



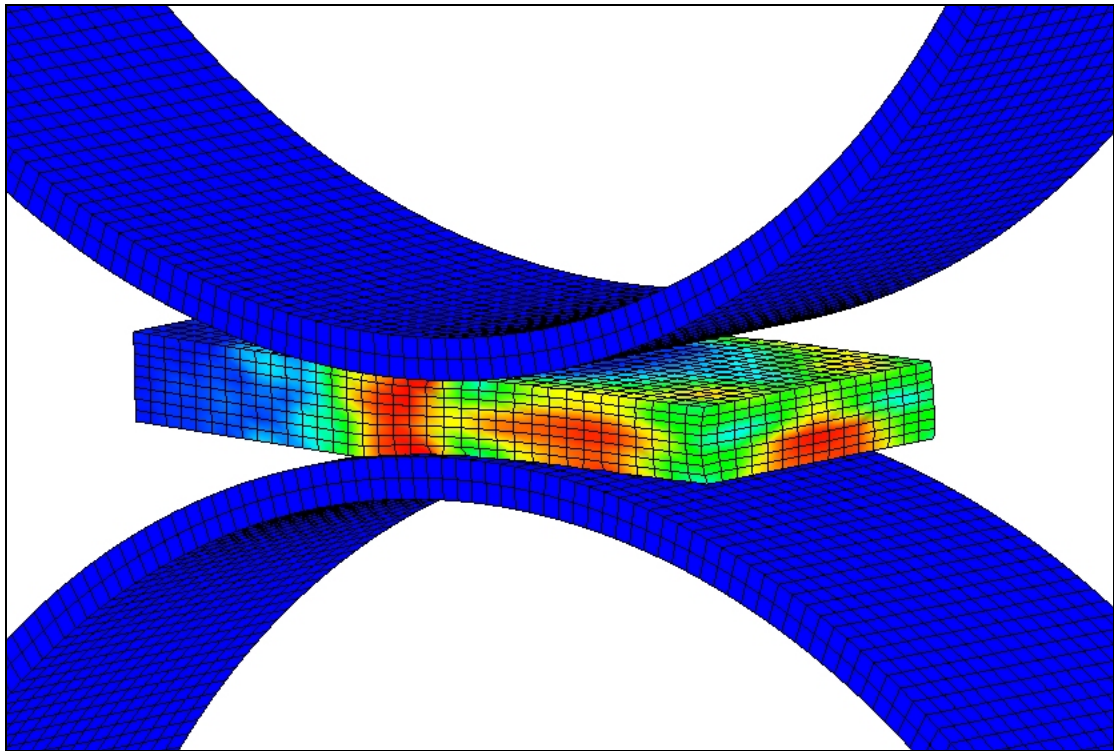
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΨΥΧΡΗΣ  
ΕΛΑΣΗΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ AL-CU  
ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ  
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

του ΓΚΟΥΤΖΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ

Επιβλέπων: Καθηγητής Δ. Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ



ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2009

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	6
1.1 Γενικά περί έλασης .....	6
1.2 Ιστορική αναδρομή .....	8
1.3 Διμεταλλικά υλικά .....	10
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	13
3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΛΑΣΗΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ .....	17
4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ .....	33
4.1 Εισαγωγή .....	33
4.2 Λογική λειτουργίας του κώδικα .....	35
4.3 Στοιχεία του μοντέλου .....	36
4.4 Περιγραφή της συμπεριφοράς των υλικών .....	38
4.5 Υπολογισμός του φορτίου και της ροπής έλασης .....	42
4.6 Η επίδραση της τριβής στην προσομοίωση .....	46
4.7 Περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης .....	48
4.7.1 Στάδιο σχεδιασμού (pre-processor) .....	48
4.7.2 Ανάλυση (analysis) .....	57
4.7.3 Στάδιο επεξεργασίας αποτελεσμάτων (post processor) .....	59
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	63
5.1 Στιγμιότυπα προσομοίωσης της έλασης .....	63
5.1.1 Χωρίς λίπανση .....	63
5.1.2 Με λίπανση .....	68
5.2 Διαγράμματα φορτίου των μοντέλων έλασης .....	72
5.2.1 Χωρίς λίπανση .....	72
5.2.2 Με λίπανση .....	76
5.3 Συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων της προσομοίωσης .....	80
5.3.1 Χωρίς λίπανση .....	80
5.3.2 Με λίπανση .....	81

5.4 Μέθοδοι επιτάχυνσης της προσομοίωσης (scaling) .....	82
5.5 Διερεύνηση της επίδρασης του συντελεστή τριβής, της ταχύτητας και του συντελεστή DT2MS στο φορτίο και τη ροπή έλασης .....	87
5.5.1 Συντελεστής τριβής .....	87
5.5.2 Συντελεστής DT2MS .....	88
5.5.3 Ταχύτητα .....	89
5.6 Κροκοδειλίαση .....	90
6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	93
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	102

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μία προσπάθεια προσέγγισης της ψυχρής έλασης διμεταλλικού ελάσματος αλουμινίου – χαλκού με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method). Για την προσομοίωση χρησιμοποιείται ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων LS DYNA 9.71. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις του τομέα τεχνολογίας κατεργασιών.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην κατεργασία της έλασης, στα διμεταλλικά υλικά, καθώς και μία ιστορική αναδρομή σε θεωρητικά μοντέλα έλασης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται σύντομη περιγραφή της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για την έλαση, και αναφέρονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία αυτή.

Στο τρίτο κεφάλαιο υπολογίζονται η κατανομή των πιέσεων, οι δυνάμεις, οι ροπές και οι κατανομές των τάσεων όπως προκύπτουν από τη θεωρία του λόφου τριβής.

Το τέταρτο κεφάλαιο, που αποτελεί και το κύριο μέρος της εργασίας, ασχολείται με τη δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης. Δίνονται πληροφορίες για την επιλογή όλων των παραμέτρων μοντελοποίησης, και περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού του φορτίου και της ροπής έλασης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα, καθώς και στιγμιότυπα από την προσομοίωση. Διερευνάται ο τρόπος επίδρασης διαφόρων παραμέτρων στα αποτελέσματά μας και γίνεται αναφορά στο φαινόμενο της κροκοδειλίας που παρατηρήθηκε.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο αντιπαραβάλλονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τις πειραματικές μετρήσεις, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων για την αξιοπιστία της μεθόδου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα το Διευθυντή του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών Καθηγητή Δ. Ε. Μανωλάκο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία, καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια αυτής.

Τέλος, πολλές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον υποψήφιο διδάκτορα Π. Κωστάζο για τη βοήθεια που μου προσέφερε τόσο στην εκμάθηση του προγράμματος, όσο και στην όλη οργάνωση της εργασίας.

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΕΛΑΣΗΣ

Η έλαση αποτελεί μία από τις σημαντικότερες και πιο συνήθεις κατεργασίες υλικών στη βιομηχανία. Περίπου το 90 % των μηχανολογικών προϊόντων έχουν περάσει κατά το στάδιο της μορφοποίησής τους από την κατεργασία αυτή. Στη συμβατική έλαση παράγονται προϊόντα όπως πλάκες, ελάσματα και ταινίες, ενώ κατά την έλαση μορφής παράγονται μορφοδοκοί κυκλικής, τετραγωνικής ή πολύπλοκης διατομής. Λόγω της δυνατότητας να τοποθετούμε στη γραμμή παραγωγής πλήθος ραούλων σε διάφορους συνδυασμούς, μπορούμε να επιτυγχάνουμε μεγάλες ταχύτητες παραγωγής, ποικιλία προϊόντων και χαμηλό κόστος.

Κατά την κατεργασία, το υλικό υπό τη μορφή πλάκας ή ράβδου εισέρχεται λόγω τριβής μέσα στο διάκενο δύο αντίθετα περιστρεφόμενων ραούλων. Εκεί υπόκειται σε θλιπτικά φορτία που του προκαλούν πλαστική παραμόρφωση. Παρατηρείται μείωση της διατομής του και επιμήκυνση κατά τη διεύθυνση της έλασης. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναλαμβάνεται διαδοχικά με σταδιακή μείωση της διατομής, μέχρι να προκύψει το τελικό προϊόν. Το τεμάχιο συχνά γυρνάει πλευρά για να επιτευχθεί ομοιόμορφα ελεγχόμενο πλάτος. Μεγαλύτερες μειώσεις διατομής πραγματοποιούνται με τη θερμή έλαση, κατά την οποία το υλικό βρίσκεται σε θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης (40 έως 50 % του σημείου τήξης). Η πρόσδοση της τελικής μορφής και διάστασης δίνεται με ψυχρή έλαση στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Το έλασμα στην είσοδο του διακένου κινείται πιο αργά από τα ράουλα, και πιο γρήγορα στην έξοδο από αυτά. Το σημείο εκείνο στο οποίο η ταχύτητα του ραούλου είναι ίση με την ταχύτητα του ελάσματος λέγεται

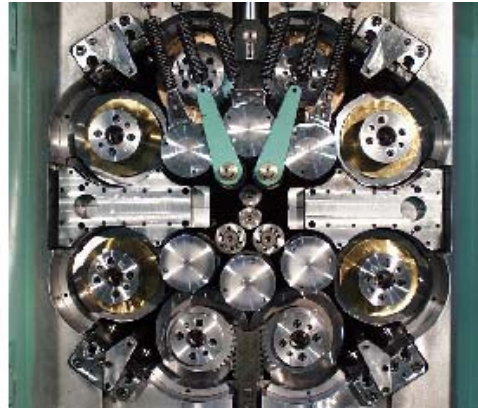
ουδέτερο επίπεδο. Η δύναμη τριβής που ασκεί το ράουλο στο έλασμα από το σημείο εισόδου μέχρι το επίπεδο αυτό προάγει την έλαση, και αντιστρέφεται σε αυτήν από το επίπεδο μέχρι την έξοδο. Όσο μεγαλύτερη είναι η μείωση του πάχους σε ένα πάσο, τόσο μετατοπίζεται η θέση του ουδέτερου επιπέδου προς την έξοδο του διακένου.

Λόγω των πολύ μεγάλων δυνάμεων που απαιτούνται για την έλαση, τα έλαστρα είναι ογκώδεις, στιβαρές κατασκευές. Για να αυξηθεί η δυνατότητά τους στην παραλαβή φορτίων, χρησιμοποιούνται περισσότερα από 2 ράουλα. Τα δύο από αυτά είναι τα ενεργά, εκείνα δηλαδή που έρχονται σε επαφή με το έλασμα. Τα υπόλοιπα χρησιμοποιούνται ως αντιστήριξη των ενεργών.

Στις εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε ένα έλαστρο με 4 ράουλα και ένα έλαστρο τύπου Cluster.



Σχ.1: Έλαστρο με 4 ράουλα



Σχ.2: Έλαστρο τύπου Cluster

## 1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Στη βιομηχανία η έλαση είναι μία από τις πιο σημαντικές μεταλλικές κατεργασίες, που στις περασμένες δεκαετίες έχει απασχολήσει πολύ η μοντελοποίησή της. Η απουσία τεχνικών μέτρησης της πίεσης στις διεπιφάνειες και η ευκολία μέτρησης των δυνάμεων έλασης και της ροπής των ραούλων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη θεωριών που προβλέπουν τις παραμέτρους αυτές. Μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για τη μελέτη της και χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα είναι η μέθοδος του λόφου τριβής (slab method) από τους Von Karman και Nadai, η μέθοδος άνω ορίου (upper bound method) από τον Komogi και η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (finite element method).

Πολλοί ερευνητές εξέλιξαν ή τροποποίησαν τις παραπάνω θεωρίες, συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση των αποτελεσμάτων για ποικίλα είδη έλασης. Ο Orowan ανέπτυξε μια περιεκτική θεωρία βασισμένη σε επέκταση της μεθόδου του λόφου τριβής με την εισαγωγή της ανομοιογένειας της πλαστικής παραμόρφωσης του ελάσματος και την ελαστική παραμόρφωση των ραούλων. Ο Alexander εξέλιξε το μαθηματικό μοντέλο του Orowan, όμως η επίλυσή του απαιτούσε μεγάλη υπολογιστική δύναμη. Κατανοώντας την πολυπλοκότητα της ανάλυσης



του Orowan, ο Bland και ο Ford απλοποίησαν τις εξισώσεις του με την υπόθεση ότι η γωνία επαφής του ελάσματος με τα ράουλα είναι πολύ μικρή. Ο Roychoudhuri και ο Lenard εξέλιξαν το μοντέλο του Orowan συμπεριλαμβάνοντας την παραμόρφωση των ραούλων στην ανάλυσή τους. Ο Michell στην αναλυτική του λύση χρησιμοποίησε επαφή σφαίρας-επιφάνειας για να καθορίσει τις παραμορφώσεις ραούλων. Η τριβή στις διεπιφάνειες μοντελοποιήθηκε ως τριβή Coulomb με το συντελεστή της τριβής να ποικίλλει κατά μήκος του τόξου της επαφής, βελτιώνοντας έτσι την πρόβλεψη της δύναμης και της ροπής. Ο Tamano διατύπωσε ένα ελαστο-πλαστικό μοντέλο για μικρές μειώσεις πάχους. Ο Dawson χρησιμοποίησε την προσέγγιση ρευστού με ένα βισκο-πλαστικό μοντέλο, ενώ ο Shima χρησιμοποίησε ένα άκαμπτο-τέλεια πλαστικό μοντέλο. Ο Saeed και ο Lenard σύγκριναν πειραματικές τιμές φορτίου ψυχρής έλασης με τις τιμές που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το μοντέλο του Orowan και το τροποποιημένο μοντέλο των Atreya και Lenard.

Στη δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης της έλασης, καθοριστικό ρόλο για την ποιότητα των αποτελεσμάτων έχουν η επιλογή της μεθόδου και η συμπεριφορά του υλικού. Η μέθοδος του λόφου τριβής επικεντρώνεται στις δύο διαστάσεις, ενώ η μέθοδος του άνω ορίου και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο για 2D όσο και για 3D ανάλυση, ανάλογα με την παραμόρφωση της πλάκας που πραγματοποιείται στη διεύθυνση του πλάτους της. Το κριτήριο για την επιλογή του 2D ή του 3D μοντέλου είναι ο λόγος πλάτους / πάχους, γιατί αν ο λόγος αυτός είναι μεγάλος, τότε η παραμόρφωση στη διεύθυνση του πλάτους είναι σημαντική και αν την αγνοήσουμε θα οδηγηθούμε σε αποτελέσματα με μεγάλη απόκλιση από τα πραγματικά [2,4].

### 1.3 ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τις τελευταίες δεκαετίες γνωρίζουμε συνεχή και αλματώδη πρόοδο, τόσο σε εξειδικευμένους τομείς όσο και σε εφαρμογές της καθημερινότητας. Στη νέα τεχνολογία που χρησιμοποιείται υπάρχει μία αυξανόμενη απαίτηση για χρήση νέων υλικών που να διαθέτουν ιδιαίτερες ιδιότητες. Για τους λόγους αυτούς τα σύνθετα υλικά κερδίζουν συνεχώς έδαφος σε νέες εφαρμογές. Συνδυάζουν τις ιδιότητες δύο ή περισσότερων υλικών ενωμένων μεταξύ τους με ισχυρό δεσμό, που έχει δημιουργηθεί από διάφορες μεθόδους συγκόλλησης (packet rolling, electroslag hard-facing, explosive welding) [1,8,13].

Ένας στόχος της χρήσης των διμεταλλικών υλικών είναι η βελτίωση της αντίστασης σε διάβρωση συστημάτων που λειτουργούν κάτω από αντίξοες συνθήκες, όπως υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, έντονα οξειδωτικό περιβάλλον [3]. Τέτοιες συνθήκες συναντώνται σε εγκαταστάσεις όπως δύλισης πετρελαίου, πυρηνικά εργοστάσια, εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, χημική βιομηχανία, βιομηχανία τροφίμων. Τα διμεταλλικά υλικά είναι τα μόνα κατάλληλα που μπορούν να αντέξουν στις συνθήκες αυτές και να διασφαλίσουν παράλληλα μεγάλη διάρκεια ζωής. Η κατάσταση που επικρατεί σήμερα στην παραγωγή και χρήση αντί-διαβρωτικών διμεταλλικών ελασμάτων στη βαριά βιομηχανία είναι πολύ διαφορετική. Πριν από 10-15 χρόνια τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνταν κυρίως σε πετροχημικά εργοστάσια, εγκαταστάσεις άντλησης πετρελαίου και βιομηχανία με εργαλειομηχανές. Σήμερα πλέον συναντώνται στη βαριά βιομηχανία σε μεγαλύτερη κλίμακα, στην ελαφριά βιομηχανία, στη γεωργία κ.α.

Εφαρμογές των διμεταλλικών ελασμάτων σε προηγμένο επίπεδο, όπως φύλλο τιτανίου – χάλυβα, βρίσκουν στον τομέα της αεροναυπηγικής και της διαστημικής αεροναυπηγικής. Το τιτάνιο και τα κράματά του, λόγω της αντι-διαβρωτικής τους ικανότητας βρίσκουν

εφαρμογή στις σωλήνες μεταφοράς υγρών που προκαλούν οξείδωση, όπως το θαλασσινό νερό. Η χρήση αυτών των υλικών είναι δικαιολογημένη γιατί αποτρέπει τα δυστυχήματα, όμως το υψηλό τους κόστος την περιορίζει. Αυτό το πρόβλημα λύνεται με τη χρήση διμεταλλικών ελασμάτων τιτανίου, μειώνοντας το κόστος στο 1/3.

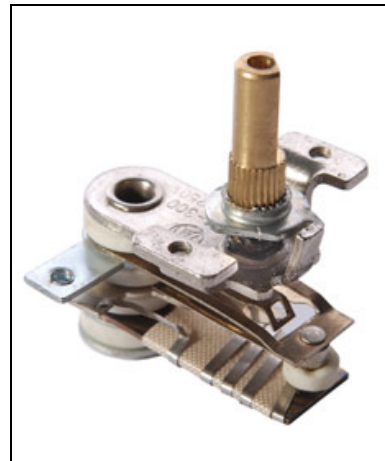
Στον τομέα της ναυπηγικής χρησιμοποιούνται για τη θωράκιση του κύτους, όπου η αντοχή σε διάβρωση και σε φορτία είναι πολύ σημαντικό κριτήριο για την επιλογή υλικών. Στην αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιούνται σε πλήθος εξαρτημάτων, όπως ρυθμιστές και μετρητές τάσης, δείκτες στροφής, θερμάστρες, αναπτήρες, εξάτμιση, πολλαπλοί έλεγχοι, διακόπτες, ψύξη, βαλβίδες θερμαντικών σωμάτων, φρένα. Στην καθημερινότητα τα συναντάμε σε πολλές οικιακές συσκευές, όπως ψυγεία, πλυντήρια ρούχων, ρυθμιστές τάσης, θερμοσίφωνες, λαμπτήρες φθορισμού, φούρνοι, κλιματιστικά μηχανήματα, κινητά τηλέφωνα.

Οι διμεταλλικοί καταλύτες έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στον τομέα της χημείας και συγκεκριμένα στην ετερογενή κατάλυση. Έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τις θεμελιώδεις έρευνες και έχουν ασκήσει σημαντική τεχνολογική επίδραση, ειδικά στη βιομηχανία πετρελαίου. Η χρήση αυτών των καταλυτών ήταν ένας βασικός παράγοντας που κατέστησε την αμόλυβδη βενζίνη εφικτή.

Τα διμεταλλικά ελάσματα έχουν επικρατήσει και στην κατασκευή θερμοστατών, που είναι συσκευές σχεδιασμένες να παρέχουν τον έλεγχο της θερμοκρασίας και την προστασία από υπερθέρμανση συσκευών και κυκλωμάτων (σχ. 4). Μπορούν να λειτουργούν σε ακραίες συνθήκες, όπως έκθεση σε επικίνδυνες ουσίες, μόρια σκόνης και στη βύθιση σε υγρά. Χαρακτηρίζονται από την αξιόπιστη λειτουργία τους, την ικανότητά τους να διατηρούν ακρίβεια στη ρύθμιση της θερμοκρασίας και την αντοχή τους σε υψηλά ηλεκτρικά φορτία.



Σχ. 3: Διμεταλλικά ρουλεμαν



Σχ. 4: Διμεταλλικοί θερμοστάτες

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

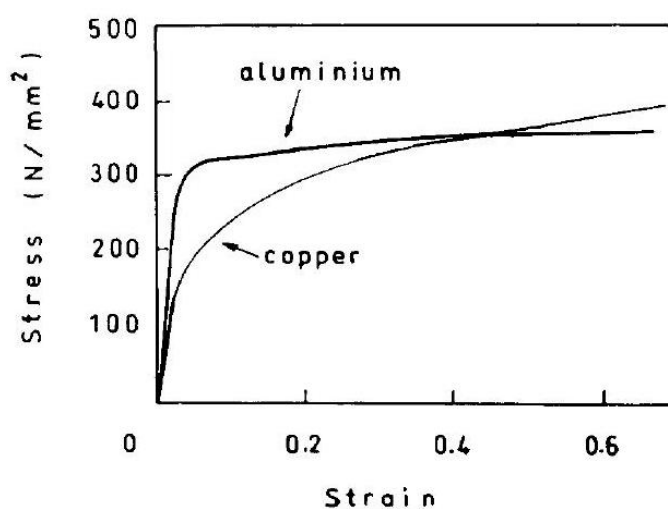
Κατά την πειραματική μας διαδικασία πραγματοποιήσαμε δύο σειρές έλασης (με λίπανση και χωρίς λίπανση) διμεταλλικών ελασμάτων αλουμινίου – χαλκού [1]. Στην έλαση χωρίς λίπανση το έλασμα διέρχεται από οχτώ διαδοχικά πάσα, ενώ στην έλαση με λίπανση το έλασμα διέρχεται από επτά διαδοχικά πάσα. Τα διμεταλλικά ελάσματα δημιουργήθηκαν με τη μέθοδο της εκρηκτικής συγκόλλησης σε πειράματα που είχαν διεξαχθεί στον τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών κατά το παρελθόν [1,25,26]. Στόχος των ελάσεων αυτών ήταν η μέτρηση δύο βασικών μεγεθών, του φορτίου και της ροπής έλασης, καθώς και η μέτρηση του πάχους και του πλάτους των ελασμάτων.

Για την έλαση χρησιμοποιήθηκε έλαστρο 2 ραούλων από βαμμένο χάλυβα, διαμέτρου 200 mm και πλάτους 100 mm. Ο ηλεκτρομειωτήρας ήταν ασύγχρονος, ισχύος 7,5 kW. Η διάταξη μετάδοσης της κίνησης από τον ηλεκτρομειωτήρα στα δύο ράουλα περιλάμβανε κιβώτιο μετάδοσης με δύο οδοντωτούς τροχούς ίσου αριθμού οδόντων για την ισοταχή περιστροφή τους. Η μετάδοση της κίνησης στο κιβώτιο γίνεται μέσω ζεύγους οδοντωτών τροχών σχέσεως 3 : 1, ώστε τελικά τα ράουλα να περιστρέφονται με ταχύτητα από 3.3 έως 20 rpm. Ο σύνδεσμος σταυρωτής άρθρωσης που συνδέει το κιβώτιο μετάδοσης με τα ράουλα επιτρέπει την κατακόρυφη κίνηση του άνω ραούλου για τον καθορισμό του διακένου. Η εκκίνηση γίνεται μέσω διακόπτη αστέρα – τριγώνου, και υπάρχει θερμική προστασία υπερφόρτισης του κινητήρα.

Για τη μέτρηση του φορτίου χρησιμοποιήθηκαν δύο ανεξάρτητοι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς KISTLER μέγιστης δυνατότητας 40 tons ο καθένας, προσαρμοσμένοι στο άνω μέρος των εδράσεων του άνω ραούλου. Για τη μέτρηση της ροπής χρησιμοποιήθηκαν δύο μετατροπείς ροπής KYOWA με strain gages, προσαρμοσμένοι μεταξύ κιβωτίου

μετάδοσης και σταυρωτών συνδέσμων. Επιπλέον στοιχεία αναφέρονται στη δημοσίευση [14].

Για τη δημιουργία των διμεταλλικών ελασμάτων χρησιμοποιήθηκαν ελάσματα αλουμινίου και χαλκού. Το αλουμίνιο με εμπορική ονομασία “κράμμα 5000” έχει πυκνότητα  $2,68 \text{ gr/cm}^3$ , μέτρο ελαστικότητας  $70 \text{ GPa}$ , περιέχει  $1\%$  μαγνήσιο και  $0,7\%$  σίδηρο. Ο χαλκός με εμπορική ονομασία “DHP-SU” έχει μέτρο ελαστικότητας  $120 \text{ GPa}$ , πυκνότητα  $8,9 \text{ gr/cm}^3$  και περιέχει  $0,01\%$  φώσφορο. Τα διμεταλλικά ελάσματα μετά τη συγκόλλησή τους και χωρίς να υποστούν θερμική κατεργασία για τη μείωση των παραμενουσών τάσεων, κόπηκαν σε λωρίδες διαστάσεων  $70 \times 30 \text{ mm}$ . Η ταχύτητα έλασης ήταν σταθερή και ίση με  $4 \text{ m/min}$ , ενώ η κατεύθυνση έλασης ήταν αντίθετη από εκείνη της εκρηκτικής συγκόλλησης. Ακολουθεί η καμπύλη πραγματικής τάσης – πραγματικής παραμόρφωσης που προέκυψε από δοκιμή θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια του αλουμινίου και του χαλκού. Λεπτομέρειες για τη διαδικασία αυτή περιγράφονται στη δημοσίευση του τομέα [1].



Σχ. 5: Καμπύλη πραγματικής τάσης – πραγματικής παραμόρφωσης

Στους παρακάτω πίνακες συνοψίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τις δύο σειρές ελάσεων :

ΠΑΣΟ	1	2	3	4	5	6	7	8
ΣΥΝΟΛ. ΠΑΧΟΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΡΙΝ (mm)	8,45	7,19	6,81	5,75	5,05	4,12	3,52	2,55
ΠΑΧΟΣ AL ΠΡΙΝ (mm)	4,18	3,50	3,29	2,83	2,43	2,05	1,70	1,23
ΠΑΧΟΣ CU ΠΡΙΝ (mm)	4,27	3,69	3,52	2,92	2,62	2,08	1,82	1,32
ΣΥΝΟΛ. ΠΑΧΟΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΜΕΤΑ (mm)	7,19	6,81	5,75	5,05	4,12	3,52	2,55	1,65
ΠΑΧΟΣ AL ΜΕΤΑ (mm)	3,50	3,29	2,83	2,43	2,05	1,70	1,23	0,80
ΠΑΧΟΣ CU ΜΕΤΑ (mm)	3,69	3,52	2,92	2,62	2,08	1,82	1,32	0,85
ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	14,91	5,29	15,57	12,17	18,42	14,56	27,56	35,29
ΣΥΝΟΛ. ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ (%)	15	19	32	40	51	58	70	80
ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ AL ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	16,3	6,0	14,0	14,1	15,6	17,1	27,6	35,0
ΣΥΝΟΛ. ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ AL (%)	16,3	21,3	32,4	41,8	51,0	59,3	70,0	80,9
ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ CU ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	13,6	4,6	17,0	10,3	20,6	12,5	27,5	35,6
ΣΥΝΟΛ. ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ CU (%)	13,6	17,6	31,5	38,7	51,3	57,3	68,7	80,1
ΠΛΑΤΟΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΠΡΙΝ (mm)	29,35	29,70	29,75	29,90	30,10	30,30	30,50	30,90
ΠΛΑΤΟΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ (mm)	29,70	29,75	29,90	30,10	30,30	30,50	30,90	31,65
ΑΥΞΗΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	1,19	0,17	0,50	0,67	0,66	0,66	1,31	2,43
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΥΞΗΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ (%)	1,19	1,36	1,87	2,56	3,24	3,92	5,28	7,84
ΦΟΡΤΙΟ ΕΛΑΣΗΣ (kN)	75	61	93	88	96	91	112	127
ΡΟΠΗ ΕΛΑΣΗΣ (N*m)	578	368	919	688	914	710	1004	1108

Πίνακας δεδομένων για την έλαση χωρίς λίπανση

ΠΑΣΟ	1	2	3	4	5	6	7
ΣΥΝΟΛ. ΠΑΧΟΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΡΙΝ (mm)	8,29	7,47	6,48	5,18	4,53	3,46	2,54
ΠΑΧΟΣ AL ΠΡΙΝ (mm)	4,10	3,72	3,16	2,54	2,13	1,59	1,23
ΠΑΧΟΣ CU ΠΡΙΝ (mm)	4,19	3,75	3,32	2,64	2,40	1,87	1,31
ΣΥΝΟΛ. ΠΑΧΟΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΜΕΤΑ (mm)	7,47	6,48	5,18	4,53	3,46	2,54	1,60
ΠΑΧΟΣ AL ΜΕΤΑ (mm)	3,72	3,16	2,54	2,13	1,59	1,23	0,74
ΠΑΧΟΣ CU ΜΕΤΑ (mm)	3,75	3,32	2,64	2,40	1,87	1,31	0,86
ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	11,0	13,0	20,6	12,5	23,6	29,5	34,4
ΣΥΝΟΛ. ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ (%)	11	22	38	45	58	71	81
ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ AL ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	9,5	15,0	19,6	16,1	25,3	22,6	39,8
ΣΥΝΟΛ. ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ AL (%)	9,5	21,0	38,2	48,2	61,2	70,0	81,9
ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ CU ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	10,7	11,5	20,5	9,1	22,1	29,9	34,3
ΣΥΝΟΛ. ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ CU (%)	10,7	21,0	37,0	42,7	55,5	68,7	79,6
ΠΛΑΤΟΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΠΡΙΝ (mm)	28,75	29,40	29,45	29,80	30,10	30,40	30,85
ΠΛΑΤΟΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ (mm)	29,40	29,45	29,80	30,10	30,40	30,85	31,40
ΑΥΞΗΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	2,26	0,17	1,19	1,00	1,00	1,48	1,78
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΥΞΗΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ (%)	2,26	2,43	3,65	4,69	5,74	7,30	9,20
ΦΟΡΤΙΟ ΕΛΑΣΗΣ (kN)	70	78	84	81	99	106	119
ΡΟΠΗ ΕΛΑΣΗΣ (N*m)	485	592	847	644	918	965	1006

Πίνακας δεδομένων για την έλαση με λίπανση

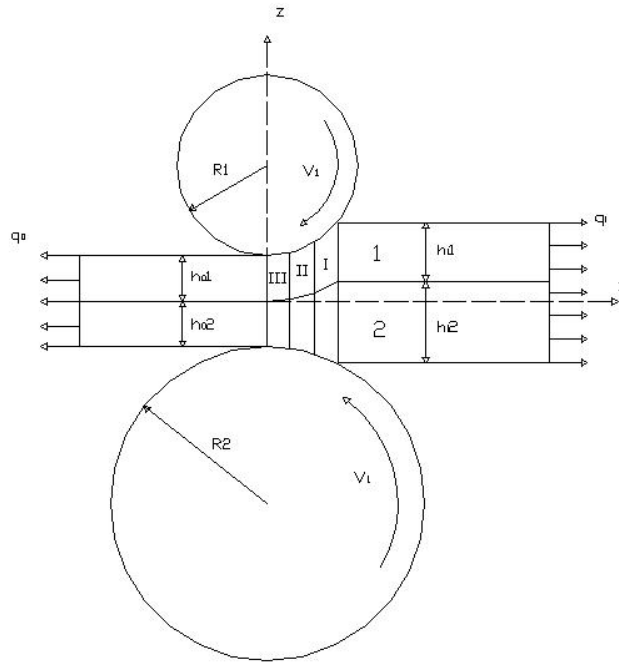


### 3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΕΛΑΣΗΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

Η έλαση διμεταλλικού ελάσματος αποτελεί περίπτωση ασύμμετρης έλασης, λόγω του γεγονότος ότι τα υλικά των δύο ελασμάτων είναι διαφορετικά και έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Η κατανομή πιέσεων, οι δυνάμεις, οι ροπές και οι κατανομές τάσεων προκύπτουν από τη θεωρία του λόφου τριβής, θέτοντας τις εξής προϋποθέσεις :

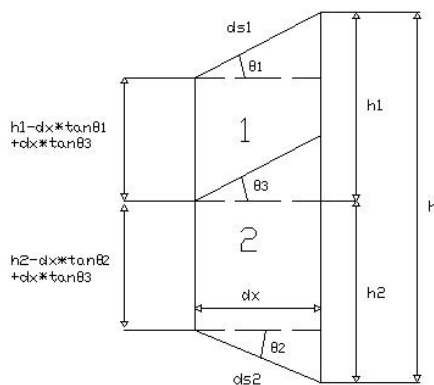
- τα ράουλα και τα ελάσματα είναι στερεά, τέλεια πλαστικά υλικά
- έχουμε επίπεδη πλαστική παραμόρφωση
- οι μέσες τάσεις είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες και οι κατακόρυφες τάσεις  $p$ , όπως και οι οριζόντιες  $q$ , είναι κύριες τάσεις
- η τριβή διάτμησης  $\tau = m * k$  είναι σταθερή, αλλά διαφορετική στα δύο ράουλα
- οι διευθύνσεις ροής στην είσοδο και έξοδο είναι οριζόντιες
- το τόξο επαφής είναι πολύ μικρότερο από την περιφέρεια του ραούλου
- δεν υπάρχει ολίσθηση στη διεπιφάνεια, δηλαδή τα ελάσματα είναι πολύ καλά συγκολλημένα

Η περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης στο διάκενο διαιρείται σε 3 μέρη, τις ζώνες I, II και III. Οι ζώνες αυτές είναι η εισόδου, διάτμησης και εξόδου αντίστοιχα. Οι δείκτες 1 και 2 δηλώνουν το άνω και το κάτω ράουλο. Ακολουθεί πλάγια όψη της έλασης, στην οποία φαίνονται οι ζώνες αυτές.

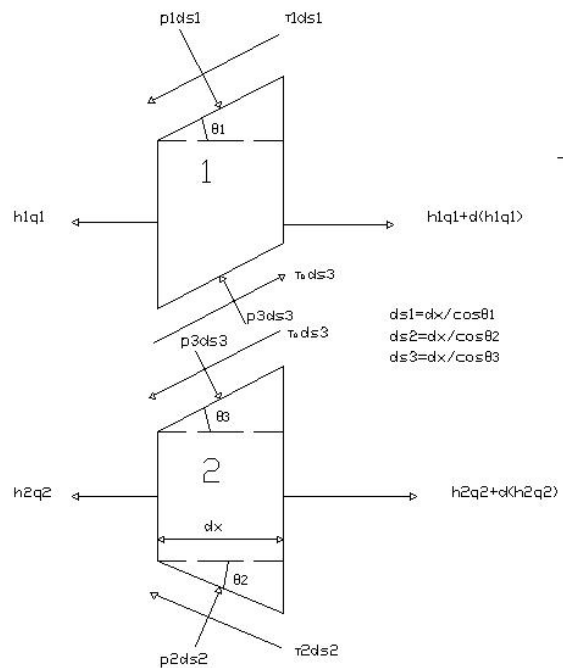


Σχ. 6: Ασύμμετρη έλαση διμεταλλικού ελάσματος

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η γεωμετρία στο διάκενο και η εντατική κατάσταση του ελάσματος στη ζώνη I, όπου οι διευθύνσεις των άνω και κάτω δυνάμεων τριβής είναι προς τα εμπρός, δηλαδή οι ταχύτητες των ραούλων είναι μεγαλύτερες από αυτή του ελάσματος.



Σχ. 7: Γεωμετρία διακένου



Σχ.8: Εντατική κατάσταση ζώνης I

Οι μαθηματικές εκφράσεις για την ισορροπία των οριζόντιων και κατακόρυφων δυνάμεων στο άνω έλασμα (1) και το κάτω έλασμα (2) είναι :

$$\frac{d(h_1 \cdot q_1)}{dx} + (p_1 \cdot \tan \theta_1) - (p_3 \tan \theta_3) - \tau_1 + \tau_0 = 0 \quad (1)$$

$$p = p_1 + \tau_1 \cdot \tan \theta_1 = p_3 + \tau_0 \cdot \tan \theta_3 \quad (2)$$

$$\frac{d(h_2 \cdot q_2)}{dx} + (p_2 \cdot \tan \theta_2) + (p_3 \tan \theta_3) - \tau_2 - \tau_0 = 0 \quad (3)$$

$$p = p_2 + \tau_2 \cdot \tan \theta_2 = p_3 + \tau_0 \cdot \tan \theta_3 \quad (4)$$

όπου q είναι οι οριζόντιες τάσεις, p οι κατακόρυφες τάσεις, h το πάχος του ελάσματος,  $\theta_1$  και  $\theta_2$  οι μεταβλητές γωνίες επαφής,  $\tau_0$  η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια του διμεταλλικού ελάσματος,  $\tau_1 = m_1 \cdot k_1$  και  $\tau_2 = m_2 \cdot k_2$  οι τάσεις τριβής κατά μήκος των ορίων του άνω και κάτω ραούλου,  $p_1$  και  $p_2$  είναι οι πιέσεις έλασης στο άνω και το κάτω ράουλο,  $p_3$  η πίεση επαφής στη συγκολλημένη διεπιφάνεια.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1) και (2), καθώς και τις (3) και (4) έχουμε :

$$\frac{d(h_1 \cdot q_1)}{dx} + (\tan \theta_1 - \tan \theta_3) \cdot p - \tau_1 \cdot (\tan^2 \theta_1 + 1) + (\tan^2 \theta_3 + 1) \cdot \tau_0 = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d(h_2 \cdot q_2)}{dx} + (\tan \theta_2 - \tan \theta_3) \cdot p - \tau_2 \cdot (\tan^2 \theta_2 + 1) + (\tan^2 \theta_3 + 1) \cdot \tau_0 = 0 \quad (6)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (5) και (6) :

$$\frac{d(h \cdot q)}{dx} + (\tan \theta_1 + \tan \theta_2) \cdot p - \tau_1 \cdot (\tan^2 \theta_1 + 1) - \tau_2 \cdot (\tan^2 \theta_2 + 1) = 0 \quad (7)$$

$$\text{Όπου } h \cdot q = h_1 \cdot q_1 + h_2 \cdot q_2 \quad (7')$$

Το κριτήριο διαρροής Von Mises για επίπεδη παραμόρφωση εντός των στρωμάτων 1 και 2 μπορεί να γραφτεί αντίστοιχα :

$$p + q_1 = 2 k_1 \quad (8)$$

$$p + q_2 = 2 k_2 \quad (9)$$

$$\text{όπου } k_1 = \frac{\sigma_{yp1}}{\sqrt{3}} \quad \text{και} \quad k_2 = \frac{\sigma_{yp2}}{\sqrt{3}} \quad (9\alpha)$$

με  $\sigma_{yp1}$  ,  $\sigma_{yp2}$  να είναι οι μέσες τάσεις διαρροής του άνω και κάτω στρώματος αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη την (7') το κριτήριο διαρροής για το συγκολλημένο έλασμα γίνεται :

$$p + q = 2 k_e \quad (10)$$

$$k_e = k_1 \cdot \beta + k_2 (1-\beta) \quad (10\alpha)$$

$$\text{όπου } \beta = \frac{h_1}{h} = \frac{h_i}{h_i} = \frac{h_{01}}{h_0} \quad (10\beta)$$

ο λόγος παχών του άνω στρώματος προς του συγκολλημένου ελάσματος,  $k_e$  η ισοδύναμη διατμητική τάση διαρροής και  $h_0$  ,  $h_i$  είναι τα πάχη του

ελάσματος στην έξοδο και την είσοδο του διακένου των ραούλων αντίστοιχα.

Στο διάκενο ισχύουν οι εξής γεωμετρικές σχέσεις :

$$h = h_1 + h_2 = h_0 + \frac{x^2}{R_{eq}} \quad (11)$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{2 \cdot x}{R_{eq}} \quad (11a)$$

$$\tan \theta_1 = \frac{x}{R_1} \quad (11b)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{x}{R_2} \quad (11c)$$

$$\text{όπου } R_{eq} = \frac{2 \cdot R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (11d)$$

η ισοδύναμη ακτίνα του ραούλου. Η σχέση μεταξύ  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  μπορεί να προκύψει από τη θεώρηση του ίδιου λόγου παχών στο διάκενο :

$$\tan \theta_3 = (1 - \beta) \cdot \tan \theta_1 - \beta \cdot \tan \theta_2 \quad (12)$$

Συνδυάζοντας τις γεωμετρικές σχέσεις στο διάκενο, η σχέση (7) γίνεται :

$$h \cdot \frac{dq}{dx} + (p + q) \cdot \frac{dh}{dx} = \tau_1 \frac{x^2}{R_1^2} + \tau_2 \frac{x^2}{R_2^2} + \tau_e \quad (13)$$

όπου  $\tau_e = \tau_1 + \tau_2$  είναι η ενεργή τάση τριβής. Αντικαθιστώντας την (10) στην (13) έχουμε :

$$h \cdot \frac{dq}{dx} = -\left(\frac{\tau_1}{R_1^2} + \frac{\tau_2}{R_2^2}\right) \cdot x^2 + 2 \cdot k_e \cdot \frac{2 \cdot x}{R_{eq}} - \tau_e \quad (14)$$

Ολοκληρώνοντας την (14) ως προς  $x$ , η λύση της διαφορικής εξίσωσης είναι :

$$p = -A \cdot x + \frac{A}{2} \cdot \ln(x^2 + R_{eq} \cdot h_o) + \frac{E}{\sqrt{R_{eq} \cdot h_o}} \cdot \omega + c^* \quad (15)$$

όπου

$$A = R_{eq} \cdot \left(\frac{\tau_1}{R_1^2} + \frac{\tau_2}{R_2^2}\right) \quad (15a)$$

$$B = 4 \cdot k_e \quad (15b)$$

$$\omega = \tan^{-1} \frac{x}{\sqrt{R_{eq} \cdot h_o}} \quad (15c)$$

$$C = R_{eq} \cdot \tau_e \quad (15d)$$

$$D = R_{eq} \cdot h_o \quad (15e)$$

$$E = D \cdot A - C \quad (15f)$$

όπου  $c^*$  η σταθερά ολοκλήρωσης καθοριζόμενη από οριακή συνθήκη. Η εξίσωση (15) είναι μια γενική μορφή για την πίεση έλασης και ισχύει στις ζώνες I, II και III. Συνδυάζοντας τις σχέσεις (5) , (6) προκύπτει η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια :

$$\tau_o = \frac{\Theta_1 \cdot \frac{d(h_2 \cdot q_2)}{dx} - \Theta_2 \cdot \frac{d(h_1 \cdot q_1)}{dx} - \Theta_4}{\Theta_3} \quad (16)$$

όπου

$$\Theta_1 = \tan \theta_1 - \tan \theta_3 \quad (16a)$$

$$\Theta_2 = \tan \theta_2 + \tan \theta_3 \quad (16b)$$

$$\Theta_3 = (\tan \theta_1 + \tan \theta_2) \cdot (\tan^2 \theta_3 + 1) \quad (16c)$$

$$\Theta_4 = \tau_2 \cdot (\tan^2 \theta_2 + 1) \cdot \Theta_1 - \tau_1 \cdot (\tan^2 \theta_1 + 1) \cdot \Theta_2 \quad (16d)$$

Αντικαθιστώντας τις (11), (12) στις παραπάνω έχουμε :

$$\Theta_1 = \frac{2 \cdot \beta \cdot x}{R_{eq}}$$

$$\Theta_2 = \frac{2 \cdot (1 - \beta) \cdot x}{R_{eq}}$$

$$\Theta_3 = \frac{2 \cdot x}{R_{eq}} \left[ \left( \frac{1}{R_1} - \frac{2 \cdot \beta}{R_{eq}} \right)^2 \cdot x^2 + 1 \right]$$

$$\Theta_4 = \tau_2 \cdot \left( \frac{x^2}{R_2^2} + 1 \right) \cdot \frac{2 \cdot \beta \cdot x}{R_{eq}} - \tau_1 \cdot \left( \frac{x^2}{R_1^2} + 1 \right) \cdot \frac{2 \cdot (1 - \beta) \cdot x}{R_{eq}}$$

Στη ζώνη I , όπου η διεύθυνση των δυνάμεων τριβής είναι προς τα εμπρός, η ταχύτητα του διμεταλλικού ελάσματος είναι μικρότερη από αυτή του άνω και κάτω ραούλου. Οι τάσεις τριβής του άνω και κάτω ραούλου είναι  $\tau_1 = m_1 * k_1$  και  $\tau_2 = m_2 * k_2$  . Έτσι, η ενεργή τάση τριβής είναι  $\tau_e = (m_1 * k_1) + (m_2 * k_2)$ .

Παρόμοια στη ζώνη III, επειδή η διεύθυνση των δυνάμεων τριβής είναι προς τα πίσω, η ταχύτητα του διμεταλλικού ελάσματος είναι μεγαλύτερη αυτής του άνω και κάτω ραούλου. Η μορφή της διαφορικής εξίσωσης στη ζώνη III είναι ίδια με της ζώνης I, αντικαθιστώντας την ενεργή τάση τριβής  $\tau_e$  με  $\tau_e = -(m_1 * k_1) - (m_2 * k_2)$ .

Στη ζώνη II, επειδή οι διευθύνσεις των δυνάμεων τριβής είναι αντίθετες, η ταχύτητα του διμεταλλικού ελάσματος είναι μεγαλύτερη του άνω ραούλου και μικρότερη του κάτω (αν υποτεθεί ότι  $V_2 > V_1$ ). Έτσι, η ενεργή τάση τριβής είναι  $\tau_e = - (m_1 * k_1) + (m_2 * k_2)$ .

Οριακές συνθήκες :

A) Ζώνη III ( $0 \leq x \leq x_{n2}$ ) ,  $\tau_e = - (m_1 * k_1) - (m_2 * k_2)$

Στο  $x=0$ , ( $\omega=0$ ) έχουμε  $p_o = 2 * k_e - q_o$

Από αυτή την οριακή συνθήκη η σταθερά ολοκλήρωσης  $c_3^*$  στη σχέση (15) προκύπτει :

$$c_3^* = 2 \cdot k_e [1 - \ln(R_e \cdot h_o)] - q_o \quad (17)$$



Η πίεση έλασης  $p_{III}$  στη ζώνη III είναι :

$$p_{III} = -A_3 \cdot x + \frac{B}{2} \ln(x^2 + R_e \cdot h_o) + \frac{E_3}{\sqrt{R_{eq} \cdot h_o}} \cdot \omega + c_3^* \quad (18)$$

όπου

$$A_3 = -R_{eq} \left( \frac{m_1 \cdot k_1}{R_1^2} + \frac{m_2 \cdot k_2}{R_2^2} \right) \quad (18a)$$

$$C_3 = R_{eq} \cdot \tau_e \quad (18b)$$

$$E_3 = D \cdot A_3 - C_3 \quad (18c)$$

Η ειδική διατμητική τάση στη ζώνη III,  $(\tau_o/k_1)$  είναι :

$$\left( \frac{\tau_o}{k_1} \right)_{III} = \frac{\Theta_5 - \Theta_4}{\Theta_3} \quad (19)$$

όπου

$$\Theta_5 = \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 - \beta) \cdot x^2}{R_{eq}^2} \cdot (2 \cdot k_2 - 2 \cdot k_1) \quad (19a)$$

B) Ζώνη I, ( $x_{n1} \leq x \leq L$ ),  $\tau_e = m_1 * k_1 + m_2 * k_2$

Στο  $x = L$ ,

$$\omega = \omega_i = \tan^{-1} \frac{L}{\sqrt{R_{eq} \cdot h_o}}$$

$$p_i = 2 * k_e - q_i$$

Από αυτήν την οριακή συνθήκη η σταθερά  $c_1^*$  μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$c_1 = 2 \cdot k_e \cdot \left[ 1 - \ln(L^2 + R_{eq} \cdot h_o) \right] - q_i + A_1 \cdot L - \frac{E_1}{\sqrt{R_{eq} \cdot h_o}} \cdot \omega_i \quad (20)$$

όπου

$$A_1 = R_{eq} \cdot \left( \frac{m_1 \cdot k_1}{R_1^2} + \frac{m_2 \cdot k_2}{R_2^2} \right) \quad (20a)$$

$$c_1 = R_{eq} * \tau_e \quad (20b)$$

$$E_1 = D * A_1 - C_1 \quad (20c)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις η πίεση έλασης στη ζώνη I μπορεί να εκφραστεί ως :

$$p_I = -A_1 \cdot x + \frac{B}{2} \ln(x^2 + R_{eq} \cdot h_o) + \frac{E_1}{\sqrt{R_{eq} \cdot h_o}} \cdot \omega + c_1^* \quad (21)$$

Η μορφή της ειδικής διατμητικής τάσης  $(\tau_o/k_1)_I$  στη ζώνη I είναι ίδια όπως στη ζώνη III. Η κύρια διαφορά στη σχέση (19) είναι ότι τα  $\tau_1, \tau_2$  αντικαθίστανται από τα  $m_1 \cdot k_1$  και  $m_2 \cdot k_2$ . Όταν η περιφερειακή ταχύτητα του άνω ραούλου  $V_1$  είναι μικρότερη από του κάτω ραούλου  $V_2$ , τα όρια του  $x$  στη ζώνη II είναι  $(x_{n2} \leq x \leq x_{n1})$  και  $\tau_e = -m_1 \cdot k_1 + m_2 \cdot k_2$ .

Γ) Ζώνη II,  $(x_{n2} \leq x \leq x_{n1})$ , και  $\tau_e = -m_1 \cdot k_1 + m_2 \cdot k_2$

Η πίεση έλασης  $p_{II}$  στη ζώνη II μπορεί να εκφραστεί :

$$p_{II} = -A_2 \cdot x + \frac{B}{2} \ln(x^2 + R_{eq} \cdot h_o) + \frac{E_2}{\sqrt{R_{eq} \cdot h_o}} \cdot \omega + c_2^* \quad (22)$$

όπου

$$A_2 = R_{eq} \cdot \left( \frac{-m_1 \cdot k_1}{R_1^2} + \frac{m_2 \cdot k_2}{R_2^2} \right) \quad (22a)$$

$$C_2 = R_{eq} \cdot \tau_e \quad (22b)$$

$$E_2 = D \cdot A_2 - C_2 \quad (22c)$$

Λόγω της συνέχειας των οριακών συνθηκών στο  $x = x_{n2}$ ,  $\omega = \omega_{n2}$  η πίεση έλασης στη ζώνη III πρέπει να είναι ίση με αυτή στη ζώνη II. Συνεπώς, τα  $c_3^*$ ,  $c_4^*$  συνδέονται με τη σχέση :

$$-A_3 \cdot x_{n2} + \frac{B}{2} \ln(x_{n2}^2 + R_{eq} \cdot h_o) + \frac{E_3}{\sqrt{R_{eq} \cdot h_o}} \cdot \omega_{n2} + c_3^* =$$

$$-A_3 \cdot x_{n2} + \frac{B}{2} \ln(x_{n2}^2 + R_{eq} \cdot h_o) + \frac{E_2}{\sqrt{R_{eq} \cdot h_o}} \cdot \omega_{n2} + c_2^* \quad (23)$$

Λόγω της συνέχειας των οριακών συνθηκών στο  $x = x_{n2}$ ,  $\omega = \omega_{n2}$  η πίεση έλασης στη ζώνη I πρέπει να είναι ίση με αυτή στη ζώνη II. Συνεπώς, τα  $c_1^*$ ,  $c_2^*$  συνδέονται με τη σχέση :

$$\begin{aligned} -A_1 \cdot x_{n1} + \frac{B}{2} \ln(x_{n1}^2 + R_{eq} \cdot h_o) + \frac{E_1}{\sqrt{R_{eq} \cdot h_o}} \cdot \omega_{n1} + c_1^* = \\ -A_2 \cdot x_{n1} + \frac{B}{2} \ln(x_{n1}^2 + R_{eq} \cdot h_o) + \frac{E_2}{\sqrt{R_{eq} \cdot h_o}} \cdot \omega_{n1} + c_2^* \end{aligned} \quad (24)$$

Από την (23) προκύπτει:

$$c_2^* = B^* \cdot x_{n2} + F^* \cdot \omega_{n2} + c_3^* \quad (25)$$

όπου

$$B^* = A_2 - A_3 \quad (25a)$$

$$F^* = \frac{(E_3 - E_2)}{\sqrt{R_{eq} \cdot h_o}} \quad (25b)$$

Από την (24) :

$$c_2^* = A^* \cdot x_{n1} + E^* \cdot \omega_{n1} + c_1^* \quad (26)$$

όπου

$$A^* = A_2 - A_1 \quad (26a)$$

$$E^* = \frac{(E_1 - E_2)}{\sqrt{R_{eq} \cdot h_o}} \quad (26b)$$

Αντικαθιστώντας την (25) στην (26) έχουμε :

$$A^* \cdot x_{n1} + E^* \cdot \omega_{n1} + c_1^* - B^* \cdot x_{n2} - F^* \cdot \omega_{n2} - c_3^* = 0 \quad (27)$$

Συμμορφωμένο με την ασυμπίεστότητα, τα άνω και κάτω ουδέτερα σημεία  $x_{n1}$  και  $x_{n2}$  έχουν τη δυνατότητα να σχετίζονται με την πιο κάτω σχέση :

$$x_{n1} = \sqrt{V_A \cdot x_{n2}^2 + (V_A - 1) \cdot \frac{h_o}{R_A}} \quad (28)$$

όπου

$$V_A = \frac{V_2}{V_1} \quad (28a)$$

$$R_A = \frac{1}{R_{eq}} - \frac{h_o}{2 \cdot R_{eq}^2} \quad (28b)$$

Αντικαθιστώντας τις (28) στις (27) η λύση για το ουδέτερο σημείο  $x_{n2}$  μπορεί να βρεθεί μέσω της μεθόδου γραμμικής παρεμβολής. Όταν αυτό είναι γνωστό, τα  $x_{n1}$  και  $c_2^*$  υπολογίζονται από τις σχέσεις (28) και (25).

Οι πιέσεις  $p_{III}$ ,  $p_{II}$ ,  $p_I$  από τις σχέσεις (18), (22), (21) αντίστοιχα όταν τα  $c_1^*$ ,  $c_2^*$ ,  $c_3^*$  είναι γνωστά από τις σχέσεις (20), (25) και (17) αντίστοιχα.

Η μορφή της ειδικής διατμητικής τάσης  $(\tau_o/k_1)_{II}$  στη ζώνη II είναι ίδια όπως στη ζώνη III. Η κύρια διαφορά στη σχέση (19) είναι ότι τα  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  αντικαθίστανται από τα  $-m_1 k_1$  και  $m_2 k_2$  αντίστοιχα.

## Δυνάμεις έλασης

Η δύναμη έλασης μπορεί να υπολογιστεί με ολοκλήρωση της κάθετης πίεσης έλασης επί του τόξου επαφής, όταν είναι γνωστά ο παράγων τριβής  $m$  και η μέση διατμητική τάση διαρροής  $\sigma_{yp}$ . Έτσι, η δύναμη έλασης ανά μονάδα πλάτους δίνεται μέσω της :

$$P = P_{III} + P_{II} + P_I \quad (29)$$

όπου

$$P_{III} = \int_0^{x_{n2}} P_{III} \cdot dx = III_1^* + III_2^* \quad (30)$$

$$III_1^* = -\frac{A_3}{2} \cdot x_{n2}^2 + \frac{B}{2} \cdot x_{n2} \cdot \ln(x_{n2}^2 + R_{eq} \cdot h_o) + (c_3^* - B) \cdot x_{n2} \quad (30a)$$

$$III_2^* = E_3 \cdot \left( \frac{\omega_{n2}^2}{2} + \frac{\omega_{n2}^4}{4} \right) + B \cdot \sqrt{R_{eq} \cdot h_o} \cdot \omega_{n2} \quad (30b)$$

$$P_{II} = \int_{x_{n2}}^{x_{n1}} P_{II} \cdot dx = II_1^* + II_2^* \quad (31)$$

$$II_1^* = -\frac{A_2}{2} \cdot x_{n1}^2 + \frac{B}{2} \cdot x_{n1} \cdot \ln(x_{n1}^2 + R_{eq} \cdot h_o) + (c_2^* - B) \cdot x_{n1} +$$

$$B \cdot \sqrt{R_{eq} \cdot h_o} \cdot \omega_{n1} + E_2 \cdot \left( \frac{\omega_{n1}^2}{2} + \frac{\omega_{n1}^4}{4} \right) \quad (31a)$$

$$\begin{aligned}
I_2^* &= \frac{A_2}{2} \cdot x_{n2}^2 - \frac{B}{2} \cdot x_{n2} \cdot \ln(x_{n2}^2 + R_{eq} \cdot h_o) - (c_2^* - B) \cdot x_{n2} - \\
& B \cdot \sqrt{R_{eq} \cdot h_o} \cdot \omega_{n2} - E_2 \cdot \left( \frac{\omega_{n2}^2}{2} + \frac{\omega_{n2}^4}{4} \right)
\end{aligned} \tag{31b}$$

$$P_I = \int_{x_{n1}}^L P_I \cdot dx = I_1^* + I_2^* \tag{32}$$

$$\begin{aligned}
I_1^* &= -\frac{A_1}{2} \cdot L^2 + \frac{B}{2} \cdot L \cdot \ln(L^2 + R_{eq} \cdot h_o) + (c_1^* - B) \cdot L + \\
& B \cdot \sqrt{R_{eq} \cdot h_o} \cdot \omega_{n1} + E_1 \cdot \left( \frac{\omega_{n1}^2}{2} + \frac{\omega_{n1}^4}{4} \right)
\end{aligned} \tag{32a}$$

$$\begin{aligned}
I_2^* &= -\frac{A_1}{2} \cdot x_{n1}^2 - \frac{B}{2} \cdot x_{n1} \cdot \ln(x_{n1}^2 + R_{eq} \cdot h_o) - (c_1^* - B) \cdot x_{n1} - \\
& B \cdot \sqrt{R_{eq} \cdot h_o} \cdot \omega_{n1} - E_1 \cdot \left( \frac{\omega_{n1}^2}{2} + \frac{\omega_{n1}^4}{4} \right)
\end{aligned} \tag{32b}$$

### Ροπή έλασης

Οι ροπές έλασης  $T_1$  και  $T_2$  που ασκούνται από το έλασμα στο άνω και κάτω ράουλο αντίστοιχα μπορούν να υπολογιστούν ολοκληρώνοντας τις ροπές των δυνάμεων τριβής κατά μήκος του τόξου επαφής γύρω από τον άξονα περιστροφής.

$$\begin{aligned}
T_1 &= R_1 \cdot \left( - \int_0^{x_{n2}} (m_1 \cdot k_1) dx - \int_{x_{n2}}^{x_{n1}} (m_1 \cdot k_1) dx + \int_{x_{n1}}^L (m_1 \cdot k_1) dx \right) = \\
&= R_1 \cdot m_1 \cdot k_1 \cdot (L - 2 \cdot x_{n1}) \tag{33}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_2 &= R_2 \cdot \left( - \int_0^{x_{n2}} (m_2 \cdot k_2) dx - \int_{x_{n2}}^{x_{n1}} (m_2 \cdot k_2) dx + \int_{x_{n1}}^L (m_2 \cdot k_2) dx \right) = \\
&= R_2 \cdot m_2 \cdot k_2 \cdot (L - 2 \cdot x_{n1}) \tag{34}
\end{aligned}$$

Η απαιτούμενη ολική ροπή έλασης είναι :

$$T = T_1 + T_2 \tag{35}$$



## 4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προσομοίωση είναι μία μέθοδος προσέγγισης ενός φυσικού φαινομένου ή μίας διεργασίας, κάνοντας χρήση μαθηματικών μοντέλων. Η βιομηχανία και ειδικότερα ο τομέας των κατεργασιών είναι ένας από τους χώρους που η προσομοίωση έχει ευρύτατη εφαρμογή. Σήμερα αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της σχεδίασης και βελτίωσης ενός προϊόντος.

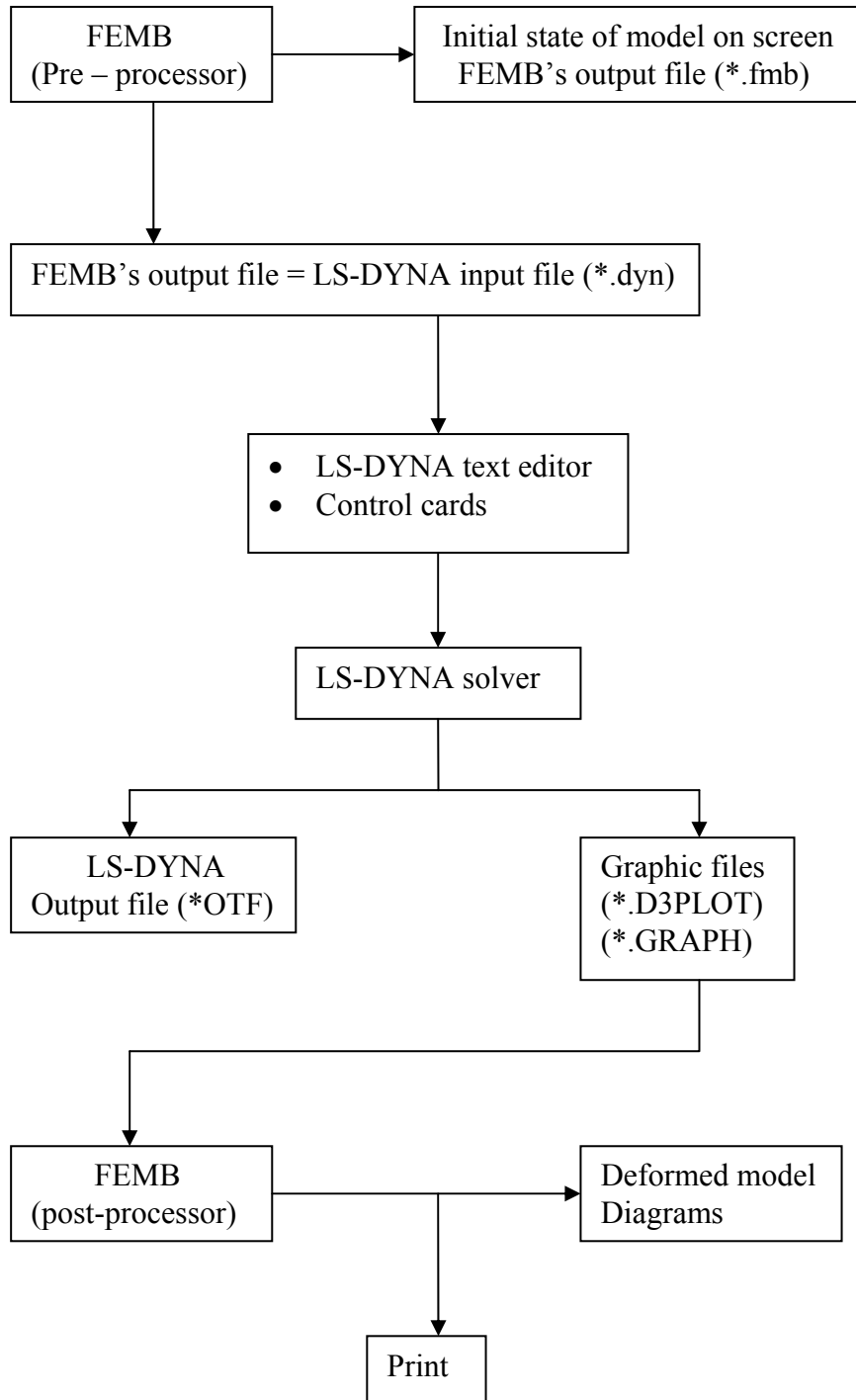
Κατά το παρελθόν, το στάδιο της σχεδίασης περιλάμβανε τη διαδικασία της κατασκευής πρωτοτύπων που στη συνέχεια δοκιμάζονταν. Αυτή η διαδικασία (trial & error) επαναλαμβανόταν έως ότου κατέληγαν σε ένα τελικό μοντέλο, και έπειτα ακολουθούσε η μαζική του παραγωγή. Με τη χρήση των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστικών συστημάτων και των προγραμμάτων προσομοίωσης, η σχεδίαση και η δοκιμή δεν απαιτούν την κατασκευή πολυάριθμων και υψηλού κόστους μήτρων και πρωτοτύπων, καθώς και τη χρήση ακριβών εργαλειομηχανών. Αυτό μειώνει σε μεγάλο βαθμό τόσο το συνολικό χρόνο όσο και το τελικό κόστος παραγωγής ενός προϊόντος, αυξάνοντας την ανταγωνιστικότητα και προωθώντας το εμπόριο.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων FEM (Finite Element Method) είναι σχετικά πρόσφατη και ιδιαίτερα δημοφιλής στη βιομηχανία. Χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων στη μηχανική, τη ρευστομηχανική, τη μετάδοση θερμότητας κ.α. Στηρίζεται στη δημιουργία πλέγματος στους όγκους του μοντέλου, αποτελούμενου από στοιχεία (elements) με κόμβους. Κάνοντας χρήση νόμων της μηχανικής όπως ισορροπία δυνάμεων, ροπών, διατήρησης μάζας, ορμής, ενέργειας, και λαμβάνοντας υπόψη τις οριακές συνθήκες του

συστήματος, επιλύει υπερστατικά συστήματα με αγνώστους τις μετατοπίσεις των κόμβων. Με γνωστές τις μετατοπίσεις υπολογίζονται στη συνέχεια όλα τα υπόλοιπα μεγέθη.

Σήμερα στο εμπόριο υπάρχουν πολλά προγράμματα που κάνουν χρήση της μεθόδου FEM. Ο κώδικας LS DYNA είναι της εταιρείας LIVINGMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION και είναι ένας κώδικας πεπερασμένων στοιχείων για επίλυση μη γραμμικών συστημάτων σε αναλύσεις τρισδιάστατων μοντέλων. Στα πρώτα χρόνια εξέλιξής του οι επιλογές στη δημιουργία μοντέλων ήταν περιορισμένες. Δεν ήταν δυνατή η χρήση πεπερασμένων στοιχείων με πολλούς κόμβους, ούτε ο ορισμός διεπιφανειών. Επίσης, απαιτούνταν χρόνος από τα υπολογιστικά συστήματα για να ολοκληρώσουν την ανάλυση και να καταλήξουν στη λύση. Στις μέρες μας ο κώδικας βρίσκεται στην έκδοση 9.71, προσφέροντας μεγάλη ποικιλία επιλογών στα υλικά, τη διακριτοποίηση, τις ιδιότητες, τη συμπεριφορά, την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Το γραφικό περιβάλλον, κάνοντας χρήση ισχυρών γραφικών καρτών, διευκολύνει το χρήστη αρχικά στη δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων, και στη συνέχεια στην εξέταση των αποτελεσμάτων μέσω γραφικής απεικόνισης αυτών. Οι ταχύτατοι νέοι υπολογιστές που είναι εξοπλισμένοι με πολλούς επεξεργαστές, σε συνεργασία με το σύγχρονο κώδικα του LS DYNA, οδηγούν σε γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα.

## 4.2 ΛΟΓΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ



### 4.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στην παράγραφο αυτή γίνεται αναφορά στη γεωμετρία του μοντέλου, καθώς και σε παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση. Πληροφορίες για τις παραμέτρους αυτές αντλήσαμε από μεγάλο αριθμό δημοσιεύσεων με ανάλογο θέμα. Παράλληλα με τις επιλογές που κάναμε για το δικό μας μοντέλο, αναφέρονται και άλλες επιλογές που συναντήθηκαν.

- Τα ράουλα είναι κυλινδρικά, απαραμόρφωτα (rigid) [4,19,20]. Η εξωτερική τους διάμετρος είναι 200 mm και έχουν πάχους 4 mm. Το πλάτος τους σε κάθε προσομοίωση σχεδιάζεται λίγο μεγαλύτερο από το πλάτος του ελάσματος, για να μειώσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο τον αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό δεν επηρεάζει τα αποτελέσματά μας γιατί στις προσομοιώσεις μας δεν έχουμε αδρανειακά φαινόμενα. Σε πολλά μοντέλα δημοσιεύσεων που έχουν σκοπό τη μελέτη της επίδρασης της παραμόρφωσης των ραούλων κατά την έλαση, τα ράουλα ήταν παραμορφώσιμα με απαραμόρφωτο πυρήνα για να μην μετατοπίζεται το κέντρο περιστροφής [2,9], καθώς και απαραμόρφωτα με παραβολικό προφίλ [6].
- Το μήκος των διμεταλλικών ελασμάτων είναι 70 mm. Το πλάτος και το πάχος τους μεταβάλλεται από πάσο σε πάσο. Οι διαστάσεις αυτές αναφέρονται στους συγκεντρωτικούς πίνακες της παραγράφου 5.3
- Η διακριτοποίηση στα ράουλα και στο έλασμα έγινε με εξαεδρικά, πεπερασμένα στοιχεία 8 κόμβων [11,17,18,20]. Αυτό το είδος στοιχείων είναι το πλέον σύνηθες στα μοντέλα προσομοίωσης της έλασης. Τα στοιχεία των ραούλων που βρίσκονται στην εξωτερική επιφάνεια έχουν το ίδιο μέγεθος με τα στοιχεία του ελάσματος. Αυτό

βελτιώνει την ακρίβεια υπολογισμού των δυνάμεων ανάμεσα σε ράουλο – έλασμα [2].

- Για τη διακριτοποίηση του ελάσματος χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία με ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Το είδος αυτό συνηθίζεται να χρησιμοποιείται [2,4,7,15,20]. Άλλα είδη που χρησιμοποιούνται είναι με visco-plastic και rigid-plastic συμπεριφορά [5],[6],[18].
- Στις επαφές ράουλο - έλασμα, ως κύρια επιφάνεια (master) έχει οριστεί το ράουλο που είναι απαραμόρφωτο, και δευτερεύουσα (slave) το έλασμα που είναι παραμορφώσιμο [2].
- Στην επαφή έλασμα αλουμινίου – έλασμα χαλκού ως κύρια επιφάνεια έχει οριστεί το αλουμίνιο.
- Στο πείραμα η ταχύτητα έλασης ήταν  $V = 0,0667 \text{ mm/msec}$  (γραμμική) ή  $V = 0,000667 \text{ rad/msec}$  (γωνιακή). Στην προσομοίωση όμως αυξήσαμε την ταχύτητα σε  $V = 0,4 \text{ mm/msec}$  (γραμμική) ή  $V = 0,004 \text{ rad/msec}$  (γωνιακή) για να μειώσουμε το χρόνο ανάλυσης. Η αύξηση της ταχύτητας σε προσομοιώσεις που δεν εμφανίζουν αδρανειακά φαινόμενα είναι συνήθης [2],[4].
- Για να φτάσει το έλασμα στο διάκενο των ραούλων και να ξεκινήσει η κατεργασία,δίνεται σε αυτήν μία αρχική ταχύτητα  $V_0 = 0,37 \text{ mm/msec}$ . Στη συνέχεια αναλαμβάνουν οι δυνάμεις τριβής την κίνησή της. Αυτή η ταχύτητα είναι λίγο πιο μικρή από την περιφερειακή ταχύτητα των ραούλων [4],[19].
- Σε κάθε προσομοίωση ο συντελεστής τριβής είναι σταθερός [5],[11],[12],[15],[16],[18].
- Οι τιμές των συντελεστών στατικής και δυναμικής τριβής που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο αναφέρονται στην παράγραφο 4.6.
- Οι τιμές των συντελεστών NFLS και SFSL, με τους οποίους ορίζουμε την αντοχή της ένωσης των δύο ελασμάτων σε ορθές και διατμητικές τάσεις αντίστοιχα, αναφέρονται στην παράγραφο 5.6 .

#### 4.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποτελεί η συμπεριφορά των υλικών σε αυτές, όπως αυτή περιγράφεται μέσα στο μοντέλο. Ακολουθούν οι τιμές που δόθηκαν για τις μηχανικές τους ιδιότητες των ραούλων:

##### Χάλυβας

πυκνότητα :	0,00783 gr/mm <sup>3</sup>
μέτρο ελαστικότητας E :	207000 MPa
λόγος Poisson :	0,30

Οι τιμές αυτές αποτελούν τυπικές επιλογές για το χάλυβα, υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα ράουλα.

Για τα ελάσματα χρησιμοποιήθηκε τύπος παραμορφώσιμων στοιχείων με γραμμική πλαστική συμπεριφορά (mat piecewise linear plasticity). Η επιλογή αυτή μας δίνει τη δυνατότητα να περιγράψουμε με ακρίβεια τη συμπεριφορά τους δίνοντας σημεία από την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης, και συγκεκριμένα από το κομμάτι της πλαστικής τους συμπεριφοράς. Τα σημεία αυτά δίνονται σε μορφή ζεύγους τιμών. Το πρώτο ζεύγος αναφέρει την τάση για μηδενική πλαστική παραμόρφωση, και ουσιαστικά έτσι ορίζουμε το όριο διαρροής για τα υλικά μας. Ακολουθούν οι μηχανικές ιδιότητες για το αλουμίνιο και το χαλκό :

##### Αλουμίνιο

πυκνότητα :	0,00268 gr/mm <sup>3</sup>
μέτρο ελαστικότητας E :	70000 MPa
λόγος Poisson :	0,30

## Χαλκός

πυκνότητα :	0,0089 gr/mm <sup>3</sup>
μέτρο ελαστικότητας E :	120000 MPa
λόγος Poisson :	0,30

Η προσπάθειά μας να περιγράψουμε τα δύο υλικά σε όλα τα διαδοχικά πάσα της έλασης, δίνοντας κάθε φορά ζεύγη τιμών από την πειραματική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (σχ. 5), μας οδήγησε σε αποτελέσματα που απόκλιναν από τα πειραματικά δεδομένα. Μάλιστα, αυτή η απόκλιση μεγάλωνε από τα πρώτα πάσα προς τα τελευταία. Ο κώδικας προσομοίωσης είχε την τάση να υποτιμά τα δύο μεγέθη που κυρίως μελετάμε, το φορτίο και τη ροπή έλασης. Αυτό γινόταν γιατί χρησιμοποιώντας συνεχώς την ίδια καμπύλη δεν λαμβάναμε υπόψη μας την πλαστική παραμόρφωση που είχε ήδη υποστεί το διμεταλλικό έλασμα στο προηγούμενο πάσο [12].

Έτσι λοιπόν, δημιουργήσαμε καινούριες καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης των υλικών για κάθε πάσο με την ακόλουθη διαδικασία :

- Στο πρώτο πάσο χρησιμοποιούμε την καμπύλη που μας έχει δοθεί.
- Στο επόμενο πάσο μετατοπίζουμε το τμήμα της καμπύλης της πλαστικής συμπεριφοράς του υλικού προς τα αριστερά, παράλληλα προς τον άξονα της πραγματικής παραμόρφωσης, τόσο όσο παραμορφώθηκε πλαστικά το έλασμα στο πάσο που προηγήθηκε.
- Προεκτείνουμε το ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης της ελαστικής παραμόρφωσης μέχρι να τέμνει την καμπύλη της πλαστικής παραμόρφωσης.
- Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το τελευταίο πάσο.

Στους παρακάτω πίνακες αναφέρονται τα ζεύγη τάσης – παραμόρφωσης των δύο υλικών, και για τις δύο σειρές έλασης, όπως τελικά προέκυψαν από τα νέα διαγράμματα και χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις μας.

		ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ					
		0.00	0.03	0.08	0.15	0.20	0.25
ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (N/mm <sup>2</sup> )	ΠΑΣΟ 1	270	315	325	335	340	345
	ΠΑΣΟ 2	335	340	345	350	355	360
	ΠΑΣΟ 3	340	345	350	355	360	365
	ΠΑΣΟ 4	350	355	360	365	370	375
	ΠΑΣΟ 5	355	360	365	370	375	380
	ΠΑΣΟ 6	360	365	370	375	380	385
	ΠΑΣΟ 7	365	370	375	380	385	390
	ΠΑΣΟ 8	370	375	380	385	390	395

Πίνακας τάσης – παραμόρφωσης αλουμινίου στην έλαση χωρίς λίπανση

		ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ					
		0.00	0.03	0.08	0.15	0.20	0.25
ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (N/mm <sup>2</sup> )	ΠΑΣΟ 1	125	200	250	285	310	325
	ΠΑΣΟ 2	280	295	310	335	345	350
	ΠΑΣΟ 3	305	315	330	345	355	365
	ΠΑΣΟ 4	340	345	355	365	375	380
	ΠΑΣΟ 5	355	362	367	375	387	393
	ΠΑΣΟ 6	365	370	380	390	395	400
	ΠΑΣΟ 7	380	385	390	400	405	410
	ΠΑΣΟ 8	410	415	420	430	435	440

Πίνακας τάσης – παραμόρφωσης χαλκού στην έλαση χωρίς λίπανση

		ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ					
		0.00	0.03	0.08	0.15	0.20	0.25
ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (N/mm <sup>2</sup> )	ΠΑΣΟ 1	270	315	325	335	340	345
	ΠΑΣΟ 2	330	335	340	350	355	360
	ΠΑΣΟ 3	340	345	350	355	360	365
	ΠΑΣΟ 4	355	360	365	370	375	380
	ΠΑΣΟ 5	360	365	370	375	380	385
	ΠΑΣΟ 6	365	370	375	380	385	390
	ΠΑΣΟ 7	370	375	380	385	390	395

Πίνακας τάσης – παραμόρφωσης αλουμινίου στην έλαση με λίπανση



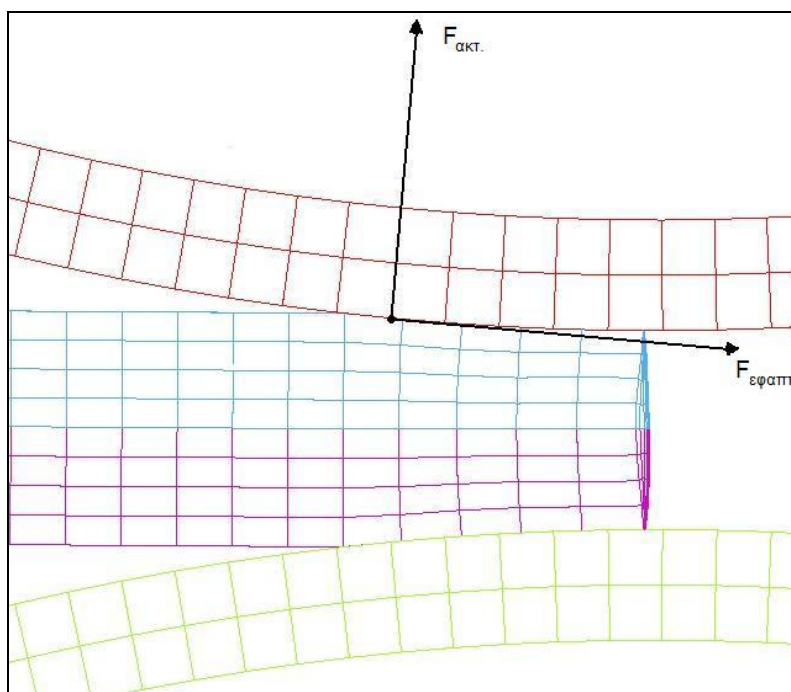
		ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ					
		0.00	0.03	0.08	0.15	0.20	0.25
ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (N/mm <sup>2</sup> )	ΠΑΣΟ 1	125	200	250	285	310	325
	ΠΑΣΟ 2	265	275	300	330	340	345
	ΠΑΣΟ 3	315	325	335	345	355	365
	ΠΑΣΟ 4	350	355	360	370	380	385
	ΠΑΣΟ 5	355	360	365	375	385	390
	ΠΑΣΟ 6	360	365	370	380	390	395
	ΠΑΣΟ 7	365	370	375	385	395	400

Πίνακας τάσης – παραμόρφωσης χαλκού στην έλαση με λίπανση

Οι πραγματικές τάσεις στην πρώτη στήλη των πινάκων αυτών, όπου η πραγματική παραμόρφωση είναι 0.00, είναι στην πραγματικότητα τα όρια διαρροής των υλικών.

#### 4.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΕΛΑΣΗΣ

Το φορτίο έλασης στις προσομοιώσεις μας θεωρήθηκε η κατακόρυφη δύναμη  $F_z$  που δέχεται το ράουλο από το διμεταλλικό έλασμα. Το μέγεθος αυτό προκύπτει άμεσα από τον κώδικα, ο οποίος μπορεί και εξάγει στο αρχείο RCFORC τις αξονικές δυνάμεις του μοντέλου σε κάθε κύκλο υπολογισμών. Η ροπή έλασης όμως, είναι ένα μέγεθος που δεν μπορεί ο κώδικας να υπολογίσει άμεσα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε μία έμμεση μέθοδος υπολογισμού. Στην άνω επαφή (ράουλο - έλασμα αλουμινίου), κάθε κόμβος του ραούλου που έρχεται σε επαφή με το έλασμα δέχεται από τους κόμβους του ελάσματος τις δυνάμεις  $F_{\text{εφαπτ.}}$  και  $F_{\text{ακτιν.}}$  κατά το τοπικό εφαπτομενικό και ακτινικό επίπεδο αντίστοιχα (σχ. 9).



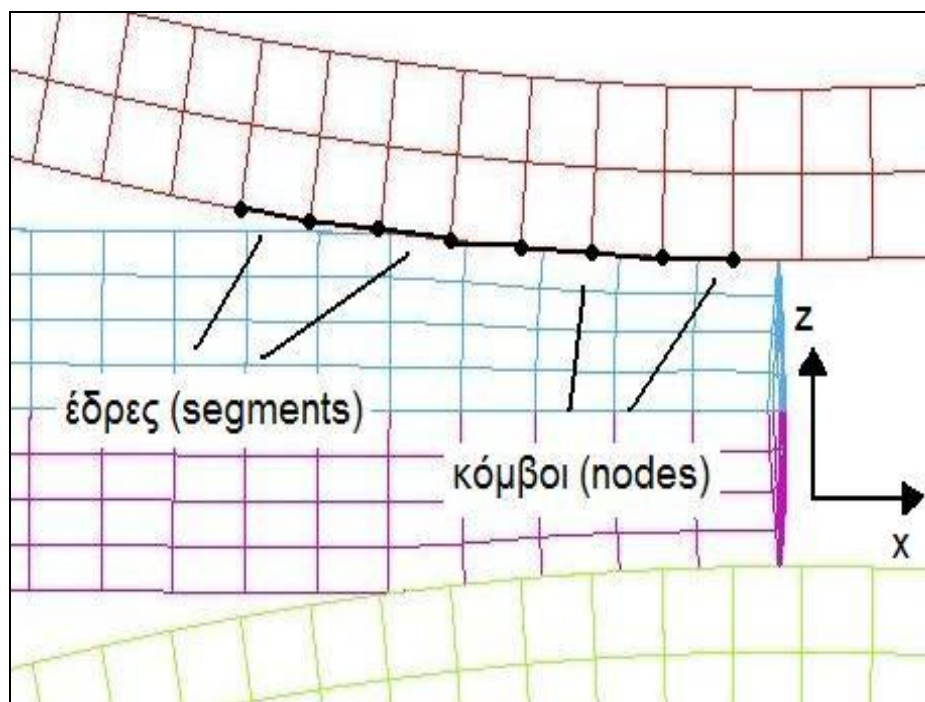
Σχ. 9: Οι δυνάμεις που δέχεται κόμβος του ραούλου σε ακτινικό και εφαπτομενικό επίπεδο

Η ροπή έλασης για το άνω ράουλο είναι το άθροισμα των ροπών όλων των κόμβων του ραούλου που βρίσκονται σε επαφή :

$$\text{Ροπή} = \sum R * F_{\text{εφαπτ.}}$$

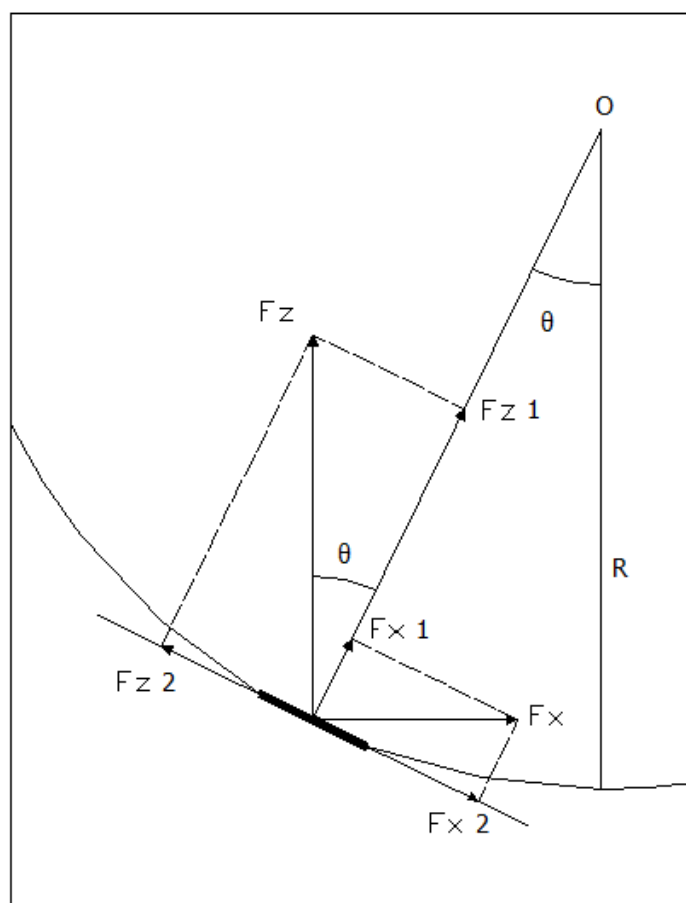
Όμως ο κώδικας δεν μπορεί να μας εξάγει τις τιμές των δυνάμεων ούτε στα επίπεδα αυτά (τα οποία συνεχώς μεταβάλλονται κατά την έλαση), αλλά ούτε σε κόμβους απαραμόρφωτων σωμάτων (ράουλο). Έτσι, αντί για κόμβους χρησιμοποιούμε στοιχειώδεις επιφάνειες (segments).

Λόγω της διακριτοποίησης, βλέποντας το μοντέλο από πλάγια όψη, παρατηρούμε ότι η εξωτερική επιφάνεια δεν είναι απόλυτα κυκλική, αλλά πολυγωνική. Αποτελείται δηλαδή από πολλά μικρά ευθύγραμμα τμήματα. Τα τμήματα αυτά είναι οι έδρες των στοιχείων του ραούλου (segments) που δημιουργούν την εξωτερική του επιφάνεια.



Σχ. 10: Τα segments και οι κόμβοι της εξωτερικής επιφάνειας του ραούλου

Πίσω από κάθε ευθύγραμμο τμήμα που βλέπουμε υπάρχουν 16 segments. Ορίζουμε σύνολο από λωρίδες, κάθε μία από τις οποίες έχει 16 τέτοια segments, και ζητάμε από τον κώδικα να μας υπολογίζει τη δύναμη κάθε λωρίδας σε κάθε κύκλο υπολογισμών (timestep). Επιπλέον, κατά το επίπεδο x-z, μία λωρίδα ορίζεται από 2 κόμβους. Γνωρίζοντας τις συντεταγμένες τους κατά x και z, μπορούμε να βρούμε τις συντεταγμένες του κέντρου της λωρίδας στο επίπεδο αυτό. Έτσι, έχοντας τις τιμές των δυνάμεων  $F_x$ ,  $F_z$  που δέχεται κάθε λωρίδα και θεωρώντας σημείο εφαρμογής τους το κέντρο της λωρίδας, μπορούμε να υπολογίσουμε τη ροπή. Στην εικόνα που ακολουθεί βλέπουμε την ανάλυση των δυνάμεων κατά το ακτινικό και το εφαπτομενικό επίπεδο.



Σχ. 11: Ανάλυση των δυνάμεων  $F_x$ ,  $F_z$  μιας λωρίδας σε ακτινικό και εφαπτομενικό επίπεδο

Οι συνισταμένες δυνάμεις στο ακτινικό και το εφαπτομενικό επίπεδο είναι :

$$\Sigma F_1 = F_{x_1} + F_{z_1} = F_x * \sin\theta + F_z * \cos\theta$$

και

$$\Sigma F_2 = F_{x_2} - F_{z_2} = F_x * \cos\theta - F_z * \sin\theta$$

Για να υπολογίσουμε τη ροπή έλασης στο άνω ράουλο, πρέπει να υπολογίσουμε τη ροπή σε κάθε λωρίδα που βρίσκεται σε επαφή, και να τις αθροίσουμε. Η ροπή στο άνω ράουλο είναι :

$$M_{\text{ανω}} = \sum R * \Sigma F_2$$

Κάνοντας την ίδια διαδικασία και στην κάτω επαφή ράουλο – έλασμα χαλκού, υπολογίζουμε τη ροπή έλασης στο κάτω ράουλο. Η συνολική ροπή έλασης είναι το άθροισμα των ροπών των δύο ραούλων [22] :

$$M_{\text{ελασης}} = M_{\text{ανω}} + M_{\text{κάτω}}$$

Η ροπή που υπολογίζουμε με αυτόν τον τρόπο είναι σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Επειδή η διαδικασία αυτή δε γίνεται αυτόματα από τον υπολογιστή και απαιτεί πολύ χρόνο, δεν κατέστη δυνατό να έχουμε διάγραμμα ροπής για όλη τη διάρκεια της κατεργασίας. Γι 'αυτό έγινε επιλογή μιας συγκεκριμένης χρονικής στιγμής περίπου στο μισό της διάρκειας της προσομοίωσης ( $t = 135 \text{ msec}$ ) όπου υπολογίζουμε τη ροπή.

#### 4.6 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Στα μοντέλα έλασης η περιγραφή της επαφής τριβής ανάμεσα στα ράουλα και το έλασμα είναι πολύ σημαντική. Η τριβή είναι το φαινόμενο που ευθύνεται για την πραγματοποίηση της κατεργασίας, και εκείνη ουσιαστικά επηρεάζει την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Ενώ σε 2D μοντέλα οι δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω επαφής περιορίζονται στο επίπεδο έλασης, σε 3D μοντέλα εμφανίζονται δυνάμεις και στο κάθετο επίπεδο πλάτους του ελάσματος, προκαλώντας την παραμόρφωσή του στη διεύθυνση αυτή. Γενικά, το φαινόμενο της τριβής στην έλαση, και ιδιαίτερα σε 3D περιβάλλον, εξακολουθεί να δυσκολεύει τους ερευνητές.

Για την περιγραφή της τριβής στη βιβλιογραφία συναντώνται πολλές θεωρίες. Δύο από αυτές, που φαίνεται να επικρατούν, είναι η θεωρία της τριβής ολίσθησης (frictional sliding) και η θεωρία της κολλώδους επαφής (sticking contact). Στην πρώτη περίπτωση, έχουμε ολίσθηση σε όλη την επαφή εκτός από το ουδέτερο επίπεδο, στο οποίο αλλάζει φορά η τριβή. Στη δεύτερη περίπτωση, παρατηρείται μία ενδιάμεση συμπεριφορά ανάμεσα στην ολίσθηση και τη μη-ολίσθηση [4]. Στις προσομοιώσεις έλασης, το πιο συχνά χρησιμοποιήσιμο μοντέλο τριβής είναι του Coulomb.

Στο δικό μας μοντέλο προσομοίωσης, όπως και σε πλήθος δημοσιεύσεων με μοντέλα έλασης, ο συντελεστής τριβής είναι σταθερός κατά τη διάρκεια της κατεργασίας [2],[4],[5],[7],[15]. Ο κώδικας του LS-DYNA μας δίνει τη δυνατότητα να δώσουμε τιμή στο στατικό και στο δυναμικό συντελεστή τριβής για κάθε επαφή. Στην προσπάθειά μας να προσομοιώσουμε τη διαδοχική έλαση ενός ελάσματος, έπρεπε να λάβουμε υπόψη μας τις αλλαγές της συμπεριφοράς του υλικού. Η μεταβολή του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης και η σταδιακή μείωση της τραχύτητας του ελάσματος επηρεάζει το συντελεστή τριβής. Έτσι, μειώσαμε την τιμή των συντελεστών τριβής στα δύο τελευταία

πάσα της έλασης χωρίς λίπανση και στα τρία τελευταία της έλασης με λίπανση. Στα πάσα αυτά πραγματοποιούνται μεγαλύτερες μειώσεις πάχους των ελασμάτων και οι δυνάμεις τριβής γίνονται πιο έντονες. Για να προσομοιώσουμε την έλαση με λίπανση χρησιμοποιήσαμε το ίδιο μοντέλο, μειώνοντας όμως τους συντελεστές τριβής. Στους ακόλουθους πίνακες αναφέρονται οι τιμές των συντελεστών τριβής που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.

		ΕΛΑΣΗ ΧΩΡΙΣ ΛΙΠΑΝΣΗ		
		ΕΠΑΦΗ	ΕΠΑΦΗ	ΕΠΑΦΗ
		ΡΑΟΥΛΟ - ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	ΡΑΟΥΛΟ - ΧΑΛΚΟΣ	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ - ΧΑΛΚΟΣ
ΠΑΣΟ 1 ΕΩΣ 6	FS	0,4	0,35	0,4
	FD	0,35	0,3	0,35
ΠΑΣΟ 7 ΕΩΣ 8	FS	0,2	0,175	0,185
	FD	0,18	0,15	0,16

Συντελεστές τριβής στην έλαση χωρίς λιπαντικό

		ΕΛΑΣΗ ΜΕ ΛΙΠΑΝΣΗ		
		ΕΠΑΦΗ	ΕΠΑΦΗ	ΕΠΑΦΗ
		ΡΑΟΥΛΟ - ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	ΡΑΟΥΛΟ - ΧΑΛΚΟΣ	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ - ΧΑΛΚΟΣ
ΠΑΣΟ 1 ΕΩΣ 4	FS	0,35	0,3	0,35
	FD	0,3	0,25	0,3
ΠΑΣΟ 5 ΕΩΣ 7	FS	0,175	0,15	0,175
	FD	0,15	0,125	0,15

Συντελεστές τριβής στην έλαση με λιπαντικό

## 4.7 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Η διαδικασία που ακολουθούμε σε κάθε προσομοίωση χωρίζεται στα τρία εξής στάδια :

- Σχεδίαση του μοντέλου και ορισμός των παραμέτρων του στον pre - processor
- Πραγματοποίηση της ανάλυσης από τον υπολογιστή (run analysis)
- Προβολή και επεξεργασία των αποτελεσμάτων στον post – processor

Στη συνέχεια ακολουθεί σύντομη περιγραφή του καθενός από τα στάδια αυτά, καθώς και δικαιολόγηση της επιλογής των παραμέτρων.

### 4.7.1 ΣΤΑΔΙΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ (PRE-PROCESSOR)

Στόχος μας είναι η κατασκευή ενός μοντέλου απλού αλλά πλήρη, με τέτοιο τρόπο ώστε να μην απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ για την επίλυσή του, περιέχοντας όμως όλα τα απαραίτητα στοιχεία που χρειάζονται για την προσομοίωση. Πριν αρχίσουμε την κατασκευή του πρέπει να ορίσουμε το σύστημα μονάδων που θα χρησιμοποιήσουμε.

#### Ορισμός συστήματος μονάδων

Πηγαίνοντας στην καρτέλα Analysis/ επιλέγουμε το ακόλουθο :

- Μονάδα μήκους το χιλιοστό (**mm**)
- Μονάδα μάζας το χιλιόγραμμα (**g**)
- Μονάδα χρόνου το χιλιοστό του δευτερολέπτου (**msec**)
- Μονάδα δύναμης το Newton (**N**)



Με βάση τις μονάδες αυτές προκύπτουν οι μονάδες και για τα υπόλοιπα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούμε στο μοντέλο μας :

- Μονάδα ταχύτητας (**mm/msec**)
- Μονάδα επιτάχυνσης (**mm/msec<sup>2</sup>**)
- Μονάδα πυκνότητας (**g/mm<sup>3</sup>**)
- Τάση (**MPa**)
- Γωνία (**rad**)
- Ενέργεια (**N\*mm**)

### Parts

Ορίζουμε τέσσερα ξεχωριστά κομμάτια (parts) :

- το άνω ράουλο,
- το κάτω ράουλο,
- το έλασμα από αλουμίνιο
- το έλασμα από χαλκό

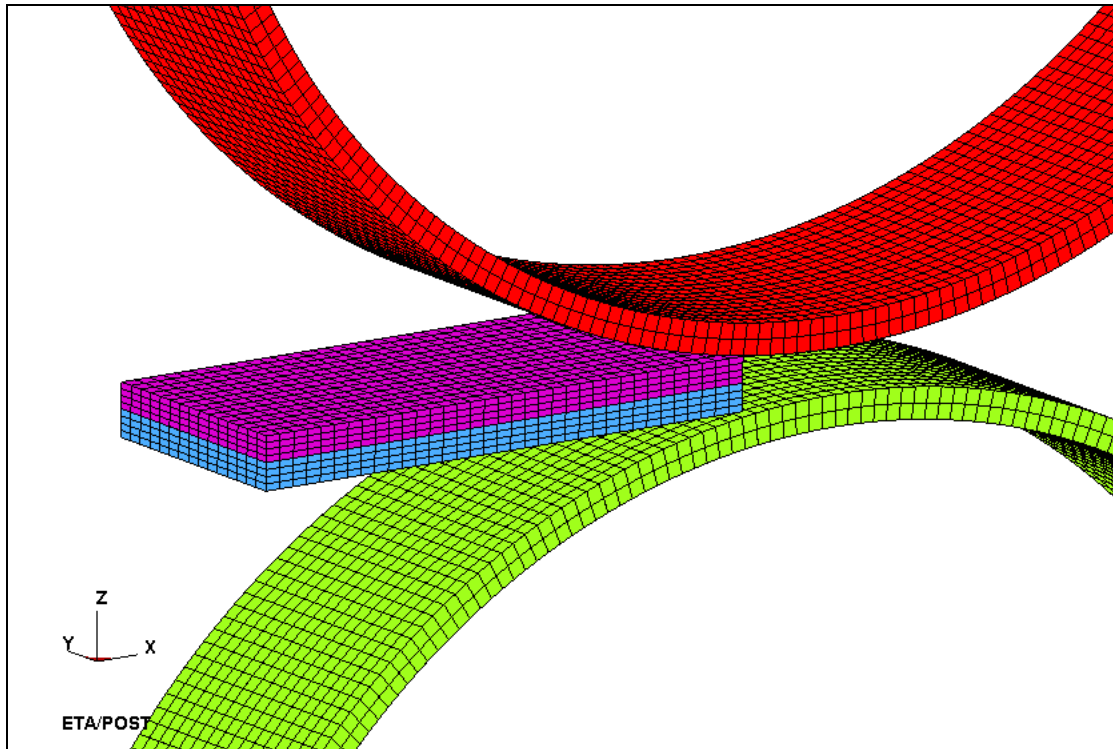
### Lines

Σχεδιάζουμε τα τέσσερα κομμάτια με γραμμές. Τα ράουλα δεν είναι συμπαγή αλλά κοίλα με πάχος στρώματος 4mm. Επειδή στο μοντέλο μας δε θέλουμε να λάβουμε υπόψη την παραμόρφωσή τους κατά την κατεργασία, τα θεωρούμε απαραμόρφωτα (rigid). Γι 'αυτό το λόγο αρκεί για την περιγραφή τους ένα λεπτό εξωτερικό στρώμα υλικού. Έτσι απαλλαγόμαστε από μεγάλο αριθμό στοιχείων (elements) στο εσωτερικό τους που θα απαιτούσαν χρόνο τόσο από εμάς στη σχεδίαση όσο και από τον επεξεργαστή κατά την επίλυση.

## Elements

Στο σημείο αυτό φτιάχνουμε το πλέγμα στα ελάσματα και στα ράουλα. Χρησιμοποιούμε τρισδιάστατο συμπαγές πλέγμα (plate / solid mesh) γιατί κάνουμε τρισδιάστατη ανάλυση. Στα δύο ελάσματα δημιουργούμε πλέγμα που να έχει στοιχεία με ίδιες διαστάσεις μήκους – πλάτους (2mm \* 2mm). Στη διάσταση του μήκους έχουμε 35 στοιχεία και στη διάσταση του πλάτους 15 στοιχεία. Επειδή μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα η συμπεριφορά του υλικού στη συμπίεση, στη διάσταση του πάχους βάζουμε 4 στοιχεία. Έτσι το κάθε έλασμα έχει  $35 * 15 * 4 = 2100$  στοιχεία.

Για ομοιομορφία των πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο και για καλύτερα αποτελέσματα, δημιουργούμε πλέγμα στα ράουλα τέτοιο ώστε οι πλευρές των στοιχείων που έρχονται σε επαφή με τα στοιχεία των ελασμάτων να έχουν ίδιες διαστάσεις μήκους – πλάτους (2mm \* 2mm). Αυξάνοντας την πυκνότητα του πλέγματος στα κομμάτια του μοντέλου επιτυγχάνουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματά μας. Παράλληλα όμως αυξάνεται και ο χρόνος που χρειάζεται ο κώδικας για να πραγματοποιήσει την προσομοίωση. Η πυκνότητα του πλέγματος σε ένα μοντέλο είναι επιλογή του προγραμματιστή, ανάλογα με το αν επιθυμεί μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων ή μικρότερο χρόνο προσομοίωσης. Στο σχ. 12 που ακολουθεί βλέπουμε πώς έχει διαμορφωθεί το πλέγμα σε όλα τα κομμάτια του μοντέλου.



Σχ. 12: Εικόνα του μοντέλου μετά τη διακριτοποίηση

### Set

Εδώ ορίζουμε το σύνολο των κόμβων της πλάκας αλουμινίου και της πλάκας χαλκού ως ενιαίο σύνολο (set/node/by parts), γιατί σε επόμενο βήμα θα δώσουμε στους κόμβους αυτούς μία αρχική ταχύτητα, ώστε το διμεταλλικό έλασμα να κινηθεί προς το διάκενο. Επίσης, ορίζουμε δύο διαφορετικά σύνολα στοιχειωδών επιφανειών (segments) που ανήκουν το ένα στην κάτω επιφάνεια της πλάκας αλουμινίου και το άλλο στην άνω επιφάνεια της πλάκας χαλκού αντίστοιχα (set/segment). Αυτά θα μας χρειαστούν στη συνέχεια για να ορίσουμε την επαφή ανάμεσα στις επιφάνειες αυτές. Τέλος, δημιουργούμε από segments λουρίδες στις επιφάνειες των ραούλων που έρχονται σε επαφή με τα ελάσματα κατά την κατεργασία, προκειμένου να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τη ροπή έλασης. Για το σκοπό αυτό χρειάζεται να δημιουργήσουμε και ένα σύνολο κόμβων που ανήκουν στα segments αυτά, ώστε να μπορούμε να

υπολογίσουμε τις συντεταγμένες των λουρίδων σε δεδομένη χρονική στιγμή της κατεργασίας. Ο τρόπος που γίνεται χρήση των λουρίδων και των κόμβων αυτών περιγράφηκε αναλυτικά στην παράγραφο υπολογισμού της ροπής 4.5.

### Nodes

Σε αυτήν την καρτέλα πραγματοποιούμε μια σειρά ελέγχων στο μοντέλο μας, για να αποφύγουμε λάθη που μπορεί να έχουμε κάνει κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του. Αρχικά, ελέγχουμε για κόμβους που έχουν την ίδια ταυτότητα (check duplicate id). Στη συνέχεια ελέγχουμε για κόμβους που συμπίπτουν (check coincident). Στο μοντέλο μας οι κόμβοι αυτοί δημιουργούνται στην κοινή επιφάνεια των δύο ελασμάτων κατά τη διαδικασία δημιουργίας πλέγματος σε αυτά. Τους κόμβους αυτούς πρέπει να τους συγχωνεύσουμε (merge & delete), ειδάλλως θα δημιουργηθεί πρόβλημα στην επαφή που θα ορίσουμε ανάμεσα στα δύο ελάσματα στη συνέχεια. Τέλος, ελέγχουμε για κόμβους που δεν ανήκουν σε κάποιο κομμάτι (node/delete unref). Οι κόμβοι αυτοί προκύπτουν συνήθως όταν σβήνουμε ατελώς κάποιο κομμάτι (part) στο οποίο έχουμε δημιουργήσει πλέγμα.

### Check

Στην καρτέλα αυτή κάνουμε έναν τελευταίο έλεγχο στο μοντέλο μας, κατά τον οποίο ελέγχεται η κατεύθυνση των συμπαγών πεπερασμένων στοιχείων (solid elements) που έχουμε δημιουργήσει.

## Materials

Σε αυτό το σημείο ορίζουμε τον τρόπο συμπεριφοράς των υλικών από τα οποία είναι φτιαγμένα τα διάφορα μέρη (parts). Για τα ελάσματα χαλκού και αλουμινίου επιλέγουμε mat piecewise linear plasticity. Η επιλογή αυτή μας δίνει τη δυνατότητα να περιγράψουμε με ακρίβεια τη συμπεριφορά τους δίνοντας σημεία από το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης ,και συγκεκριμένα από το κομμάτι της πλαστικής τους συμπεριφοράς. Παράλληλα, ορίζουμε την πυκνότητα, το μέτρο ελαστικότητας, το λόγο Poisson και το όριο διαρροής.

Για τα ράουλα, επειδή δε θέλουμε στο μοντέλο μας να παραμορφώνονται, επιλέγουμε mat rigid. Οι μηχανικές ιδιότητες που ορίζουμε εδώ είναι επίσης η πυκνότητα, το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson. Περισσότερες λεπτομέρειες για τον ορισμό της συμπεριφοράς των υλικών και τις τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων δίνονται στην παράγραφο 4.4.

Τέλος, πρέπει να ορίσουμε τους βαθμούς ελευθερίας των ραούλων. Έτσι, λοιπόν, δίνοντας στη μεταβλητή CON1 την τιμή 7 απαγορεύουμε τη μετατόπισή τους ως προς οποιαδήποτε διεύθυνση, ενώ δίνοντας στη μεταβλητή CON2 την τιμή 6 επιτρέπουμε την περιστροφή τους μόνο ως προς τον άξονα y.

## Properties

Εδώ επιλέγουμε τις ιδιότητες των στοιχείων (elements) που έχουμε ήδη δημιουργήσει. Στο βήμα αυτό ουσιαστικά δηλώνουμε στον κώδικα με ποια μέθοδο να υπολογίσει τις τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτά. Για τα ράουλα βάζουμε constant stress solid element και για το έλασμα fully integrated S/R solid.

## Contacts

Στο σημείο αυτό ορίζουμε τις επαφές ανάμεσα στα κομμάτια. Το μοντέλο έχει τις τρεις εξής επαφές:

- Έλασμα αλουμινίου – έλασμα χαλκού
- Άνω ράουλο – έλασμα αλουμινίου
- Κάτω ράουλο – έλασμα χαλκού

Η επαφή ανάμεσα στο έλασμα αλουμινίου και το έλασμα χαλκού ονομάζεται tiebreak surface to surface. Δηλώνουμε ποιο έλασμα είναι πρωτεύον (master) και ποιο δευτερεύον (slave) στην επαφή. Επίσης, δίνουμε τιμές στο στατικό και το δυναμικό συντελεστή τριβής, αφήνοντας όλες τις άλλες ρυθμίσεις με τις τιμές που έχει ορίσει το πρόγραμμα (default). Η ιδιαιτερότητα της επαφής αυτής όμως, είναι η δυνατότητα να ορίσουμε όριο αντοχής σε ορθές (NFLS) και διατμητικές (SFLS) τάσεις. Αν κατά την ανάλυση αναπτυχθεί σε ένα κόμβο της επαφής ορθή ή διατμητική τάση μεγαλύτερη από τα όρια αντοχής που έχουμε ορίσει, τότε η ένωση σπάει στο σημείο αυτό. Αυτή η αστοχία σε μεγαλύτερο αριθμό κόμβων της επαφής οδηγεί στην αποκόλληση των δύο ελασμάτων. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να μελετήσουμε το φαινόμενο της κροκοδειλίας

Οι επαφές που ορίζονται ανάμεσα στα ράουλα και τα ελάσματα ονομάζονται contact surface to surface. Ως πρωτεύον (master) δηλώνουμε το ράουλο και ως δευτερεύον (slave) τα ελάσματα αλουμινίου και χαλκού. Όταν έχουμε επαφή ανάμεσα σε ένα απαραμόρφωτο και ένα παραμορφώσιμο κομμάτι, δηλώνουμε πάντα ως πρωτεύον το απαραμόρφωτο. Στην συνέχεια δίνουμε τιμή στο στατικό

και δυναμικό συντελεστή τριβής, ενώ όλες τις άλλες παραμέτρους τις αφήνουμε με τις τιμές που έχει δώσει το πρόγραμμα.

### Dynamisc

Στην καρτέλα Dynamisc/load curve ορίζουμε με τη μορφή γραφικής παράστασης την ταχύτητα περιστροφής των ραούλων σε συνάρτηση με το χρόνο. Στην περίπτωση μας η ταχύτητα είναι σταθερή κατά την έλαση. Πηγαίνοντας έπειτα, στην καρτέλα Dynamisc/control ενεργοποιούμε τις επιλογές termination και timestep. Στην πρώτη επιλογή δηλώνουμε το χρόνο που θα διαρκέσει η ανάλυση, ενώ στη δεύτερη ρυθμίζουμε την παράμετρο DT2MS για το mass scaling. Περισσότερες πληροφορίες για το συντελεστή αυτό αναφέρονται στην παράγραφο 5.4.

Στην καρτέλα Dynamisc/database/ascii ενεργοποιούμε τα αρχεία τύπου ascii που επιθυμούμε να μας εξάγουν αποτελέσματα και ορίζουμε τη συχνότητα που το πρόγραμμα θα εξάγει τα αποτελέσματα αυτά. Εμείς ενεργοποιούμε τα αρχεία RCFORC, GLSTAT και NODOUT. Το αρχείο RCFORC μας δίνει τιμές των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα κομμάτια (parts) του μοντέλου μας κατά τους άξονες X,Ψ,Z. Το αρχείο GLSTAT μας δίνει τιμές για διάφορα είδη ενέργειας του μοντέλου. Το αρχείο NODOUT μας δίνει τις συντεταγμένες κόμβων που ανήκουν σε ομάδα που έχουμε ορίσει σε προηγούμενο στάδιο.

Τέλος, στην κάρτα Dynamisc/database/binary ενεργοποιούμε το αρχείο D3PLOT και ορίζουμε σε αυτό τη συχνότητα που το πρόγραμμα θα εξάγει αποτελέσματα σε αυτό. Το αρχείο αυτό περιέχει στιγμιότυπα της κατεργασίας που προσομοιώνεται, και το βλέπουμε με τον post-processor του προγράμματος. Όσο περισσότερα στιγμιότυπα περιέχει το D3PLOT τόσο καλύτερη εικόνα μπορούμε να έχουμε για την κατεργασία και τις παραμορφώσεις που γίνονται κατά τη διάρκεια αυτής. Ακολουθούν οι τιμές που δώσαμε στις παραμέτρους αυτές :

TERMINATION TIME :	250 msec
ANGULAR VELOCITY :	0,004 rad/msec
TIMESTEP DT2MS :	0,006
RCFORC :	1.0 msec
GLSTAT :	1.0 msec
NODOUT :	1.0 msec
D3PLOT :	5.0 msec

### Bc

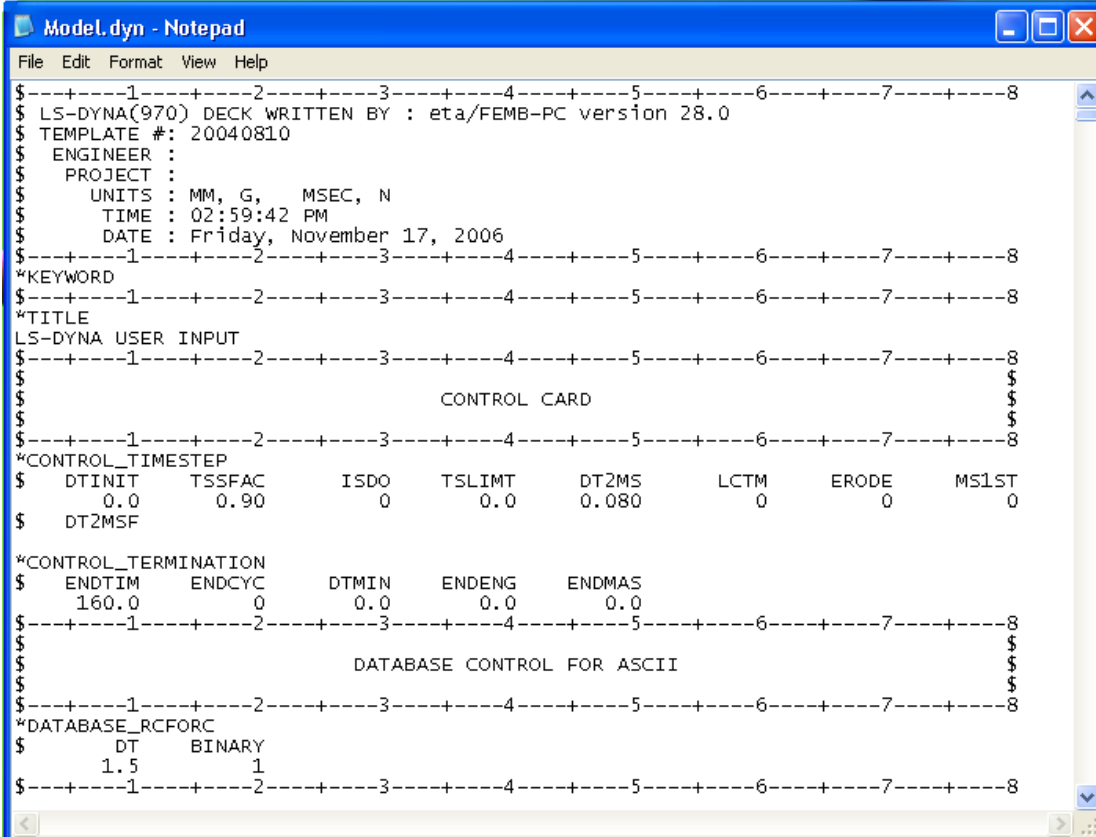
Το διμεταλλικό έλασμα για να εισέλθει στο διάκενο των ραούλων και να ξεκινήσει η έλαση, χρειάζεται να έχει μία αρχική ταχύτητα. Αυτή η δυνατότητα μας δίνεται μέσα από το μενού Bc/initial condition/velocity. Εκεί μας ζητείται μία ομάδα κόμβων που έχουμε ήδη ορίσει στην καρτέλα set/nodes/by parts. Το set αυτό θα πρέπει να περιέχει όλους τους κόμβους του διμεταλλικού ελάσματος, δηλαδή και του ελάσματος αλουμινίου και του χαλκού. Η αρχική γραμμική ταχύτητα εισόδου του διμεταλλικού ελάσματος που εμείς ορίσαμε είναι  $V_{in} = 0,37 \text{ mm/msec}$ .

Στην καρτέλα Bc/boundary/prescribed motion, που είναι και η τελευταία, προσδίδουμε την ταχύτητα στα ράουλα που ορίσαμε πρωτύτερα με τη μορφή γραφικής παράστασης. Επιπλέον, ορίζουμε το βαθμό ελευθερίας τους και τη φορά περιστροφής τους.



## 4.7.2 ΑΝΑΛΥΣΗ (ANALYSIS)

Το αρχείο που δημιουργείται από τον pre-processor κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού που προηγήθηκε παραπάνω είναι του τύπου \*.fmb. Το πρόγραμμα μπορεί να αποθηκεύσει όλες αυτές τις πληροφορίες και σε μία εναλλακτική μορφή του τύπου \*.dyn κάνοντας file/export αντί για file/save. Ο τύπος αυτός αρχείου είναι, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, ένα είδος κωδικοποιημένου κειμένου που μπορεί να αναγνωστεί με τον επεξεργαστή κειμένου NOTEPAD του λειτουργικού συστήματος. Αυτή η απλοϊκή μορφή δίνει την ευχέρεια σε έναν έμπειρο χρήστη να ελέγξει γρήγορα το μοντέλο του για σφάλματα ή να πραγματοποιήσει αλλαγές σε κάθε παράμετρο που είχε ορίσει κατά τη διάρκεια της σχεδίασης.



```
Model.dyn - Notepad
File Edit Format View Help
$-----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, G, MSEC, N
$ TIME : 02:59:42 PM
$ DATE : Friday, November 17, 2006
$-----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_TIMESTEP
$ DTINIT TSSFAC ISDO TSLIMIT DT2MS LCTM ERODE MS1ST
$ 0.0 0.90 0 0.0 0.080 0 0 0
$ DT2MSF
*CONTROL_TERMINATION
$ ENDTIM ENDCYC DTMIN ENDENG ENDMAS
$ 160.0 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
$ 1.5 1
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
```

Σχ. 13: Το αρχείο \*.dyn

Η ανάλυση πραγματοποιείται από τον SOLVER του προγράμματος, ο οποίος μας ζητά ένα αρχείο εισαγωγής (input file) της μορφής \*.dyn για να διαβάσει τα δεδομένα του μοντέλου. Δίνοντας την εντολή RUN ο SOLVER ξεκινά την ανάλυση και κάνει έλεγχο στα δεδομένα για τυχόν σφάλματα. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το παράθυρο ανάλυσης καθώς ξεκινά η διαδικασία. Αφού διαβάσει τα δεδομένα εισαγωγής κάνει κάποιους πρώτους υπολογισμούς, ανάμεσα στους οποίους και μια πρόβλεψη για το χρόνο που θα απαιτηθεί για να ολοκληρωθεί η ανάλυση.

```

C:\ I=C:\LSDYNA~1\Model.dyn O=C:\LSDYNA~1\d3hsp
The LS-DYNA time step size should not exceed 0.236E-03
to avoid contact instabilities. If the step size is
bigger then scale the penalty of the offending surface.

Memory required to begin solution      :      9378597
Additional dynamically allocated memory:      268286
Total:                                9646883

initialization completed

calculation with mass scaling:
scaled mass = 1.1074E+07
physical mass = 1.0333E+02
ratio = 1.0717E+05

dt of cycle      1 is controlled by solid      element      63646

time..... 0.00000E+00
time step..... 8.00000E-02
kinetic energy..... 1.29158E+01
internal energy..... 1.00000E-20
spring and damper energy..... 1.00000E-20
system damping energy..... 0.00000E+00
sliding interface energy..... 0.00000E+00
external work..... 0.00000E+00
eroded kinetic energy..... 0.00000E+00
eroded internal energy..... 0.00000E+00
total energy..... 1.29158E+01
total energy / initial energy.. 1.00000E+00
energy ratio w/o eroded energy.. 1.00000E+00
global x velocity..... 1.30421E-02
global y velocity..... 0.00000E+00
global z velocity..... 0.00000E+00

number of shell elements that
reached the minimum time step.. 0
cpu time per zone cycle..... 15576 nanoseconds
average cpu time per zone cycle... 15576 nanoseconds
average clock time per zone cycle.. 5763 nanoseconds

estimated total cpu time      =      2001 sec (      0 hrs 33 mins)
estimated cpu time to complete =      2000 sec (      0 hrs 33 mins)
estimated total clock time    =       740 sec (      0 hrs 12 mins)
estimated clock time to complete =       740 sec (      0 hrs 12 mins)
  1 t 0.00000E+00 dt 8.00E-02 flush i/o buffers
  1 t 0.00000E+00 dt 8.00E-02 write d3plot file
  51 t 4.00000E+00 dt 8.00E-02 write d3plot file
 101 t 8.00000E+00 dt 8.00E-02 write d3plot file
 150 t 1.1920E+01 dt 8.00E-02 write d3plot file

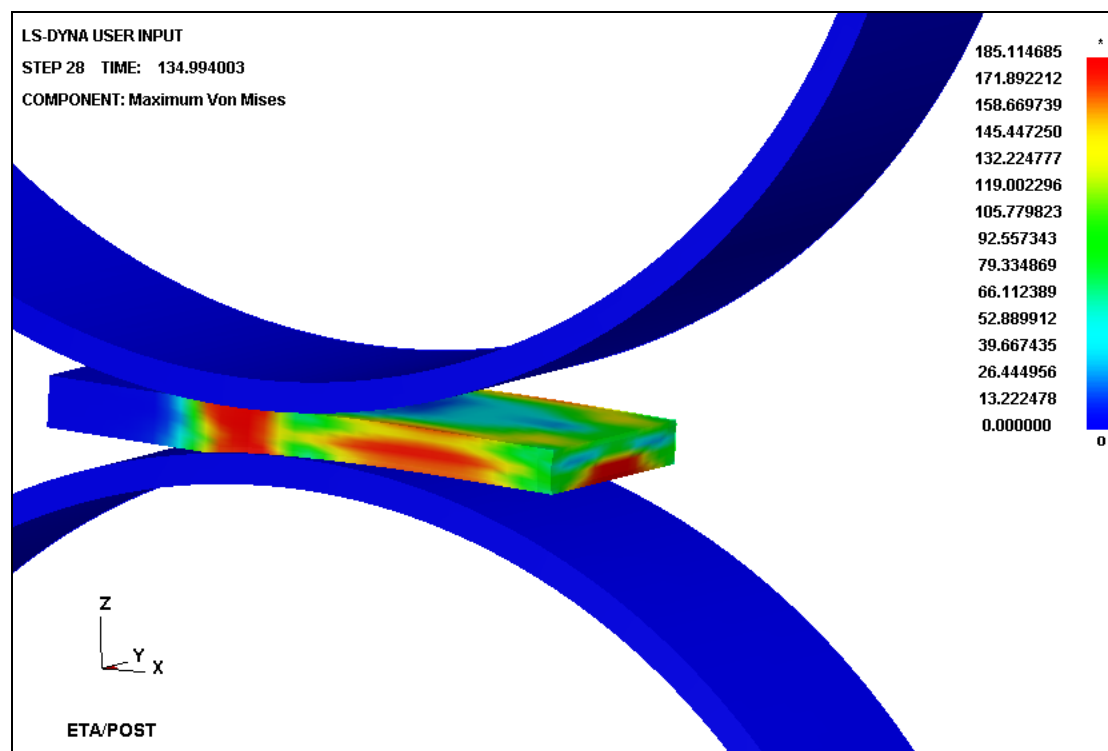
```

Σχ. 14: Το παράθυρο που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της ανάλυσης

Στην ολοκλήρωση της ανάλυσης θα έχουν δημιουργηθεί από το πρόγραμμα ένα σύνολο αρχείων, ανάμεσα στα οποία θα είναι το D3PLOT, το RCFORC, το GLSTAT και το NODOUT.

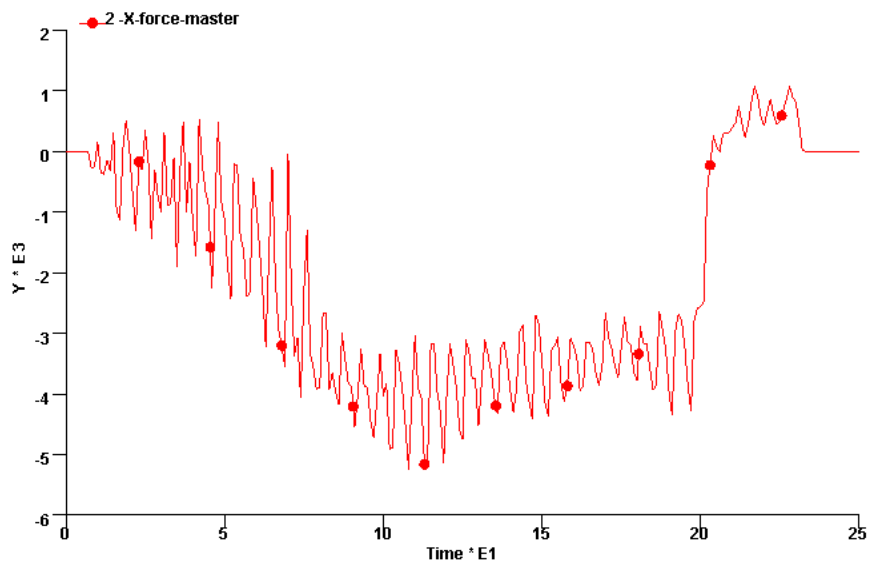
#### 4.7.3 ΣΤΑΔΙΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (POST-PROCESSOR)

Το αρχείο D3PLOT ανοίγει με τον post-processor και αποτελεί την οπτική προσομοίωση της κατεργασίας. Με αυτό έχουμε τη δυνατότητα να εξετάσουμε οπτικά σε κάθε στιγμιότυπο το μοντέλο μας, να δούμε την παραμόρφωσή του, να επιλέξουμε την χρωματική απεικόνιση των τάσεων και να κρίνουμε κατά πόσο είμαστε ικανοποιημένοι από το μοντέλο μας. Ακολουθεί εικόνα που δείχνει το μοντέλο σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή με χρωματική απεικόνιση τάσεων κατά VON MISES. Το υπόμνημα των τάσεων βρίσκεται στην πάνω δεξιά γωνία.

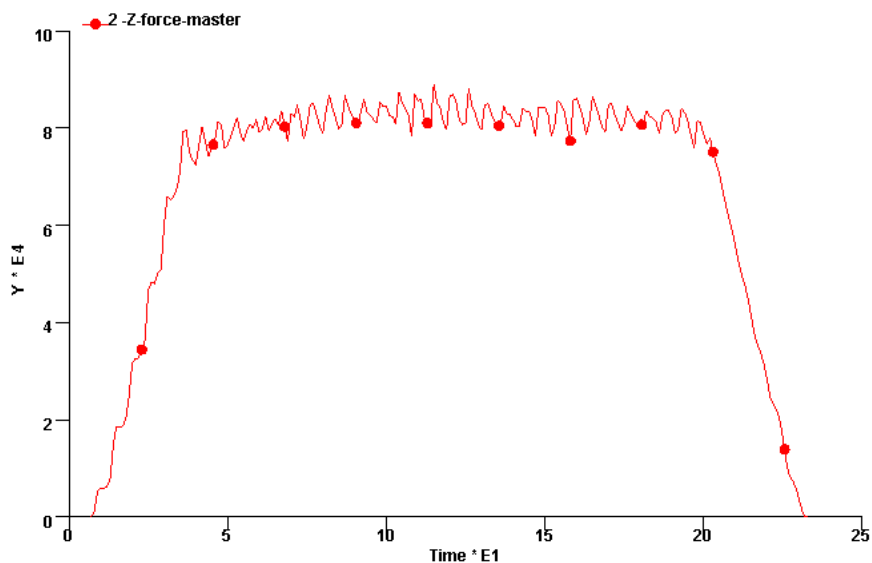


Σχ. 15: Απεικόνιση των τάσεων κατά Von Mises

Ο post - processor επιπλέον, μας δίνει τη δυνατότητα να δούμε με τη μορφή γραφικής παράστασης τα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα στα αρχεία RCFORC και GLSTAT. Από το αρχείο RCFORC μπορούμε να δούμε τη μεταβολή των αξονικών δυνάμεων ως προς το χρόνο. Ακολουθούν δύο γραφήματα της συνολικής δύναμης κατά τον άξονα X και κατά τον άξονα Z αντίστοιχα.

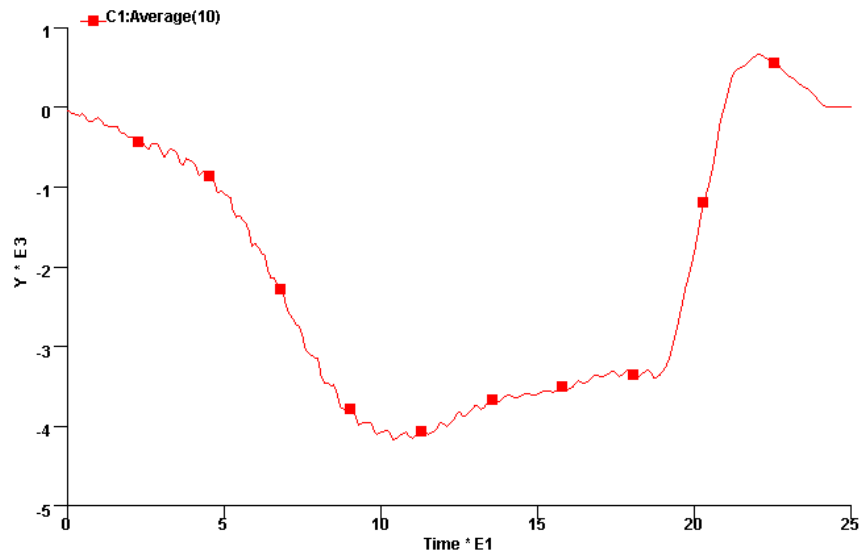


Σχ. 16: Καμπύλη δύναμης Fx ως προς το χρόνο

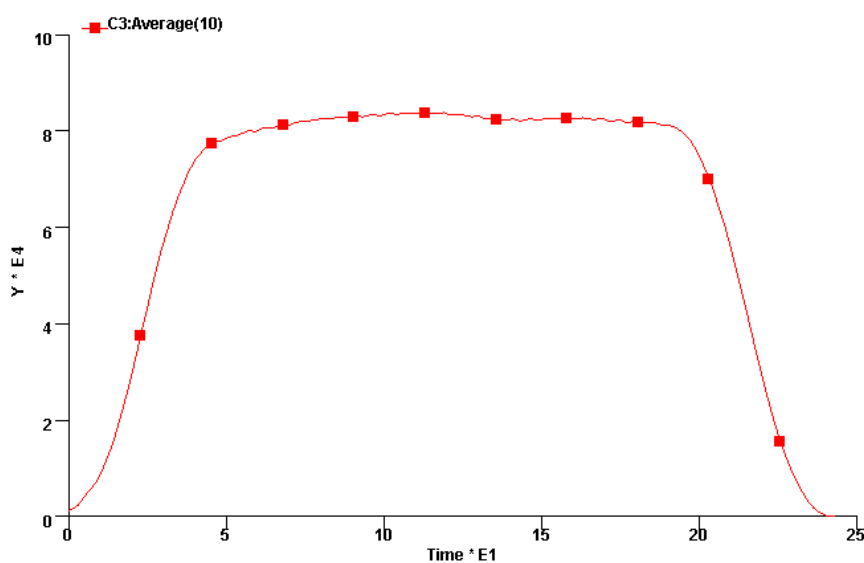


Σχ. 17: Καμπύλη Fz ως προς το χρόνο

Λόγω της διακριτοποίησης η επιφάνεια των ραούλων δεν είναι απόλυτα κυλινδρική, αλλά πολυγωνική. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η γραφική παράσταση να έχει πριονωτή μορφή (fluctuation). Κάνοντας τη χρήση φίλτρου που μας δίδεται ως εργαλείο, μπορούμε να επιτύχουμε εξομάλυνση αυτών. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα παρακάτω.



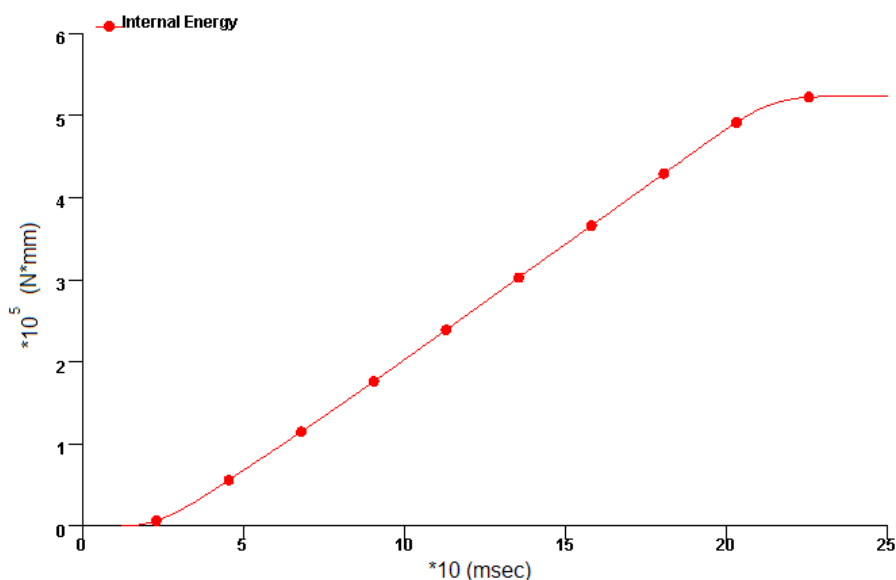
Σχ. 18: Καμπύλη δύναμης  $F_x$  ως προς το χρόνο, με χρήση φίλτρου



Σχ. 19: Καμπύλη δύναμης  $F_z$  ως προς το χρόνο, με χρήση φίλτρου

Παρατηρώντας το γράφημα παραπάνω, βλέπουμε να αποτελείται από τρία τμήματα. Στο πρώτο και τρίτο τμήμα η δύναμη  $F_z$  αυξάνεται και μειώνεται αντίστοιχα, σχεδόν γραμμικά. Στο δεύτερο τμήμα η δύναμη  $F_z$  βρίσκεται σε ένα όριο τιμής, παρουσιάζοντας μικρές διακυμάνσεις γύρω από αυτό. Το γράφημα του φορτίου έχει τη σωστή μορφή, συγκρινόμενο με γραφήματα από δημοσιεύσεις [21].

Το αρχείο GLSTAT περιέχει χρήσιμες πληροφορίες για την ενέργεια του μοντέλου μας. Το γράφημα που ακολουθεί δείχνει την εσωτερική ενέργεια σε συνάρτηση με το χρόνο.



Σχ. 20: Καμπύλη της εσωτερικής ενέργειας ως προς το χρόνο

Οι προσομοιώσεις έγιναν σε υπολογιστή του τομέα κατεργασιών του Ε.Μ.Π. με τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά :

Επεξεργαστής INTEL PENTIUM 4 2.8 GHz

Μνήμη 512 MB RAM

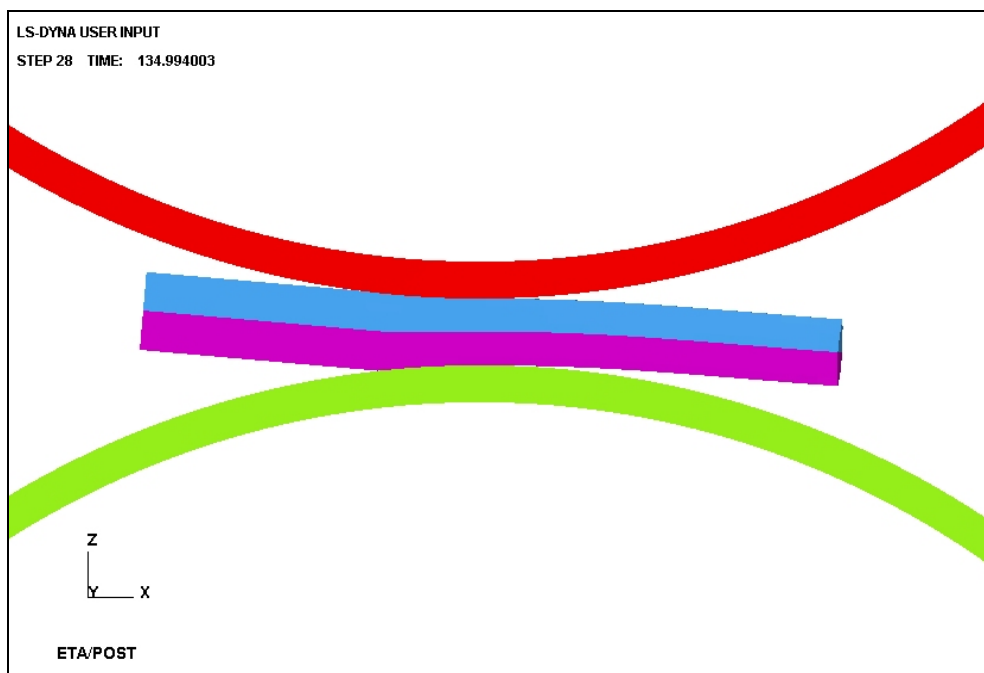
Λειτουργικό σύστημα WINDOWS XP PROFESSIONAL + SP1

Η διάρκεια των προσομοιώσεων κυμαινόταν από 1,5 έως 2 ώρες.

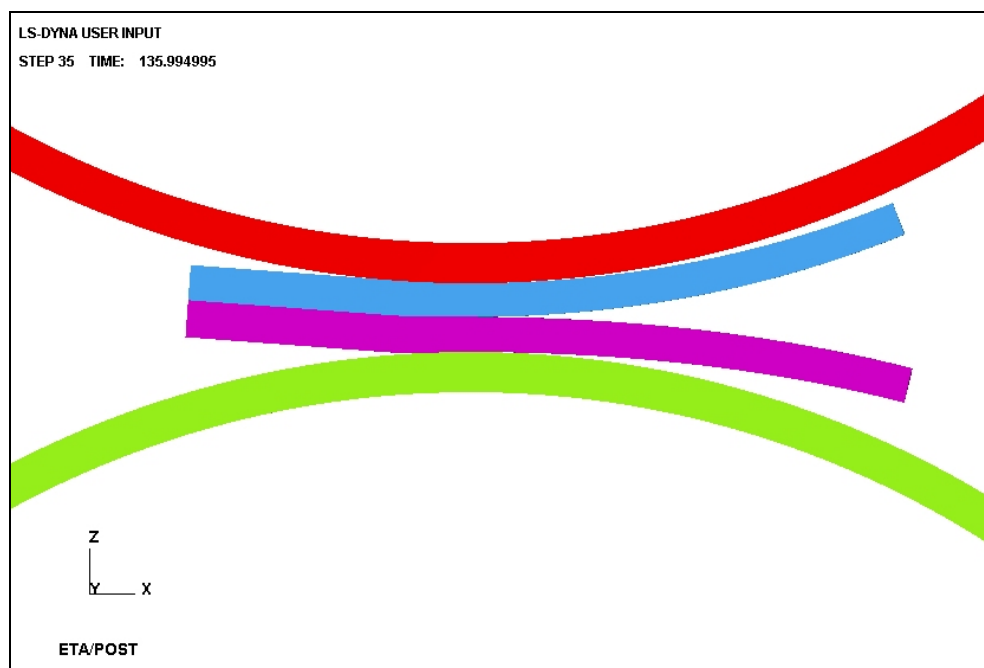
## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΛΑΣΗΣ

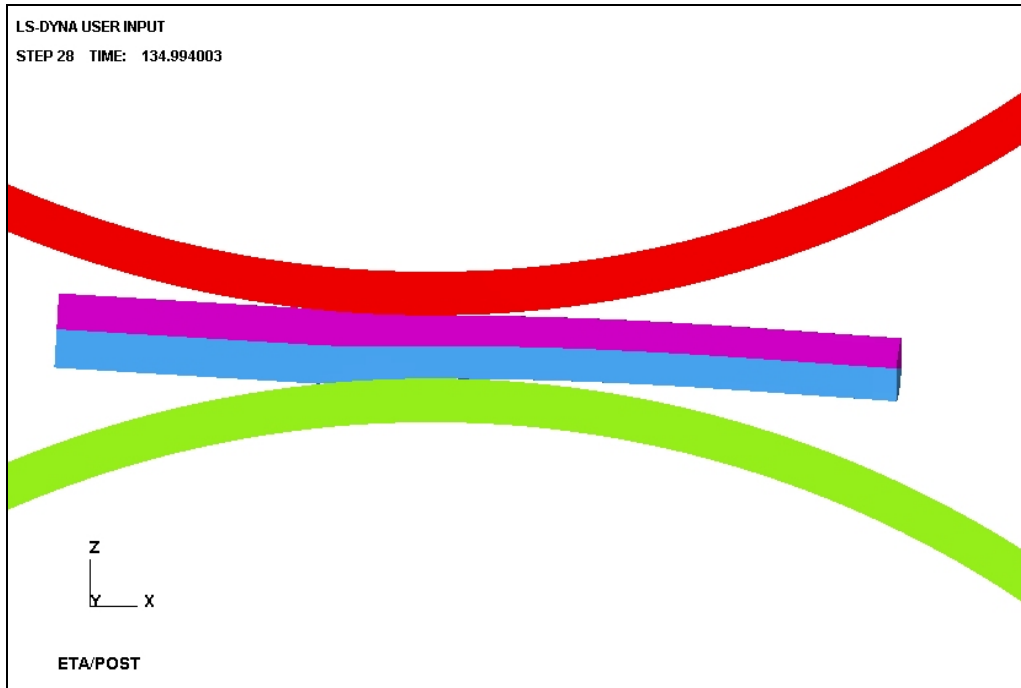
#### 5.1.1 ΧΩΡΙΣ ΛΙΠΑΝΣΗ



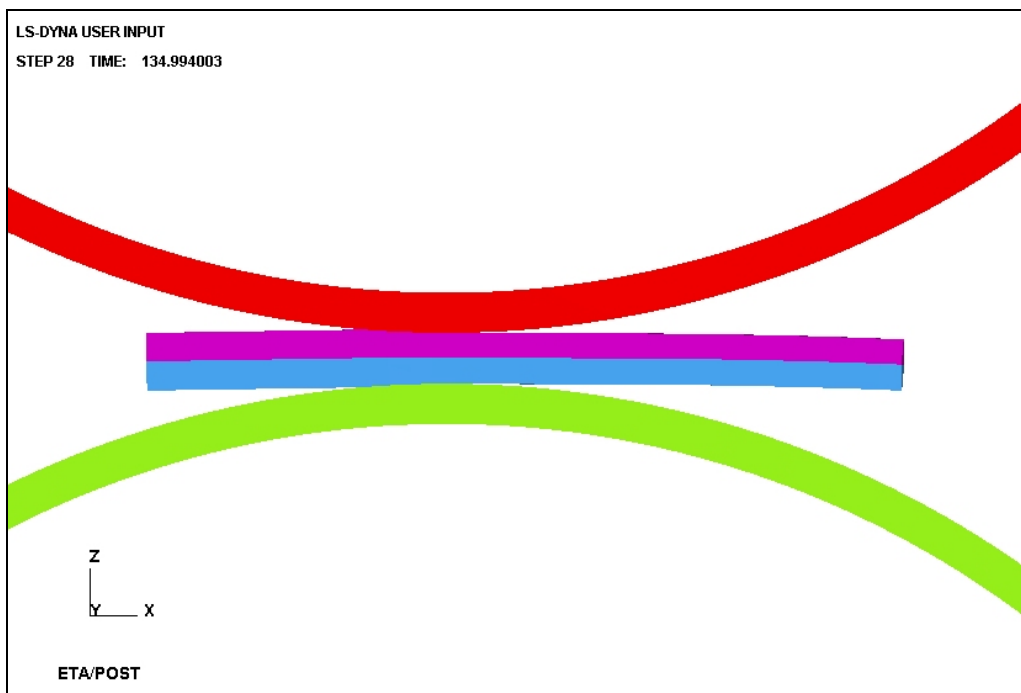
Σχ. 21: Πάσο 1



Σχ. 22: Πάσο 2

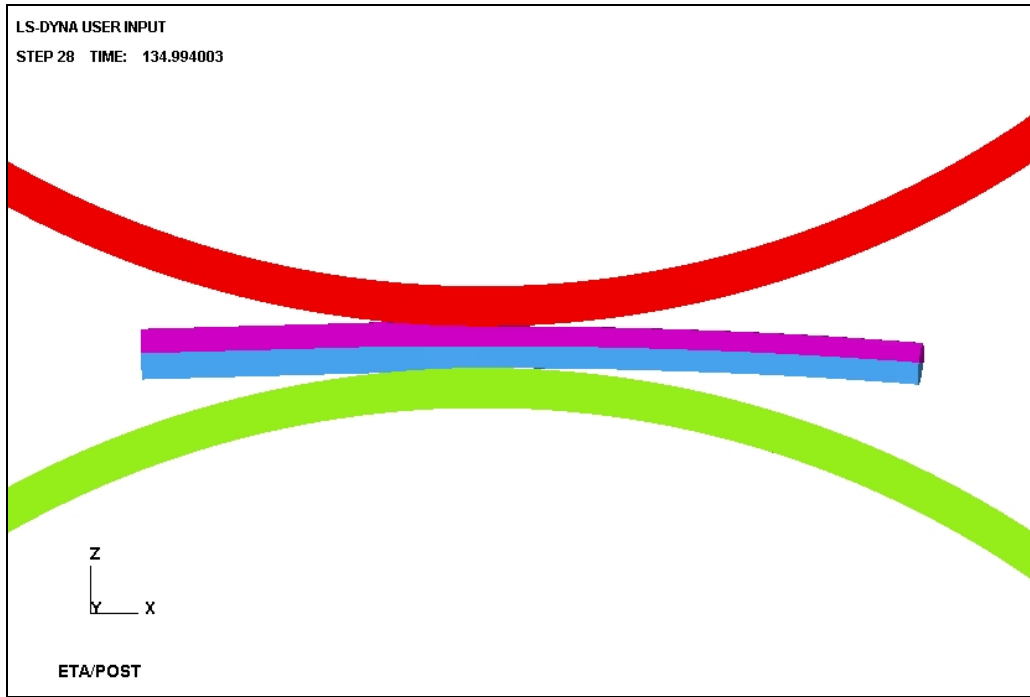


Σχ. 23: Πάσο 3

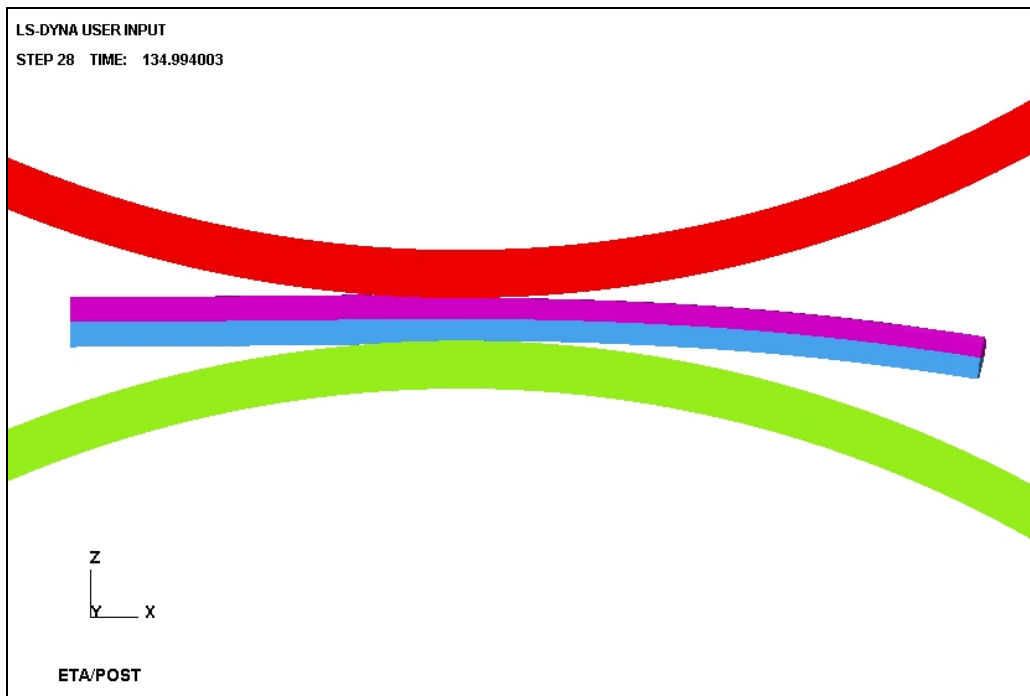


Σχ. 24: Πάσο 4

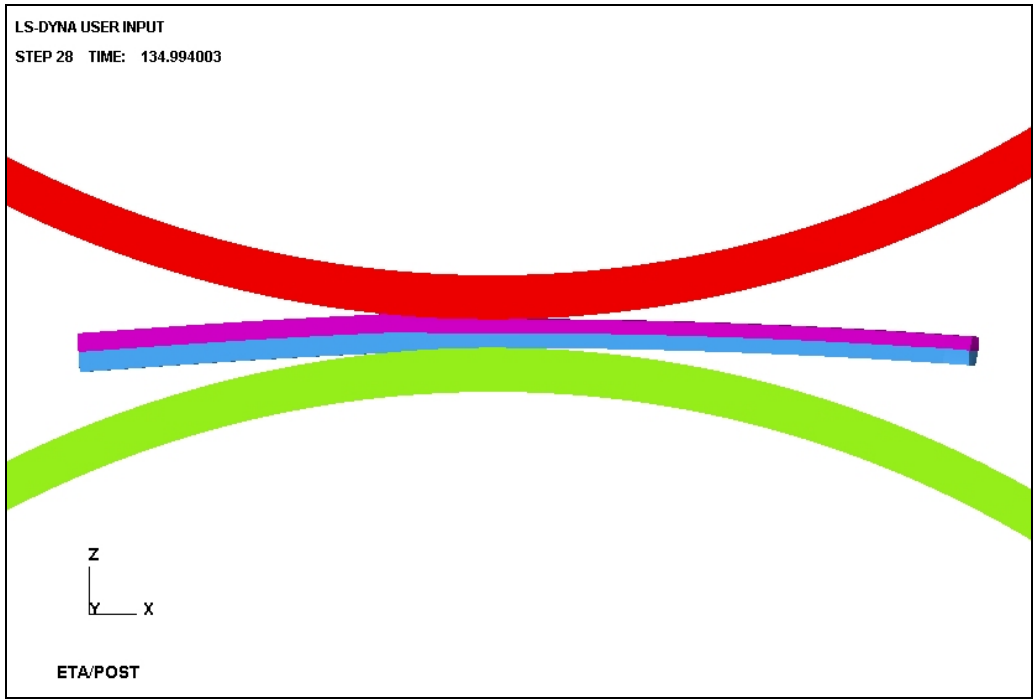




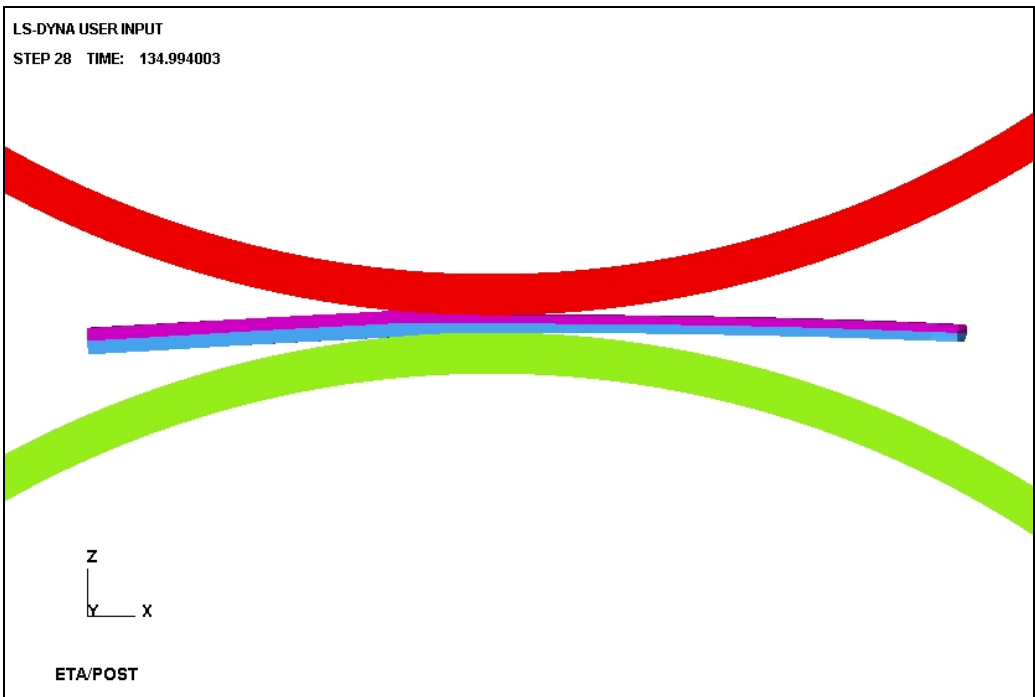
Σχ. 25: Πάσο 5



Σχ. 26: Πάσο 6

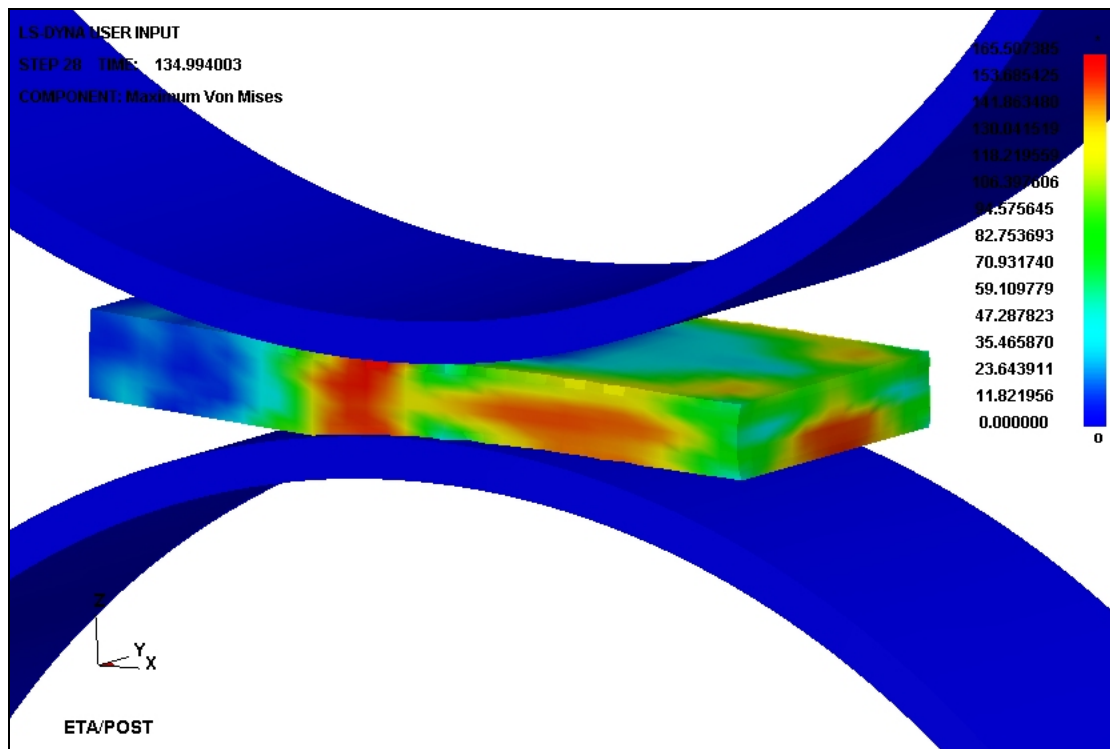


Σχ. 27: Πάσο 7



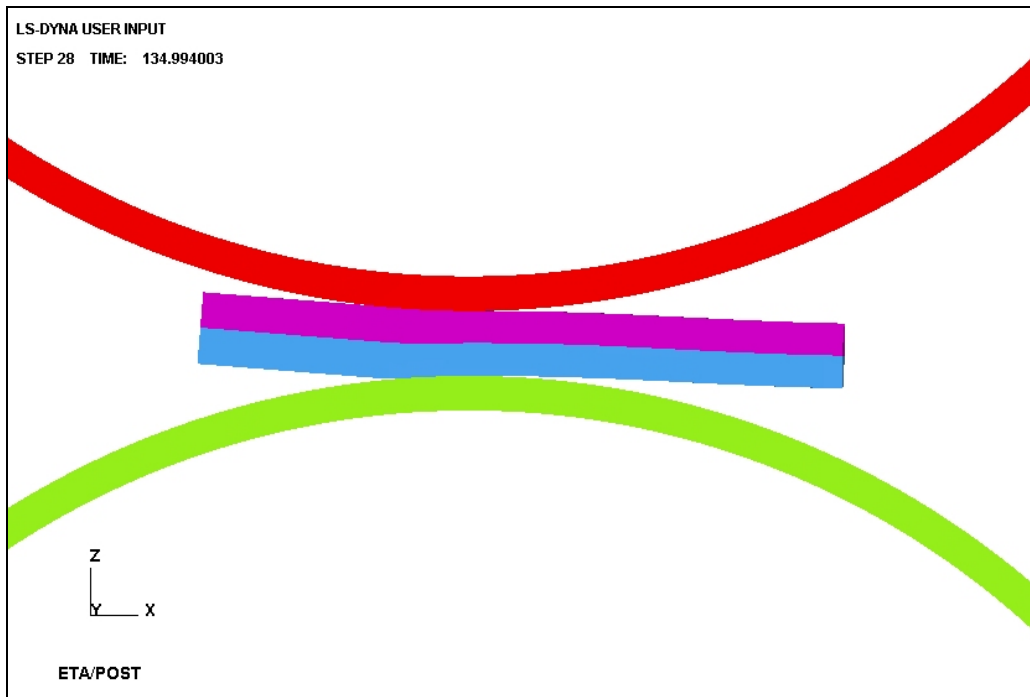
Σχ. 28: Πάσο 8

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η τρισδιάστατη απεικόνιση κατά Von Mises της έλασης στο πρώτο πάσο. Παρατηρούμε την περιοχή με το έντονο πορτοκαλί και κόκκινο χρώμα ανάμεσα στα ράουλα. Στο σημείο αυτό πραγματοποιείται η πλαστική παραμόρφωση του ελάσματος, και σύμφωνα με το χρωματικό υπόμνημα τάσεων, εκεί αναπτύσσονται και οι μεγαλύτερες τάσεις. Επιπλέον, βλέπουμε ότι στην έξοδο του ελάσματος παραμένουν τάσεις λόγω της παραμόρφωσής του. Τα ράουλα δεν παρουσιάζουν τάσεις γιατί τα έχουμε θεωρήσει απαραμόρφωτα.

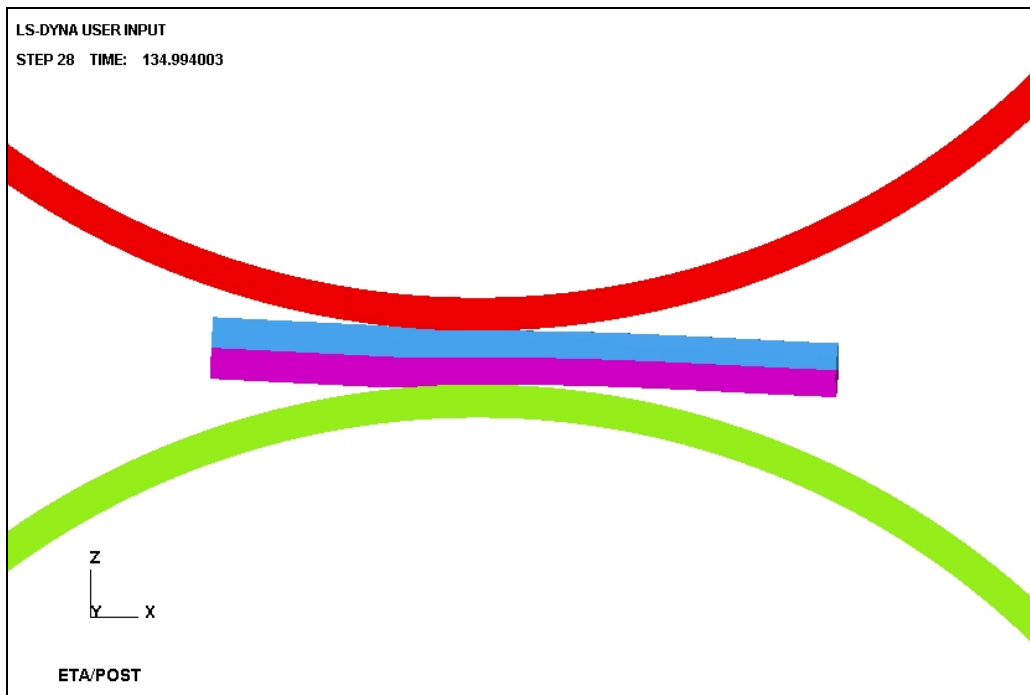


Σχ. 29: Στιγμιότυπο της έλασης κατά το πρώτο πάσο

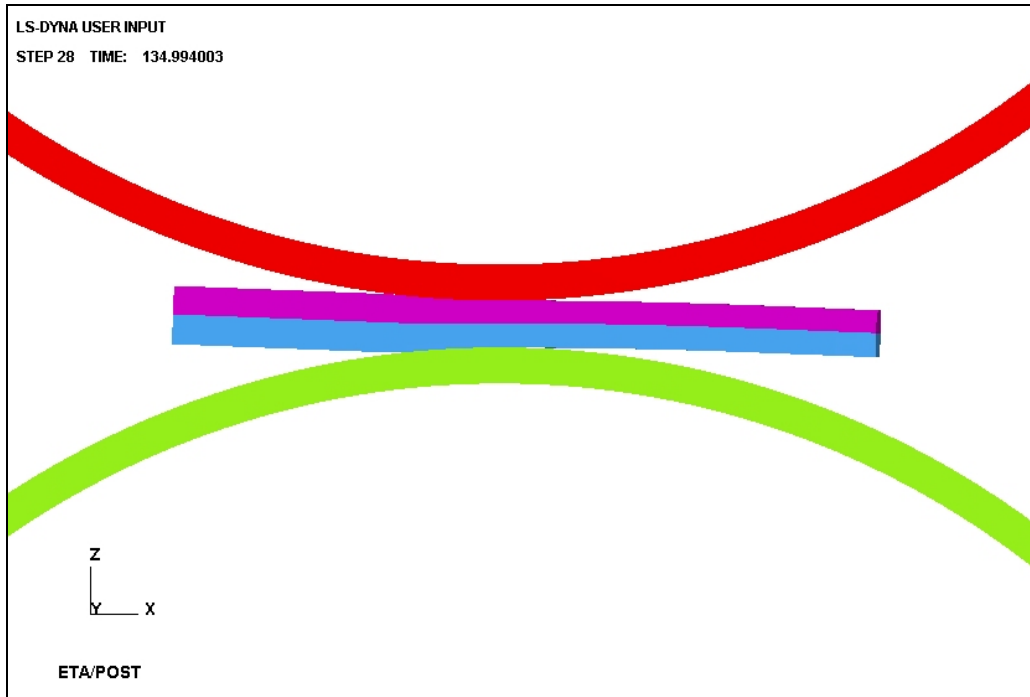
### 5.1.2 ΜΕ ΛΙΠΑΝΣΗ



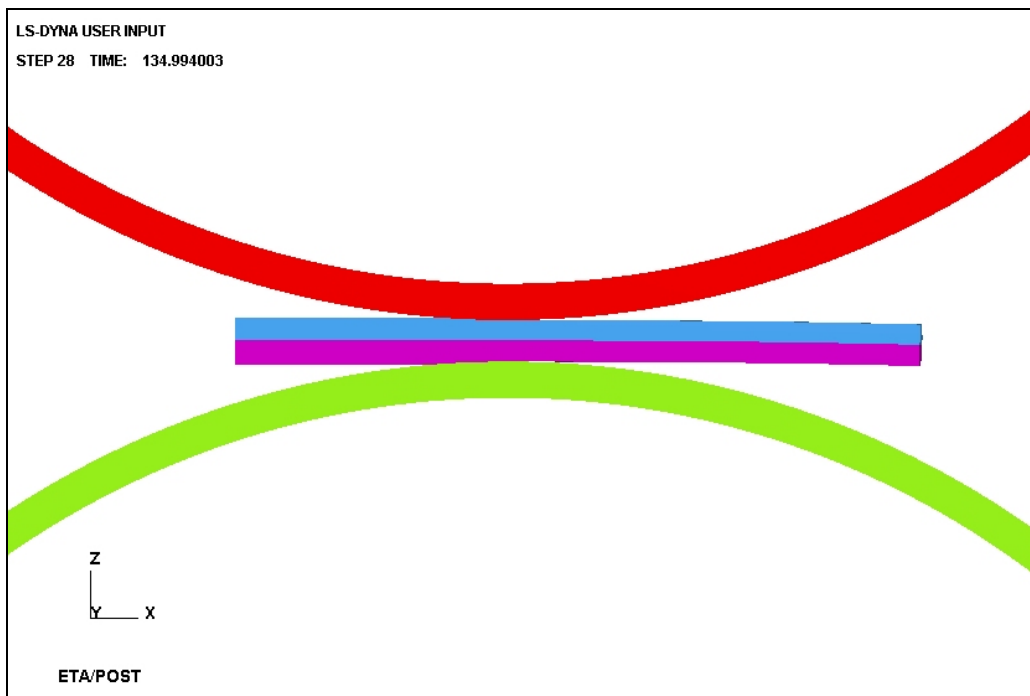
Σχ. 30: Πάσο 1



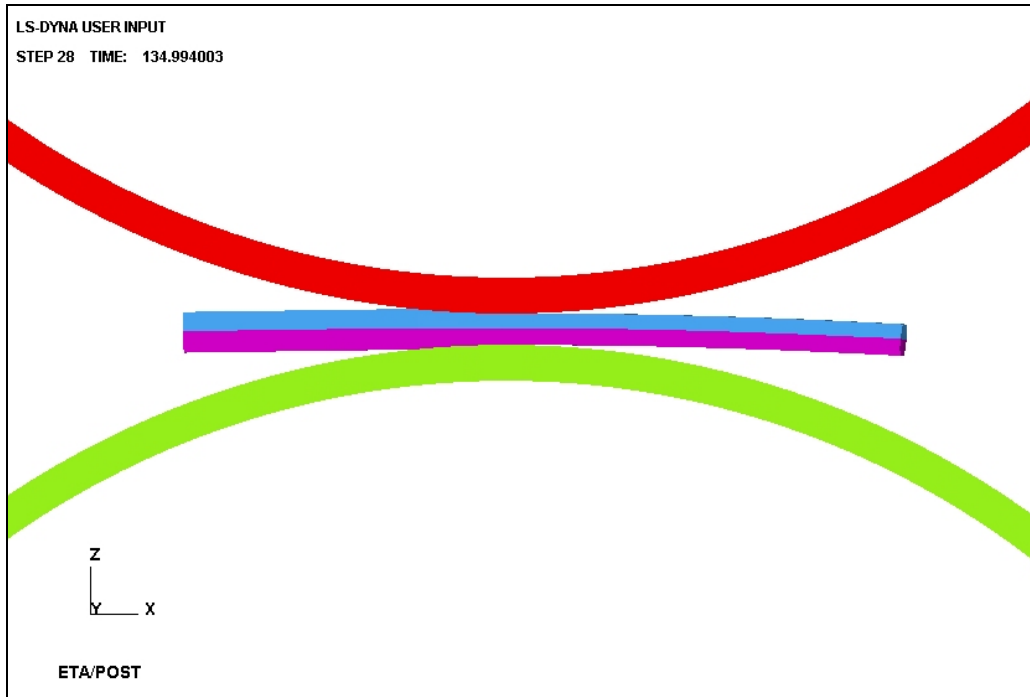
Σχ. 31: Πάσο 2



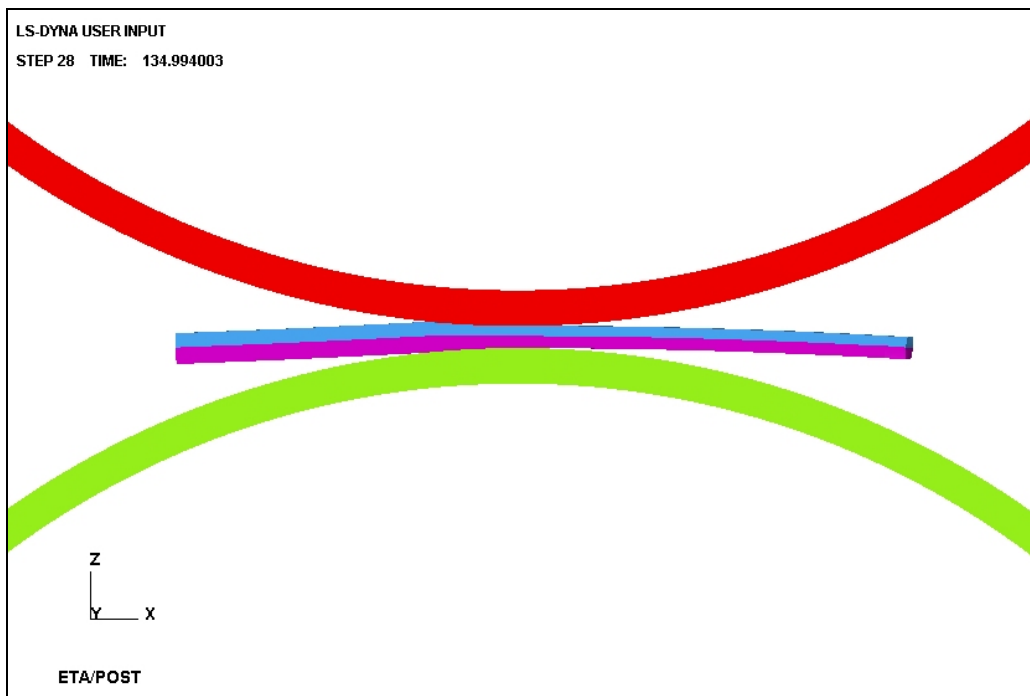
Σχ. 32: Πάσο 3



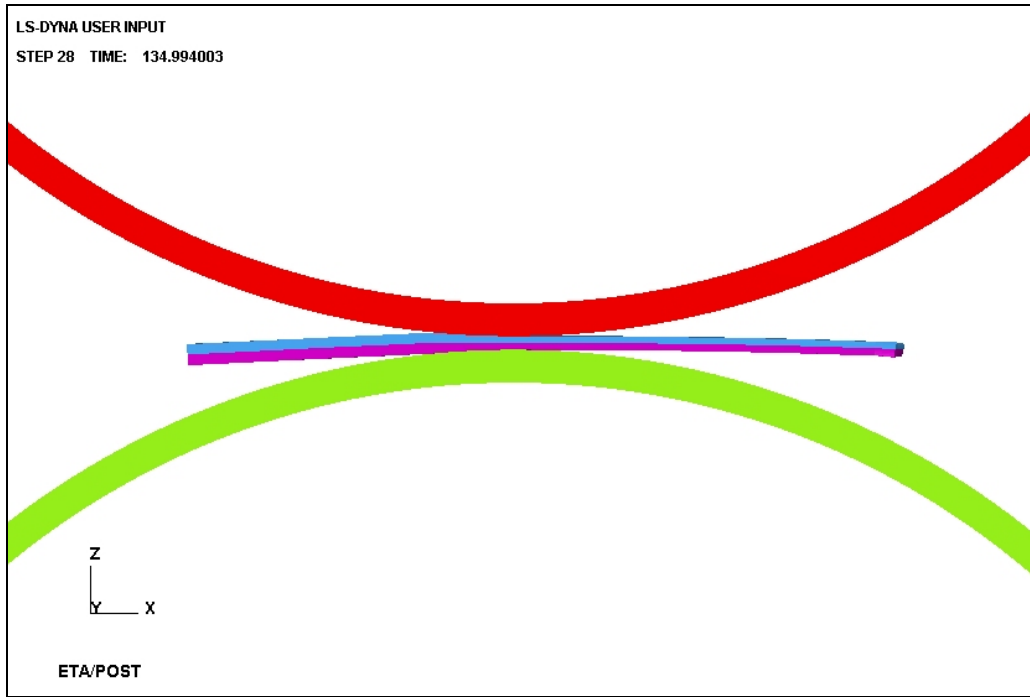
Σχ. 33: Πάσο 4



Σχ. 34: Πάσο 5

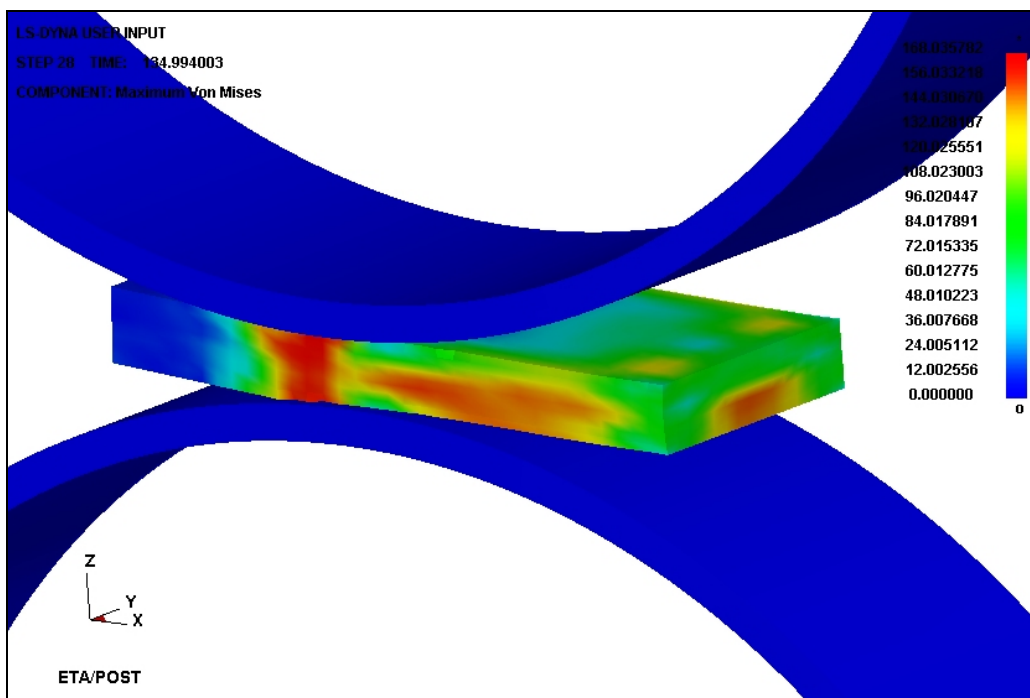


Σχ. 35: Πάσο 6



Σχ. 36: Πάσο 7

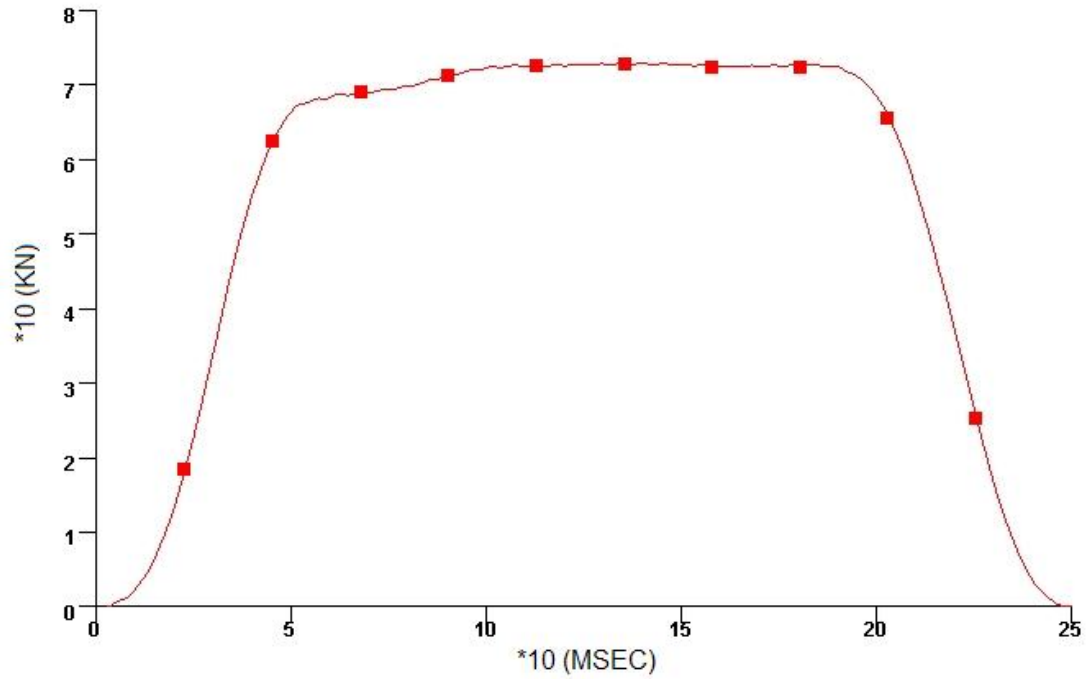
Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε στιγμιότυπο της έλασης στο πρώτο πάσο, με απεικόνιση των τάσεων κατά Von Mises.



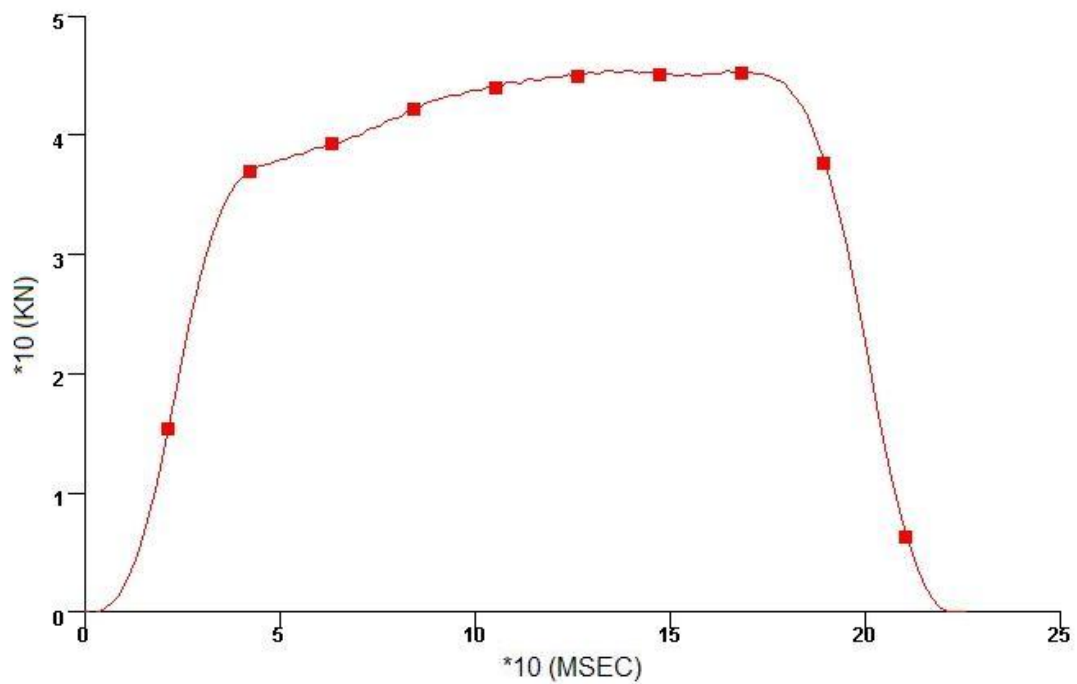
Σχ. 37: Οι τάσεις που αναπτύσσονται στο έλασμα, κατά Von Mises

## 5.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΛΑΣΗΣ

### 5.2.1 ΧΩΡΙΣ ΛΙΠΑΝΣΗ

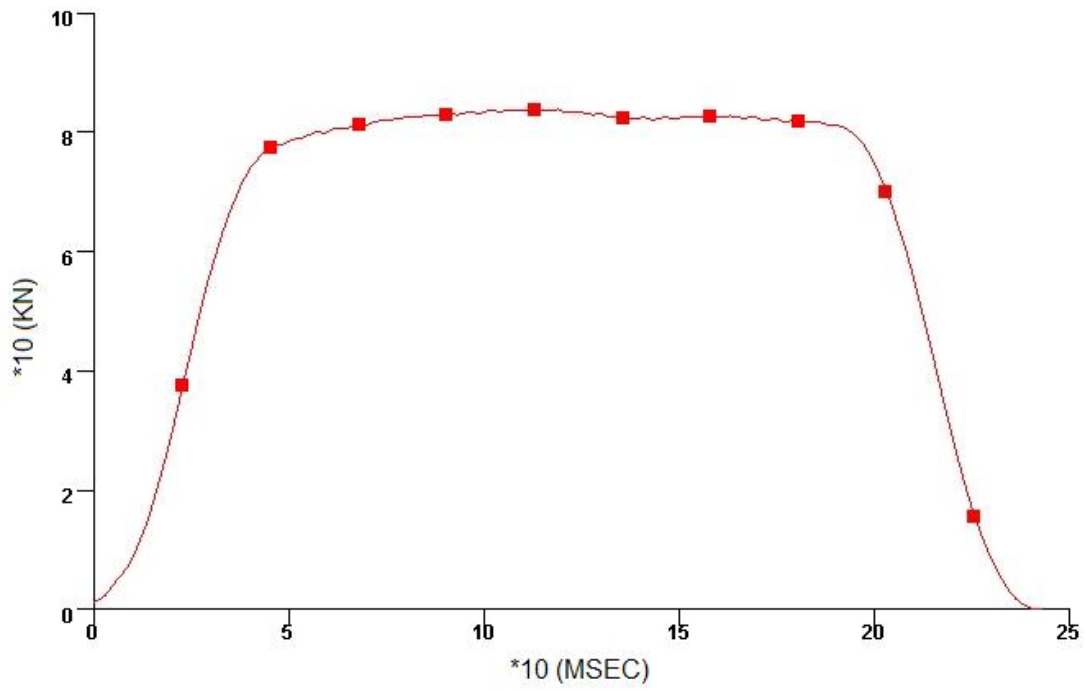


Σχ. 38: Πάσο 1

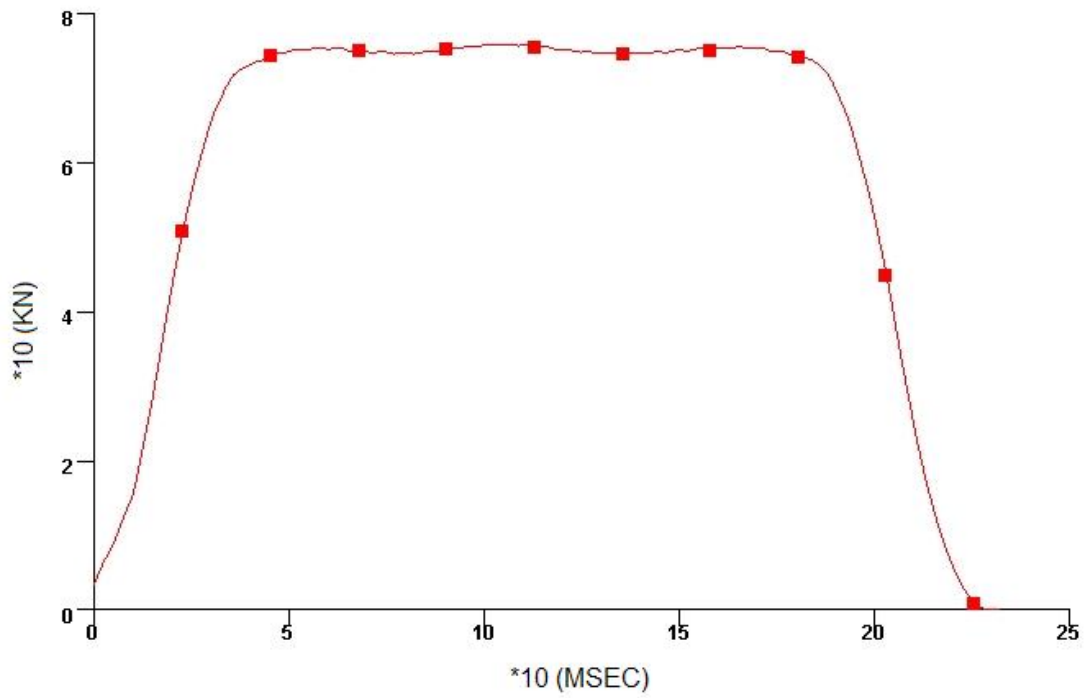


Σχ. 39: Πάσο 2

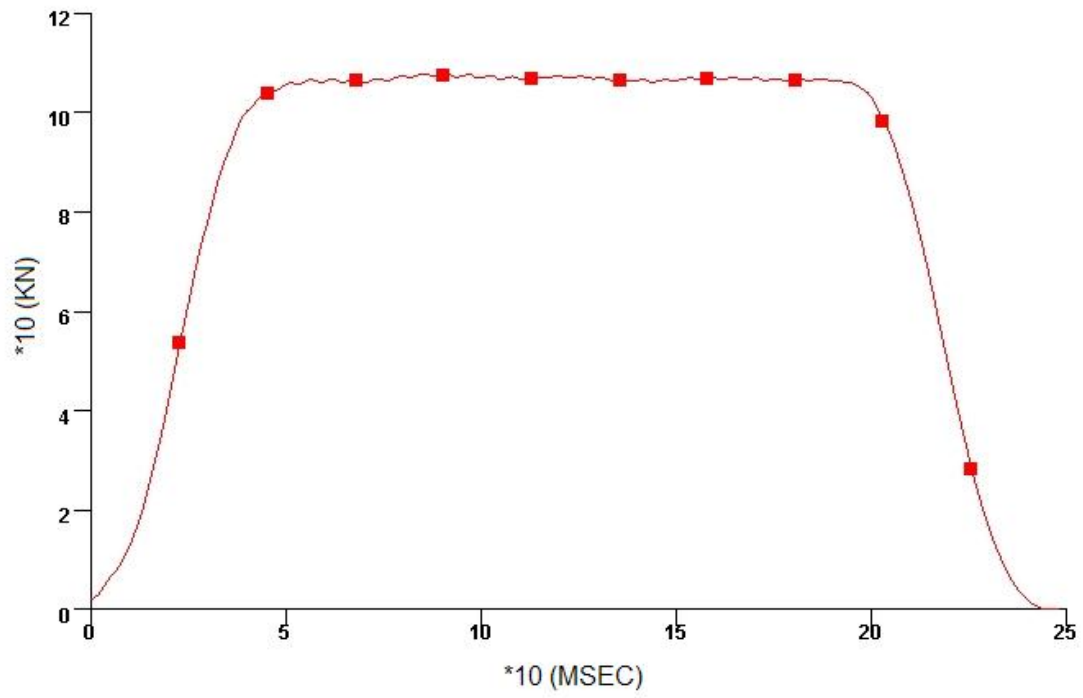




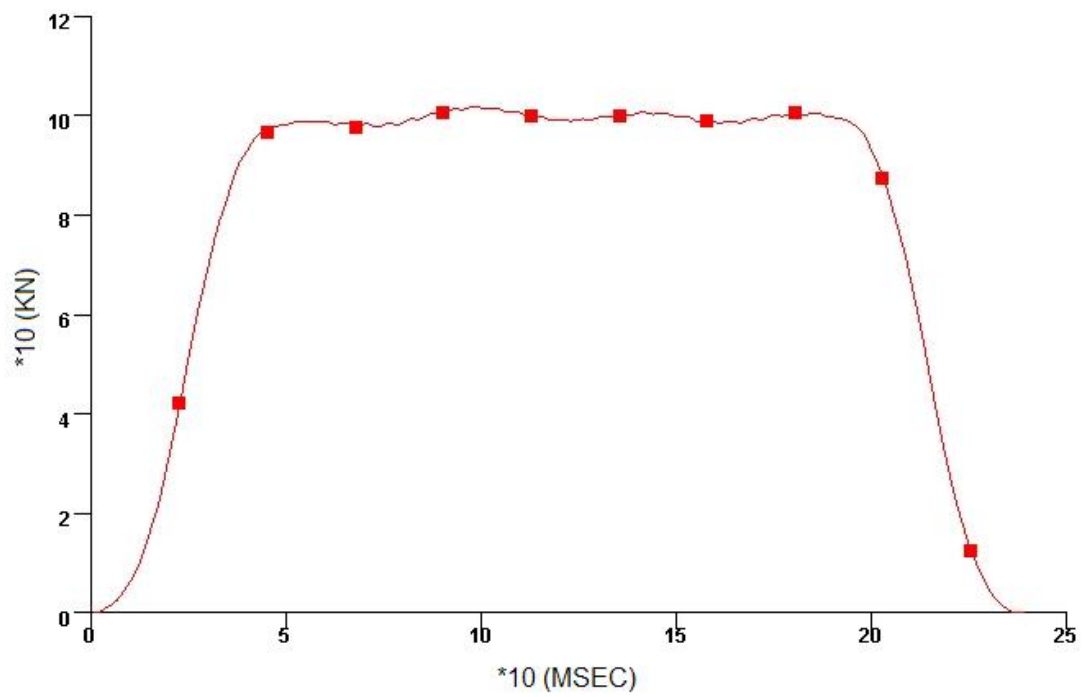
Σχ. 40: Πάσο 3



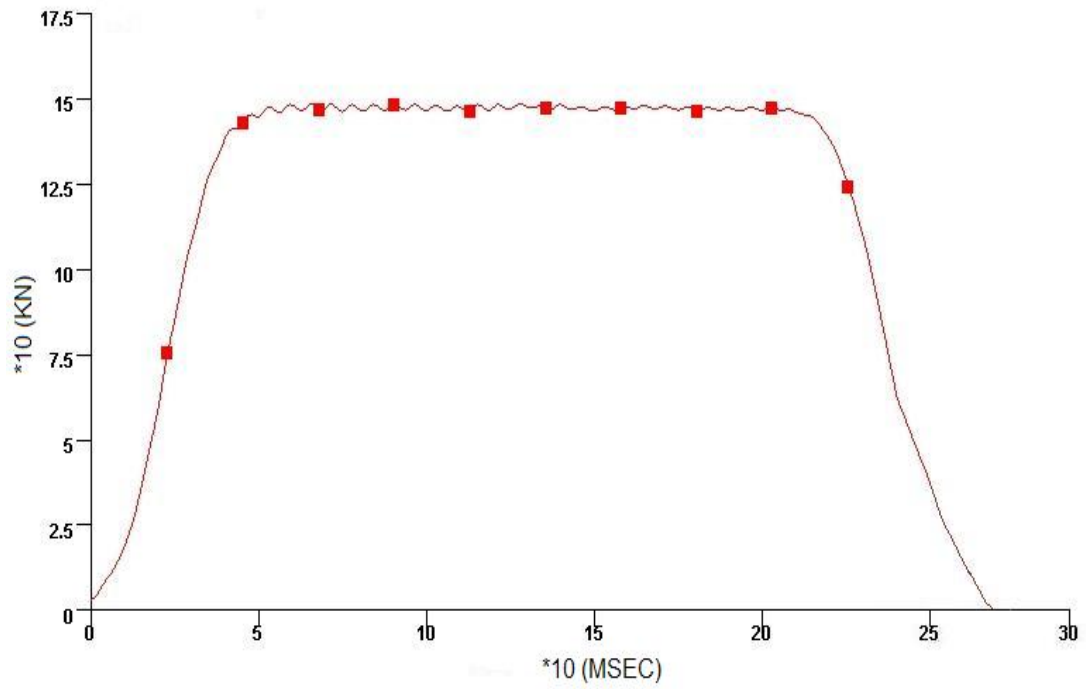
Σχ. 41: Πάσο 4



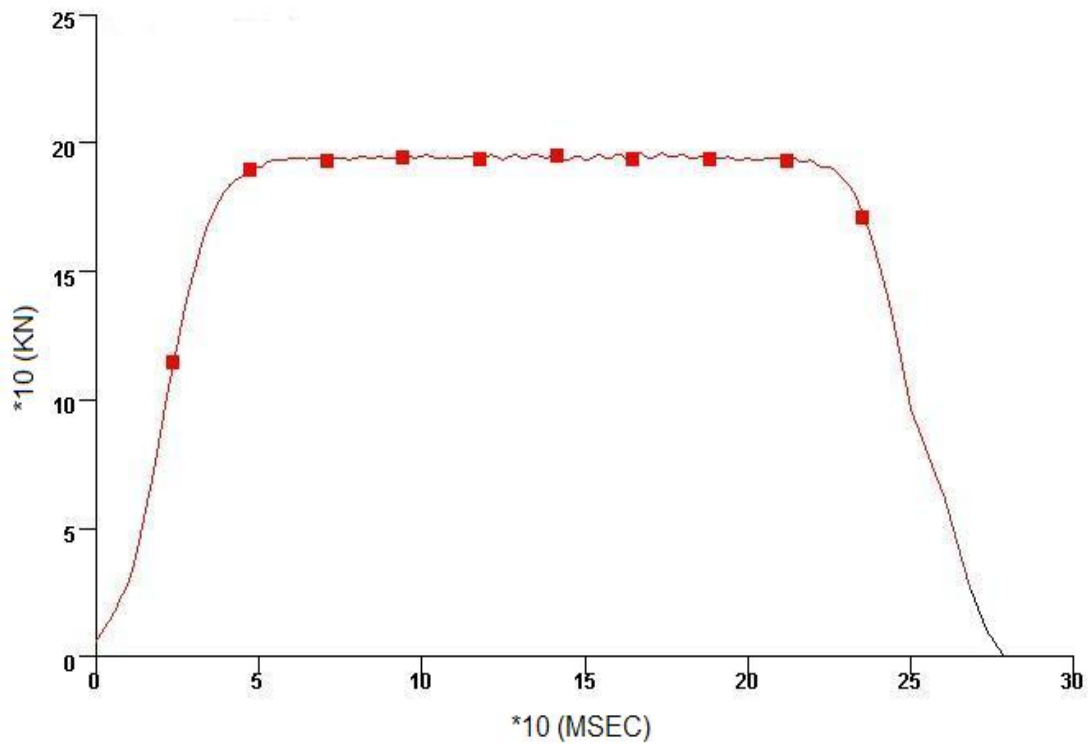
Σχ. 42: Πάσο 5



Σχ. 43: Πάσο 6

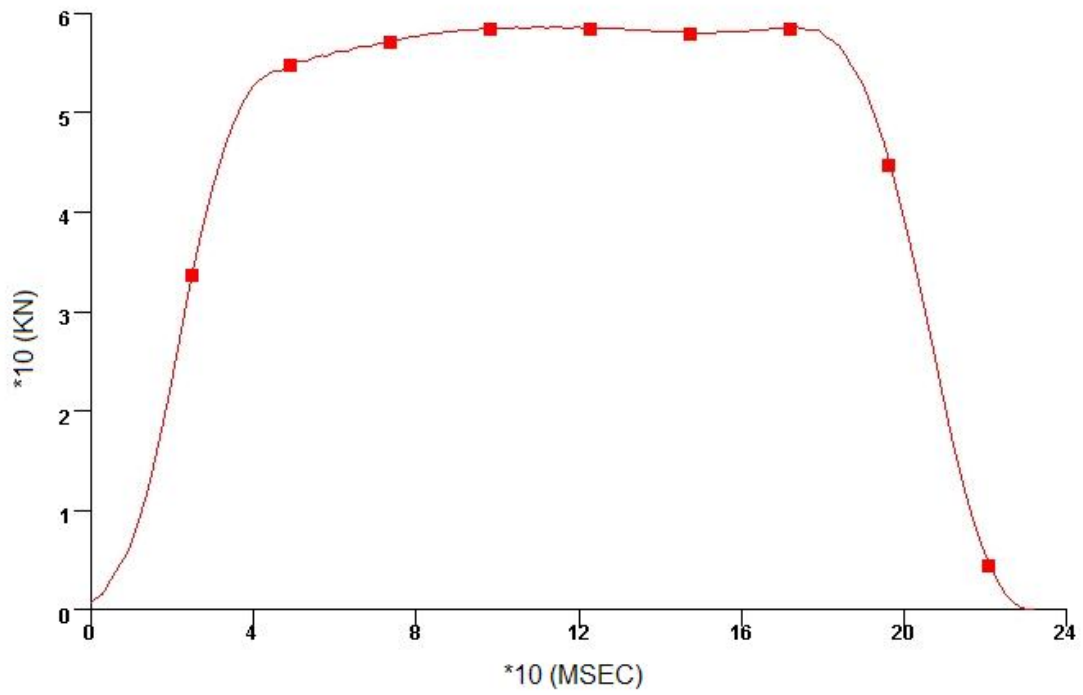


Σχ. 44: Πάσο 7

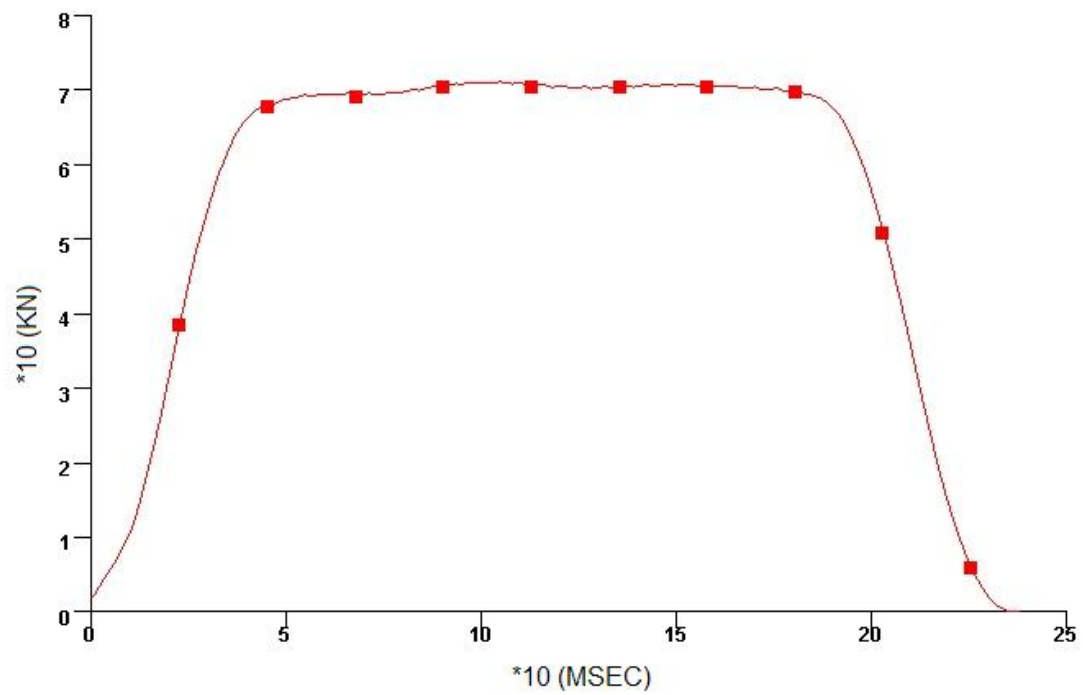


Σχ. 45: Πάσο 8

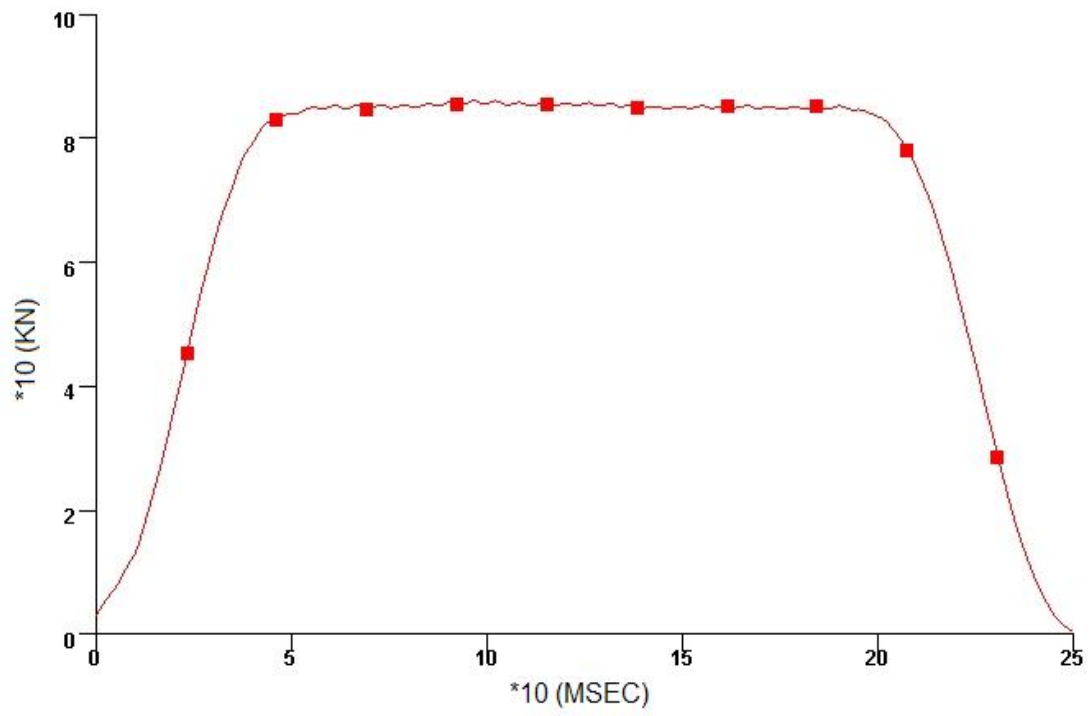
### 5.2.2 ΜΕ ΛΙΠΑΝΣΗ



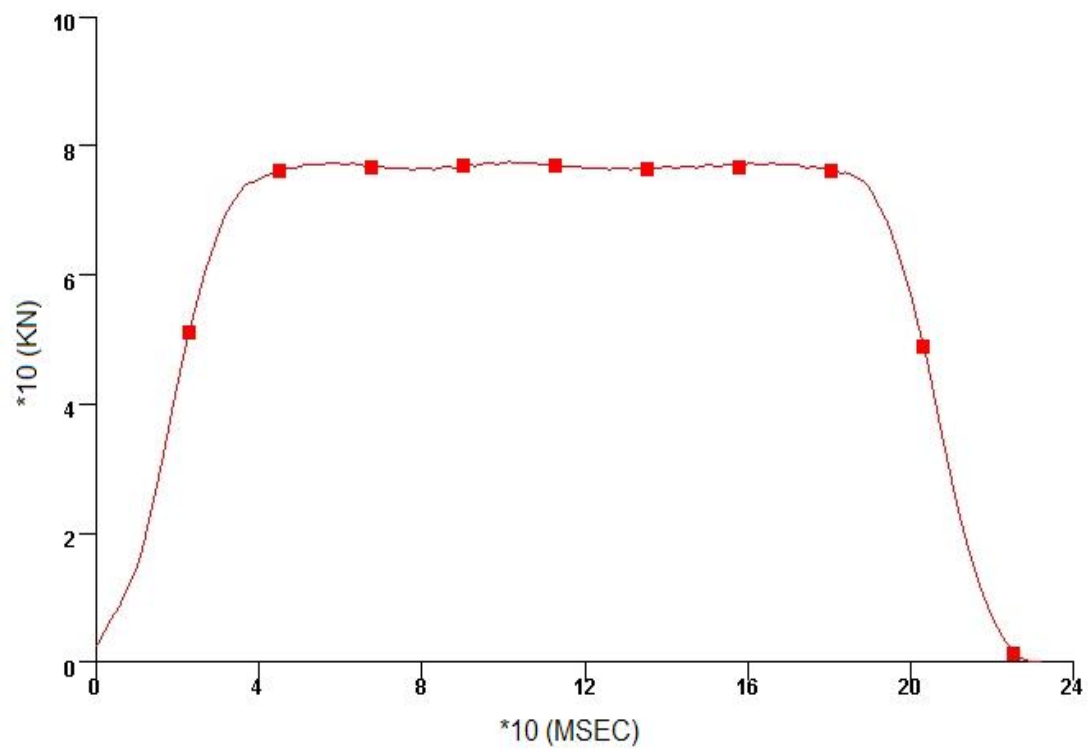
Σχ. 46: Πάσο 1



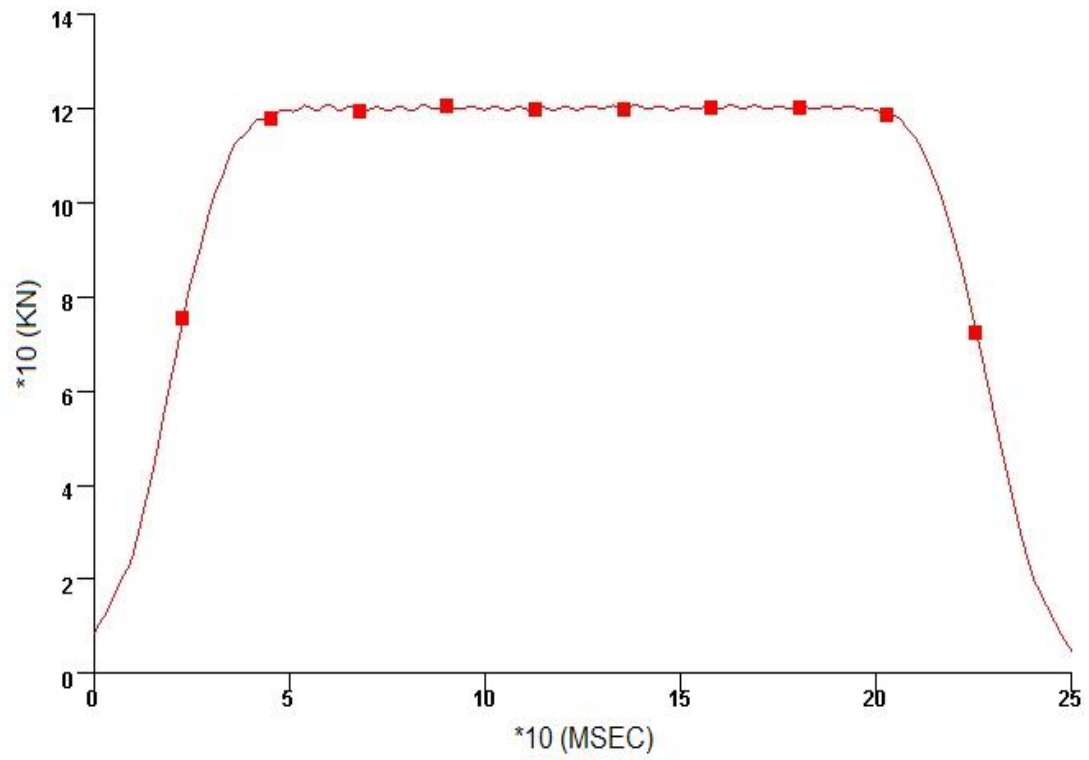
Σχ. 47: Πάσο 2



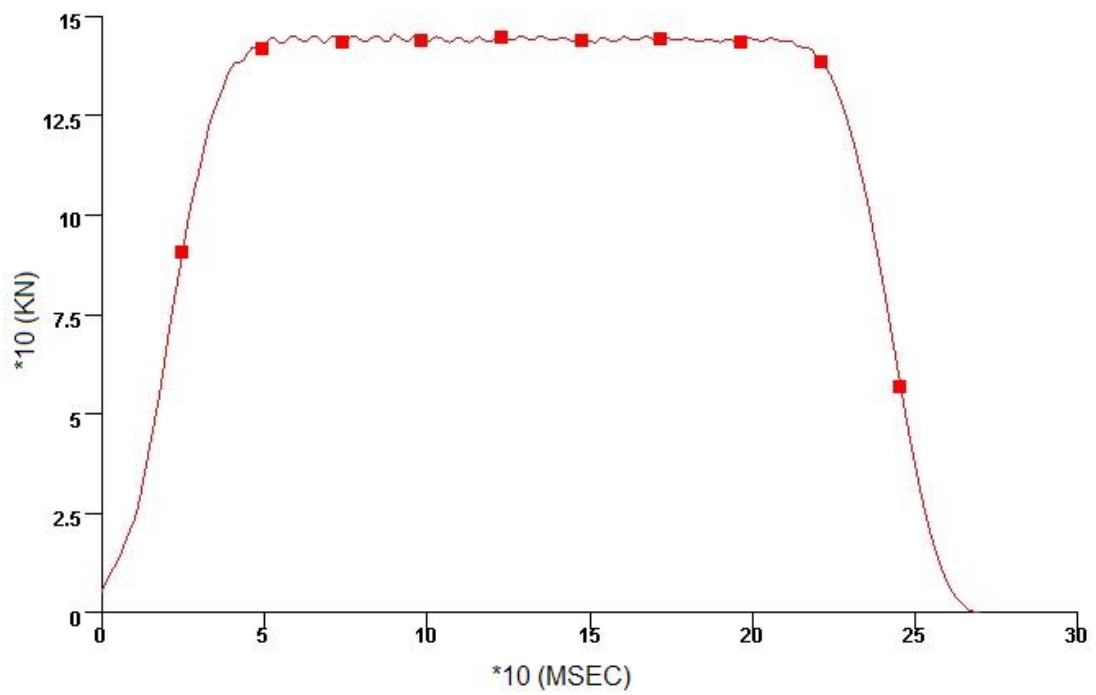
Σχ. 48: Πάσο 3



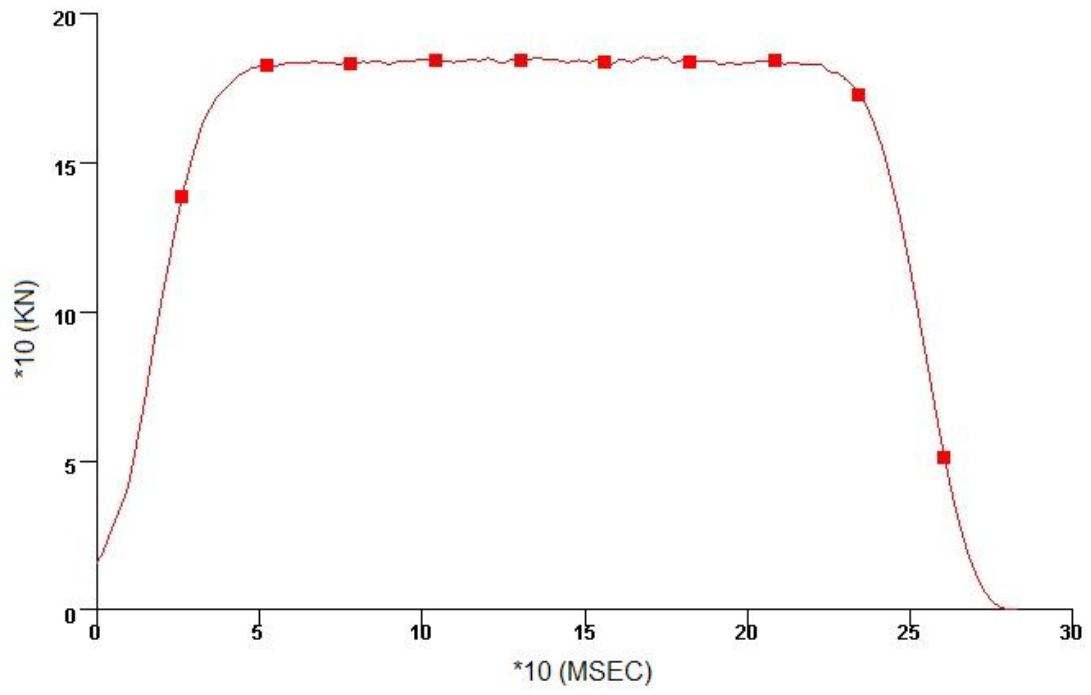
Σχ. 49: Πάσο 4



Σχ. 50: Πάσο 5



Σχ. 51: Πάσο 6



Σχ. 52: Πάσο 7

### 5.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

#### 5.3.1 ΧΩΡΙΣ ΛΙΠΑΝΣΗ

ΠΑΣΟ	1	2	3	4	5	6	7	8
ΣΥΝΟΛ. ΠΑΧΟΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΡΙΝ (mm)	8,45	7,19	6,81	5,75	5,05	4,13	3,52	2,55
ΠΑΧΟΣ AL ΠΡΙΝ (mm)	4,18	3,50	3,29	2,83	2,43	2,05	1,70	1,23
ΠΑΧΟΣ CU ΠΡΙΝ (mm)	4,27	3,69	3,52	2,92	2,62	2,08	1,82	1,32
ΣΥΝΟΛ. ΠΑΧΟΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΜΕΤΑ (mm)	7,24	6,86	5,82	5,10	4,24	3,59	2,67	1,83
ΠΑΧΟΣ AL ΜΕΤΑ (mm)	3,61	3,36	2,83	2,50	2,03	1,78	1,29	0,90
ΠΑΧΟΣ CU ΜΕΤΑ (mm)	3,63	3,50	2,99	2,60	2,21	1,81	1,38	0,93
ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	14,32	4,59	14,54	11,30	16,04	13,08	24,15	28,24
ΣΥΝΟΛ. ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ (%)	14	19	31	40	50	58	68	78
ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ AL ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	13,6	4,0	14,0	11,7	16,5	13,2	24,1	26,8
ΣΥΝΟΛ. ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ AL (%)	13,6	19,6	32,3	40,2	51,4	57,4	69,1	78,5
ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ CU ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	15,0	5,1	15,1	11,0	15,6	13,0	24,2	29,5
ΣΥΝΟΛ. ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ CU (%)	15,0	18,0	30,0	39,1	48,2	57,6	67,7	78,2
ΠΛΑΤΟΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΠΡΙΝ (mm)	29,35	29,70	29,75	29,90	30,10	30,30	30,50	30,90
ΠΛΑΤΟΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ (mm)	29,95	30,12	30,28	30,47	30,78	30,82	31,63	32,25
ΑΥΞΗΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	2,04	1,41	1,78	1,91	2,26	1,72	3,70	4,37
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΥΞΗΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ (%)	2,04	2,62	3,17	3,82	4,87	5,01	7,77	9,88
ΦΟΡΤΙΟ ΕΛΑΣΗΣ (kN)	71	47	80	78	105	100	144	181
ΡΟΠΗ ΕΛΑΣΗΣ (N*m)	604	294	964	629	855	608	952	1093



### 5.3.2 ΜΕ ΛΙΠΑΝΣΗ

ΠΑΣΟ	1	2	3	4	5	6	7
ΣΥΝΟΛ. ΠΑΧΟΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΡΙΝ (mm)	8,29	7,47	6,48	5,18	4,53	3,46	2,54
ΠΑΧΟΣ AL ΠΡΙΝ (mm)	4,10	3,72	3,16	2,54	2,13	1,59	1,23
ΠΑΧΟΣ CU ΠΡΙΝ (mm)	4,19	3,75	3,32	2,64	2,40	1,87	1,31
ΣΥΝΟΛ. ΠΑΧΟΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΜΕΤΑ (mm)	7,49	6,54	5,29	4,58	3,55	2,56	1,77
ΠΑΧΟΣ AL ΜΕΤΑ (mm)	3,73	3,26	2,60	2,24	1,67	1,19	0,87
ΠΑΧΟΣ CU ΜΕΤΑ (mm)	3,76	3,28	2,69	2,34	1,88	1,37	0,90
ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	9,7	12,4	18,4	11,6	21,6	26,0	30,3
ΣΥΝΟΛ. ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ (%)	9,7	21,1	36,2	44,8	57,2	69,1	78,6
ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ AL ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	9,0	12,4	17,7	11,8	21,6	25,2	29,3
ΣΥΝΟΛ. ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ AL (%)	11,0	22,2	37,9	46,5	60,1	71,6	79,2
ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ CU ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	10,3	12,5	19,0	11,4	21,7	26,7	31,3
ΣΥΝΟΛ. ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ CU (%)	10,3	21,7	35,8	44,2	55,1	67,3	78,5
ΠΛΑΤΟΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΠΡΙΝ (mm)	28,75	29,40	29,45	29,80	30,10	30,40	30,85
ΠΛΑΤΟΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ (mm)	29,05	29,85	30,27	30,20	31,02	31,52	31,95
ΑΥΞΗΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	1,04	1,53	2,78	1,34	3,06	3,68	3,57
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΥΞΗΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ (%)	1,04	3,83	5,29	5,04	7,90	9,63	11,13
ΦΟΡΤΙΟ ΕΛΑΣΗΣ (kN)	58	72	87	75	124	143	173
ΡΟΠΗ ΕΛΑΣΗΣ (N*m)	508	641	872	516	943	1129	1180

## 5.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (SCALING)

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιούμε, προκειμένου να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματά μας, χρησιμοποιούμε μοντέλα με μεγάλο αριθμό στοιχείων (elements). Αυτό όμως έχει ως αποτέλεσμα, αφενός να αυξάνεται πάρα πολύ ο χρόνος για να ολοκληρωθεί η ανάλυση και αφετέρου να απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύς. Ένα πολύτιμο εργαλείο που προσφέρει το LS-DYNA και χρησιμοποιείται ευρέως από τους ερευνητές για να ελαττωθεί ο υπολογιστικός χρόνος είναι το λεγόμενο «scaling» [10,20,22-24]. Υπάρχουν δύο τρόποι να κάνουμε scaling, το mass scaling και το velocity scaling.

Το mass scaling είναι μια τεχνική όπου προσθέτουμε μάζα στο μοντέλο μας προκειμένου να επιτύχουμε μεγαλύτερο explicit timestep. Ως timestep ορίζεται ο χρόνος που χρειάζεται ο ήχος για να διαπεράσει ένα στοιχείο. Αυξάνουμε την πυκνότητα, δηλαδή αυξάνουμε τη μάζα, μειώνοντας έτσι την ταχύτητα του ήχου  $c$  μέσα στο υλικό, αφού  $c=(E/\rho)^{1/2}$ . Επειδή όμως έτσι αυξάνεται ο χρόνος που χρειάζεται ο ήχος να διαπεράσει ένα στοιχείο, αυξάνεται το timestep. Οπότε, ο υπολογισμός θα γίνει σε λιγότερους κύκλους και κατά συνέπεια σε λιγότερο χρόνο. Η ρύθμιση του mass scale γίνεται βάζοντας τιμή στην παράμετρο DT2MS. Αυτή η παράμετρος βρίσκεται στην καρτέλα DYNAMISC/CONTROL/ TIMESTEP του pre-processor. Όταν η τιμή είναι θετική, αυτόματα προστίθεται ή αφαιρείται μάζα από τα στοιχεία ώστε να γίνεται ενιαίο το timestep. Μπορούμε να ενεργοποιήσουμε τη λειτουργία ENDMASS από την καρτέλα DYNAMISC/CONTROL/ TERMINATION για να σταματήσουμε τους υπολογισμούς στην περίπτωση που προστεθεί περισσότερη μάζα από μία προκαθορισμένη ποσότητα. Όταν η τιμή του DT2MS είναι αρνητική, μάζα προστίθεται μόνο σε εκείνα τα στοιχεία στα οποία το timestep θα ήταν μικρότερο από  $TSSFAC*|DT2MS|$ . Με τη ρύθμιση αυτών των δύο παραμέτρων το

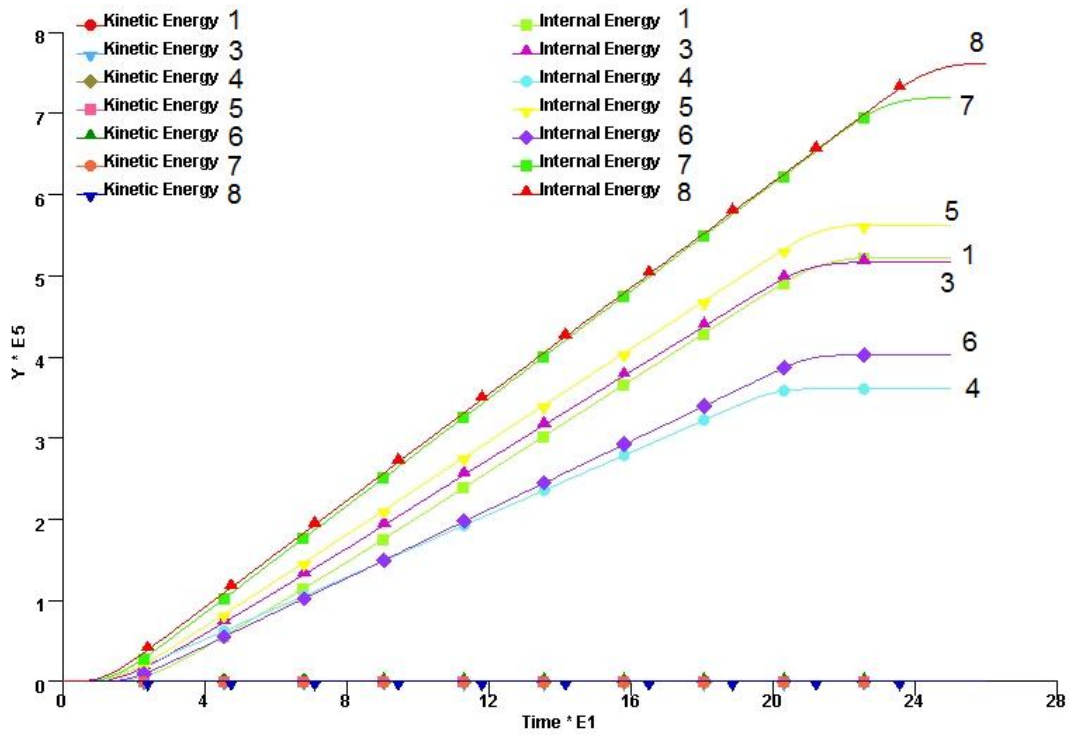
πρόγραμμα προσθέτει μάζα ώστε το timestep να γίνει σε όλα τα στοιχεία ίσο με  $TSSFAC * |DT2MS|$ . Υπάρχει πρακτικά άπειρος συνδυασμός τιμών των δύο αυτών παραμέτρων, προσφέροντάς μας έτσι απεριόριστη ελευθερία επιλογών ρύθμισης του mass scale. Όσο μικρότερη τιμή δίνουμε στην παράμετρο TSSFAC, τόσο περισσότερη μάζα θα προστεθεί στα elements. Η default τιμή του TSSFAC είναι 0.9. Στο παράθυρο εκτέλεσης κατά την εκκίνηση της ανάλυσης, ο solver υπολογίζει τη φυσική μάζα (physical mass), την πρόσθετη μάζα (scaled mass) και το λόγο αυτών (ratio). Από εκεί μπορούμε να δούμε πόσες φορές έχει αυξηθεί η μάζα του μοντέλου μας και να αξιολογήσουμε ποσοτικά το mass scale.

Η εφαρμογή του mass scale θέλει ιδιαίτερη προσοχή, γιατί σύμφωνα με το θεμελιώδη νόμο της φυσικής ( $F = m * a$ ), αυξάνοντας τη μάζα, αυξάνουμε τις δυνάμεις και την κινητική ενέργεια του συστήματος ( $E = \frac{1}{2} * m * u^2$ ). Μας ενδιαφέρει η κινητική ενέργεια να μένει σε χαμηλό ποσοστό συγκριτικά με την εσωτερική ενέργεια του συστήματος, γιατί έτσι το σύστημα παραμένει σταθερό. Για να μπορέσουμε να δούμε πως μεταβάλλονται οι δύο αυτές ενέργειες στο μοντέλο μας, πρέπει να ζητήσουμε από το πρόγραμμα να εξάγει τις τιμές τους κατά τη διάρκεια της ανάλυσης και να τις αποθηκεύσει. Αυτό γίνεται στην καρτέλα DYNAMISC/DATABASE/ASCII/GLSTAT. Εκεί μπορούμε να ρυθμίσουμε τη συχνότητα που θα εξάγονται οι πληροφορίες αυτές. Τα στοιχεία αυτά αποθηκεύονται σε ένα αρχείο με το όνομα GLSTAT και μπορούμε να τα δούμε με τη μορφή γραφήματος.

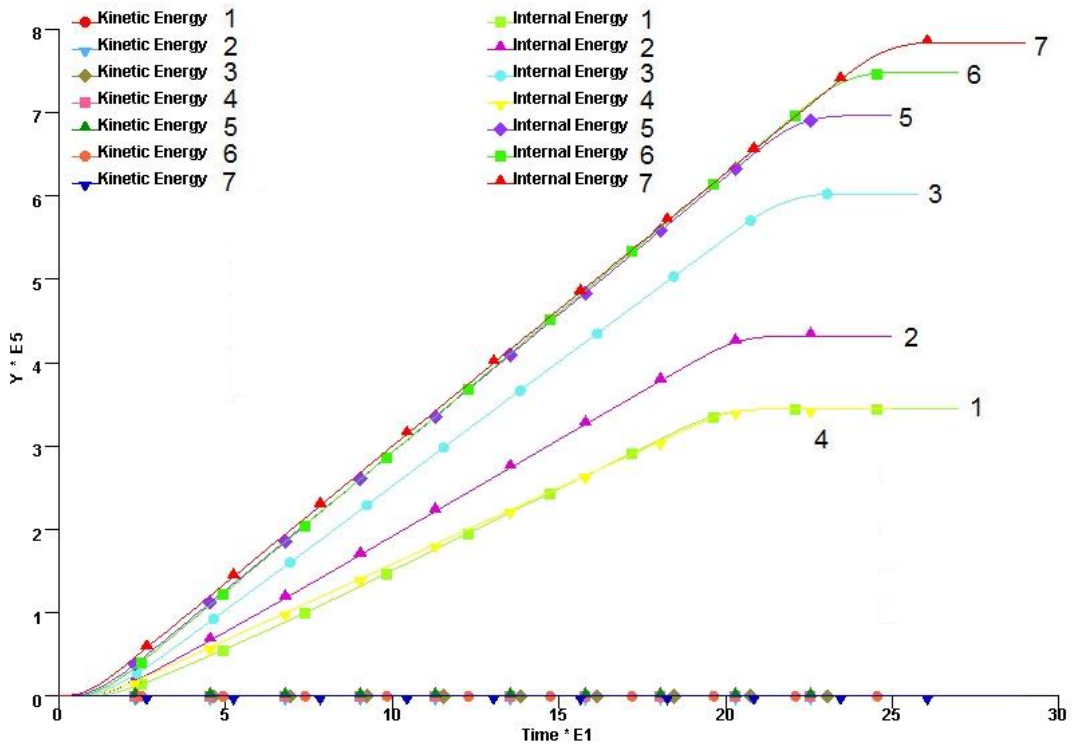
Ένας άλλος τρόπος να μειώσουμε το χρόνο τρεξίματος είναι να κάνουμε velocity scaling. Η περίπτωση αυτή είναι πιο απλή, αφού το μόνο που χρειάζεται να κάνουμε είναι να αυξήσουμε την ταχύτητα κατεργασίας. Στο μοντέλο της έλασης αυτό πραγματοποιείται αυξάνοντας την αρχική ταχύτητα του ελάσματος και τη γωνιακή

ταχύτητα των ραούλων. Η εφαρμογή του velocity scaling όμως απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή γιατί ο τύπος της κινητικής ενέργειας ( $E = \frac{1}{2} * m * u^2$ ) μας δείχνει ότι η επίδραση της ταχύτητας είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη της μάζας. Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι είναι στην κρίση του αναλυτή η χρήση και η ρύθμιση των παραμέτρων του scaling.

Στο σχ. 53 και το σχ. 54 που ακολουθούν, βλέπουμε συγκεντρωμένα τα γραφήματα ενέργειας που προέκυψαν από τα αρχεία GLSTAT για τις δύο σειρές προσομοιώσεων (χωρίς λίπανση και με λίπανση). Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των εσωτερικών ενεργειών συνεχώς αυξάνονται, σε αντίθεση με τις καμπύλες των κινητικών ενεργειών που κινούνται κοντά στον άξονα του χρόνου. Αμέσως μετά τα δύο γραφήματα ακολουθούν δύο πίνακες που περιέχουν τις παραμορφώσεις του διμεταλλικού ελάσματος με λίπανση και χωρίς λίπανση. Συγκρίνοντας τις εσωτερικές ενέργειες με τις αντίστοιχες παραμορφώσεις ανά πάσο, παρατηρούμε ότι η εσωτερική ενέργεια του μοντέλου αυξάνεται με την αύξηση της παραμόρφωσης. Αυτή η συμπεριφορά του μοντέλου είναι σωστή, γιατί όσο πιο πολύ συμπιέζεται το έλασμα, τόσο περισσότερη ενέργεια συσσωρεύεται μέσα σε αυτή.



Σχ. 53: Καμπύλες ενέργειας – χρόνου για έλαση χωρίς λίπανση



Σχ. 54: Καμπύλες ενέργειας – χρόνου για έλαση με λίπανση

	ΕΛΑΣΗ ΧΩΡΙΣ ΛΙΠΑΝΣΗ							
	πάσο 1	πάσο 2	πάσο 3	πάσο 4	πάσο 5	πάσο 6	πάσο 7	πάσο 8
μείωση πάχους ελασμ. %	14,9	5,29	15,6	12,2	18,4	14,6	27,6	35,3

Ποσοστό μείωσης πάχους του ελάσματος σε κάθε πάσο έλασης χωρίς λίπανση

	ΕΛΑΣΗ ΜΕ ΛΙΠΑΝΣΗ						
	πάσο 1	πάσο 2	πάσο 3	πάσο 4	πάσο 5	πάσο 6	πάσο 7
μείωση πάχους ελασμ. %	11	13	20,6	12,5	23,6	29,5	34,4

Ποσοστό μείωσης πάχους του ελάσματος σε κάθε πάσο έλασης με λίπανση

## 5.5 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ, ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ DT2MS ΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΙ ΤΗ ΡΟΠΗ ΕΛΑΣΗΣ

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε μας απασχόλησαν ιδιαίτερα οι τιμές του συντελεστή τριβής, της ταχύτητας έλασης και του συντελεστή DT2MS. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιήσουμε κάποιες επιπλέον προσομοιώσεις μεταβάλλοντας τις παραμέτρους αυτές, με στόχο να παρατηρήσουμε την επίδρασή τους στο φορτίο και τη ροπή έλασης.

### 5.5.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ

Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται οι τιμές των στατικών και των δυναμικών συντελεστών τριβής. Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές εκδοχές, διατηρώντας σταθερό το λόγο του συντελεστή τριβής της άνω επιφάνειας (άνω ράουλο – αλουμίνιο) προς το συντελεστή τριβής της κάτω επιφάνειας (κάτω ράουλο – χαλκός). Αυτό γίνεται και για τους στατικούς και για τους δυναμικούς συντελεστές. Ο λόγος αυτός έχει τιμή  $\lambda = 1,14$ . Όλες οι άλλες παράμετροι στην προσομοίωση παρέμειναν ίδιες.

	ΧΑΜΗΛΗ ΤΙΜΗ ΤΡΙΒΗΣ			ΜΕΣΑΙΑ ΤΙΜΗ ΤΡΙΒΗΣ			ΥΨΗΛΗ ΤΙΜΗ ΤΡΙΒΗΣ		
	ΑΝΩ ΕΠΙΦ.	ΜΕΣΗ ΕΠΙΦ.	ΚΑΤΩ ΕΠΙΦ.	ΑΝΩ ΕΠΙΦ.	ΜΕΣΗ ΕΠΙΦ.	ΚΑΤΩ ΕΠΙΦ.	ΑΝΩ ΕΠΙΦ.	ΜΕΣΗ ΕΠΙΦ.	ΚΑΤΩ ΕΠΙΦ.
FS	0,2	0,19	0,175	0,4	0,37	0,35	0,6	0,56	0,525
FD	0,175	0,17	0,15	0,35	0,32	0,3	0,525	0,5	0,45

Πίνακας συντελεστών τριβής για τις δοκιμές

Οι τιμές του φορτίου και της ροπής έλασης που προέκυψαν είναι οι εξής :

	ΧΑΜΗΛΗ ΤΙΜΗ ΤΡΙΒΗΣ	ΜΕΣΑΙΑ ΤΙΜΗ ΤΡΙΒΗΣ	ΥΨΗΛΗ ΤΙΜΗ ΤΡΙΒΗΣ
ΦΟΡΤΙΟ (Mpa)	69	75	82
ΡΟΠΗ (N*mm)	717	780	920

Πίνακας τιμών φορτίου και ροπής από τις δοκιμές τριβής

Παρατηρούμε ότι αυξάνοντας τους συντελεστές τριβής, παράλληλα αυξάνονται το φορτίο και η ροπή έλασης [17]. Η συμπεριφορά του μοντέλου είναι σωστή [23].

#### 5.5.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ DT2MS

Για να δούμε την επίδραση του συντελεστή DT2MS, κάναμε τρεις προσομοιώσεις, δίνοντας τις τιμές 0,001 0,006 και 0,01. Οι τιμές του φορτίου και της ροπής που προέκυψαν είναι :

	DT2MS = 0,001	DT2MS = 0,006	DT2MS = 0,01
ΦΟΡΤΙΟ (Mpa)	75	75	75
ΡΟΠΗ (N*mm)	815	780	810

Πίνακας τιμών φορτίου και ροπής από τις δοκιμές DT2MS

Παρατηρούμε, δηλαδή, ότι η αλλαγή του συντελεστή δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Αυτό δικαιώνει την επιλογή μας να χρησιμοποιήσουμε το mass scaling ως μέθοδο για να μειώσουμε το χρόνο προσομοίωσης.



### 5.5.3 ΤΑΧΥΤΗΤΑ

Πραγματοποιήσαμε τρεις προσομοιώσεις , με γωνιακές ταχύτητες  $V = 0,001$  rad/msec (σχεδόν δηλαδή όσο και η πειραματική),  $V = 0,004$  rad/msec και  $V = 0,01$  rad/msec. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

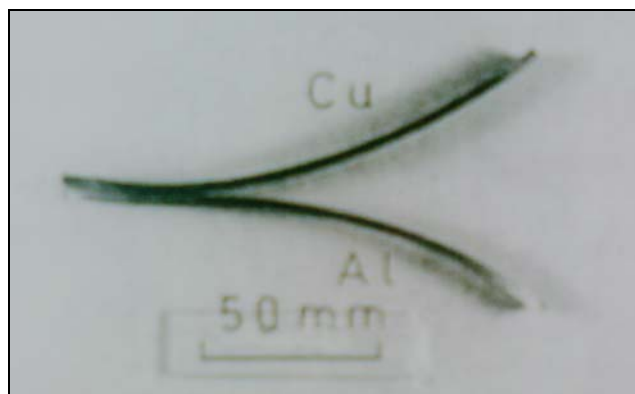
	$V = 0,001$	$V = 0,004$	$V = 0,01$
ΦΟΡΤΙΟ (Mpa)	75	75	72
ΡΟΠΗ (N*mm)	820	780	750

Πίνακας τιμών φορτίου και ροπής από τις δοκιμές ταχύτητας

Εδώ παρατηρούμε ότι ενώ το φορτίο έλασης δε μεταβάλλεται καθόλου με την αύξηση της ταχύτητας (κατά 1000 %), η ροπή μειώνεται σε ένα ποσοστό 8,5 % συνολικά. Η μείωση αυτή δεν είναι αμελητέα, όμως μπορεί να οφείλεται σε σφάλμα του τρόπου υπολογισμού της ροπής από εμάς. Το αναμενόμενο είναι η ροπή να μην εξαρτάται από την ταχύτητα έλασης [2],[4].

## 5.6 ΚΡΟΚΟΔΕΙΛΙΑΣΗ

Στην πειραματική εκτέλεση των ελάσεων είχε παρουσιαστεί στο δεύτερο πάσο της έλασης χωρίς λίπανση το φαινόμενο της κροκοδειλίασης. Κατά το φαινόμενο αυτό, τα δύο ελάσματα αποκολλήθηκαν το ένα από το άλλο, τείνοντας να ακολουθήσουν την καμπυλότητα των ραούλων. Αυτό συνέβη όταν το ποσοστό μείωσης του πάχους του ελάσματος ήταν μικρότερο από 10 %. Τότε αναπτύχθηκαν έντονες εφελκυστικές δυνάμεις, οι οποίες σε συνδυασμό με τις παραμένουσες τάσεις, υπερέβησαν την αντοχή της συγκόλλησης.



Σχ. 55: Φωτογραφία του ελάσματος που παρουσίασε κροκοδειλίαση

Για να προσομοιώσουμε το φαινόμενο αυτό, για την ένωση των δύο ελασμάτων στο μοντέλο μας χρησιμοποιήσαμε επαφή tiebreak surface to surface, κατά την οποία τα δύο ελάσματα έχουν κοινούς κόμβους. Η επαφή αυτή έχει την ιδιότητα, όταν οι ορθές και οι διατμητικές τάσεις που εφαρμόζονται στους κόμβους αυτούς ξεπεράσουν ένα όριο, να σπάει η ένωσή τους και τα δύο ελάσματα να αποκολλώνται. Η συνθήκη που περιγράφει τη συμπεριφορά του υλικού στους κόμβους αυτούς είναι :

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFLS}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{SFLS}\right)^2 \geq 1$$

όπου  $\sigma_n$  και  $\sigma_s$  η ορθή και η διατμητική τάση. Με τους συντελεστές NFLS και SFLS θέτουμε τα όρια αντοχής των κοινών κόμβων στις ορθές και τις διατμητικές τάσεις.

Για τις προσομοιώσεις μας οι συντελεστές αυτοί έχουν τις τιμές :

$$NFLS = 200 \text{ MPa}$$

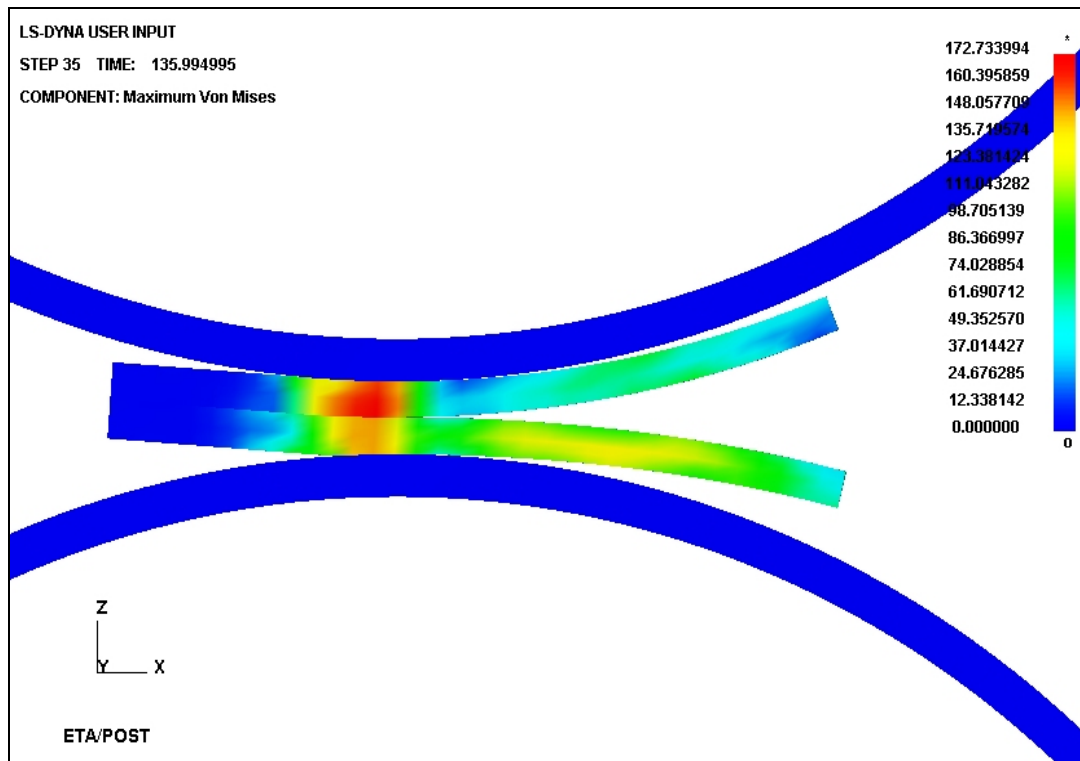
και

$$SFLS = 120 \text{ MPa}$$

Η τιμή του συντελεστή NFLS είναι περίπου η μέση τιμή των ορίων διαρροής των δύο υλικών στο πρώτο πάσο. Η τιμή του συντελεστή SFLS προκύπτει από τον συντελεστή NFLS σύμφωνα με τον τύπο :

$$SFLS = \frac{NFLS}{\sqrt{3}}$$

Κατά τις προσομοιώσεις, το μοντέλο μας συμπεριφέρθηκε πολύ σωστά και το έλασμα παρουσίασε κροκοδειλίαση μόνο στο πάσο που είχε παρουσιαστεί και στη διαδικασία των πειραματικών ελάσεων . Στην παρακάτω εικόνα (σχ. 56) βλέπουμε ένα στιγμιότυπο από την προσομοίωση.



Σχ. 56: Στιγμιότυπο από την έλαση του ελάσματος που παρουσίασε κροκοδειλίαση

## 6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παράγραφο αυτή συγκρίνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα που μας έδωσε το LS DYNA, και βγάζουμε συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του μοντέλου. Στον παρακάτω πίνακα γίνεται σύγκριση ανάμεσα στις πειραματικές και τις υπολογισμένες τιμές του φορτίου και της ροπής για την περίπτωση της έλασης χωρίς λίπανση.

ΠΑΣΟ	1	2	3	4	5	6	7	8
ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	14,91	5,29	15,57	12,17	18,42	14,56	27,56	35,29
ΦΟΡΤΙΟ ΕΛΑΣΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ (kN)	75	61	93	88	96	91	112	127
ΦΟΡΤΙΟ ΕΛΑΣΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΟ (kN)	71	47	80	78	105	100	144	181
ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ (%)	-5	-23	-14	-11	9	10	29	43
ΡΟΠΗ ΕΛΑΣΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ (N*m)	578	368	919	688	914	710	1004	1108
ΡΟΠΗ ΕΛΑΣΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΗ (N*m)	604	294	964	629	855	608	952	1093
ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΗΣ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ (%)	4	-20	5	-9	-6	-14	-5	-1

Συγκριτικός πίνακας για το φορτίο και τη ροπή στην έλαση χωρίς λίπανση

Παρατηρούμε ότι το φορτίο έλασης προσεγγίζεται με επιτυχία στα πάσα 1,3,4,5 και 6 με ποσοστά απόκλισης μικρότερα του 15 %. Στα πάσα αυτά η μείωση του πάχους του διμεταλλικού κυμαινόταν από 12 έως

19 %. Στο πάσο 2, όπου έχουμε τη μικρότερη μείωση πάχους (μόλις 5,29%), ο κώδικας υποτιμά το φορτίο. Στα πάσα 7 και 8, όπου λαμβάνει χώρα μεγάλη μείωση πάχους ( 27,56 % και 35,29 %), έχουμε υπερεκτίμηση του φορτίου. Δηλαδή, στις ακραίες τιμές μεταβολής του πάχους ο κώδικας δεν μπορεί να υπολογίσει το φορτίο με καλή προσέγγιση. Σχετικά με τη ροπή έλασης, βλέπουμε ότι σε όλα τα πάσα η προσέγγισή της είναι πολύ καλή. Πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι στα δύο τελευταία πάσα, όπως είδαμε και στην παράγραφο 4.6, μειώσαμε τους συντελεστές τριβής στο 50 % των τιμών που είχαν στα προηγούμενα πάσα. Αυτό μείωσε τις τιμές του φορτίου και της ροπής.

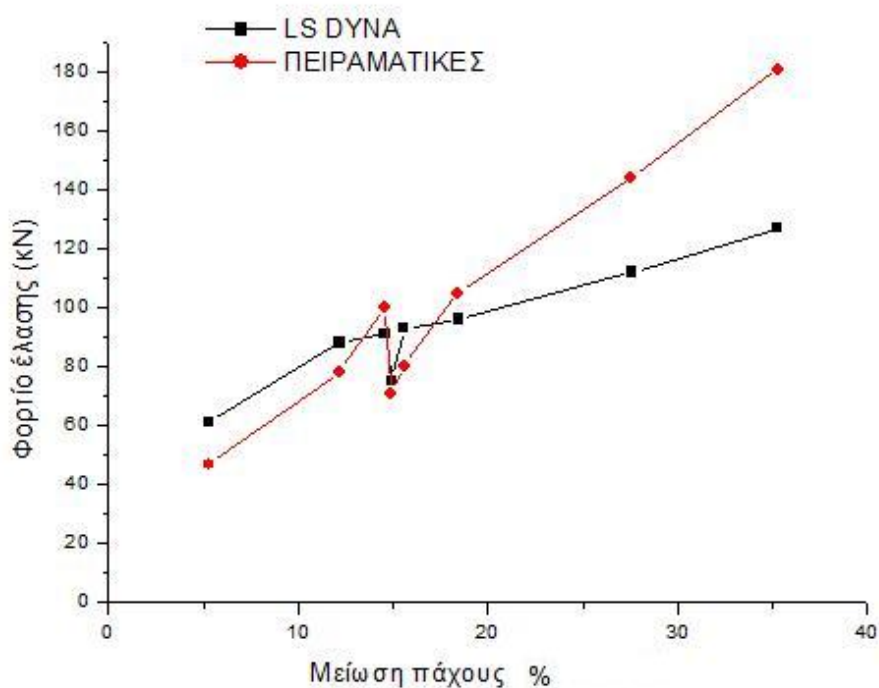
Σε παρόμοιες παρατηρήσεις καταλήγουμε και για την έλαση με λίπανση. Ακολουθεί ο πίνακας με τα στοιχεία σύγκρισης :

ΠΑΣΟ	1	2	3	4	5	6	7
ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΝΑ ΠΑΣΟ (%)	11,0	13,0	20,6	12,5	23,6	29,5	34,4
ΦΟΡΤΙΟ ΕΛΑΣΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ (kN)	70	78	84	81	99	106	119
ΦΟΡΤΙΟ ΕΛΑΣΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΟ (kN)	58	72	87	75	124	143	173
ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ (%)	-17	-8	4	-7	25	35	45
ΡΟΠΗ ΕΛΑΣΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ (N*m)	485	592	847	644	918	965	1006
ΡΟΠΗ ΕΛΑΣΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΗ (N*m)	508	641	872	516	943	1129	1180
ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΗΣ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ (%)	5	8	3	-20	3	17	17

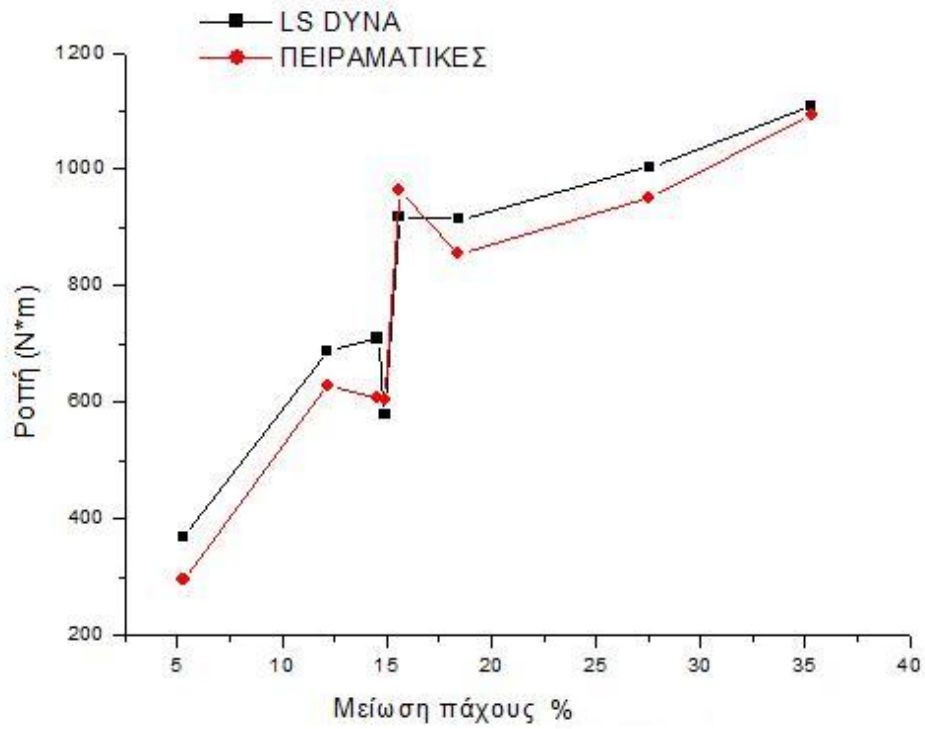
Συγκριτικός πίνακας για το φορτίο και τη ροπή στην έλαση με λίπανση

Βλέπουμε ότι το φορτίο έλασης προσεγγίζεται ικανοποιητικά στα πρώτα τέσσερα πάσα, όπου η μείωση του πάχους του διμεταλλικού κυμαίνεται από 11 έως 20,6 %. Στα πάσα 5, 6 και 7, όπου η μείωση είναι από 23,6 έως 34,4 % ο κώδικας πάλι υπερεκτιμά το φορτίο. Η ροπή και σε αυτή τη σειρά προσομοιώσεων προσεγγίζεται ικανοποιητικά σε όλα τα πάσα. Όπως και στην έλαση χωρίς λίπανση, στα τελευταία τρία πάσα μειώσαμε τις τιμές των συντελεστών τριβής στο 50 %.

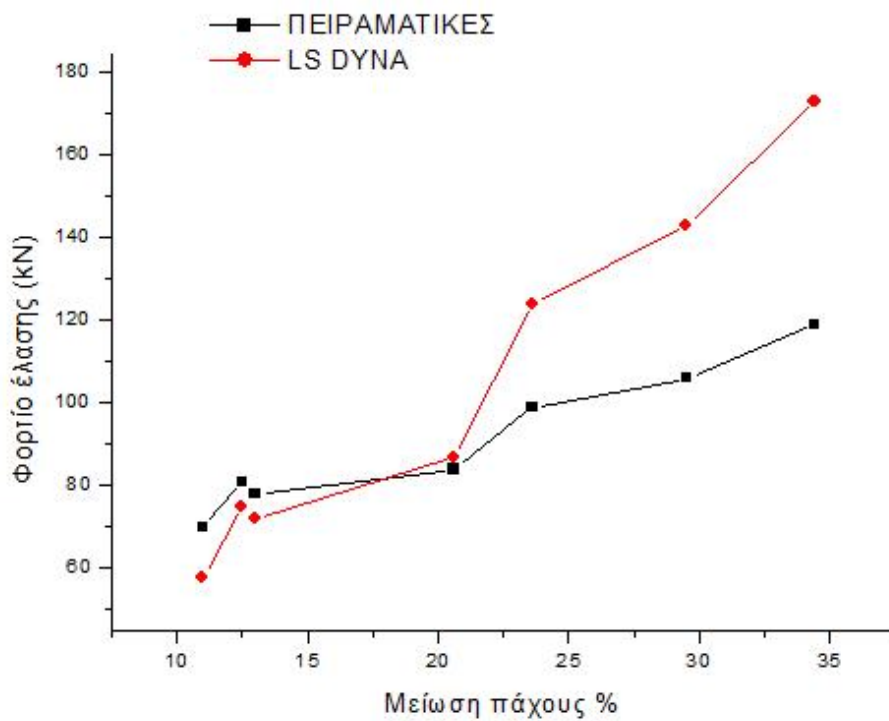
Ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα για τη συμπεριφορά του μοντέλου προκύπτει από την παρατήρηση της μεταβολής του φορτίου και της ροπής έλασης, σε συνάρτηση με τη μεταβολή της μείωσης του πάχους του διμεταλλικού ελάσματος σε ένα πάσο. Στα γραφήματα που ακολουθούν φαίνεται η ταυτόχρονη αύξηση του φορτίου και της ροπής όταν αυξάνεται η μείωση του πάχους, τόσο στις πειραματικές τιμές όσο και στα αποτελέσματα του LS DYNA για την έλαση χωρίς λίπανση.



Σχ. 57: Γράφημα του φορτίου προς τη μείωση πάχους στην έλαση χωρίς λίπανση

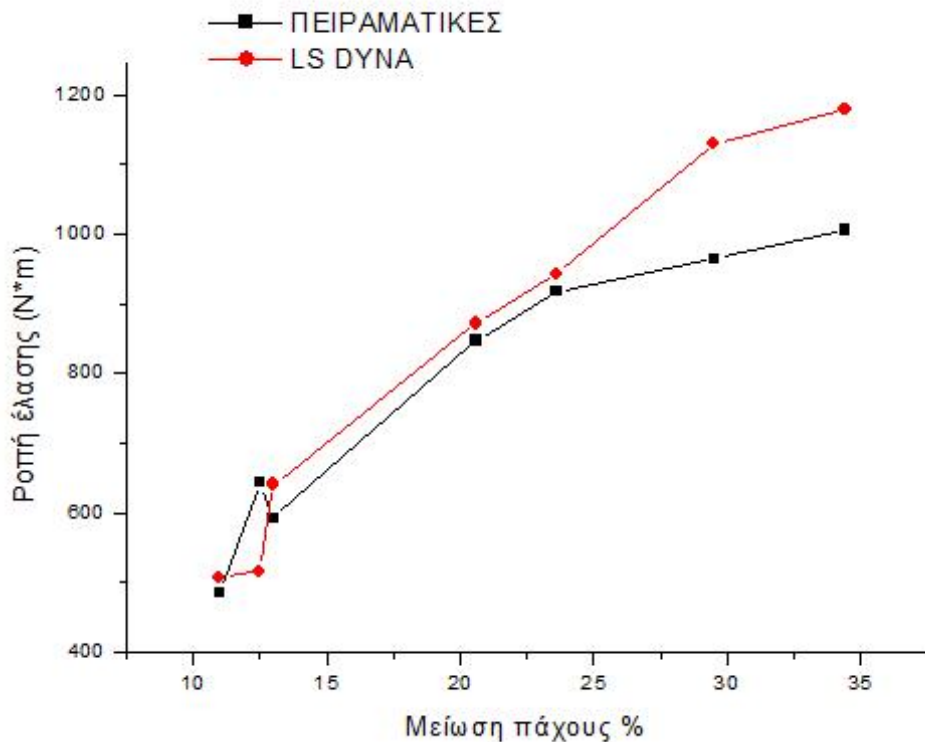


Σχ. 58: Γράφημα της ροπής προς τη μείωση πάχους στην έλαση χωρίς λίπανση



Σχ. 59: Γράφημα του φορτίου προς τη μείωση πάχους στην έλαση με λίπανση





Σχ. 60: Γράφημα της ροπής προς τη μείωση πάχους στην έλαση με λίπανση

Σε σημαντικά συμπεράσματα καταλήξαμε στην παράγραφο 5.5.0, όπου μελετήσαμε την επίδραση των συντελεστών τριβής, της ταχύτητας και του συντελεστή DT2MS. Ο συντελεστής τριβής με την αύξησή του προκάλεσε αύξηση του φορτίου και της ροπής. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των ραούλων κατά 1000 % δεν προκάλεσε μεταβολή στο φορτίο της έλασης, όμως μείωσε τη ροπή κατά 8,5 %. Το ποσοστό αυτό μπορεί να θεωρηθεί μικρό για την αύξηση της ταχύτητας που επιβάλαμε, και μπορεί επίσης να αποδοθεί και σε σφάλμα κατά τον υπολογισμό της ροπής. Τα γραφήματα ενέργειας (εσωτερικής και κινητικής) μας έδειξαν ότι δεν έχουμε αδρανειακά φαινόμενα στις προσομοιώσεις μας, που σημαίνει ότι η μεταβολή της πυκνότητας και της ταχύτητας δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Αυτό φάνηκε και στη διερεύνηση της επίδρασης του συντελεστή DT2MS, με τον οποίο αλλάζουμε την

πυκνότητα του μοντέλου. Ενώ εμείς αυξήσαμε την πυκνότητα παραπάνω από χίλιες φορές, το φορτίο και η ροπή δε μεταβλήθηκαν αισθητά.

Στην παράγραφο 5.4 συγκρίνοντας τις εσωτερικές ενέργειες με τις αντίστοιχες παραμορφώσεις ανά πάσο, παρατηρήσαμε ότι η εσωτερική ενέργεια του μοντέλου αυξάνεται με την αύξηση της παραμόρφωσης.

Ενδιαφέρον έχει να δούμε πώς ο κώδικας παρακολουθεί τη μείωση του πάχους των ελασμάτων αλουμινίου και χαλκού κατά τις ελάσεις.

ΠΑΣΟ	0	1	2	3	4	5	6	7	8
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΑΧΟΣ AL ΜΕΤΑ ΤΟ ΠΑΣΟ (mm)	4,18	3,50	3,29	2,83	2,43	2,05	1,70	1,23	0,80
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΑΧΟΣ CU ΜΕΤΑ ΤΟ ΠΑΣΟ (mm)	4,27	3,69	3,52	2,92	2,62	2,08	1,82	1,32	0,85
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΟ ΠΑΧΟΣ AL ΜΕΤΑ ΤΟ ΠΑΣΟ (mm)	4,18	3,61	3,36	2,83	2,50	2,03	1,78	1,29	0,90
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΟ ΠΑΧΟΣ CU ΜΕΤΑ ΤΟ ΠΑΣΟ (mm)	4,27	3,63	3,50	2,99	2,60	2,21	1,81	1,38	0,93

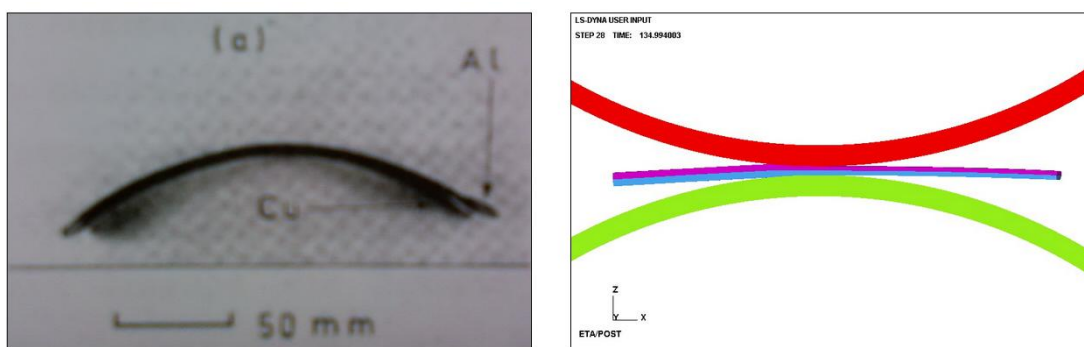
Συγκριτικός πίνακας πάχους εξόδου των ελασμάτων στην έλαση χωρίς λίπανση

ΠΑΣΟ	0	1	2	3	4	5	6	7
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΑΧΟΣ AL ΜΕΤΑ ΤΟ ΠΑΣΟ (mm)	4,10	3,72	3,16	2,54	2,13	1,59	1,23	0,74
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΑΧΟΣ CU ΜΕΤΑ ΤΟ ΠΑΣΟ (mm)	4,19	3,75	3,32	2,64	2,40	1,87	1,31	0,86
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΟ ΠΑΧΟΣ AL ΜΕΤΑ ΤΟ ΠΑΣΟ (mm)	4,10	3,73	3,26	2,60	2,24	1,67	1,19	0,87
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΟ ΠΑΧΟΣ CU ΜΕΤΑ ΤΟ ΠΑΣΟ (mm)	4,19	3,76	3,28	2,69	2,34	1,88	1,37	0,90

Συγκριτικός πίνακας πάχους εξόδου των ελασμάτων στην έλαση με λίπανση

Συγκρίνοντας τα πειραματικά πάχη με τα υπολογισμένα, παρατηρούμε ότι σε όλα τα πάσα το πάχος που υπολογίζει ο κώδικας είναι λίγο μεγαλύτερο του πειραματικού. Αυτό οφείλεται στην ελαστική συμπεριφορά του διμεταλλικού ελάσματος. Σε κάθε μοντέλο σχεδιάσαμε το διάκενο ανάμεσα στα ράουλα να είναι όσο το πειραματικό πάχος εξόδου του ελάσματος από το πάσο αυτό. Το έλασμα όμως στην προσομοίωση ανακτά μέρος του πάχους που είχε πριν την έλαση λόγω της ελαστικής παραμόρφωσης που είχε υποστεί. Η διαφορά αυτή επειδή είναι μικρή, δε θεωρούμε ότι αποτελεί σημαντικό λόγο αποκλίσης των τιμών του φορτίου και της ροπής από τις πειραματικές.

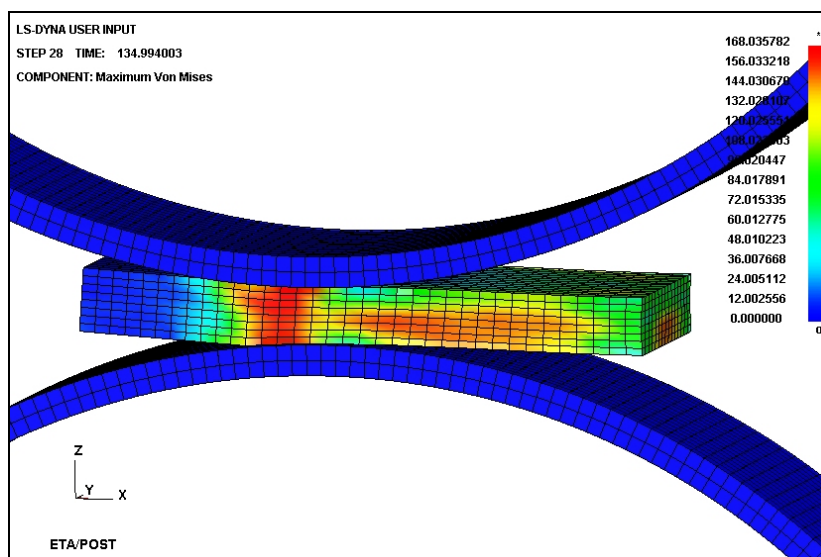
Τέλος, οφείλουμε να κάνουμε παρατήρηση για την καμπυλότητα του ελάσματος κατά τις ελάσεις προσομοίωσης και να τη συγκρίνουμε με την πειραματική. Τόσο στο πείραμα όσο και στην προσομοίωση το έλασμα καμπυλώνει προς τα κάτω, δηλαδή προς το έλασμα χαλκού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το έλασμα του αλουμινίου, επειδή είναι πιο μαλακό, επιμηκύνεται περισσότερο από το χαλκό. Στην εικόνα που ακολουθεί (σχ. 61) βλέπουμε το έλασμα όπως καμπύλωσε μετά από τις διαδοχικές πειραματικές ελάσεις. Δίπλα του βλέπουμε την καμπύλωση του διμεταλλικού ελάσματος στην προσομοίωση μετά από ένα πάσο. Αν στην προσομοίωση το ίδιο έλασμα μπορούσε να περάσει από όλα τα πάσα, η καμπύλωσή του θα ήταν το ίδιο έντονη με την πειραματική.



Σχ. 61: Αριστερά η καμπύλωση του ελάσματος στο πείραμα και δεξιά στην προσομοίωση

Η απόκλιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από τα πειραματικά αποτελέσματα οφείλεται σε μεγάλο βαθμό από τους παρακάτω παράγοντες :

- Η περιγραφή της αλλαγής συμπεριφοράς των υλικών του διμεταλλικού ελάσματος κατά το πέρασμά του από τα διαδοχικά πάσα είναι προσεγγιστική. Επιπλέον, το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης που έχουμε στη διάθεσή μας είναι για τα υλικά πριν την εκρηκτική συγκόλληση. Είναι βέβαιο όμως, ότι κατά τη συγκόλληση δημιουργήθηκαν παραμένουσες τάσεις που επηρέασαν τη συμπεριφορά τους στις ελάσεις που ακολούθησαν.
- Η δημιουργία νέων παραμενουσών τάσεων σε κάθε νέο πάσο, που έρχονται να προστεθούν στις ήδη υπάρχουσες. Στην πειραματική διαδικασία το έλασμα δεν υποβαλλόταν σε θερμική κατεργασία εξομάλυνσης αυτών. Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνονται οι τάσεις που παραμένουν σε ένα έλασμα μετά την έλασή του.



Σχ. 62: Εικόνα από τις παραμένουσες τάσεις στο έλασμα

- Οι συνθήκες τριβής στις επαφές του μοντέλου είναι άγνωστες. Οι τιμές που ορίσαμε στις προσομοιώσεις προέκυψαν από βάση δεδομένων για συντελεστές τριβής.
- Τα ράουλα έχουν θεωρηθεί απαραμόρφωτα για απλοποίηση του μοντέλου. Στη θερμή έλαση, όπου το υλικό ρέει πιο εύκολα κατά την παραμόρφωσή του και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι μικρότερες, η παραδοχή αυτή μπορεί να γίνει δίχως να επηρεάζονται τα αποτελέσματα. Στην ψυχρή έλαση όμως, επειδή έχουμε ανάπτυξη μεγαλύτερων φορτίων, χρειάζεται το μοντέλο να λαμβάνει υπόψη και την παραμόρφωση των ραούλων.
- Η διακριτοποίηση δημιούργησε επιφάνειες με ακμές, οι οποίες μπορεί να προσεγγίζουν τις πραγματικές επιφάνειες, αλλά δεν συμπεριφέρονται ακριβώς το ίδιο. Αυτό φαίνεται στα γραφήματα φορτίου και ροπής χωρίς τη χρήση φίλτρου, όπου οι καμπύλες παρουσιάζουν έντονα πριονωτή μορφή (fluctuation).
- Η ροπή έλασης μετριέται στιγμιαία και όχι σε όλη τη διάρκεια κάθε έλασης. Αυτό δε μας επιτρέπει να μελετήσουμε ικανοποιητικά το μέγεθος αυτό και να βγάλουμε μία μέση τιμή.
- Η αύξηση της ταχύτητας έλασης έχει μια μικρή επίδραση στη ροπή έλασης.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι το μοντέλο, και γενικότερα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, καταφέρνει να προσομοιώσει την έλαση διαδοχικών πάσων ικανοποιητικά. Ο κώδικας του LS DYNA μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για έναν έμπειρο μηχανικό, ο οποίος χρειάζεται να προσεγγίσει μία κατεργασία.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. A.G. Mamalis, Vaxevanidis N. M., Szalay A. and Prohaszca J.  
Fabrication of Al/Cu bimetallics by explosive cladding and rolling  
J. of Mat. Processing Tech.,44,99,1994
2. R. Shivpuri and P. C. Chou  
A Comparative Study of Slab, Upper Bound and Finite Element  
Methods For Predicting Force and Torque in Cold Rolling  
Int. J. Mach. Tools Manufact. 29(3),1989,pp.305-322
3. L. A. Nikitina  
Status and Prospects for the Manufacture of Multilayered and  
Bimetallic Metal Products  
Metallurgist 42(8),1998
4. Ann Bettina Richelsen, Viggo Tvergaard  
3D Analysis of Cold Rolling Using a Constitutive Model for Interface  
Friction  
Int. J. Mech. Sci., 46, pp. 653-671
5. Z. Y. Jiang, A. K. Tieu  
A Simulation of Three-Dimensional Metal Rolling Processes by  
Rigid-Plastic Finite Element Method  
J. of Mat. Processing Tech.,112, pp. 144-151
6. Pierre Montmitonnet  
Hot and Cold Strip Rolling Processes  
Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 195, 6604-6625
7. J. J. Anza, M. A. Gutierrez  
Metal Forming Simulation – Numerical Efficiency in Rolling  
Processes, Part 1  
Engin. Comput. 15(8), pp. 1049-1072

8. A.G. Mamalis, Vaxevanidis N. M., Szalay A.  
Cold Rolling of Multi-Layer Explosively Cladded Strips  
Int. J. Mach. Tools Manufact. 36(9), pp. 1033-1044
9. Han Han  
Determination of Mean Flow Stress and Friction Coefficient by the  
Modified Two-Specimen Method in Cold Rolling  
J. of Mat. Processing Tech.,159, pp. 401-408
10. J. Y. Chin, S. W. Lee, S. H. Paik, W. S. Chung  
The Effects of Numerical Result and Computing Time Due to Mass  
Scaling in Rolling Analysis  
8<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference, Fluid/Structure
11. YU Hai-liang, LIU Xiang-hua, ZHAO Xian-ming, WU Di, Y. Kusaba  
Explicit Dynamic FEM Analysis of Multipass Vertical-Horizontal  
Rolling  
J. of Iron and Steel Res., 13(3), 26-30
12. Y. Liu, J. Lin  
Modelling of Microstructural Evolution in Multipass Hot Rolling  
J. Mater. Process. Tech.,143-144, pp. 723-728
13. A.G. Mamalis, Vaxevanidis N.M., Szalay A.  
Fabrication of Trimetallic Strips by Explosive Cladding and Rolling  
J. Mater. Process. Tech.,45, pp. 407-414
14. A.G. Mamalis, Vaxevanidis N.M., A.P Karafillis  
Surface Integrity and Formability of Steel Sheet  
VDI Verlag, Dusseldorf, 1990
15. D. Rydz  
The Optimal Conditions for Production of Bimetallic Plate ST36K +  
OH13J in Asymmetrical Hot Rolling  
J. Mater. Process. Tech.,157-158, pp. 609-612

16. LIU Xiang-hua, SHI Xu, LI Shan-ging, XU Jian-yong, WANG Guo-dong  
FEM Analysis of Rolling Pressure Along Strip Width in Cold Rolling Process  
J. of Iron and Steel Res., 14(5), 22-26
17. A. K. Tieu, Z. Y. Jiang, C. Lu  
A 3D Finite Element Analysis of the Hot Rolling of Strip With Lubrication  
J. Mater. Process. Tech., 125-126, pp. 638-644
18. Su Hai Hsiang, Sheng Li Lin  
Study of a 3D FEM Combined With the Slab Method for Shape Rolling  
J. Mater. Process. Tech., 100, pp. 74-79
19. Anup A. Kuldiwar  
Finite Element Modeling of Strip Curvature During Hot Rolling  
9<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference, Metal Forming (2)
20. Henry H. Fong, Jonas Edberg  
Grid-Based LS-DYNA Solutions  
5<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference, Computing Technology (2)
21. X. Duan, T. Sheppard  
Three Dimensional Thermal Mechanical Coupled Simulation During Hot Rolling of Aluminium Alloy 3003  
Int. J. Mech. Sc., 44, 2155-2172
22. Yeong-Maw Hwang, Gow-Yi Tzou  
An Analytical Approach to Asymmetrical Hot-Sheet Rolling Considering the Effects of the Shear Stress and Internal Moment at the Roll Gap  
J. Mater. Process. Tech., 52, pp. 399-424



23. H. Gao, S.C. Ramalingam, G.C. Barder, G. Chen  
Analysis of Asymmetrical Cold Rolling With Varying Coefficients of friction  
J. Mater. Process. Tech.,124, pp. 178-182
24. A.G. Mamalis, Vaxevanidis N. M., D.I. Pantelis  
On the Rolling of Bimetallic Explosively Cladded Plates  
Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on the Tech. of Plast., China, 874, 1993
25. Crossland B., Williams J. D.  
Explosive Welding of Metals and its Applications  
Clarendon Press, Oxford, 1982
26. R.A. Patterson,  
Explosive Bonding, in: D.L Olson  
Welding: Theory and Practise, Elsevier, Amsterdam, 1990,  
pp.265-291
27. Livermore Software Technology Corporation : LS-DYNA Keyword  
User's Manual
28. Livermore Software Technology Corporation : LS-DYNA Keyword  
Theory Manual
29. Livermore Software Technology Corporation : LS-DYNA Pre  
Processing Manual
30. Livermore Software Technology Corporation : LS-DYNA Post  
Processing Manual
31. Livermore Software Technology Corporation : LS-DYNA Graph  
Processing Manual
32. Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών, Μεταλλικά Τεχνικά  
Υλικά
33. Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών