

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΜΕΛΕΤΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗΣ ΨΑΛΙΔΙΣΜΟΥ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ
ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΕΣΦΑΛΜΕΝΗΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΗΣ ΧΑΡΗΣ ΜΕ ΤΗ
ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ»**

ΦΩΤΙΟΣ Δ. ΜΠΑΝΤΕΣ

Επιβλέπων: ΓΕΩΡΓΙΟΣ-ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΣ ΒΟΣΝΙΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2017

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας και ταυτόχρονα τις σπουδές μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον κ. Γεώργιο-Χριστόφορο Βοσνιάκο, για την επίβλεψη της εργασίας, τη συνεχή υποστήριξη και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκειά της, την υπομονή που έδειξε και την εξαιρετική συνέπειά του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο, για την πολύ σημαντική βοήθεια που πρόσφερε στο κομμάτι των πεπερασμένων στοιχείων με τις εξειδικευμένες γνώσεις και την εμπειρία του.

Ευχαριστώ επίσης, την εταιρία Gizelis A.E. για την παροχή των σχεδίων της μηχανής και συγκεκριμένα τον κ. Γιάννη Σεισάκη για την βοήθεια του στην κατανόηση του προβλήματος και τις διευκρινήσεις του.

Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συνεχή στήριξή τους, χωρίς την οποία δεν θα είχα καταφέρει να ξεκινήσω, ούτε να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	4
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	5
1.1 Παραγωγή και χρήση ελασμάτων	5
1.2 Η σημασία του ψαλιδισμού.....	7
1.3 Η δομή της εργασίας	8
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	9
Κεφάλαιο 3 Η μηχανική του ψαλιδισμού.....	16
3.1 Ο μηχανισμός της κοπής	16
3.2 Έκφραση της δυναμικής του συστήματος	18
3.3 Σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων	20
3.4 Εργαλειομηχανές Ψαλιδισμού.....	22
Κεφάλαιο 4 Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων	25
4.1 Κατασκευή των εξισώσεων των πεπερασμένων στοιχείων	26
4.2 Επίλυση του συστήματος	29
4.3 Χαρακτηριστικά της μεθόδου των κεντρικών διαφορών	31
4.4 Διαδικασία ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία	31
Κεφάλαιο 5 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων	33
5.1 Κατασκευή της γεωμετρίας.....	33
5.2 Δημιουργία πλέγματος	37
5.3 Οριακές συνθήκες	41
5.4 Μοντέλο υλικού	41
5.5 Επιπλέον παράμετροι μοντέλου.....	46
5.6 Έλεγχος μοντέλου	50
Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα	53
6.1 Κοπή με κανονική χάρη	53
6.2 Κοπή με αυξημένη χάρη	57
6.3 Κοπή με αυξημένη χάρη και απαραμόρφωτη μηχανή	61
6.4 Κοπή ελάσματος με αυξημένη χάρη συνυπολογίζοντας τον ρυθμό παραμόρφωσης	63
6.5 Καταπόνηση μηχανής	64
6.6 Σύγκριση δυνάμεων	65
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία.....	68
7.1 Συμπεράσματα	68
7.2 Μελλοντική εργασία	68
Βιβλιογραφία.....	69

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση ψαλιδισμού μεταλλικού ελάσματος με αυξημένη χάρη. Η αυξημένη χάρη αποτελεί μια μη επιθυμητή κατάσταση που μπορεί να συμβεί συχνά ως αποτέλεσμα κακού χειρισμού. Συγκεκριμένα, σκοπός είναι ο υπολογισμός των δυνάμεων σε αυτή την περίπτωση καθώς και η εκτίμηση των επιπτώσεων τους στην μηχανή. Οι υπολογισμοί αυτοί έγιναν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Παρουσιάζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της κατεργασίας, οι εξισώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα και η διαδικασία σύστασης της μητρικής μορφής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιώντας εμπορικό λογισμικό, γίνεται απλοποίηση της γεωμετρίας και κατασκευάζεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του συστήματος εργαλειομηχανής-ελάσματος. Από την επίλυση του μοντέλου εξάγονται αποτελέσματα για την περίπτωση της κανονικής κοπής και για την περίπτωση αυξημένης χάρης, σε διαφορετικές παραλλαγές, αξιολογούνται και συγκρίνονται μεταξύ τους.

Abstract

The subject of this diploma thesis is the analysis of the guillotining process of a metallic sheet, with increased clearance. An increased clearance corresponds to an unwanted situation which may occasionally occur, as a result of bad handling. In particular, our purpose is to calculate the loads in this case and estimate their impact on the machine. In order to achieve that, the finite element method was used. The qualitative features of the shearing process, as well as the equations that describe the problem and the procedure of assembling the matrix form of the finite element method are presented. Using commercial finite element software, the geometry of the machine was simplified and the finite element model of the system was constructed. By solving the model, results were obtained concerning the normal case of the shearing process and the case with increased clearance in different variations. The results were evaluated and compared.

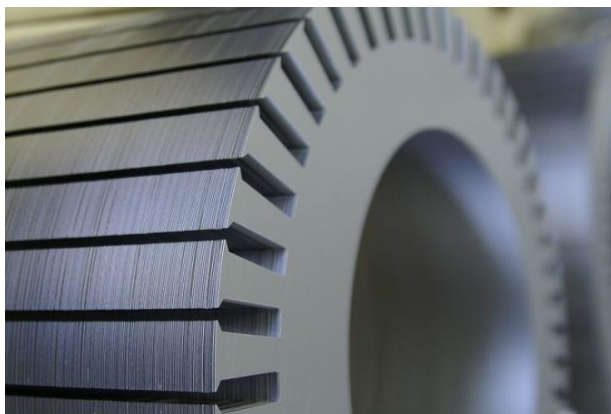
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση της κοπής ελάσματος μέσω της κατεργασίας του ψαλιδισμού, με έμφαση στην καταπόνηση της μηχανής καθώς και στις επιπτώσεις κακού χειρισμού.

1.1 Παραγωγή και χρήση ελασμάτων

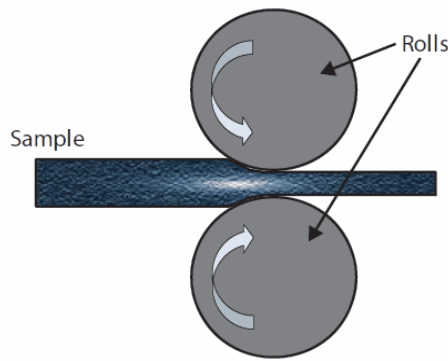
Έλασμα ονομάζεται ένα επίπεδο μεταλλικό κομμάτι μικρού πάχους. Τα μεταλλικά ελάσματα αποτελούν σημαντικό κομμάτι της βιομηχανίας, αφού απαντώνται σε μεγάλο πλήθος κατασκευών και προϊόντων. Οι εφαρμογές τους ποικίλλουν από απλά προϊόντα καθημερινής χρήσης όπως ένα κουτάκι αναψυκτικού έως μεγάλης κλίμακας κατασκευές όπως το κύριο σώμα ενός πλοίου. Συνήθεις κατασκευές παραγόμενες από μορφοποίηση και συναρμολόγηση ελασμάτων είναι το σώμα και τα πτερύγια των αεροπλάνων, το κέλυφος των αυτοκινήτων, ηλεκτρικοί κινητήρες, μεταλλικά κτίρια, κοντέινερ, δεξαμενές.

Η χρήση ελασμάτων στις κατασκευές προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα. Η δυνατότητα μείωσης του βάρους τα καθιστά κατάλληλα για ελαφρές κατασκευές (αυτοκινητοβιομηχανία, αεροναυπηγική, αεροδιαστημική). Το κόστος παραγωγής και διαμόρφωσης μπορεί να είναι αρκετά χαμηλό, αν και εξαρτάται πάντα από την αυστηρότητα των προδιαγραφών του τελικού προϊόντος.



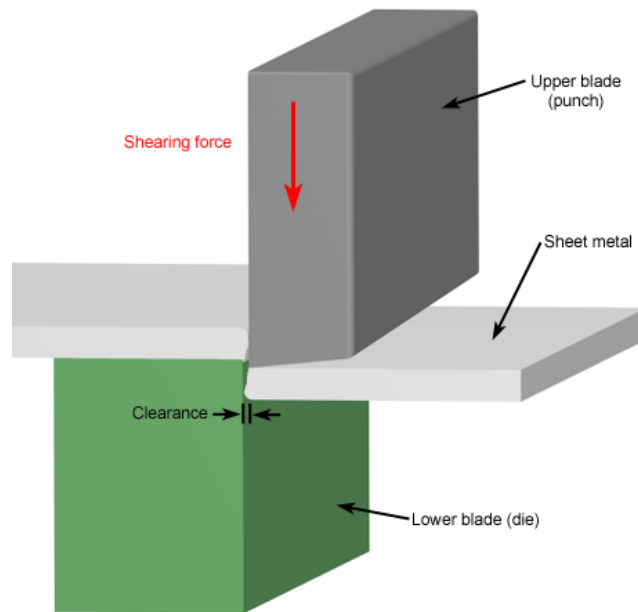
Εικόνα 1: Ρότορας από φύλλα χάλυβα (laminated steel)

Η βασική κατεργασία για την παραγωγή ενός ελάσματος είναι η έλαση. Κατά την έλαση, το αρχικό τεμάχιο διέρχεται μέσα από δύο αντίθετα περιστρεφόμενα ρόουλα δεχόμενο θλιπτικές δυνάμεις που οδηγούν στη μείωση του αρχικού του πάχους. Για την παραγωγή ενός λεπτού ελάσματος απαιτείται ένας αριθμός από διαδοχικές ελάσεις (πάσα) ξεκινώντας συνήθως από μια πλάκα (προϊόν χύτευσης). Διάφορα υλικά μπορούν να υποβληθούν στην κατεργασία της έλασης. Τα κυριότερα είναι ο χάλυβας, το αλουμίνιο, ο χαλκός, ο ορείχαλκος, το τιτάνιο, το νικέλιο με τα δύο πρώτα να είναι τα πιο διαδεδομένα στη βιομηχανία. Οι μαλακοί χάλυβες χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της ευκολίας διαμόρφωσης σε συνδυασμό με την υψηλή αντοχή τους ενώ πιο ισχυροί χάλυβες χρησιμοποιούνται σε πιο απαιτητικές περιπτώσεις, όπως οι TRIP στην αυτοκινητοβιομηχανία (Kalpakjian, & Schmid, 2003). Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται σε οικιακές συσκευές και είδη συσκευασίας όπου απαιτείται προστασία από τη διάβρωση ενώ μαζί με το τιτάνιο έχει σημαντική θέση σε εφαρμογές της αεροναυπηγικής και της αεροδιαστημικής.



Εικόνα 2: Ψυχρή Έλαση

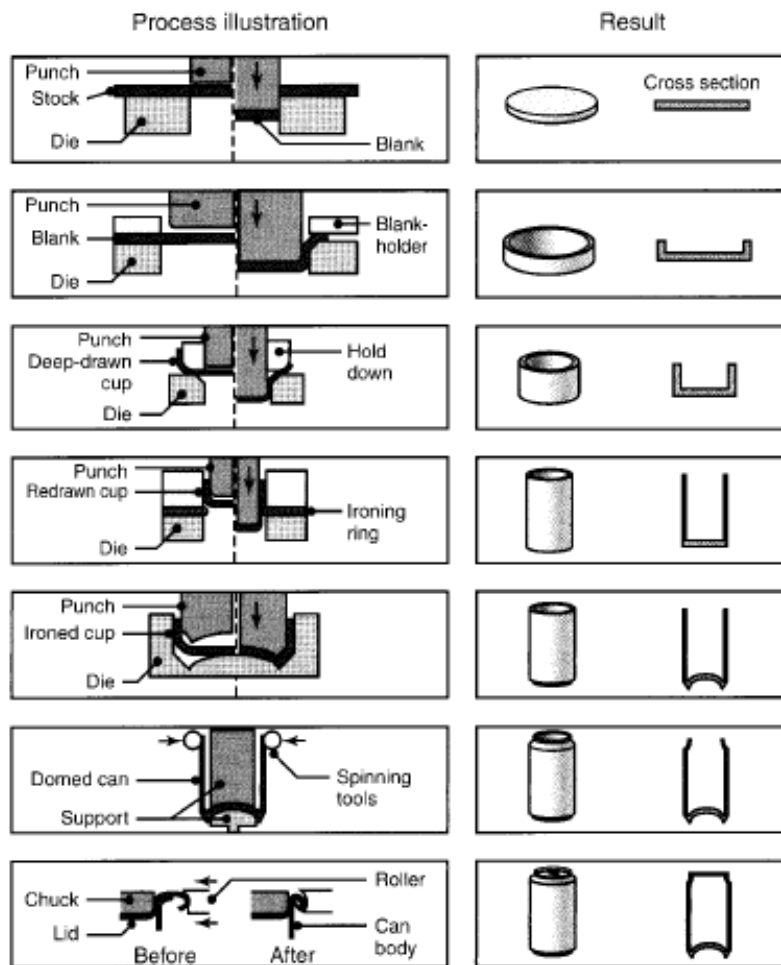
Η επόμενη φάση που συνήθως ακολουθεί την έλαση είναι ο τεμαχισμός των ελασμάτων που έχουν προκύψει σε μικρότερα, κατάλληλων διαστάσεων (blanks). Οι κατεργασίες με την οποία υλοποιείται αυτό παραδοσιακά είναι η απότμηση, δηλαδή ο αποχωρισμός ενός τμήματος του αρχικού ελάσματος κατά μήκος μιας ανοιχτής ή κλειστής γραμμής (blanking). Η πρώτη περίπτωση ονομάζεται ψαλιδισμός (shearing) όπου το έλασμα κόβεται από δύο λάμες, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων κατά μία ευθεία γραμμή. Αυτή είναι η κατεργασία που θα μας απασχολήσει στη συνέχεια. Στην δεύτερη, έχουμε μια μήτρα και ένα έμβολο συγκεκριμένου σχήματος, οδηγούμενο συνήθως από μία μηχανική ή υδραυλική πρέσα. Η γραμμή αποχωρισμού έχει τη μορφή του συνόρου των δύο συνεργαζόμενων εργαλείων.



Εικόνα 3: Ψαλιδισμός ευθείας γραμμής.

Υπάρχουν και μη συμβατικές κατεργασίες που χρησιμοποιούνται ευρέως όπως η κοπή με laser, η κοπή με πλάσμα και η κοπή με δέσμη νερού. Τα προϊόντα της απότμησης υποβάλλονται σε περαιτέρω κατεργασίες ώστε να καταλήξουμε στη τελική μορφή, κυρίως διαμόρφωσης, αλλά και επιπλέον αποβολής υλικού. Οι βασικότερες κατεργασίες διαμόρφωσης είναι η κάμψη (bending) και η βαθιά κοίλανση (deep drawing) ενώ έχουν αναπτυχθεί πολλές μη συμβατικές μέθοδοι διαμόρφωσης όπως είναι η εκρηκτική διαμόρφωση (explosive forming), η ηλεκτρομαγνητική διαμόρφωση (magnetic-pulse forming), η διαμόρφωση με laser (laser forming). Εκτός από τη διαμόρφωση είναι απαραίτητο πολλές φορές να γίνουν επιπλέον αποτμήσεις συγκεκριμένου σχήματος, για παράδειγμα διάνοιξη σπών κλπ. Τα διαμορφωμένα ελάσματα μπορεί να αποτελούν αυτοτελή προϊόντα ή να συναρμολογούνται με άλλα. Το αποτέλεσμα των παραπάνω εξαρτάται, εκτός από τις συνθήκες της εκάστοτε κατεργασίας διαμόρφωσης ή τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και από το αποτέλεσμα του ψαλιδισμού που έχει προηγηθεί. Η ποιότητα των ακμών του ελάσματος μετά την κοπή είναι από τους παράγοντες που επηρεάζουν την

μορφοποίηση που θα ακολουθήσει, η την συγκόλληση με κάποιο άλλο έλασμα. Οι παραμένουσες τάσεις και η ελαστική επαναφορά του ελάσματος έχουν επίσης αρνητικές επιπτώσεις στην μετέπειτα επεξεργασία.



Εικόνα 4:Κουτί αναψυκτικού. Διαδοχικές κατεργασίες επεξεργασίας ελάσματος.

1.2 Η σημασία του ψαλιδισμού

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της μείωσης του κόστους τους, μέθοδοι όπως η κοπή με laser, πλάσμα και νερό έχουν αντικαταστήσει πολλές κατεργασίες απότμησης. Οι κατεργασίες αυτές προσφέρουν καλύτερη ποιότητα κοπής και μπορούν να προγραμματιστούν ανάλογα ώστε να κόψουν οποιοδήποτε σχήμα. Σε πολλές περιπτώσεις, για παράδειγμα όταν πρόκειται για λεπτό έλασμα, μπορούν να είναι και πολύ πιο γρήγορες. Παρά τα πλεονεκτήματά τους όμως, κατά την κοπή μεγάλου μήκους και πλάτους φύλλων σε παραλληλόγραμμα σχήματα, ο απλός ψαλιδισμός φαίνεται προς το παρόν αναντικατάστατος. Εδώ, ο ψαλιδισμός μπορεί να είναι ταχύτερος από τις μη συμβατικές μεθόδους και ανταγωνίζεται την παραγωγικότητά τους. Βέβαια πλέον, οι μηχανές ψαλιδισμού υποστηρίζονται από βιομηχανικούς υπολογιστές και μικροϋπολογιστές που προσδίδουν επιπλέον ακρίβεια, ευκολία χρήσης και ταχύτητα παραγωγής. Τέλος, ένα από τους πιο σημαντικούς λόγους που ο ψαλιδισμός προτιμάται σε μια βιομηχανία είναι το κόστος. Το κόστος επένδυσης είναι σίγουρα χαμηλότερο, αλλά υπάρχει διαφορά και στο κόστος λειτουργίας αφού μια μηχανή ψαλιδισμού απαιτεί λιγότερη ισχύ.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, το αποκομμένο έλασμα πρέπει να ικανοποιεί κάποιες απαιτητικές προδιαγραφές, γεγονός που μας οδηγεί στην ανάγκη για προσεκτικό καθορισμό των παραμέτρων της κατεργασίας. Οι πιο βασικές παράμετροι που μπορούν να μεταβληθούν ανάλογα είναι το διάκενο και η ταχύτητα διάτμησης. Σημαντικό ρόλο στην κοπή παίζει και η γεωμετρία της εργαλειομηχανής, η γωνία κλίσης (rake angle) της άνω λεπίδας του υλικού και η αιχμηρότητα των κοπτικών εργαλείων. Η κοπή μεγάλου μήκους ελασμάτων, παρουσιάζει τον κίνδυνο εμφάνισης μεγάλων αποκλίσεων στη μία άκρη σε

σχέση με την άλλη. Επομένως απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός μιας στιβαρής εργαλειομηχανής, λαμβάνοντας υπόψη την παραμόρφωσή της κατά την κοπή.

1.3 Η δομή της εργασίας

Στα κεφάλαια που θα ακολουθήσουν θα μελετηθεί η κατεργασία του ψαλιδισμού χαλύβδινου ελάσματος (λαμαρίνας) σε ένα υδραυλικό ψαλίδι με μήκος κοπής 3100mm, και συγκεκριμένα η περίπτωση όπου το διάκενο είναι μεγαλύτερο από το προβλεπόμενο ως αποτέλεσμα λάθος εισαγωγής παραμέτρων από τον χειριστή. Η υπό μελέτη εργαλειομηχανή διαθέτει ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου μέσω της οποίας ο χειριστής πρέπει να δώσει ως είσοδο το πάχος του ελάσματος που πρόκειται να κοπεί. Το διάκενο υπολογίζεται και ρυθμίζεται αυτόματα. Είναι αρκετά συχνό όμως το φαινόμενο ο χειριστής να πληκτρολογήσει λάθος τον αριθμό και το διάκενο να ρυθμιστεί μεγαλύτερο. Ως αποτέλεσμα δεν είναι δυνατή η κοπή και η εργαλειομηχανή δέχεται φορτία, για την παραλαβή των οποίων δεν είναι σχεδιασμένη. Έτσι, η εργαλειομηχανή μπορεί να υποστεί μόνιμες παραμορφώσεις που αλλοιώνουν την ακρίβεια της κοπής.

Αρχικά, θα μελετηθεί η μηχανική της κατεργασίας και θα παρουσιαστούν οι εξισώσεις τις οποίες θα χρησιμοποιήσουμε στην μελέτη μας καθώς και η δομή των εργαλειομηχανών ψαλιδισμού. Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να προσομοιώσουμε την κοπή με δεδομένες παραμέτρους και συνθήκες. Θα εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με τις δυνάμεις κοπής, την επίδρασή τους στην εργαλειομηχανή και τη σημασία των διαφόρων παραμέτρων.

Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Analysis of Guillotining and Slitting Finite Element Simulations (Wisselink, 2000)

Ο Wisselink το 2000 χρησιμοποίησε πεπερασμένα στοιχεία για την ανάλυση του ψαλιδισμού(Guillotining) και έκανε σύγκριση των αποτελεσμάτων του με πειραματικά αποτελέσματα. Η μελέτη συμπεριλάμβανε την κατασκευή ενός 2D και ενός 3D μοντέλου.

Μοντέλο υλικού

Χρησιμοποίησε ένα ελαστοπλαστικό μοντέλο υλικού σε συνδυασμό με το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας του Ogane που βασίζεται στην συσσώρευση αστοχίας(damage accumulation) που είναι μια συνάρτηση των τάσεων και των παραμορφώσεων που έχουν προηγηθεί. Η αστοχία ξεκινά όταν η τιμή της συνάρτησης γίνει ίση με μια συγκεκριμένη τιμή που εξαρτάται από την παραμόρφωση θραύσης. Το μοντέλο αυτό αγνοεί την επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης(strain rate) και την επίδραση της θερμοκρασίας επομένως περιορίζεται σε μικρές ταχύτητες κοπής. Επίσης είναι λιγότερο ακριβές από μοντέλα αστοχίας τα οποία λαμβάνουν υπόψιν την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού πριν τη θραύση. Τέλος τοποθετήθηκε ρωγμή συγκεκριμένου σχήματος σε προκαθορισμένη θέση.

Πεπερασμένα στοιχεία

Το μοντέλο το πεπερασμένων στοιχείων υλοποιήθηκε με την περιγραφή (formulation) ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) που είναι ένας συνδυασμός των Lagrangian και Eulerian περιγραφών, προς αποφυγήν μεγάλων παραμορφώσεων των στοιχείων και της ανάγκης για γένεση νέου πλέγματος(remeshing). Η επαφή μεταξύ εργαλείου-ελάσματος χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου penalty. Η επίλυση έγινε με αντιστροφή του πίνακα στιβαρότητας επαναληπτικά (implicit solver) και η διάρκεια της προσομοίωσης ήταν κάποιες μέρες.

Αποτελέσματα

Μετά τη σύγκριση με τα πειραματικά, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποδείχτηκαν αξιόπιστα ποιοτικά, αλλά τα νούμερα είχαν μεγάλες αποκλίσεις που αποδόθηκαν στη συμπεριφορά του μοντέλου στις μεγάλες παραμορφώσεις, και στην αρχική τοποθέτηση της ρωγμής (θέση και σχήμα).

Numerical Modelling of sheet metal guillotining process (Berti, Monti, Nicola, & Vicenza, n.d.)

Οι Berti και Monti το 2012 υπολόγισαν την δύναμη της κοπής και απεικόνισαν την μορφή του αποκόμματος. Για την δύναμη κοπής, προτάθηκε ένα απλοποιημένο 2D μοντέλο επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης το οποίο εμπεριείχε και ένα κριτήριο αστοχίας. Υπολογίζεται η δύναμη από τις διατμητικές τάσεις και ολοκληρώνεται σε όλο το μήκος για να προκύψει η συνολική δύναμη κοπής. Ύστερα πραγματοποιήθηκε μια 3D προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία.

Μοντέλο Υλικού

Το έλασμα προσεγγίστηκε με ένα ιστροπικό και ελαστο-πλαστικό μοντέλο, εκθετικά κρατυνόμενο σύμφωνα με το μοντέλο του Hollomon. Το μοντέλο είναι βασισμένο στην επιφάνεια διαρροής(yield surface) κατά Von Mises. Το κριτήριο αστοχίας Cockroft-Latham ενεργοποιείται για να απεικονίσει την έναρξη και τη διάδοση της ρωγμής.

Πεπερασμένα στοιχεία

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν τετραεδρικά στοιχεία. Το πλέγμα έγινε πυκνότερο στην περιοχή της επαφής ελάσματος-λεπίδας και έγινε επαναδημιουργία πλέγματος όταν αυτό κρίθηκε αναγκαίο. Τα εργαλεία θεωρήθηκαν απαραμόρφωτα και η τριβή μοντελοποιήθηκε με τον νόμο του Coulomb.

Αποτελέσματα

Η σύγκριση των δύο αναλύσεων έδειξε πως η πρώτη έχει σχετικά καλή ακρίβεια και μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για εξοικονόμηση χρόνου.

Experiments on Sheet Metal Shearing (Gustafsson, n.d.)

Ο Gustafsson το 2013 μελέτησε πειραματικά την επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας. Για να καθορίσει τον απαιτούμενο εξοπλισμό για τα πειράματά του, πραγματοποίησε αρχικά μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων σε ένα 2D μοντέλο επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης. Τα εργαλεία θεωρήθηκαν ελαστικά και το έλασμα ελαστοπλαστικό και εκθετικά κρατυνόμενο σύμφωνα με τον νόμο του Hollomon. Οι προσομοιώσεις έτρεξαν έχοντας ως είσοδο σταθερή επιτάχυνση. Θεωρήθηκε πιο ρεαλιστικό από την σταθερή ταχύτητα, αφού η λεπίδα οδηγείται από υδραυλικό σύστημα.

Η διακριτοποίηση έγινε με τετρακομβικά στοιχεία με πλήρης ολοκλήρωση(full integrated). Ενεργοποιήθηκε το “adaptive remeshing” για να αποτραπεί η εκτενής παραμόρφωση των στοιχείων. Λήφθηκε υπόψη και η στατική και η δυναμική τριβή. Η επίλυση έγινε σε explicit solver (LS dyna). Για να περατωθεί η προσομοίωση σε ρεαλιστικό χρόνο προστέθηκε μη φυσική μάζα στο σύστημα(mass scling), η οποία για μικρές επιταχύνσεις έχει μηδαμινή επίδραση στα αποτελέσματα.

Finite element simulation of 3D sheet metal guillotining using advanced fully coupled elastoplastic-damage constitutive equations (Saouni, Belamri, & Autesserre, 2010)

Οι Saouni, Belamri και Autesserre το 2010 ανέπτυξαν ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό να αναλύσουν την κοπή ελάσματος με σεβασμό στην ανισοτροπία του υλικού. Με βάση αυτό διερεύνησαν την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων της κατεργασίας, όπως το πάχος του ελάσματος, η φθορά του κοπτικού εργαλείου, το σχήμα και η παραμόρφωσή του, καθώς και οι αρχικές τάσεις.

Μοντέλο υλικού

Σε αυτή την μελέτη η συμπεριφορά του υλικού προσομοιάζεται με τον συνδυασμό της ανισότροπης πλαστικότητας με την ισότροπη θραύση. Η έναρξη της διαρροής του υλικού βασίζεται στην επιφάνεια του Hill για ανισότροπα υλικά. Η όλκιμη θραύση διεξάγεται ισότροπα. Από πειραματικά αποτελέσματα βρέθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού και καθορίστηκαν οι αναγκαίες παράμετροι των εξισώσεων. Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων παρουσιάζει μη γραμμική κράτυνση, με την τάση να αυξάνεται έως την έναρξη της αστοχίας όπου ξεκινά να μειώνεται μη γραμμικά μέχρι την τελική θραύση(softening).

Πεπερασμένα στοιχεία

Για την κατασκευή του μοντέλου χρησιμοποιείται ένα είδος Lagrangian περιγραφής. Τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία είναι εξαεδρικά με οκτώ κόμβους και τετραεδρικά με τέσσερις κόμβους και ενός σημείου ολοκλήρωσης(reduced integration). Τα στοιχεία που φτάνουν στην θραύση διαγράφονται. Η τριβή βασίζεται στο μοντέλο του Coulomb. Ο τύπος της επαφής μεταξύ εργαλείων και ελάσματος επιτρέπει την απόσπαση των κατεστραμμένων επιφανειών. Η επίλυση έγινε χρησιμοποιώντας explicit solver σε συνδυασμό με implicit(Newton-Raphson).

Αποτελέσματα

Η δύναμη κοπής υπολογίστηκε για απαραμόρφωτα αλλά και ελαστικά κοπτικά εργαλεία. Η απόκλιση ήταν αρκετά μεγάλη, περίπου 30% .

On cropping and related processes (Atkins, 1980)

Ο Atkins το 1980, στην μελέτη κατεργασιών απότμησης εξήγαγε αναλυτικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της δύναμης κοπής και της μέγιστης εισχώρησης της ακμής του εργαλείου. Οι εξισώσεις αυτές λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της διάδοσης ρωγμής και την γεωμετρία της ακμής . Τα αριθμητικά αποτελέσματα από την επίλυσή τους συγκρίθηκαν με πειραματικά από προηγούμενες μελέτες τα οποία ήταν αρκετά κοντά.

On the mechanics of guillotining ductile materials (Atkins, 1990)

Το 1990 ο Atkins ανέλυσε την μηχανική της κατεργασίας της απότμησης ανοικτής γραμμής με κεκλιμένη λεπίδα και επεσήμανε τις διαφορές με την ορθογωνική κοπή. Επικεντρώθηκε στην δύναμη της κοπής και στο καταναλισκόμενο έργο. Οι εξισώσεις οι οποίες χρησιμοποίησε επαληθεύτηκαν από πειραματικά δεδομένα. Κατά τον συγκεκριμένο τρόπο κοπής εμφανίζεται κάμψη και στρέψη του ελάσματος που είναι προς αποκοπή(ελεύθερο). Επίσης η δύναμη μειώνεται με την αύξηση της κλίσης, όπως είναι λογικό. Οι συνιστώσες που απορροφούν έργο είναι η διάτμηση και η αστοχία στην διεύθυνση της κοπής, η κάμψη λόγω της λεπίδας, η στρέψη του αποκόμματος και η τριβή. Συνεπώς ο ψαλιδισμός απαιτεί περισσότερο έργο λόγω των παραπάνω και απαιτείται μεγάλη δύναμη για την κοπή μικρού πλάτους ελασμάτων.

Establishment of Optimal Blade Clearance of Stainless Steel Rolling-Cut Shear and Test of Shearing Force Parameters (Ma, Huang, Huang, Chu, & Tian, 2012)

Η συγκεκριμένη μελέτη έγινε με σκοπό τη βελτίωση της κοπής ελάσματος ή πλάκας ανοξειδωτού χάλυβα μέσω της βέλτιστης ρύθμισης του διακένου. Χρησιμοποιώντας μια συγκεκριμένη μηχανή κοπής έγιναν πειράματα για διάφορες τιμές του διακένου υπό διαφορετικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως το βέλτιστο διάκενο εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Είναι συνάρτηση του πάχους της πλάκας, του υλικού, της θερμοκρασίας και της αντοχής σε διάτμηση.

Πάχος ελάσματος

Το βέλτιστο διάκενο αυξάνεται με την αύξηση του πάχους με ρυθμό ο οποίος μειώνεται.

Θερμοκρασία

Με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται η αντοχή του υλικού και η πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται δημιουργώντας ατέλειες στην τελική μορφή του προϊόντος. Σε θερμοκρασίες έως 150 °C η επίδραση είναι μικρή, σε μεγαλύτερες όμως δεν μπορεί να αγνοηθεί. Το διάκενο αυξάνεται μέχρι τη θερμοκρασία των 150 βαθμών και σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες απαιτείται μικρότερο διάκενο.

Διάτμηση

Πολλές φορές συμβαίνει λόγω φθοράς η άνω ακμή να ολισθαίνει πάνω στο έλασμα και να αυξάνεται το υπό διάτμηση υλικό. Καθώς ο όγκος του υλικού που υφίσταται διάτμηση αυξάνεται το διάκενο πρέπει να μειώνεται. Αυτό συνάδει με το γεγονός πως η ρωγμή που ξεκινά από την πάνω λεπίδα πρέπει να διαδίδεται και την ίδια διεύθυνση με αυτήν από την κάτω (η ολίσθηση στην κάτω λεπίδα περιορίζεται από τον συγκρατητή).

Υλικό

Έγινε σύγκριση μεταξύ δύο ανοξειδωτων χαλύβων, ASTM 304 και 410. Το βέλτιστο διάκενο για τον 304 προκύπτει μεγαλύτερο, ανεξαρτήτως του πάχους.

Finite Element Method Analysis of Effect of Blade Clearance on Plate Shearing Process (Li, Ye, Fan, Bao, & Huang, 2012)

Η εύρεση του καταλληλότερου διακένου σε αυτήν την μελέτη διερευνάται υπολογιστικά, με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αξιολογούνται κάνοντας σύγκριση της υπολογιζόμενης δύναμης κοπής με την μετρούμενη πειραματικά δύναμη.

Το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων

Η ταχύτητα της άνω λεπίδας είναι σταθερή. Η θερμοκρασίας θεωρείται πως δεν ξεπερνά τους 150 °C οπότε η επίδραση της αμελείται. Τα εργαλεία θεωρούνται απαραμόρφωτα και το μοντέλο του υλικού της πλάκας είναι πλαστικό, συνδυασμένο με το κριτήριο αστοχίας Cockcroft-Latham. Το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων στην μηχανικά φορτισμένη περιοχή επιλέχθηκε 0.6 mm.

Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι πολύ κοντά με τα μετρούμενα, επίσης οι υπολογισμοί που βασίζονται σε εμπειρικές σχέσεις είναι αρκετά αξιόπιστοι. Αντίθετα, οι θεωρητικές σχέσεις έχουν μεγάλη απόκλιση λόγω των πολλών απλοποιήσεων και υποθέσεων που έχουν γίνει. Το διάκενο αυξάνεται ανάλογα με το πλάτος της πλάκας.

Determination of forces in high speed blanking using FEM and experiments (Subramonian, Altan, Campbell, & Ciocirlan, 2013)

Εδώ, δίνεται έμφαση στην απότμηση υψηλής ταχύτητας. Διεξάγονται πειραματικές μετρήσεις και προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων σε μοντέλο 2D για διάφορες ταχύτητες εμβόλου έως και 1600 mm/s. Γίνεται μελέτη της επίδρασης της ταχύτητας στην δύναμη κοπής. Επίσης, παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων για σε συνάρτηση με τον ρυθμό παραμόρφωσης, συσχετίζοντας πειραματικές μετρήσεις με τα πεπερασμένα στοιχεία. Το 2D μοντέλο, εμπεριέχει την επίδραση της θερμοκρασίας στο έλασμα. Το υλικό θεωρείται πλαστικό και χρησιμοποιείται η εξίσωση του Hollomon για την περιγραφή του, η οποία προκύπτει ύστερα από παρεμβολή σε σημεία που έχουν προκύψει από δοκιμή διόγκωσης (bulge test). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για χαμηλές ταχύτητες (20 mm/s) επιβεβαιώθηκαν συγκρίνοντας τα με τα πειραματικά. Σε υψηλές ταχύτητες, η υπολογιζόμενη δύναμη ταίριαζε με την μετρούμενη, αλλά η ανάλυση δεν μπόρεσε να προβλέψει την δυναμικότητα του φαινομένου, επειδή τα το μοντέλο ήταν στατικό (quasi-static). Τα συμπεράσματα ήταν πως η ταχύτητα του εμβόλου στη απότμηση έχει σημαντική επίδραση. Κατά την φάση της εξόλκευσης, το έμβολο δέχεται πλευρικές δυνάμεις οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν την μηχανή. Όσον αφορά τα πεπερασμένα στοιχεία, η μοντελοποίηση της απότμησης μεγάλων ταχυτήτων απαιτεί την ενσωμάτωση της επίδρασης της θερμοκρασίας και της ταχύτητας παραμόρφωσης

Assessment of influence of some process parameters on sheet metal blanking (Maiti, Ambekar, Singh, Date, & Narasimhan, 2000)

Οι Maiti, Ambekar, Singh, Date και Narasimhan το 1999, αξιολόγησαν την επίδραση του διακένου, της τριβής και του πάχους στην απότμηση λεπτού ελάσματος μέσω ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων σε δύο διαστάσεις (2D). Η μηχανική συμπεριφορά του υλικού προσεγγίστηκε από μια τριγωνική καμπύλη, έπειτα από συλλογή δεδομένων δοκιμής εφελκυσμού. Ύστερα από διάφορες εφαρμογές του μοντέλου κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα:

- Η μείωση του διακένου οδηγεί σε αύξηση της δύναμη κοπής.
- Η αύξηση της τριβής μεταξύ ελάσματος-εργαλείου συνεπάγεται αύξηση της δύναμης.
- Για συγκεκριμένο λόγο διαμέτρου-πάχους, η μεταβολή στο πάχος δεν προκαλεί μεταβολή της δύναμης. Για συγκεκριμένο πάχος, η δύναμη αυξάνεται καθώς μειώνεται η διάμετρος προς αποκοπή.
- Ένα μέσο διάκενο, περίπου στο 10% του πάχους είναι κατάλληλο από άποψη ζήτησης φορτίου αλλά και παραμόρφωσης του ελάσματος.

Numerical modelling of the metal blanking process (Brokken, Brekelmans, & Baaijens, 1998)

Η συγκεκριμένη δημοσίευση του 1997 εισάγει ένα ελαστο-πλαστικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με στόχο την πρόβλεψη της μορφής και των ιδιοτήτων των προϊόντων της απότμησης. Το μοντέλο ήταν επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης και είχε διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε να ανταποκρίνεται στις μεγάλες παραμορφώσεις που εισάγει η κατεργασία. Για να επιτευχθεί αυτό, η τοπολογία του πλέγματος βασιζόταν στην τεχνική ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) την οποία ακολουθούσε αναγέννηση πλέγματος ανά συγκεκριμένο αριθμό κύκλων. Η αστοχία περιγράφεται με την μέθοδο διακριτής ρωγμής και όχι με την διαγραφή στοιχείων. Η ρωγμή διαδίδεται όσο ικανοποιείται το κριτήριο αστοχίας. Ύστερα από επίλυση του μοντέλου υπό διαφορετικές συνθήκες εξήχθησαν η γεωμετρία του ελάσματος στο σημείο της κοπής και το μέτρο της δύναμης απότμησης συναρτήσει της μετατόπισης του εμβόλου.

An experimental and numerical study of a planar blanking process (Stegeman et al., 1999)

Οι συγγραφείς, έχοντας ως στόχο την εύρεση ενός αξιόπιστου μοντέλου της κατεργασίας της απότμησης, κατέγραψαν κατά την διάρκεια πειραμάτων τις μετατοπίσεις του υλικού μέσω κάμερας και

επεξεργασίας της εικόνας. Επίσης μετρήθηκε το φορτίο της κοπής για διάκενο 2% και 10% του πάχους. Έγινε αριθμητική επίλυση μέσω ενός διδιάστατου μοντέλου επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης. Το υλικό θεωρείται ελαστοπλαστικό και ιστροπικό. Χρησιμοποιείται το κριτήριο διαρροής του Von Mises και η κράτυνση περιγράφεται από τον κανόνα των Prandtl-Reuss. Ο ρυθμός παραμόρφωσης δεν συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο. Χρησιμοποιείται η τεχνική ALE προς αποφυγήν μεγάλων παραμορφώσεων των στοιχείων καθώς και αναγέννηση πλέγματος. Έπειτα από σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων το μοντέλο αποδεικνύεται αξιόπιστο, παρόλο που η θεώρηση της επίπεδης παραμόρφωσης δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Οι ποσοτικές διαφοροποιήσεις αποδίδονται στις συνοριακές συνθήκες του μοντέλου, την περιγραφή της τριβής, την θεώρηση ιστροπίας και την άγνοια της επίδρασης του ρυθμού παραμόρφωσης.

Ductile fracture modeling of initiation and propagation in sheet-metal blanking processes (Yu, Xie, Zhang, & Zhao, 2007)

Σε αυτήν την δημοσίευση παρουσιάζεται ένα νέο κριτήριο έναρξης της αστοχίας και η υλοποίηση ενός μοντέλου προσομοίωσης της διάδοσης της ρωγμής. Μετά την έναρξη της θραύσης, ξεκινά η διάδοση της ρωγμής υιοθετώντας μια μέθοδο delete-and-fill, κατά την οποία ένα μέρος του πλέγματος διαγράφεται, υπολογίζεται το νέο μέγεθος της ρωγμής και δημιουργείται καινούριο πλέγμα με βάση την νέα γεωμετρία. Η πρόβλεψη την κατεύθυνσης της ρωγμής γίνεται με βάση το κριτήριο της μέγιστης περιφερειακής τάσης που βασιίζεται στην ένταση της τάσης (stress intensity), τη μέγιστη κύρια τάση (maximum principal stress), το ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας (energy release rate) και την γωνία του άκρου της ρωγμής (crack tip angle). Με βάση τα παραπάνω έγινε απεικόνιση της περιοχής αποχωρισμού και των ελαττωμάτων που παρουσιάζονται. Επίσης μελετήθηκε η επίδραση του διακένου στις συνιστώσες της τάσης κοντά στην ακμή του εμβόλου. Καθώς μειώνεται το διάκενο, οι τάσεις αυξάνονται αλλά η θραύση ξεκινά σχεδόν στο 20% του πάχους (εισχώρηση εμβόλου). Επίσης έχοντας μικρό διάκενο, η ρωγμή ξεκινά πιο μετά και διαδίδεται με μικρότερη ταχύτητα, γεγονός που οδηγεί σε καλύτερη επιφάνεια. Όσον αφορά την αιχμηρότητα του κοπτικού εργαλείου, καθώς μειώνεται παρατηρούνται πιο έντονες ατέλειες στο προϊόν.

Description of numerical techniques with the aim of predicting the sheet metal blanking process by FEM simulation (Lemiale, Chambert, & Picart, 2009)

Στο άρθρο αυτό παρουσιάζεται ένα μοντέλο προσομοίωσης της απότμησης. Χρησιμοποιείται ένα λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων υλοποιώντας διάφορες τεχνικές και μοντέλα για την μοντελοποίηση της αστοχίας με σκοπό την εύρεση του καταλληλότερου συνδυασμού για τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Γίνεται σύγκριση μεταξύ coupled και uncoupled μοντέλων και δύο μεθόδων περιγραφής της αστοχίας. Χρησιμοποιείται ένα μοντέλο βασισμένο στο Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) και συγκρίνεται με ένα ελαστοπλαστικό μοντέλο. Η μία περιγραφή αστοχίας είναι η διαγραφή στοιχείων όταν ικανοποιήσουν το αντίστοιχο κριτήριο και η άλλη είναι η μέθοδος διακριτής ρωγμής, όπου αφού γίνεται έναρξη της αστοχίας η ρωγμή διαδίδεται σύμφωνα με συγκεκριμένα κριτήρια. Η εφαρμογή των παραπάνω γίνεται σε μια περίπτωση αξονοσυμμετρικής απότμησης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το remeshing αποδεικνύεται απαραίτητο. Συγκρίνοντας το GTN με το κλασικό ελαστοπλαστικό μοντέλο φαίνεται πως το πρώτο δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα αλλά για την εφαρμογή του απαιτείται ο προσδιορισμός πολλών παραμέτρων. Αν το GTN διαμορφωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να συνυπολογίζεται η συνένωση των κόκκων του υλικού τα αποτελέσματα προσεγγίζουν ακόμη καλύτερα τις πειραματικές μετρήσεις. Τέλος συγκρίνεται η μέθοδος διαγραφής στοιχείων και η μέθοδος διακριτής ρωγμής. Η δεύτερη προσεγγίζει πολύ καλά ποιοτικά την θραύση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της μορφής του αποκόμματος.

Finite elements simulations of thin copper sheets blanking: Study of blanking parameters on sheared edge quality (Husson, Correia, Daridon, & Ahzi, 2008)

Στην μελέτη αυτή χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση της απότμησης και τις επίδρασης των βασικότερων παραμέτρων όπως το διάκενο, η τριβή και η φθορά του κοπτικού εργαλείου. Η κράτυνση του υλικού περιγράφεται με ένα νέο βισκοπλαστικό μοντέλο συνδυαζόμενο με ένα νέο μοντέλο αστοχίας, που έχει προταθεί από τον Husson. Συνυπολογίζεται ο ρυθμός παραμόρφωσης και η επίδραση της θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα του μοντέλου

αξιολογήθηκαν έπειτα από σύγκριση με άλλα μοντέλα και με πειραματικά δεδομένα. Αποδείχθηκε πιο ακριβές από τα μοντέλα των Johnson-Cook και Guron. Οι προσομοιώσεις έδειξαν πως μεγάλα διάκενα, προχωρημένη φθορά του κοπτικού και υψηλή τριβή επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα του αποτμήματος. Η επίδραση της φθοράς του εργαλείου είναι πιο έντονη όταν το διάκενο είναι μεγάλο. Καθώς αυξάνεται το διάκενο αυξάνεται η γωνία της θραύσης και η φθορά του εργαλείου οδηγεί σε υψηλότερο προέκταμα. Η σημασία της τριβής στην μορφή της επιφάνειας κοπής είναι αμελητέα.

Optimum selection of variable punch-die clearance to improve tool life in blanking non-symmetric shapes (Subramonian, Altan, Ciocirlan, & Campbell, 2013)

Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι η καλύτερη επιλογή του διακένου ως προς την φθορά των εργαλείων. Δίνεται έμφαση στο πώς το βέλτιστο διάκενο επηρεάζεται από το σχήμα του τελικού ελάσματος. Σε αποτμήσεις μη κυκλικού σχήματος παρατηρείται μη ομοιόμορφη φθορά των εργαλείων. Μεγαλύτερη φθορά παρατηρείται σε σημεία με μικρές ακτίνες καμπυλότητας και απότομες αλλαγές γεωμετρίας. Η επίδραση του διακένου στη φθορά διερευνάται με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Οι προσομοιώσεις γίνονται θεωρώντας το υλικό πλαστικό και εκθετικά κρατυνόμενο. Η αστοχία δεν μοντελοποιείται γιατί είναι απαραίτητη μόνο η αρχική φάση κατά την οποία το υλικό υποβάλλεται σε διάτμηση και δεν υφίσταται αστοχία. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η καταπόνηση του εμβόλου μειώνεται εκθετικά καθώς αυξάνεται η ακτίνα καμπυλότητας. Υπάρχει ένα εύρος της τιμής του διακένου κατά το οποίο η καταπόνηση του εμβόλου ελαχιστοποιείται. Το βέλτιστο διάκενο για οποιοδήποτε υλικό εξαρτάται από την γεωμετρία της κοπής. Προτάθηκε η έννοια του μεταβλητού διακένου και εφαρμόστηκε πειραματικά, δείχνοντας πως αυτή η προσέγγιση αυξάνει την διάρκεια ζωής του εργαλείου περίπου στο τριπλάσιο.

Numerical investigations on sheet metal blanking with high speed deformation (Marouani, Ben Ismail, Hug, & Rachik, 2009)

Οι Marouani, Ben Ismail, Hug και Rachik χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο εξαρτώμενο από τον ρυθμό παραμόρφωσης με σκοπό την ακριβέστερη μοντελοποίηση της απότμησης. Διεξήχθησαν πειράματα σύμφωνα με τα οποία προσαρμόστηκαν οι παράμετροι του μοντέλου. Εκτός του κλασικού εφελκυσμού, έγιναν δοκιμές υποβοηθούμενες από σύστημα τεχνητής όρασης για να εξασφαλίζεται σταθερός ρυθμός παραμόρφωσης κατά την διάρκεια της κοπής. Η επίλυση του μοντέλου γίνεται με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η κατεργασία προσομοιώνεται για διάφορες τιμές διακένου και ταχύτητας. Για τον έλεγχο της ορθότητας των αριθμητικών υπολογισμών γίνεται σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως ο ρυθμός παραμόρφωσης επηρεάζει τόσο την δύναμη κοπής όσο και την ποιότητα του αποτμήματος. Το μέγιστο της δύναμης κοπής αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα. Για μεγάλες ταχύτητες φαίνεται πως μόνο χρησιμοποιώντας μοντέλο εξαρτώμενο από το ρυθμό παραμόρφωσης μπορούμε να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα. Η μέγιστη δύναμη και η μετατόπιση του εμβόλου στη θραύση προσεγγίζονται με καλή ακρίβεια με το προτεινόμενο μοντέλο.

Machining accuracy for shearing process of thin-sheet metals—Development of initial tool position adjustment system (Kibe, Okada, & Mitsui, 2007)

Οι συγγραφείς ανέπτυξαν μια νέα μέθοδο για την προσαρμογή των αρχικών θέσεων εμβόλου μήτρας κατά την απότμηση. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο και πετυχαίνοντας ευθυγράμμιση του εργαλείου με ακρίβεια 2μm, διεξήχθησαν πειράματα για την διερεύνηση της επιρροής των διάφορων παραμέτρων (διάκενο, διάμετρος) στην ακρίβεια της κατεργασίας. Η μέτρηση της θέσης του εργαλείου γίνεται χρησιμοποιώντας κάμερα και έπειτα από επεξεργασία της εικόνας. Ένα σύστημα που χρησιμοποιεί πιεζοηλεκτρικούς μεταλλάκτες επιτρέπει την μετακίνηση του εργαλείου στο επίπεδο. Επιβεβαιώθηκε πως η αρχική θέση επηρεάζει την ακρίβεια της κοπής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, τα ελαττώματα της επιφάνειας κοπής, το προέκταμα και η περιοχή εφελκυσμού αυξάνονται με την αύξηση του διακένου, με το δεύτερο να είναι πιο ευαίσθητο στην μεταβολή του. Όταν το διάκενο είναι μικρό, η ευθυγράμμιση αποκτά μεγαλύτερη σημασία.

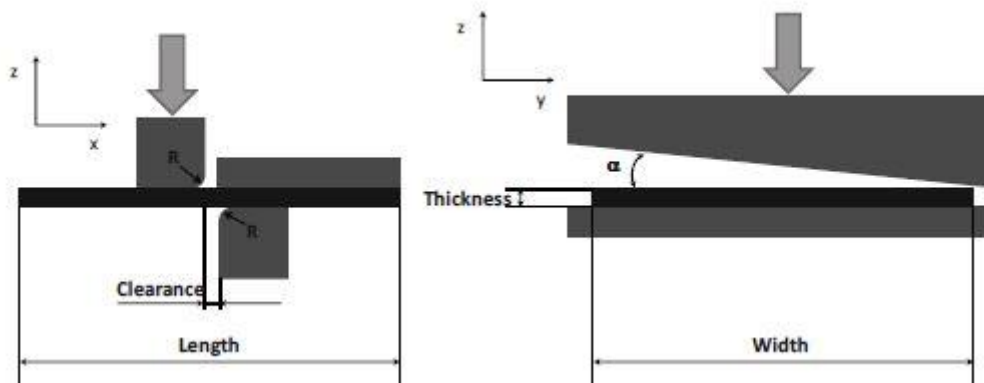
Prediction of shape aberrations due to punching, shearing and slitting

P.J. Bolt*, W.H. Sillekens (Bolt & Sillekens, 2000)

Οι Bolt και Sillekens το 2000 μελέτησαν την απόκλιση που παρουσιάζουν τα αποτμήματα σε κατεργασίες απότμησης και ψαλιδισμού, λόγω παραμενουσών τάσεων. Επιχείρησαν να προσεγγίσουν το φαινόμενο χρησιμοποιώντας ένα απλό ελαστικό-γραμμικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Εκτός αυτού παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από πειραματικές εφαρμογές. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, οι παραμένουσες τάσεις που προκαλούν την παραμόρφωση μπορεί να εισάγονται από την κατεργασία ή να προϋπάρχουν αυτής. Αυτές μπορούν να διακριθούν αφαιρώντας την ζώνη γύρω από στις ακμές με κοπή με laser.

Κεφάλαιο 3 Η μηχανική του ψαλιδισμού

Ψαλιδισμός ονομάζεται η κατεργασία της κοπής ενός ελάσματος ή πλάκας με την χρήση δύο ευθέων κοπτικών εργαλείων (λεπίδες, κνίves). Η μία λεπίδα είναι σταθερή (κάτω) και η άλλη είναι κινούμενη (άνω). Συνήθως η άνω λεπίδα είναι κεκλιμένη ως προς την κάτω με γωνία α (rake angle). Οι δύο λεπίδες έχουν μια μικρή χάρη (clearance). Το έλασμα κρατείται σταθερό χάρη στον συγκρατητή (blank-holder). Η άνω λεπίδα κινείται προς τα κάτω κόβοντας σταδιακά το έλασμα. Η κατεργασία μπορεί να θεωρηθεί στατική (stationary), εξαιρώντας την έναρξη και το τέλος της.



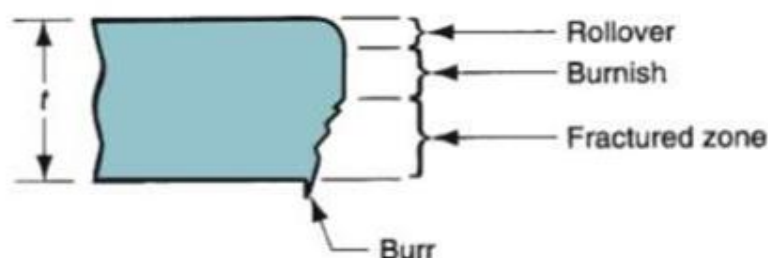
Εικόνα 3.1: Ψαλιδισμός υπό γωνία (Guillotining)

3.1 Ο μηχανισμός της κοπής

Από την στιγμή που η άνω λεπίδα και το έλασμα έρχονται σε επαφή έως τον τελικό αποχωρισμό του ελάσματος, διακρίνονται τέσσερις φάσεις:

1. Αρχικά η άνω λεπίδα ασκεί μια καμπτική ροπή στο έλασμα. Το έλασμα κάμπτεται στην ελεύθερη άκρη του ενώ η άλλη περιορίζεται από τον συγκρατητή. Έτσι οδηγείται σε ελαστική συμπίεση στην περιοχή μεταξύ των δύο ακμών, συνοδευόμενη από ελαφρά εισχώρηση των ακμών στο υλικό.
2. Καθώς διεισδύει το έμβολο, η περιοχή του αποχωρισμού υφίσταται πλαστική παραμόρφωση. Το έλασμα εφελκύεται από την άνω ακμή σχηματίζοντας μια κυκλική περιοχή (rollover) την οποία έπειτα από περεταίρω διείσδυση ακολουθεί μια λεία περιοχή (στίλβωση). Η διατομή αποχωρισμού μειώνεται.
3. Ξεκινά η εμφάνιση ρωγμών στην περιοχή των δύο κοπτικών ακμών, οι οποίες διαδίδονται στο υλικό.
4. Οι ρωγμές επεκτείνονται μέχρι που να συναντηθούν, γεγονός που σημαίνει τον τελικό αποχωρισμό του αποτμήματος. Η συνάντηση των ρωγμών πραγματοποιείται συνήθως πριν φτάσει η άνω λεπίδα στο κατώτερο σημείο. Σε αυτή την φάση σχηματίζεται στην επιφάνεια αποχωρισμού ένα τραχύ κομμάτι που προκύπτει από τη θραύση και σχηματίζονται προεκτάματα μόλις η άνω ακμή περάσει το πάχος του ελάσματος.

Στην Εικόνα 3.2 φαίνονται οι χαρακτηριστικές ζώνες στην επιφάνεια της κοπής.



Εικόνα 3.2: Χαρακτηριστικές ζώνες αποτμήματος

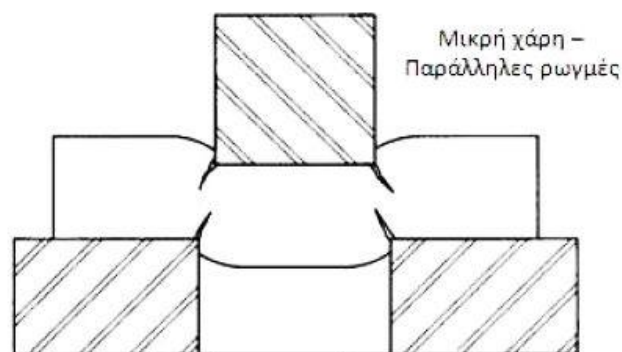
Παράμετροι της κατεργασίας

Υπάρχουν αρκετές παράμετροι που επηρεάζουν την μηχανική της κατεργασίας και συνεπώς την ποιότητα του αποτμημένου ελάσματος. Οι κυριότερες είναι:

- Το διάκενο
- Η ακτίνα καμπυλότητας των ακμών(φθορά)
- Η δύναμη συγκράτησης
- Η τριβή
- Η ταχύτητα της κινούμενης λεπίδας
- Οι ιδιότητες του υλικού
- Το πάχος του ελάσματος

Η ποιότητα της επιφάνειας κοπής μπορεί να βελτιωθεί αυξάνοντας την ταχύτητα. Η ταχύτητα του ψαλιδισμού μπορεί να είναι έως και 12m/s . Αυτό οφείλεται στο ότι η παραγόμενη θερμότητα δεν έχει χρόνο να διαδοθεί σε μεγάλη έκταση επομένως μειώνεται η ζώνη της διάτμησης.

Η σημαντικότερη παράμετρος, είναι η χάρη η οποία είναι καθοριστική στον τρόπο αστοχίας του υλικού. Καθώς αυξάνεται η χάρη αυξάνεται ο όγκος του υλικού που υποβάλλεται σε διάτμηση και η ποιότητα του αποτμήματος μειώνεται σημαντικά. Γίνεται πιο τραχιά και οι ακμές του σχηματίζουν μεγάλες γωνίες. Το μέγεθος της χάρης που δίνει καλά αποτελέσματα συνήθως κυμαίνεται στο 10%-15% του πάχους του ελάσματος. Η χρήση πού μικρής χάρης(κάτω του 5%) μπορεί να οδηγήσει στο φαινόμενο της δευτερογενούς διάτμησης. Αυτό σημαίνει πως είναι δυνατό κατά την φάση (4) που περιγράφηκε, οι δύο ρωγμές από την άνω και την κάτω ακμή να ταξιδεύουν παράλληλα και να μην συναντηθούν (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3: Το φαινόμενο της δευτερογενούς διάτμησης

Οι δυνάμεις κατά την κοπή

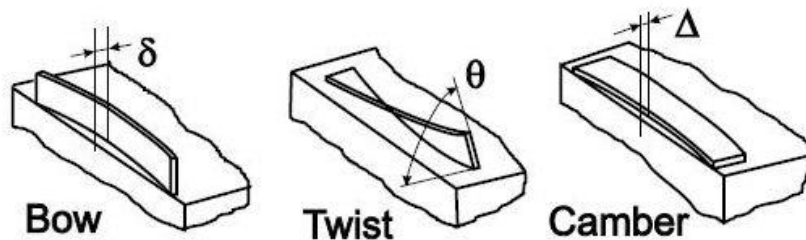
Η δύναμη κοπής αποτελεί μία εκ των βασικότερων προδιαγραφών κατά τον σχεδιασμό μιας μηχανής ψαλιδισμού και γενικότερα οποιασδήποτε μηχανής απότμησης. Ο γενικός τύπος υπολογισμού της δύναμης είναι :

$$F_c = S_c L t$$

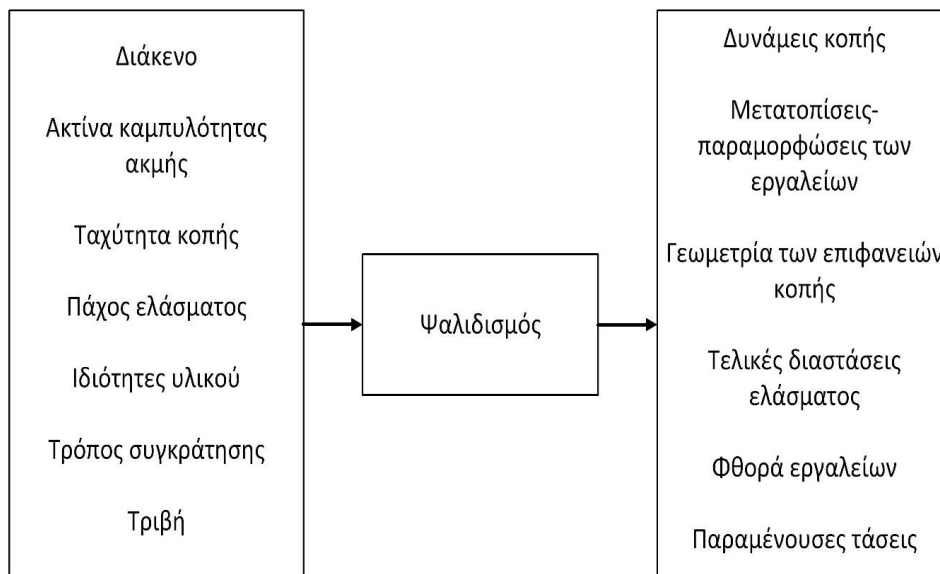
Όπου S_c είναι η αντοχή του υλικού σε διάτμηση, L είναι το μήκος κοπής και t το πάχος του ελάσματος. Συνεπώς η μείωση του μήκους κοπής τοποθετώντας υπό γωνία τις δύο λεπίδες οδηγεί σε μείωση της απαραίτητης για την κοπή δύναμης και συνεπώς λιγότερες απαιτήσεις από πλευράς ισχύος και στιβαρότητας, κάνοντας δυνατή την κοπή μεγάλων μηκών. Σε αυτήν την περίπτωση η δύναμη είναι ανεξάρτητη από το συνολικό μήκος της και είναι σταθερή, εκτός από την αρχή και το τέλος και της κατεργασίας. Καθώς η γωνία κλίσης α αυξάνεται η δύναμη ελαττώνεται. Όμως, η γωνία αυτή επηρεάζει την ποιότητα της κοπής εφόσον προκαλεί επιπλέον παραμορφώσεις στο έλασμα και έτσι περιορίζεται σε τιμές έως 3°.

Εκτός από τη δύναμη κοπής, δρουν και άλλες δυνάμεις κατά την κατεργασία. Καθώς η ακμή εισχωρεί στο υλικό το έλασμα δέχεται δυνάμεις εφελκυστικές και θλιπτικές που το παραμορφώνουν. Το έλασμα με τη σειρά του ασκεί οριζόντιες δυνάμεις στην λεπίδα (lateral forces), οι οποίες μπορεί να την παραμορφώσουν αυξάνοντας το διάκενο κατά μήκος της κοπής, αν η μηχανή δεν παρέχει την απαραίτητη στιβαρότητα σε αυτήν την διεύθυνση. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα διαστασιολογικές ανομοιομορφίες και χειροτέρευση της ποιότητας του αποτιμήματος. Η οριζόντια δύναμη επιδρά επίσης στην φθορά των ακμών. Η οριζόντια είναι σαφώς μικρότερη από την δύναμη κοπής και συνήθως αποτελεί ποσοστό κάτω από το 30% της δύναμης κοπής.

Στον ψαλιδισμό υπό γωνία, όπως είναι λογικό εμφανίζεται μια επιπλέον δύναμη στο επίπεδο του ελάσματος και παράλληλη στην σταθερή λεπίδα. Η πολύπλοκη φόρτιση στην οποία υποβάλλεται το έλασμα επηρεάζει την επιπεδότητά του μετά την αποκοπή λόγω παραμενουσών τάσεων. Μπορεί να έχει υποστεί κάμψη κατά το μήκος του (bow), κατά το πλάτος (camber) ή στρέψη (twist) όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4. Τα ελαττώματα αυτά αυξάνονται με την αύξηση της γωνίας κοπής η οποία επηρεάζει σημαντικά τον τρόπο φόρτισης.



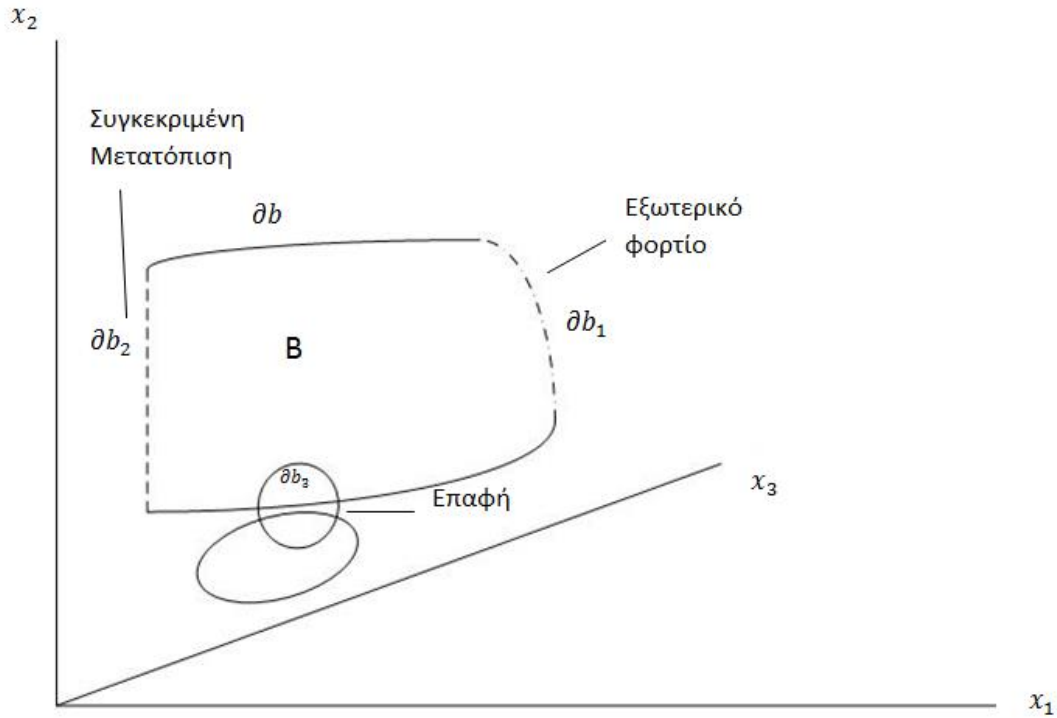
Εικόνα 3.4: Ελαττώματα της κατεργασίας



Εικόνα 3.5: Είσοδοι και έξοδοι στην κατεργασία

3.2 Έκφραση της δυναμικής του συστήματος

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η γενική περίπτωση φόρτισης ενός οποιουδήποτε στερεού σώματος στο χώρο.



Εικόνα 3.6: Γενική φόρτιση αυθαίρετου σώματος

Η εξίσωση που περιγράφει την δυναμική του συστήματος είναι:

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i \quad (3.1)$$

όπου σ είναι ο ταυιστής των τάσεων κατά τον Cauchy, ρ είναι η τρέχουσα πυκνότητα, \mathbf{f} το διάνυσμα της δύναμης σώματος και $\ddot{\mathbf{x}}$ είναι η επιτάχυνση. Το κόμμα στον ταυιστή δηλώνει παραγώγιση (covariant differentiation).

Η εξίσωση 3.1 συμπληρώνεται από τις παρακάτω οριακές συνθήκες:

Στο σύνορο ∂b_1 εφαρμόζονται εξωτερικά φορτία:

$$\sigma_{ij} n_j = t_i(t) \quad (3.2)$$

όπου n_j είναι το κάθετο διάνυσμα στο σύνορο σε ένα τμήμα του συνόρου ∂b .

Στο σύνορο ∂b_2 υπάρχουν οι περιορισμοί μετατόπισης:

$$x_i(X_a, t) = D_i(t) \quad (3.3)$$

Στο σύνορο ∂b_3 ο ασυνεχής περιορισμός που εξαρτάται από την επαφή εκφράζεται με την σχέση:

$$(\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_i = 0 \quad (3.4)$$

όταν $x_i^+ = x_i^-$, δηλαδή όταν υπάρχει επαφή.

Η διατήρηση της μάζας εκφράζεται ως :

$$\rho V = \rho_0 \quad (3.5)$$

όπου V είναι ο λόγος μεταβολής του όγκου και ρ_0 η πυκνότητα αναφοράς.

Το ζητούμενό μας είναι ο προσδιορισμός της χρονικής μετατόπισης ενός σημείου α του σώματος με συντεταγμένες $X_\alpha(\alpha=1,2,3)$ στο σημείο i με συντεταγμένες $X_i(i=1,2,3)$ στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Σύμφωνα με την περιγραφή Lagrange η μετατόπιση εκφράζεται ως εξής:

$$x_i = x_i(X_\alpha, t) \quad (3.6)$$

Η εύρεση των x_i προϋποθέτει την επίλυση του συστήματος εξισώσεων 3.1 με σεβασμό στις οριακές συνθήκες. Οι τάσεις συνδέονται με τις παραμορφώσεις και οι παραμορφώσεις με τις μετατοπίσεις. Η αναλυτική επίλυση του συνόλου των εξισώσεων (ακριβής λύση) απαιτεί την επίλυση συστήματος μερικών διαφορικών εξισώσεων δευτέρας τάξης. Μια τέτοια λύση είναι σχεδόν αδύνατη, με εξαίρεση συγκεκριμένες περιπτώσεις, με πολύ απλή γεωμετρία και συνθήκες φόρτισης. Για την επίλυση γενικών και σύνθετων περιπτώσεων χρησιμοποιούνται προσεγγιστικές μέθοδοι οι οποίες συνήθως εφαρμόζουν τεχνικές δυναμικής ενέργειας.

Από τις παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να γράψουμε:

$$\int_V (\rho \ddot{x}_i - \sigma_{ij,j} - \rho f_i) \delta x_i dv + \int_{\partial b_2} (\sigma_{ij} n_j - t_i) \delta x_i ds + \int_{\partial b_3} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j \delta x_i ds = 0 \quad (3.7)$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα της απόκλισης (Gauss) για το ολοκλήρωμα του διανύσματος της τάσης στον όγκο v έχουμε:

$$\int_V (\sigma_{ij} \delta x_i)_{,j} dv = \int_{\partial b_2} \sigma_{ij} n_j \delta x_i ds + \int_{\partial b_3} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j \delta x_i ds \quad (3.8)$$

Επίσης ισχύει:

$$(\sigma_{ij} \delta x_i)_{,j} - \sigma_{ij,j} \delta x_i = \sigma_{ij} \delta x_{i,j} \quad (3.9)$$

Από τις σχέσεις 3.7- 3.9 έχουμε:

$$\delta \pi = \int_V \rho \ddot{x}_i \delta x_i dv + \int_V \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dv - \int_V \rho f_i \delta x_i dv - \int_{\partial b_2} t_i \delta x_i ds = 0 \quad (3.10)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την αδύναμη διατύπωση (weak form) των εξισώσεων ισορροπίας όπως προκύπτει από την εφαρμογή της αρχής των δυνατών έργων. Η διατύπωση αυτή προσφέρεται προς αριθμητική επίλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η οποία θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

3.3 Σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων

Προκειμένου να είναι δυνατός ο υπολογισμός των παραμορφώσεων (και συνεπώς των μετατοπίσεων) από τις τάσεις και το αντίστροφο πρέπει να καθοριστούν οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων. Οι σχέσεις αυτές εξαρτώνται από το υλικό. Για γραμμικά ελαστικά και ισότροπα υλικά, που αποτελούν την πιο απλή προσέγγιση οι σχέσεις τάσεων παραμορφώσεων δίνονται από τον γενικευμένο νόμο του Hooke και οι μόνες παράμετροι που απαιτούν προσδιορισμό είναι ο λόγος Poisson(ν) και το μέτρο ελαστικότητας (E). Αυτές οι εξισώσεις είναι χρήσιμες όταν θέλουμε να μελετήσουμε φαινόμενα μικρών παραμορφώσεων, πριν τη διαρροή του υλικού. Για την διεξαγωγή μιας ανάλυσης μεγάλων παραμορφώσεων πρέπει να

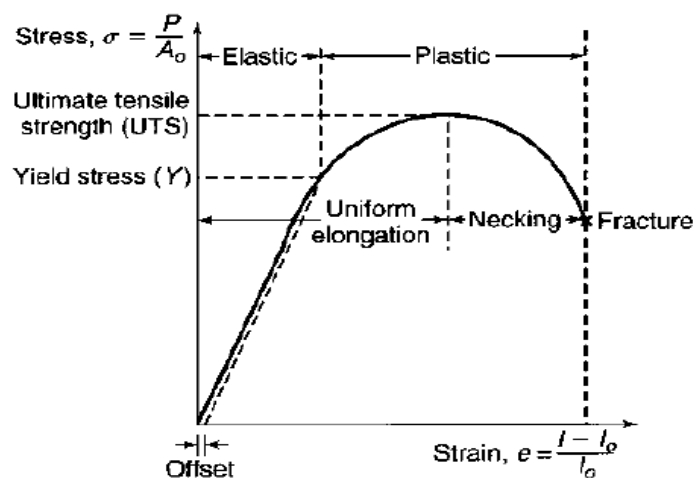
αναζητηθούν εξισώσεις που να ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν καλύτερα στην πραγματικότητα . Είναι σημαντικό να μπορούμε να παρακολουθήσουμε την πλαστικότητα του υλικού και τον τρόπο με τον οποίο οδηγείται στην αστοχία.

Γενικά, η σχέση τάσης-παραμόρφωσης δίνεται από την εξίσωση:

$$\sigma = D\varepsilon \quad (3.11)$$

όπου D είναι το μητρώο παραμόρφωσης(6x6). Όπως είναι εμφανές, οι όροι του D είναι αυτοί που καθορίζουν τη συμπεριφορά του υλικού. Στην ανάλυσή μας, εισάγουμε τις σχέσεις τάσεων παραμορφώσεων μέσω του μοντέλου του υλικού, που θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

Παρακάτω φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων και οι χαρακτηριστικές περιοχές του.



Εικόνα3.7:Ποιοτικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για όλκιμο υλικό

Εκτός από το υλικό, υπάρχουν και άλλες παράμετροι που επηρεάζουν την παραπάνω καμπύλης ποιοτικά και ποσοτικά. Οι κυριότερες είναι η θερμοκρασία και ο ρυθμός παραμόρφωσης.

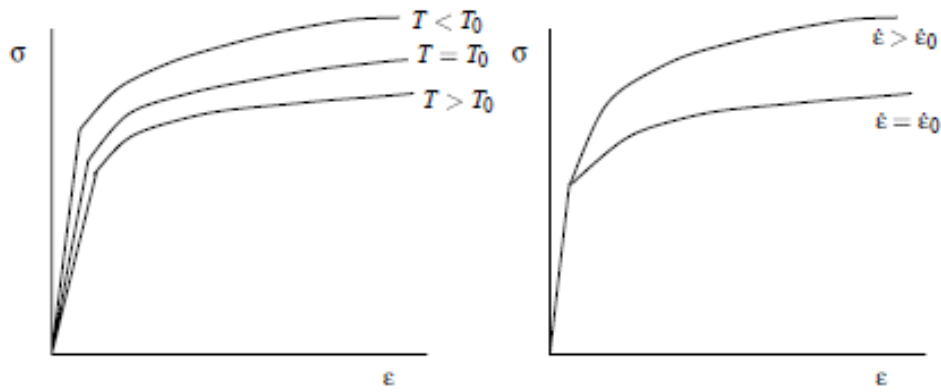
Επίδραση της θερμοκρασίας

Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε:

1. Αύξηση της ολκιμότητας.
2. Μείωση του ορίου διαρροής και του μέτρου ελαστικότητας.

Επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης

Το όριο διαρροής αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας κοπής και συνεπώς του ρυθμού παραμόρφωσης. Περίπου το 90% του έργου της πλαστικής παραμόρφωσης μετατρέπεται σε θερμότητα αυξάνοντας τη θερμοκρασία γύρω από τη ζώνη παραμόρφωσης. Σε υψηλές ταχύτητες η θερμότητα αυτή δεν προλαβαίνει να μεταφερθεί σε μεγάλο εύρος και έτσι η διάτμηση θεωρείται αδιαβατική (Wisselink, 2000). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ποιοτικά η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης (Kalrajan et al., 2003).



Εικόνα 3.8: Επίδραση θερμοκρασίας (αριστερά) και ρυθμού παραμόρφωσης (δεξιά)

Αστοχία και θραύση

Ο τρόπος με τον οποίο τα υλικά οδηγούνται στη θραύση διαφέρει ανάλογα με τις ιδιότητές τους. Η θραύση συμβαίνει ύστερα από την δημιουργία και διάδοση εσωτερικών ή εξωτερικών ρωγμών. Παρατηρείται μεγάλη διαφορά στην αστοχία των ψαθυρών και των όλκιμων υλικών, επομένως διαχωρίζεται στην όλκιμη θραύση (ductile fracture) και την ψαθυρή (brittle fracture). Την μελέτη μας θα απασχολήσει μόνο η πρώτη, καθώς τα υλικά που υπόκεινται στην κατεργασία της ψαλιδισμού είναι εν γένει όλκιμα.

Όλκιμη θραύση

Πριν τη θραύση το υλικό παραμορφώνεται πλαστικά. Η έναρξη της θραύσης συνήθως γίνεται στο επίπεδο όπου η διατμητική τάση είναι μέγιστη. Η όλκιμη θραύση αποτελείται από τρεις φάσεις:

- Εμφάνιση μικροκενών (nucleation of microvoids). Λόγω της της ανομοιογένειας του υλικού (δευτερογενείς φάσεις, εγκλείσματα), κάποια σημεία παραμορφώνονται διαφορετικά από άλλα με συνέπεια να δημιουργούνται μικροκενά γύρω από αυτά.
- Αύξηση του μεγέθους των μικροκενών, των οποίων η ισχυρή παρουσία πλέον στον όγκο του υλικού συντελεί στην υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του (softening).
- Συνένωση των μικροκενών που σημαίνει την έναρξη ρωγμής. Οι ρωγμές διαδίδονται και συναντώνται οδηγώντας στην θραύση.

3.4 Εργαλειομηχανές Ψαλιδισμού

Λόγω τη πληθώρας των αναγκών της βιομηχανίας έχουν αναπτυχθεί αρκετοί τύποι ψαλιδιών με σκοπό την επίτευξη όσο το δυνατόν καλύτερης ακρίβειας κοπής κρατώντας όσο το δυνατόν χαμηλότερα το κόστος κατασκευής και το κόστος λειτουργίας. Θα γίνει αναφορά στους τύπους των μηχανών που απαντώνται πιο συχνά στη βιομηχανίας.

Ψαλίδια χειρός με μοχλό (Bench shears)

Αυτά τα ψαλίδια αποτελούνται από μια λεπίδα δεμένη στο σταθερό μέρος τους το οποίο είναι πακτωμένο και μια κινητή, η οποία μετακινείται χειροκίνητα συνήθως μέσω κάποιου μοχλού για πολλαπλασιασμό της δύναμης. Εφόσον η ισχύς παρέχεται από τον χειριστή είναι κατάλληλα για κοπή μόνο μικρών μεγεθών και λεπτών ελασμάτων και προφανώς η δυνατότητές του εξαρτώνται από το μέγεθός τους. Στα πλεονεκτηματά τους συγκαταλέγονται η δυνατότητα κοπής διαφόρων σχημάτων, η δυνατότητα κοπής κοίλων δοκών (κυλινδρικών ή ορθογωνικών), η ποιότητα κοπής και το κόστος.

Ηλεκτρικά ή πνευματικά ψαλίδια χειρός (power shears)

Μικρού μεγέθους ψαλίδια που κατευθύνονται με το χέρι. Η απαιτούμενη ισχύς παρέχεται από

έναν ηλεκτρικό ή πνευματικό κινητήρα που ωθεί μια κινητή λεπίδα προς τη σταθερή και κατευθύνονται με το χέρι. Αυτό επιτρέπει την κοπή μεγάλων διαστάσεων ελασμάτων. Προτιμώνται για κοπή ευθείας γραμμής ή γραμμής μεγάλης καμπυλότητας. Επιτυγχάνουν καλή ποιότητα επιφάνειας και μπορούν να κόψουν οποιαδήποτε καμπύλη.

Ψαλίδια τύπου ‘Throatless’

Η γεωμετρία τους επιτρέπει την περιστροφή του ελάσματος κατά την κοπή. Έτσι είναι ιδανικά για την κοπή περίπλοκων σχημάτων.



Εικόνα 3.9 : Ψαλίδι τύπου ‘throatless’

Βαρέως τύπου βιομηχανικά ψαλίδια (Guillotine Machines)

Είναι ψαλίδια μεγάλου μεγέθους και χρησιμοποιούνται για κοπή μεγάλων μηκών και πλατών ελασμάτων και πλακών. Δεν περιορίζονται στην κοπή μαλακών μετάλλων. Λόγω της στιβαρότητάς τους έχουν τη δυνατότητα κοπής ανοξείδωτων χαλύβων υψηλής αντοχής. Αποτελούνται από ένα πακτωμένο μέρος όπου δένεται η σταθερή λεπίδα, ένα κινητό με την λεπίδα υπό κλίση και τον συγκρατητή. Ανάλογα με τη χρήση τους, μπορεί να είναι υποστηριζόμενα από κάποιο βιομηχανικό υπολογιστή που τα κάνουν πιο εύχρηστα και παραγωγικά. Η κίνηση της άνω λεπίδας μπορεί να είναι κάθετη ή περιστροφική (καρμανιόλα).

Ανάλογα με τον τρόπο πρόσδοσης της ισχύος στην κινητή λεπίδα διακρίνονται σε:

- Πνευματικά, τα οποία χρησιμοποιούν πνευματικά έμβολα
- Υδραυλικά, που χρησιμοποιούν υδραυλικά έμβολα. Τα συγκεκριμένα μπορούν να αποδώσουν πολύ υψηλή δύναμη κοπής.
- Μηχανικά, όπου η ισχύς προέρχεται από έναν υδραυλικό κινητήρα συνοδευόμενη από κάποιον μηχανισμό για την αύξηση της δύναμης
- Σερβο-κινούμενα (Servo driven), τα οποία κινούνται απευθείας από σερβοκινητήρες
- Χειροκίνητα, με μοχλό ή άλλο μηχανισμό. Μικρότερου μεγέθους ψαλίδια για κοπές που δεν απαιτούν πολύ μεγάλη δύναμη.

Το ψαλίδι πάνω στο οποίο πραγματοποιείται η ανάλυσή μας είναι υδραυλικό περιστροφικής κοπής με βιομηχανικό υπολογιστή. Συγκεκριμένα πρόκειται για το μοντέλο G-Cut CNC 3006 της εταιρίας Gizelis, τα δε χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Χαρακτηριστικά του υπό μελέτη ψαλιδιού:

Μέγεθος	τιμή	μονάδα
Μέγιστο πάχος κοπής μαλακού χάλυβα st42	6	mm
Μέγιστο πάχος κοπής ανοξείδωτου χάλυβα	4	mm
Μέγιστο μήκος κοπής	3100	mm
Γόνατο	180	mm
Διαδρομή οπίσθιου οδηγού	1000	mm
Γωνία κοπής	01/01/25	μοίρες
Μέγιστη υδραυλική πίεση	255	bar
Ισχύς ηλεκτρικού κινητήρα	11	KW
Μήκος	3820	mm
Πλάτος	3835	mm
Ύψος	1820	mm
Βάρος	7000	kg

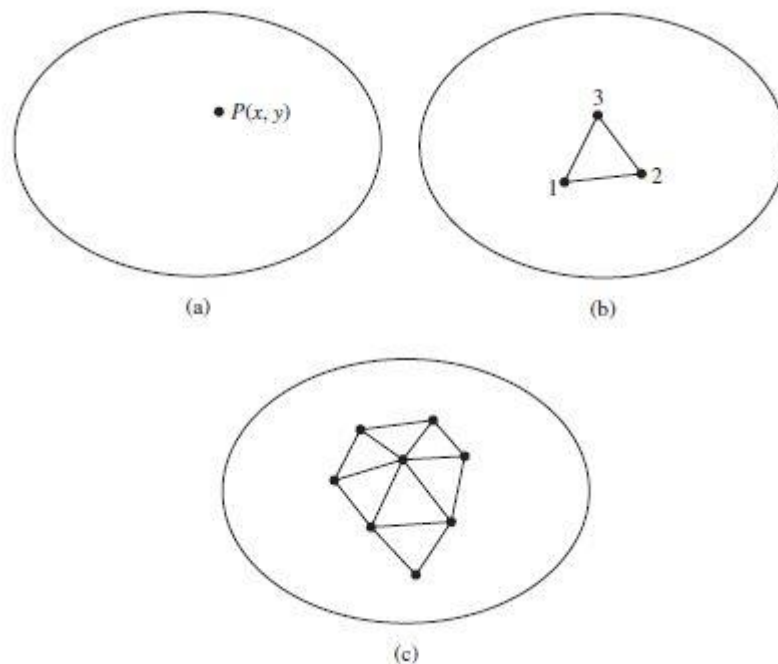


Εικόνα 3.10: Υδραυλικό Ψαλίδι στο οποίο αναφέρεται η εργασία

Κεφάλαιο 4 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων συνοριακών τιμών, όπως το πρόβλημα που ορίστηκε στο κεφάλαιο 3. Όπως αναφέρθηκε, στην πράξη είναι αδύνατη η ακριβής επίλυση του προβλήματος. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μια πολύ καλή τεχνική για την εύρεση προσεγγιστικών λύσεων. Μπορεί να προσφέρει πολύ καλή ακρίβεια και μπορεί να προγραμματίζεται, εκμεταλλευόμενη την ισχύ των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία χρόνια.

Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι να γίνει διακριτοποίηση του πεδίου. Δηλαδή η μεταβλητή που μας ενδιαφέρει (field variable), στην περίπτωση μας η μετατόπιση, να έχει διακριτή τιμή σε συγκεκριμένα σημεία (κόμβους) του πεδίου.



Εικόνα 4.1 (a) Το συνολικό πεδίο 2 διαστάσεων μιας μεταβλητής $\varphi(x, y)$. (b) Ορισμός ενός πεπερασμένου στοιχείου 2 διαστάσεων στο πεδίο. (c) Επιπλέον πεπερασμένα στοιχεία που συνιστούν ένα πλέγμα που καλύπτει μέρος του πεδίου.

Η τιμή της μεταβλητής υπολογίζεται στους κόμβους. Σε σημεία εντός του στοιχείου, η τιμή προσεγγίζεται μέσω παρεμβολής, χρησιμοποιώντας τις τιμές στους κόμβους και τις συναρτήσεις παρεμβολής ή συναρτήσεις μορφής (shape functions). Οι συναρτήσεις μορφής είναι βασικό κομμάτι της μεθόδου και παίζουν σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια.

Για το τριγωνικό στοιχείο του σχήματος 4.1(b) η τιμή της μεταβλητής στο εσωτερικό του προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$\varphi(x, y) = N_1(x, y)\varphi_1 + N_2(x, y)\varphi_2 + N_3(x, y)\varphi_3 \quad (4.1)$$

όπου \mathbf{N} είναι οι συναρτήσεις μορφής που ικανοποιούν συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες στους κόμβους και Φ οι τιμές στους κόμβους. Σύμφωνα με την εξίσωση 4.1 το στοιχείο αυτό έχει 3 βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή είναι αναγκαίες 3 τιμές στο κόμβους για την περιγραφή της τιμής οπουδήποτε στο εσωτερικό του στοιχείου. Αυτό θα μπορούσε να είναι ένα πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας με μεταβλητή την θερμοκρασία. Αν είχαμε ένα πρόβλημα μηχανικής 2 διαστάσεων η βασική η μεταβλητή θα ήταν η μετατόπιση και θα έπρεπε να υπολογιστούν 2 τιμές σε κάθε κόμβο. Έτσι το τριγωνικό στοιχείο θα έχει 6 βαθμούς ελευθερίας.

Σε ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, τα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους έχοντας κάποιους

κοινούς εξωτερικούς κόμβους. Οι κοινοί κόμβοι έχουν και ταυτόσημη τιμή μεταβλητής, ώστε να διασφαλίζεται η συνέχεια στους κόμβους. Επίσης η μέθοδος είναι κατασκευασμένη ώστε να υπάρχει συνέχεια και στα όρια των στοιχείων. Ασυνέχειες σε προβλήματα μηχανικής θα σήμαιναν αποχωρισμό του υλικού οδηγώντας σε μη πραγματικά αποτελέσματα. Εκτός από την βασική μεταβλητή μας ενδιαφέρει και η συνέχεια των παραγώγων της, που πολλές φορές μπορεί να είναι και πιο σημαντικές. Η παραμόρφωση εκφράζεται σε όρους της πρώτης παραγώγου των μετατοπίσεων. Επομένως η παραμόρφωση δεν είναι κατ' ανάγκη συνεχής, το ίδιο και η τάση. Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις εξαρτώνται και από την τάξη των συναρτήσεων μορφής. Αν οι συναρτήσεις μορφής είναι γραμμικές τότε θα έχουν μία διακριτή τιμή σε κάθε στοιχείο. Αν είναι τετραγωνικές τότε οι τάσεις και οι παραμορφώσεις θα μεταβάλλονται γραμμικά εντός του στοιχείου.

Όπως θα δούμε παρακάτω, χρησιμοποιώντας την συσχέτιση μετατοπίσεων, παραμορφώσεων και τάσεων δημιουργούμε μητρώα ακαμψίας και τα διανύσματα δυνάμεων για το κάθε πεπερασμένο στοιχείο. Για δυναμική ανάλυση είναι απαραίτητη η κατασκευή και μητρώων μάζας. Τα οποία συνθέτονται σε ολικά μητρώα. Έτσι λοιπόν, τα πεπερασμένα στοιχεία ανάγουν το πρόβλημα συνοριακών τιμών σε ένα σύστημα εξισώσεων της μορφής:

$$M\ddot{x} + Kx = F \quad (4.2)$$

το οποίο προσφέρεται για επίλυση με ηλεκτρονικό υπολογιστή, χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές.

4.1 Κατασκευή των εξισώσεων των πεπερασμένων στοιχείων

Το υπόβαθρο για την κατασκευή της μεθόδου αποτελείται από (Hutton, 2004) :

- Τους νόμους της μηχανικής (Εξισώσεις ισορροπίας, διατήρηση της μάζας, σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων)
- Την αδύναμη έκφραση της δυναμικής ενέργειας
- Τη μέθοδο Galerkin

Επαναφέρουμε την αδύναμη έκφραση της δυναμικής ενέργειας:

$$\delta\pi = \int_v \rho \ddot{x}_i \delta x_i dv + \int_v \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dv - \int_v \rho f_i \delta x_i dv - \int_{\partial B_1} t_i \delta x_i ds = 0 \quad (4.3)$$

$$x_i(X_\alpha, t) = x_i(X_\alpha(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^k N_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t) \quad (4.4)$$

Αν εισάγουμε ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων παρακολουθώντας χρονικά τα σημεία έχουμε:

Όπου N_j είναι οι συναρτήσεις μορφής σε παραμετρικές συντεταγμένες (ξ, η, ζ) , k είναι ο αριθμός των κόμβων του στοιχείου και x_i^j είναι η κομβική συντεταγμένη του κόμβου j στην διεύθυνση i . Εφόσον το σώμα διακριτοποιείται με n πεπερασμένα στοιχεία η σχέση 4.3 μπορεί να διασπαστεί σε n όρους, έναν για κάθε στοιχείο:

$$\delta\pi = \sum_{m=1}^n \delta\pi_m = 0 \quad (4.5)$$

Η συνεισφορά κάθε στοιχείου θα είναι:

$$\delta\pi_m = \int_{v_m} \rho \ddot{x}_i \delta x_i dv + \int_{v_m} \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dv - \int_{v_m} \rho f_i \delta x_i dv - \int_{\partial b_1 \cap \partial v_m} t_i \delta x_i ds \quad (4.6)$$

Θεωρούμε τον διανυσματικό χώρο R^n με μία καρτεσιανή του βάση $\{e'_i\}_{i=1}^n$ όπου n ο συνολικός αριθμός των κόμβων.

Προσθέτοντας τις επί μέρους συνεισφορές έχουμε :

$$\sum_{m=1}^n \left\{ \int_{v_m} \rho \ddot{x}_i (e_i \otimes v^m) dv + \int_{v_m} \sigma_{ij} (e_i \otimes v_j^m) dv - \int_{v_m} \rho f_i (e_i \otimes v^m) dv - \int_{\partial b_1 \cap \partial v_m} t_i (e_i \otimes v^m) ds \right\} = 0 \quad (4.7)$$

Όπου

$$v^m = \sum_{i=1}^k N_i e'_{n_m(i)} \quad (4.8)$$

και $n_m(i)$ είναι ο ολικός(global) αριθμός του κόμβου.

Αν εφαρμόσουμε την προσέγγιση με συναρτήσεις μορφής της εξίσωσης 4.4 στις μεταβλητές της εξίσωσης 4.7 οδηγούμαστε στη σχέση:

$$\sum_{m=1}^n \left\{ \int_{v_m} \rho N_m^T N_m \alpha dv + \int_{v_m} B_m^T \sigma dv - \int_{v_m} \rho N_m^T b dv - \int_{\partial b_1 \cap \partial v_m} N_m^T t ds \right\} = 0 \quad (4.9)$$

Στην παραπάνω εξίσωση

- N είναι το μητρώο των συναρτήσεων μορφής
- σ είναι το διάνυσμα των τάσεων

$$\sigma^T = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}) \quad (4.10)$$

- B είναι το μητρώο που συσχετίζει τις παραμορφώσεις με τις μετατοπίσεις(μητρώο παραμόρφωσης μετατόπισης), είναι δηλαδή

$$\varepsilon = Bx \quad (4.11)$$

- α είναι το διάνυσμα των κομβικών μετατοπίσεων

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} = Na \quad (4.12)$$

- b είναι το διάνυσμα της δύναμης σώματος

$$b = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

- t είναι το διάνυσμα του εξωτερικού φορτίου

$$t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Ανάλογα με τις ανάγκες της ανάλυσης επιλέγονται κατάλληλα η τάξη των συναρτήσεων μορφής και το είδος των πεπερασμένων στοιχείων. Ύστερα απαιτείται ο υπολογισμός των ολοκληρωμάτων της εξίσωσης 4.9 για κάθε πεπερασμένο στοιχείο. Αυτό σημαίνει πως για κάθε πεπερασμένο στοιχείο

υπολογίζεται το μητρώο μάζας \mathbf{M} από το πρώτο ολοκλήρωμα, το μητρώο στιβαρότητας \mathbf{K} από το δεύτερο και το μητρώο της συνολικής δύναμης \mathbf{F} από τα δύο τελευταία.
Επομένως για κάθε πεπερασμένο στοιχείο μπορούμε να γράψουμε

$$\mathbf{M}^m \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}^m \mathbf{x} = \mathbf{F}^m \quad (4.15)$$

όπου (θεωρώντας σταθερή πυκνότητα) και χρησιμοποιώντας τη σχέση 4.6

$$\mathbf{M}^m = \rho \int_{v_m} \mathbf{N}_m^T \mathbf{N}_m dv \quad (4.16)$$

$$\mathbf{K}^m = \int_{v_m} \mathbf{B}_m^T \mathbf{D} \mathbf{B}_m dv \quad (4.17)$$

$$\mathbf{F}^m = \rho \int_{v_m} \mathbf{N}_m^T \mathbf{b} dv + \int_{\partial v_m} \mathbf{N}_m^T \mathbf{t} ds \quad (4.18)$$

Η ολοκλήρωση πραγματοποιείται σε κάθε ένα στοιχείο και στις τοπικές του συντεταγμένες (ξ, η, ζ) επομένως οι σχέσεις 4.16-4.18 πρέπει να εκφραστούν παραμετρικά.

Αν τα (ξ, η, ζ) μεταβάλλονται στο διάστημα $[-1, 1]$ τότε όλα τα ολοκληρώματα θα έχουν την εξής γενική μορφή

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 g(\xi, \eta, \zeta) \det \mathbf{J} d\xi d\eta d\zeta \quad (4.19)$$

όπου \mathbf{J} είναι ο ιακωβιανός πίνακας που συσχετίζει τις μερικές παραγώγους ως προς ξ, η, ζ με αυτές ως προς x, y, z

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N}{\partial \zeta} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \\ \frac{\partial N}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

και

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Αντιστρέφοντας τον \mathbf{J} μπορούμε να λύσουμε ως προς τις μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν.

Αριθμητική ολοκλήρωση

Όπως φαίνεται από τις σχέσεις της προηγούμενης παραγράφου, μια ανάλυση πεπερασμένων απαιτεί τον υπολογισμό πολλών ολοκληρωμάτων. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται αριθμητικά. Θα περιγράψουμε την μέθοδο ολοκλήρωσης κατά Gauss (Gauss Quadrature), την οποία εφαρμόζουν τα περισσότερα λογισμικά.

Έστω ότι θέλουμε να υπολογίσουμε το ολοκλήρωμα

$$I = \int_{-1}^1 f(\xi) d\xi \quad (4.21)$$

Η προσέγγιση έχει ως εξής:

$$I \approx w_1 f(\xi_1) + w_2 f(\xi_2) + \dots + w_n f(\xi_n) \quad (4.22)$$

όπου n είναι το πλήθος των σημείων Gauss, w_i είναι τα βάρη και ξ_i τα σημεία Gauss (Gauss integration points). Τα βάρη και τα σημεία Gauss υπολογίζονται με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του σφάλματος. Η ολοκλήρωση Gauss n σημείων είναι ακριβής για ένα πολυώνυμο τάξης $(2n-1)$.

Ολοκλήρωση Gauss για τριπλά ολοκληρώματα

Φυσικά, σε προβλήματα 3 διαστάσεων εμφανίζονται κυρίως τριπλά ολοκληρώματα. Η μέθοδος Gauss επεκτείνεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$I = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(r, s, t) dr ds dt \approx \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n W_k W_j W_i f(r_i, s_j, t_k) \quad (4.23)$$

Εφόσον υπολογιστούν τα μητρώα των 4.16-4.18, συντίθενται τα συνολικά μητρώα μάζας στιβαρότητας και δυνάμεων και διαμορφώνεται η τελική μορφή του προβλήματος

$$M\ddot{x} + Kx = F \quad (4.24a)$$

4.2 Επίλυση του συστήματος

Στα πεπερασμένα στοιχεία οδηγούμαστε συνήθως στην κατασκευή συστημάτων μεγάλων διαστάσεων. Η τάξη του συστήματος μπορεί να φτάνει τις εκατοντάδες χιλιάδες για προβλήματα που απαιτούν πολύ καλή διακριτοποίηση. Η επίλυση αυτών των συστημάτων μέσω H/Y, για να μπορεί να περατωθεί σε λογικό χρόνο και χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν λιγότερη μνήμη απαιτεί την χρήση διαφόρων τεχνικών επίλυσης και αποθήκευσης. Οι βασικές οικογένειες προβλημάτων που χρήζουν επίλυσης (ανάλογα με την μορφή του συστήματος και το είδος των εξισώσεων) είναι:

- i. Γραμμικά προβλήματα
- ii. Μη γραμμικά προβλήματα
- iii. Προβλήματα ιδιοτιμών
- iv. Δυναμικά προβλήματα

Το κομμάτι της επίλυσης απαιτεί ιδιαίτερο χειρισμό. Ένα σύστημα δεν είναι σίγουρο ότι θα μπορεί να επιλυθεί με οποιοδήποτε τρόπο. Οι λόγοι που μπορεί να μην καθιστούν ανέφικτη μια επίλυση είναι:

- i. Η αδυναμία της μεθόδου να μητρώα εντός της διαθέσιμης μνήμης του υπολογιστή
- ii. Η απαίτηση μη ρεαλιστικών χρόνων επίλυσης ισοδυναμεί με αδυναμία επίλυσης
- iii. Αριθμητική αστάθεια που μπορεί να παρουσιαστεί σε κάποιες μεθόδους

Μία μέθοδος επίλυσης μπορεί να είναι **άμεση** ή **επαναληπτική**. Η πρώτη επιτυγχάνει επίλυση ακολουθώντας μια προκαθορισμένη διαδικασία αριθμητικών πράξεων και είναι κατάλληλη για γραμμικά συστήματα ενώ η δεύτερη απαιτεί διαδοχικές προσεγγίσεις και χρησιμοποιείται σε μη γραμμικά συστήματα. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται φυσικά από το είδος και το μέγεθος του προβλήματος, αλλά και από τις δυνατότητες του διαθέσιμου H/Y.

Στην περίπτωση των στατικών προβλημάτων το τελικό σύστημα είναι στην μορφή:

$$Kx = F \quad (4.24b)$$

Η επίλυση αυτών των συστημάτων γίνεται με μεθόδους όπως η μέθοδος απαλοιφής του Gauss (που είναι η πιο συνήθης), η μέθοδος Cholesky, η Jacobi, η Gauss-Seidel και άλλες.

Σε μια δυναμική ανάλυση εμπλέκεται ως μεταβλητή και ο χρόνος. Υπάρχουν 2 τύποι επίλυσης σε

αυτήν τη περίπτωση, implicit και explicit. Η βασική διαφορά είναι πως σε μια implicit μέθοδο επιλύονται εξισώσεις που εμπεριέχουν πληροφορίες από το παρόν χρονικό βήμα αλλά και το επόμενο, ενώ σε μια explicit η κατάσταση του συστήματος υπολογίζεται μόνο από το προηγούμενο χρονικό βήμα. Σε μη γραμμικά προβλήματα η επίλυση για κάθε χρονικό βήμα απαιτεί μια σειρά από επαναληπτικές διαδικασίες οι οποίες πρέπει να συγκλίνουν με βάση κάποιο κριτήριο. Στην explicit ανάλυση γίνεται απ' ευθείας υπολογισμός των κομβικών επιταχύνσεων με αποτέλεσμα να έχουμε σημαντική μείωση στο χρόνο. Οι βασικότερες μέθοδοι επίλυσης είναι:

- Η μέθοδος Newmark (Implicit)
- Η μέθοδος των κεντρικών διαφορών (Explicit)

Αν προσθέσουμε τον όρο της απόσβεσης στην 4.24a έχουμε

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (4.24c)$$

που είναι ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων 2^{ης} τάξης.

Θεωρούμε την κατάσταση του συστήματος γνωστή την χρονική στιγμή t και αναζητούμε την κατάσταση την χρονική στιγμή $t+\Delta t$. Δηλαδή πρέπει να λύσουμε την εξίσωση

$$M\ddot{x}(t + \Delta t) + C\dot{x}(t + \Delta t) + Kx(t + \Delta t) = F(t + \Delta t) \quad (4.25)$$

ως προς $x(t + \Delta t)$.

Η μέθοδος Newmark

Η μέθοδος Newmark ανάγει την παραπάνω εξίσωση σε ένα σύστημα της μορφής:

$$K'x(t + \Delta t) = F'(t + \Delta t) \quad (4.26)$$

το δεξί μέλος της οποίας εξαρτάται από την κατάσταση t και από τις δυνάμεις την $t+\Delta t$. Το αλγεβρικό αυτό σύστημα μπορεί να λυθεί σε κάθε χρονικό βήμα ως προς τις μετατοπίσεις. Το K' εξαρτάται από τα συνολικά μητρώα και το Δt . Δηλαδή αν το Δt είναι σταθερό το K' υπολογίζεται μόνο μια φορά. Το F' ανανεώνεται σε κάθε βήμα. Η μέθοδος Newmark είναι ευσταθής (unconditionally stable) δηλαδή συγκλίνει πάντα. Η ακρίβεια της μεθόδου βέβαια εξαρτάται από το μέγεθος του χρονικού βήματος (time step).

Η μέθοδος των κεντρικών διαφορών

Στον πρώτο κύκλο έχουμε γνωστή επιτάχυνση $\ddot{x}(t)$ την χρονική στιγμή t (από τις αρχικές συνθήκες).

Για την χρονική στιγμή $t + \frac{\Delta t}{2}$ η ταχύτητα θα είναι:

$$\dot{x}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) = \dot{x}\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) + \ddot{x}(t)\Delta t(t) \quad (4.27)$$

Η μετατόπιση την στιγμή $t + \Delta t$ θα είναι:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \dot{x}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right)\Delta t(t + \frac{\Delta t}{2}) \quad (4.28)$$

Όπου

$$\Delta t\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) = \frac{\Delta t(t) + \Delta t(t + \Delta t)}{2} \quad (4.29)$$

Έπειτα από τον υπολογισμό των μετατοπίσεων μπορούν να βρεθούν οι νέες συντεταγμένες των κόμβων.

$$X_i(t + \Delta t) = X_i(t) + x_i(t + \Delta t) \quad (4.30)$$

Η επιτάχυνση στο επόμενο κύκλο υπολογίζεται λύνοντας την εξίσωση ως προς την επιτάχυνση

$$\ddot{x} = M^{-1}(F_{nodal}) \quad (4.31)$$

Η μέθοδος των κεντρικών διαφορών εκμεταλλεύεται το γεγονός πως ο πίνακας M είναι διαγώνιος, πράγμα που καθιστά την αντιστροφή του υπολογιστικά εύκολη.

Η διαδικασία της επίλυσης

Σύμφωνα με τα παραπάνω, αρχικά γίνεται υπολογισμός των κομβικών επιταχύνσεων άμεσα και όχι επαναληπτικά. Ο πίνακας F_{nodal} περιέχει τις δυνάμεις στους κόμβους, που προκύπτουν από τις δυνάμεις σώματος, εξωτερικές δυνάμεις, δυνάμεις από επαφή, τάσεις, απόσβεση. Από τον υπολογισμό της επιτάχυνσης την στιγμή t υπολογίζονται οι ταχύτητες την στιγμή $t+\Delta t/2$ και οι μετατοπίσεις την στιγμή $t+\Delta t$. Γίνεται ανανέωση του πλέγματος. Επίσης από τις μετατοπίσεις υπολογίζονται οι παραμορφώσεις. Από τις παραμορφώσεις οι τάσεις, και έτσι ανανεώνεται ο πίνακας F_{nodal} . Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να φτάσουμε τον επιθυμητό χρόνο τερματισμού.

4.3 Χαρακτηριστικά της μεθόδου των κεντρικών διαφορών

Ευστάθεια της μεθόδου των κεντρικών διαφορών

Σε αντίθεση με την implicit μέθοδο, η μέθοδος των κεντρικών διαφορών δεν συγκλίνει πάντα. Το κριτήριο για την σύγκλιση, αφορά το μέγεθος του Δt (time step) το οποίο δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλο. Το Δt φράσσεται από την μέγιστη ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων η μέγιστη η ιδιοσυχνότητα εξαρτάται από την μέγιστη ιδιοσυχνότητα του κάθε στοιχείου.

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{max}} \quad (4.32)$$

Αυτό σημαίνει πως σε μοντέλα με πολύ μικρά σε μέγεθος (συνεπώς μάζα) πεπερασμένα στοιχεία η μέγιστη ιδιοσυχνότητα γίνεται μεγάλη και το κρίσιμο χρονικό βήμα γίνεται μικρό. Αποτέλεσμα είναι η ανάλυση να χρειάζεται μεγάλο υπολογιστικό χρόνο.

Διαγώνιος πίνακας μάζας

Ο διαγώνιος πίνακας είναι ζωτικής σημασίας για την explicit μέθοδο. Στο βήμα υπολογισμού της επιτάχυνσης, αποφεύγεται η αντιστροφή του πίνακα M η οποία είναι μια βαριά υπολογιστικά διαδικασία. Η σχέση 4.16 δίνει τον μη διαγώνιο πίνακα καταναμημένης μάζας (consistent mass matrix). Μια εύκολα υλοποιήσιμη διαγωνοποίηση του πίνακα είναι η πρόσθεση των στοιχείων της k γραμμής για την εύρεση του kk διαγώνιου στοιχείου:

$$m_{kk} = \int_V \rho \varphi_k \sum_{i=1}^n \varphi_i dv = \int_V \rho \varphi_k dv \quad (4.33)$$

δεδομένου ότι για τις συναρτήσεις μορφής ισχύει:

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i = 1$$

Ο διαγώνιος πίνακας ονομάζεται και πίνακας συγκεντρωμένης μάζας (lumped mass matrix) αφού η μάζα επιμερίζεται στους κόμβους.

4.4 Διαδικασία ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία

Η επίλυση ενός προβλήματος, απαιτεί μια σειρά από συγκεκριμένα βήματα τα οποία γενικά είναι τα ίδια ανεξάρτητα από το λογισμικό που χρησιμοποιείται.

Τα επιμέρους βήματα είναι τα παρακάτω:

Προεπεξεργασία (Preprocessing)

- Ορισμός της γεωμετρίας
- Ορισμός του τύπου των πεπερασμένων στοιχείων
- Ορισμός του μοντέλου του υλικού
- Ορισμός του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων

- Δημιουργία του πλέγματος
- Ορισμός των περιορισμών-συνοριακών συνθηκών
- Επιβολή των φορτίων
- Ορισμός του μοντέλου της επαφής (αν υπάρχει)

Επίλυση (Solution)

Επίλυση της μητρικής μορφής των εξισώσεων ως προς την βασική μεταβλητή (μετατόπιση). Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων, των τάσεων και των δυνάμεων. Διάφορες τεχνικές χειρισμού των δεδομένων χρησιμοποιούνται με σκοπό την μείωση του υπολογιστικού χρόνου και του αποθηκευτικού χώρου.

Μετεπεξεργασία (Postprocessing)

- Εξαγωγή των τιμών όλων των μεταβλητών
- Απεικόνιση της παραμορφωμένης γεωμετρίας
- Γραφική απεικόνιση με χρωματισμούς όλων των μεταβλητών και ταξινόμηση ανάλογα με το μέτρο τους

Κεφάλαιο 5 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν μέσω τις προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να κατασκευάσουμε ένα μοντέλο το οποίο να είναι όσο το δυνατό πιο φιλικό προς τον αλγόριθμο επίλυσης (solver). Είναι σημαντικό βρεθεί μια ισορροπία μεταξύ της απλότητας του μοντέλου και της ακρίβειάς του. Στην πραγματικότητα, τα φορτία που δέχεται η μηχανή είναι καταναμεμένα σε πολύπλοκες επιφάνειες χωρίς πάντα σαφές μέτρο και διεύθυνση. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα βήματα και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή ενός γρήγορου ως προς την επίλυση και αρκετά ακριβούς μοντέλου.

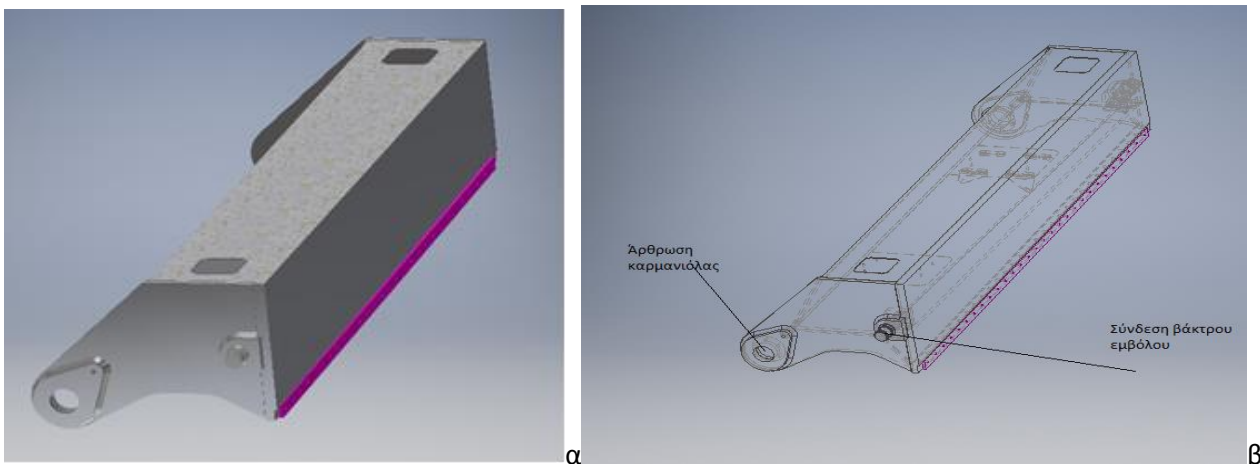
5.1 Κατασκευή της γεωμετρίας

Η μελέτη μας περιέχει δύο αλληλεπιδρώντα σώματα, το έλασμα και τη μηχανή. Η γεωμετρία του ελάσματος είναι απλή, ένα ομοιόμορφο σώμα ορθογωνικής διατομής με καθορισμένο μήκος, πλάτος και πάχος. Οι διαστάσεις του είναι 1500mmx200mmx2mm. Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας της μηχανής χρειάζεται περισσότερη προσοχή. Η μηχανή λειτουργεί στην πραγματικότητα με έναν μεγάλο αριθμό από συνεργαζόμενα στοιχεία, τα οποία είναι πρακτικά αδύνατο να συμπεριληφθούν στην ανάλυση. Επομένως σχεδιάστηκαν μόνο τα πιο βασικά μέρη που σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες προσομοιώνουν την κοπή. Αυτά είναι:

- Η καρμανιόλα
- Το έλασμα
- Η βάση
- Το άνω κοπτικό εργαλείο (κινητό)
- Το κάτω κοπτικό εργαλείο (σταθερό)
- Ο συγκρατητής

Καρμανιόλα

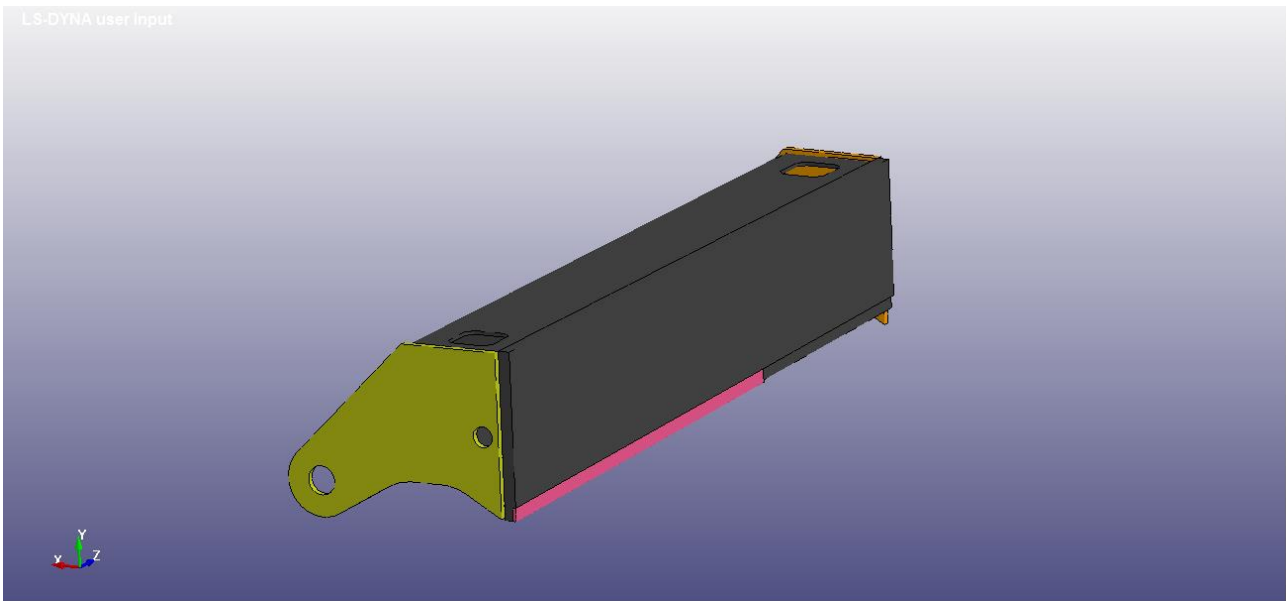
Η καρμανιόλα είναι ένα από τα σημαντικότερα μέρη της μηχανής, η γεωμετρία της και η στιβαρότητα καθορίζουν το αποτέλεσμα της κοπής. Επίσης, παρουσιάζει ενδιαφέρον η παραμόρφωσή της κατά την κανονική κοπή και κυρίως κατά την κοπή με μεγάλο διάκενο. Βάσει των παραπάνω, θα πρέπει να συμπεριληφθεί στο μοντέλο η ακριβής γεωμετρία της καρμανιόλας



Εικόνα 5.1 (α) Καρμανιόλα και λεπίδα (β) Σχεδιαστικές λεπτομέρειες κατασκευής

Στις εικόνες 5.1 και 5.2 φαίνεται η πραγματική γεωμετρία της καρμανιόλας, το σημείο της άρθρωσης χάρη στην οποία περιστρέφεται καθώς και τα σημεία άσκησης της δύναμης από τα υδραυλικά έμβολα. Όπως φαίνεται παρακάτω, στην εικόνα 5.3, έχουν αγνοηθεί μόνο οι οπές στις οποίες δένεται η λεπίδα και τα σημεία σύνδεσης της με τα βάρια και την υπόλοιπη μηχανή. Τα επιμέρους τμήματα είναι μεταξύ τους συγκολλητά. Οι συγκολλήσεις αγνοούνται και η κατασκευή θεωρείται ως ένα σώμα. Όπως αναφέρθηκε, η

κοπή είναι περιστροφική. Η κινητή λεπίδα βρίσκεται πάνω στην καρμανιόλα που περιστρέφεται γύρω από κάποιο κέντρο. Η περιστροφική κοπή σε συνδυασμό με την ανάγκη για κοπή υπό γωνία περιπλέκει την γεωμετρία της λεπίδας, η οποία τοποθετείται στην καρμανιόλα έχοντας υποστεί κάποια κάμψη έτσι ώστε το διάκενο να είναι σταθερό σε κάθε σημείο του μήκους κοπής. Σε κάθε τέτοιο σημείο, στην αρχή της κοπής, δηλαδή σε μηδενική εισχώρηση της κοπτικής ακμής η απόσταση μεταξύ των δύο ακμών είναι ίση με το διάκενο. Καθώς ξεκινά η εισχώρηση η κινητή ακμή απομακρύνεται ελάχιστα από την σταθερή για να αποφευχθεί το «μπλοκάρισμα» του ελάσματος ανάμεσα στις δύο λεπίδες. Επειδή οι γωνίες είναι αρκετά μικρές θεωρείται πως δεν θα υπάρχει σημαντική διαφορά στις δυνάμεις ανάμεσα στην περιστροφική κοπή και στην κάθετη κοπή. Επομένως η καρμανιόλα μοντελοποιείται με ευθεία λεπίδα και η κίνησή της είναι καθοδική.

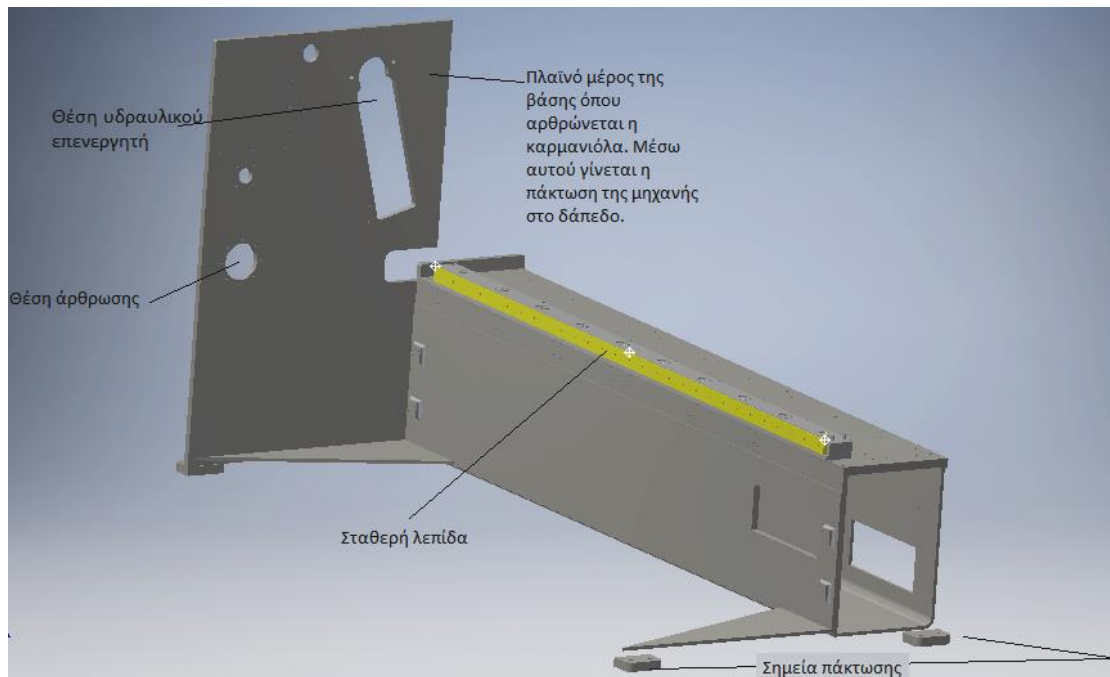


Εικόνα 5.2: Απλοποιημένο μοντέλο καρμανιόλας

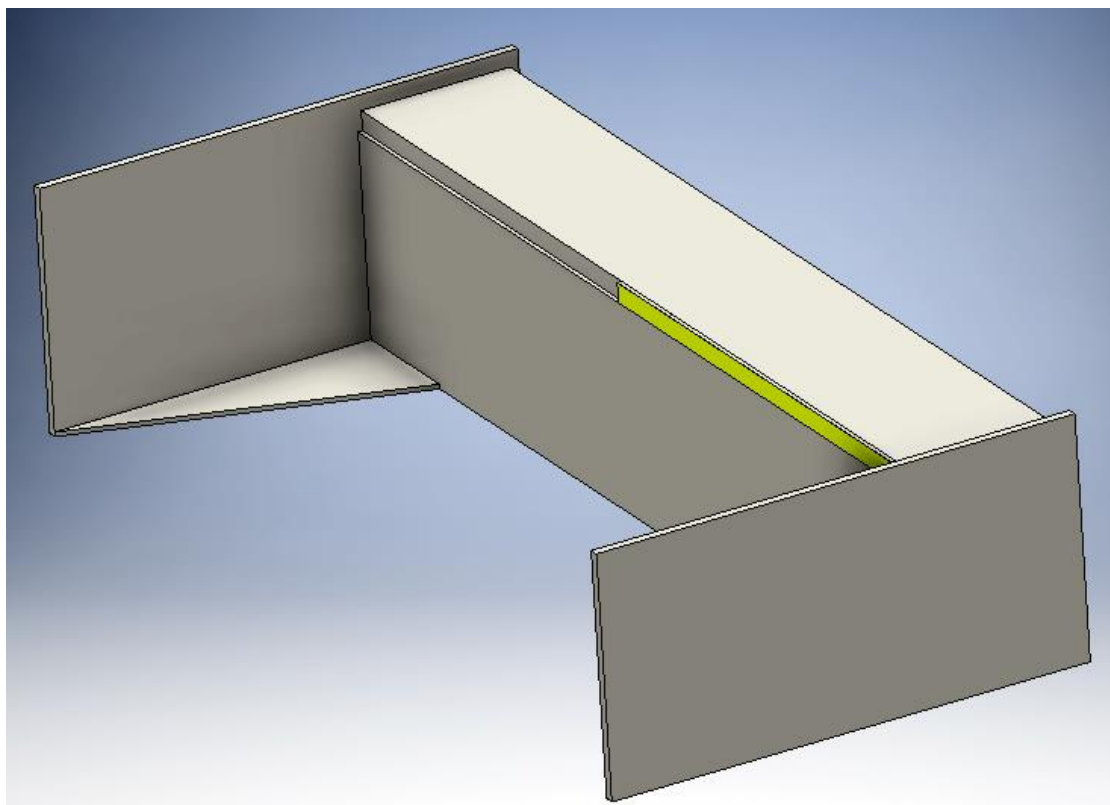
Μοντελοποίηση Βάσης

Η βάση της μηχανής είναι το κομμάτι πάνω στο οποίο γίνεται η πρόσδεση της σταθερής λεπίδας και αυτό που πακτώνεται στο έδαφος, προσφέροντας στήριξη για ολόκληρο το ψαλίδι. Παρουσιάζει ενδιαφέρον η καταπόνηση που δέχεται κατά την κοπή καθώς και η συνεισφορά της στον καθορισμό της απαιτούμενης δύναμης κοπής. Φυσικά, ο πραγματικός σχεδιασμός της βάσης εμπεριέχει αρκετές λεπτομέρειες που είναι απαραίτητες για την συναρμολόγηση των επιμέρους εξαρτημάτων.

Αυτές δεν επηρεάζουν πρακτικά την μηχανική της συμπεριφορά επομένως θα αγνοηθούν χάριν απλότητας της γεωμετρίας του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων. Αντιθέτως, θα γίνει ακριβής απεικόνιση των σημείων πάκτωσης της μηχανής και θα σχεδιαστεί με τις ακριβείς διαστάσεις της. Η συναρμολόγηση της βάσης γίνεται από πλάκες, συγκολλητές μεταξύ τους. Η συγκόλληση δεν θα μοντελοποιηθεί, αλλά τα συγκολλητά τμήματα θα έχουν κοινούς κόμβους.



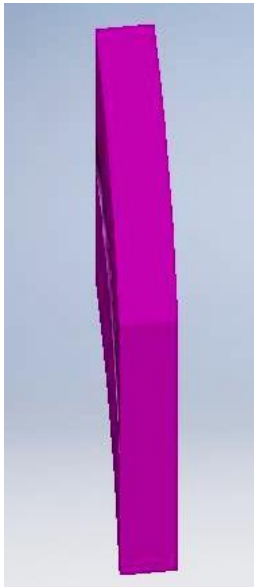
Εικόνα 5.3: Βάση ψαλιδιού



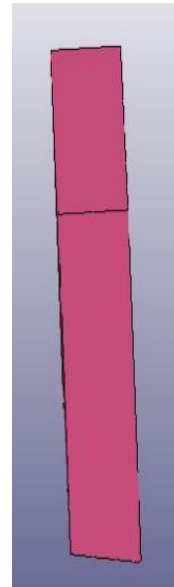
Εικόνα 5.4: Απλοποιημένο μοντέλο βάσης

Κινητή λεπίδα

Τα κοπτικά εργαλεία είναι προφανώς ίδια. Έχουν αγνοηθεί οι σπές που φέρουν για την πρόσδεσή τους. Επίσης η άνω λεπίδα έχει μια ιδιαίτερη γεωμετρία όπως φαίνεται παρακάτω, επειδή η κίνηση της καρμανιόλας είναι περιστροφική πρέπει σε κάθε σημείο του μήκους κοπής το διάκενο να είναι το ίδιο. Εφόσον στη συνέχεια θα θεωρηθεί κάθετη και όχι περιστροφική η κίνηση της καρμανιόλας, η γεωμετρία απλοποιείται όπως φαίνεται στην εικόνα.



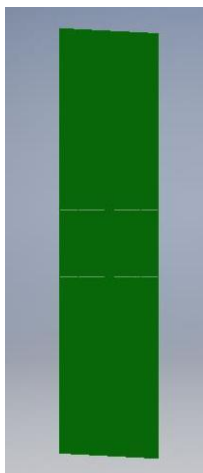
Εικόνα 5.6: Πραγματική γεωμετρία κινητής λεπίδας



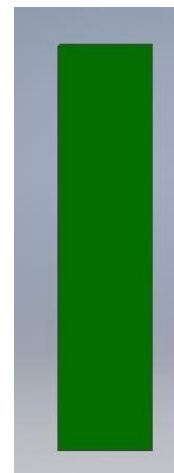
Εικόνα 5.7: Απλοποιημένη γεωμετρία λεπίδας

Σταθερή λεπίδα

Η σταθερή λεπίδα είναι απλώς ένα παραλληλεπίπεδο. Όπως και στην κινητή δε θα συμπεριλάβουμε τι οπές για την πρόσδεση. Επίσης η διατομή της θα θεωρηθεί ορθογωνική, αν και στην πραγματικότητα δεν είναι ώστε να διευκολύνεται η κοπή.



Εικόνα 5.5: Διατομή σταθερής λεπίδας



Εικόνα 5.6: Διατομή μοντέλου

Κοπτική ακμή

Στην ιδανική περίπτωση η κοπτική ακμή θα έπρεπε να έχει μηδενική καμπυλότητα. Αυτό στην πράξη δεν είναι εφικτό, και σύμφωνα με την μελέτη του Saanouni οι διαφορές στην δύναμη κοπής είναι σημαντικές για διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας. Η ακτίνα καμπυλότητας αυξάνει καθώς εντείνεται η φθορά του κοπτικού εργαλείου. Επειδή εστιάζουμε το ενδιαφέρον μας στην καταπόνηση της μηχανής και θα θέλαμε να προσεγγίσουμε μια δυσμενή περίπτωση η ακτίνα καμπυλότητας θα τεθεί ίση με 0.5.

Στάδιο φθοράς	Ακτίνα καμπυλότητας ακμής(mm)
Μηδενική	0
Μέτρια	1
Προχωρημένη	2

Συγκρατητής

Ο συγκρατητής αποτελείται από έναν αριθμό εν σειρά πνευματικών εμβόλων που ασκούν κάθετη δύναμη στο έλασμα κρατώντας το σταθερό πάνω στη βάση. Το σύστημα αυτό αντικαταστάθηκε από μια πλάκα που μετακινείται κάθετα προς την επιφάνεια του ελάσματος.

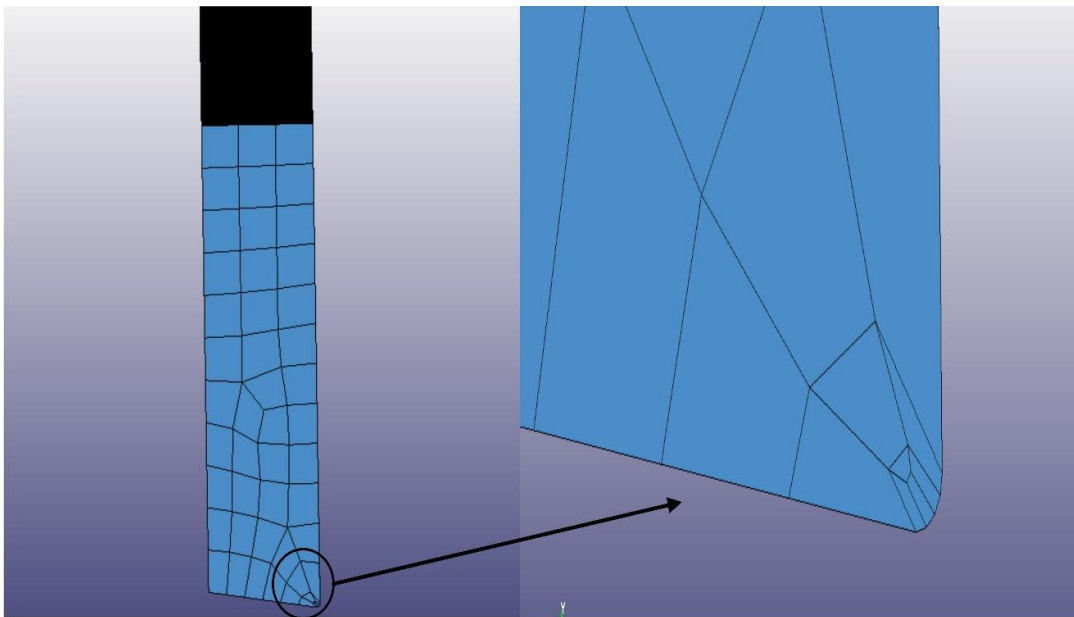
5.2 Δημιουργία πλέγματος

Άνω λεπίδα

Η ακτίνα καμπυλότητας της κοπτικής ακμής έχει επιλεγεί ίση προς 0.5mm. Είναι σημαντικό η διακριτοποίηση να είναι τέτοια ώστε να παρακολουθείται η καμπύλη, δηλαδή να υπάρχει ικανός αριθμός κόμβων στην επιφάνεια της ακμής. Επιλέχθηκε διακριτοποίηση 4 στοιχείων σε αυτό το σημείο. Αυτή η ανάγκη μας οδηγεί στον περιορισμό της μιας διάστασης των στοιχείων σε 0,0625mm. Κατά το μήκος της λεπίδας χρειαζόμαστε επίσης καλή διακριτοποίηση για δύο λόγους:

- Για λόγους που σχετίζονται με την επαφή και τις δυνάμεις που προκύπτουν από αυτή.
- Επειδή θέλουμε να παρακολουθήσουμε την κάμψη της κατά την κοπή.

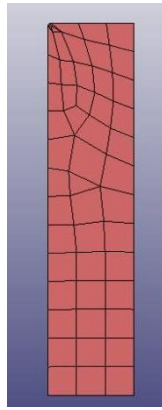
Κατά το πάχος της λεπίδας, δεν έχουμε κάποιον περιορισμό, παρά μόνο την διατήρηση καλών λόγων διαστάσεων (*aspect ratio*), ένα μέγεθος που σχετίζεται άμεσα με την ακρίβεια και την ευστάθεια του μοντέλου. Επομένως, αφέθηκε να υπολογιστούν αυτόματα οι υπόλοιπες διαστάσεις από τον αλγόριθμο γένεσης πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων. Η γεωμετρία της λεπίδας δεν επιτρέπει την γένεση δομημένου και ομοιόμορφου πλέγματος, οπότε τα στοιχεία είναι μεν εξαεδρικά αλλά διαφορετικού σχήματος. Το τελικό πλέγμα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 5.7: Πλέγμα άνω λεπίδας

Κάτω λεπίδα

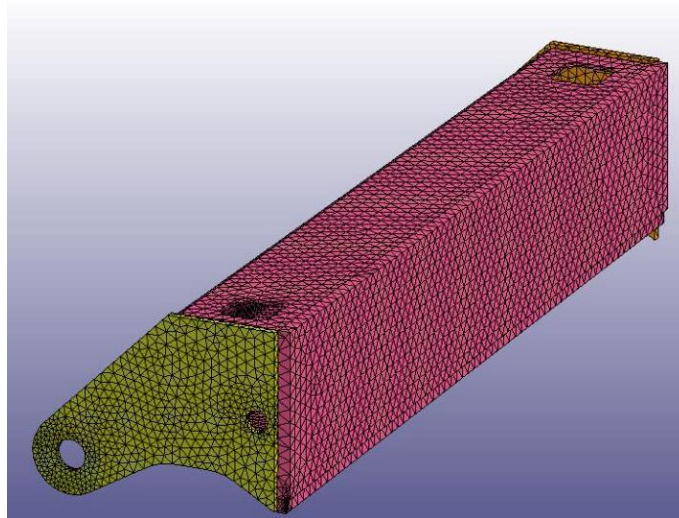
Η σταθερή λεπίδα διακριτοποιείται ομοίως. Η ίδια διακριτοποίηση εφαρμόστηκε κατά το προφίλ της ακμής όπως στην άνω και η ίδια διακριτοποίηση κατά το μήκος.



Εικόνα 5.8: Πλέγμα κάτω λεπίδας

Καρμανιόλα

Ο λόγος που η καρμανιόλα και η άνω λεπίδα είναι ξεχωριστά σώματα είναι για να έχουμε τη δυνατότητα να ορίσουμε διαφορετικό υλικό και για τα δύο. Για να απλοποιηθεί ο τρόπος σύνδεσης των δύο σωμάτων θα πρέπει αργότερα να ορίσουμε τους κόμβους της λεπίδας στην πλευρά της καρμανιόλας ως άρρηκτα συνδεδεμένους με τους αντίστοιχους αυτής. Αυτό θα γίνει μέσω ενός τύπου επαφής. Αυτός ο τύπος επαφής δεν απαιτεί οι κόμβοι των δύο σωμάτων να συμπίπτουν, επομένως δεν εισάγει κάποιον περιορισμό ως προς το μέγεθος των στοιχείων. Επομένως το πλέγμα της καρμανιόλας θα είναι σαφώς πιο αραιό από τα υπόλοιπα, έχοντας μια σχετικά καλή διακριτοποίηση ως προς το μέγεθός της για να μπορέσει να προσεγγισθεί η ελαστικότητά της όσο το δυνατόν καλύτερα. Ο όγκος της καρμανιόλας είναι τέτοιος, ώστε η διακριτοποίησή της με στοιχεία ανάλογα των λεπίδων να αυξάνει κατακόρυφα τον υπολογιστικό φόρτο. Λόγω της περίεργης γεωμετρίας της, ήταν αδύνατη η δημιουργία δομημένου πλέγματος με εξαεδρικά στοιχεία και δεδομένου πως αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η ελαστικότητά της και όχι η κατανομή των τάσεων της προτιμήθηκε να χρησιμοποιηθούν τετραεδρικά στοιχεία (πυραμίδες) μεγέθους περίπου 60mm. Δεδομένου ότι το μήκος της καρμανιόλας είναι 3200mm το πλέγμα μπορεί να χαρακτηριστεί μέτριας πυκνότητας.

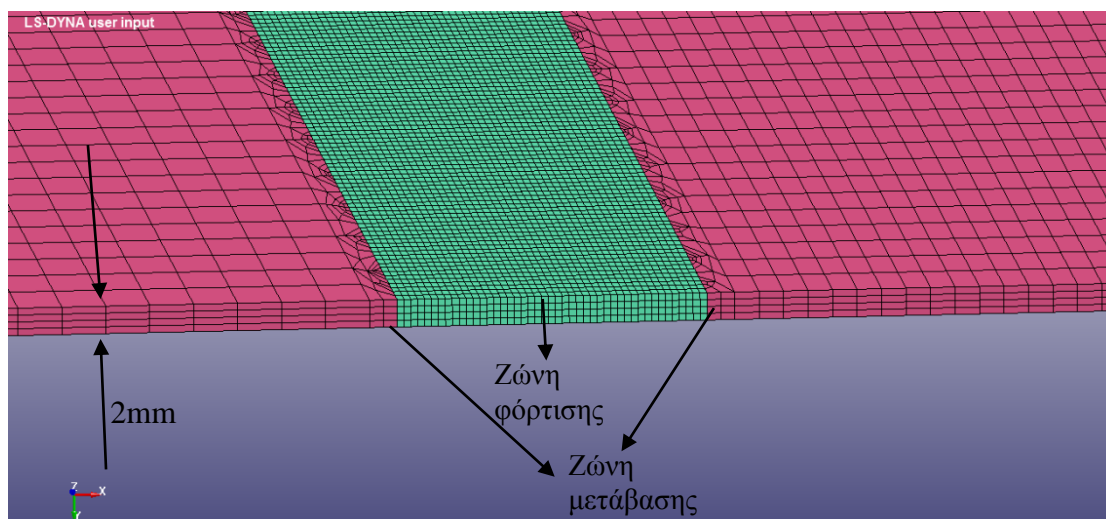


Εικόνα 5.9: Πλέγμα Καρμανιόλας

Έλασμα

Το έλασμα είναι αυτό το οποίο δέχεται τη μεγαλύτερη καταπόνηση και εκεί εμφανίζονται οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις, άρα απαιτείται προσοχή στην διακριτοποίησή του. Εκτός αυτών, έρχεται σε επαφή με δύο άλλα σώματα, τα κοπτικά εργαλεία. Λόγω των μεγάλων ταχυτήτων και παραμορφώσεων η σχετική ταχύτητα μεταξύ των κόμβων του ελάσματος και των εργαλείων είναι αρκετά μεγάλη με αποτέλεσμα η λειτουργικότητα της επαφής να εξαρτάται από το πλέγμα.

Ο πρώτος περιορισμός εδώ είναι η επαφή που σχετίζεται με το πλέγμα των λεπίδων, που με τη σειρά του, όπως αναφέρθηκε, εξαρτάται από την καμπυλότητα της ακμής. Για λόγους ευστάθειας της επαφής, για την οποία θα μιλήσουμε σε επόμενη παράγραφο, έπρεπε το μέγεθος των στοιχείων του ελάσματος να είναι της τάξης αυτών με τα οποία έρχεται σε επαφή. Επομένως, αυτό μας οδηγεί σε επιλογή στοιχείων μεγέθους με την μία πλευρά του να είναι περίπου 0.2mmx1mm. Ο δεύτερος περιορισμός είναι πως πρέπει να υπάρχουν αρκετά στοιχεία κατά το πάχος του ελάσματος, αφού όπως είδαμε στη βιβλιογραφία, οι τάσεις μεταβάλλονται σημαντικά κατά το πάχος. Επομένως η τρίτη διάσταση των εξαεδρικών στοιχείων επιλέχθηκε με βάση το πάχος 0.5mm. Αν χρησιμοποιούσαμε αυτά τα στοιχεία σε όλο το έλασμα, θα είχαμε κάποια εκατομμύρια πεπερασμένα στοιχεία με αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου επίλυσης του μοντέλου. Η διακριτοποίηση αυτή έχει νόημα κυρίως στην περιοχή του ελάσματος που υπόκειται σε διάτμηση και έρχεται σε επαφή με τα εργαλεία. Επιλέχθηκε λοιπόν σε μια περιοχή σε όλο το μήκος του ελάσματος, αλλά σε πλάτος λίγο μεγαλύτερο του διακένου, να δημιουργηθεί πυκνό πλέγμα και αραιότερο εκτός αυτής. Αυτή είναι η περιοχή υψηλής φόρτισης. Στην περιοχή κοντά στα άκρα, δεν αναμένουμε ιδιαίτερη φόρτιση, από άποψη τάσεων και παραμορφώσεων, άρα το πλέγμα εκεί μπορεί να είναι αρκετά αραιό. Ενδιάμεσα, πρέπει να υπάρχει μια περιοχή μετάβασης. Τα στοιχεία σε αυτήν την περιοχή γίνονται αναπόφευκτα πιο μικρά και χαμηλότερης ποιότητας αλλά επειδή το μήκος αυτών των ζωνών είναι 3 mm σε κάθε πλευρά δεν επηρεάζουν σημαντικά την ανάλυση.

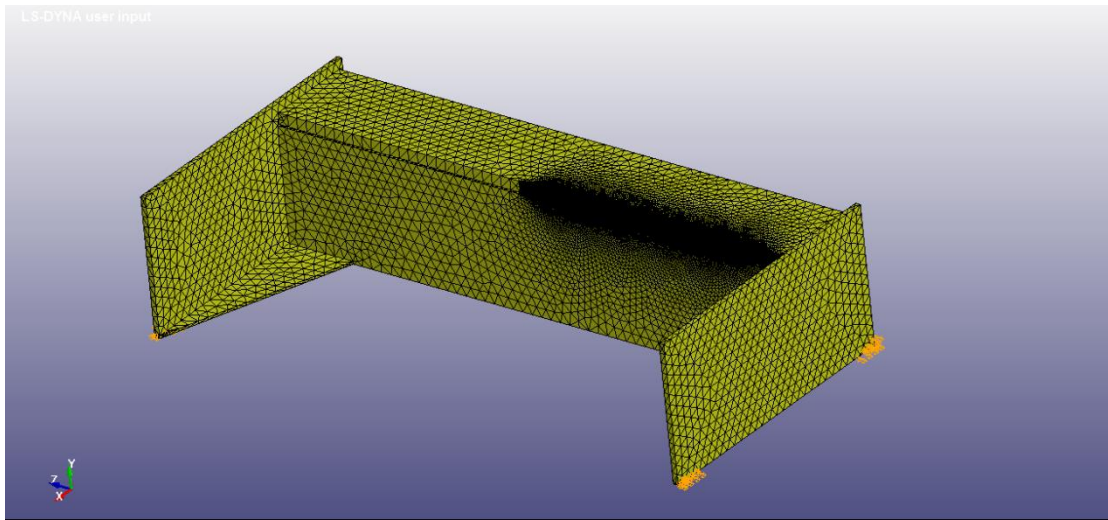


Εικόνα 5.10: Πλέγμα ελάσματος

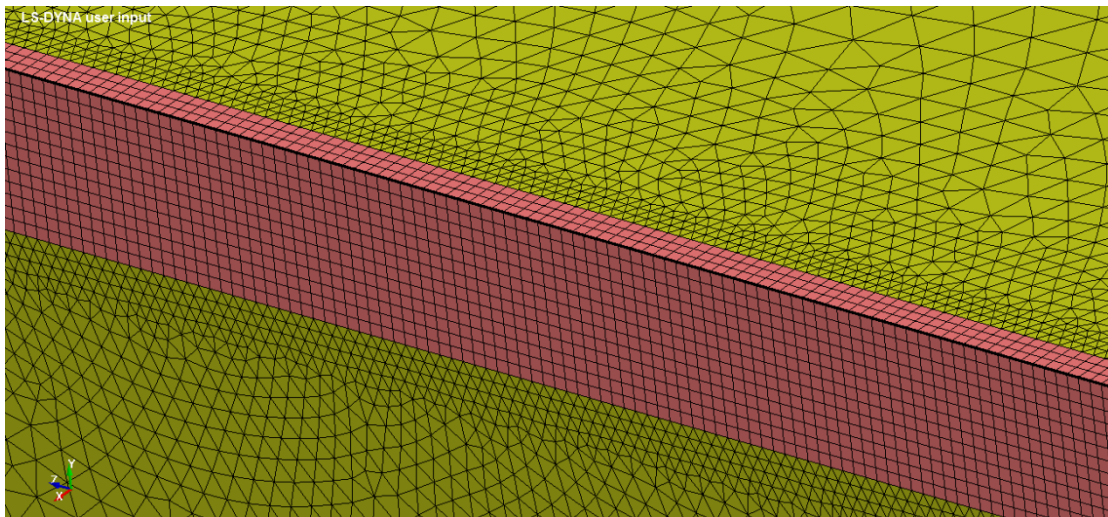
Συνεπώς έχουμε 3 ζώνες πλέγματος κατά το πλάτος του ελάσματος. Η πρώτη ζώνη είναι το κέντρο. Η δεύτερη ζώνη αποτελείται και αυτή από εξαεδρικά στοιχεία με μεγαλύτερο πλάτος αυτή τη φορά, και η τρίτη ζώνη με από εξαεδρικά στοιχεία ακόμα μεγαλύτερου πλάτους. Το μήκος και το πάχος των στοιχείων διατηρήθηκε λόγω της επαφής. Οι ζώνες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Η άλλη εναλλακτική ήταν να χρησιμοποιηθούν 2 ζώνες με πυραμίδες στην δεύτερη, όπως φαίνεται στο σχήμα αλλά απορρίφθηκε επειδή τα εξαεδρικά εμφανίζουν καλύτερη ευστάθεια.

Βάση

Η προσομοίωση της ελαστικότητας της βάσης είναι από τα πιο ενδιαφέροντα σημεία της ανάλυσης. Το πλέγμα της βάσης έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτό της καρμανιόλας. Το επιθυμητό μέγεθος των πυραμίδων είναι περί τα 60 mm. Το κύριο μέρος της βάσης, τα πλαϊνά στηρίγματα και να νεύρα που βρίσκονται στο κάτω μέρος έχουν σχεδιασθεί ξεχωριστά. Επειδή στην πραγματικότητα είναι συγκολλητά, οι πλευρές που έρχονται σε επαφή μεταξύ τους έχουν συνενωθεί σε μία, γεγονός που επιτρέπει την δημιουργία κοινού πλέγματος σε αυτά τα σημεία. Το ίδιο ισχύει και στην περιοχή όπου η βάση συνδέεται με την λεπίδα. Βέβαια το πλέγμα της λεπίδας είναι αρκετά πυκνότερο με αποτέλεσμα το αντίστοιχο της βάσης να το «ακολουθεί» στην γύρω περιοχή, μιας και η διακριτοποίηση της βάσης έπεται αυτής της λεπίδας, αφού η δεύτερη είναι πολύ σημαντικότερη. Το πλέγμα αραιώνει σταδιακά έως την δοθείσα τιμή των 60 mm.



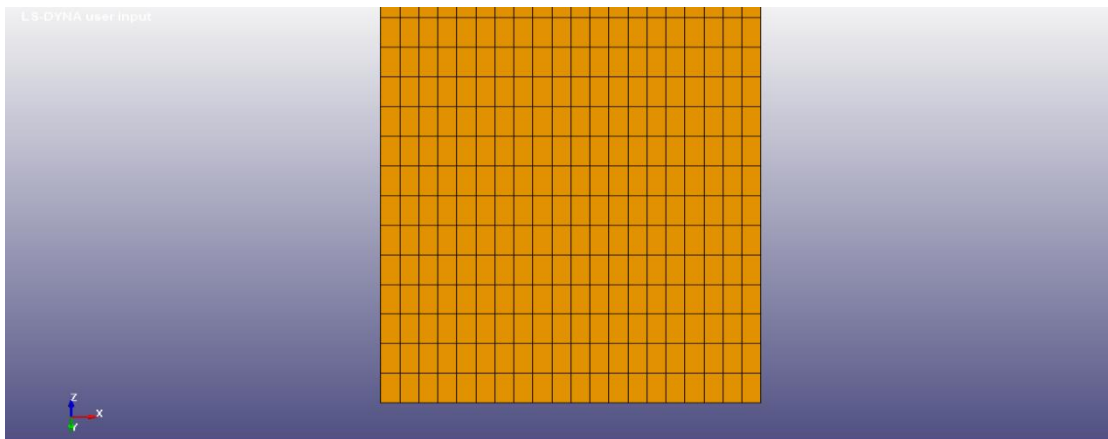
Εικόνα 5.11: Διακριτοποίηση βάσης



Εικόνα 5.12: Διακριτοποίηση γύρω από τη σταθερή λεπίδα

Συγκρατητής

Ο συγκρατητής έχει θεωρηθεί μια πλάκα επομένως το πλέγμα του είναι με 2-διάστατα στοιχεία κελύφους (shell elements). Το μέγεθος των στοιχείων επιλέχθηκε σχετικά μεγάλο.



Εικόνα 5.13: Πλέγμα πλάκας συγκράτησης

5.3 Οριακές συνθήκες

Η άνω λεπίδα θεωρείται πακτωμένη στην καρμανιόλα επομένως δεν έχει κάποια οριακή συνθήκη. Το έλασμα επίσης δεν έχει οριακές συνθήκες.

Καρμανιόλα

Η καρμανιόλα δέχεται τη δύναμη από τα έμβολα κοντά στα άκρα της. Επίσης στα άκρα της είναι το παραβολικό κομμάτι που τη συνδέει με την βάση στην περιστροφική άρθρωση. Οι δύο αρθρώσεις είναι αυτές που παραλαμβάνουν εξ ολοκλήρου το φορτίο της καρμανιόλας. Άρα η κίνηση της προσεγγίστηκε από τα εξής:

- Καθορισμένη ταχύτητα κοπής 750mm/s. Επιλέγονται οι κόμβοι στα σημεία σύνδεσης βάρου και καρμανιόλας και σε αυτούς ορίζουμε την επιθυμητή ταχύτητα.
- Κύλιση στα σημεία της άρθρωσης. Με αυτόν τον τρόπο θέλουμε αφενός να προσεγγίσουμε τις πραγματικές οριακές συνθήκες και αφετέρου να επιτρέψουμε την κάθετη κίνηση της καρμανιόλας.

Βάση

Η μηχανή πακτώνεται στο δάπεδο με κοχλίες σε 4 σημεία, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3. Η πάκτωση στο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται επιλέγοντας τους κόμβους στα σημεία πάκτωσης και ορίζοντας μηδενική μετατόπιση και περιστροφή προς όλες τις διευθύνσεις.

Συγκρατητής

Τα έμβολα συγκράτησης ασκούν κάθετη δύναμη στο έλασμα. Επειδή δεν έχουμε στοιχεία για το μέγεθος αυτής της δύναμης δίνουμε ως είσοδο κάθετη μετατόπιση. Εφαρμόζεται καθορισμένη κάθετη μετατόπιση 15μm. Η πλάκα συγκράτησης φτάνει στην καθορισμένη θέση σε ελάχιστο χρόνο μετά την έναρξη της προσομοίωσης.

5.4 Μοντέλο υλικού

Όπως ειπώθηκε στο κεφάλαιο 3, το μοντέλο του υλικού παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων και είναι βασικό κομμάτι της ανάλυσής μας. Για την μοντελοποίηση των εργαλείων χρησιμοποιήθηκε ένα απλό ελαστικό γραμμικό υλικό, εφόσον λόγω των σκληρών χαλύβων που χρησιμοποιούνται στα εργαλεία δεν αναμένεται να φτάσουν το όριο διαρροής τους. Το ίδιο και για την καρμανιόλα, με τα δύο υλικά να διαφέρουν μόνο κατά το μέτρο ελαστικότητας. Για το έλασμα χρησιμοποιήθηκε ένα ελαστοπλαστικό υλικό σε συνδυασμό με ένα κριτήριο αστοχίας. Αποτελείται από μια ελαστική γραμμική περιοχή μέχρι να φτάσει το όριο διαρροής. Η καμπύλη κράτυνσης μπορεί να είναι εκθετική (power-law) ή κατά τμήματα γραμμική (piecewise linear plastic). Το χρησιμοποιούμενο λογισμικό προσφέρει μια μεγάλη ποικιλία από μοντέλα υλικών. Πολλά από αυτά περιλαμβάνουν και κάποιο κριτήριο αστοχίας. Τα περισσότερα απαιτούν τον καθορισμό κάποιων αρκετά εξεζητημένων παραμέτρων οι οποίες για να βρεθούν απαιτούν την διεξαγωγή μια σειράς πειραμάτων και την επεξεργασία τους. Κάποια άλλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μόνο με τα απλά στοιχεία που προκύπτουν από απλές δοκιμές εφελκυσμού και υπάρχουν διαθέσιμα ευρέως.

Γενικά, με ένα μοντέλο υλικού επιδιώκουμε να προσεγγίσουμε τα εξής:

- Την ελαστική περιοχή
- Την καμπύλη κράτυνσης
- Την καμπύλη αστοχίας-λαιμού μου ακολουθεί την αντοχή(UTS)
- Το σημείο θραύσης

Η ελαστική περιοχή είναι απλή και υπάρχει σε όλα τα μοντέλα υλικού. Η πλαστική έχει διαφορετική προσέγγιση ανάλογα με το μοντέλο. Τα μοντέλα που εμπεριέχουν και την καμπυλή αστοχίας, ονομάζονται coupled μοντέλα. Επίσης η θραύση μπορεί να προσδιοριστεί με διάφορους τρόπους. Στην περίπτωση μας, όπου μας ενδιαφέρει η μέγιστη δύναμη που δέχεται η μηχανή και η καταπόνησή της, δεν είναι ανά-

γκη να αναζητήσουμε προσέγγιση της περιοχής του λαιμού. Αυτό που είναι σημαντικό είναι το όριο διαρροής, η μέγιστη τάση που μπορεί να φτάσει ένα στοιχείο και το πότε θα διαγραφεί από την ανάλυσή μας.

Για το έλασμα, θεωρούμε πως είναι από χάλυβα AISI 304, με ιδιότητες που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

	Έλασμα	Καρμανιόλα	Βάση	Εργαλεία
Μέτρο ελαστικότητας(Mpa)	195x10 ³	195x10 ³	195x10 ³	220x10 ³
Λόγος Poisson	0.29	0.29	0.29	0.29
Όριο διαρροής(Mpa)	215	-	-	-
Παραμόρφωση θραύσης	0.45	-	-	-
Όριο Αντοχής(Mpa)	750	-	-	-
Πυκνότητα(kg/m ³)	7.9x10 ³	7.9x10 ³	7.9x10 ³	7.9x10 ³

	Έλασμα	Καρμανιόλας	Βάση	Κοπτικά εργαλεία	Πλάκα Συγκράτησης
Απαραμόρφωτο(rigid)					✓
Γραμμικό ελαστικό		✓	✓	✓	
Ελαστοπλαστικό	✓				

Το μοντέλο Johnson Cook

Με το μοντέλο Johnson-Cook μας δίνεται η δυνατότητα να ενσωματώσουμε στην ανάλυσή μας την επίδραση της θερμοκρασίας, την επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης καθώς και την περιοχή αστοχίας(softening). Στην πλήρη μορφή του η σχέση τάσης -παραμόρφωσης δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^{\bar{p}^n})(1 + c \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (5.1)$$

Όπου

- Τα A,B,n,c,m είναι παράμετροι
- $\varepsilon^{\bar{p}}$ είναι η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση(effective plastic strain)
- $T = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$
- $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}^{\bar{p}}}{\dot{\varepsilon}_0}$

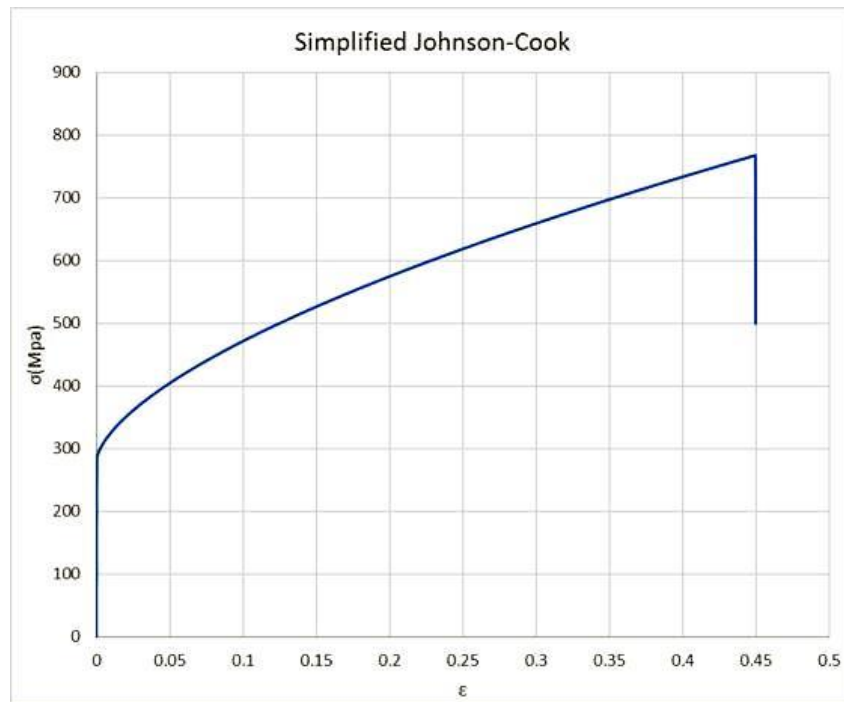
Σημειώνεται πως η $\dot{\varepsilon}_0$ είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης αναφοράς. Αποτελεί το ανώτατο όριο για το οποίο δε γίνεται αναπροσαρμογή της καμπύλης λόγω ρυθμού παραμόρφωσης.

Απλοποιημένο μοντέλο Johnson-Cook

Επειδή το μοντέλο που παρουσιάστηκε είναι αρκετά βαρύ υπολογιστικά και ο σκοπός δεν είναι προσεγγίσει με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια την κοπή του ελάσματος (μας ενδιαφέρει η συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος), και δεδομένου του υπολογιστικού φόρτου που προσθέτει, το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε τελικώς είναι μια απλοποιημένη μορφή του που αγνοεί τα φαινόμενα θερμοκρασίας. Εκτός αυτού, η αστοχία ικανοποιείται με πιο απλό τρόπο, ορίζοντας την ισοδύναμη παραμόρφωση θραύσης (effective plastic strain at failure). Επομένως οι τάση δίνεται από την εξίσωση:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^{\bar{p}^n})(1 + c \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (5.2)$$

Η δεύτερη παρένθεση μπορεί να αγνοηθεί για c=0 και πλέον η συμπεριφορά του υλικού να περιγράφεται από έναν απλό εκθετικό νόμο. Αυτή η περίπτωση φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχούν σε ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304.



Διάγραμμα 5.1: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης

5.4 Επαφή

Η μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των διακριτών σωμάτων είναι ίσως το πιο κρίσιμο κομμάτι της ανάλυσης. Εισάγει αρκετές δυσκολίες και χρειάζεται προσοχή η διαχείρισή της. Η εισαγωγή επαφής καλό είναι, όποτε είναι εφικτό να αποφεύγεται και να αντικαθίσταται από οριακές συνθήκες ή στοιχεία σύνδεσης. Στην περίπτωση μας που μας ενδιαφέρει κυρίως η αλληλεπίδραση μεταξύ του ελάσματος και της μηχανής δεν μπορούμε να την αποφύγουμε.

Τα κυριότερα επακόλουθα της χρήσης μοντέλων επαφής είναι:

- Εισαγωγή επιπλέον μη γραμμικών σχέσεων
- Αύξηση του χρόνου επίλυσης λόγω των αλγόριθμων αναζήτησης επαφής (contact search) αλλά και του μέγιστου χρονικού βήματος για ευστάθεια της επαφής (contact timestep)
- Πολύπλοκη φόρτιση στις διεπαφές. Αυξομειώσεις στα φορτία που εφαρμόζονται στους κόμβους πολλές φορές είναι υπεύθυνα για παραμορφώσεις μηδενικής ενέργειας (hourglassing) και πολύ μεγάλες παραμορφώσεις που οδηγούν σε τερματισμό της ανάλυσης (negative volume).
- Μπορεί να καθορίσει το μέγεθος των στοιχείων, δηλαδή για τη σωστή λειτουργία της επαφής να απαιτείται συγκεκριμένο μέγεθος στοιχείων
- Όταν οι γεωμετρία δεν είναι τόσο απλή και οι παραμορφώσεις είναι πολύ πιθανό η επαφή να οδηγηθεί σε αστάθεια που κυρίως φαίνεται μέσω της εισχώρησης του ενός σώματος στο άλλο. Η εισχώρηση, αν και μπορεί να είναι ανεκτή σε μικρή κλίμακα, προκαλεί σύγχυση στον τρόπο επιβολής των δυνάμεων της επαφής (penalty forces) και οδηγεί την ανάλυση σε αστάθεια.

Γενική λειτουργία της επαφής

Σε κάθε χρονικό βήμα (timestep) γίνεται έλεγχος για το αν κάποια από τα σώματα που έχουν οριστεί ως αλληλεπιδρώντα βρίσκονται σε επαφή. Η συνθήκη για το αν βρίσκονται σε επαφή εξαρτάται από τον τύπο της επαφής. Αυτό που ελέγχεται πάντα είναι η εισχώρηση. Αν υπάρχει εισχώρηση τότε εφαρμόζονται δυνάμεις απωθητικές δυνάμεις στους κόμβους, με μέτρο ανάλογο της εισχώρησης, ώστε να διαχωρίσουν τα δύο σώματα. Οι δυνάμεις αυτές ονομάζονται δυνάμεις πέναλτι (penalty forces).

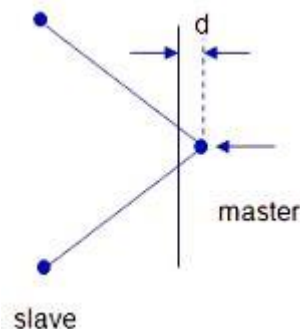
Επίσης οι επαφές λαμβάνουν υπόψη την ολίσθηση μεταξύ των σωμάτων. Η μοντελοποίηση γίνεται με βάση το μοντέλο Coulomb για την τριβή. Δέχονται ως όρισμα τον συντελεστή στατικής τριβής αλλά και τον συντελεστή δυναμική τριβής.

Οι τύποι επαφής που έχουμε στη διάθεσή μας είναι:

- Single Surface. Θεωρείται πως υπάρχει επαφή όταν το σύνορο κάθε σώματος έρθει σε επαφή με τον εαυτό του ή με οποιοδήποτε σώμα του μοντέλου. Αποτελεί τον πιο γενικό τύπο επαφής. Δεν υιοθετήθηκε στην παρούσα ανάλυση λόγω του ότι δεν επιτρέπει να εξάγουμε τις δυνάμεις μεταξύ των σωμάτων (contact forces)
- Nodes-to-Surface. Ορίζεται το ένα σώμα ως Master και το άλλο ως Slave. Συνήθως master είναι αυτό με το πιο αραιό πλέγμα ή το απαραμόρφωτο (αν υπάρχει). Η επαφή υφίσταται όταν ένας ή κόμβος του slave διαπεράσει την επιφάνεια του master.
- Surface-to-Surface. Έχοντας ορίσει τα master και slave σώματα όπως παραπάνω, υπάρχει επαφή όταν η επιφάνεια του slave έχει εισχωρήσει στην επιφάνεια του master. Οι επιφάνειες ορίζονται με βάση τους κόμβους.

Μοντέλο επαφής surface-to-surface

Με την χρήση αυτού του αλγορίθμου καταγράφονται οι δυνάμεις στις επαφές σε ένα αρχείο τύπου ASCII. Επίσης λειτουργεί καλά για μεγάλες επιφάνειες, οπότε αυτός είναι ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε. Ο υπολογισμός των δυνάμεων προκύπτει από την θεώρηση ενός «ελατηρίου» μεταξύ των slave κόμβων και των master, ως το γινόμενο την μιας σταθερά ελατηρίου k και την μετατόπισης.



Εικόνα 5. 17: Δύναμη που ασκείται στον slave κόμβο: $f=kd$

Σταθερά ελατηρίου

Η σταθερά k , δηλαδή η στιβαρότητα του ελατηρίου βασίζεται στην στιβαρότητα των σωμάτων. Για τρισδιάστατα στοιχεία (solid elements) είναι:

$$k = \frac{f_s \times Area^2 \times K}{volume} \quad (5.3)$$

Για 2-διάστατα στοιχεία είναι:

$$k = \frac{f_s \times Area \times K}{Maximum Diagonal} \quad (5.4)$$

όπου

Area= εμβαδόν του τμήματος που εμπλέεται στην επαφή

K=bulk modulus

f_s=συντελεστής πέναλτι (penalty factor)

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, ο υπολογισμός του k θα διαφέρει ανάμεσα σε slave και master. Αυτό που επιλέγεται τελικά, είναι το μικρότερο από τα δύο.

$$k = \min\{k_{slave}, k_{master}\} \quad (5.5)$$

Ευστάθεια επαφής

Η επαφή είναι πολύ πιθανό να εμφανίσει κάποια αστάθεια, δηλαδή να σημειωθεί εισχώρηση η οποία είτε δεν θα γίνει αντιληπτή, είτε οι υπολογιζόμενες δυνάμεις δεν θα επαρκούν για την απομάκρυνση των δύο επιφανειών. Όπως είπαμε, η επαφή ενδέχεται να καθορίσει και το χρονικό βήμα. Το μέγιστο χρονικό βήμα για ευστάθεια της επαφής είναι ανάλογο του μεγέθους $\min\left[\sqrt{\frac{m}{k}}\right]$ όπου m είναι η μάζα που φέρει το ελατήριο της επαφής και k η ελαστική σταθερά του. Σε πολλές περιπτώσεις, μπορεί να εμφανίζεται εισχώρηση για την οποία δεν ευθύνεται το χρονικό βήμα, αλλά η προκύπτουσα ελαστική σταθερά. Αυτές οι περιπτώσεις αντιμετωπίζονται με δύο τρόπους :

1. Αύξηση του penalty factor
2. Χρησιμοποίηση διαφορετικής προσέγγισης για τον υπολογισμό του k

Η δεύτερη περίπτωση αφορά τη χρήση της επιλογής SOFT=1 η οποία βασίζει το k στην ευστάθεια του συστήματος αποτελούμενο από δύο μάζες συνδεδεμένες με ένα ελατήριο. Σε αυτήν την περίπτωση, το επιλεγμένο χρονικό βήμα δεν επηρεάζει την ευστάθεια, εφόσον το k υπολογίζεται βάσει αυτού. Υπολογίζεται ένας νέος συντελεστής :

$$k_{cs}(t) = 0.55 S' m^* \left(\frac{1}{\Delta t_c(t)} \right)^2 \quad (5.6)$$

Τελικά λαμβάνεται:

$$k_{soft=1} = \max\{k_{cs}, k\} \quad (5.7)$$

Η επαφή Surface-to-Surface χρησιμοποιήθηκε με τις εξής μορφές

- **Automatic.** Αυτός ο αλγόριθμος ελέγχει για εισχώρηση τους κόμβους και των δύο σωμάτων ως προς το άλλο, δηλαδή η επαφή ορίζεται συμμετρικά. Αυτό την κάνει πιο αξιόπιστη αλλά αυξάνει το υπολογιστικό κόστος.
- **One-Way.** Εδώ ελέγχεται μόνο ο slave κόμβος για διείσδυση στο master σώμα. Χρησιμοποιείται μεταξύ της άνω λεπίδας και του ελάσματος, όπου ο προσανατολισμός των δύο σωμάτων είναι περίπου γνωστός εξ αρχής.
- **Eroding surface-to-surface.** Επειδή στο μοντέλο έχει ενσωματωθεί κριτήριο αστοχίας ο αλγόριθμος Automatic-Surface-to-Surface ή One-Way-Surface-to-Surface ίσως να μην είναι επαρκής. Υπάρχει ο κίνδυνος, αν τα εξωτερικά στοιχεία του ελάσματος διαγραφούν οι αλγόριθμοι αυτοί να μην αντιληφθούν την επαφή της λεπίδας με τα υπόλοιπα στοιχεία. Το πλεονέκτημα των Eroding επαφών είναι ότι σε αυτές, τα στοιχεία τα οποία τα οποία αστοχούν, διαγράφονται και από την αναζήτηση επαφής (slave search) και γίνεται επαναπροσδιορισμός των αλληλεπιδρώντων τμημάτων (contact segments). Αυτός αλγόριθμος είναι πιο χρονοβόρος, αλλά κάποιες φορές απαραίτητος. Κατά την μοντελοποίηση της κοπής με αυξημένο διάκενο, τα στοιχεία του ελάσματος που έρχονται σε επαφή αρχικά με τις λεπίδες δεν διαγράφονται, επομένως δεν χρειάστηκε επαφή που να λαμβάνει υπόψη τη διαγραφή. Στην περίπτωση όμως με το μικρό διάκενο, όπου διαγράφονταν στοιχεία πιο κοντά στις ακμές η χρήση των

απλών επαφών οδηγούσε σε αστάθεια (negative volume) της οποίας προηγούνταν μια μικρή εισχώρηση της ακμής στο έλασμα. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε όταν χρησιμοποιήθηκε η επαφή Eroding surface-to-surface.

- **Tied.** Σε αυτές τις επαφές, οι slave κόμβοι είναι πακτωμένοι πάνω στους αντίστοιχους master κόμβους. Χρησιμοποιείται στην σύνδεση της λεπίδας με την καρμανιόλα. Έτσι, είναι εφικτό να οριστούν διαφορετικά υλικά για την καρμανιόλα και το κοπτικό εργαλείο.

5.5 Επιπλέον παράμετροι μοντέλου

Element Formulation

Εκτός από την γεωμετρία των πεπερασμένων στοιχείων και τον αριθμό των κόμβων, είναι σημαντική και η επιλογή άλλων παραμέτρων όπως είναι ο αριθμός των σημείων ολοκλήρωσης.

Για την ανάλυσή μας έχουν χρησιμοποιηθεί τρία είδη στοιχείων. Εξαεδρικά στοιχεία με 8 κόμβους, τετραεδρικά στοιχεία με 4 κόμβους και στοιχεία κελύφους με 4 κόμβους.

Σημεία ολοκλήρωσης εξαεδρικών και τετραεδρικών στοιχείων

Έχουμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε 2 τύπους στοιχείων ανάλογα με τα σημεία ολοκλήρωσής τους:

- Πλήρους ολοκλήρωσης (Fully Integrated)
- Ενός σημείου ολοκλήρωσης (1-point integration)

Τα στοιχεία πλήρους ολοκλήρωσης, δηλαδή με 8 σημεία ολοκλήρωσης στα εξαεδρικά στοιχεία και 4 στα τετραεδρικά παρέχουν όπως είναι λογικό καλύτερη υπολογιστική ακρίβεια. Αυτό φυσικά έρχεται μαζί με την αύξηση του υπολογιστικού κόστους η οποία περίπου 3 φορές μεγαλύτερη. Το πλεονέκτημά του είναι ότι δεν επιτρέπουν να συμβούν καταστάσεις μηδενικής ενέργειας (hourglass modes) για τις οποίες θα μιλήσουμε σε επόμενη παράγραφο. Το μειονέκτημά τους που είναι αρκετά σημαντικό για την περίπτωση μας είναι πως παρουσιάζουν εύκολα αστάθεια στις μεγάλες παραμορφώσεις.

Τα στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης ενός σημείου είναι αυτά που επιλέχθηκαν. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι πως είναι καταλληλότερα για αναλύσεις μεγάλων παραμορφώσεων ενώ τα πλήρους ολοκλήρωσης είναι πιο εύκολο να παρουσιάσουν αστάθεια και η ανάλυση να τερματίσει με μήνυμα “**negative volume**”. Υπολογιστικά αυτό σημαίνει πως η υπολογιζόμενη ορίζουσα της ιακωβιανής είναι αρνητική ή είναι μικρότερη από έναν προκαθορισμένο αριθμό (έστω και σε ένα από τα σημεία ολοκλήρωσης ενώ ο συνολικός όγκος είναι θετικός). Το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι από τα σημαντικότερα σε αναλύσεις που περιέχουν μεγάλες παραμορφώσεις και επαφές μεταξύ σωμάτων. Αντιθέτως, τα στοιχεία που έχουν ένα σημείο ολοκλήρωσης στο κέντρο τους, είναι πιο δύσκολο να αντιληφθούν τις ίδιες μεταβολές στη γεωμετρία και η ανάλυση θα τερματίσει μόνο σε ακραίες περιπτώσεις μη φυσικής παραμόρφωσης των στοιχείων. Επίσης αυτά τα στοιχεία επιτρέπουν σημαντική μείωση του υπολογιστικού κόστους. Στην περίπτωση του ενός σημείου ολοκλήρωσης ο πίνακας παραμορφώσεων του κεφαλαίου 4 έχει την εξής ιδιότητα αντισυμμετρίας στο σημείο $\xi=\eta=\zeta=0$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_i} &= -\frac{\partial \varphi_7}{\partial x_i} \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial x_i} &= -\frac{\partial \varphi_8}{\partial x_i} \\ \frac{\partial \varphi_3}{\partial x_i} &= -\frac{\partial \varphi_5}{\partial x_i} \\ \frac{\partial \varphi_4}{\partial x_i} &= -\frac{\partial \varphi_6}{\partial x_i} \end{aligned} \right\}$$

η οποία μειώνει τον χρόνο υπολογισμού του πίνακα κατά περίπου 25 φορές. Ο αριθμός των εξισώσεων για τον καθορισμό της τάσης από την παραμόρφωση είναι 1 αντί για 8. Επίσης απαιτούνται 16 φορές λιγότεροι πολλαπλασιασμοί για τον καθορισμό των παραμορφώσεων και των κομβικών δυνάμεων. Το βασικό μειονέκτημα όμως των στοιχείων αυτών είναι το ότι πολύ εύκολα διαστρεβλώνονται σε μορφές με μηδενική ενέργεια που καταστρέφουν ολόκληρο το πλέγμα. Ο έλεγχος και η αποτροπή τέτοιων καταστάσεων προσθέτει φυσικά κάποιο υπολογιστικό κόστος, αλλά γενικά η ανάλυση εξακολουθεί να είναι αρκετά πιο γρήγορη από αυτή με στοιχεία 8 σημείων ολοκλήρωσης.

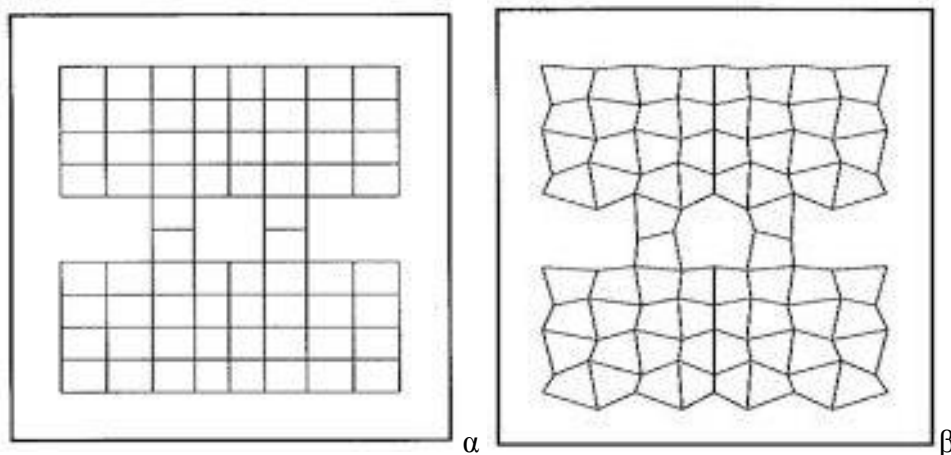
Hourglass modes

Ας θεωρήσουμε ένα επίπεδο στοιχείο ενός σημείου ολοκλήρωσης το οποίο υποβάλλεται σε καθαρή κάμψη:



Εικόνα 5.14: Hourglassing

Βλέπουμε πως το στοιχείο έχει παραμορφωθεί αλλά οι διακεκομμένες γραμμές δεν έχουν αλλάξει μήκος ούτε γωνία. Αυτό σημαίνει πως η τάση στο σημείο ολοκλήρωσης είναι μηδέν. Αυτού του είδους η παραμόρφωση ονομάζεται μηδενικής ενέργειας επειδή δεν παράγεται κάποια ενέργεια παραμόρφωσης. Επίσης το στοιχείο δεν υποβάλλει κάποια αντίσταση και παραμορφώνεται πολύ εύκολα κατά αυτόν τον τρόπο. Άμεση συνέπεια είναι πως αυτό το φαινόμενο μπορεί να διαδοθεί στο πλέγμα στρεβλώνοντάς το. Η ανάλυση μετά χάνει την αξιοπιστία της και είναι πολύ πιθανόν να τερματίσει λόγω εκτεταμένης παραμόρφωσης (negative volume).



Εικόνα 5.15 (α) Αρχικό Πλέγμα (β) Στρεβλωμένο Πλέγμα

Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται εκτός από επίπεδα στοιχεία και σε στοιχεία τριών διαστάσεων, όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα ανάλυση. Στην περίπτωση μας, η στρέβλωση του πλέγματος προκαλείται πρακτικά λόγω της επαφής, που ασκεί μεγάλα συγκεντρωμένα φορτία σε κόμβους. Επίσης η μετάδοση των παραμορφώσεων γίνεται σε σημεία που βρίσκονται μακριά από το σύνορο, με το μέγεθος της γεωμετρίας του συγκεκριμένου μοντέλου να ευνοεί αυτό το φαινόμενο.

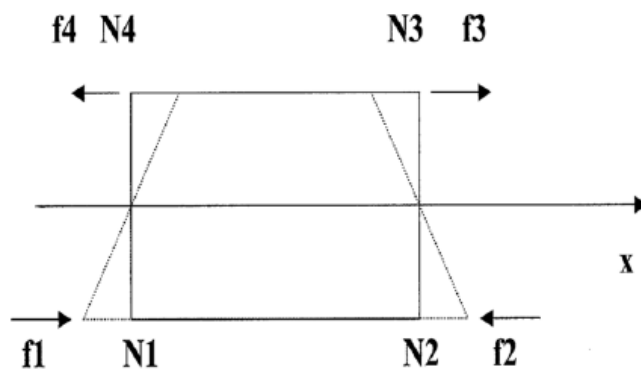
Αντιμετώπιση των παραμορφώσεων ασταθούς μορφής

- Πρόσθεση επιπλέον στιβαρότητας(stiffness) για αντίσταση στις συγκεκριμένες παραμορφώσεις (hourglass modes)
- Αύξηση του ιξώδους (viscosity)
- Χρησιμοποίηση στοιχείων πλήρους ολοκλήρωσης

- Αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος (refinement)
- Χρήση τετραεδρικών στοιχείων

Τη χρήση στοιχείων πλήρους ολοκλήρωσης την έχουμε απορρίψει λόγω της αστάθειάς του σε μεγάλες παραμορφώσεις σε συνδυασμό με την αύξηση που επιφέρουν στον χρόνο επίλυσης. Η αύξηση του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια λύση η οποία πρώτον δεν εγγυάται την εξάλειψη του φαινομένου (δεν μπορούμε να ποσοτικοποιήσουμε την πυκνότητα του πλέγματος για πλήρη αποφυγή της διαστρέβλωσης) και δεύτερον έστω και μια μικρή μείωση στο μέγεθος εκατοντάδων χιλιάδων στοιχείων συνεπεί σε μεγάλη αύξηση του αριθμού τους.

Συνεπώς, η χρήση των αλγορίθμων hourglass controls που μας παρέχει το λογισμικό είναι η πιο κατάλληλη και οικονομική λύση και μας επιτρέπει να διατηρήσουμε και τα εξαεδρικά στοιχεία που επιλέξαμε στην αρχή. Μέσω αυτών των αλγορίθμων μπορούμε να προσθέσουμε επιπλέον στιβαρότητα στα στοιχεία. Ο όρος στιβαρότητα μεταφράζεται στην εφαρμογή κάποιων κομβικών δυνάμεων οι οποίες αντιστέκονται στην εκάστοτε ανεπιθύμητη παραμόρφωση (hourglass mode).



Εικόνα 5.16: Εφαρμογή δυνάμεων για αντίσταση σε παραμόρφωση μηδενικής ενέργειας

Οι δύο βασικές μορφές αλγορίθμων είναι:

Τύπου ιξώδους (Viscous forms)

Εφαρμόζουν δυνάμεις που είναι ανάλογες με την ταχύτητα των κόμβων, γεγονός που τους καθιστά κατάλληλους για προβλήματα με μεγάλους ρυθμούς παραμόρφωσης.

Τύπου στιβαρότητας (Stiffness forms)

Εφαρμόζουν δυνάμεις που είναι ανάλογες της παραμόρφωσης επομένως καταλληλότεροι για προβλήματα με μικρού ή μέτριου ρυθμού παραμόρφωσης.

Mass scaling

Ο τρόπος υπολογισμού του χρονικού βήματος της επίλυσης είναι:

$$\Delta t = \frac{L_e}{C} \quad (5.8)$$

Για το εξαεδρικό στοιχείο είναι το χαρακτηριστικό μήκος L_e είναι:

$$L_e = \frac{v_s}{A_{smax}} \quad (5.9)$$

όπου v_s είναι ο όγκος του στοιχείου και A_{smax} είναι η μέγιστη επιφάνεια.

Η ταχύτητα του ήχου για σταθερό bulk modulus δίνεται από τη σχέση:

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}$$

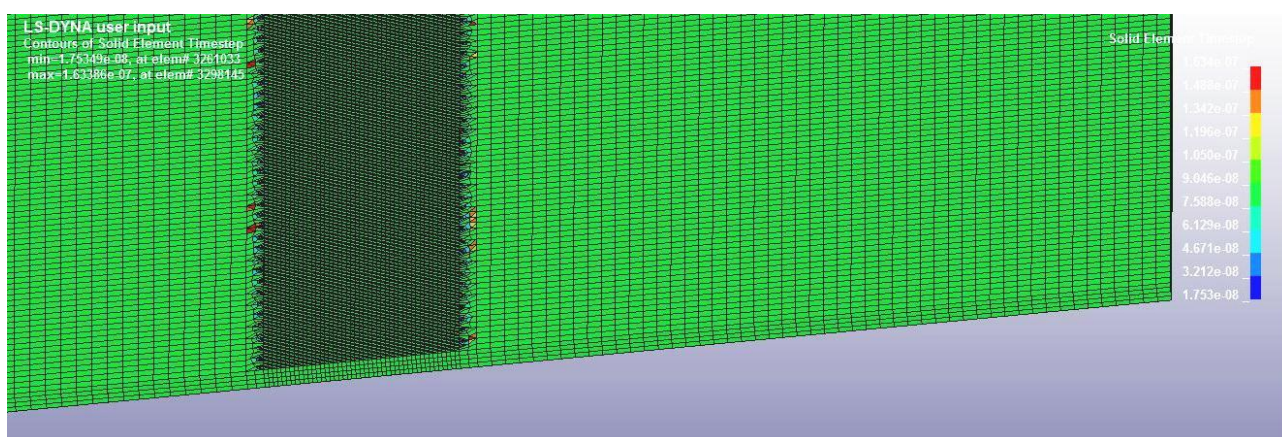
Το χρονικό βήμα καθορίζεται από το στοιχείο που δίνει την μικρότερη τιμή του Δt πολλαπλασιαζόμενο με έναν συντελεστή βαρύτητας (scale factor). Από τις παραπάνω σχέσεις είναι προφανές πως αν θέλουμε να αυξήσουμε το χρονικό βήμα πρέπει είτε να αυξήσουμε το μέγεθος των στοιχείων είτε να αυξήσουμε την πυκνότητά του υλικού. Οι βασικότεροι τρόποι για να επιτευχθεί αυτό είναι :

- Μέσω προσθήκης μη ρεαλιστικής πυκνότητας στην περιγραφή του υλικού
- Επιλέγοντας το επιθυμητό timestep και αφήνοντας το πρόγραμμα να αυξήσει την μάζα ολόκληρου του μοντέλου
- Επιλέγοντας να αυξηθεί η μάζα μόνο των στοιχείων που το καθορίζουν, δηλαδή των μικρών στοιχείων του πλέγματος

Απαιτείται προσοχή ώστε να μην αυξήσουμε πολύ τη μάζα του μοντέλου και οδηγηθούμε σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα. Ένας γενικός κανόνας είναι να κρατήσουμε το ποσοστό αύξησης μάζας στο 5% για τη διατήρηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Συνδυάζοντας την τελευταία μέθοδο με μια σχολαστική επισκόπηση των timestep του μοντέλου μπορούμε να έχουμε μια καλή εικόνα για το ποια σημεία θα επιφορτιστούν με επιπλέον μάζα.

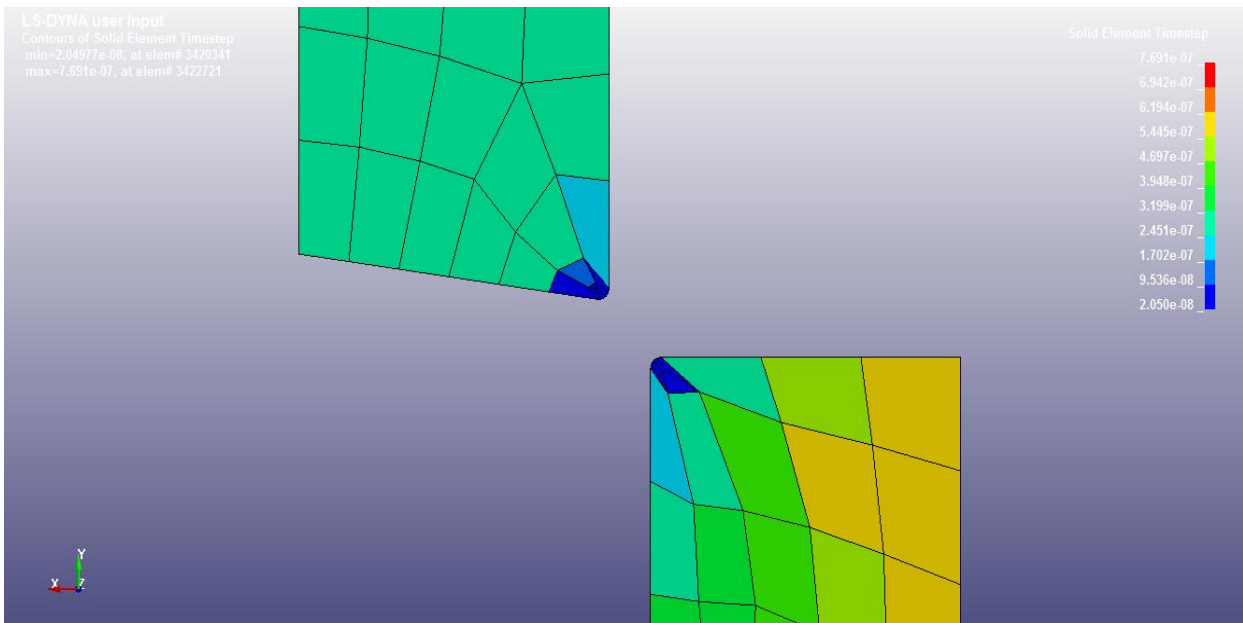
Αναμένουμε τις ελάχιστες τιμές στα πιο μικρά στοιχεία, τα οποία βρίσκονται στο έλασμα και τις λεπίδες. Επειδή το έλασμα είναι ελαφρύ, δε θα ήταν θεμιτό να επηρεάσουμε τη μάζα του γιατί έστω και μια μικρή αλλαγή θα επηρέαζε σε μεγάλο ποσοστό τη συμπεριφορά του. Επομένως οδηγούμαστε σε ένα άνω φράγμα για την τιμή του timestep. Αν τα στοιχεία του ελάσματος είναι μεγαλύτερα από αυτά των λεπίδων τότε μπορούμε απλά να προσδίδοντας μάζα σε αυτά, τόση ώστε $\Delta t_{\text{ελάσματος}} = \Delta t_{\text{λεπίδων}}$. Μικρή αύξηση της μάζας της καρμανιόλας θα σημαίνει ανάλογη αύξηση της κινητικής ενέργειας. Αν όμως είναι $\Delta t_{\text{ελάσματος}} < \Delta t_{\text{λεπίδων}}$, δεν είναι εφικτό να αποφύγουμε την αλλοίωση της μάζας του ελάσματος. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει αναγκαστικά να γίνει επαναπροσδιορισμός του πλέγματος. Επομένως το τελικό πλέγμα επιλέχθηκε έπειτα από δοκιμές χρησιμοποιώντας ως κριτήριο και το παραπάνω.

Στην παρακάτω εικόνα, φαίνεται πως το timestep των στοιχείων του ελάσματος κυμαίνεται από 7.588×10^{-8} sec έως 9.044×10^{-8} sec. Τα στοιχεία στο κέντρο, που είναι πιο μικρά έχουν timestep 8.2×10^{-8} sec. Παρατηρούμε πως μικρότερο timestep έχουν ελάχιστα στοιχεία μόνο στην περιοχή μετάβασης. Επομένως το timestep δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 8.2×10^{-8} sec. Έτσι το βάρος του ελάσματος παραμένει πρακτικά το ίδιο.

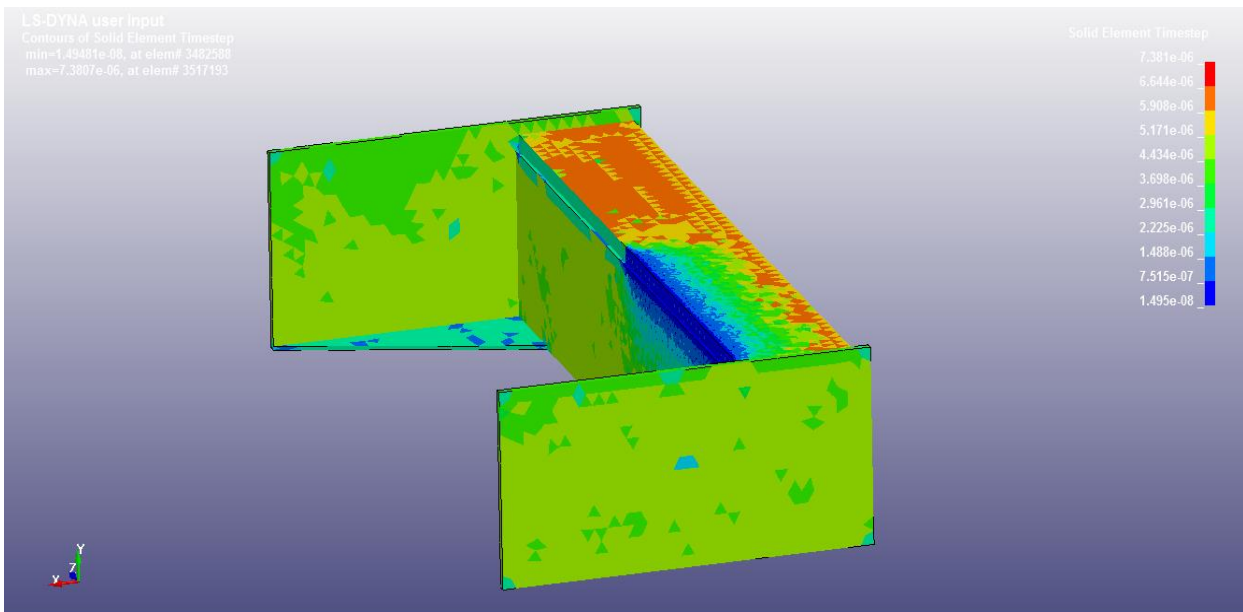


Εικόνα 5.18: Υπολογιζόμενα χρονικά βήματα των στοιχείων του ελάσματος

Παρακάτω φαίνεται που κυμαίνονται τα ελάχιστα timestep των λεπίδων και της βάσης. Φαίνεται πως αυτά, θα έχουν κάποια μεταβολή στο βάρος τους, εφόσον έχουν αρκετό αριθμό στοιχείων που θα επιφορτιστούν με επιπλέον μάζα. Εφόσον βέβαια η αύξηση αυτή είναι μέσα σε λογικά πλαίσια, δεν θα επηρεαστούν τα αποτελέσματα.



Εικόνα 5.19: Αναζήτηση Ελάχιστων timesteps στις λεπίδες



Εικόνα 5.20: Αναζήτηση ελάχιστων timesteps στη βάση

Εκτιμώμενος χρόνος χωρίς mass scaling	90 h
Εκτιμώμενος χρόνος με mass scaling	30 h
Εξοικονόμηση χρόνου	66%

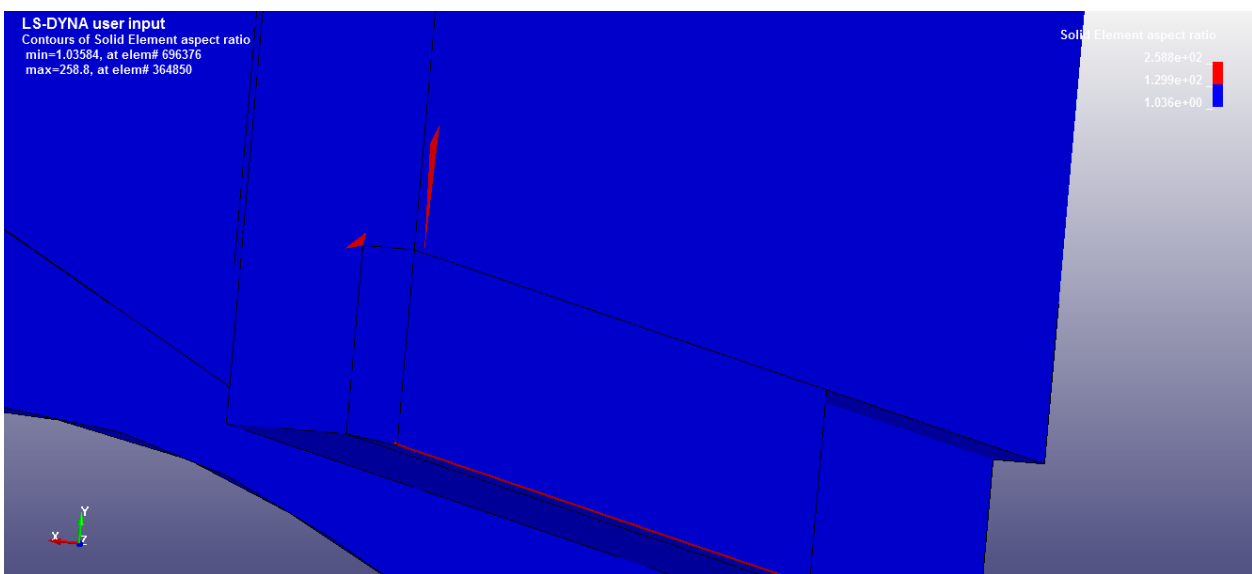
5.6 Έλεγχος μοντέλου

Τα αποτελέσματα μιας ανάλυση πεπερασμένων είναι σημαντικό να αξιολογούνται. Η ποιότητα των αποτελεσμάτων είναι ανάλογη της ποιότητας των εισόδων στο μοντέλο. Εκτός από την επιθεώρηση των αποτελεσμάτων και την αξιολόγησή τους με βάση την εμπειρία του μηχανικού που διεξάγει την ανάλυση, υπάρχουν κάποια μεγέθη που μπορούν να μας δείξουν αν σε γενικές γραμμές το μοντέλο και η ανάλυση είναι σωστές. Κάποια από αυτά είναι:

- Η ποιότητα των στοιχείων του πλέγματος (element quality), με βάση τις μικρότερες γωνίες και του λόγους πλευρών (aspect ratio). Σε κάποιες αναλύσεις είναι αναπόφευκτο να υπάρχουν κάποια στοιχεία κακής ποιότητας (poorly shaped elements). Αυτό είναι αποδεκτό αν το ποσοστό αυτών των στοιχείων είναι αρκετά μικρό.
- Η τύπωση του πεδίου των τάσεων για να ελέγξουμε αν συνάδει με το επιθυμητό μοντέλο που ορίσαμε.
- Η τύπωση της κινητικής και της εσωτερικής ενέργειας. Στο τέλος της προσομοίωσης θα πρέπει η κινητική ενέργεια να είναι αρκετά μικρότερη της εσωτερικής, για να βεβαιωθούμε πως δεν η ανάλυση δεν έχει επηρεαστεί από δυναμικά φαινόμενα λόγω του mass scaling.

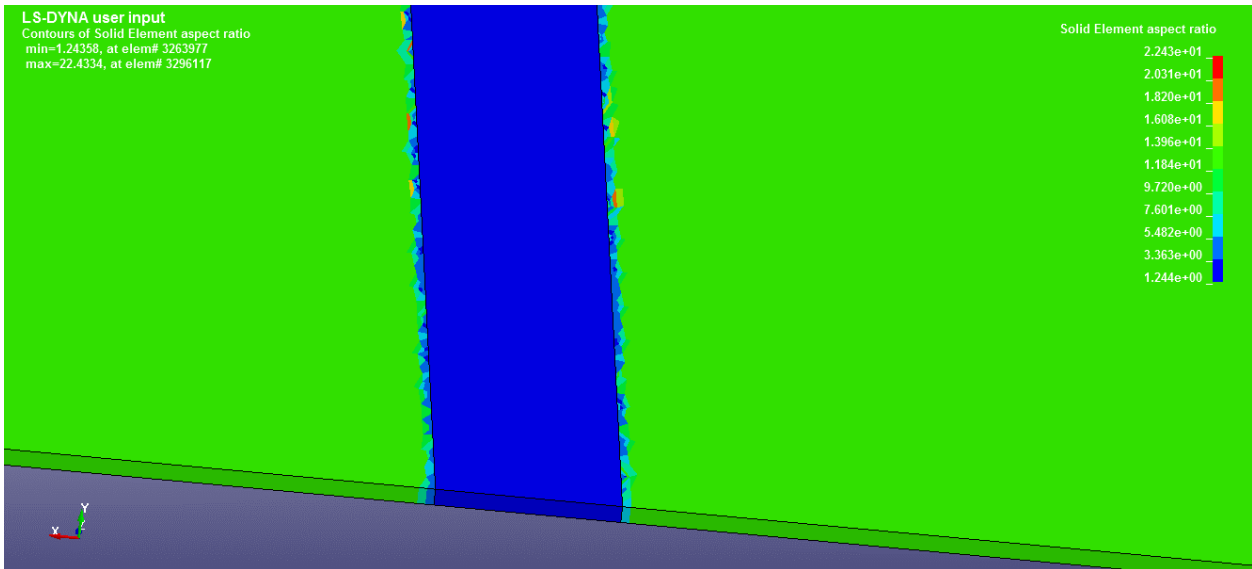
Aspect ratio

Στην Εικόνα 5.21 φαίνονται με κόκκινο τα στοιχεία με aspect ratio μεγαλύτερο από 5. Βλέπουμε αντιστοιχούν σε μόνο μια σειρά από στοιχεία στην ακμή, καθώς και άλλα δυο στοιχεία στην καρμανιόλα. Το ίδιο ισχύει και για την άλλη λεπίδα.



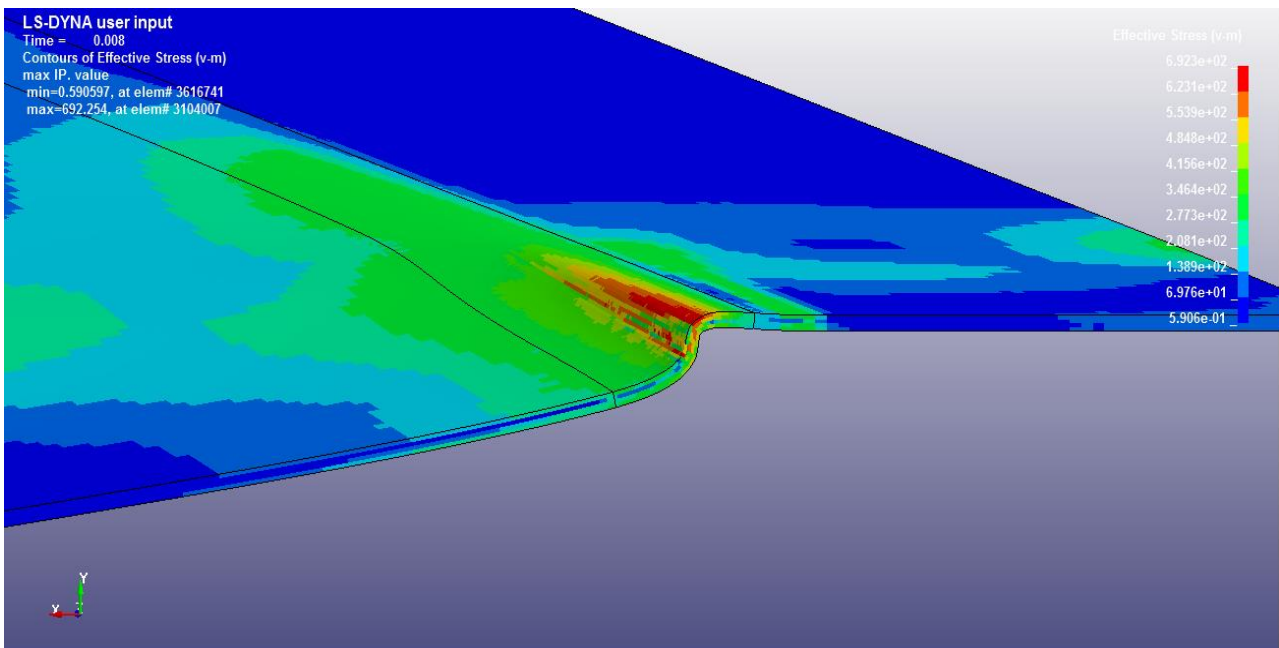
Εικόνα 5.21: Στοιχεία με aspect ratio μεγαλύτερο από 5

Στην εικόνα 5.22 φαίνονται τα στοιχεία του ελάσματος. Στο κέντρο όπου έχουμε τις περισσότερες παραμορφώσεις τα στοιχεία έχουν πολύ καλό σχήμα. Ελάχιστα στοιχεία στην περιοχή έχουν αναπόφευκτα μεγάλο aspect ratio. Τα στοιχεία με πράσινο χρώμα έχουν μεν σχετικά μεγάλο aspect ratio (περίπου 12), αλλά η διαφοροποίηση είναι μεταξύ της κατά μήκος διακριτοποίησης (μεγάλη) και της διακριτοποίησης κατά το πάχος (μικρή πλευρά), που δεν επηρεάζει ιδιαίτερα.



Εικόνα 5.22: Στοιχεία του ελάσματος

Στην εικόνα 5.23 φαίνεται το πεδίο των τάσεων(ισοδύναμη τάση V.Mises) στην αρχή της προσομοίωσης. Η μέγιστη τιμή είναι στην περιοχή γύρω από την ακμή της σταθερής λεπίδας, όπως είναι λογικό (αλλαγή γεωμετρίας και συγκέντρωση τάσεων) και η τιμή της είναι κοντά στο UTS που έχουμε ορίσει, περίπου 700 MPa.



Εικόνα 5.23: Πεδίο τάσεων στην αρχή της προσομοίωσης

Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η δομή του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την επίλυση του συστήματος. Η επίλυση έγινε σε explicit solver για δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Το βασικό ζήτημα είναι ο υπολογισμός των δυνάμεων που επιδρούν στην καρμανιόλα και τη βάση καθώς και η δυναμική τους συμπεριφορά κατά την περίπτωση αυξημένου διακένου. Αυτό είναι το πρώτο μοντέλο που επιλύθηκε. Φυσικά, για να έχουν νόημα αυτά τα αποτελέσματα θα πρέπει πρώτα να επιλυθεί και η περίπτωση του κανονικού διακένου ώστε να συγκριθούν μεταξύ τους.

6.1 Κοπή με κανονική χάρη

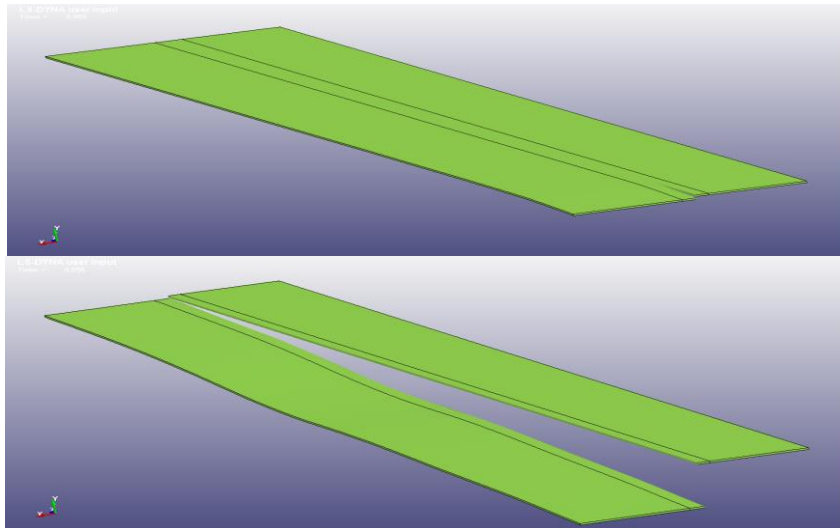
Διάκενο: 0.2mm

Μηχανή: Ελαστική

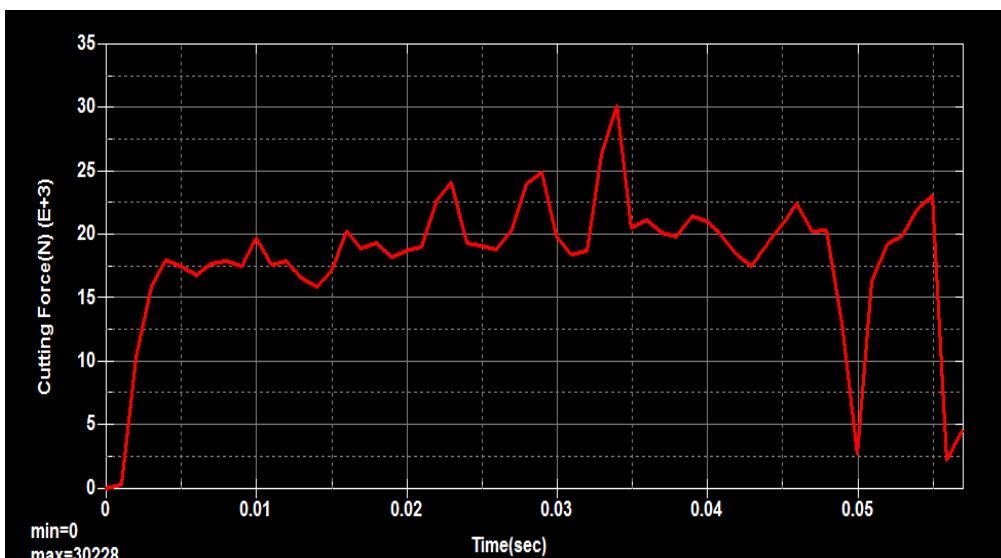
Μετατόπιση πλάκας συγκράτησης: 0.15 mm

Χρόνος έναρξης: 0 sec

Χρόνος περάτωσης: 0.057 sec

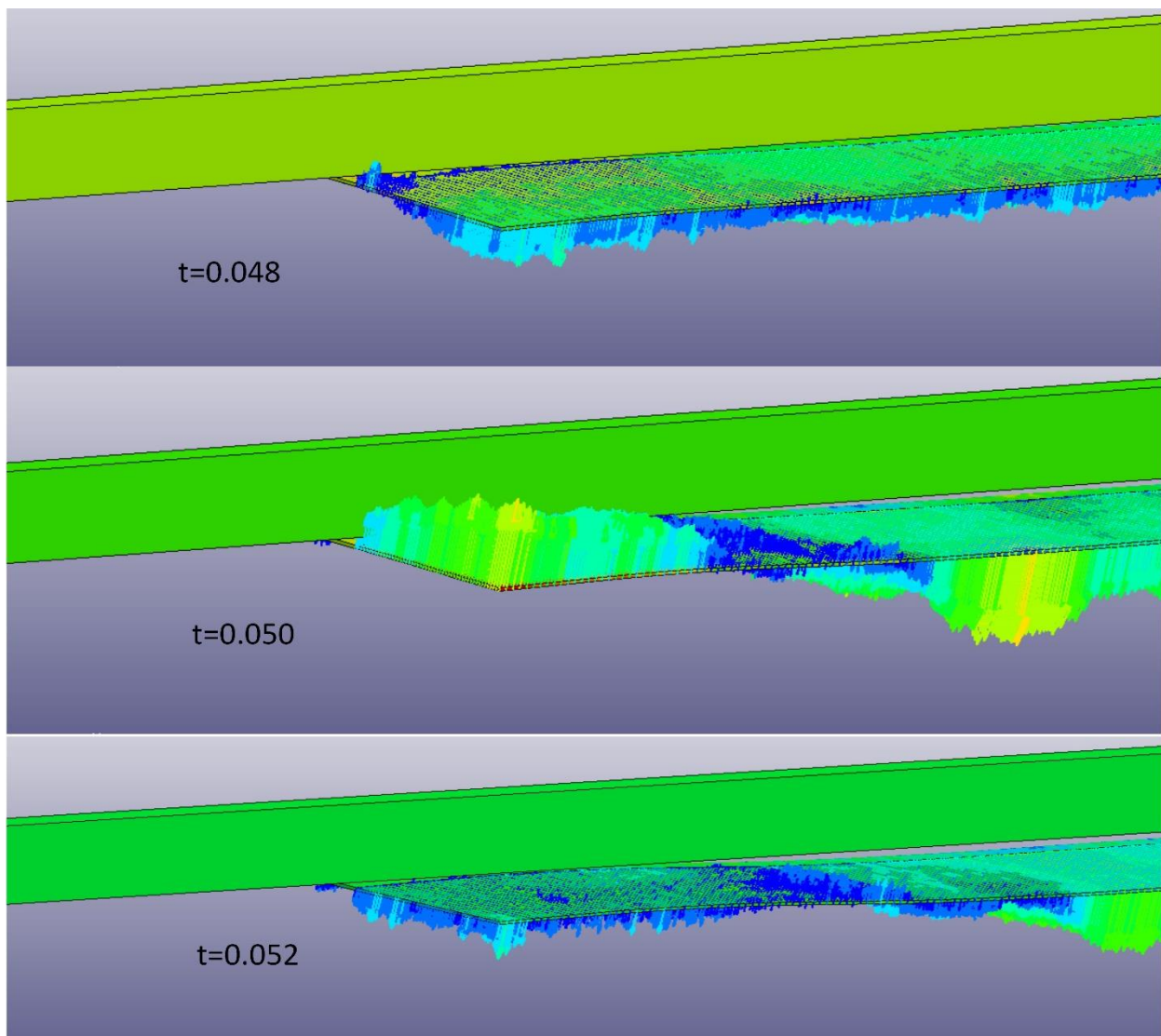


Εικόνα 6.1: Γραφική απεικόνιση της κοπής του ελάσματος



Εικόνα 6.2: Δύναμη κοπής

Στην Εικόνα 6.2 φαίνεται η υπολογιζόμενη δύναμη κατά την διεύθυνση κοπής. Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3, το διάγραμμα έχει την αναμενόμενη μορφή. Η κατεργασία εμφανίζει σχετική σταθερότητα (stationary) κατά το μήκος κοπής. Η δύναμη αυξάνεται κατακόρυφα μέχρι να φτάσει μια τιμή γύρω από την οποία παραμένει μέχρι το τέλος της κοπής. Σύμφωνα με το διάγραμμα κυμαίνεται γύρω από τα 20 kN εμφανίζοντας και ένα στιγμιαίο μέγιστο 30 kN. Την χρονική στιγμή 0.05 sec παρατηρείται μια μη αναμενόμενη πτώση της δύναμης κοπής. Για να δικαιολογήσουμε και να κατανοήσουμε το φαινόμενο αυτό αρκεί να παρατηρήσουμε την γραφική απεικόνιση της κοπής από τα 0.048 sec έως τα 0.052, βλ. Εικόνα 6.3, και να συνυπολογίσουμε το γεγονός πως αυτό εμφανίζεται προς το τέλος της κοπής. Λόγω της κοπής υπό γωνία όταν η λεπίδα έρχεται σε επαφή με το έλασμα τείνει να το στρέψει. Η αντίσταση σε αυτή τη στρέψη που επιτρέπει την ανάπτυξη διατμητικής δύναμης, παρέχεται από τη συγκράτηση μέσω του τμήματος που δεν έχει ακόμη αποκοπεί. Σε αυτό το σημείο το μεγαλύτερο μέρος του ελάσματος έχει αποκοπεί. Το αποκομμένο τμήμα έχει μια κάθετη ταχύτητα και πλέον ένα αρκετά μικρό κομμάτι το συνδέει με το συγκρατούμενο. Επομένως δέχεται μια στροφή λόγω της ταχύτητάς του και για ελάχιστο χρονικό διάστημα δεν υποβάλλει αντίσταση.

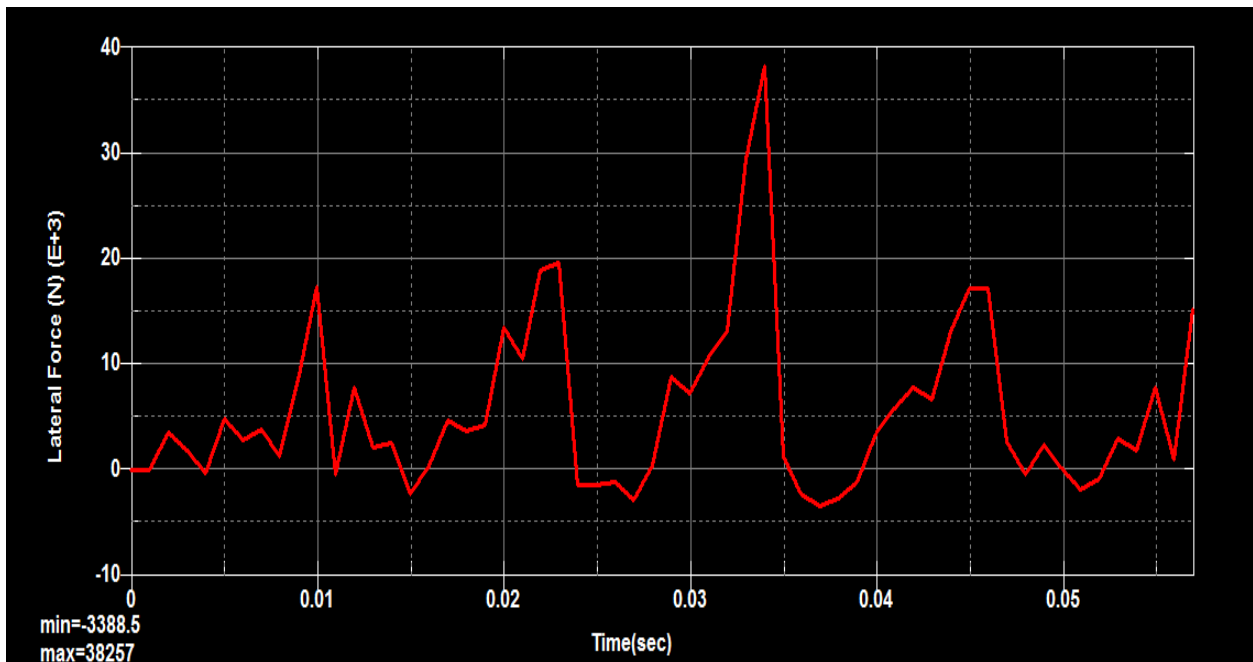


Εικόνα 6.3: Διανυσματα κάθετης ταχύτητας των στοιχείων του προς αποκοπή τμήματος

Όπως φαίνεται στην εικόνα 6.3, κατά την στιγμή 0.05 sec έχει αποκτήσει ένα πεδίο ταχυτήτων που τείνει να το περιστρέψει γύρω από άξονα που είναι κάθετος στη διεύθυνση κοπής και διέρχεται περίπου από το σημείο που βρίσκεται σε επαφή με την λεπίδα.

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η οριζόντια δύναμη που δέχονται η καρμανιόλα αλλά και η βάση. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η οριζόντια δύναμη που ασκείται στην καρμανιόλα. Οι βασικές παρατηρήσεις είναι δύο :

1. Δεν εμφανίζει τη σχετική σταθερότητα που εμφανίζει η κάθετη δύναμη.
2. Κυμαίνεται σε μικρότερες τιμές από την κάθετη δύναμη, με εξαίρεση κάποια συγκεκριμένα σημεία όπου αυξάνεται κατακόρυφα.
3. Τα σημεία των μεγίστων είναι ακριβώς στις ίδιες χρονικές στιγμές με τα μέγιστα της κάθετη δύναμης, συνεπώς και στις ίδιες θέσεις του μήκους κοπής.

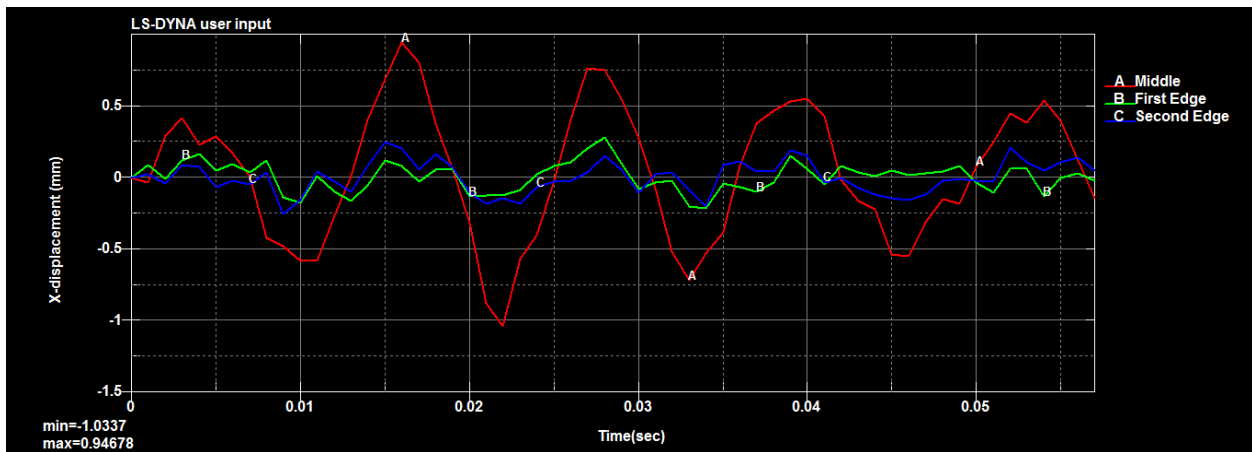


Εικόνα 6.4: Οριζόντια δύναμη κοπής

Έως τώρα έχει διερευνηθεί η φόρτιση που δέχεται η μηχανή. Θα πρέπει, επιπλέον, να δούμε και ποια είναι τα αποτελέσματα αυτής της φόρτισης. Θα δείξουμε τις μετατοπίσεις που προκύπτουν για την καρμανιόλα και τη βάση. Με βάση την στήριξη της μηχανής στα δύο άκρα της φαίνεται πως οι μετατοπίσεις θα είναι μεγαλύτερες προς το μέσο του μήκους κοπής. Επομένως θα εξετάσουμε την μετατόπιση δύο σημείων στα άκρα (ένα από την κάθε πλευρά) και ενός μεσαίου σημείου στην βάση και την καρμανιόλα αντίστοιχα.

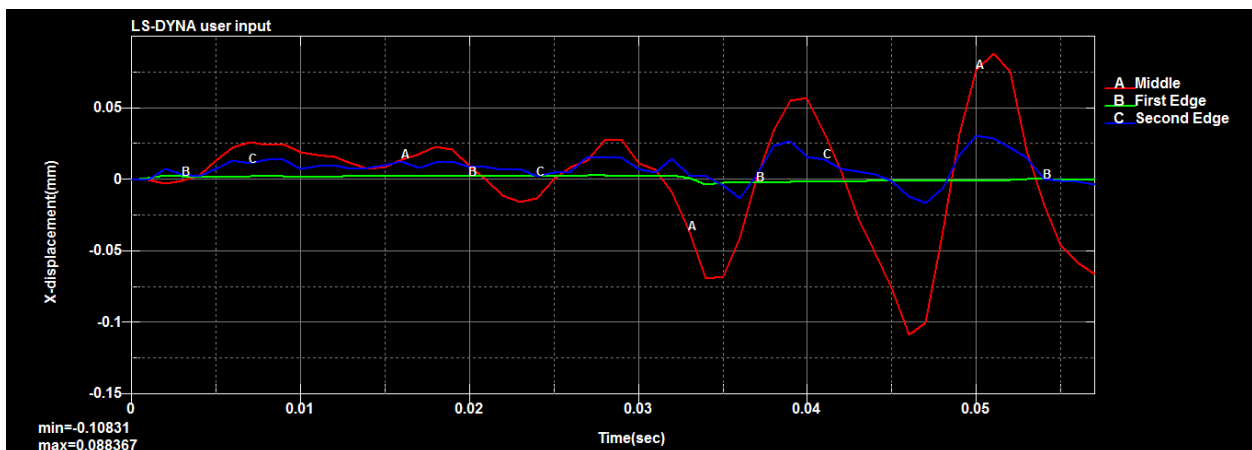


Εικόνα 6.5: Θέσεις σημείων κατά το μήκος κοπής



Εικόνα 6.6: Σύγκριση μετατοπίσεων τριών σημείων της καρμανιόλας

Στην Εικόνα 6.6 φαίνεται η απόκριση των 3 θέσεων της καρμανιόλας. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ταλαντωτική συμπεριφορά της καρμανιόλας. Η ταλάντωση φαίνεται να έχει περίοδο περίπου $T=0.01$ sec. Εφόσον η καρμανιόλα είναι ελαστική και η οριζόντια δύναμη μεταβάλλεται από τιμές κοντά στο μηδέν (δηλαδή σε κάποια σημεία δεν υπάρχει αντίσταση κατά την οριζόντια διεύθυνση) έως τιμές της τάξης των 20-40 kN η συμπεριφορά αυτή δικαιολογείται. Επίσης φαίνεται, όπως αναμενόταν, το σημείο A που βρίσκεται στο μέσο της καρμανιόλας να ταλαντώνεται με το τετραπλάσιο περίπου πλάτος από τα σημεία στα άκρα, δηλαδή η μέγιστη προκύπτουσα μετατόπιση είναι 1mm στο μέσο της καρμανιόλας.



Εικόνα 6.7: Σύγκριση μετατοπίσεων τριών σημείων της βάσης

Στην εικόνα 6.7 φαίνεται η μετατόπιση των αντίστοιχων σημείων της βάσης. Με βάση αυτό μπορούμε να εξάγουμε δύο συμπεράσματα:

1. Η βάση παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερη στιβαρότητα σε σχέση με την καρμανιόλα.
2. Παρουσιάζει μηδενική πρακτικά υποχώρηση στην αρχή και στο τέλος της κοπής. Εξαιρετικά μικρή είναι και η μέγιστη μετατόπιση που εμφανίζεται, η οποία περιορίζεται στο 10% της μετατόπισης της καρμανιόλας.

Τα παραπάνω, γίνεται εύκολα αντιληπτό πως, οφείλονται στην στήριξη των δύο σωμάτων. Η καρμανιόλα επειδή είναι κινούμενη και στηρίζεται σε δύο μόνο αρθρώσεις θα υποχωρεί αρκετά περισσότερο κατά την κοπή από τη βάση, της οποίας οι δύο πλευρές είναι εξ ολοκλήρου συγκολλητές με τα πλευρικά τμήματα της μηχανής που πακτώνονται στο έδαφος.

6.2 Κοπή με αυξημένη χάρη

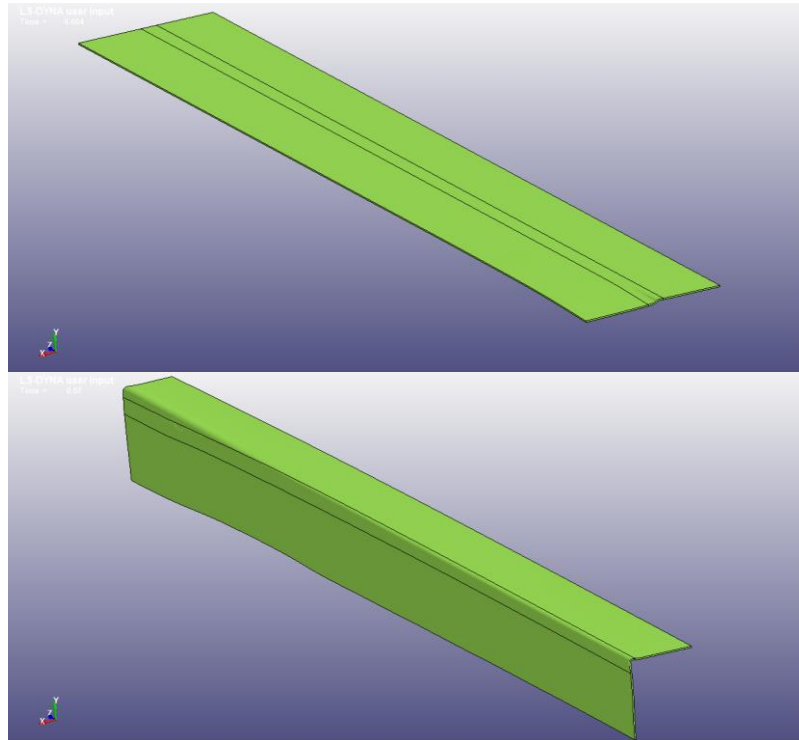
Διάκενο: 2.5 mm

Μηχανή: Ελαστική

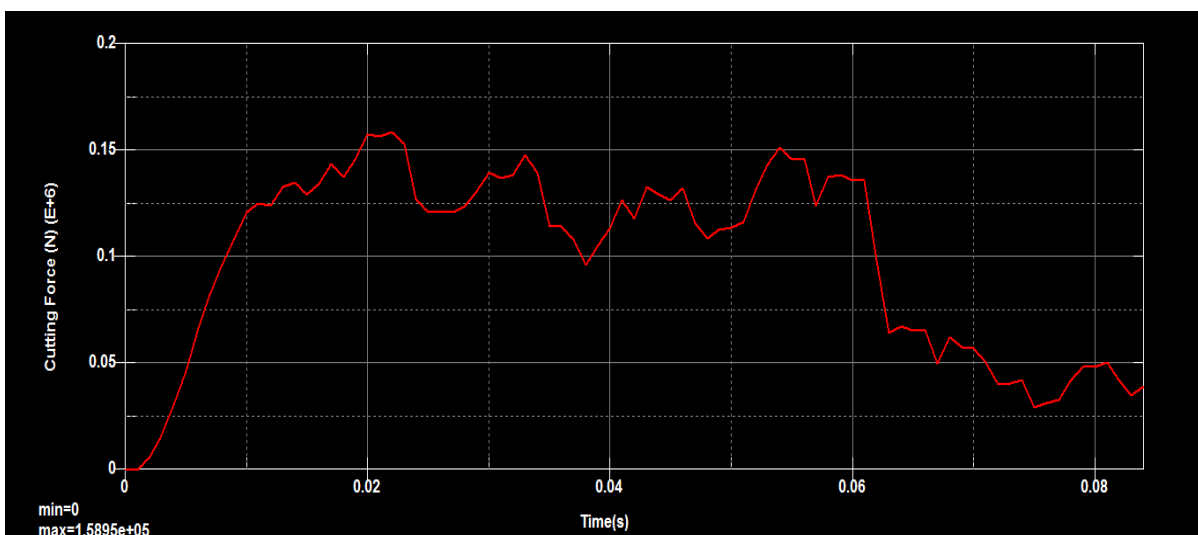
Μετατόπιση πλάκας συγκράτησης: 0.15 mm

Χρόνος έναρξης: 0 sec

Χρόνος περάτωσης: 0.084 sec



Εικόνα 6.8: Γραφική απεικόνιση της αρχικής και τελικής μορφής του ελάσματος



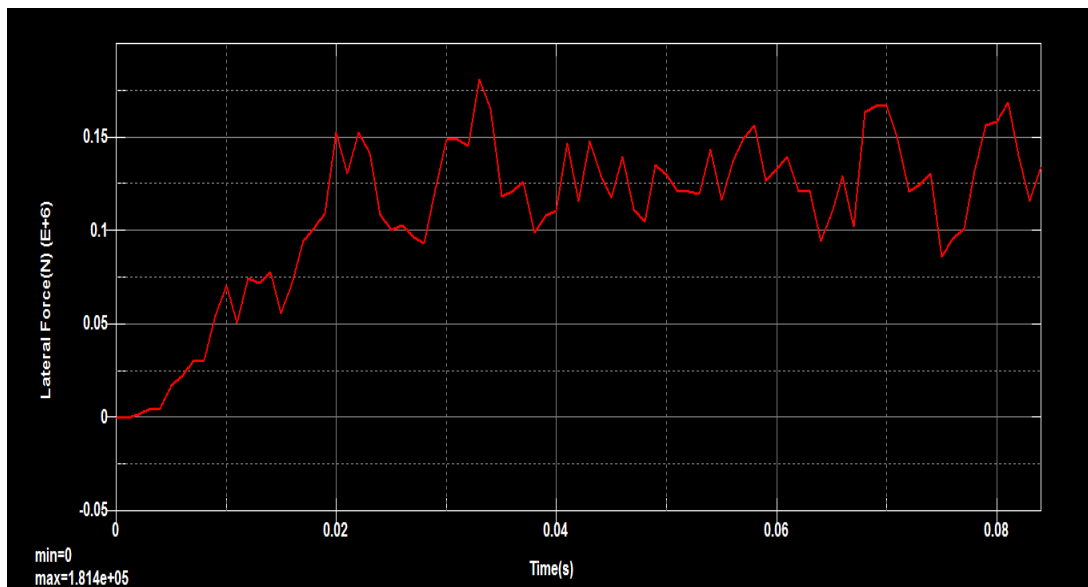
Εικόνα 6.9: Κάθετη δύναμη μεταξύ άνω λεπίδας και ελάσματος

Δυνάμεις στην καρμανιόλα

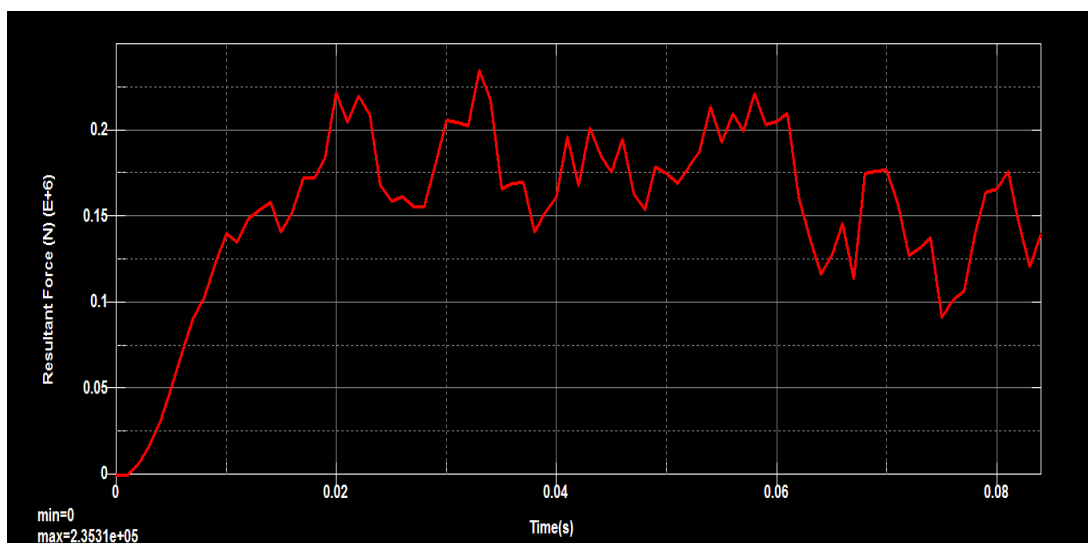
Στην εικόνα 6.9 φαίνεται η δύναμη κοπής (κάθετη δύναμη) μεταξύ ελάσματος και άνω λεπίδας. Στο μοντέλο των πεπερασμένων το έλασμα έχει ορισθεί ως δύο σώματα (parts). Το ένα είναι η περιοχή υψηλής

φόρτισης και το άλλο το υπόλοιπο. Επομένως υπάρχουν δύο αλληλεπιδρώντα ζευγάρια. Το ένα είναι η λεπίδα με την περιοχή υψηλής φόρτισης και το άλλο η λεπίδα με την περιοχή χαμηλής φόρτισης. Η λεπίδα καθώς κατεβαίνει έρχεται πρώτα σε επαφή με την περιοχή υψηλής φόρτισης. Καθώς το έλασμα κάμπτεται, έρχεται αργότερα σε επαφή και με το δεύτερο σώμα που έχουμε ορίσει. Είναι αναγκαίο λοιπόν να αθροίσουμε τις δυνάμεις που προκύπτουν για την κάθε επαφή. Στο διάγραμμα φαίνεται πως η κάθετη δύναμη αυξάνεται μέχρι τα 0.02 sec, όπου φτάνει και στη μέγιστη τιμή της, τα 159 kN. Από αυτό το σημείο και μετά κυμαίνεται γύρω στα 125 kN. Στα 0.06 sec παρατηρείται ραγδαία πτώση της δύναμης. Είναι το σημείο στο οποίο όλο το έλασμα έχει καμφθεί. Η δύναμη που συνεχίζει να υπάρχει μετά από αυτό το σημείο οφείλεται στην τριβή μεταξύ του ελάσματος και της λεπίδας.

Στην Εικόνα 6.10 φαίνεται η εξέλιξη της οριζόντιας δύναμης. Αυξάνεται ακολουθώντας το ίδιο μοτίβο με την κάθετη δύναμη. Κυμαίνεται και αυτή γύρω από τα 125 kN έως το τέλος της προσομοίωσης. Κανονικά, θα περιμέναμε να μειωθεί στο τέλος εφόσον διαρρεύσει το υλικό αλλά παραμένει σταθερή. Η αιτία αυτού του φαινομένου είναι πως προς τέλος, λόγω της υψηλής τριβής η άνω λεπίδα προκαλεί ολίσθηση του ελάσματος από την πλάκα συγκράτησης. Έτσι καθώς έρχεται νέο υλικό προς την ακμή, δέχεται και αυτό καταπόνηση αναπτύσσοντας δυνάμεις.



Εικόνα 6. 10: Οριζόντια δύναμη στην άνω λεπίδα

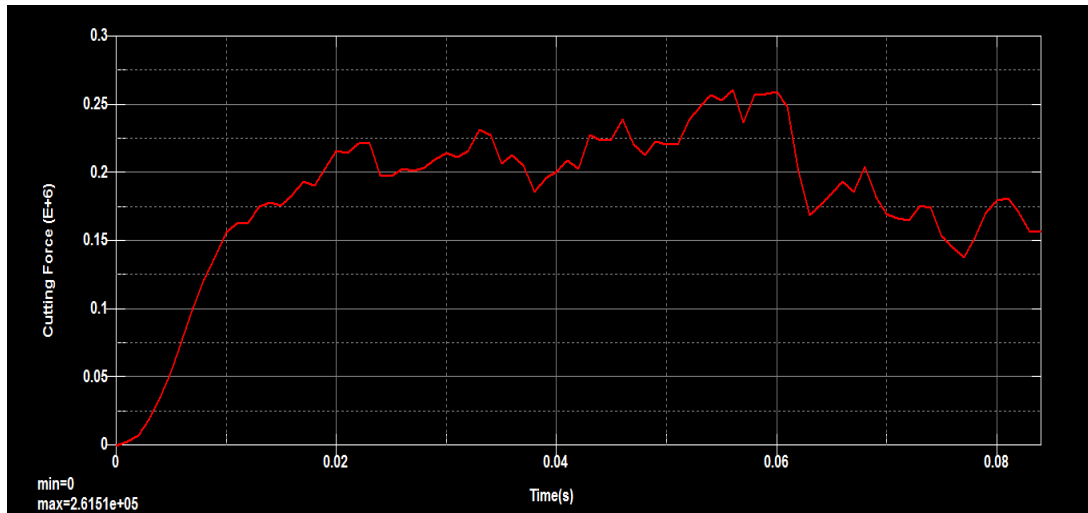


Εικόνα 6.11: Συνισταμένη δύναμη στην καρμανιόλα

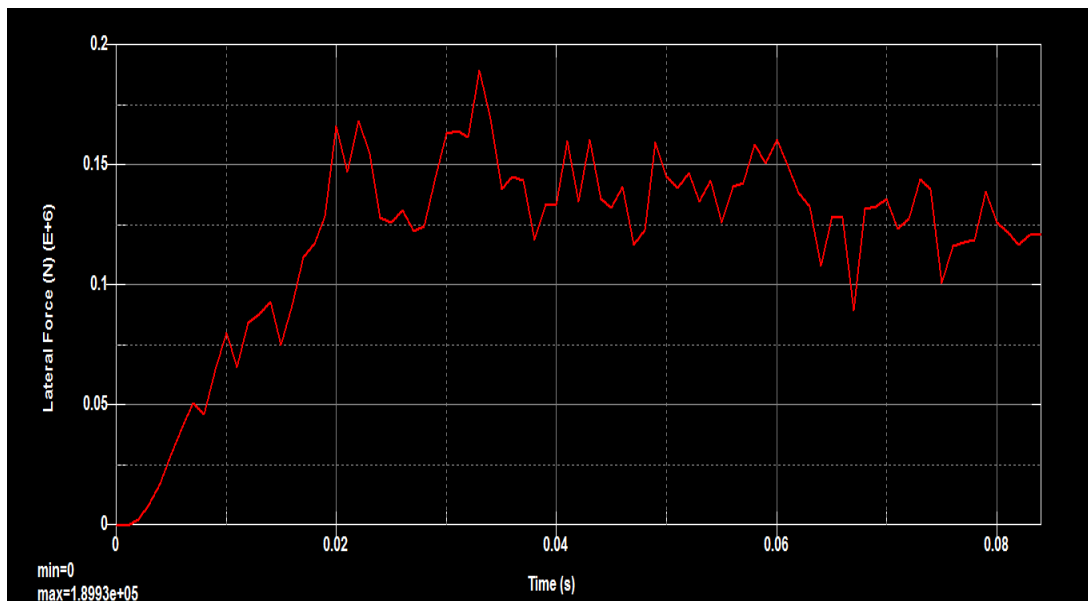
Δυνάμεις στη βάση

Στις Εικόνες 6.12-6.13 φαίνονται οι δυνάμεις από τις οποίες καταπονείται η βάση. Η κάθετη δύναμη φτάνει τη μέγιστη τιμή των 262kN και μέχρι την χρονική στιγμή 0.06 sec υπερβαίνει τα 200kN. Ύστερα από αυτό το σημείο παρατηρείται πτώση του μέτρου της αλλά παραμένει σε υψηλά επίπεδα, γεγονός που δείχνει πως εξακολουθεί να δέχεται δύναμη από την καρμανιόλα μέσω της τριβής της με το έλασμα. Όσον αφορά την οριζόντια δύναμη, το μέτρο της κυμαίνεται σε μεγάλο εύρος γύρω από την τιμή των 135kN φτάνοντας το μέγιστο των σχεδόν 190 kN και μειώνεται κατά ελάχιστα μετά τα 0.06 sec.

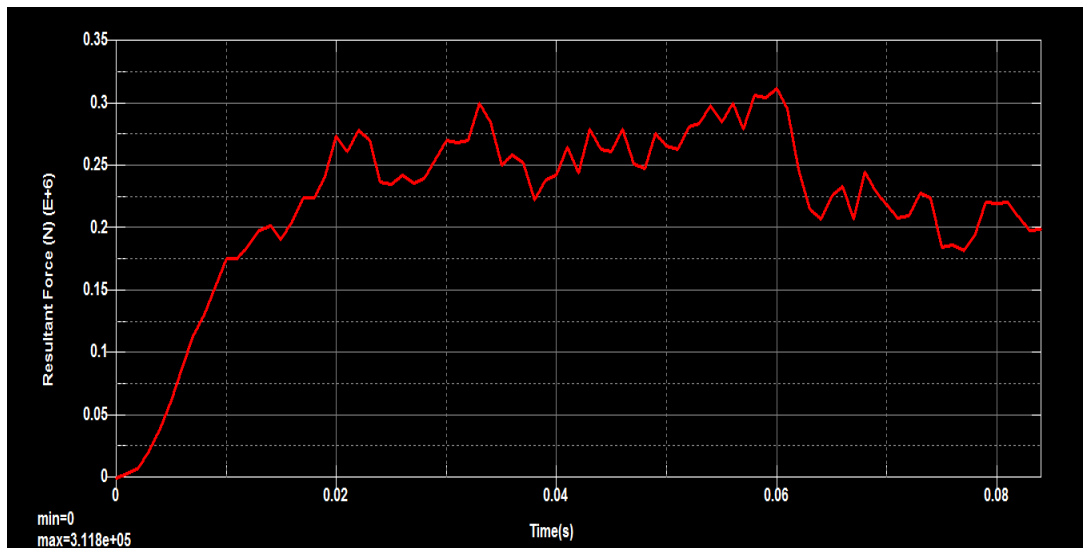
Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί πως οι μη ομαλές διακυμάνσεις που φαίνονται στα διαγράμματα των δυνάμεων οφείλονται στην διακριτοποίηση αλλά και στη φύση των δυνάμεων της επαφής (penalty forces).



Εικόνα 6.12: Κάθετη δύναμη στην σταθερή λεπίδα



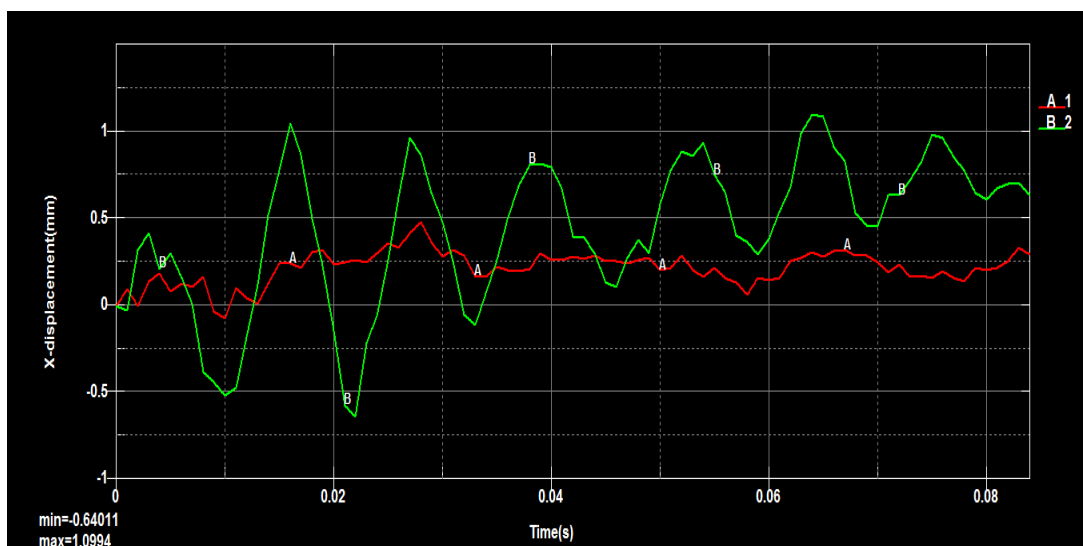
Εικόνα 6. 13: Οριζόντια δύναμη στην σταθερή λεπίδα



Εικόνα 6.14: Συνισταμένη δύναμη στη βάση

Δυναμική συμπεριφορά μηχανής

Στις Εικόνες 6.15-6.16 φαίνονται οι μετατοπίσεις ενός σημείου στο μέσο του μήκους κοπής και στην αρχή του, πάνω στην καρμανιόλα και πάνω στη βάση. Η μετατόπιση είναι κατά τον άξονα x, ο οποίος είναι κάθετος στο μήκος και κάθετος στον άξονα κίνησης της καρμανιόλας. Στο σχήμα 6.15 φαίνεται με κόκκινο χρώμα η μετατόπιση ενός ακραίου σημείου της καρμανιόλας και με πράσινο η μετατόπιση ενός σημείου στο μέσο της. Παρατηρούμε την έντονη ταλάντωση, όπως και στην «περίπτωση 1» που εξετάσαμε. Εκτός αυτού μπορούμε να διακρίνουμε πως μεταβάλλεται το σημείο γύρω από το οποίο εμφανίζεται η ταλάντωση. Αρχικά η ταλάντωση γίνεται γύρω από το μηδέν. Στη συνέχεια, καθώς η λεπίδα κατεβαίνει και το σημείο εφαρμογής των δυνάμεων μετατοπίζεται προς το μέσο της καρμανιόλας, αυτή αποκτά κάποιο βέλος κάμψης. Αυτό στο τέλος της προσομοίωσης είναι περίπου 0.6 mm. Η μέγιστη απόκλιση είναι το 1mm. Τέλος, όπως είναι αναμενόμενη η υποχώρηση του κεντρικού σημείου είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του ακραίου σημείου.

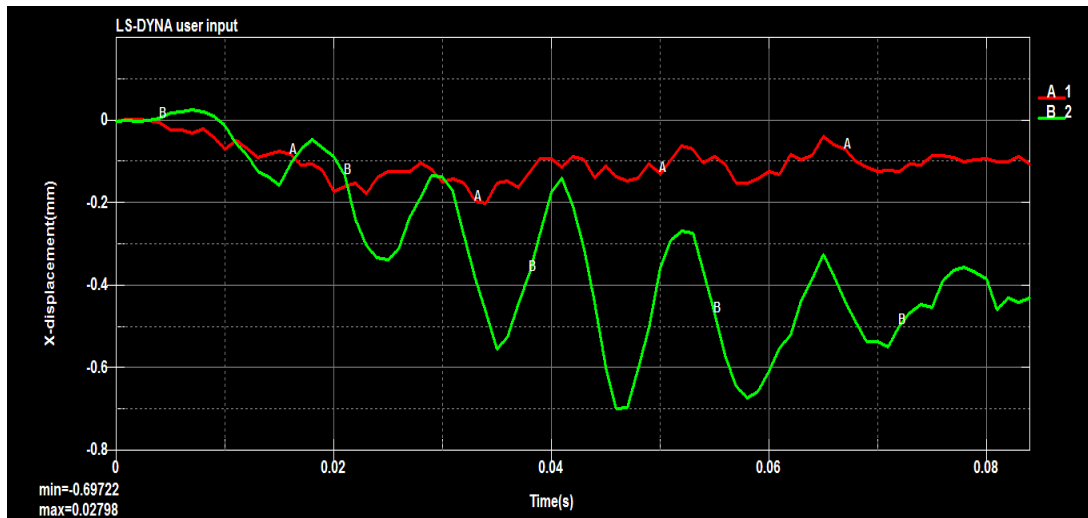


Εικόνα 6. 15: Μετατόπιση σημείων A (άκρου) και B (κέντρου) της καρμανιόλας.

Κατά τον ίδιο τρόπο, αλλά με αντίθετη κατεύθυνση παραμορφώνεται και η βάση, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.16. Εδώ η μετατόπιση στο μέσο της φτάνει στο τέλος της προσομοίωσης φτάνει στα 0.44 mm, έχο-

ντας αποκτήσει προηγουμένως μια μέγιστη τιμή στα 0.7 mm. Στο άκρο της η μετατόπιση είναι περίπου 0.1 mm.

Φαίνεται λοιπόν και από αυτά τα γραφήματα πως η βάση είναι πολύ πιο στιβαρή από την καρμανιόλα, λαμβάνοντας υπόψη και το ότι δέχεται αρκετά μεγαλύτερες δυνάμεις.



Εικόνα 6.16: Μετατόπιση σημείων A (άκρου) και B (κέντρου) της βάσης.

6.3 Κοπή με αυξημένη χάρη και απαραμόρφωτη μηχανή

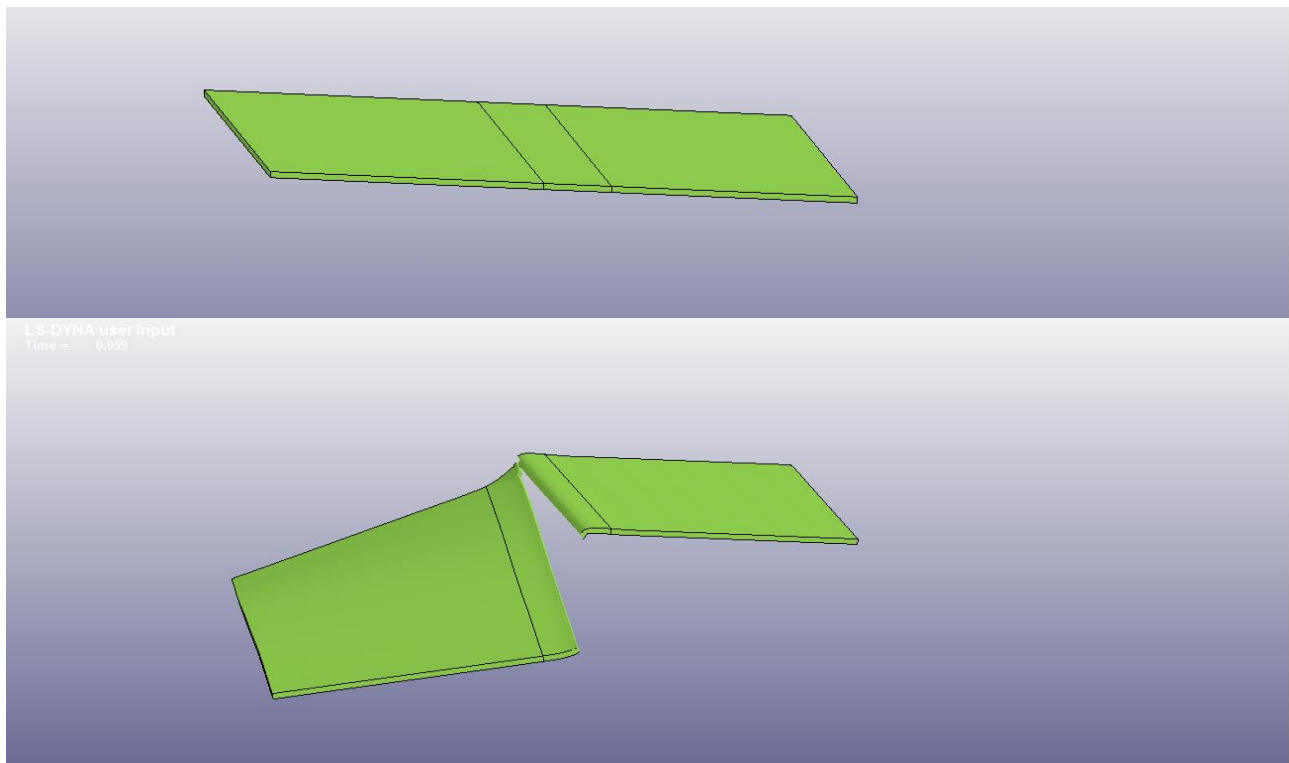
Διάκενο: 2.5 mm

Μηχανή: Απαραμόρφωτη

Μετατόπιση πλάκας συγκράτησης: 0.15 mm

Χρόνος έναρξης: 0 sec

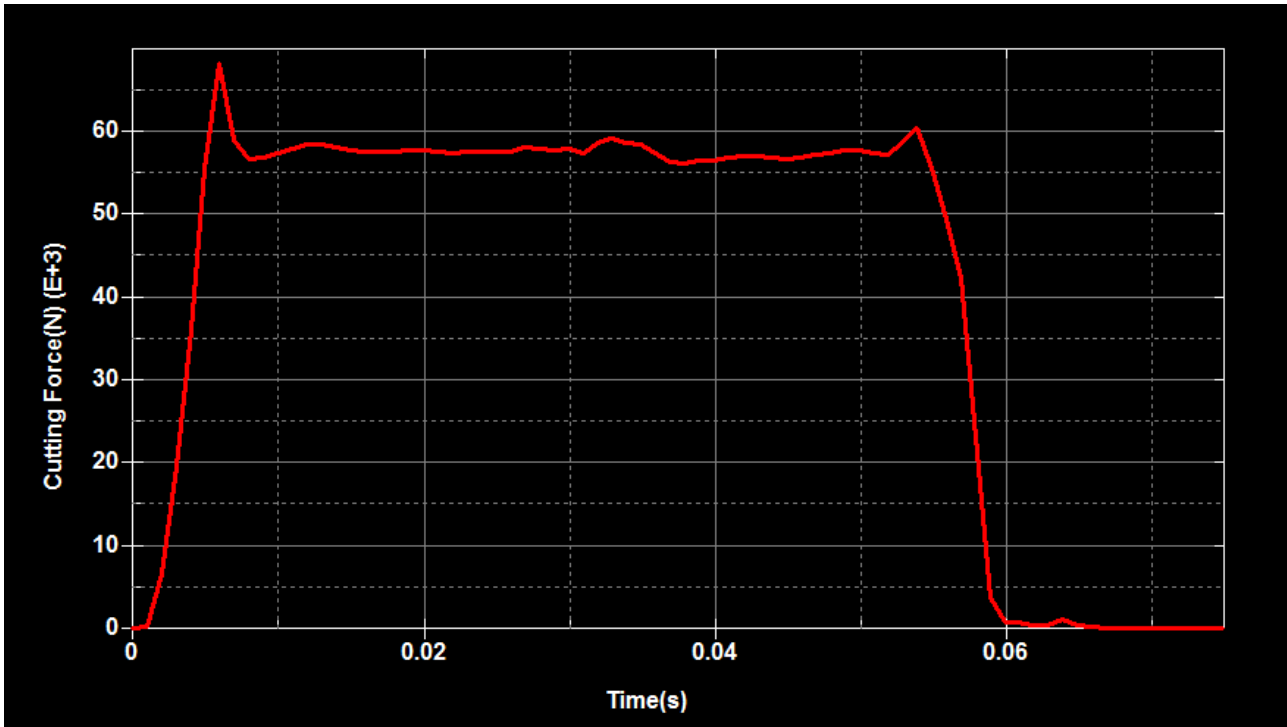
Χρόνος περάτωσης: 0.054 sec



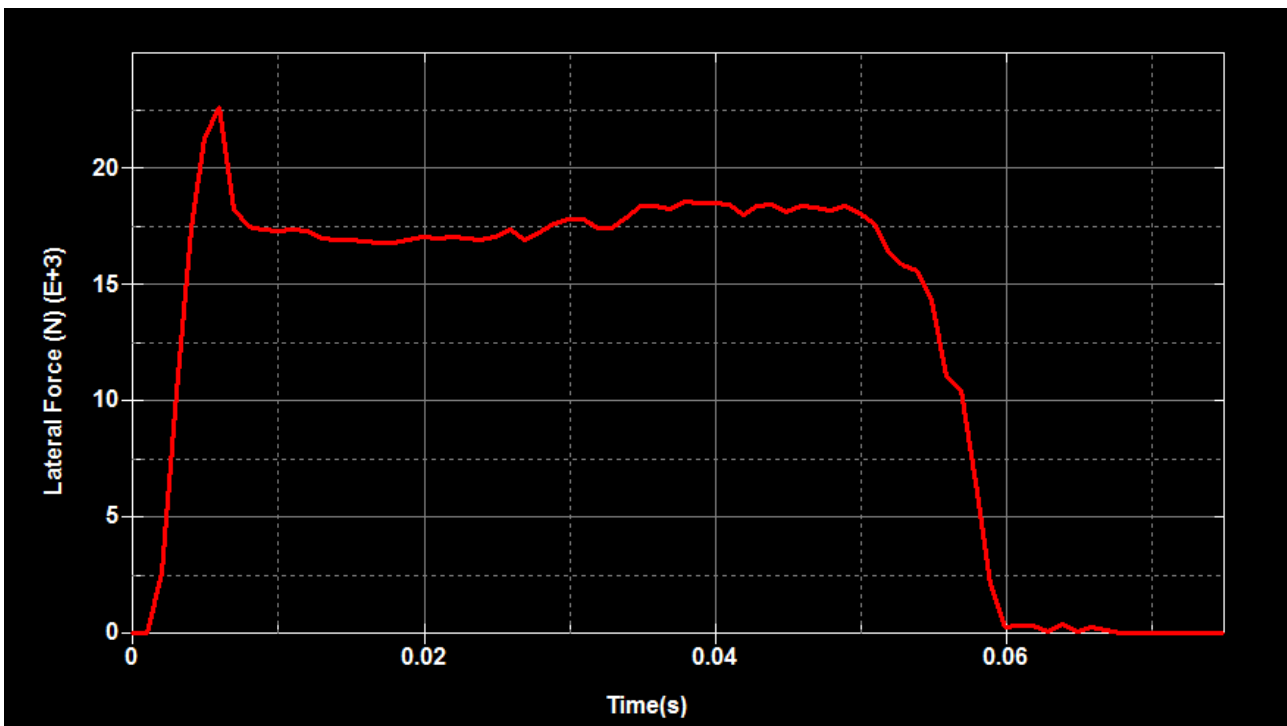
Εικόνα 6.17: Αποτέλεσμα κοπής με απαραμόρφωτη μηχανή και αυξημένη χάρη.

Στην βιβλιογραφία, η οι περισσότερες αναλύσεις (και όλες όσες παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2) αγνοούν την ελαστικότητα της μηχανής, με ελάχιστες από αυτές να λαμβάνουν υπόψη μόνο την ελαστικότητα των λεπίδων. Επομένως παρουσιάζει ενδιαφέρον να δούμε τα αποτελέσματα μιας τέτοιας ανάλυσης με το παρόν μοντέλο και να τα συγκρίνουμε με αυτά της ελαστικής μηχανής. Στην εικόνα 6.17 φαίνεται πως το έλασμα κόβεται μεν, αλλά ανομοιόμορφα και έχοντας εφελκυστεί αρκετά πριν την αστοχία. Εδώ το διάκενο παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια της κοπής, σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση όπου είδαμε να αυξάνεται σημαντικά. Επομένως το έλασμα αστοχεί πολύ πιο εύκολα.

Δυνάμεις στην καρμανιόλα



Εικόνα 6.18: Κάθετη δύναμη

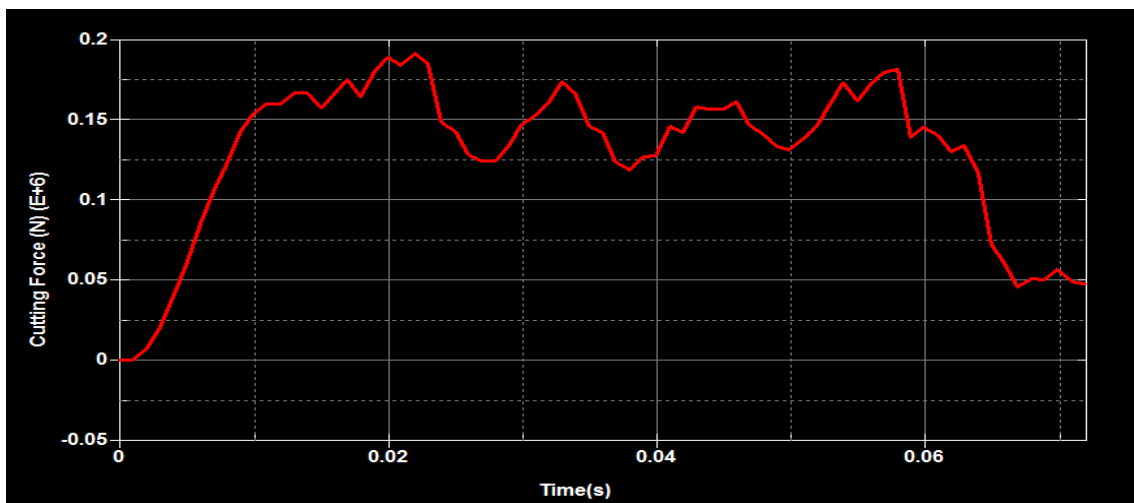


Εικόνα 6.18: Οριζόντια δύναμη

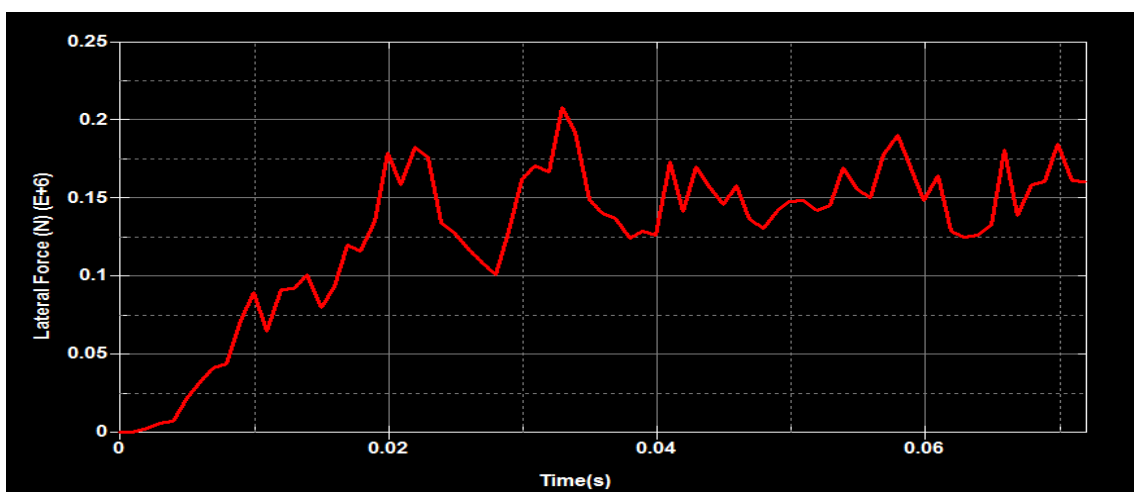
Στις εικόνες 6.17-6.18 φαίνεται πως η δύναμη είναι εξαιρετικά μικρότερη από την προηγούμενη ανάλυση. Η μέγιστη δύναμη κοπής είναι 68 kN ενώ η μέγιστη οριζόντια δύναμη είναι 25 kN. Επίσης, ένα σημαντικό στοιχείο είναι η σταθερότητα που παρουσιάζει η δύναμη. Αυτό αποτελεί μια επιβεβαίωση πως η αυξομείωση των δυνάμεων που παρατηρήθηκε στην ανάλυση με ελαστική μηχανή δεν οφείλεται σε μη επαρκή διακριτοποίηση.

6.4 Κοπή ελάσματος με αυξημένη χάρη συνυπολογίζοντας τον ρυθμό παραμόρφωσης

Όπως ειπώθηκε στο κεφάλαιο 5.4, το χρησιμοποιούμενο έως τώρα μοντέλο υλικού του ελάσματος Johnson-Cook, παρέχει τη δυνατότητα να μεταβληθεί η καμπύλη (scale) τάσεων-παραμορφώσεων ανάλογα με το ρυθμό παραμόρφωσης και την θερμοκρασία. Επειδή η κατεργασία γίνεται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα η θερμοκρασία εκτιμάται πως θα έχει μηδαμινή επίδραση. Επειδή όμως η ταχύτητα είναι σχετικά μεγάλη, έγινε μια προσομοίωση συμπεριλαμβάνοντας τον δεύτερο όρο της εξίσωσης 5.2. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της κατεργασίας δεν μεταβλήθηκαν. Το έλασμα έλαβε τη τελική μορφή της εικόνας 6.8. Όπως δείχνουν τα παρακάτω διαγράμματα παρατηρείται μια αύξηση των δυνάμεων, όπως είναι αναμενόμενο αφού ο συνυπολογισμός του ρυθμού παραμόρφωσης μπορεί να αυξήσει τις μέγιστες τάσεις.



Εικόνα 6.19: Κάθετη δύναμη στην καρμανιόλα



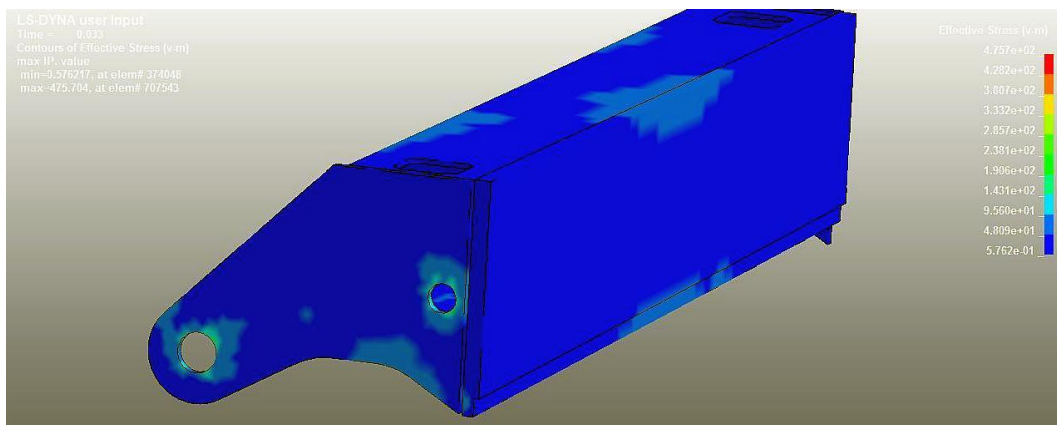
Εικόνα 6.20: Οριζόντια δύναμη στην καρμανιόλα

Η μέγιστη δύναμη κοπής σε αυτήν την περίπτωση είναι 192 kN και η μέγιστη δύναμη οριζόντια δύναμη είναι 208 kN.

6.5 Καταπόνηση μηχανής

Έως αυτό το σημείο παρουσιάστηκαν τα μέτρα των δυνάμεων στην καρμανιόλα και στη βάση. Σε αυτό το σημείο θα δείξουμε σε ποια σημεία της μηχανής ασκούνται οι μέγιστες δυνάμεις και πού η μηχανή φαίνεται να έχει τη μεγαλύτερη καταπόνηση.

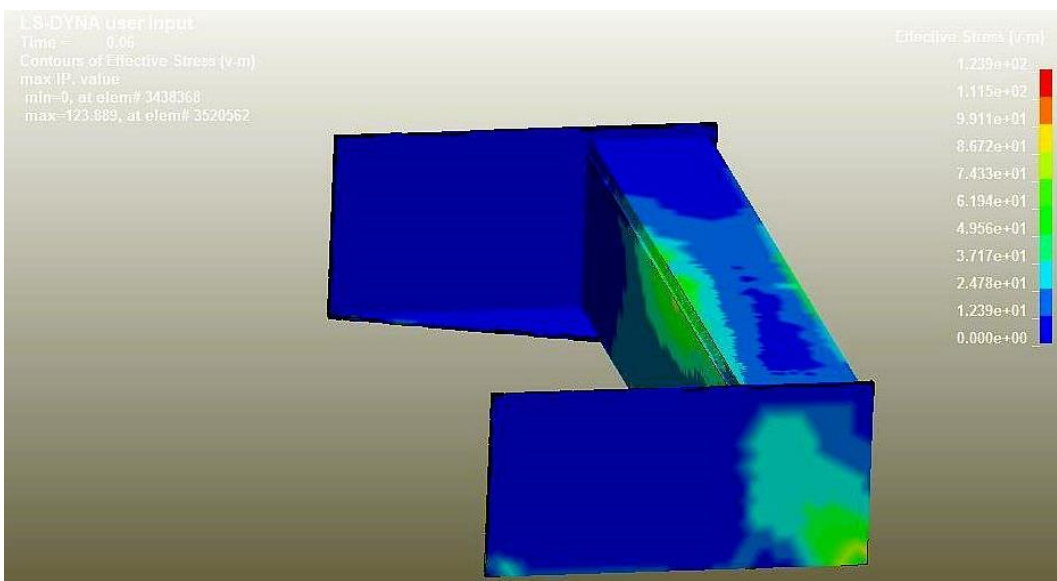
Η μέγιστη καταπόνηση για την καρμανιόλα εμφανίζεται στα 0.033 sec. Σε αυτό το σημείο η άνω λεπίδα έχει μετατοπισθεί κάθετα κατά 24.75 mm. Στο σχήμα φαίνεται το σημείο όπου ασκείται αυτή η δύναμη. Σύμφωνα με τη θέση στην οποία βρίσκεται εκείνη τη στιγμή η λεπίδα, η μέγιστη δύναμη ασκείται σε απόσταση 795 mm από το άκρο της λεπίδας. Η απόσταση αυτή δεν μπορεί να είναι ακριβής, καθώς η δύναμη δεν ασκείται σε ένα σημείο αλλά σε ένα ευθύγραμμο τμήμα της λεπίδας το οποίο δεν μπορεί να προσδιορισθεί ακριβώς. Η τιμή 795mm, είναι η απόσταση του σημείου στο μέσο του διαφανόμενου ευθύγραμμου τμήματος. Τα σημεία που καταπονούνται περισσότερο λόγω αυτής της φόρτισης φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 6.21: Καταπόνηση καρμανιόλας

Τα σημεία με πιο ανοιχτό χρώμα είναι αυτά που καταπονούνται περισσότερο. Αυτά είναι τα σημεία στο μέσο της καρμανιόλας. Τα σημεία των αρθρώσεων καταπονούνται επίσης, αλλά αυτό δεν επηρεάζει την αντοχή της μηχανής.

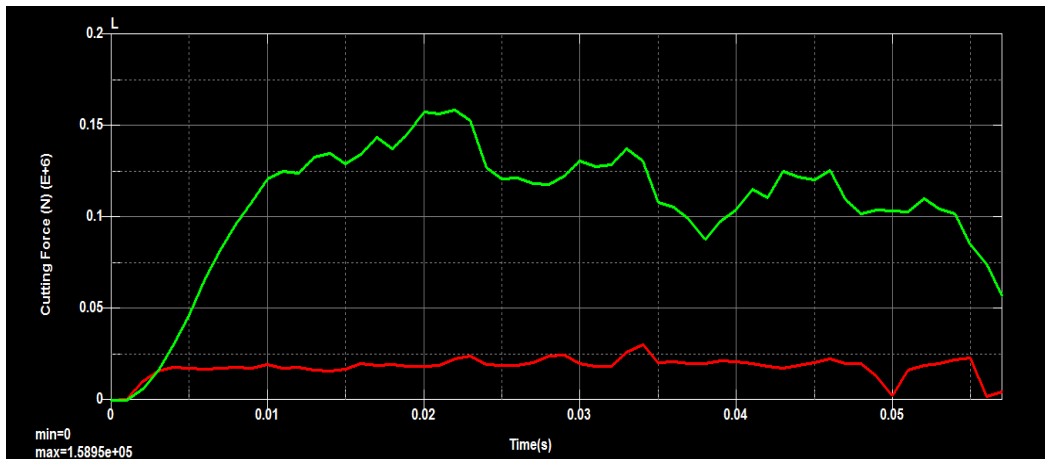
Στην περίπτωση της βάσης, η μέγιστη δύναμη εμφανίζεται στα 0.06 sec, όπου η μετατόπιση της άνω λεπίδας είναι 0.45 mm. Η μέγιστη δύναμη ασκείται 1375 mm από το άκρο της σταθερής λεπίδας. Σχετικά με τα σημεία καταπόνησης φαίνεται πως το μέσο της βάσης είναι αυτό που δέχεται τις υψηλότερες τάσεις, καθώς και το πίσω σημείο πάκτωσης, στην πλευρά που αρχίζει η κοπή.



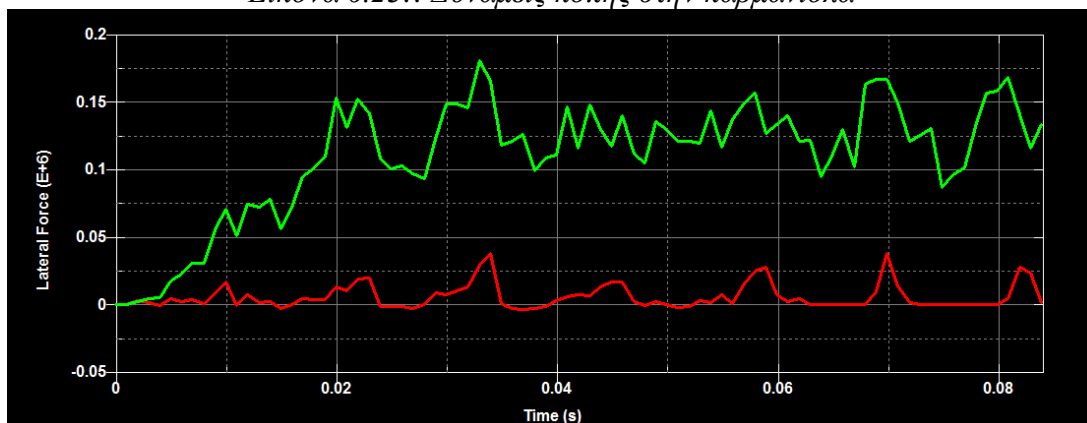
Εικόνα 6.22: Καταπόνηση Βάσης

6.6 Σύγκριση δυνάμεων

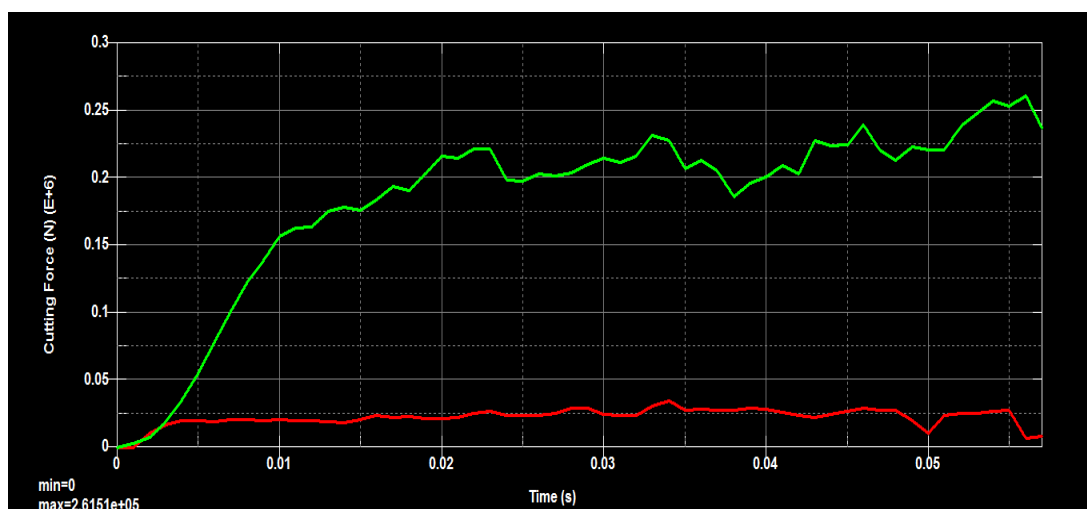
Στις Εικόνες 6.23-6.27 παρατίθενται τα συγκριτικά διαγράμματα δυνάμεων στην κοπή με διάκενο 2.5mm (πράσινο χρώμα) και 0.2 mm (κόκκινο χρώμα). Στην πρώτη περίπτωση, οι δυνάμεις είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές στην κανονική κοπή. Αυτό συμβαίνει διότι στην περίπτωση του 'μασήματος', ολόκληρο το έλασμα «συμμετέχει» στην ανάπτυξη δυνάμεων. Στην κανονική κοπή, τμήμα που έχει αστοχήσει δεν υποβάλει πλέον κάποια αντίσταση. Επίσης, σημασία έχει και το ότι με την αύξηση του διακένου αυξάνεται και η περιοχή του ελάσματος που δέχεται διάτμηση.



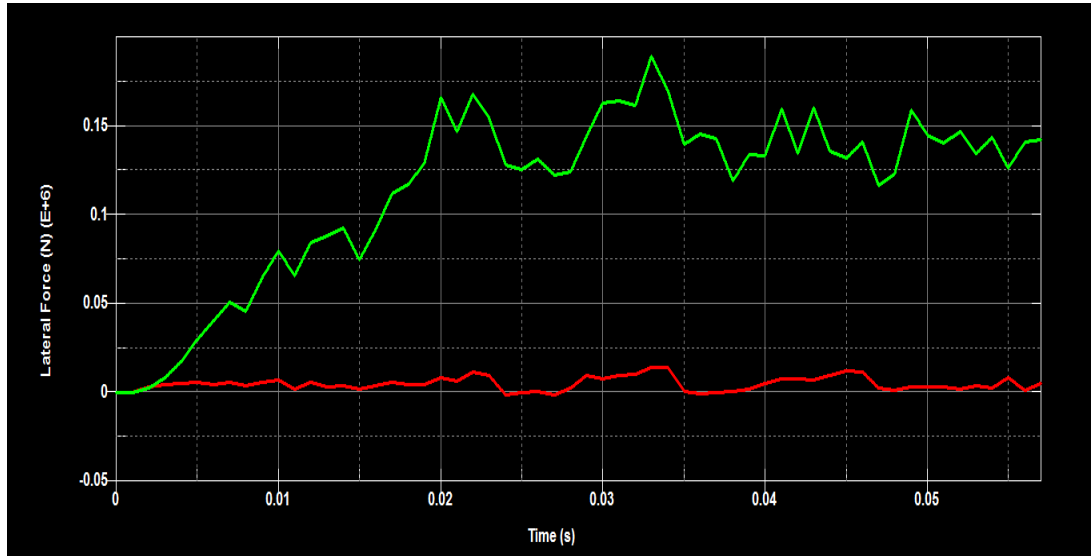
Εικόνα 6.23:: Δυνάμεις κοπής στην καρμανιόλα



Εικόνα 6.24: Οριζόντια δύναμη στην καρμανιόλα

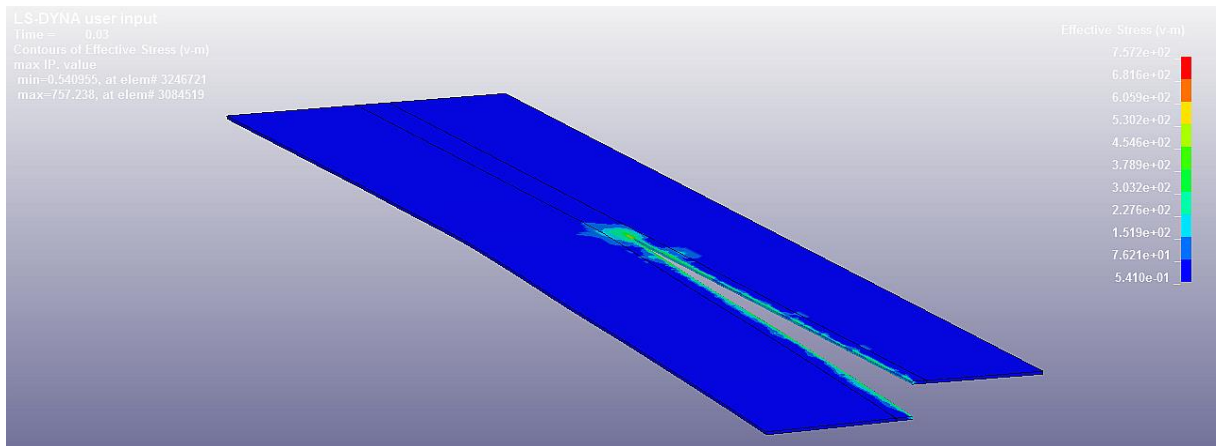


Εικόνα 6.25: Δύναμη κοπής στη βάση

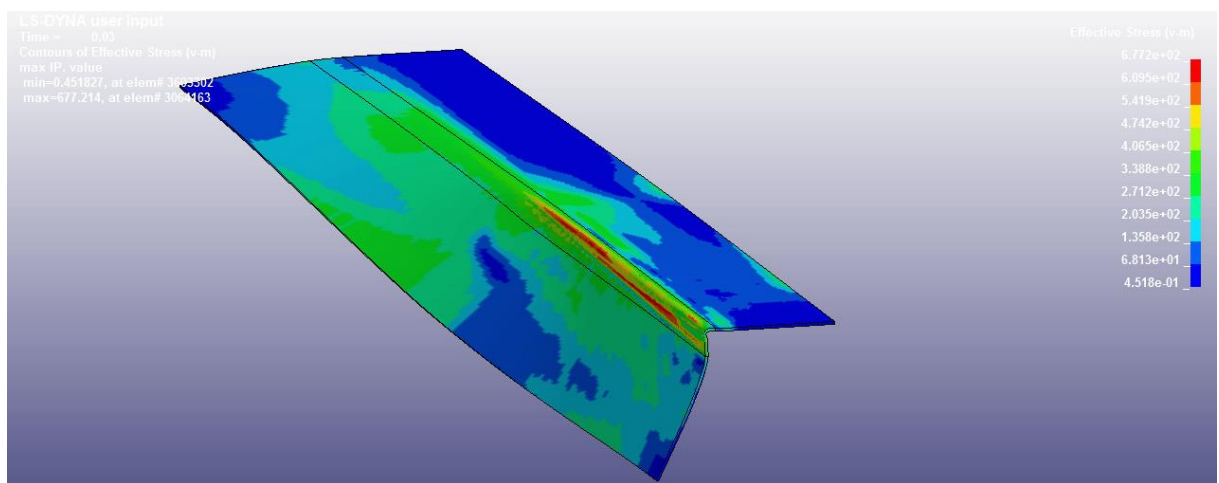


Εικόνα 6.26: Οριζόντια δύναμη στη βάση

Στην Εικόνα 6.27 φαίνεται κατανομή των τάσεων την ίδια χρονική στιγμή για τις δύο περιπτώσεις. Το σαφώς πιο εκτεταμένο πεδίο τάσεων της περίπτωσης με αυξημένο διάκενο αιτιολογεί τα παραπάνω.



α



β

Εικόνα 6.27 Κατανομή τάσεων με διάκενο (α) 0.2mm (β) 2.5mm

Επίδραση του διακένου χρησιμοποιώντας το ίδιο μοντέλο

	Διάκενο(mm)	Καρμανιόλα	Βάση
Μέγιστη κάθετη δύναμη (kN)	0.2	30	35
	2.5	159	262
Μέγιστη οριζόντια δύναμη (kN)	0.2	38	14.6
	2.5	181	190

Μέγιστες δυνάμεις στην καρμανιόλα για τα διαφορετικά μοντέλα και διάκενο 2.5 mm

	Απαραμόρφωτη Μηχανή	Ελαστική Μηχανή	Ελαστική μηχανή με συνυπολογισμό ρυθμού παραμόρφωσης
Μέγιστη κάθετη δύναμη (kN)	68	159	192
Μέγιστη οριζόντια δύναμη (kN)	25	181	208

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

7.1 Συμπεράσματα

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία μελετήθηκε μια περίπτωση ρύθμισης - κατά λάθος – υπερβολικά μεγάλης χάρης σε κατεργασία ψαλιδισμού. Αυτό είναι αποτέλεσμα κακού χειρισμού της εργαλειομηχανής ψαλιδισμού, που συμβαίνει συχνά στην πράξη. Στόχος ήταν να υπολογίσουμε τις δυνάμεις που αναπτύσσονται και να προβλέψουμε τις συνέπειες που έχει αυτό στη μηχανή.

Για να επιτευχθεί αυτό, κατασκευάστηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο της δομής της μηχανής, φιλικό ως προς την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Ορίσθηκε το πρόβλημα και επιλύθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα βρέθηκαν οι μέγιστες δυνάμεις, τα σημεία εφαρμογής τους και η καταπόνηση της μηχανής. Έγινε σύγκριση της επίδρασης που έχει στην μηχανή η κοπή με το κατάλληλο διάκενο με την περίπτωση του αυξημένου διακένου.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα, μπορούμε να πούμε, με αναφορά σε συγκεκριμένη εργαλειομηχανή, αλλά χωρίς βλάβη της γενικότητας, ότι:

- Στην περίπτωση της αυξημένης χάρης, οι δυνάμεις που δημιουργούνται παρουσιάζουν σημαντική αύξηση της τάξης του 400% σε σχέση με αυτές της κοπής με κανονική χάρη.
- Οι δυνάμεις αυτές οδηγούν την καρμανιόλα και τη βάση σε υπολογίσιμες μετατοπίσεις, εν προκειμένω 0.55mm και 0.45mm, αντίστοιχα. Αν αυτό συμβεί επανειλημμένα, μπορεί να συντελέσει σε μόνιμη παραμόρφωση της μηχανής, γεγονός που με τη σειρά του επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα της κοπής, όπως είναι οι τελικές διαστάσεις και η ποιότητα της ακμής.
- Κατά τον σχεδιασμό μιας μηχανής ψαλιδισμού, δεν μπορεί να αγνοηθεί η οριζόντια συνιστώσα της δύναμης κοπής η οποία, σε κανονικές συνθήκες κοπής, μπορεί να ξεπερνά τα 30 kN, μέτρο το οποίο είναι συγκρίσιμο με τη κάθετη δύναμη κοπής.
- Τα σημεία όπου η μηχανή δέχεται τη μεγαλύτερη καταπόνηση είναι τα κεντρικά σημεία της καρμανιόλας και της βάσης.

7.2 Μελλοντική εργασία

Η παρούσα εργασία μπορεί να αποτελέσει τη βάση για περαιτέρω ανάλυση της κατεργασίας του ψαλιδισμού και της καταπόνησης της μηχανής, η οποία περιλαμβάνει :

- Μοντελοποίηση της ακριβούς περιστροφικής κίνησης της καρμανιόλας και της γεωμετρίας της λεπίδας για τη σύγκριση της καταπόνησης σε σχέση με αυτή που υπολογίστηκε για την κάθετη κίνηση.
- Χρησιμοποίηση του ίδιου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για διερεύνηση επιπλέον παραμέτρων της κοπής, όπως η ταχύτητα, η φθορά των εργαλείων και η τριβή.
- Εκτίμηση του αριθμού των κύκλων έπειτα από τον οποίο η καρμανιόλα υφίσταται μόνιμες παραμορφώσεις.
- Ενσωμάτωση ενός πιο ακριβούς μοντέλου για το υλικό του ελάσματος, που θα λαμβάνει υπόψη την ανισοτροπία του και καλιμπράρισμά του (model calibration) για ένα κοινώς χρησιμοποιούμενο υλικό του εμπορίου, μέσω μηχανικών δοκιμών και βελτιστοποίησης.

Βιβλιογραφία

- Atkins, A. G. (1980). On cropping and related processes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 22(4), 215–231. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(80\)90037-5](https://doi.org/10.1016/0020-7403(80)90037-5)
- Atkins, A. G. (1990). On the mechanics of guillotining ductile materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier 24,(1990) 245–257.
- Belytschko, T., Liu, W., & Moran, B. (2000). *Nonlinear finite elements for continua and structures*. 2000. Chichester, New York, John Wiley (Vol. 16). [https://doi.org/10.1016/S0065-230X\(09\)04001-9](https://doi.org/10.1016/S0065-230X(09)04001-9)
- Berti, G. A., Monti, M., Nicola, S. S., & Vicenza, I.-. (n.d.). Numerical modelling of sheet metal guillotining process.
- Bolt, P. J., & Sillekens, W. H. (2000). Prediction of shape aberrations due to punching, shearing and slitting. *Journal of Materials Processing Technology*, 103(1), 87–94. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00390-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00390-3)
- Brokken, D., Brekelmans, W. A. M., & Baaijens, F. P. T. (1998). Numerical modelling of the metal blanking process. *Journal of Materials Processing Technology*, 83(83), 192–199. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00062-4)
- Chandrupalta, Tirupathi R.;Belegundu,Ashok D.,(2002). Introduction to Finite Elements in Engineering 3rdEdition.
- Dev, L., SOfware, L. I. S., & COrporation, T. E. C. (n.d.). *Theory Manual 08/30/17* (Vol. 17).
- Mark S.Gockenbach(2006) ,Understanding And Implementing the Finite Element Method
- Gustafsson, E. (n.d.). *Experiments on Sheet Metal Shearing*.
- Husson, C., Correia, J. P. M., Daridon, L., & Ahzi, S. (2008). Finite elements simulations of thin copper sheets blanking: Study of blanking parameters on sheared edge quality. *Journal of Materials Processing Technology*, 199(1), 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.08.034>
- Hutton, D. V. (2004). Fundamentals of Finite Element Analysis. *Textbook (Important)*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Irgens, F. (2008). *Continuum mechanics. Continuum Mechanics*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74298-2>
- Kalpajian, Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2003). *Manufacturing Processes for Engineering Materials. International Journal of Machine Tool Design and Research* (Vol. 25). Retrieved from <http://books.google.co.uk/books?id=63CSygAACAAJ>
- Kibe, Y., Okada, Y., & Mitsui, K. (2007). Machining accuracy for shearing process of thin-sheet metals- Development of initial tool position adjustment system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(11), 1728–1737. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.12.006>
- Lemiale, V., Chambert, J., & Picart, P. (2009). Description of numerical techniques with the aim of predicting the sheet metal blanking process by FEM simulation. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(5), 2723–2734. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.06.019>
- Li, Y. gui, Ye, Q., Fan, F., Bao, Y., & Huang, Q. xue. (2012). Finite Element Method Analysis of Effect of Blade Clearance on Plate Shearing Process. *Journal of Iron and Steel Research International*, 19(10), 26–29. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60147-2](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60147-2)
- Ma, L. feng, Huang, Q. xue, Huang, Z. quan, Chu, Z. bing, & Tian, Y. qin. (2012). Establishment of Optimal Blade Clearance of Stainless Steel Rolling-Cut Shear and Test of Shearing Force Parameters. *Journal of Iron and Steel Research International*, 19(9), 52–61. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60008-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60008-4)
- Maiti, S. K., Ambekar, A. A., Singh, U. P., Date, P. P., & Narasimhan, K. (2000). Assessment of influence of some process parameters on sheet metal blanking. *Journal of Materials Processing Technology*,

102(1), 249–256. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00486-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00486-0)

- Marouani, H., Ben Ismail, A., Hug, E., & Rachik, M. (2009). Numerical investigations on sheet metal blanking with high speed deformation. *Materials and Design*, 30(9), 3566–3571. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.02.028>
- Saanouni, K., Belamri, N., & Autesserre, P. (2010). Finite element simulation of 3D sheet metal guillotining using advanced fully coupled elastoplastic-damage constitutive equations. *Finite Elements in Analysis and Design*, 46(7), 535–550. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2010.02.002>
- Stegeman, Y. W., Goijaerts, A. M., Brokken, D., Brekelmans, W. A. M., Govaert, L. E., & Baaijens, F. P. T. (1999). An experimental and numerical study of a planar blanking process. *Journal of Materials Processing Technology*, 87(1–3), 266–276. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00362-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00362-8)
- Subramonian, S., Altan, T., Campbell, C., & Ciocirlan, B. (2013). Determination of forces in high speed blanking using FEM and experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(12), 2184–2190. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.06.014>
- Subramonian, S., Altan, T., Ciocirlan, B., & Campbell, C. (2013). Optimum selection of variable punch-die clearance to improve tool life in blanking non-symmetric shapes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 75, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.09.004>
- Wisselink, H. (2000). Analysis of Guillotining and Slitting Finite Element Simulations, 159.
- Yu, S., Xie, X., Zhang, J., & Zhao, Z. (2007). Ductile fracture modeling of initiation and propagation in sheet-metal blanking processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 187–188, 169–172. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.179>
- Παπαδρακάκης Μ.(2001) ,Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων