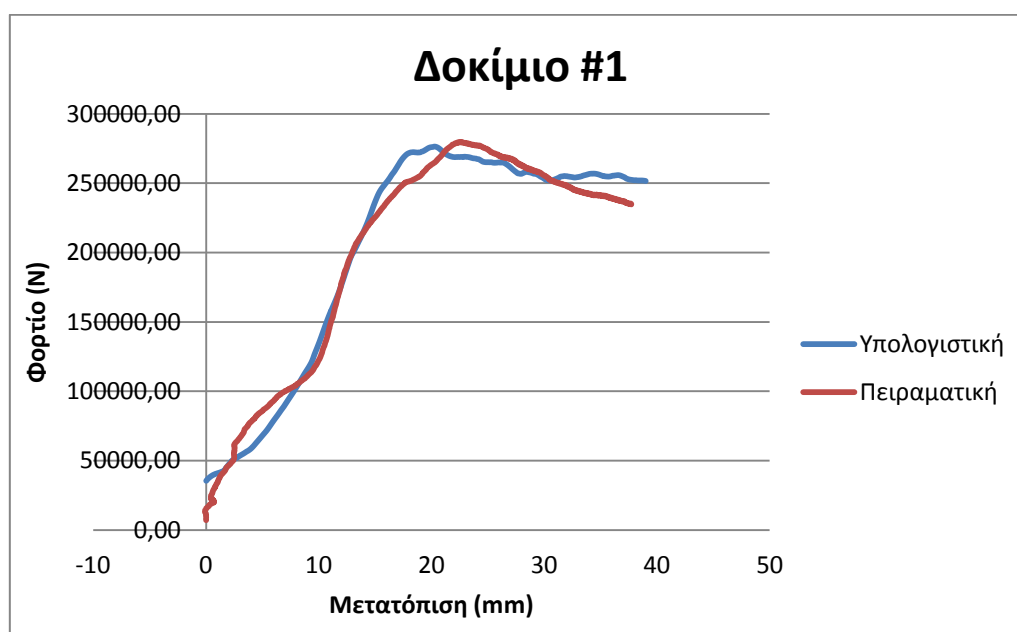
Στην ενότητα αυτή θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων του πειραματικού και του υπολογιστικού μέρους της εργασίας. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ξανά το γεγονός, ότι τα υπολογιστικά μοντέλα κατασκευάστηκαν με τις συνθήκες εκείνες που θα επέτρεπαν τη μεγαλύτερη σύγκλιση των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης (ή των καμπυλών των μέσων τιμών τους), που θα εξάγονταν από το πειραματικό και το υπολογιστικό μέρος. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, χρειάστηκε να επαναληφθεί η επίλυση των υπολογιστικών μοντέλων, μεταβάλλοντας σε κάθε επίλυση κάποιους παράγοντες (μέθοδος «δοκιμής – λάθους»). Οι παράγοντες αυτοί ήταν το προφίλ της ταχύτητας του εμβόλου κάθε μοντέλου, και οι συντελεστές τριβής στη διεπιφάνεια του δοκιμίου με τα τοιχώματα της μήτρας. Τα τελικά προφίλ των ταχυτήτων παρουσιάστηκαν παραπάνω (Υποενότητα 5.1.2), ενώ οι τελικοί συντελεστές τριβής παρατίθενται για μια ακόμη φορά (παράθεση των συντελεστών έγινε και στο Κεφ. 3) στον πίνακα που ακολουθεί:

Επαφή\Δοκίμιο	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Matrix – Outer^[1]	0.235 / 0.184	0.265 / 0.215	0.195 / 0.145	0.12 / 0.07	0.2175 / 0.1675	0.215 / 0.165
Outer – Middle^[2]	0.53 / 0.36	0.53 / 0.36	0.53 / 0.36	0.61 / 0.47	0.61 / 0.47	0.61 / 0.47
Middle – Inner^[2]	0.57 / 0.48	0.57 / 0.48	0.57 / 0.48	0.57 / 0.48	0.57 / 0.48	0.57 / 0.48
Outer – Inner^[2]	0.61 / 0.47	0.61 / 0.47	0.61 / 0.47	0.53 / 0.36	0.53 / 0.36	0.53 / 0.36
Item – Plate^[3]	0.2705 / 0.2163	0.2774 / 0.2197	0.2852 / 0.2235	0.3028 / 0.2834	0.3351 / 0.2697	0.3723 / 0.2991
(Δοκίμια #4 και #6) Matrix Down – Outer^[1]	-	-	-	0.165 / 0.115	-	0.215 / 0.165

Στη συνέχεια, γίνεται η σύγκριση των καμπυλών των μέσων τιμών φορτίου – μετατόπισης, για κάθε ένα από τα δοκίμια της εργασίας.

5.2.1 Δοκίμιο #1

Για το δοκίμιο #1, η σύγκριση των δύο καμπυλών παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων δοκιμίου #1

Συγκρίνοντας τις δύο καμπύλες μεταξύ τους, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

Πρώτη φάση διέλασης:

- Στην έναρξη της πρώτης φάσης (περιοχή μέχρι περίπου τα 10 mm μετατόπισης), οι τιμές του φορτίου της πειραματικής καμπύλης είναι λίγο μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της υπολογιστικής καμπύλης.
- Στο μέσο της πρώτης φάσης (περιοχή από 10 mm έως 15 mm περίπου), οι δύο καμπύλες έχουν περίπου την ίδια μορφή και τιμές.
- Στο τέλος της πρώτης φάσης (περιοχή από 15 mm ως 22 mm περίπου), η υπολογιστική καμπύλη φτάνει στη μέγιστη τιμή του φορτίου νωρίτερα από

την πειραματική καμπύλη, η οποία έχει πιο ομαλή κλίση ως το σημείο του μέγιστου φορτίου. Άρα η πρώτη φάση της διέλασης στο πείραμα ολοκληρώθηκε λίγο πιο αργά από ότι αυτό έγινε στο υπολογιστικό ανάλογο (για μετατόπιση 20 mm η υπολογιστική καμπύλη είναι ήδη στη δεύτερη φάση της διέλασης). Παρόλα αυτά, η τιμή του μέγιστου φορτίου των δύο καμπυλών είναι περίπου η ίδια.

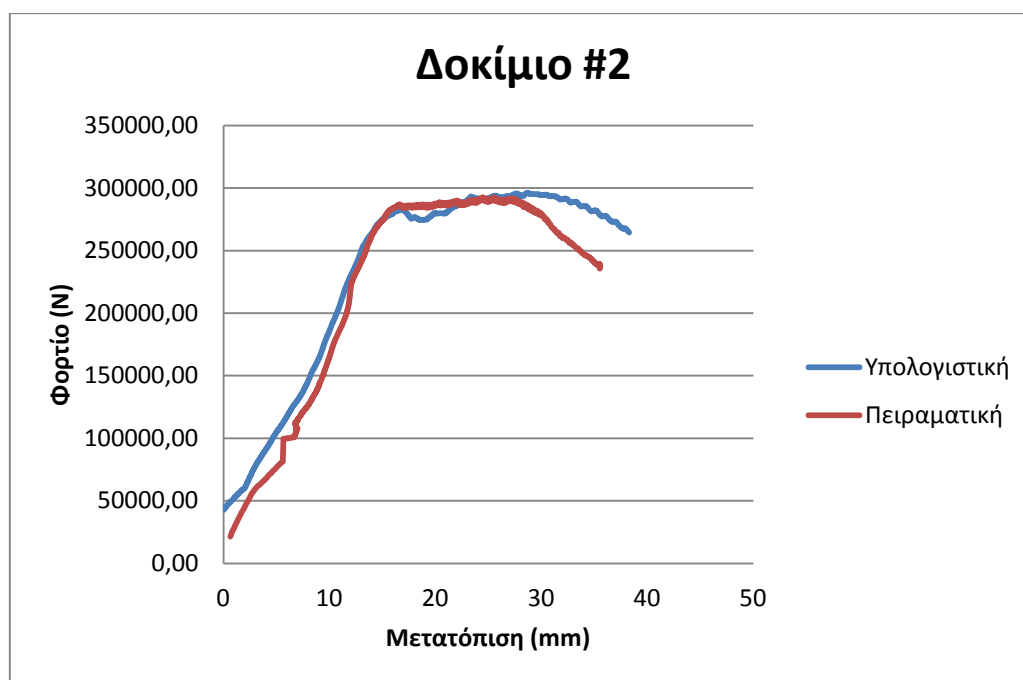
Δεύτερη φάση διέλασης:

- Στο πρώτο μισό της δεύτερης φάσης (περιοχή από 22 mm έως 30 mm περίπου), η πειραματική καμπύλη έχει μεγαλύτερες τιμές φορτίου από ότι η υπολογιστική καμπύλη. Παρόλα αυτά, η κλίση της είναι πιο μεγάλη, με αποτέλεσμα οι τιμές του φορτίου να μειώνονται πιο γρήγορα από ότι στην υπολογιστική καμπύλη.
- Στο δεύτερο μισό της δεύτερης φάσης (περιοχή από 30 mm περίπου έως το τέλος), η υπολογιστική καμπύλη σταματά την πτωτική της πορεία και συνεχίζει σχεδόν ευθύγραμμα. Αντίθετα, η πειραματική καμπύλη συνεχίζει με την ίδια κλίση την πτωτική της πορεία. Αποτέλεσμα είναι ότι στο συγκεκριμένο τμήμα των καμπυλών η υπολογιστική καμπύλη έχει μεγαλύτερες τιμές φορτίου από ότι η πειραματική.

Γενικά, από τις δύο καμπύλες φαίνεται πως υπάρχει συνέπεια μεταξύ του πειράματος και του υπολογιστικού μοντέλου. Έτσι, η χρήση του υπολογιστικού μοντέλου για την προσομοίωση του πειράματος με τις συγκεκριμένες συνθήκες, θεωρείται αποδεκτή, αφού οι μέγιστες τιμές των φορτίων δεν έχουν μεγάλη απόκλιση και η πορεία της υπολογιστικής καμπύλης είναι πολύ κοντά σε αυτή της πειραματικής. Παρόλα αυτά, στο μοντέλο υπάρχει περιθώριο για περαιτέρω βελτίωση. Μια προτεινόμενη τέτοια βελτίωση είναι η κατάλληλη μεταβολή του προφίλ ταχύτητας, ώστε να επιτευχθεί αλλαγή της κλίσης της καμπύλης, κυρίως στη δεύτερη φάση της διέλασης.

5.2.2 Δοκίμιο #2

Για το δοκίμιο #2, η σύγκριση των δύο καμπυλών παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων δοκιμίου #2

Συγκρίνοντας τις δύο καμπύλες μεταξύ τους, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

Πρώτη φάση διέλασης:

- Στο πρώτο μέρος της πρώτης φάσης της κατεργασίας (περιοχή από 0 mm έως 12 mm περίπου), οι τιμές του φορτίου στο υπολογιστικό μοντέλο φαίνεται πως είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του πειραματικού μέρους. Παρόλα αυτά, οι κλίσεις των δύο καμπυλών στο κομμάτι αυτό φαίνεται πως είναι περίπου οι ίδιες.
- Στο ίδιο αυτό κομμάτι της πρώτης φάσης, γίνεται ορατή μια περίεργη διαμόρφωση στην πειραματική καμπύλη. Αυτή η διαμόρφωση παρουσιάστηκε κατά την προσπάθεια της σύνδεσης των δύο μερών της πειραματικής καμπύλης, τα οποία προέκυψαν μετά την παράληψη των τιμών της περιοχής

σφάλματος, της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης του αντίστοιχου πειράματος. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το σφάλμα της συγκεκριμένης καμπύλης, ο αναγνώστης παραπέμπεται στην υποενότητα 5.1.1.

- Στο δεύτερο μέρος της πρώτης φάσης (περιοχή από 12 mm έως 17 mm περίπου), παρατηρείται ότι οι δύο καμπύλες συγκλίνουν και μάλιστα σε πολύ μεγάλο βαθμό, μέχρις ότου η καμπύλη περάσει το γόνατο.
- Στο τελευταίο μέρος της πρώτης φάσης (περιοχή από 17 mm έως 30 mm περίπου), η πειραματική καμπύλη συνεχίζει μια σχεδόν ευθεία πορεία. Αντίθετα, στην καμπύλη του υπολογιστικού μοντέλου παρατηρείται μια μικρή «κοιλιά» στην αρχή αυτού του τμήματος της καμπύλης, όπου όμως σύντομα επανέρχεται στα ίδια επίπεδα με την πειραματική καμπύλη. Διαφορά παρατηρείται στο γεγονός ότι, η πρώτη φάση στο πείραμα ολοκληρώνεται γρηγορότερα από ότι στο υπολογιστικό μοντέλο (για μετατόπιση 30 mm η πειραματική καμπύλη είναι ήδη στη δεύτερη φάση της διέλασης), αφού το ευθύγραμμο τμήμα της υπολογιστικής καμπύλης είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της πειραματικής. Τέλος, και στην περίπτωση αυτή η τιμή του μέγιστου φορτίου είναι περίπου η ίδια, αν και εμφανίζεται σε διαφορετικές μετατοπίσεις των δύο καμπυλών.

Δεύτερη φάση διέλασης:

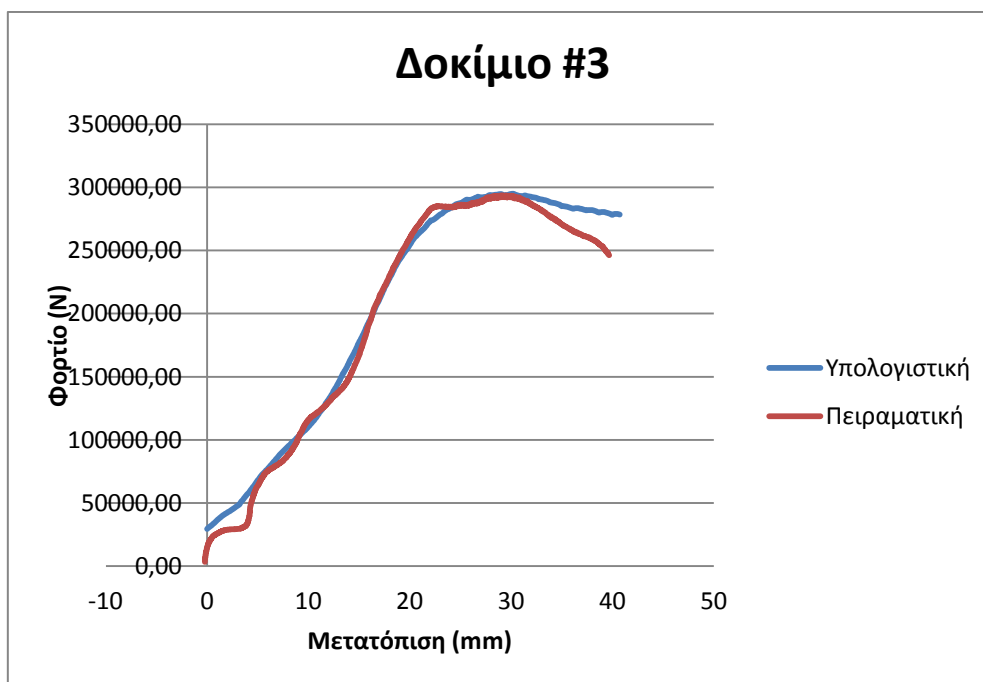
- Σε ολόκληρη τη δεύτερη φάση της κατεργασίας, η υπολογιστική καμπύλη είναι μετατοπισμένη δεξιά από την πειραματική καμπύλη. Έτσι, αν και οι τιμές του φορτίου που παρουσιάζονται στα δύο τμήματα είναι περίπου οι ίδιες, οι αντίστοιχες τιμές φορτίου εμφανίζονται σε διαφορετικές μετατοπίσεις. Παρόλα αυτά, παρατηρώντας τις κλίσεις των δύο αυτών τμημάτων, προκύπτει ότι αυτά είναι σχεδόν παράλληλα.

Στην περίπτωση αυτή παρατηρήθηκε ότι, οι δύο καμπύλες κατά ένα μεγάλο μέρος τους παρουσίαζαν παρόμοια συμπεριφορά. Μάλιστα, σε ένα τμήμα τους (κοντά στο γόνατο) εμφανίστηκε ταύτιση των δύο καμπυλών. Παρόλα αυτά, το συγκεκριμένο μοντέλο δεν είχε την ίδια τελική μετατόπιση με το αντίστοιχο πείραμα, αλλά εντούτοις είχε μεγαλύτερη. Ο λόγος για το συγκεκριμένο φαινόμενο ήταν ότι,

το μοντέλο σχεδιάστηκε έτσι ώστε να συγκλίνει στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης του πειράματος, στην οποία συμπεριλαμβάνονταν και μια περιοχή σφάλματος. Έτσι, ο χρονικός (και άρα και ο χωρικός) ορίζοντας του μοντέλου αναμενόταν μεγαλύτερος από αυτόν του πειράματος, αν εξαιρούνταν οι λανθασμένες τιμές. Συμπερασματικά προκύπτει λοιπόν ότι, το μοντέλο αυτό μπορεί, σε περίπτωση που βελτιωθεί το χρονικό σφάλμα, να δώσει μια πολύ καλή και ακριβή εικόνα για το συγκεκριμένο πείραμα, αφού τόσο η μορφή των καμπυλών όσο και οι μέγιστες τιμές του φορτίου, εμφάνισαν υψηλό ποσοστό σύγκλισης. Για τη βελτίωση του μοντέλου θα πρέπει να γίνει αναπροσαρμογή του προφίλ της ταχύτητας καθόδου του εμβόλου, καθώς και μείωση του τελικού χρόνου προσομοίωσης. Πάντως τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου, μπορούν να πληροφορήσουν σχετικά με τη γενική εικόνα του πειράματος, και μάλιστα με αρκετά καλή ακρίβεια για το μεγαλύτερο μέρος αυτής.

5.2.3 Δοκίμιο #3

Για το δοκίμιο #3, η σύγκριση των δύο καμπυλών παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων δοκιμίου #3

Από τη σύγκριση των δύο καμπυλών προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

Πρώτη φάση διέλασης:

- Παρατηρούμε ότι στην πρώτη φάση της διέλασης, σε όλο σχεδόν το διάστημα, οι δύο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται. Οι μόνες διαφορές που παρατηρούνται είναι σε κάποιες μικρές ταλαντώσεις που παρουσιάζονται στην πειραματική καμπύλη. Οι συγκεκριμένες ταλαντώσεις υπό κανονικές συνθήκες θα εμφανίζονταν και στην υπολογιστική καμπύλη, αλλά αυτές εξομαλύνθηκαν στην καμπύλη των μέσων τιμών, αφού χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος πολλών τιμών για κάθε σημείο της καμπύλης.
- Οι μέγιστες τιμές του φορτίου και σε αυτή την περίπτωση είναι σχεδόν οι ίδιες.

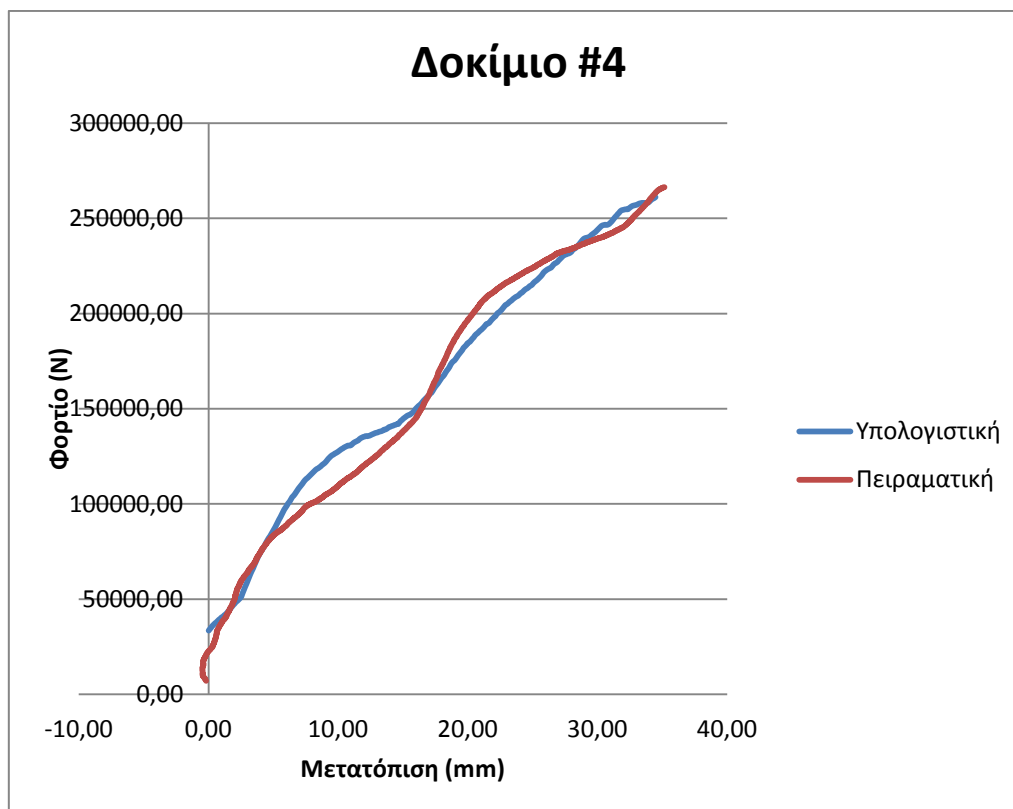
Δεύτερη φάση διέλασης:

- Η δεύτερη φάση της διέλασης, αν και μικρή σε διάστημα, παρουσιάζει διαφορές ανάμεσα στις δύο καμπύλες. Συγκεκριμένα τα φορτία της πειραματικής καμπύλης είναι μικρότερα σε τιμή, από τα αντίστοιχα της υπολογιστικής καμπύλης.

Γενικά, στην συγκεκριμένη περίπτωση, το υπολογιστικό μοντέλο, έδωσε πολύ κοντινά αποτελέσματα σε αυτά της πειραματικής καμπύλης, σε όλη την πρώτη φάση της διέλασης. Βελτίωση, όμως, απαιτείται στη δεύτερη φάση της κατεργασίας, ώστε τα αποτελέσματα της υπολογιστικής καμπύλης να πλησιάσουν σε αυτά της πειραματικής. Σαν τρόπος βελτίωσης, προτείνεται η κατάλληλη μεταβολή του τελευταίου τμήματος του προφίλ ταχυτήτων. Πάντως και με την παρούσα μορφή της υπολογιστικής καμπύλης, ο παρατηρητής μπορεί να αποκτήσει μια αρκετά καλή εικόνα της συγκεκριμένης κατεργασίας.

5.2.4 Δοκίμιο #4

Για το δοκίμιο #4, η σύγκριση των δύο καμπυλών παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων δοκιμίου #4

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι, στην περίπτωση αυτή, υπάρχει μόνο η πρώτη φάση της κατεργασίας. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα παρακάτω:

Πρώτη φάση διέλασης:

- Στο πρώτο τμήμα της φάσης αυτής (περιοχή από 0 mm έως 5 mm περίπου), οι δύο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται.
- Στο δεύτερο τμήμα της φάσης αυτής (περιοχή από 5 mm έως 17 mm περίπου), η μεν πειραματική καμπύλη ακολουθεί μια σχεδόν σταθερή πορεία, η δε υπολογιστική καμπύλη καμπυλώνει διατηρώντας τα κοίλα προς τα κάτω.

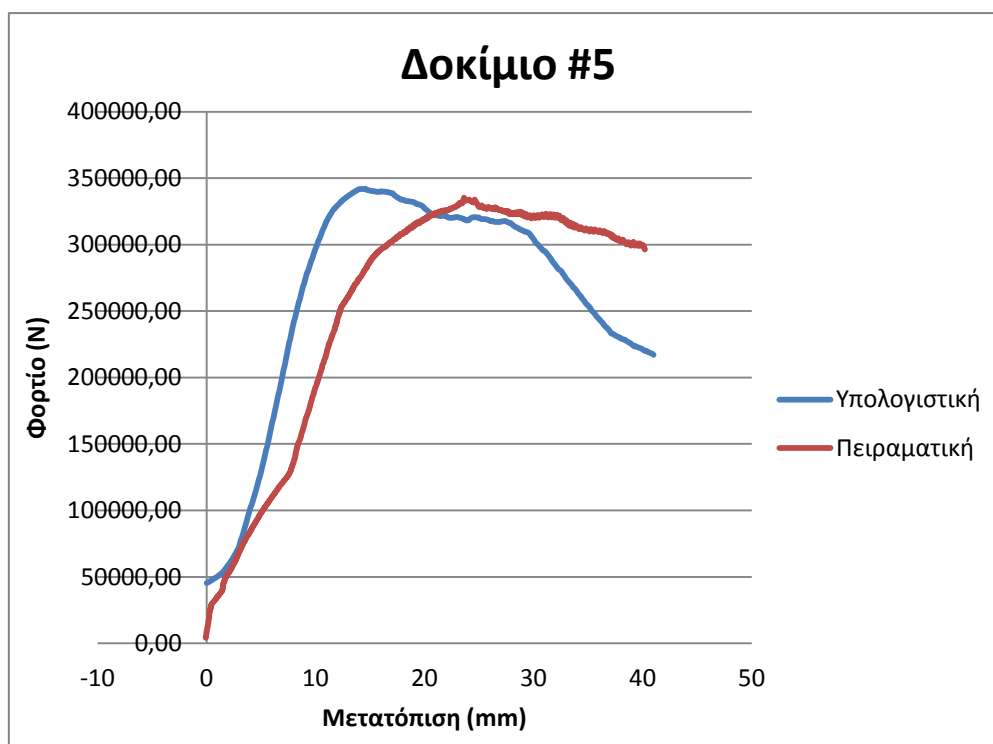
Οι τιμές του φορτίου της υπολογιστικής καμπύλης, στο τμήμα αυτό, είναι μεγαλύτερες, από τις αντίστοιχες τιμές της πειραματικής καμπύλης.

- Στο τρίτο τμήμα της φάσης αυτής (περιοχή από 17 mm έως 28 mm περίπου), οι συνθήκες αντιστρέφονται και τώρα η υπολογιστική καμπύλη είναι αυτή που ακολουθεί περίπου σταθερή πορεία, ενώ παράλληλα η πειραματική καμπύλη δημιουργεί μια καμπύλωση διατηρώντας τα κοίλα προς τα κάτω. Στην περίπτωση αυτή, οι τιμές του φορτίου της πειραματικής καμπύλης είναι μεγαλύτερες, από τις αντίστοιχες τιμές της υπολογιστικής καμπύλης.
- Στο τελευταίο τμήμα αυτής της φάσης (περιοχή από 28 mm περίπου έως το τέλος), η υπολογιστική καμπύλη διατηρεί την ίδια σταθερή πορεία, ενώ παράλληλα η πειραματική καμπύλη δημιουργεί μια αντίθετης φοράς (σε σχέση με την προηγούμενη) καμπύλωση. Ως αποτέλεσμα, οι τιμές του φορτίου της υπολογιστικής καμπύλης είναι και πάλι μεγαλύτερες από εκείνες της πειραματικής καμπύλης.
- Οι μέγιστες τιμές του φορτίου σε αυτή την περίπτωση εμφανίζονται στο τέλος της διέλασης του δοκιμίου και είναι και εδώ περίπου ίδιες και στις δύο καμπύλες.

Η σύγκριση των καμπυλών στην προκειμένη περίπτωση έδειξε ότι, αν και σε γενικές γραμμές το μοντέλο έδωσε παρόμοια αποτελέσματα με το πείραμα, έτσι ώστε ο παρατηρητής να μπορεί να αποκτήσει μια γενική εικόνα αυτού, εντούτοις υπάρχει περιθώριο βελτίωσης του συγκεκριμένου μοντέλου. Προτεινόμενοι τρόποι βελτίωσης αυτή τη φορά, είναι η κατάλληλη μεταβολή των συντελεστών τριβής ανάμεσα στα διάφορα μέρη της μήτρας και το δοκίμιο, με παράλληλη προσαρμογή του προφίλ ταχύτητας του εμβόλου, στους νέους συντελεστές τριβής. Υπενθυμίζεται στην περίπτωση αυτή, ότι το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί μια ιδιαίζουσα περίπτωση, και άρα τα αντίστοιχα αποτελέσματα δεν θεωρούνται πολύ αξιόπιστα.

5.2.5 Δοκίμιο #5

Για το δοκίμιο #5, η σύγκριση των δύο καμπυλών παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων δοκιμίου #5

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το συγκεκριμένο διάγραμμα παρουσιάζονται παρακάτω:

Πρώτη φάση διέλασης:

- Οι δύο καμπύλες σε όλη την πρώτη φάση παρουσιάζουν απόκλιση η μία ως προς την άλλη. Επίσης, οι πρώτη φάση δεν ολοκληρώνεται στην ίδια τιμή μετατόπισης και για τις δύο καμπύλες (η καμπύλη του υπολογιστικού μοντέλου έχει ήδη μπει στη δεύτερη φάση για μετατόπιση 23 mm περίπου, όπου τελειώνει η πρώτη φάση στο πείραμα). Παρόλα αυτά οι μέγιστες τιμές του φορτίου είναι περίπου οι ίδιες και στις δύο καμπύλες.

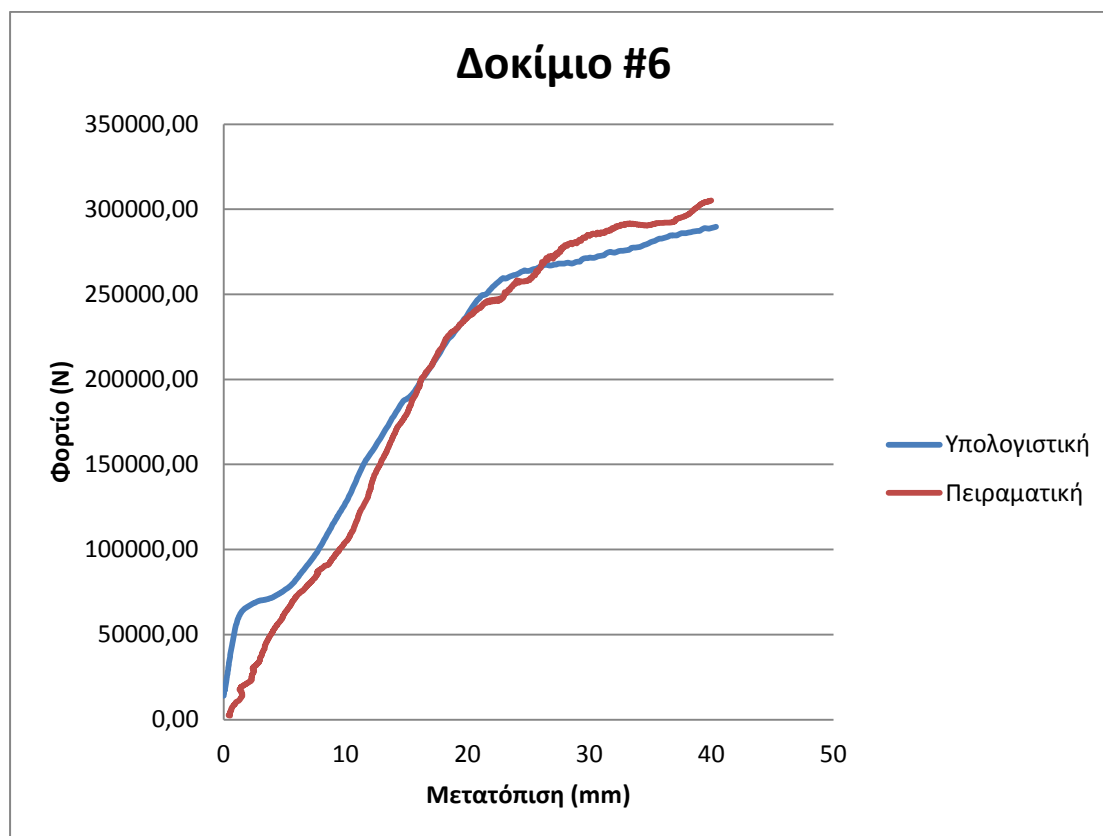
Δεύτερη φάση διέλασης:

- Κατά την έναρξη της δεύτερης φάσης οι δύο καμπύλες φαίνεται να έχουν κοινή κλίση, αν και η υπολογιστική καμπύλη προηγείται της πειραματικής. Βέβαια, αυτό αλλάζει μετά από λίγο, εξαιτίας της αύξησης της ταχύτητας του εμβόλου, που έχει ως αποτέλεσμα την απότομη μείωση της κλίσης της υπολογιστικής καμπύλης.

Για την περίπτωση αυτή δεν μπορούν να γίνουν ιδιαίτερα σχόλια. Η καμπύλη του υπολογιστικού μοντέλου που αντιστοιχεί στο δοκίμιο #5, παρουσιάζει αρκετές διαφορές σε σχέση με την αντίστοιχη πειραματική καμπύλη. Έτσι, αν και ο παρατηρητής μπορεί να πληροφορηθεί σχετικά με τα μέγιστα φορτία του πειράματος, δεν μπορεί να ενημερωθεί για κανένα άλλο στοιχείο της κατεργασίας από τα αποτελέσματα του μοντέλου. Αυτό που πρέπει να γίνει είναι να προσαρμοστεί κατάλληλα το προφίλ της ταχύτητας του εμβόλου, ώστε η αντίστοιχη υπολογιστική καμπύλη να πλησιάσει την πειραματική.

5.2.6 Δοκίμιο #6

Για το δοκίμιο #6, η σύγκριση των δύο καμπυλών παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων δοκιμίου #6

Και στην περίπτωση αυτής της καμπύλης, φαίνεται πως υπάρχει μόνο η πρώτη φάση της κατεργασίας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την παρατήρηση των καμπύλων είναι τα εξής:

Πρώτη φάση διέλασης:

- Στο πρώτο τμήμα αυτής της φάσης (από 0 mm έως 15 mm περίπου), παρατηρείται ότι οι τιμές του φορτίου της υπολογιστικής καμπύλης είναι λίγο μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές της πειραματικής καμπύλης. Παρόλα αυτά η πορεία των καμπυλών είναι σχεδόν παράλληλη.
- Στο δεύτερο τμήμα αυτής της φάσης (από 15 mm έως 20 mm περίπου), παρατηρείται ότι οι δύο καμπύλες ταυτίζονται.
- Στο τρίτο τμήμα αυτής της φάσης (από 20 mm έως 25 mm περίπου), και πάλι η υπολογιστική καμπύλη παρουσιάζει λίγο μεγαλύτερες τιμές φορτίου, λόγω μιας καμπύλωσης που δημιουργεί (τα κοίλα είναι προς τα κάτω), ενώ η πειραματική καμπύλη διατηρεί την ίδια περίπου κλίση που είχε και στο τέλος του προηγούμενου τμήματος.
- Στο τελευταίο τμήμα αυτής της φάσης (από 25 mm περίπου έως το τέλος), η πειραματική καμπύλη εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές φορτίου από τις αντίστοιχες της υπολογιστικής καμπύλης, ενώ δημιουργεί μια καμπύλωση λίγο πριν το τέλος (με τα κοίλα προς τα πάνω), η οποία δημιουργεί μια μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα στις μέγιστες τιμές του φορτίου των δύο καμπυλών.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα αποτελέσματα της σύγκρισης έδειξαν ότι, από το υπολογιστικό μοντέλο ο παρατηρητής μπορεί να αποκτήσει μια σφαιρική άποψη για το συγκεκριμένο πείραμα. Οι μέγιστες τιμές των δύο καμπυλών, αν και έχουν μεγαλύτερη διαφορά από ότι συνέβη μεταξύ των καμπυλών των προηγούμενων δοκιμών, εντούτοις δεν είναι πολύ μακριά η μία από την άλλη. Επίσης, η μορφή των δύο καμπυλών εμφανίζει ομοιομορφία. Καλύτερη προσαρμογή του προφίλ ταχύτητας, μπορεί και στην περίπτωση αυτή να επιφέρει βελτίωση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

5.2.7 Συμπεράσματα

Από τις συγκρίσεις που έγιναν σε αυτήν την ενότητα φάνηκε καθαρά ότι τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μπορούν να προσομοιωθούν μέσω του προγράμματος LS – DYNA, και μάλιστα με αρκετά καλή ακρίβεια στα αποτελέσματα. Για την κατασκευή των αντίστοιχων μοντέλων, βέβαια, απαραίτητο είναι να γνωρίζουμε κάποιες παραμέτρους των μοντέλων. Οι σημαντικότερες αυτές παράμετροι είναι το προφίλ της ταχύτητας του εμβόλου, και οι συντελεστές τριβής, κυρίως μεταξύ των τοιχωμάτων της μήτρας και της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμίου.

Σχετικά με την επίλυση των μοντέλων, προέκυψαν συμπεράσματα για την επιρροή των προαναφερθέντων παραμέτρων των μοντέλων, πάνω στα αποτελέσματα της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης. Έτσι, αλλαγή στους συντελεστές τριβής της διεπιφάνειας μήτρας δοκιμίου, επηρεάζει τις τιμές των φορτίων σε κάθε σημείο της καμπύλης με τρόπο ανάλογο, δηλαδή αύξηση του συντελεστή τριβής, προκαλεί αύξηση των τιμών του φορτίου σε κάθε σημείο της καμπύλης και αντίστροφα. Όσον αφορά στην επιρροή του προφίλ ταχύτητας του εμβόλου, πάνω στα αποτελέσματα της υπολογιστικής καμπύλης, εξακριβώθηκε ότι αύξηση της ταχύτητας σε ένα χρονικό σημείο της προσομοίωσης, οδηγεί στην μεταβολή της κλίσης της καμπύλης από το σημείο αυτό, έτσι ώστε η καμπύλη να γίνει πιο κάθετη. Αντίστοιχα, μείωση της ταχύτητας από κάποιο σημείο και έπειτα, οδηγεί τη καμπύλη φορτίου – μετατόπισης σε πιο οριζόντια κλίση.

Συμπεράσματα, όμως, προέκυψαν και για τα πειράματα. Έτσι, φαίνεται πως αν και η κάθοδος του εμβόλου ρυθμίστηκε έτσι ώστε να πραγματοποιείται με σταθερή ταχύτητα, παρόλα αυτά κάτι τέτοιο δεν πρέπει να έγινε. Ο λόγος είναι ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, το προφίλ ταχύτητας του μοντελοποιημένου εμβόλου, δεν ήταν σταθερό. Η αιτία για το συγκεκριμένο φαινόμενο πρέπει να ήταν ότι η πρέσσα που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα ήταν υδραυλική, και άρα δεν μπορούσε να εξασφαλιστεί η 1:1 μετάδοση ισχύος. Έτσι, είναι πιθανό το έμβολο να μην είχε σταθερή ταχύτητα καθόδου, όπως υπονοείται από τα προφίλ ταχύτητας των αντίστοιχων μοντέλων.

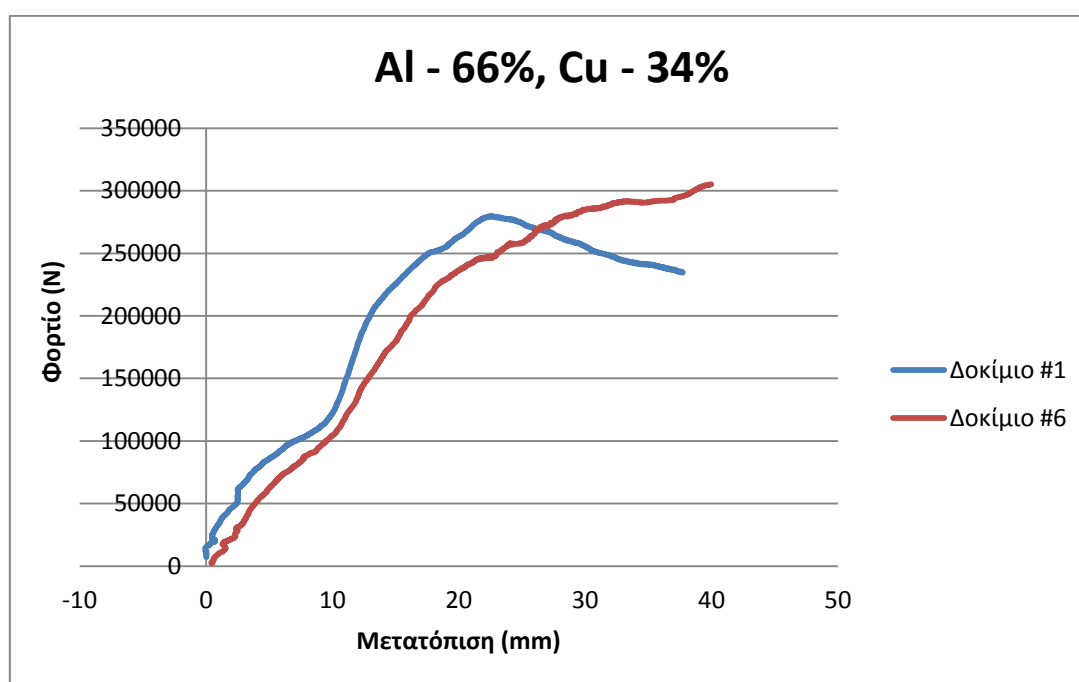
Επίσης, μέσα από τα υπολογιστικά μοντέλα, έγινε μια προσέγγιση των τιμών των διαφόρων συντελεστών τριβής που δεν ήταν γνωστοί από τη σχετική βιβλιογραφία. Η εξακρίβωση των συντελεστών αυτών, βέβαια, πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω.

5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών με ίδια αναλογία υλικών

Στην ενότητα αυτή θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμών εκείνων που είχαν ίδια αναλογία υλικών στο εσωτερικό τους. Με τον τρόπο αυτό θα μπορέσει να εξακριβωθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάστηκαν τα δοκίμια από την αλλαγή της θέσης κάθε υλικού. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων όπως είναι λογικό, θα πραγματοποιηθεί σε ζεύγη δοκιμών.

5.3.1 Δοκίμια με αναλογία Al - 66%, Cu - 34%

Τα δοκίμια που είχαν τη συγκεκριμένη αναλογία υλικών ήταν τα δοκίμια #1 και #6. Η σύγκριση των αντίστοιχων πειραματικών καμπυλών παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



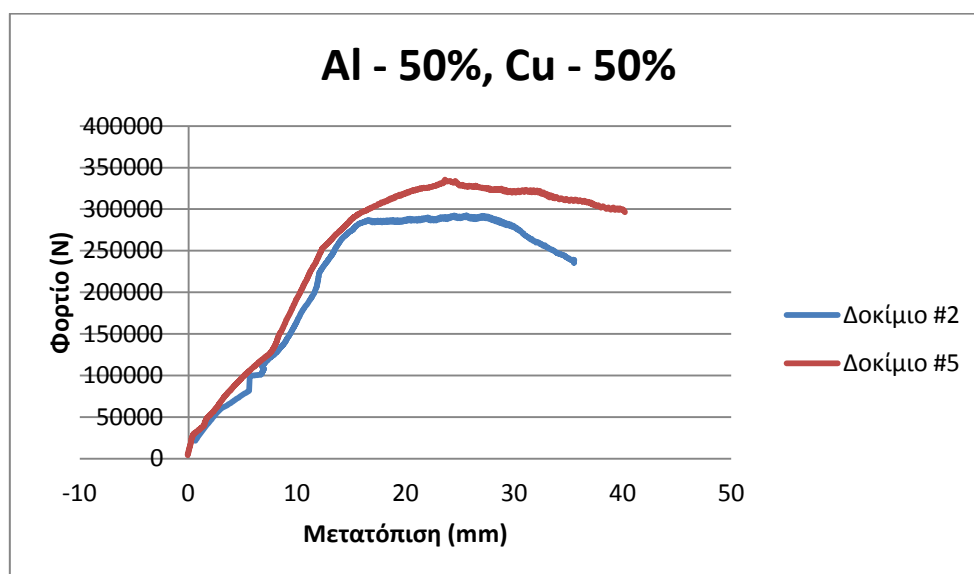
Σύγκριση καμπυλών δοκιμών με αναλογία εσωτερικών υλικών Al - 66%, Cu - 34%

Αρχικά για το δοκίμιο #6 υπενθυμίζεται ότι δεν παρατηρήθηκε η δεύτερη φάση της διέλασης. Ο λόγος για το συγκεκριμένο φαινόμενο ήταν η επαφή που υπήρξε μεταξύ του δοκιμίου και του τμήματος εξόδου της μήτρας, κάτι που οδήγησε στην συνεχή αύξηση του φορτίου, ώστε να μπορέσει να υπερνικηθεί η ολοένα αυξανόμενη αντίσταση λόγω τριβής. Έτσι, μπορεί να δικαιολογηθεί η αλλαγή της μορφής της καμπύλης του δοκιμίου #6, μετά από την μετατόπιση των 25 mm περίπου.

Γενικά, συγκρίνοντας τις δύο αυτές καμπύλες μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτή η ομοιότητα της μορφής του μεγαλύτερου μέρους αυτών. Παρόλα αυτά, σχεδόν στο ίδιο μεγάλο μέρος των καμπυλών αυτών, οι τιμές του φορτίου της καμπύλης του δοκιμίου #1 είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές της καμπύλης του δοκιμίου #6. Το γεγονός αυτό πιθανώς υποδηλώνει ότι η παρουσία του χαλκού ως ενδιάμεσο επίστρωμα, δημιουργεί ανάγκη για μεγαλύτερη ισχύ κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Η υπόθεση αυτή θα επιβεβαιωθεί και μέσα από τις συγκρίσεις των υπόλοιπων δοκιμίων.

5.3.2 Δοκίμια με αναλογία Al – 50%, Cu – 50%

Τα δοκίμια που είχαν τη συγκεκριμένη αναλογία υλικών ήταν τα δοκίμια #2 και #5. Η σύγκριση των αντίστοιχων πειραματικών καμπυλών παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Σύγκριση καμπυλών δοκιμίων με αναλογία εσωτερικών υλικών Al - 50%, Cu - 50%

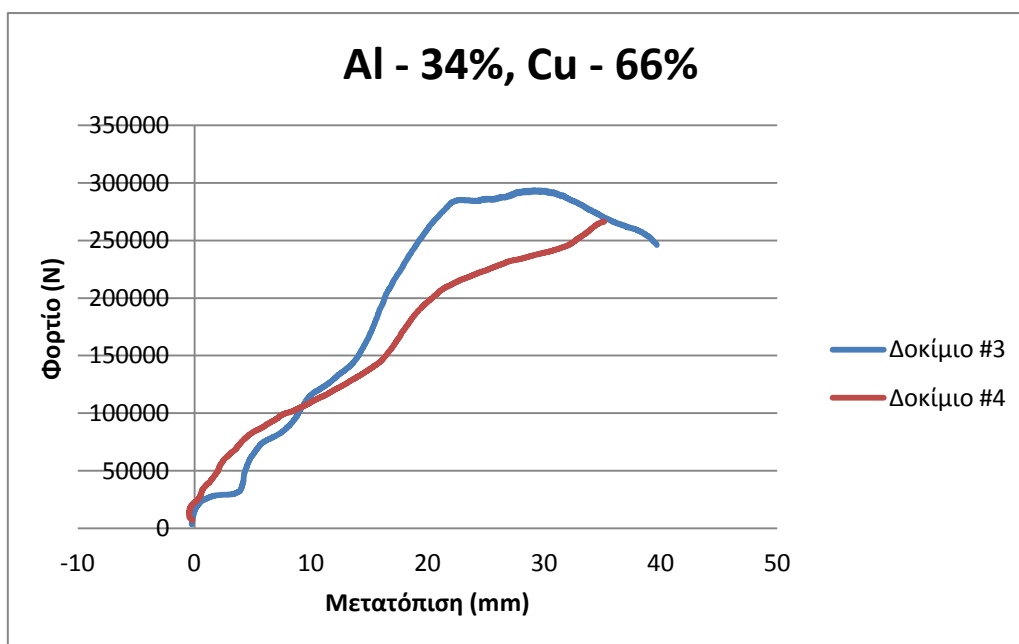
Από τη σύγκριση αυτών των δύο καμπυλών εύκολα διακρίνεται το γεγονός ότι, οι δύο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται σε ένα μεγάλο ποσοστό τους. Στη συνέχεια, περίπου στην τιμή 15 mm της μετατόπισης, η καμπύλη του δοκιμίου #2 ακολουθεί μια σχεδόν ευθύγραμμη πορεία, ενώ αντίθετα η καμπύλη του δοκιμίου #5, συνεχίζει για λίγο ακόμα μια αύξουσα πορεία, μέχρι το πέρας της πρώτης φάσης της διέλασης. Έπειτα, όταν και τα δύο δοκίμια έχουν περάσει στη δεύτερη φάση της διέλασης, οι κλίσεις των δύο καμπυλών παρουσιάζουν διαφορές.

Σε αντίθεση με τη σύγκριση των δοκιμίων της προηγούμενης ενότητας, στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ότι οι τιμές των φορτίων της καμπύλης του δοκιμίου #5, είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές της καμπύλης του δοκιμίου #2. Μάλιστα, στο σημείο που παρατηρείται η μέγιστη διαφοροποίηση των τιμών αυτών, είναι στο σημείο όπου ολοκληρώνεται η πρώτη φάση της διέλασης του δοκιμίου #5.

Έτσι, προκύπτει το συμπέρασμα, ότι τελικά η υπόθεση που έγινε στην προηγούμενη ενότητα δεν ισχύει για αυτό το ζεύγος δοκιμίων. Παρόλα αυτά, αυτό που ισχύει και στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ότι οι καμπύλες παρουσιάζουν παρόμοια μορφή, η οποία διαφοροποιείται σε ένα μικρό μέρος της μόνο. Συγκεκριμένα, το αύξον τμήμα της καμπύλης του δοκιμίου #5 είναι λίγο πιο μεγάλο από το αντίστοιχο τμήμα της καμπύλης του δοκιμίου #2, ενώ επίσης οι κλίσεις των δύο καμπυλών είναι λίγο διαφορετικές κατά τη δεύτερη φάση της κατεργασίας των δοκιμίων.

5.3.3 Δοκίμια με αναλογία Al – 34%, Cu – 66%

Τα δοκίμια που είχαν τη συγκεκριμένη αναλογία υλικών ήταν τα δοκίμια #3 και #4. Η σύγκριση των αντίστοιχων πειραματικών καμπυλών παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Σύγκριση καμπυλών δοκιμίων με αναλογία εσωτερικών υλικών Al - 34%, Cu - 66%

Η σύγκριση των καμπυλών των δοκιμίων στην περίπτωση αυτή, δεν εμφάνισε τόσο καθαρά αποτελέσματα. Ο λόγος ήταν ότι στην περίπτωση αυτή το ένα από τα δύο δοκίμια ήταν το δοκίμιο #4, που, όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω στην εργασία, δεν κατάφερε να διελαθεί με επιτυχία. Παρόλα αυτά, γίνεται μια προσπάθεια για την εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων.

Πράγματι, λοιπόν, και στην περίπτωση αυτή οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν μια σχετική ομοιότητα. Πιο συγκεκριμένα, έως το σημείο της μετατόπισης των 12 mm περίπου, οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν παρόμοια μορφή, από την άποψη ότι σχηματίζουν καμπυλότητες, οι οποίες σταματούν στο σημείο αυτό. Στη συνέχεια, παρατηρείται η έναρξη μιας ακόμα καμπυλότητας σε κάθε καμπύλη, που και πάλι σταματά στο ίδιο σημείο μετατόπισης (περίπου στα 30 mm). Βέβαια, ως το σημείο αυτό έχει γίνει εμφανές, ότι η κλίση του αύξοντος τμήματος κάθε καμπύλης είναι διαφορετική. Επίσης, μετά τα 30 mm της μετατόπισης, η καμπύλη του δοκιμίου #3 αρχίζει να πέφτει, ως αποτέλεσμα της εισόδου του δοκιμίου στη δεύτερη φάση της διέλασης. Αντίθετα, η καμπύλη του δοκιμίου #4, λόγω της ιδιαιτερότητας του συγκεκριμένου πειράματος, συνεχίζει την αύξουσα πορεία της.

Όσον αφορά στο επίπεδο των τιμών του φορτίου των δύο καμπυλών, παρατηρείται ότι αρχικά (έως τη μετατόπιση των 10 mm περίπου), η καμπύλη του

δοκιμίου #4 είναι πιο ψηλά από αυτή του δοκιμίου #3. Παρόλα αυτά, αμέσως μετά η τελευταία ξεπερνά κατά πολύ την καμπύλη του δοκιμίου #4, δημιουργώντας μια κατάσταση η οποία δεν μεταβάλλεται ως το τέλος του πειράματος. Η συγκεκριμένη παρατήρηση ενισχύει την υπόθεση που έγινε στην *υποενότητα 5.3.1*, αν και δεν είναι αρκετή (και λόγω της ιδιομορφίας της καμπύλης του δοκιμίου #4) για να την επαληθεύσει.

5.3.4 Συμπεράσματα

Από την παρατήρηση των παραπάνω ζευγών δοκιμίων προέκυψαν μερικά συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση που έχει η ακολουθία των υλικών σε δοκίμια με κοινή αναλογία εσωτερικών υλικών. Πιο συγκεκριμένα, αν και όλα τα ζεύγη παρουσίαζαν ομοιότητες στα αποτελέσματά τους, εντούτοις δεν παρουσίαζαν κοινές τιμές μέγιστων φορτίων. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει το συμπέρασμα, ότι η αλληλουχία των υλικών μέσα στο δοκίμιο επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα. Με άλλα λόγια, αν και η αναλογία των υλικών ήταν η ίδια σε κάθε ζεύγος δοκιμίων, παρόλα αυτά το μέγιστο φορτίο που απαιτήθηκε για τη διέλαση αυτών, ήταν διαφορετικό. Η κύρια αιτία που πιθανώς ευθύνεται για το γεγονός αυτό, είναι η μεταβολή των παραγόντων της κατεργασίας ως συνάρτηση της διαρροής των εσωτερικών υλικών. Τέτοιοι παράγοντες μπορεί για παράδειγμα να είναι η αύξηση της τριβής στη διεπιφάνεια μήτρας – δοκιμίου, λόγω της αντίστοιχης αύξησης της κάθετης αντίδρασης στη συγκεκριμένη διεπιφάνεια, ή η αύξηση της αντίστασης στην κάθοδο του εμβόλου, ως αποτέλεσμα της διαρροής των υλικών, στην περιοχή πριν το κωνικό τμήμα της μήτρας.

Επίσης, όπως προαναφέρθηκε, από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρήθηκε ότι οι καμπύλες των ζευγών δοκιμίων, παρουσίασαν ομοιότητες ως προς τη μορφή τους. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει, ότι η αναλογία των εσωτερικών υλικών του δοκιμίου χαρακτηρίζει σε μεγάλο βαθμό, τη μορφή της εξαγόμενης καμπύλης. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται, αν υποθεθεί ότι όταν ο όγκος ενός ισχυρότερου υλικού αυξηθεί σε βάρος του όγκου ενός ασθενέστερου υλικού σε ένα δοκίμιο, το απαιτούμενο φορτίο για την πραγματοποίηση της διέλασης θα αυξηθεί, ανεξαρτήτως της θέσης που έχει το ισχυρότερο υλικό στο εσωτερικό του δοκιμίου.

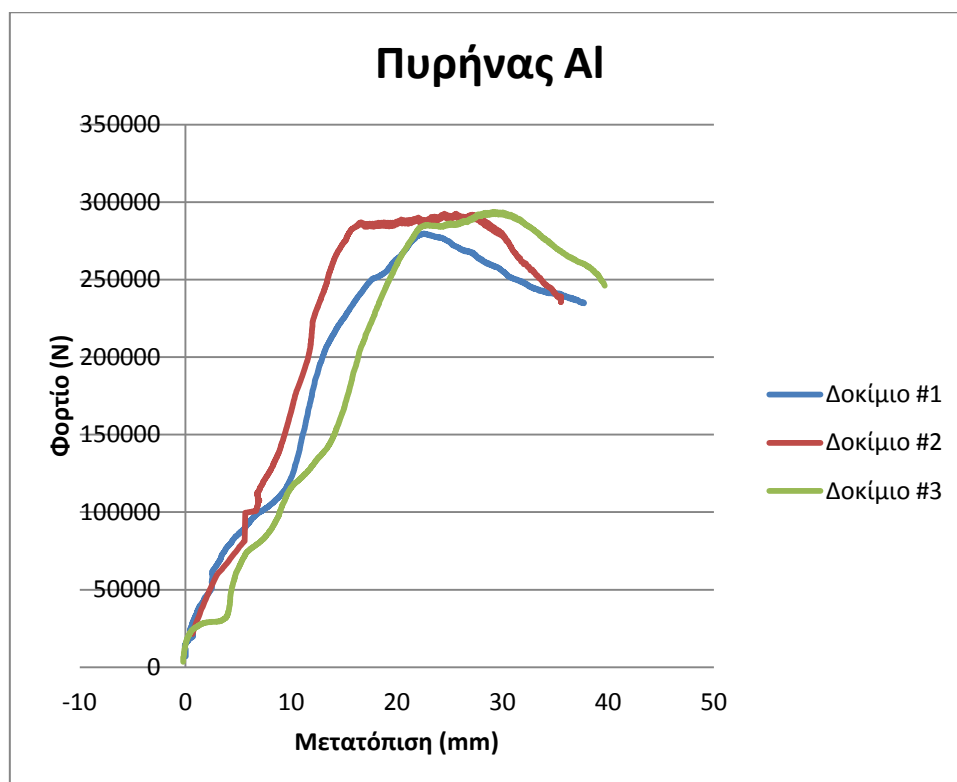
Σε κάθε περίπτωση, η παρατήρηση των συγκεκριμένων διαγραμμάτων υπέδειξε πως κοινή αναλογία υλικών ανάμεσα σε δύο δοκίμια, τους προσδίδει παρόμοια συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της διέλασής τους. Παρόλα αυτά, ο τρόπος με τον οποίο διαμορφώνει τη συμπεριφορά των δοκιμίων, η σειρά με την οποία τοποθετούνται τα υλικά στο εσωτερικό, δεν έγινε απόλυτα ξεκάθαρος, και για το λόγο αυτό προτείνεται η πραγματοποίηση περεταίρω έρευνας πάνω στον τομέα αυτό. Προτείνεται δε η διεξαγωγή των πειραμάτων σε περισσότερα δοκίμια, ώστε τα αποτελέσματα να μην επηρεαστούν σημαντικά από τα ελαττώματα κατά την κατεργασία μερικών δοκιμίων.

5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμίων με ίδια ακολουθία υλικών

Στην ενότητα αυτή θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των πειραματικών καμπυλών των δοκιμίων εκείνων που είχαν ίδια ακολουθία υλικών στο εσωτερικό τους. Με τον τρόπο αυτό θα διερευνηθεί η μεταβολή των απαιτήσεων ισχύος της κατεργασίας, κατά την αύξηση του ενός εσωτερικού υλικού του δοκιμίου, σε βάρος του άλλου. Όπως είναι αυτονόητο, οι συγκρίσεις μεταξύ των καμπυλών των δοκιμίων θα γίνουν σε ομάδες των τριών.

5.4.1 Δοκίμια με πυρήνα από αλουμίνιο

Τα δοκίμια που είχαν πυρήνα από αλουμίνιο (και άρα ενδιάμεσο επίστρωμα από χαλκό), ήταν τα δοκίμια #1, #2 και #3. Η σύγκριση των πειραματικών καμπυλών των συγκεκριμένων δοκιμίων, παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



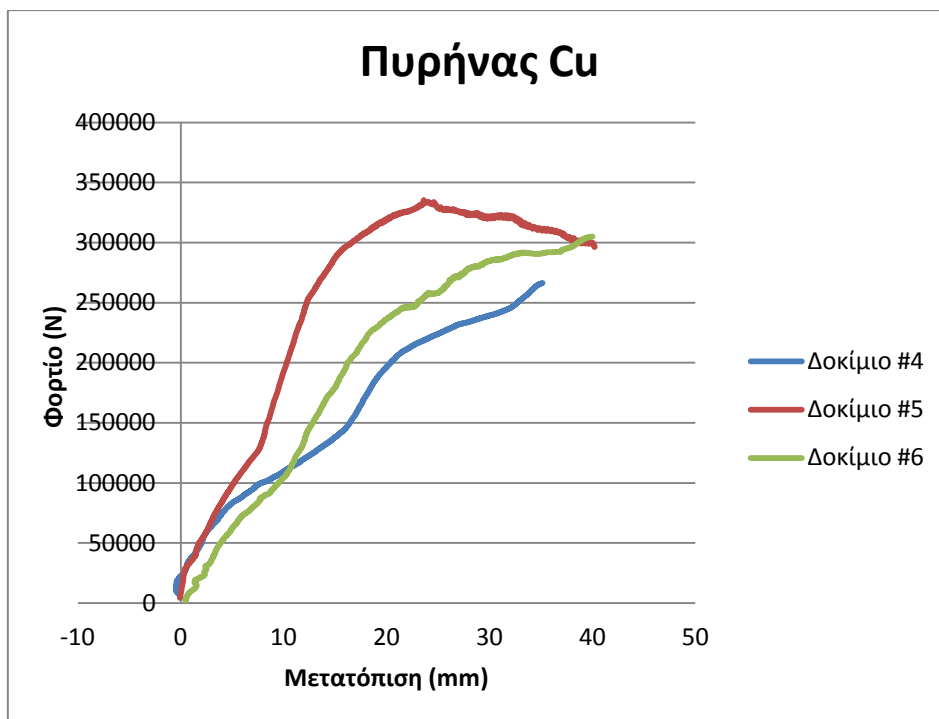
Σύγκριση καμπυλών δοκιμών με πυρήνα αλουμινίου

Από την παρατήρηση του παραπάνω διαγράμματος, είναι εμφανές ότι και οι τρεις καμπύλες, έχουν περίπου την ίδια τιμή για το μέγιστο φορτίο της κατεργασίας. Αυτό που μεταβάλλεται σύμφωνα με τα διαγράμματα αυτά, είναι η μετατόπιση στην οποία τελειώνει η πρώτη φάση της διέλασης σε κάθε δοκίμιο, και άρα εκεί που εμφανίζεται η μέγιστη τιμή του φορτίου. Μάλιστα, φαίνεται πως όσο το ποσοστό του αλουμινίου μειώνεται στο εσωτερικό του δοκιμίου, με αντίστοιχη αύξηση του ποσοστού του χαλκού, η μετατόπιση στην οποία συναντάται το μέγιστο φορτίο αυξάνεται. Το γεγονός αυτό μένει να επιβεβαιωθεί και από την επόμενη ομάδα δοκιμών.

Κατά τα άλλα, οι τρεις καμπύλες παρουσιάζουν παρόμοια μορφή, αν και γενικά δεν μπορούν να παρατηρηθούν ιδιαίτερες ομοιότητες ως προς τις τιμές των φορτιών των καμπυλών, στις ίδιες τιμές μετατόπισης.

5.4.2 Δοκίμια με πυρήνα από χαλκό

Τα δοκίμια που είχαν πυρήνα από χαλκό (και άρα ενδιάμεσο επίστρωμα από αλουμίνιο), ήταν τα δοκίμια #4, #5 και #6. Η σύγκριση των πειραματικών καμπυλών των συγκεκριμένων δοκιμίων, παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σύγκριση καμπυλών δοκιμίων με πυρήνα χαλκού

Οι τρεις αυτές καμπύλες παρουσιάζουν μεν κάποια ομοιότητα στη μορφή τους, αλλά και σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα των τιμών των φορτίων, στις ίδιες τιμές μετατόπισης, δεν παρουσιάζουν καμία σχέση. Επίσης, λόγω της ιδιομορφίας των καμπυλών των δοκιμίων #4 και #6, δεν είναι δυνατή κάποια παρατήρηση σε σχέση με το μέγιστο φορτίο των τριών πειραμάτων. Έτσι, η μόνη ασφαλής παρατήρηση από τις παραπάνω τρεις καμπύλες, είναι η ομοιότητα που παρουσιάζεται στη μορφή τους, κατά την πρώτη φάση της διέλασης των τριών δοκιμίων.

5.4.3 Συμπεράσματα

Από τις συγκρίσεις των δύο ομάδων των δοκιμίων, έγινε φανερό ότι και στην περίπτωση αυτή, οι καμπύλες κάθε τριάδας παρουσίαζαν ομοιότητες στη μορφή τους. Λόγω της ιδιαιτερότητας των καμπυλών των δύο εκ των τριών δοκιμίων της δεύτερης ομάδας (δοκίμια #4 και #6), γενικά δεν ήταν δυνατή εξαγωγή κάποιου ασφαλούς συμπεράσματος από τη συγκεκριμένη ομάδα.

Από την πρώτη ομάδα δοκιμίων, αίσθηση προκάλεσε το γεγονός ότι και τα τρία δοκίμια, είχαν περίπου την ίδια τιμή για το μέγιστο φορτίο. Αυτή η τιμή ήταν περίπου στα 300 kN και για τα τρία δοκίμια, αλλά όμως παρουσιαζόταν σε διαφορετική τιμή μετατόπισης του κάθε δοκιμίου. Μάλιστα, η σειρά με την οποία αυξανόταν η τιμή της μετατόπισης στο σημείο του μέγιστου φορτίου, συνέπιπτε με την αύξηση του όγκου του χαλκού στο εσωτερικό του δοκιμίου. Το γεγονός αυτό πρέπει να εξακριβωθεί στα πλαίσια ενός πιο στοχευμένου πειράματος, αφού εδώ επιβεβαιώθηκε μόνο από την ομάδα εκείνη των δοκιμίων που δεν εμφάνισε ιδιομορφίες στα πειραματικά της αποτελέσματα.

5.5 Γενικά συμπεράσματα

Μετά το πέρας όλων των ερευνητικών διεργασιών στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μπορούν να εξαχθούν κάποια γενικά συμπεράσματα γύρω από το πείραμα και την προσομοίωσή του.

Από το πείραμα που διεξήχθη στα πλαίσια αυτής της εργασίας, ήταν δυνατό να γίνει με επιτυχία η κατεργασία όλων των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν πριν το πείραμα, πλην ενός. Τα δοκίμια που λήφθηκαν με επιτυχία μετά την κατεργασία, είχαν όλα πολύ καλή ποιότητα επιφάνειας και παρουσίασαν την αναμενόμενη μορφή. Αυτό αποδεικνύει ότι η κατεργασία της διέλασης είναι ιδανική για την κατασκευή τριμεταλλικών ράβδων, διαφόρων μεγεθών. Επίσης, είναι πολύ πιθανή και η επιτυχημένη κατασκευή τριμεταλλικών προϊόντων παρόμοιας γεωμετρίας, όπως για παράδειγμα, συρμάτων.

Από την παρατήρηση των δοκιμίων μετά το πέρας του πειράματος έγινε σαφές, ότι ανάμεσα στα τρία υλικά των δοκιμίων δημιουργούνται δεσμοί από τη

διέλαση, εκεί που προηγουμένως δεν εμφανιζόταν κάτι τέτοιο. Οι δεσμοί ανάμεσα στα διάφορα υλικά ήταν γενικά πολύ καλής ποιότητας, όπως αποδείχθηκε από την παρατήρηση με το μικροσκόπιο, όπου τα περισσότερα από τα ελαττώματα των διεπιφανειών των υλικών, έγιναν ορατά σε μεγέθυνση 500 φορές επί το φυσικό τους μέγεθος. Αυτό γενικά σημαίνει πως τα παραγόμενα από αυτή την κατεργασία προϊόντα, είναι αρκετά στιβαρά (όπως αναμενόταν από μια κατεργασία διαμόρφωσης) και ανθεκτικά.

Από όλα τα δοκίμια του πειράματος, το χειρότερο ήταν το δοκίμιο #4, λόγω του ότι ήταν το μόνο που δεν ολοκλήρωσε με επιτυχία την κατεργασία. Από την άλλη, το καλύτερο δοκίμιο ήταν το #2, όπου ήταν αυτό που παρουσίασε μαζί με το δοκίμιο #5 τα λιγότερα μεταλλογραφικά ελαττώματα, και ταυτόχρονα το μέγιστο φορτίο για την διέλασή του ήταν μικρότερο από το αντίστοιχο του δοκιμίου #5. Από την ανάλυση αυτή σχετικά με την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης του δοκιμίου #2, αγνοούνται οι τιμές της περιοχής σφάλματος, οι οποίες υπό κανονικές συνθήκες δεν θα εμφανίζονταν.

Σχετικά με την προσομοίωση των δοκιμίων με τη χρήση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων, έγινε εμφανές ότι η μοντελοποίηση του πειράματος της εργασίας είναι εφικτή και μάλιστα (στις περισσότερες περιπτώσεις) με πολύ ακριβή αποτελέσματα. Βέβαια, για να είναι εφικτή η ορθή μοντελοποίηση του πειράματος, είναι απαραίτητος ο ακριβής περιορισμός αρκετών παραμέτρων του πειράματος. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αν και οι περισσότεροι παράγοντες της μοντελοποίησης ήταν γνωστοί, εντούτοις υπήρχαν ορισμένοι που παρέμεναν άγνωστοι. Έτσι, ήταν υποχρεωτική η διεξαγωγή πολλών προσομοιώσεων για κάθε μοντέλο, ώστε να μπορέσουν να προσεγγιστούν οι τιμές των άγνωστων παραγόντων και να ληφθούν αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης, από την επίλυση των υπολογιστικών μοντέλων παρατηρήθηκαν φαινόμενα, τα οποία δεν μπορούσαν να παρατηρηθούν από το πείραμα, όπως οι ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις των δοκιμίων, οι οποίες λόγω των καλών αποτελεσμάτων φορτίου – μετατόπισης των περισσότερων μοντέλων, θεωρούνται και αυτές αξιόπιστες.

Τελικά, από τα υπολογιστικά αποτελέσματα, την καλύτερη συμπεριφορά παρουσίασε το μοντέλο του δοκιμίου #3, αφού ο προσδιορισμός των αγνώστων παραμέτρων ήταν αρκετά ακριβής, με αποτέλεσμα η αποδιδόμενη καμπύλη φορτίου –

μετατόπισης να είναι πολύ κοντά στην αντίστοιχη πειραματική. Αντίθετα, την χειρότερη συμπεριφορά παρουσίασε το μοντέλου του δοκιμίου #5, όπου η τελική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης δεν ήταν τόσο κοντά στην αντίστοιχη πειραματική, αν και εμφάνιζε ορισμένα κοινά στοιχεία με αυτή.

Τέλος, όσον αφορά στις συγκρίσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων έγινε η εξαγωγή κάποιων πρώτων συμπερασμάτων, όπως αυτά αναλύθηκαν παραπάνω, που όμως δεν κατάφεραν να εξακριβωθούν, λόγω των σχετικά κακών πειραματικών αποτελεσμάτων των δύο από τα έξι συνολικά δοκίμια. Βέβαια, τα συμπεράσματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κάποια βάση για μια πιο στοχευμένη έρευνα στο μέλλον.

5.6 Πιθανές εφαρμογές αποτελεσμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

5.6.1 Πιθανές εφαρμογές αποτελεσμάτων

Η ιδέα των τριμεταλλικών ράβδων ξεκίνησε από άλλες παρόμοιες εφαρμογές πολυμεταλλικών τεμαχίων. Βέβαια, οι εφαρμογές που έχουν χρησιμοποιηθεί στην πράξη μέχρι σήμερα, περιορίζονται κυρίως σε διμεταλλικά τεμάχια. Η επέκταση των διμεταλλικών εφαρμογών σε άλλες παρόμοιες με τρία μέταλλα είναι μια μέθοδος που μπορεί να δώσει λύση, εκεί που οι διμεταλλικές εφαρμογές δεν μπορούν.

Πρέπει σε αυτό το σημείο να γίνει σαφές, ότι τα τριμεταλλικά τεμάχια που μελετήθηκαν αποτελούν εφαρμογές σύνθετων υλικών. Έτσι, μπορούν με κατάλληλη επιλογή των υλικών, να παραχθούν τεμάχια που σκοπό θα έχουν την αντικατάσταση άλλων μονομεταλλικών στοιχείων μηχανών, αφού θα προσφέρουν παρόμοια στιβαρότητα και σταθερότητα με αυτά, αλλά σε αρκετά μικρότερο μέγεθος. Επίσης, λόγω των τριών διαφορετικών μετάλλων που συνυπάρχουν διακριτά μέσα στο σώμα του τεμαχίου, είναι πιθανή η κατασκευή προϊόντων, που θα παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε κάθε διεύθυνση φόρτισης, αφού το κάθε ένα από τα τρία υλικά μπορεί να επιλεγεί έτσι ώστε να εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή σε διαφορετική κατεύθυνση φόρτισης.

Ενδεικτικά προτείνεται η χρήση των μεθόδων που αναλύθηκαν στην εργασία αυτή, για την κατασκευή βιομηχανικών προϊόντων όπως:

- τριμεταλλικά σύρματα
- τριμεταλλικοί πείροι
- τριμεταλλικές ράβδοι υποστήριξης
- εργαλεία μεγαλύτερης αντοχής
- σύνθετοι εναλλάκτες θερμότητας
- ελαφρύτερα και στιβαρότερα (σε σχέση με τα μονομεταλλικά) πλαίσια
- ράβδοι πολυκατευθυντικής φόρτισης, κ.α.

5.6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Σε όλη την έκταση της συγκεκριμένης εργασίας, παρατηρήθηκαν σημεία όπου θα μπορούσαν να μελετηθούν περαιτέρω, ώστε να προκύψουν ακριβή και ασφαλή συμπεράσματα. Επίσης, επισημάνθηκαν στοιχεία που δεν ήταν σαφώς προσδιορισμένα στα πλαίσια της εργασίας, και που προσεγγίστηκαν ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή αποτελεσμάτων. Οι προτάσεις αυτές ανάλογα με τον κομμάτι της εργασίας στο οποίο εμπίπτουν, παρουσιάζονται παρακάτω:

Κατασκευή τριμεταλλικών δοκιμίων:

- Μετά από συζήτηση με τους τεχνίτες του εργαστηρίου επισημάνθηκε το γεγονός, ότι στα δοκίμια όπου υπήρχε σχετικά μικρός χώρος για τη χύτευση του αλουμινίου, πιθανώς αυτό να ψύχθηκε προτού φτάσει στο κατώτερο μέρος του δοκιμίου. Το γεγονός αυτό μπορεί να διερευνηθεί, είτε με τη χρήση υπερήχων, είτε με τομή κάποιων παρόμοιων δοκιμίων, πριν από την κατεργασία τους.

Μοντελοποίηση πειράματος:

- Κατά την μοντελοποίηση των δοκιμίων προέκυψε η ανάγκη του ακριβούς προσδιορισμού της ταχύτητας καθόδου του εμβόλου της πρέσας. Το συγκεκριμένο στοιχείο όμως δεν ήταν γνωστό και για αυτό προσεγγίστηκε σε κάθε περίπτωση μέσω της μεθόδου «δοκιμή – λάθος». Η ακριβής γνώση του

συγκεκριμένου στοιχείου είναι εύκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια, απλά με την χρήση ενός κατάλληλου αισθητήρα.

- Εκτός από την ταχύτητα καθόδου του εμβόλου, ελλιπή στοιχεία υπήρχαν και γύρω από τους συντελεστές τριβής ανάμεσα στα διάφορα υλικά. Και για το στοιχείο αυτό είναι εμφανής η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα, με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό των συγκεκριμένων στοιχείων.

Αποτελέσματα πειράματος:

- Κατά την επίλυση των μοντέλων των δοκιμίων παρατηρήθηκαν διάφορες διαμορφώσεις των εσωτερικών υλικών, οι οποίες δεν παρατηρήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Γενικά, η σύγκριση των γεωμετρικών αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν από το πείραμα παρουσιάζουν ενδιαφέρον.
- Οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης που λήφθηκαν από το πειραματικό μέρος εμφανίζουν στοιχεία, τα οποία δεν έχουν αναλυθεί εκτενώς στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Μεγαλύτερη έρευνα γύρω από τη μορφή των συγκεκριμένων καμπυλών θα ήταν μεγάλης σημασίας για τη βελτίωση του πειράματος.

Αποτελέσματα μοντέλων:

- Μετά την ανάλυση των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού μέρους, παρατηρήθηκαν διάφορα στοιχεία που θύμιζαν τη συμπεριφορά του ρευστού στα υλικά των δοκιμίων. Η σύζευξη μεταξύ των δύο είναι ένας τομέας γύρω από τον οποίο θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί παραπάνω έρευνα.

Σύγκριση αποτελεσμάτων:

- Κατά τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων των διαφόρων δοκιμίων, προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα. Παρόλα αυτά, τα συμπεράσματα αυτά δεν εξακριβώθηκαν πλήρως, λόγω του μικρού αριθμού δοκιμίων. Προτείνεται η επανάληψη πιο στοχευμένων πειραμάτων, με μεγαλύτερο αριθμό δοκιμίων, ώστε τα συμπεράσματα να επιβεβαιωθούν πλήρως.

Βιβλιογραφία

Έντυπη βιβλιογραφία

[1] Σ.Ε. Σιμόπουλος

«Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών», Β' Έκδοση, Αθήνα 1989, p. 142-147

[2] **Peter J. Blau, Metals and Ceramics Division, Oak Ridge National Laboratory**

«ASM Handbook, Volume 18: Friction, Lubrication and Wear Technology», ASM International, p. 112-114

[3] Δ. Ε. Μανωλάκος

«6. Διέλαση», Ηλεκτρονικές σημειώσεις μαθήματος Κατεργασίες I

[4] **LS-DYNA_Theory_Manual_2006.pdf**

Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

[e1] http://en.wikipedia.org/wiki/Fushi_Copperweld

Παράρτημα

Υπόδειγμα αρχείου .dyn

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ LS-DYNA(970) DECK WRITTEN BY : eta/FEMB-PC version 28.0
$ TEMPLATE #: 20040810
$ ENGINEER :
$ PROJECT :
$ UNITS : MM, TON, SEC, N
$ TIME : 06:39:26 PM
$ DATE : Wednesday, September 14, 2011
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*KEYWORD
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*TITLE
LS-DYNA USER INPUT
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ $ $
$ CONTROL CARD $
$ $ $
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*CONTROL_TERMINATION
$ ENDTIM ENDCYC DTMIN ENDENG ENDMAS
60.0 0 0.0 0.0 0.0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ $ $
$ DATABASE CONTROL FOR ASCII $
$ $ $
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DATABASE_RCFORC
$ DT BINARY
0.10 1
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ $ $
$ DATABASE CONTROL FOR BINARY $
$ $ $
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$ DT/CYCL LCDT BEAM NPLTC
1.0 0 0 0
$ IOOPT
0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ $ $
$ PART CARDS $
$ $ $
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*PART
Matrix
$ PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID
1 1 1 0 0 0 0 0
*PART
Outer
$ PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID
2 1 2 0 0 0 0 0
*PART
Middle
$ PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID
3 1 3 0 0 0 0 0
*PART
Inner
$ PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID
4 1 4 0 0 0 0 0
*PART
Plate
$ PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID
5 1 5 0 0 0 0 0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

```

```

          $          $
          $          SECTION CARDS          $
          $          $          $
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
          *SECTION_SOLID_TITLE
          P-1
          $ SECID ELFORM AET
            1 2 0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
          $          MATERIAL CARDS          $
          $          $          $
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
          *MAT_RIGID_TITLE
          M-1
          $ MID RO E PR N COUPLE M ALIAS
            1 0.00785 207000.0 0.30 0.0 0.0 0.0
          $ CMO CON1 CON2
            1.0 7.0 7
          $LCO_OR_A1 A2 A3 V1 V2 V3
            0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
          *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_TITLE
          M-2
          $ MID RO E PR SIGY ETAN FAIL TDEL
            2 0.00785 135115.4 0.30 270.0 0.01.0000E+21 0.0
          $ C P LCSS LCSR VP
            0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
          $ EPS1 EPS2 EPS3 EPS4 EPS5 EPS6 EPS7 EPS8
            0.0 0.3205131 2.552706 2.689443 2.826368 3.239097 3.652707 11.30254
          $ ES1 ES2 ES3 ES4 ES5 ES6 ES7 ES8
            0.0 0.3331418 349.7755 344.2696 341.1403 337.8233 331.7421 480.1645
          *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_TITLE
          M-3
          $ MID RO E PR SIGY ETAN FAIL TDEL
            3 0.0027 68950.0 0.33 63.7 0.01.0000E+21 0.0
          $ C P LCSS LCSR VP
            0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
          $ EPS1 EPS2 EPS3 EPS4 EPS5 EPS6 EPS7 EPS8
            0.0 0.3205131 0.4818901 1.404501 2.465698 4.367767 7.410082 40.39248
          $ ES1 ES2 ES3 ES4 ES5 ES6 ES7 ES8
            0.0 16.34238 27.92645 63.33479 86.07416 107.4771 124.7579 168.9998
          *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_TITLE
          M-4
          $ MID RO E PR SIGY ETAN FAIL TDEL
            4 0.0089 117200.0 0.36 264.0 0.01.0000E+21 0.0
          $ C P LCSS LCSR VP
            0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
          $ EPS1 EPS2 EPS3 EPS4 EPS5 EPS6 EPS7 EPS8
            0.0 1.80316 2.279109 2.68917 6.885359 22.29811 30.99777 47.78369
          $ ES1 ES2 ES3 ES4 ES5 ES6 ES7 ES8
            0.0 258.1136 277.0827 280.829 284.7455 301.8096 314.7695 333.4857
          *MAT_RIGID_TITLE
          M-5
          $ MID RO E PR N COUPLE M ALIAS
            5 0.00785 207000.0 0.30 0.0 0.0 0.0
          $ CMO CON1 CON2
            1.0 4.0 7
          $LCO_OR_A1 A2 A3 V1 V2 V3
            0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
          $          SEGMENT SET CARDS          $
          $          $          $
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
          *SET_SEGMENT_TITLE
          Matrix
          $ SID DA1 DA2 DA3 DA4
            1 0.0 0.0 0.0 0.0
          $ N1 N2 N3 N4 A1 A2 A3 A4
            43 45 129 127 0.0 0.0 0.0 0.0

```

45	47	131	129	0.0	0.0	0.0	0.0
47	49	133	131	0.0	0.0	0.0	0.0
49	51	135	133	0.0	0.0	0.0	0.0
51	53	137	135	0.0	0.0	0.0	0.0

...

*SET_SEGMENT_TITLE

Outer-Middle/Inner

\$	SID	DA1	DA2	DA3	DA4				
	2	0.0	0.0	0.0	0.0				
\$	N1	N2	N3	N4	A1	A2	A3	A4	
999	1005	1375	1372	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1005	1011	1378	1375	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1011	1017	1381	1378	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1017	1023	1384	1381	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1023	1029	1387	1384	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

...

*SET_SEGMENT_TITLE

Middle-Outer

\$	SID	DA1	DA2	DA3	DA4				
	3	0.0	0.0	0.0	0.0				
\$	N1	N2	N3	N4	A1	A2	A3	A4	
3983	3979	4063	4067	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3987	3983	4067	4071	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3991	3987	4071	4075	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3995	3991	4075	4079	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3999	3995	4079	4083	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

...

*SET_SEGMENT_TITLE

Middle-Inner

\$	SID	DA1	DA2	DA3	DA4				
	4	0.0	0.0	0.0	0.0				
\$	N1	N2	N3	N4	A1	A2	A3	A4	
3976	3980	4064	4060	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3980	3984	4068	4064	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3984	3988	4072	4068	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3988	3992	4076	4072	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3992	3996	4080	4076	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

...

*SET_SEGMENT_TITLE

Inner-Middle/Outer

\$	SID	DA1	DA2	DA3	DA4				
	5	0.0	0.0	0.0	0.0				
\$	N1	N2	N3	N4	A1	A2	A3	A4	
12304	12300	12384	12388	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
12308	12304	12388	12392	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
12312	12308	12392	12396	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
12316	12312	12396	12400	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
12320	12316	12400	12404	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

...

*SET_SEGMENT_TITLE

Item

\$	SID	DA1	DA2	DA3	DA4				
	6	0.0	0.0	0.0	0.0				
\$	N1	N2	N3	N4	A1	A2	A3	A4	
3829	3832	3833	3830	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3830	3833	3834	3831	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3832	3835	3836	3833	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3833	3836	3837	3834	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3835	3838	3839	3836	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

...

*SET_SEGMENT_TITLE

Plate

\$	SID	DA1	DA2	DA3	DA4				
	7	0.0	0.0	0.0	0.0				

\$	N1	N2	N3	N4	A1	A2	A3	A4
15742	15743	15741	15741	15741	0.0	0.0	0.0	0.0
15743	15744	15741	15741	15741	0.0	0.0	0.0	0.0
15744	15745	15741	15741	15741	0.0	0.0	0.0	0.0
15745	15746	15741	15741	15741	0.0	0.0	0.0	0.0
15746	15747	15741	15741	15741	0.0	0.0	0.0	0.0

...

*SET_SEGMENT_TITLE
Matrix Down

\$	SID	DA1	DA2	DA3	DA4
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

\$	N1	N2	N3	N4	A1	A2	A3	A4
1	3	45	43	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	5	47	45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	7	49	47	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	9	51	49	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	11	53	51	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

...

\$	1	2	3	4	5	6	7	8
\$								\$
\$								\$
\$								\$

*SET_NODE_LIST_TITLE
XZ

\$	SID	DA1	DA2	DA3	DA4
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

\$	NID1	NID2	NID3	NID4	NID5	NID6	NID7	NID8
490	491	492	493	494	495	496	497	
498	499	611	612	613	614	615	616	
617	618	619	620	732	733	734	735	
736	737	738	739	740	741	863	864	
865	866	867	989	990	991	992	993	

...

*SET_NODE_LIST_TITLE
YZ

\$	SID	DA1	DA2	DA3	DA4
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

\$	NID1	NID2	NID3	NID4	NID5	NID6	NID7	NID8
379	390	401	412	423	434	445	456	
467	478	500	511	522	533	544	555	
566	577	588	599	621	632	643	654	
665	676	687	698	709	720	743	744	
745	746	747	869	870	871	872	873	

...

*SET_NODE_LIST_TITLE
Cntr

\$	SID	DA1	DA2	DA3	DA4
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

\$	NID1	NID2	NID3	NID4	NID5	NID6	NID7	NID8
489	610	731	7446	7567	7688	7809	7930	
8051	8172	8293	8414	8535	8656	8777	8898	
9019	9140	9261	9382	9503	9624	9745	9866	
9987	10108	10229	10350	10471	10592	10713	10834	
10955	11076	11197	11318	11439	11560	11681	11802	
		11923	12044	12165	12286			

*SET_NODE_LIST_TITLE
Outer

\$	SID	DA1	DA2	DA3	DA4
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

\$	NID1	NID2	NID3	NID4	NID5	NID6	NID7	NID8
1122	1125	1128	1131	1134	1137	1140	1143	
1146	1149	1152	1155	1158	1161	1164	1167	
1170	1173	1176	1179	1182	1185	1188	1191	
1194	1197	1200	1203	1206	1209	1212	1215	
1218	1221	1224	1227	1230	1233	1236	1239	


```

...
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$          $          $          $
$          BOUNDARY PRESCRIBED CARDS          $
$          $          $          $
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_ID
$^PRESCRIBED MOTION CARD 1
$ ID
1
$ PID DOF VAD LCID SF VID DEATH BIRTH
5 3 0 1 1.0 01.0000E+28 0.0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$          $          $          $
$          BOUNDARY SPC CARDS          $
$          $          $          $
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*BOUNDARY_SPC_SET_ID
$ ID
1
$ NSID CID DOFX DOFY DOFZ DOFRX DOFRY DOFRZ
1 0 0 1 0 1 0 1
2
2 0 1 0 0 0 1 1
3
3 0 1 1 0 0 0 1
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$          $          $          $
$          CONTACT CARDS          $
$          $          $          $
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*CONTACT_NODES_TO_SURFACE
$^MA-O
$ SSID MSID SSTYP MSTYP SBOXID MBOXID SPR MPR
4 1 4 0 0 0 0 0
$ FS FD DC VC VDC PENCHK BT DT
0.2175 0.1675 0.0 0.0 0.0 0 0.01.0000E+20
$ SFS SFM SST MST SFST SFMT FSF VSF
1.0 1.0 0.0 0.0 1.0 1.0 1.0 1.0
*CONTACT_SURFACE_TO_SURFACE
$^O-M
$ SSID MSID SSTYP MSTYP SBOXID MBOXID SPR MPR
3 2 0 0 0 0 0 0
$ FS FD DC VC VDC PENCHK BT DT
0.61 0.47 0.0 0.0 0.0 0 0.01.0000E+20
$ SFS SFM SST MST SFST SFMT FSF VSF
1.0 1.0 0.0 0.0 1.0 1.0 1.0 1.0
*CONTACT_SURFACE_TO_SURFACE
$^M-I
$ SSID MSID SSTYP MSTYP SBOXID MBOXID SPR MPR
4 5 0 0 0 0 0 0
$ FS FD DC VC VDC PENCHK BT DT
0.57 0.48 0.0 0.0 0.0 0 0.01.0000E+20
$ SFS SFM SST MST SFST SFMT FSF VSF
1.0 1.0 0.0 0.0 1.0 1.0 1.0 1.0
*CONTACT_SURFACE_TO_SURFACE
$^O-I
$ SSID MSID SSTYP MSTYP SBOXID MBOXID SPR MPR
5 2 0 0 0 0 0 0
$ FS FD DC VC VDC PENCHK BT DT
0.55 0.36 0.0 0.0 0.0 0 0.01.0000E+20
$ SFS SFM SST MST SFST SFMT FSF VSF
1.0 1.0 0.0 0.0 1.0 1.0 1.0 1.0
*CONTACT_SURFACE_TO_SURFACE
$^IT-PL
$ SSID MSID SSTYP MSTYP SBOXID MBOXID SPR MPR
6 7 0 0 0 0 0 0
$ FS FD DC VC VDC PENCHK BT DT
0.3351 0.2697 0.0 0.0 0.0 0 0.01.0000E+20

```

```

$ SFS SFM SST MST SFST SFMT FSF VSF
  1.0 1.0 0.0 0.0 1.0 1.0 1.0 1.0
*CONTACT_NODES_TO_SURFACE
$^MA-O-D
$ SSID MSID SSTYP MSTYP SBOXID MBOXID SPR MPR
  4 8 4 0 0 0
$ FS FD DC VC VDC PENCHK BT DT
0.145 0.095 0.0 0.0 0.0 0 0.01.0000E+20
$ SFS SFM SST MST SFST SFMT FSF VSF
  1.0 1.0 0.0 0.0 1.0 1.0 1.0 1.0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$ LOAD CURVE CARDS $
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DEFINE_CURVE_TITLE
LCur_1
$ LCID SIDR SFA SFO OFFA OFFO DATTYP
  1 0 1.0 1.0 0.0 0.0 0
$
$ A1 O1
  0.0 -0.90
  8.0 -0.375
  36.0 -0.39
  41.5 -0.60
  60.0 -0.90
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$ NODE INFORMATION $
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*NODE
$ NID X Y Z TC RC
  1 0.0 10.0 0.0 0.0 0.0
  2 0.0 20.0 0.0 0.0 0.0
  3 0.7845614 9.968794 0.0 0.0 0.0
  4 1.999998 20.0 0.0 0.0 0.0
  5 1.564345 9.876883 0.0 0.0 0.0
...
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$ ELEMENTS INFORMATION $
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$ SOLID ELEMENTS $
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*ELEMENT_SOLID
$ EID PID NID1 NID2 NID3 NID4 NID5 NID6 NID7 NID8
  1 1 1 3 4 2 43 45 46 44
  2 1 3 5 6 4 45 47 48 46
  3 1 5 7 8 6 47 49 50 48
  4 1 7 9 10 8 49 51 52 50
  5 1 9 11 12 10 51 53 54 52
...
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*END

```