



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

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΑ
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ
ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ρ. ΜΠΟΥΡΜΠΑΚΗΣ

**Επιβλέπων: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ
Καθηγητής ΕΜΠ**

ΑΘΗΝΑ, Ιανουάριος 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται ένα σύγχρονο θέμα όπως είναι ο τομέας της Μικρομηχανικής. Η ζήτηση στις μέρες μας είναι ολοένα αυξανόμενη για μικροεξαρτήματα της τάξης των μm . Το ενδιαφέρον των ερευνητών έχει στραφεί στη μελέτη και την επίδραση που έχουν διάφορες παράμετροι όπως είναι οι δυνάμεις κοπής, η κατανομή των τάσεων κτλ. Για να διεξαχθεί μια τέτοια μελέτη απαιτείται η κατασκευή μοντέλων και η διεξαγωγή προσομοιώσεων. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή ενός μοντέλου μικροκοπής και η εξέταση της επίδρασης διαφόρων θεωριών για την μοντελοποίηση της τριβής και της καταστατικής εξίσωσης του τεμαχίου.

Κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας κατασκευάστηκε με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων και με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου MSC.Marc που διέθετε προς χρήση το εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, ένα θερμομηχανικό μοντέλο μικροκοπής. Στο πρώτο μέρος της διπλωματικής εργασίας διεξήχθησαν με το παραπάνω μοντέλο δύο προσομοιώσεις με δύο διαφορετικές τιμές πρόωσης. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων, καθώς επίσης και με τις τιμές των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων εργασιών άλλων ερευνητών.

Στη συνέχεια μελετήθηκε η μοντελοποίηση της τριβής. Στο μοντέλο που παρουσιάστηκε στο πρώτο μέρος εφαρμόστηκαν δύο μοντέλα τριβής. Το μοντέλο τριβής του Coulomb και το μοντέλο τριβής Stick Slip του Zorev. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών συγκρίθηκαν μεταξύ τους σχετικά με τα δύο μοντέλα τριβής.

Στο τελευταίο μέρος της παρούσας διπλωματικής μελετήθηκε η μοντελοποίηση του υλικού του τεμαχίου. Διεξήχθησαν δύο προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας το Μοντέλο υλικού των Johnson-Cook για δύο διαφορετικούς τύπους τριβής.

ABSTRACT

This thesis deals with a contemporary issue as is the area of Micromechanics. Nowadays, the demand for components in micro regime is increasing more and more. The interest of researchers has focused on the study and the influence of various parameters such as cutting forces, the stress distribution, etc. To carry out such a study requires the construction of models and carrying out simulations. The aim of this thesis is to create a microcutting model and examine the influence of various theories about modeling the friction and the constitutive equation of the material of the workpiece.

During this thesis a thermomechanical microcutting model was constructed via the Finite Element Method by using the software package MSC.Marc, that is offered by the laboratory of the Department of Manufacturing Technology. In the first part of this thesis two simulations with two different values of feed rates were carried out in the above model. The results were compared with the corresponding values of the experimental results, as well as with the results obtained from the simulations of other researchers.

Afterwards, the modeling of friction was studied. In the model presented in the first part two friction models were applied. The friction model of Coulomb and the friction model Stick Slip of Zorev. The results of these simulations were compared on the two friction models .

In the last part of this thesis the modeling of the material of the workpiece was studied. Two simulations were carried out using the material model of Johnson-Cook for two different types of friction .

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ.....	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΚΟΠΩΝ.....	8
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ.....	10
1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ.....	11
1.4 ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	12
1.5 ΟΦΕΛΗ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΑΠΟ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	13
1.6 ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	13
1.7 ΛΟΓΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΤΥΧΙΑ ΕΝΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	14
1.8 ΕΙΔΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ.....	16
ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	16
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	16
2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	16
2.3 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ (MESHING).....	17
2.4 ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (ADAPTIVE MESHING).....	17
2.4.1 Τεχνική Remeshing.....	17
2.4.2 Τεχνική Refinement.....	18
2.4.3 Τεχνική εξομάλυνσης (Smoothing).....	18
2.5 ΑΠΟ ΤΗΝ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟΥΣ ΤΕΛΙΚΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ.....	19
2.6 ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ EULER.....	20
2.7 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ LAGRANGE.....	20
2.8 ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ LAGRANGIAN-EULERIAN (ALE).....	21
2.9 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	22
2.10 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ MSC MARC.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο.....	28
ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΚΟΠΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ.....	28
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	28
3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΟΠΗΣ.....	28
3.3 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ.....	30
3.4 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ[9-14,21-24].....	30
3.5 ΖΩΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	32
3.6 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΚΟΠΩΝ.....	33
3.7 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΑΙ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΚΟΠΗ.....	33
3.8 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΜΙΚΡΟΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ.....	35
3.9 ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΠΑΧΟΣ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ(MINIMUM CHIP THICKNESS)[9-11,35].....	36
3.10 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΛΙΜΑΚΑΣ (SIZE EFFECT)[9-11,30].....	37
3.11 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΣΤΙΣ ΜΙΚΡΟΚΟΠΕΣ.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ.....	40
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ VALIDATION ΜΕ ΤΗ ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΗ ΠΡΟΤΥΠΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	40
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	40
4.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΑΡΟΜΟΙΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ.....	40
4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	42
4.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΤΟ MSC MARC.....	43
4.4.1 Σχεδίαση του τεμαχίου.....	43
4.4.2 Σχεδίαση του κοπτικού εργαλείου.....	45
4.5 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ ΤΟΥ ΤΕΜΑΧΙΟΥ.....	46
4.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΠΑΦΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΡΧΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ.....	50
4.7 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (MESH ADAPTIVITY).....	52
4.8 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	53
4.9 ΤΕΛΙΚΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΚΑΙ ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	54

4.10 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	55
ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	56
ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ.....	82
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ.....	82
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	82
5.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΡΙΒΗΣ	82
5.3 ΜΟΝΤΕΛΟ COULOMB (CONSTANT COULOMB).....	82
5.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΡΙΒΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (SHEAR).....	83
5.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΡΙΒΗΣ ΤΟΥ ZOREV, STICK-SLIP	83
ΤΡΙΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	86
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΡΙΒΗΣ STICK-SLIP.....	96
ΤΕΤΑΡΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	96
ΠΕΜΠΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	106
ΕΚΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	116
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ	129
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.....	129
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	129
6.2 Η ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ	129
6.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΛΙΚΟΥ ΤΟΥ OXLEY	131
6.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΛΙΚΟΥ ΤΩΝ JOHNSON-COOK (JC)	131
6.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΛΙΚΟΥ ZERILLI-ARMSTRONG.....	132
6.6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΥΛΙΚΟΥ	133
ΈΒΔΟΜΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	135
ΌΓΔΩΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	143
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΌΓΔΩΟ.....	156
ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ.....	156
8.1 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	156
8.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	157
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	158

Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνονται οι σπουδές μου ως προπτυχιακός φοιτητής της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή, κο Δημήτριο Ε. Μανωλάκο, Διευθυντή του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Υλικών για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το ενδιαφέρον αυτό θέμα, για την παροχή της δυνατότητας χρήσης του εξοπλισμού του Εργαστηρίου του Τομέα των Κατεργασιών, καθώς επίσης και για την υποστήριξη που μου προσέφερε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Θερμά θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης, τον Διδάκτορα κο Άγγελο Μαρκόπουλο για την ουσιαστική και πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε, καθώς επίσης και για τις χρήσιμες συμβουλές του. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον υποψήφιο Διδάκτορα κο Εμμανουήλ Γκιθώνα για την αμέριστη συνεχή βοήθεια του, τις χρήσιμες συμβουλές που μου παρείχε, όπως επίσης και για τη συμβολή του στην εκμάθηση του προγράμματος Πεπερασμένων Στοιχείων MSC.MARC. Επιπλέον, ευχαριστώ όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Υλικών για την προθυμία βοήθειας σε οποιαδήποτε απορία και οποιοδήποτε ζήτημα.

Τέλος, την παρούσα διπλωματική μου εργασία την αφιερώνω στους γονείς μου, Ρούσιο και Αργέττα, τα αδέρφια μου Ιωάννη, Βασιλεία και Ευαγγελία, στην Κωνσταντίνα μου, για την αγάπη και για τη στήριξη τους όλα τα χρόνια. Δίχως αυτούς δεν θα έφτανα εδώ. Επίσης, την αφιερώνω στους φίλους μου και σε όλους όσους χαίρονται για τη σημερινή αποφοίτηση μου.

Κωνσταντίνος Ρ. Μπουρμπάκης
Ιανουάριος, 2014

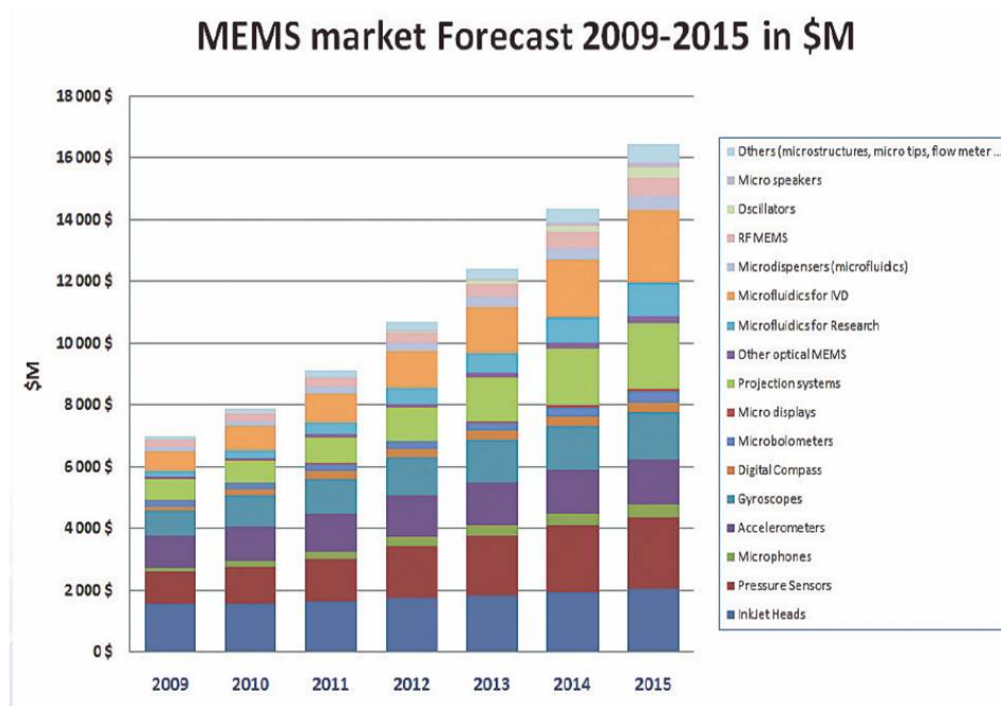
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΚΟΠΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Οι κατεργασίες αποβολής υλικού είναι από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές παραγωγής στη βιομηχανία, για μετατροπή και διαμόρφωση των μετάλλων στα επιθυμητά σχήματα με την κατάλληλη ποιότητα επιφάνειας και την επιθυμητή ακρίβεια διαστάσεων. Σε αυτές τις κατεργασίες αφαιρείται προοδευτικά προκαθορισμένος όγκος μετάλλου με τη βοήθεια εργαλείου, με πλαστική παραμόρφωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου υπό μορφή αποβλήτου, σε μέγεθος και σχήμα που ποικίλλει ανάλογα με τη κατεργασία.

Στην εποχή μας το ενδιαφέρον στον τομέα των κατεργασιών έχει επικεντρωθεί στην Μικρομηχανική. Η ζήτηση εξαρτημάτων με χαρακτηριστικά διαστάσεων της τάξης των μm ή και ακόμα των nm είναι ολοένα αυξανόμενη τα τελευταία χρόνια. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του γεγονότος ότι τέτοια εξαρτήματα βρίσκουν χρήση σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Ο τομέας της πληροφορικής και των πληροφοριακών συστημάτων αποτελούν τον κύριο τομέα που ενσωματώνονται τέτοια εξαρτήματα. Άλλοι σημαντικοί τομείς είναι ο κλάδος της υγείας και της βιοϊατρικής τεχνολογίας, η αυτοκινητοβιομηχανία και ο κλάδος των τηλεπικοινωνιών. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών αποτελούν οι μικρορευστομηχανικές αντλίες και βαλβίδες, τα μικροακροφύσια, μικροκαλούπια και μικροσπές καθώς και οπτικά εξαρτήματα. Την ίδια στιγμή, η ένταξη των μικροσυστημάτων στις περισσότερες εφαρμογές από τους προαναφερθέντες τομείς ενδιαφέροντος έχει δώσει μια ώθηση στη μικρό- και νανοπαραγωγή. Ως εκ τούτου έχει στραφεί το ενδιαφέρον των ερευνητών προς τα Μικροηλεκτρομηχανικά Συστήματα (Microelectromechanical systems-MEMS) και τα Νανοηλεκτρομηχανικά Συστήματα (Nanoelectromechanical systems-NEMS) προηγμένης τεχνολογίας τα οποία αυξάνουν την απόδοση και περιορίζουν το κόστος. Στην εικόνα που ακολουθεί γίνεται φανερό η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση της αγοράς για προϊόντα και εξαρτήματα με τα χαρακτηριστικά των MEMS.[1-3]



Εικόνα 1.1: Η χρονική εξέλιξη και η προβλέψεις για το τζίρο προϊόντων και εξαρτημάτων MEMS [4]

Για την παραγωγή τέτοιων μικροεξαρτημάτων απαιτείται η χρήση προηγμένων τεχνολογικά εφαρμογών. Στον τομέα των ηλεκτρονικών ειδών, για την παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και τσιπ υπολογιστών, χρησιμοποιούνται διάφοροι μέθοδοι παραγωγής για τη τελική διαμόρφωση των πλακιδίων. Αυτοί μπορεί να είναι είτε προσθετικοί είτε αφαιρετικοί. Προϊόντα βασισμένα και κατασκευασμένα από πυρίτιο, παράγονται κυρίως με λιθογραφικές μεθόδους. Η κυριότερη λιθογραφική μέθοδος είναι η φωτολιθογραφία. Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν νέες μέθοδοι ευρέως γνωστές ως Next Generation Lithographies (NGL) που αποτελούν τη νέα γενιά στις μεθόδους των λιθογραφιών, ώστε να εκπληρωθούν οι απαιτήσεις και η ζήτηση της αγοράς για ηλεκτρονικά εξαρτήματα με ακόμα μικρότερο μέγεθος και ακόμα μεγαλύτερη χωρητικότητα. Άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σε υλικά από πυρίτιο είναι:

- η λιθογραφία με χρήση ακτινών X
- η Extreme UV λιθογραφία
- η μέθοδος LIGA
- η μέθοδος SCAPEL
- η λιθογραφία με τη χρήση δέσμης ακτινών Ιόντων

Οι περισσότερες από τις παραπάνω μεθόδους των μικροκατεργασιών, είναι επίπεδες και έχουν περιορισμένη εφαρμογή σε υλικά πέρα του πυριτίου. Η τεχνολογική ανάπτυξη που παρατηρείται στον τομέα των μικροκατεργασιών οδηγείται και οφείλεται στην ολοένα αυξανόμενη ζήτηση της αγοράς και της ανάγκης της για προϊόντα που θα εκπληρώνουν τις απαιτήσεις της ταχεία αναπτυσσόμενης αγοράς ηλεκτρονικών ειδών.

1.2 Τεχνολογία των κατεργασιών και των μικροκατεργασιών.

Τεχνολογίες αναπτύσσονται για την διαμόρφωση και άλλων υλικών όπως μετάλλων, κεραμικών και πολυμερών υλικών. Οι κατεργασίες αυτές είναι της τάξης των μερικών μη μέχρι και αρκετά εκατοντάδων μm. Οι μικροκατεργασίες αυτές είναι, συμβατικές ή μη συμβατικές κατεργασίες κοπής. Με τον όρο κατεργασίες κοπής, ονομάζουμε τις μεθόδους διαμόρφωσης τεμαχίων μέσω της αποβολής του ανεπιθύμητου υλικού. Το τμήμα που κατεργαζόμαστε ονομάζεται συνήθως δοκίμιο και μπορεί να είναι είτε μεταλλικό είτε όχι, όπως για παράδειγμα πολυμερές, ξύλο, κεραμικό η ακόμα και σύνθετο. Παρακάτω θα αναφερθούμε μόνο στην κοπή μετάλλων. Το ανεπιθύμητο τμήμα υλικού συνήθως αποβάλλεται με τη μορφή αποβλήτου. Φαινόμενα εξάτμισης ή αποκόλλησης υλικού μπορεί να λάβουν χώρα κατά τη διαδικασία.

Τον όρο κοπή, συνήθως τον χρησιμοποιούμε για την περιγραφή διαμόρφωσης αποβλήτου το οποίο προκύπτει από την εισχώρηση κοπτικού υπό τη μορφή σφήνας, όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του δοκιμίου και του εργαλείου. Οι κατεργασίες αυτές στις οποίες συμπεριλαμβάνονται η τόννευση, το φρεζάρισμα, η διάτρηση και η εσωτερική τόννευση, συνήθως αναφέρονται στην βιβλιογραφία ως παραδοσιακές κατεργασίες και στο μικροσκοπικό επίπεδο ως μικροκατεργασίες ή μηχανικές μικροκατεργασίες. Κατεργασίες όπως η λείανση, είναι κατεργασίες κοπής και μάλιστα αρκετά σημαντικές για την σύγχρονη βιομηχανία. Άλλες μη συμβατικές κατεργασίες οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν ή όχι φυσική επαφή μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του δοκιμίου ή μπορεί να μη χρησιμοποιούν κοπτικό εργαλείο με τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιείται στις συμβατικές μεθόδους κατεργασιών, είτε χρησιμοποιούν θερμική ή χημική ενέργεια για την αποβολή υλικού από το δοκίμιο είναι :

- οι κατεργασίες με την χρήση υπερήχων (USM)
- οι κατεργασίες πίδακα νερού
- οι κατεργασίες ηλεκτροδιάβρωσης (EDM)
- οι κοπές με την χρήση laser
- και οι ηλεκτροχημικές κατεργασίες πχ ηλεκτροχημική λείανση (ECG)

Στις μέρες μας, οι παραπάνω κατεργασίες βρίσκονται στην πρώτη γραμμή της βιομηχανικής πρακτικής και οι εφαρμογές τους έχουν φτάσει σε υψηλό επίπεδο παραγωγικής ωριμότητας. Μερικές από αυτές έχουν το πρόθεμα "μικρο" στην ονομασία τους για να δηλώσουν ότι είναι κατεργασίες που ακολουθούν και βασίζονται στις ίδιες αρχές όπως οι πρωτότυπες στο μακρόκοσμο. Χαρακτηριστικά τέτοια παραδείγματα μικροκατεργασιών αποτελούν το μικροφρεζάρισμα, η μικροδιάτρηση κτλ. Χάρis τις μικροκατεργασίες έχουμε την δυνατότητα να κατεργαστούμε πληθώρα μετάλλων, με πολύπλοκα σχήματα επιτυγχάνοντας τέλειο φινίρισμα και σφικτές ανοχές. Τα παραπάνω σαφέστατα πλεονεκτήματα των μηχανικών μικροκατεργασιών, τις καθιστούν σε κυρίαρχη θέση όσον αφορά τη κατασκευή εξαρτημάτων διαφόρων τεχνολογικών τομέων.[5]

Οι μικροκατεργασίες (micromachining) στη μηχανολογία αφορούν την κατασκευή αντικειμένων με διαστάσεις 1 έως 999 μm . Στη διεθνή βιβλιογραφία, ο όρος micromachining αναφέρεται στην κατασκευή μινιατούρων και προϊόντων με διαστάσεις από 1 έως 500 μm [5]. Συνήθως όμως, αυτό το πεδίο αναφέρεται σε διαστάσεις από 0.1 έως 100 μm . Βέβαια, ο όρος «μικρό», δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται για να περιγράψει μόνο το μέγεθος στο οποίο αναφερόμαστε, αλλά και για να υποδείξει τη δυσκολία κατασκευής. Γενικά, δηλαδή, ο παραπάνω όρος αναφέρεται στην όλη φιλοσοφία και τα χαρακτηριστικά των μικροπροϊόντων. Η μετάβαση σε όλο και μικρότερες κλίμακες στις κατεργασίες προϋποθέτει δύο ενέργειες. Η πρώτη αφορά στην ελάττωση της μοναδιαίας αφαίρεσης υλικού UR και η δεύτερη στη βελτίωση της ακρίβειας του εξοπλισμού. Ο αντικειμενικός στόχος για την ομαλή μετάβαση στην κλίμακα των μικροκατεργασιών είναι η UR να παραμένει μικρότερη του τεμαχίου σε έναν ικανοποιητικό βαθμό και η ακρίβεια να μεγαλώνει με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε ο λόγος των ανοχών προς τις διαστάσεις του τεμαχίου να παραμένει ο ίδιος

Παρότι οι περισσότερες μη συμβατικές μέθοδοι των μικροκατεργασιών χρησιμοποιούν τις ίδιες αρχές που εφαρμόζονται στον μακρόκοσμο και στον μικρόκοσμο, το ίδιο δεν ισχύει και για τις μηχανικές μικροκατεργασίες. Σε αυτή την περίπτωση το πρόθεμα "μικρο" είναι πολύ σημαντικό δεδομένου ότι μια "υποβάθμιση" της κοπής σε κλίμακα μικροκοπής για παράδειγμα την καθιστά ιδιαίτερα πιο πολύπλοκη. Οι μικρές διαστάσεις του δοκιμίου, του κοπτικού εργαλείου, του βάθους κοπής κτλ εγείρουν ένα μεγάλο αριθμό ζητημάτων, τα οποία μπορεί να μη διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις παραδοσιακές κατεργασίες, αλλά αποτελούν μείζον θέμα για τις μικροκατεργασίες. Οι μηχανισμοί διαμόρφωσης του αποβλήτου επηρεάζονται από δύο σημαντικά φαινόμενα που εμφανίζονται. Το **ελάχιστο πάχος αποβλήτου (minimum chip thickness)** και το **φαινόμενο κλίμακας (size effect)**. Και τα δύο φαινόμενα θα αναλυθούν στην συνέχεια. Έτσι προκύπτουν περιορισμοί λόγω μεγέθους. Η διεξαγωγή πειραμάτων δεν είναι πάντα εφικτή να πραγματοποιηθεί για να ξεπεραστούν τα προβλήματα κατασκευής εξαρτημάτων σε μικρο και νανοκλίμακα. Επιπλέον, πρέπει να ικανοποιούνται παράμετροι όπως η αυξημένη ζήτηση, η καινοτομία, η αξιοπιστία και η μείωση του κόστους παραγωγής. Έτσι έχουν αναπτυχθεί οι τεχνικές της μοντελοποίησης και της προσομοίωσης και συνεισφέρουν στην προσπάθεια ερευνητών και μηχανικών για τον περιορισμό του πειραματικού χρόνου και του χρόνου των δοκιμών. Ακόμα μας δίνουν τη δυνατότητα να δούμε πολύπλοκα φαινόμενα, να διευρύνουμε τις δυνατότητές μας, να περιορίσουμε τη πολυπλοκότητα και να αυξήσουμε την ακρίβεια βελτιστοποιώντας τις κατεργασίες, άρα και τα τελικά προϊόντα.

1.3 Εφαρμογές των Μικροκατεργασιών

Οι μικροκατεργασίες είναι απαραίτητες σε διάφορους κλάδους της βιομηχανίας και της καθημερινότητας, και για το λόγο αυτό, συνεχώς βελτιώνονται και νέες τεχνικές ανακαλύπτονται. Οι κύριες εφαρμογές αφορούν την ιατρική (αισθητήρες, φακοί, αναίμακτη χειρουργική, βηματοδότες), την πληροφορική (κεφαλές ανάγνωσης σκληρών δίσκων, κεφαλές εκτυπωτών ink-jet) και την αυτοκινητοβιομηχανία (αισθητήρες όπως επιταχυνσιόμετρα κλπ). Άλλες εφαρμογές αφορούν αισθητήρες, επενεργητές, μικροοπτικά συστήματα και καλούπια έγχυσης πλαστικών ή μεταλλικών μικροπροϊόντων.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται αντικείμενα που κατασκευάζονται με μικροκατεργασίες:



Εικόνα 1.2: Εφαρμογές μικροκατεργασιών [5]

1.4 Διαφορά Μοντελοποίησης και Προσομοίωσης

Για τους μηχανικούς, η χρήση μεθόδων μοντελοποίησης για την ανάπτυξη ενός προϊόντος αποτελεί κοινή πρακτική. Ως μοντέλο μπορούμε να ορίσουμε ένα θεωρητικό σύστημα το οποίο είναι ισοδύναμο με το πραγματικό και έχει τις ίδιες ιδιότητες και χαρακτηριστικά με το πρωτότυπο. Χρησιμοποιείται για διερεύνηση, υπολογισμούς και επεξήγηση πειραμάτων τα οποία θα ήταν πολύ ακριβό ή ακόμα και αδύνατο να πραγματοποιηθούν. Τα μοντέλα επιτρέπουν γενικές παραδοχές για στοιχεία, τη δομή και τη συμπεριφορά ως τμήμα της πραγματικότητας. Από την άλλη η προσομοίωση είναι η μίμηση μιας δυναμικής διαδικασίας με ένα μοντέλο, με σκοπό να αποκομίσουμε γνώση η οποία θα μπορούσαμε να την μεταφέρουμε και να την αξιοποιήσουμε στην πραγματικότητα.[6]

1.5 Οφέλη που προκύπτουν από τη μοντελοποίηση

Στις μέρες μας η πλειονότητα των ερευνητών εφαρμόζει και αξιοποιεί την μοντελοποίηση των κατεργασιών για τη προβλεψιμότητα που παρέχουν στην απόδοση μιας κοπής και για την βοήθεια που παρέχουν στην επίλυση πρακτικών προβλημάτων που εμφανίζονται στη βιομηχανία. Σημαντικοί παράμετροι των κατεργασιών αποτελούν, οι δυνάμεις κοπής, οι θερμοκρασίες, η μορφολογία του αποβλήτου, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις. Τα παραπάνω μπορούν πλέον να υπολογιστούν προτού πραγματοποιηθεί η οποιαδήποτε κοπή. Η προσέγγιση που υπήρχε για πολλαπλές δοκιμές, έτσι ώστε να βελτιώσουμε το τελικό προϊόν, είναι πολύ πιο επίπονη, πιο δαπανηρή και χρονοβόρα. Έτσι χάρις τη μοντελοποίηση εξοικονομούνται πόροι, επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση στο αποτέλεσμα και μειώνεται το συνολικό κόστος. Από τα παραπάνω δεν προκύπτει ότι παραγκωνίζεται ο ρόλος της πειραματικής διερεύνησης, καθώς στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι απαραίτητη η τελική επικύρωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι να δοκιμαστεί το τελικό μας μοντέλο στις πραγματικές συνθήκες και να γίνει η τελική σύγκριση των αποτελεσμάτων. Ωστόσο η μοντελοποίηση μειώνει σημαντικά την πειραματική εργασία. Επιπλέον η μοντελοποίηση και τα πειράματα συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση θεμελιωδών ζητημάτων της θεωρίας των κατεργασιών. Αυτό σχηματίζει ένα βρόχο ανάδρασης ζωτικής σημασίας για την έρευνα της κατεργασίας, καθώς όσο καλύτερα κατανοούμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την κατεργασία, τόσο και αυτά με την σειρά τους θα οδηγούν σε ολοένα και καλύτερα μοντέλα των κατεργασιών και ούτω καθεξής. Όπως προκύπτει και από την δημοσίευση του CIRP [7], υπάρχουν δύο διαφορετικά "παραδοσιακά σχολεία" στα οποία μπορεί να καταταχθεί η μοντελοποίηση των κατεργασιών. Στην πρώτη η μοντελοποίηση μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μηχανική αναγκαιότητα, ενώ στη δεύτερη ως μια επιστημονική πρόκληση. Μακροπρόθεσμα και οι δύο "σχολές" οδηγούν και παράγουν ακριβή και αξιόπιστα μοντέλα προς όφελος της βιομηχανίας και κατ' επέκταση και της κοινωνίας μας.

1.6 Δυσκολίες κατά τη μοντελοποίηση

Η βασική δυσκολία που παρατηρείται κατά τη μοντελοποίηση είναι ο μεγάλος αριθμός μεταβλητών και παραμέτρων οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την κατασκευή του εκάστοτε μοντέλου. Το παραπάνω σε συνάρτηση με το γεγονός ότι κάθε μοντέλο έχει τις δικές του ιδιαιτερότητες και συντελεστές, καθιστούν αδύνατη την ύπαρξη ενός και μόνο μοντέλου το οποίο θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε περίπτωση.

Άλλη μια σημαντική δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι στο συγκεκριμένο είδος κατεργασιών ασκούνται υψηλές τάσεις και καταπονήσεις σε ελάχιστο όγκο και με μεγάλη ταχύτητα. Οι μηχανισμοί σχηματισμού του αποβλήτου είναι αρκετά πολύπλοκοι και αυτοί με τη σειρά τους οδηγούν σε αντίστοιχα πολύπλοκες θεωρίες και σύνθετα μοντέλα τα οποία αντιπροσωπεύουν αυτές τις θεωρίες. Συνεπώς, ως επακόλουθο τα μοντέλα μικροκοπών πρέπει πάντα να εμπεριέχουν απλουστεύσεις, έτσι ώστε να μπορούν να ενσωματώνουν την εκάστοτε θεωρία. Όμως σε αυτή την

περίπτωση, ελλοχεύει πάντα ο κίνδυνος της υπεραπλούστευσης. Τα αποτελέσματα θα είναι είτε ανακριβή και ως εκ τούτου λανθασμένα, είτε τα αποτελέσματα ή τα μοντέλα θα ισχύουν μόνο για πολύ συγκεκριμένες και περιορισμένες περιπτώσεις. Θα πρέπει εδώ να επισημανθεί ότι οποιαδήποτε είδος μοντέλου είναι πάντα εφαρμόσιμο εντός των ορίων των τιμών εισόδου των εκάστοτε δεδομένων. Ωστόσο, το πεδίο εφαρμογής πρέπει να είναι όσο το δυνατόν διευρυμένο, προκειμένου τα μοντέλα να έχουν πρακτική χρήση.

Επίσης άλλη μία δυσκολία προκύπτει από την πληθώρα που παρατηρείται στο συνδυασμό δοκιμών, κοπτικών εργαλείων με τις εκάστοτε ιδιότητες τους και γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Ακόμα σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν η ταχύτητα κοπής, η πρόωση, το βάθος κοπής, η χρήση η όχι υγρών κοπής καθώς επίσης και ο συνδυασμός όλων των παραπάνω στο ίδιο σύστημα, αυξάνει την πολυπλοκότητα του μοντέλου. Όλες οι παραπάνω μεταβλητές αποτελούν τα δεδομένα που πρέπει να εισαχθούν προκειμένου να δημιουργηθεί το μοντέλο μας. Είναι προφανές ότι η εισαγωγή διαφορετικών παραμέτρων ως δεδομένα, θα επιφέρουν σημαντική μεταβολή στις δυνάμεις κοπής ,στις θερμοκρασίες καθώς επίσης και στη μορφολογία του αποβλήτου.[8]

1.7 Λόγοι για την αποτυχία ενός μοντέλου

Ένα μοντέλο αποτυγχάνει όταν δεν μπορεί να παρέχει ακριβή αποτελέσματα. Επίσης, λόγοι αποτυχίας αποτελούν η πολυπλοκότητα του μοντέλου, που να το καθιστά δύσχρηστο και αργό για χρήση στην πράξη. Πολλοί λόγοι μπορεί να συντελέσουν στην αποτυχία ενός μοντέλου. Τους πιο συνήθεις αποτελούν η έλλειψη εισαγωγής ακριβών δεδομένων, η ανεπαρκής ενσωμάτωση σημαντικών παραμέτρων, καθώς επίσης και η κατάχρησης μιας τεχνικής μοντελοποίησης

1.8 Είδη μοντελοποίησης

Το μοντέλο μας θα πρέπει να μας παρέχει αξιόπιστες απαντήσεις και αποτελέσματα σύμφωνα πάντα με τα εκάστοτε δεδομένα εισαγωγής. Έτσι υπάρχουν πέντε γενικές κατηγορίες μοντελοποίησης:[9]

- η εμπειρική
- η αναλυτική
- η μηχανιστική
- η αριθμητική
- η τεχνητή νοημοσύνη

Συνήθως πιο πολύπλοκα μοντέλα απαιτούν περισσότερες παραμέτρους ως δεδομένα εισαγωγής και άλλα μοντέλα παρουσιάζουν δυσκολία και δεν είναι σε θέση να προβλέψουν μερικές παραμέτρους από τα αποτελέσματά τους.

Στις αρχές της μοντελοποίησης της κοπής μετάλλων η φθορά του κοπτικού εργαλείου ήταν ύψιστης σημασίας για τους ερευνητές. Στην εποχή μας όμως το ενδιαφέρον τους έχει επικεντρωθεί σε άλλους τομείς όπως η ακρίβεια και ο προσδιορισμός των κοπτικών δυνάμεων, ο υπολογισμός των θερμοκρασιών και το είδος του παραγόμενου αποβλήτου. Επιπλέον, η βιομηχανία ενδιαφέρεται για

κατεργασίες υψηλής ταχύτητας οι οποίες θα είναι φιλικές στο περιβάλλον και θα περιορίζουν ή ακόμα και θα εξαλείφουν την χρήση κοπτικών υγρών.

Το αναλυτικό μοντέλο προβλέπει και εξάγει τα απαιτούμενα αποτελέσματα όπως παραδείγματος χάρη τις δυνάμεις κοπής, μέσω των απαιτούμενων εξισώσεων και των σταθερών που προκύπτουν από τις βάσεις δεδομένων για το εκάστοτε υλικό του δοκιμίου. Οι σταθερές αυτές έχουν προκύψει από σειρές πειραμάτων. Σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί ότι για σπάνιες περιπτώσεις υλικών και άλλων παραμέτρων δεν υπάρχουν απαραίτητα και αξιόπιστα ακριβή αποτελέσματα.

Από την άλλη, με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων μπορούμε να διεξάγουμε σε συνδυασμό θερμο-μηχανικές αναλύσεις, οι οποίες όμως απαιτούν αυξημένη υπολογιστική ισχύ για να εξάγουν ακριβή αποτελέσματα.

Ακόμα μια τεχνική μοντελοποίησης είναι μέσω της χρήσης τεχνητής νοημοσύνης. Η συγκεκριμένη τεχνική συνήθως μας παρέχει απλούστερα και γρήγορα αποτελέσματα τα οποία όμως έχουν τη δυνατότητα να επικεντρωθούν σε μία παράμετρο ή ακόμα και σε μια συγκεκριμένη περιοχή του δοκιμίου. Είναι αλήθεια ότι η επιλογή της τεχνικής της μοντελοποίησης κυρίως εξαρτάται από τις γνωστές παραμέτρους και τα δεδομένα της κατεργασίας μας.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω και αφού αναφερθήκαμε σε όλα τα είδη και τις τεχνικές μοντελοποίησης, καταλήγουμε ότι η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων προσφέρει τη δυνατότητα για πιο ακριβείς αναπαραστάσεις μοντέλων διαφόρων κατεργασιών. Έτσι, παραδείγματος χάρη, μπορούμε να αναπαραστήσουμε τρισδιάστατα μοντέλα, τα οποία αξιοποιώντας τις ισχυρές υπολογιστικές τους δυνατότητες μπορούν σε εύλογο χρονικό διάστημα να διεξάγουν τους απαραίτητους και πολύπλοκους υπολογισμούς που απαιτούνται. Συνεπώς η χρήση λογισμικών Πεπερασμένων Στοιχείων αποτελεί πλέον την πρώτη επιλογή των ερευνητών για τη μοντελοποίηση μηχανικών κατεργασιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή ενός μοντέλου μικροκοπής και η εξέταση της επίδρασης διαφόρων θεωριών για την μοντελοποίηση της τριβής και της καταστατικής εξίσωσης του τεμαχίου. Για να γίνει αυτή η διερεύνηση θα βασιστούμε σε αντίστοιχες εργασίες που έχουν γίνει στο μακρόκοσμο.

2.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Στις αρχές της δεκαετίας του 1970 άρχισαν να δημοσιεύονται, τα πρώτα άρθρα και οι πρώτες πρωτοποριακές εργασίες που αφορούσαν την μοντελοποίηση διαφόρων κατεργασιών με την Μέθοδο των Πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Με τα χρόνια και την αλματώδη πρόοδο που συντελούνταν στον τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών, με την ραγδαία ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος τους, καθώς επίσης και με την ανάπτυξη των πρώτων εμπορικά διαθέσιμων λογισμικών Πεπερασμένων Στοιχείων, οι τεχνικές με πεπερασμένα στοιχεία άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως από τους ερευνητές για τη μοντελοποίηση των κατεργασιών.

Στις μέρες μας τα μοντέλα Πεπερασμένων Στοιχείων χρησιμοποιούνται για να διευρύνουμε τις γνώσεις μας σε βασικά ζητήματα των μηχανισμών αποβολής υλικού, αλλά κυρίως για την δυνατότητα που μας παρέχουν να προβλέψουμε σημαντικές παραμέτρους όπως : δυνάμεις κοπής, οι θερμοκρασίες, οι τάσεις κ.α. που αποτελούν απαραίτητοι παράμετροι για την πρόβλεψη του τελικού αποτελέσματος, όπως επίσης και της ποιότητας του τελικού προϊόντος με ένα έγκαιρο και ανέξοδο τρόπο.

Απαραίτητες προϋποθέσεις που πρέπει να τηρούνται για την καλύτερη απόδοση και το βέλτιστο αποτέλεσμα είναι:

- a) το θεωρητικό επιστημονικό υπόβαθρο
- b) η εμπειρία από την παραγωγική διαδικασία
- c) η ακρίβεια δεδομένων
- d) οι σχεδιαστικές δεξιότητες και οι γνώσεις μοντελοποίησης

Από τον συνδυασμό όλων των παραπάνω προκύπτει το μοντέλο από το οποίο εξάγονται όλα τα απαραίτητα αποτελέσματα.

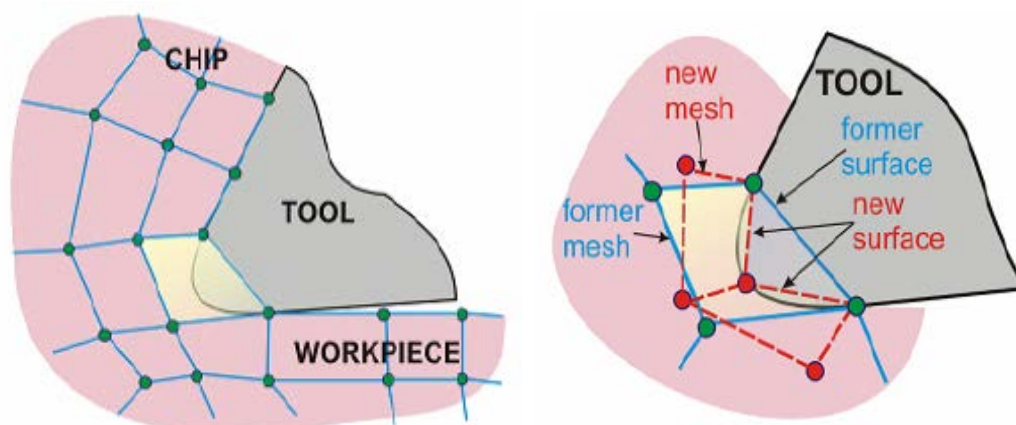
2.3 Διακριτοποίηση (Meshing)

Η μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ξεκινά με τη διακριτοποίηση των συνεχών μέσων της κατεργασίας. Ο χώρος που αυτά καταλαμβάνουν χωρίζεται συνήθως σε τετράγωνα ή σε τρίγωνα (σε δισδιάστατο πρόβλημα, στο τρισδιάστατο έχουμε ανάλογο πλέγμα) και ενώνονται αυτά τα πεπερασμένα στοιχεία με κόμβους. Οι κόμβοι μας δίνουν πληροφορίες για το μέγεθος ή τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν και ο βαθμός ελευθερίας τους προσδιορίζεται από τον αριθμό των μεγεθών που αναφέρονται σε αυτούς, δηλαδή των αγνώστων. Το πλέγμα που δημιουργείται δεν είναι πάντα ομοιόμορφο. Ειδικά σήμερα μπορούν να κατασκευαστούν πλέγματα πυκνότερα σε περιοχές του χώρου μοντελοποίησης που μας ενδιαφέρουν περισσότερο και αραιότερα σε περιοχές μικρού ενδιαφέροντος, με χρήση ειδικών αλγορίθμων. Αναλυτικότερα, οι προσαρμοστικές τεχνικές πλέγματος θα παρουσιαστούν στις παραγράφους που ακολουθούν.

2.4 Προσαρμοστικές τεχνικές πλέγματος (Adaptive Meshing)

2.4.1 Τεχνική Remeshing

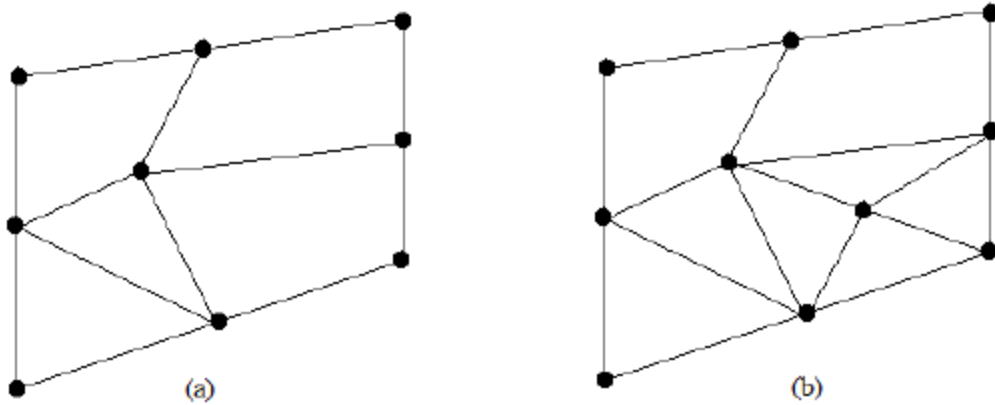
Μια προσαρμοστική διαδικασία κατασκευής πλέγματος είναι η τεχνική remeshing, η οποία περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός νέου πλέγματος πέραν του ήδη διαθέσιμου παραμορφωμένου. Έτσι το ήδη υπάρχον παραμορφωμένο πλέγμα αντικαθίσταται από ένα νέο. Ειδικότερα στις κοπές μετάλλων που μας αφορούν, η δημιουργία του νέου πλέγματος και η διαδικασία του Remeshing, πραγματοποιείται όταν το κοπτικό εργαλείο που εισχωρεί στο δοκίμιο ξεπεράσει μια προκαθορισμένη από τον χρήστη τιμή. Στις εικόνες που ακολουθούν, γίνεται φανερό ο τρόπος δημιουργίας της νέας επιφάνειας και του νέου στοιχείου στο δοκίμιο, ενώ το κοπτικό εισχωρεί στο ήδη διαμορφωμένο πλέγμα.



Εικόνα 2.1 : Διαχωρισμός αποβλήτου από το δοκίμιο με τη τεχνική του Remeshing.[10]

2.4.2 Τεχνική Refinement

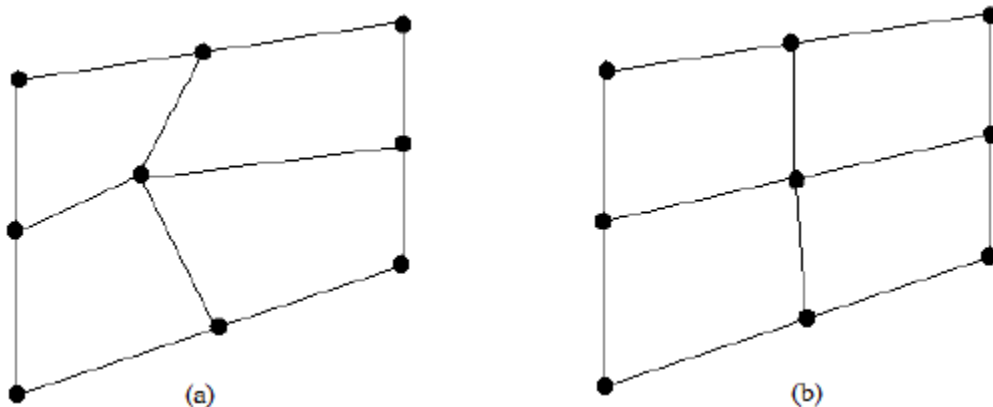
Η δεύτερη τεχνική είναι η τεχνική Refinement. Όπως προαναφέρθηκε η τεχνική αυτή βασίζεται στην αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος τοπικά, μέσω του αντίστοιχου περιορισμού του μεγέθους των τοπικών στοιχείων. Η εικόνα που ακολουθεί εξηγεί καλύτερα την τεχνική.



Εικόνα 2.2: a) Αρχικό τοπικό πλέγμα b) Νέο πλέγμα μειωμένου μεγέθους.

2.4.3 Τεχνική εξομάλυνσης (Smoothing)

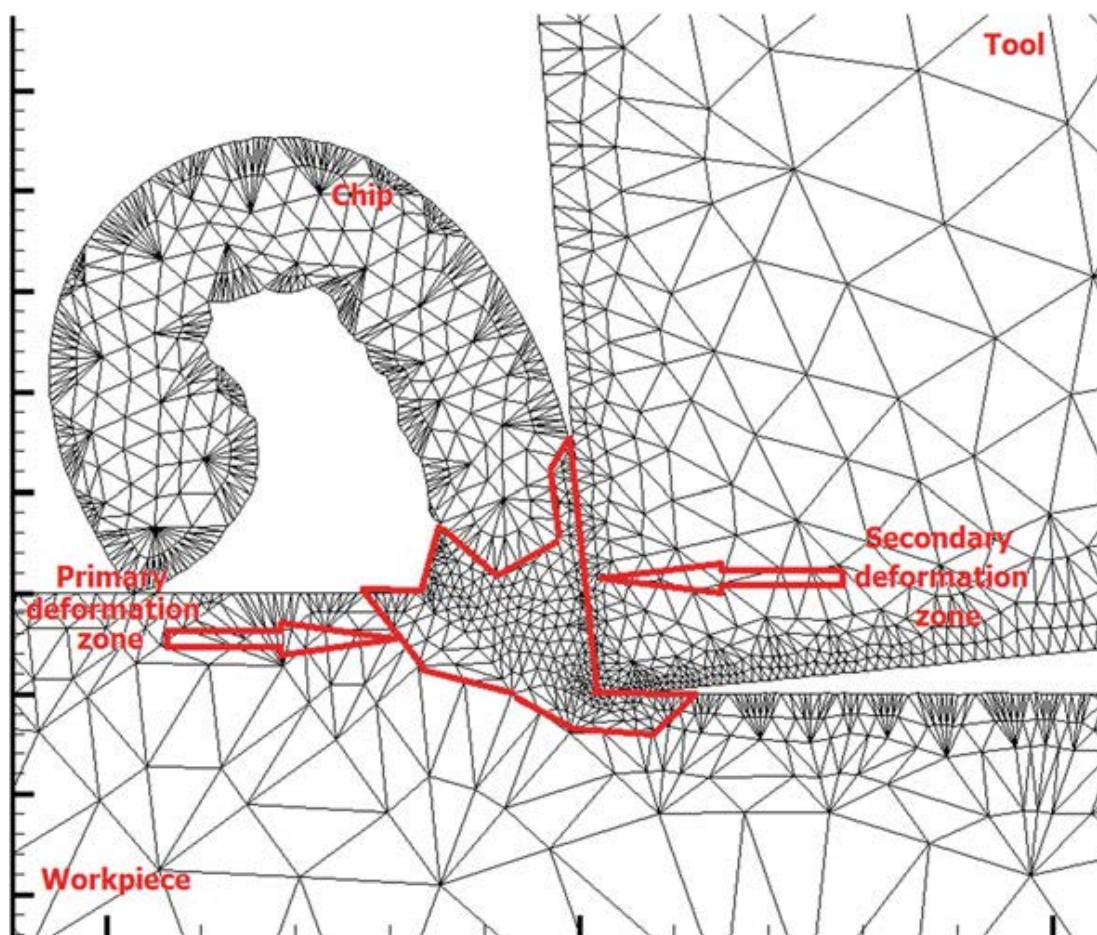
Η τελευταία μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η τεχνική της εξομάλυνσης (Smoothing adaptive technique). Με τη τεχνική αυτή επιτυγχάνουμε αναδιάρθρωση της διάταξης των κόμβων, έτσι ώστε να επιτευχθεί και να μας παρέχει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα για το σχηματισμό του στοιχείου του πλέγματος μας, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 2.3: Smoothing a) Αρχικό τοπικό πλέγμα b) Νέα αναδιορθωμένη διάταξη πλέγματος.[11]

Από την εφαρμογή των τριών παραπάνω τεχνικών καταλήγουμε ότι οποιαδήποτε προσαρμοστική μέθοδος και αν εφαρμοστεί, συμβάλει στον περιορισμό των λαθών που συντελούνται κατά τη διαδικασία των υπολογισμών. Συνεπώς, αυξάνουν την

ακρίβεια της προσομοίωσης. Από όλα τα παραπάνω προκύπτει η αναγκαιότητα χρήσης των προσαρμοστικών τεχνικών δημιουργίας πλέγματος στις προσομοιώσεις Πεπερασμένων Στοιχείων. Ειδικότερα δε σε προσομοιώσεις που λαμβάνουν χώρα σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις, όπως οι κοπές μετάλλων και οι διαμορφώσεις υλικού, η χρησιμοποίησή τους κρίνεται απαραίτητη για την έκβαση του τελικού αποτελέσματος.



Εικόνα 2.4: Παράδειγμα διακριτοποίησης[9]

2.5 Από την διακριτοποίηση στους τελικούς υπολογισμούς

Έπειτα από την εφαρμογή της διακριτοποίησης και τη δημιουργία του πλέγματος και των στοιχείων μας, στη συνέχεια δίνονται ιδιότητες στα στοιχεία ανάλογα με τις ιδιότητες του μέσου που μοντελοποιούν και δίνονται οριακές συνθήκες στους κόμβους. Τέλος λύνονται οι αλγεβρικές εξισώσεις που είναι σε μητρωϊκή μορφή, και υπολογίζονται οι τιμές κάθε βαθμού ελευθερίας. Προφανώς, όσο περισσότερους κόμβους έχουμε, τόσο πιο καλά προσεγγίζεται το πραγματικό πρόβλημα που έχει άπειρους (θεωρητικά). Βέβαια ο υπολογισμός κάθε πεπερασμένου στοιχείου απαιτεί υπολογιστικό χρόνο και έτσι δεν είναι δυνατό να αυξήσουμε υπερβολικά τον αριθμό των κόμβων αν θέλουμε να έχουμε αποτέλεσμα σε λογικό χρόνο. Η χρήση του υπολογιστή επιβάλλεται για τη μοντελοποίηση ενός προβλήματος με FEM και εκτός

των γρήγορων υπολογισμών, μπορεί να δώσει τα αποτελέσματα σε πιο παραστατική μορφή.

Πιο συγκεκριμένα για τις κατεργασίες, δεν είναι πλέον απαραίτητος ο προγραμματισμός όλης της παραπάνω διαδικασίας, καθώς κυκλοφορούν αξιόπιστοι εμπορικοί κώδικες που είναι συμβατοί με προσωπικούς υπολογιστές. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο μιας ορθογωνικής κοπής θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για την ταχύτητα κοπής, το βάθος κοπής και την πρόωση. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται *pre processor*. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται *solver* και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους. Όταν τελειώσει η επίλυση πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται *post processor*, για να μπορέσει ο μελετητής να δει και να επεξεργαστεί τα αποτελέσματα. Τα παραπάνω προγράμματα μπορεί να αποτελούν και επιμέρους τμήματα του ίδιου προγράμματος.

Δύο είναι οι βασικότεροι τύποι μοντέλων Πεπερασμένων Στοιχείων για την προσομοίωση διεργασιών κατεργασίας, του Euler και του Lagrange.

2.6 Μοντέλο του Euler

Κατά τη διατύπωση του Euler, η οποία εμφανίστηκε πρώτη, το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων είναι χωρικά σταθερό και το υλικό ρέει μέσα από αυτό, προκειμένου να προσομοιώσει το σχηματισμό του αποβλήτου. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι η ποσότητα των στοιχείων για τη μοντελοποίηση του τεμαχίου και του αποβλήτου που χρειάζονται για την ανάλυση είναι μικρή, επιτρέποντας τη μείωση του χρόνου ανάλυσης και το γεγονός ότι δεν υφίστανται σοβαρή στρέβλωση, δεδομένου ότι το πλέγμα και επομένως η μορφή του παραγόμενου αποβλήτου είναι εκ των προτέρων γνωστή. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί περίπλοκο προγραμματισμό και ότι τα πειραματικά δεδομένα πρέπει να είναι γνωστά πριν από την κατασκευή του μοντέλου, προκειμένου να καθοριστεί η γεωμετρία του αποβλήτου. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται ακόμα από μερικούς ερευνητές για την προσομοίωση της σταθερής κατάστασης της διαδικασίας κοπής.[9-11]

2.7 Μέθοδος του Lagrange

Από την άλλη, στη μεταγενέστερη μέθοδο Lagrange, τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα με το υλικό και το εργαλείο έχει προχωρήσει προς το τεμάχιο. Το απόβλητο σχηματίζεται με τη χρήση ενός κριτηρίου διαχωρισμού μπροστά από την ακμή του εργαλείου. Μέχρι στιγμής γεωμετρικά ή φυσικά κριτήρια έχουν προταθεί, με την συμμετοχή της κρίσιμης απόστασης μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου, των κρίσιμων τιμών για παράδειγμα πίεσης ή παραμόρφωσης, ή ακόμα και κριτήρια διάδοσης της ρωγμής. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου έχει να κάνει με τη μεγάλη παραμόρφωση του πλέγματος που παρατηρείται κατά την προσομοίωση. Λόγω της

σύνδεσης του πλέγματος στο υλικό του τεμαχίου, το πλέγμα καταστρέφεται λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης στη ζώνη κοπής. Για να ξεπεραστεί αυτό, συνήθως εφαρμόζεται ένας συνεχής επανασηματισμός του πλέγματος και μία προσαρμογή του πλέγματος, που επιβαρύνουν σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο υπολογισμού. Παρ' όλα αυτά, η πρόοδος των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει καταστήσει δυνατή τη μείωση του χρόνου που απαιτείται για μια τέτοια ανάλυση σε αποδεκτά πλαίσια

Σήμερα, το μοντέλο Lagrange προτιμάται περισσότερο από το μοντέλο Euler στον τομέα της έρευνας. Όλες οι προσπάθειες μοντελοποίησης της μορφής του αποβλήτου στηρίζονται στον τρόπο διαχωρισμού αυτού από το τεμάχιο. Η μέθοδος Lagrange χρησιμοποιεί συνήθως για την περιοχή αποκόλλησης του αποβλήτου από το τεμάχιο την τεχνική του διαχωρισμού των κόμβων με τη μέθοδο διάδοσης ρωγμής, όπου όταν ο τελευταίος κόμβος της κοπτικής ακμής πλησιάζει κοντύτερα από μία απόσταση τον κόμβο του τεμαχίου και ικανοποιούνται ορισμένες φυσικές παράμετροι (θερμοκρασίας και τάσεων), αυτός χωρίζεται σε δύο κόμβους. Επίσης, όπως είπαμε, η μέθοδος Lagrange έχει το μειονέκτημα της υπερβολικής παραμόρφωσης του πλέγματος και έτσι απαιτείται ο συνεχής επαναπροσδιορισμός πλέγματος (remeshing) και η ομαλοποίησή του (smoothing). Και οι δύο τεχνικές υπολογιστικά στοιχίζουν πολύ, ενώ παράλληλα απαιτείται και τοπική πύκνωση του πλέγματος (refinement) του τεμαχίου στο σημείο κάθε φορά που έρχεται σε επαφή με το εργαλείο.

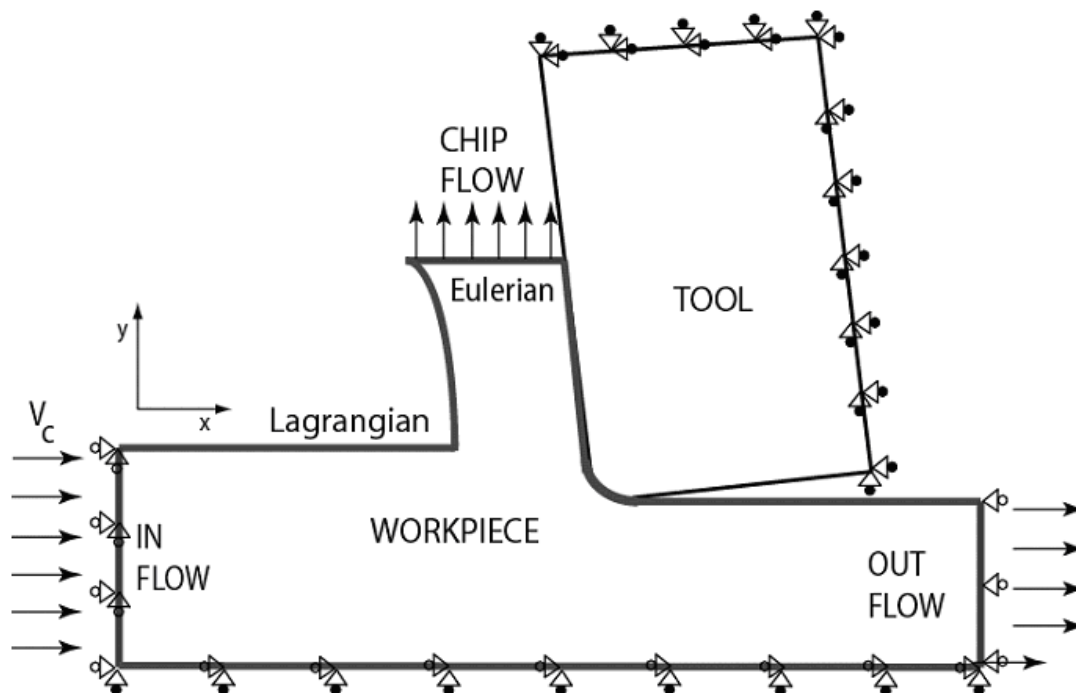
Σημαντικό είναι εδώ να αναφέρουμε ότι τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένα συνδυαστικό μοντέλο Lagragnian-Eulerian (ALE), το οποίο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο μεθόδων.[9-13]

2.8 Συνδυαστικό Μοντέλο Lagragnian-Eulerian (ALE)

Το μοντέλο στηρίζεται στη χρήση της μεθόδου διαχωρισμού. Το πλέγμα που χρησιμοποιείται δεν είναι ούτε καθορισμένο, ούτε όμως και συνδεδεμένο με το υλικό. Αντί αυτού το πλέγμα ακολουθεί τη ροή του υλικού και η επίλυση του προβλήματος για τις μετατοπίσεις γίνεται ακολουθώντας τα βήματα της μεθόδου Lagrange. Ταυτόχρονα το πλέγμα επανακαθορίζεται και το πρόβλημα για τα ζητήματα ταχυτήτων ακολουθεί την μέθοδο του Euler.

Στις προσομοιώσεις κοπών μετάλλων η ιδέα που χρησιμοποιείται είναι η αξιοποίηση της θεωρίας του Euler για την μοντελοποίηση της περιοχής γύρω από τη κορυφή του κοπτικού εργαλείου στην οποία λαμβάνει χώρα η κατεργασία της κοπής. Έτσι αποφεύγονται οι σοβαρές παραμορφώσεις που λαμβάνουν χώρα δίχως τη χρησιμοποίηση τεχνικών και μεθόδων remeshing. Ακόμα, η μέθοδος Lagrange χρησιμοποιείται για την αβίαστη ροή του υλικού στα ελεύθερα όρια του τεμαχίου. Επιπλέον, ο σηματοπισμός του αποβλήτου δημιουργείται λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης που λαμβάνει χώρα. Η διαδικασία προϋποθέτει μικρή προσαύξηση του χρόνου και δεν επιφέρει μεταβολή των στοιχείων και της συνδεσιμότητας του πλέγματος. Επιπρόσθετα δεν απαιτεί την χρήση κριτηρίου διαχωρισμού ούτε εκτεταμένου remeshing του πλέγματος του. Έτσι στη συνδυαστική μέθοδο ALE το πλέγμα αναμένεται να είναι λιγότερο παραμορφωμένο και περισσότερο ομαλό σε σχέση με τα συνήθη πλέγματα που εμφανίζονται στη μέθοδο Lagrange. Ως μειονέκτημα της μεθόδου μπορεί να αναφέρουμε την ανακριβή αντιστοίχιση των μεταβλητών κατάστασης που μπορεί να συμβεί όπως επίσης και την αναγκαιότητα

για ολοκληρωμένο remeshing. Η παραπάνω συνδυαστική προσέγγιση γίνεται καλύτερα φανερή στην παρακάτω εικόνα:[9-11,14-16]



Εικόνα 2.5: Οι οριακές συνθήκες με συνδυασμό των μεθόδων Lagrange και Euler σε προσομοίωση ALE.[11]

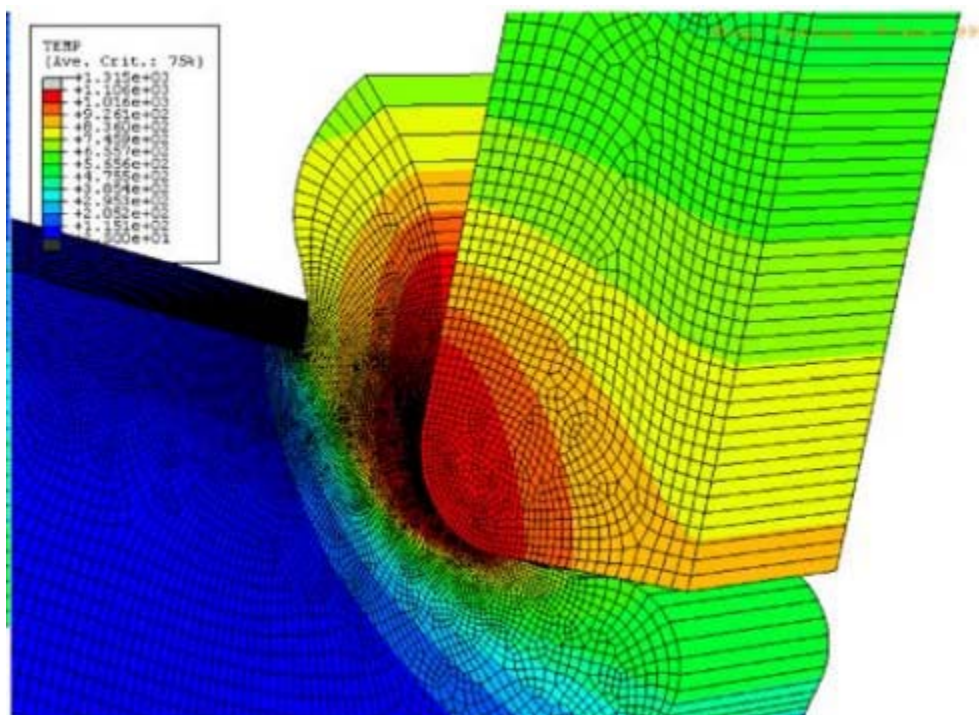
Η αριθμητική επίλυση σε όλες τις μεθόδους λύνει ουσιαστικά την παρακάτω εξίσωση: $M \cdot \ddot{u} = P - I$, όπου M το μητρώο μάζας, \ddot{u} η επιτάχυνση του κάθε κόμβου, P η εξωτερικές και I οι εσωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε αυτόν. Για τον υπολογισμό των επιταχύνσεων δεν χρησιμοποιείται πλέον η μέθοδος των συνεχών επαναλήψεων γραμμικών εξισώσεων, αλλά η λύση βρίσκεται με τη χρήση κεντρικής διαφοράς για τη λύση των εξισώσεων κίνησης που δεν είναι γραμμικές και η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται ως άμεση (explicit). Αυτό συμβαίνει διότι για τις επαφές των πλεγμάτων στις κατεργασίες κοπής το πρόβλημα είναι δυναμικό και θα απαιτούνταν πολλές επαναλήψεις.

2.9 Προγράμματα λογισμικού προσομοιώσεων Πεπερασμένων Στοιχείων

Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1990 οι ερευνητές συχνά έγραφαν και χρησιμοποιούσαν τον δικό τους κώδικα Πεπερασμένων Στοιχείων για να παραστήσουν και επιλύσουν ζητήματα όπως η ανάλυση μιας κοπής. Τα τελευταία όμως χρόνια έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται εκτεταμένα, τόσο από την ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και από τη βιομηχανία, εμπορικά λογισμικά όπως το Deform 2D/3D, το Abaqus, το Advantedge, το Ls-Dyna, το MSC Marc κ.α. Η επιλογή του προγράμματος Πεπερασμένων Στοιχείων για την ανάλυση μιας κοπής αποτελεί μια σημαντική παράμετρος για την ποιότητα των τελικών αποτελεσμάτων. Αυτό συμβαίνει διότι διαφορετικά προγράμματα Πεπερασμένων Στοιχείων έχουν διαφορετικές δυνατότητες και τρόπους επίλυσης των εκάστοτε ζητημάτων.

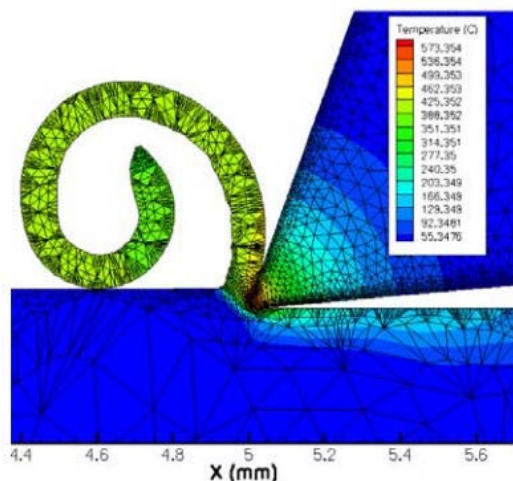
Το Deform (Design Enviroment for Forming), είναι πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προσομοιώσεις διαφόρων κατεργασιών όπως η σφυρηλάτηση, η διέλαση κτλ. Το Deform παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη, μέσα από μια ειδική λειτουργία του ,να κατασκευάζει άμεσα μοντέλα που αφορούν την τórνευση, το φρεζάρισμα, την εσωτερική τórνευση, τη διάτρηση. Τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου καθώς επίσης και οι συνθήκες κοπής της κάθε κατεργασίας μπορούν να εισαχθούν από το χρήστη. Ακόμα το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να καθορίζει απαραίτητες για την προσομοίωση μεταβλητές όπως το μέγεθος του πλέγματος, τις οριακές συνθήκες και τις συνθήκες διεπαφής του κοπτικού εργαλείου με το τεμάχιο. Επιπλέον, το πρόγραμμα έχει εγκατεστημένη βιβλιοθήκη υλικών όπως διαφόρους χάλυβες, κράματα κτλ. Άλλη μια επιπλέον δυνατότητα που έχει το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι η δυνατότητα που παρέχει στο χρήστη να δημιουργήσει ένα νέο υλικό χρησιμοποιώντας διάφορα μοντέλα υλικού.

Άλλο ένα πρόγραμμα με ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων είναι το Abaqus. Το Abaqus, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων όπως για παράδειγμα μία κοπή που φαίνεται στην εικόνα 2.6. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα δε διαθέτει έτοιμη λειτουργία και αυτόματη επιλογή συγκεκριμένης κατεργασίας. Συνεπώς, ο χρήστης πρέπει να ορίσει τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου, τις συνθήκες κοπής, την τεχνική επίλυσης, τις οριακές συνθήκες ,το μέγεθος του πλέγματος κ.α. Το Abaqus, δε διαθέτει προεγκατεστημένη βιβλιοθήκη υλικών, αλλά επιτρέπει στο χρήστη να ορίσει και να κατασκευάσει διάφορα υλικά χρησιμοποιώντας ένα πλήθος μοντέλων. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του παραπάνω προγράμματος είναι η ικανότητα του να μοντελοποιεί ένα σύστημα με έμφαση στη λεπτομέρεια. Για να επιτευχθεί όμως αυτό, η εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων και των εκάστοτε συνθηκών απαιτούν αρκετό χρόνο και ένα έμπειρο χρήστη των δυνατοτήτων του προγράμματος.

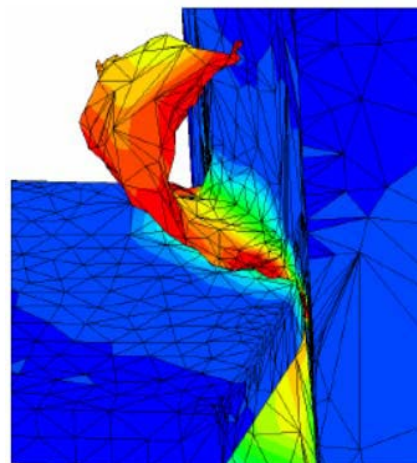


Εικόνα 2.6: Προσομοίωση ορθογωνικής κοπής με τη χρήση του Abaqus[17]

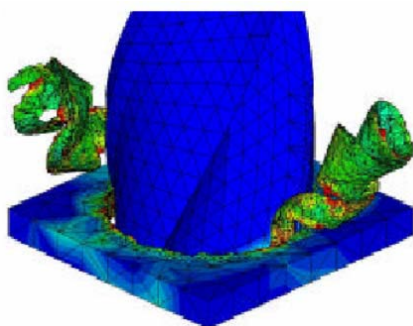
Το Advantedge είναι ένα πρόγραμμα που αναπτύχθηκε για κατεργασίες κοπής όπως για τη τόνρευση, το φρεζάρισμα και τη διάτρηση που εμφανίζονται στη εικόνα 2.7. Το πρόγραμμα διαθέτει εύχρηστο περιβάλλον και είναι φιλικό στο χρήστη, παρέχοντας του τη δυνατότητα να εισάγει εύκολα και απλά τα απαιτούμενα δεδομένα για τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου, καθώς επίσης και συνθηκών κοπής. Επιπλέον, το πρόγραμμα διαθέτει εκτεταμένη βιβλιοθήκη υλικών. Δυστυχώς όμως ο χρήστης δεν έχει τη δυνατότητα να ελέγχει την επίλυση.



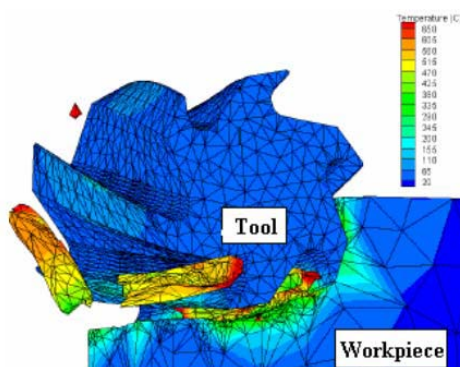
α) 2D Τόνρευση



β) 3D Τόνρευση



γ) Διάτρηση

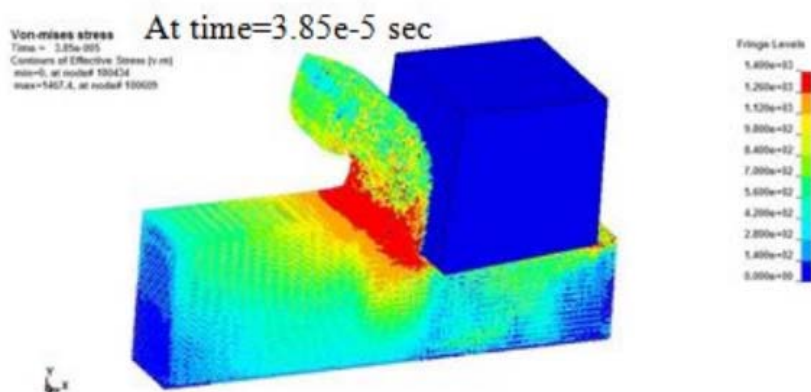


δ) Φραιζάρισμα

Εικόνα 2.7: Παραδείγματα προσομοιώσεων με τη χρήση του Advantedge[18]

Ακόμα ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις Πεπερασμένων Στοιχείων είναι το Ls-Dyna. Το Ls-Dyna αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για προβλήματα που αφορούν συγκρούσεις και διαμορφώσεις τεμαχίων. Ακόμα το συγκεκριμένο πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσομοιώσεις κοπών όπως αυτή που εμφανίζεται στην εικόνα που ακολουθεί 2.8. Παρόλα αυτά δεν προτιμάται επίλυση και προσομοίωση τέτοιων προβλημάτων καθώς δεν εμπεριέχει έτοιμα πρότυπα επιλογών κατεργασιών και ως αποτέλεσμα η επίλυση κοπών θα είναι αρκετά χρονοβόρα. Επιπλέον, το πρόγραμμα Ls-Dyna δεν έχει τη δυνατότητα remeshing των στοιχείων στην περιοχή κοπής μεταξύ κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου. Αυτό το

μειονέκτημα επιφέρει και επιδρά αρνητικά ως προς την ποιότητα των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων κοπών.



Εικόνα 2.8: Προσομοίωση κοπής μετάλλου με τη χρήση του προγράμματος Ls-Dyna[19]

2.10 Παρουσίαση υπολογιστικού πακέτου MSC Marc

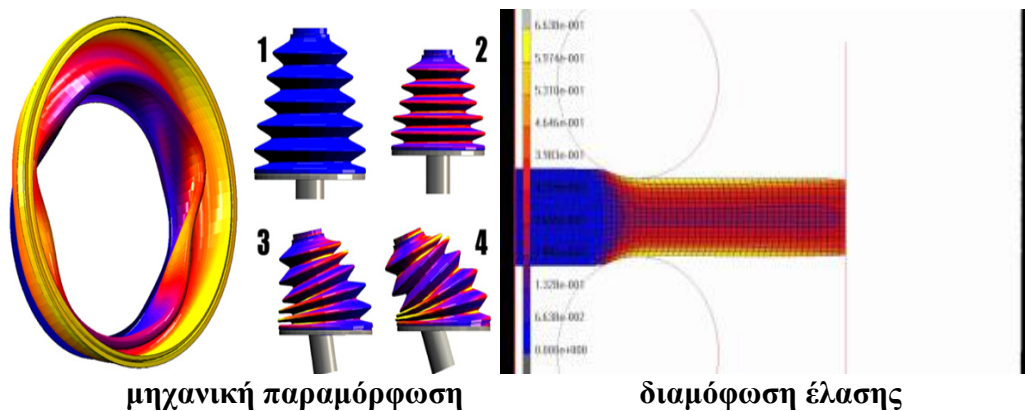
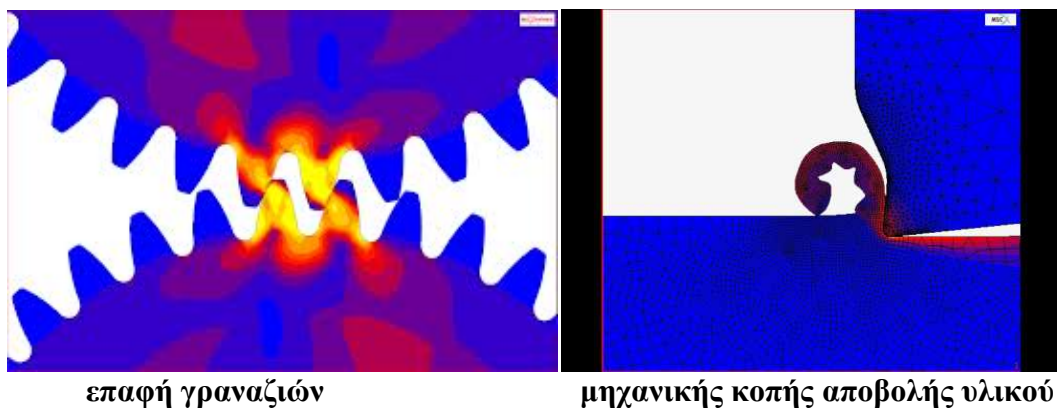
Το Marc είναι ένα ισχυρό, γενικής χρήσης πρόγραμμα μοντελοποίησης της εταιρίας MSC για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων Πεπερασμένων Στοιχείων. Με την χρήση αυτού του υπολογιστικού προγράμματος δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να προσομοιώσει με ακρίβεια την απόκριση των προϊόντων του και να δει την επίδραση που έχουν σε αυτό διάφορες παράμετροι όπως η στατική και η δυναμική φόρτιση του. Ακόμα το Marc θεωρείται ευέλικτο και ιδανικό για την μοντελοποίηση υλικών με μη γραμμική συμπεριφορά καθώς επίσης και για την επίλυση πολύπλοκων σχεδιαστικών προβλημάτων υπό μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Με τις καινοτόμες τεχνολογίες και μεθοδολογίες μοντελοποίησης που διαθέτει, δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να προσομοιώσει πολύπλοκες συμπεριφορές μηχανολογικών συστημάτων στον πραγματικό κόσμο. Αυτό το καθιστά κατάλληλο και απαραίτητο για την αντιμετώπιση οπουδήποτε κατασκευαστικού και σχεδιαστικού προβλήματος, που μπορεί να αντιμετωπίσει ένας μηχανικός σε ένα σύγχρονο και μεταβαλλόμενο περιβάλλον.

Με τον τρόπο επίλυσης του, που είναι έξυπνα σχεδιασμένο για να παρέχει την βέλτιστη απόδοση και πλήρη αξιοποίηση του υλικού, σε συνδυασμό με ένα φιλικό σχεδιαστικό περιβάλλον δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα επίλυσης, μοντελοποίησης, προσομοίωσης και διερεύνησης οποιουδήποτε πολύπλοκου ζητήματος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με μεγάλες μηχανικές παραμορφώσεις, με την επίδραση τάσεων και φορτίων, θερμικής αγωγιμότητας, ζητημάτων κοπής και επαφής υλικών, καθώς επίσης και η αλληλεπίδραση τους. Συνεπώς, το Marc είναι σε θέση να βοηθήσει στην επίλυση προβλημάτων και να δώσει εικόνα για τη συμπεριφορά διαφόρων προϊόντων υπό διάφορες περιβαλλοντολογικές συνθήκες. Άρα για την βελτιστοποίηση και το σχεδιασμό των τελικών μας προϊόντων.

Πεδία εφαρμογής είναι τα ακόλουθα προβλήματα:

- 1) Γεωμετρίας υλικού και οριακών συνθηκών (συνθήκες επαφής)
- 2) θερμικής ανάλυσης
- 3) διεργασιών διαμόρφωσης όπως διαμορφώσεις, συγκολλήσεις, βαφές κτλ.
- 4) φυσικών προβλημάτων
 - a) συνδυασμού θερμομηχανικής ανάλυσης
 - b) ηλεκτρομαγνητικών
 - c) πιεζοηλεκτρικών
 - d) ηλεκτρο-θερμο-μηχανικών
 - e) συνδυαστικά ηλεκτροστατικών και μαγνητοστατικών ζητημάτων
 - f) μηχανικής των ρευστών κ.α

Ακολουθούν χαρακτηριστικά παραδείγματα προβλημάτων που επιλύθηκαν με το υπολογιστικό πακέτο MSC Marc όπως:



Εικόνα 2.9: Παραδείγματα προβλημάτων [20]

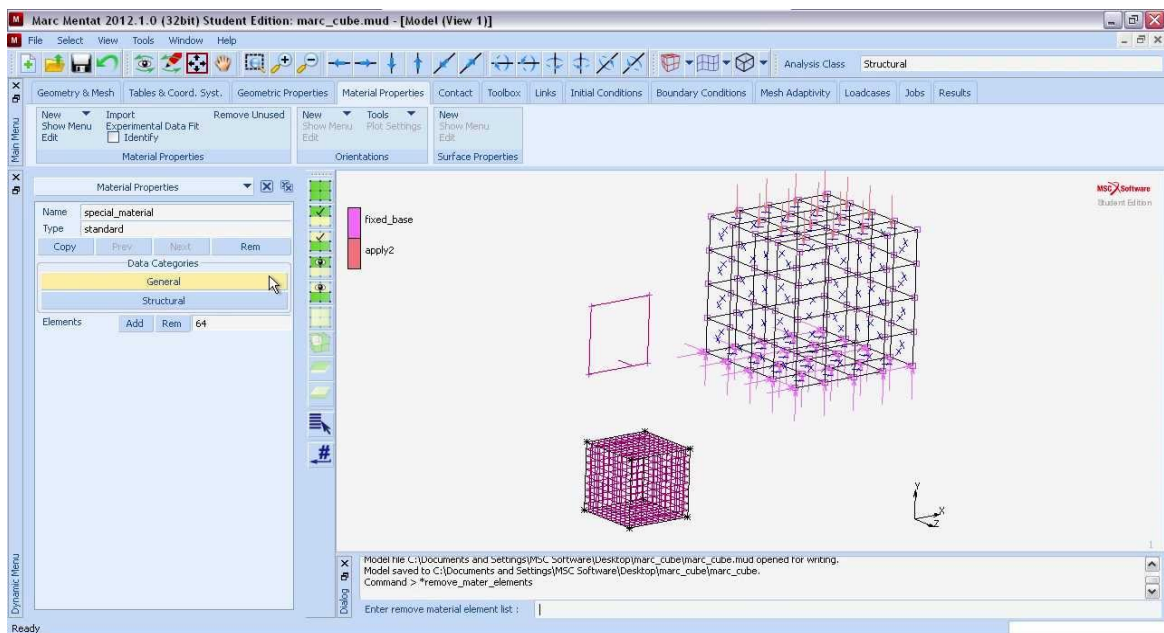
Το Marc αποτελεί απαραίτητο εργαλείο και χρησιμοποιείται παγκοσμίως από εταιρίες κολλοσσούς σε διάφορους τομείς όπως :

- σε Αυτοκινητοβιομηχανίες :TOYOTA, BMW, FERRARI κ.α.
- σε αεροδιαστημικές εταιρίες : Boeing, Airbus, Eurocopter,Sikorsky
- σε εταιρείες ελαστικών : Goodyear, Pirelli, Dunlop κ.α
- και σε άλλες πολυεθνικές όπως Philips,Lego,HP,Duracell

Ακόμα το Marc διαδραματίζει σημαντικό ρόλο και επηρεάζει τις τελικές αποφάσεις που αφορούν το τελικό προϊόν. Χαρακτηριστικοί τομείς είναι οι ακόλουθοι που αφορούν:

- εξαρτήματα αυτοκινήτων
- βιοϊατρικό εξοπλισμό
- ηλεκτρονικά εξαρτήματα
- διωστήρες κινητήρων
- αεροδιαστημικά οχήματα
- και ελαστικά

Παρακάτω παρουσιάζουμε το περιβάλλον σχεδίασης του λογισμικού MSC Marc.



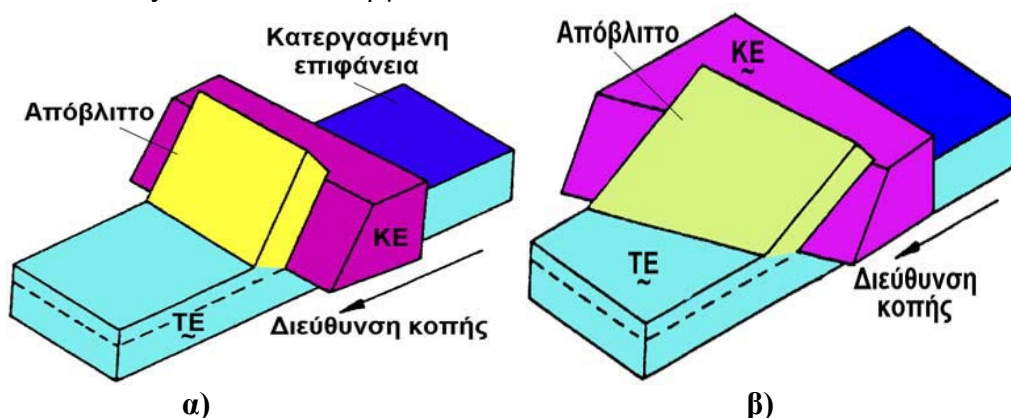
Εικόνα 2.10: Το περιβάλλον του MSC.Marc

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΚΟΠΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι δύο τύποι κοπών που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση της μηχανικής των κοπών των μετάλλων είναι: α) η ορθογωνική κοπή και η λοξή κοπή. Στην ορθογωνική κοπή όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.1, το ανεπιθύμητο υλικό αποβάλλεται από το τεμάχιο όταν η κοπτική ακμή, η οποία βρίσκεται κάθετη στη διεύθυνση της σχετικής κίνησης κοπτικού εργαλείου(ΚΕ) - τεμαχίου(ΤΕ), εισχωρεί σε αυτό. Από τη σχετική κίνηση τους, μια στρώση υλικού αποβάλλεται με τη μορφή αποβλήτου. Κάθετο στην πρόωση είναι το βάθος κοπής, το οποίο είναι μικρότερο ή ίσο με το πλάτος του κοπτικού εργαλείου.



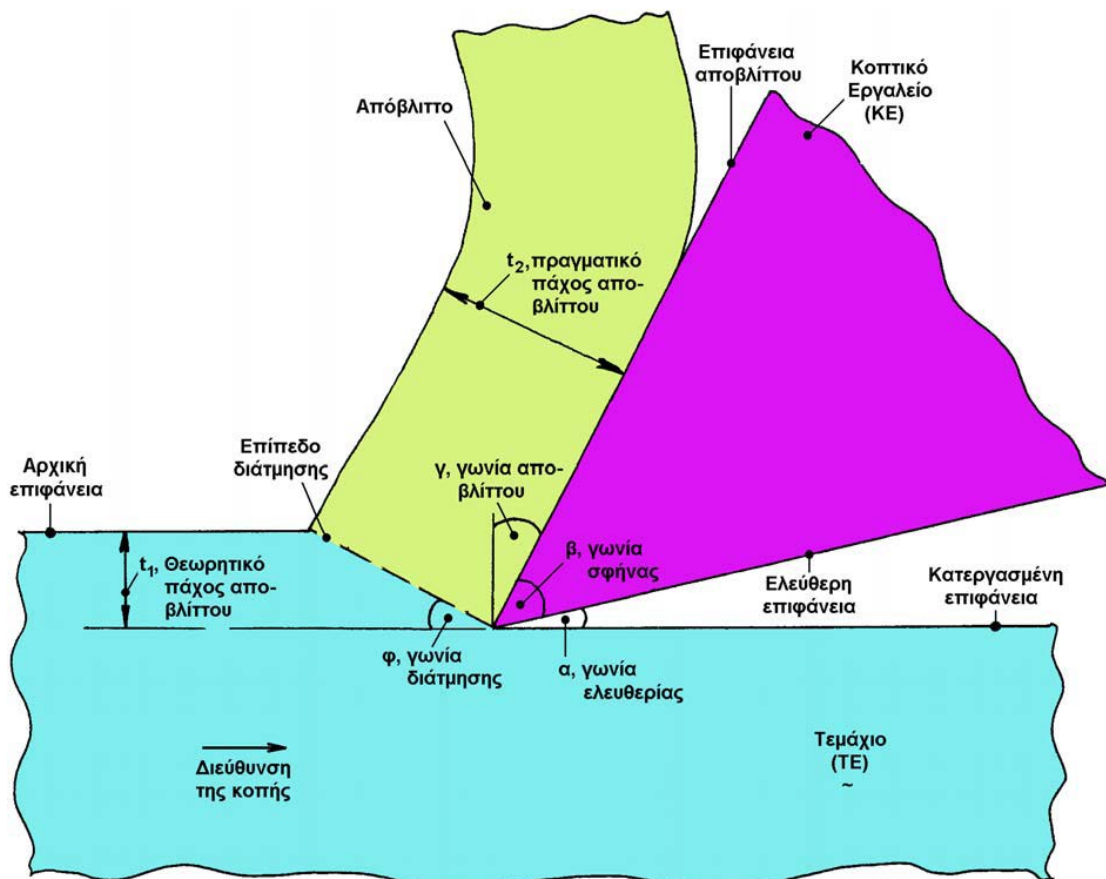
Εικόνα 3.1 : Είδη κοπής: (α) Ορθογωνική κοπή, (β) Λοξή κοπή[21]

Στην ορθογωνική κοπή, η διαδικασία αποβολής του υλικού θεωρείται ομοιόμορφη κατά μήκος της κοπτικής ακμής. Συνεπώς αποτελεί ένα δισδιάστατο πρόβλημα επίπεδης παραμόρφωσης. Στη λοξή κοπή, η κόψη του κοπτικού εργαλείου είναι λοξή, ως προς τη διεύθυνση κοπής, με κλίση της γωνίας όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.

Παρότι οι πλειονότητα των κοπών είναι ως επί το πλείστον λόξες κοπές, η ορθογωνική κοπή αποτελεί αντικείμενο μελέτης των ερευνητών, εξαιτίας της απλοϊκότητας της, καθώς επίσης και των καλών προσεγγίσεων που επιτυγχάνει.

3.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κοπής

Το κοπτικό εργαλείο της ορθογωνικής κοπής, καθορίζεται από συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Στο σχήμα που ακολουθεί παρατηρούμε αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως επίσης και ότι το κοπτικό εργαλείο έχει δύο κοπτικές πλευρές, την κύρια και τη δευτερεύουσα



Εικόνα 3.2: Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κοπής

Τα σημαντικότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου είναι:[21-23]

- Η **γωνία ελευθερίας (α)**, η οποία σχηματίζεται από την κατεργασμένη επιφάνεια και την ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου. Συμβάλλει στη μείωση της τριβής μεταξύ ΤΕ(τεμαχίου) και ΚΕ(κοπτικού εργαλείου). Παίρνει τιμές από 5° - 15° . Η ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου δεν παίρνει μέρος στο σχηματισμό του αποβλήτου, η γωνία ελευθερίας όμως επηρεάζει τη φθορά του εργαλείου.
- Η **γωνία σφήνας (β)**, η οποία σχηματίζεται από την επιφάνεια αποβλήτου και την ελεύθερη επιφάνεια.
- Η **γωνία αποβλήτου (γ)**, η οποία σχηματίζεται μεταξύ του νοητού κάθετου άξονα στην κατεργασμένη επιφάνεια ο οποίος ξεκινά από την αιχμή του κοπτικού εργαλείου και την επιφάνεια αποβλήτου. Όσο αυξάνεται η τιμή της τόσο μειώνονται οι δυνάμεις κοπής. Για μεγάλες γωνίες αποβλήτου το ΚΕ γίνεται πιο αιχμηρό με αποτέλεσμα να υπερθερμαίνεται και να φθείρεται πιο εύκολα η αιχμή του. Παίρνει τιμές από 0° - 20° . Για μεγάλες ταχύτητες κοπής και μικρή διατομή αποβλήτου η γωνία γ λαμβάνει αρνητικές τιμές.

Όπως συμπεραίνουμε από το σχήμα πρέπει να ισχύει $\alpha + \beta + \gamma = 90^{\circ}$.

- Η **γωνία διατμήσεως (φ)** : το ΤΕ παραμορφώνεται πλαστικά κατά μήκος του επιπέδου διάτμησης σχηματίζοντας το απόβλητο με πάχος t_2 . Όπως φαίνεται

στο σχήμα το επίπεδο διατμήσεως κλίνει προς την διεύθυνση κοπής κατά μια γωνία φ .

Τα παραπάνω γεωμετρικά μεγέθη αποτελούν σημαντικούς παράγοντες ,διότι χάρις σε αυτά καθορίζονται τα χαρακτηριστικά της κοπής.

3.3 Συνθήκες κοπής

Για τις συνθήκες κοπής έχουμε το εξής "τρίπτυχο":[21]

- Βάθος κοπής, a : Είναι το βάθος στο οποίο εισχωρεί το ΚΕ μέσα στο υλικό ΤΕ. Μετράται σε mm.
- Ταχύτητα κοπής, v : Είναι η στιγμιαία (σχετική) ταχύτητα της ακμής (κόψης) του ΚΕ ως προς το ΤΕ κατά την πρωτεύουσα κίνηση. Συνήθως μετράται σε m/min (σπανιότερα σε m/s).
- Πρόωση, s : Είναι η σχετική μετατόπιση του ΚΕ ως προς ΤΕ ανά περιστροφή ή ενεργό διαδρομή (ΚΕ ή ΤΕ). Μετράται σε mm/τεν ή mm/ενεργό διαδρομή και κατά τη κατεύθυνση της κίνησης πρόωσης. Το σύνηθες είναι να επιτυγχάνεται με κίνηση του κοπτικού εργαλείου ενώ είναι το τεμάχιο σταθερό αλλά μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να συμβαίνει και το αντίθετο. Στον τόρνο, πρόωση είναι η κατά την έννοια του άξονα περιστροφής μετακίνηση του κοπτικού εργαλείου ανά στροφή του αντικειμένου

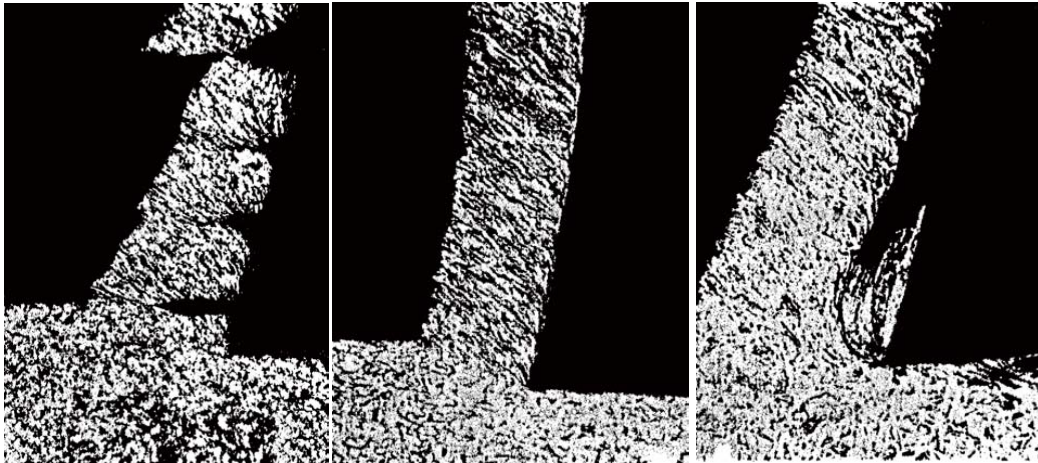
Ταχύτητα πρόωσης, uv : Είναι η στιγμιαία (σχετική) ταχύτητα της ακμής ΚΕ ως προς το ΤΕ κατά τη συνεχή κίνηση πρόωσης. Μετράται σε m/min και χρησιμοποιείται εναλλακτικά αντί της πρόωσης

3.4 Μορφολογία και σχηματισμός του απόβλητου[9-14,21-24]

Όπως γνωρίζουμε, κύριο χαρακτηριστικό των κατεργασιών κοπής αποτελεί ότι ,για τη μορφοποίηση των κομματιών, αφαιρείται μέταλλο και ότι το μέταλλο αυτό αφαιρείται σε μορφή απόβλητων. Το απόβλητο κατά συνέπεια είναι το προϊόν της κοπής των μετάλλων και η μελέτη του μας δίνει τη δυνατότητα να βγάζουμε ενδιαφέροντα συμπεράσματα για το φαινόμενο της κοπής.

Το απόβλητο, όπως θα δούμε στη συνέχεια, σχηματίζεται σε διάφορα μεγέθη και παίρνει ποικίλες μορφές ανάλογα με τη περίπτωση της κατεργασίας, δηλαδή από ταινιοειδές ευθύ και μακρύ μέχρι σπειροειδές τεμαχισμένο ή ακόμη κατακερματισμένο σε τεμαχίδια.

Τα απόβλητα διακρίνονται σε τρία βασικά είδη: α) το **ασυνεχές απόβλητο**, β) το **συνεχές απόβλητο**, και γ) το **συνεχές απόβλητο με ψευδοακμή**. Τα τρία είδη απόβλητου διακρίνονται στις παρακάτω εικόνες



α)

β)

γ)

Εικόνα 3.3 :Είδη αποβλήτου : α)Ασυνεχές απόβλητο, β)Συνεχές απόβλητο, γ)Συνεχές απόβλητο με ψευδοακμή [21]

Ασυνεχές απόβλητο συναντούμε στην κοπή ψαθυρών μετάλλων, όπως είναι ο χυτοσίδηρος ή χυτευτικός ορείχαλκος κ.α. Ακόμα είναι δυνατός ο σχηματισμός ασυνεχούς αποβλήτου και κατά την κοπή όλκιμων μετάλλων ή κραμάτων (μαλακός χάλυβας, αργύλιο, μόλυβδος κτλ) γενικά σε χαμηλές ταχύτητες κοπής, σε μεγάλες προώσεις και με εργαλεία με μικρές τιμές της γωνίας αποβλήτου. Το συνεχές απόβλητο σχηματίζεται κατά την κοπή όλκιμων μετάλλων και κραμάτων, κυρίως σε υψηλές ταχύτητες κοπής, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούμε σκληρομέταλλα ως κοπτικά εργαλεία. Αυτό το είδος αποβλήτου είναι πολύ επιθυμητό για τις κατεργασίες κοπών, λόγω των καλύτερων αποτελεσμάτων που επιτυγχάνουν στο φινίρισμα των επιφανειών, καθώς επίσης και επειδή ο σχηματισμός του σχετίζεται με ευνοϊκές συνθήκες αναπτυσσόμενων δυνάμεων κοπής και καταναλισκόμενης ισχύος. Το απόβλητο όμως αυτό έχει τέτοια μορφή και το μήκος του μπορεί να είναι τόσο μεγάλο, ώστε να δυσχεραίνει γενικά την κοπή. Αυτό πρακτικά αντιμετωπίζεται με τη χρήση γρεζοθραυστών. Συνεχές απόβλητο με ψευδοακμή σχηματίζεται όταν μαλακοί χάλυβες κόβονται από κοπτικά εργαλεία υψηλών ταχυτήτων σε χαμηλές ταχύτητες κοπής. Η ψευδοακμή έχει ως αποτέλεσμα τη χειροτέρευση της τραχύτητας της κατεργαζόμενης επιφάνειας του τεμαχίου και την αύξηση της φθοράς, άρα και τη μείωση της διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου.

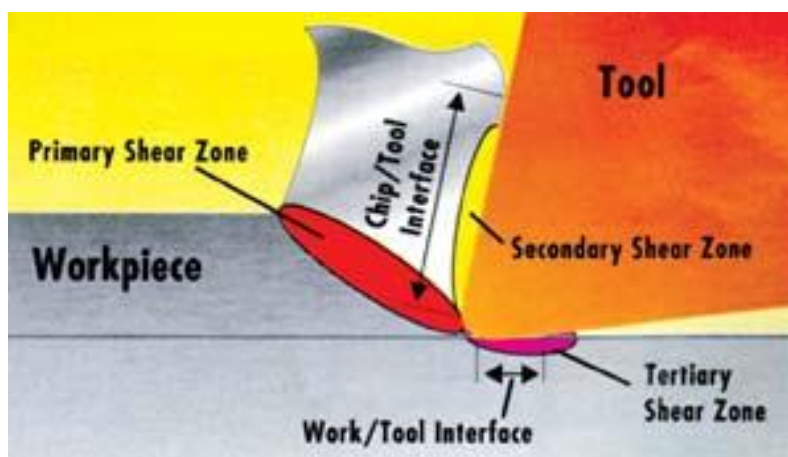
3.5 Ζώνες Παραμόρφωσης

Στην κατεργασία της κοπής εμφανίζονται τρεις ζώνες παραμόρφωσης όπως φαίνονται και στην εικόνα 3.5 που ακολουθεί παρακάτω:

- Πρωτογενής διατμητική ζώνη. Ο σχηματισμός του αποβλήτου διαδραματίζεται πρώτα και κυριότερα σε αυτή την περιοχή, όσο η κοπτική ακμή εισχωρεί μέσα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Από μικροσκοπικές μελέτες και πειράματα έχει προκύψει ότι το απόβλητο σε αυτή την περιοχή δημιουργείται λόγω της διάτμησης. Ακόμα πειραματικές μελέτες έχουν καταλήξει ότι το μέσο πάχος αυτής της περιοχής είναι ίσο με το ένα δέκατο του πάχους αποβλήτου.
- Δευτερογενής διατμητική ζώνη. Η περιοχή σχηματίζεται από την επαφή του κοπτικού εργαλείου με το απόβλητο καθόλο το μήκος της. Το υλικό παραμορφώνεται εξαιτίας της εντατικής επιφανειακής τριβής που εμφανίζεται. Αυτή η δευτερογενής περιοχή αποτελείται από δύο μέρη, την περιοχή Sticking, κοντά στην κορυφή της κοπτικής ακμής και την περιοχή ολίσθησης που έπεται αυτής {}.

Και οι δύο παραπάνω περιοχές χαρακτηρίζονται από αύξηση της θερμοκρασίας. Στην μεν πρωτογενή ζώνη λόγω της έντονης πλαστικής παραμόρφωσης και στη δευτερογενή λόγω της τριβής. Επίσης, εξαιτίας των μεγάλων ταχυτήτων κοπής, δεν παρατηρείται αγωγιμότητα της θερμότητας και η παραγόμενη θερμότητα θεωρείται συγκεντρωμένη στην περιοχή γύρω από την κοπτική ακμή.

- Τριτογενής διατμητική ζώνη. Όταν η ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου έρχεται σε επαφή με τη νέα διαμορφωμένη επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου, μπορεί να δημιουργηθεί αυτή η τριτογενής περιοχή παραμόρφωσης.



Εικόνα 3.5: Ζώνες παραμόρφωσης στις κοπές[25]

3.6 Μηχανική των Κοπών

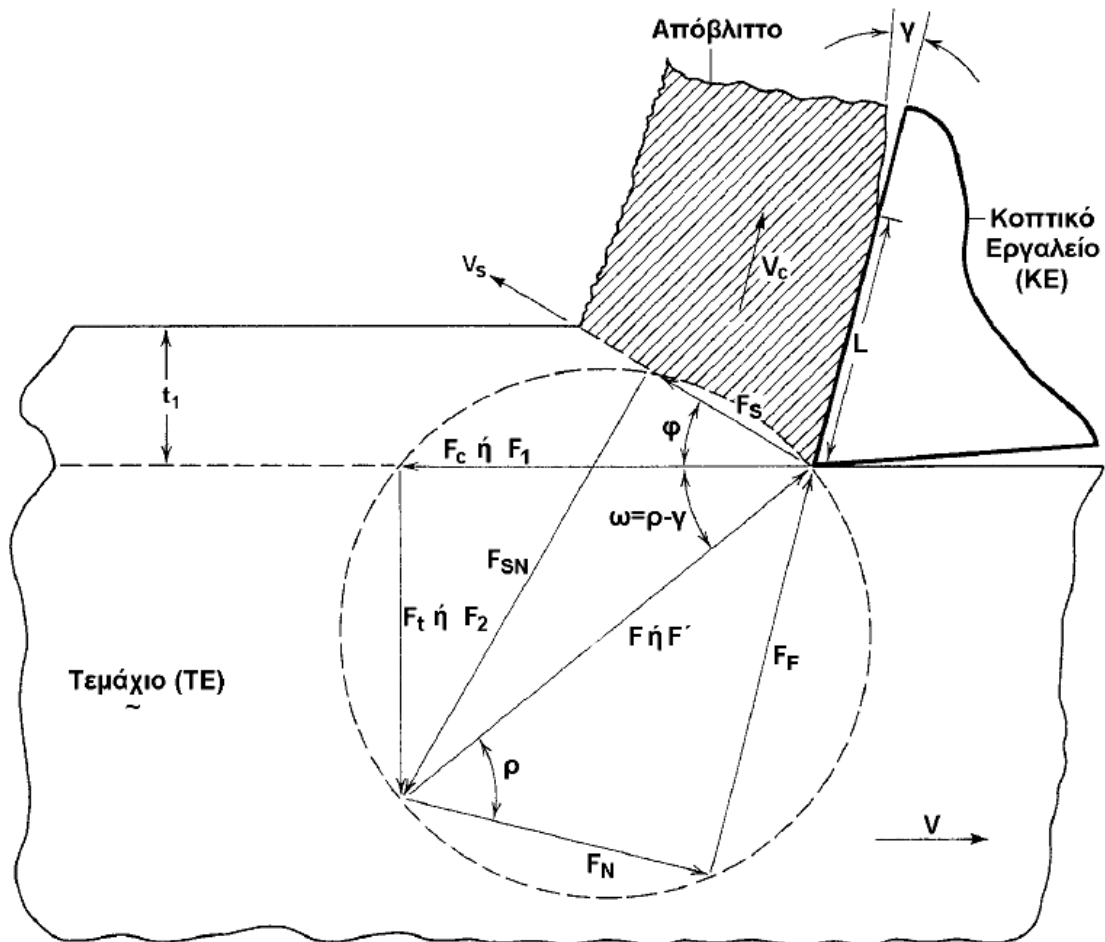
Τα τελευταία 60 χρόνια οι ερευνητές έχουν επικεντρώσει τη μελέτη τους στην κατασκευή μοντέλων που αφορούν τη συμπεριφορά κοπών μετάλλων ή την ανάπτυξη προηγούμενων μοντέλων. Πολλές από τις πρώτες εργασίες που έγιναν αφορούσαν αναλυτικά μοντέλα, στα οποία παρουσιαζόταν η βασική μηχανική που αφορούσε τις κοπές. Τα περισσότερα αναλυτικά μοντέλα είχαν σκοπό τους την παραγωγή των εξισώσεων από τις οποίες θα καθορίζονταν οι δυνάμεις κοπής, δίχως την διεξαγωγή πειραμάτων. Από τα αποτελέσματα των δυνάμεων κοπής και από τη φθορά που παρουσίαζε το κοπτικό εργαλείο, μπορούσαν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούσαν την ακεραιότητα και την ποιότητα της επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Το πρόβλημα προϋπόθετε τον καθορισμό των δυνάμεων κοπής, με γνωστές τις συνθήκες κοπής και επιλύονταν με τον ορισμό της κατάλληλης σχέσης μεταξύ της διατμητικής γωνίας, της γωνίας αποβλήτου και του συντελεστή τριβής. Αρκετές μέθοδοι έχουν εφαρμοστεί, οι οποίες άλλοτε υπερεκτιμούν και άλλοτε υποτιμούν τα αποτελέσματα σε σχέση με τις πραγματικές τιμές. Οι πραγματικές τιμές των δυνάμεων κοπής, συνήθως βρίσκονται κάπου μεταξύ των δύο παραπάνω ορίων.

3.7 Δυνάμεις και τάσεις στην Ορθογωνική Κοπή

Ο Merchant το 1945[27] ανέπτυξε την θεωρία του μοντέλου λεπτής ζώνης (Thin-zone model) κάνοντας χρήση των παρακάτω υποθέσεων:[28]

- 1) Η κοπτική ακμή είναι αιχμηρή και μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου δεν υπάρχει τριβή.
- 2) Η παραμόρφωση θεωρείται δισδιάστατη
- 3) Οι τάσεις του επιπέδου διάτμησης είναι ανομοιόμορφα κατανομημένες.
- 4) Η συνισταμένη δύναμη F που εφαρμόζεται στο επίπεδο διάτμησης είναι ίση, αντίθετη και συγραμική με τη δύναμη F που ασκείται στην επιφάνεια κοπτικού εργαλείου-αποβλήτου.

Με τη βοήθεια των παραπάνω υποθέσεων προέκυψε το διάγραμμα δυνάμεων της ορθογωνικής κοπής που φαίνεται στην εικόνα 3.6 που ακολουθεί.



Εικόνα 3.6 :Ο κύκλος τους Merchant με το διάγραμμα δυνάμεων[21]

Η συνισταμένη δύναμη F αναλύεται στις δύο συνιστώσες F_N και F_F οι οποίες είναι κάθετες στην κόψη του κοπτικού εργαλείου η μεν πρώτη και κατά μήκος της κόψης του κοπτικού εργαλείου η δεύτερη. Ακόμα, αναλύεται και στις F_{SN} και F_S οι οποίες είναι κάθετες και διαμήκεις αντίστοιχα στο επίπεδο διάτμησης. Τελικά έτσι μπορεί να αναλυθεί στις συνιστώσες F_c , της δύναμης κοπής και F_t της δύναμης πρόωσης ή απόθησης (thrust force). Ακόμα από στο διάγραμμα των δυνάμεων διακρίνονται και άλλοι σημαντικοί παράμετροι όπως η γωνία αποβλήτου γ , η γωνία διάτμησης φ και η μέση φαινόμενη γωνία τριβής ρ που σχηματίζεται μεταξύ του αποβλήτου και του κοπτικού εργαλείου. Η γωνία τριβής ρ συνδέεται με το μέσο φαινόμενο συντελεστή τριβής μ μέσω της εξίσωσης:

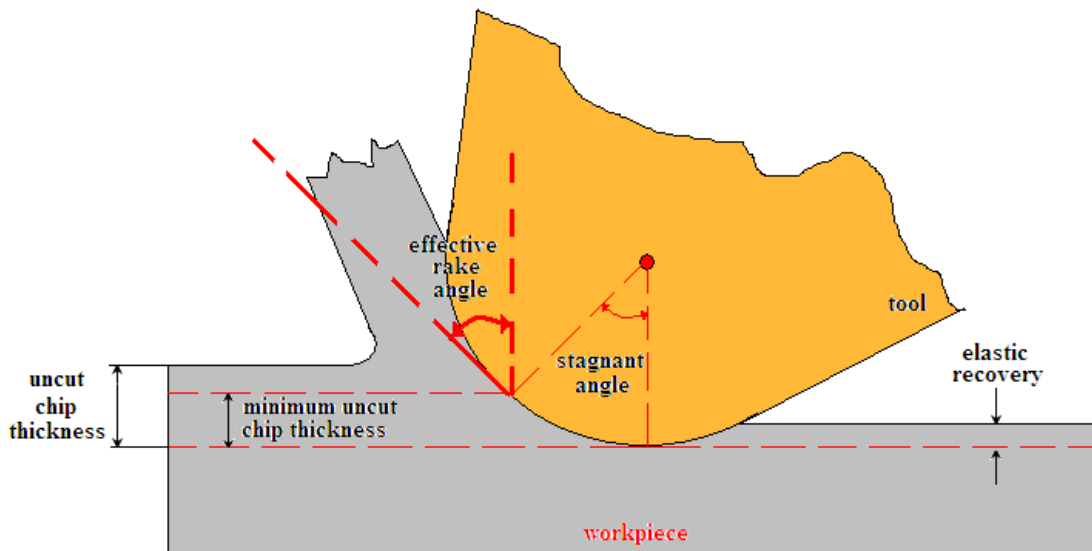
$$\rho = \arctan(\mu) = \arctan(F_F/F_N)$$

Σύμφωνα με την θεωρία των Ernst και Merchant, το ανώτερο όριο της γωνίας διάτμησης πρέπει να βρεθεί, στην οποία το έργο θα περιορίζεται στο ελάχιστο. Με άλλα λόγια, αφού το παραγόμενο έργο είναι ανάλογο της δύναμης κοπής F_c αναζητείται η έκφραση που συνδέει τη δύναμη κοπής με τη διατμητική γωνία και μετά να βρεθεί η φ^o για την οποία η F_c γίνεται ελάχιστη. Από την εικόνα του κύκλου Merchant εύκολα συμπεραίνουμε ότι :

$$F_s = F \cos(\varphi + \rho - \gamma)$$

Από το διάγραμμα των δυνάμεων προκύπτουν οι δυνάμεις κοπής F_c και οι δυνάμεις απόθησης F_t ως εξής:

$$F_c =$$



Εικόνα 3.7: Ορθογωνική μικροκοπή

3.9 Ελάχιστο πάχος αποβλήτου (Minimum chip thickness) [9-11,35]

Σε τέτοιο επίπεδο, το μοντέλο του Merchant είναι μη ρεαλιστικό. Στις μικροκοπές το βάθος κοπής μπορεί να είναι μικρότερο των 10 μm και η επικρατούσα τραχύτητα επιφανείας μόλις μερικά nm. Εδώ η ακμή του κοπτικού εργαλείου δεν μπορεί πλέον να θεωρείται κοφτερή. Έτσι το κοπτικό εργαλείο έχει ακτίνα κοπτικής ακμής σε μέγεθος αντίστοιχο με το άκοπο πλάτος του αποβλήτου. Σημειωτέον η κατασκευή ενός τέλει κοπτικού εργαλείου είναι πρακτικά αδύνατη, εξαιτίας τεχνικών περιορισμών που συνδέονται με την κατασκευή του εργαλείου. Από την παραπάνω εικόνα της μικροκοπής παρατηρούμε ότι η ενεργή γωνία κοπής είναι αρνητική. Στην περίπτωση αυτή η ελαστοπλαστική παραμόρφωση του υλικού του τεμαχίου όπως επίσης και η ελαστική επαναφορά της ελεύθερης επιφάνειας, πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Από τα παραπάνω προκύπτει ο όρος του **ελάχιστου πάχους αποβλήτου** που μπορεί να αφαιρεθεί από το τεμάχιο σε μια μικροκοπή και γενικότερα στις μικροκατεργασίες. Θεωρούμε σταθερό σημείο πάνω από το οποίο διαμορφώνεται το απόβλητο και κάτω από το οποίο λαμβάνει χώρα μόνο ελαστοπλαστική παραμόρφωση. Με τη χρήση του σταθερού αυτού σημείου και με τη βοήθεια της προκύπτουσας γωνίας θ_m , σε συνδυασμό με την ακτίνα της κοπτικής ακμής του εργαλείου, ορίζεται η παρακάτω σχέση του ελάχιστου άκοπου πάχους κοπής h_m [36] ως εξής:

$$h_m = r_e (1 - \cos \theta_m)$$

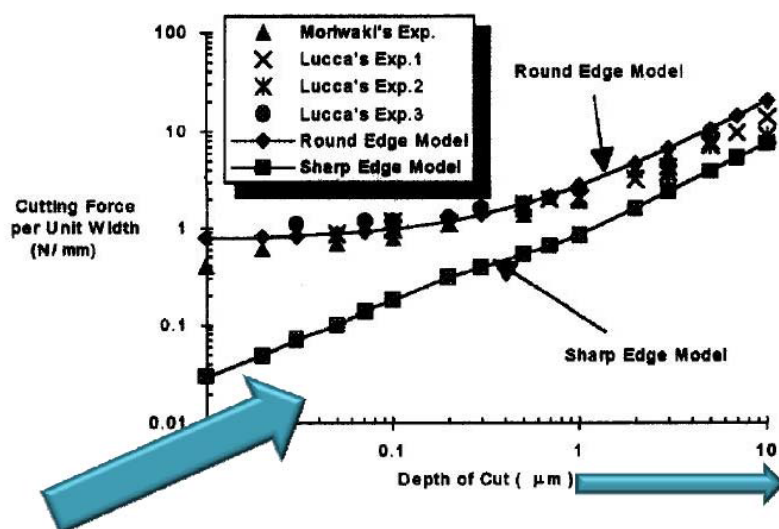
Το ελάχιστο πάχος αποβλήτου ορίζει αν θα διαμορφωθεί ένα απόβλητο ή όχι, καθώς αν το βάθος κοπής σε μια μικροκατεργασία έχει οριστεί μικρότερο του ελαχίστου, τότε η κοπτική ακμή αναμένεται να διαμορφώσει πλαστικά μόνο το υλικό του τεμαχίου δίχως να δημιουργήσει απόβλητο. Αυτός είναι ο μηχανισμός ploughing ο οποίος εκτός του ότι επιφέρει τα προφανή αποτελέσματα στην ακεραιότητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας του τεμαχίου, μεταβάλλει εμφανέστατα τις δυνάμεις κοπής. Άρα και τη δυνατότητα πρόβλεψής τους.

Το φαινόμενο του ελαχίστου πάχους αποβλήτου αναγνωρίστηκε αρχικά από τον Finnie στην κατεργασία της λείανσης [31]. Και άλλοι όμως ερευνητές έχουν διεξάγει πειράματα για να αποδείξουν την ύπαρξη του φαινομένου στη μικροτόρνευση και στο μικροφρεζάρισμα. Ο Ikawa με τη χρήση ενός περιστρεφόμενου κοπτικού εργαλείου από διαμάντι και κοπτική ακτίνα ακμής της τάξεως των 10 nm, υπολόγισε ότι το άκοπο πάχος του αποβλήτου είναι περίπου το 1/10 της κοπτικής ακτίνας [32]. Ο Weule μελέτησε το ελάχιστο πάχος αποβλήτου στο μικροφρεζάρισμα. Από τη μελέτη του προέκυψε ότι κατά το πέρασμα ενός δοντιού και λόγω του μεταβλητού πάχους αποβλήτου, ο μηχανισμός αποβολής του υλικού μπορεί να μεταβληθεί από διατμητικός σε ploughing. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση της επιφάνειας σε πριονωτή μορφή και την επιδείνωση του φινιρίσματος της [33]. Αντίστοιχα μελέτησε το ίδιο φαινόμενο κατά τη διάρκεια μικροφρεζαρίσματος και ο Kim. Κατά τη διάρκεια της έρευνας του συνέκρινε τον όγκο του αποβλήτου με τον ονομαστικό και τα σημάδια της πρόωσης στο τεμάχιο με την πρόωση ανά δόντι. Έτσι κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το απόβλητο δεν διαμορφωνόταν σε κάθε πέρασμα του κοπτικού οδόντα και αυτό αποδιδόταν στο ελάχιστο πάχος αποβλήτου [34].

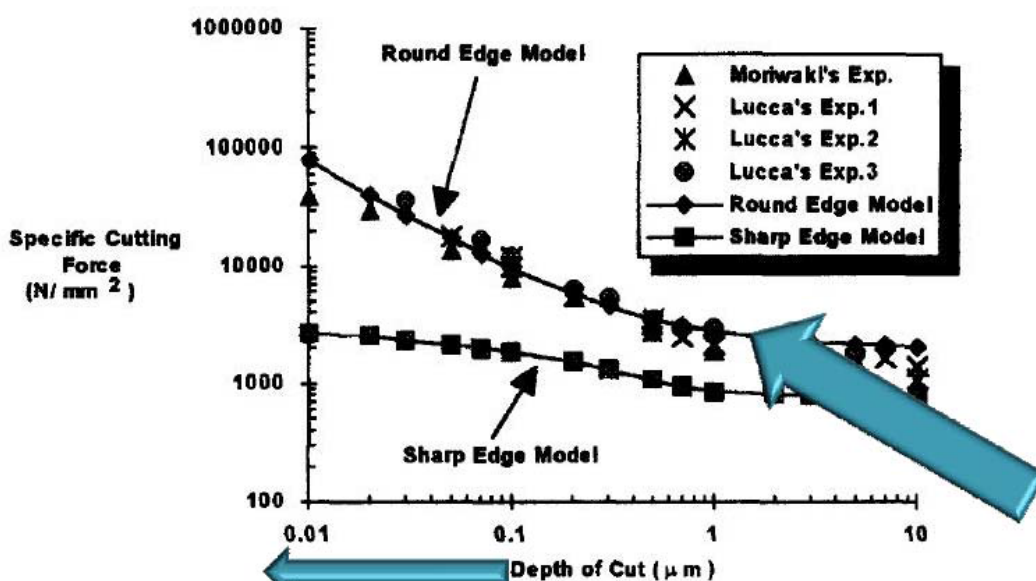
3.10 Επίδραση κλίμακας (Size effect)[9-11,30]

Η μικροκοπή χαρακτηρίζεται από πολύ μικρές ποσότητες υλικού που αφαιρούνται από την επιφάνεια, όπου το πάχος του αποβλήτου κυμαίνεται από μερικά μικρόμετρα μέχρι μερικές εκατοντάδες μικρόμετρα. Σε αυτά τα μεγέθη αφαίρεσης υλικού, αναμένεται να κάνει την εμφάνισή του το φαινόμενο της επίδρασης κλίμακας, γνωστό στη βιβλιογραφία και ως “size effect”. Στις κατεργασίες η επίδραση κλίμακας τυπικά χαρακτηρίζεται από μια μη γραμμική αύξηση της ειδικής ενέργειας ή ειδικής δύναμης όσο το πάχος του αδιαμόρφωτου αποβλήτου μειώνεται. Σε ερευνητικό επίπεδο ουκ ολίγες είναι οι πειραματικές παρατηρήσεις πάνω στην επίδραση κλίμακας που έχουν γίνει σε διαφορετικά υλικά και κάτω από διαφορετικές συνθήκες κοπής.

Οι προσπάθειες που έχουν γίνει για να εξηγήσουν και να προβλέψουν την επίδραση κλίμακας είναι αρκετές. Οι περισσότερες εξηγήσεις που έχουν δοθεί μέχρι σήμερα μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής: 1) η ενίσχυση του υλικού που οφείλεται σε παράγοντες που ποικίλουν ανάλογα με το πάχος του αδιαμόρφωτου αποβλήτου, 2) η παραμόρφωση του υλικού κάτω από την κατεργαζόμενη επιφάνεια, 3) η επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας, 4) η ενέργεια που απαιτείται για να δημιουργηθούν νέες επιφάνειες διαμέσου όλκιμης θραύσης. Το φαινόμενο της επίδρασης κλίμακας στις μικροκοπές φαίνεται καλύτερα στις εικόνες που ακολουθούν:



Εικόνα 3.8: Δύναμη με βάθος κοπής



Εικόνα 3.9: Ειδική δύναμη με βάθος κοπής [35]

Πρόσφατη έρευνα από τον Atkins [37] αποδίδει την επίδραση κλίμακας στην κοπή, στην ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία νέας επιφάνειας μέσω όλκιμης θραύσης. Ο συγγραφέας βρήκε μέσω προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία ότι το έργο είναι κοντά στην τυπική τιμή αντοχής σε θραύση για το υλικό σε μηχανισμούς όλκιμης θραύσης. Υπέδειξε ότι η ενέργεια που απαιτείται για τη διαμόρφωση της νέας επιφάνειας δε μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα στην ανάλυση κοπής μετάλλων. Αυτή η ενέργεια είναι ανεξάρτητη του βάθους κοπής και κατά συνέπεια η συμβολή της στη συνολική ειδική ενέργεια θα πρέπει να αυξηθεί όσο μικραίνουν οι τιμές του πάχους του αδιαμόρφωτου αποβλήτου.

Τελευταίες έρευνες εστιάζουν στη συσχέτιση του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης με την επίδραση κλίμακας. Είναι σαφές, από τη βιβλιογραφία, ότι η επίδραση κλίμακας στη μικροκοπή μπορεί να προκύψει λόγω πολλαπλών μηχανισμών. Είναι επίσης προφανές ότι η επίδραση κλίμακας μπορεί να προκύψει ακόμα και κατά την κοπή με αιχμηρά εργαλεία ή και όταν οι επιπτώσεις της θερμοκρασίας και του ρυθμού παραμόρφωσης αμελούνται (π.χ. για πολύ μικρές ταχύτητες κοπής).

Οι περισσότερες έρευνες συμφωνούν ότι μεγάλο ρόλο στο φαινόμενο παίζει η ακτίνα καμπυλότητας της κοπτικής ακμής. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι για μειούμενο βάθος κοπής, η συμμετοχή των δυνάμεων άρωσης και τριβής στη συνολική δύναμη κοπής είναι αρκετά σημαντική. Οι δυνάμεις αυτές είναι ανεξάρτητες του βάθους κοπής και για το λόγο αυτό σε μικρά βάθη κοπής αποτελούν μεγάλο ποσοστό της συνολικής δύναμης κοπής. Γενικά, η ειδική δύναμη άπωσης αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από ότι η ειδική δύναμη κοπής, για μειούμενο βάθος κοπής. Επιπλέον, η κατάσταση της κοπτικής ακμής, που σχετίζεται με τη φθορά του κοπτικού εργαλείου, επηρεάζει σημαντικά τη δύναμη άπωσης

3.11 Θερμοκρασίες στις Μικροκοπές

Όσον αφορά στις θερμοκρασίες κοπής κατά τη διάρκεια της μικροκοπής, αυτές είναι σημαντικά μικρότερες από τις αντίστοιχες των μακροκατεργασιών. Αυτό οφείλεται στη μικρή ενέργεια κοπής, αλλά και στην αγωγιμότητα των εργαλείων και των κατεργαζόμενων υλικών. Βέβαια, μικρή αύξηση της θερμοκρασίας είναι πολύ σημαντική στις μικροκατεργασίες, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε διαστολή του εργαλείου, του εργαλειοφορείου ή του τεμαχίου, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμό της ακρίβειας που μπορεί να επιτευχθεί με την κατεργασία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ VALIDATION ΜΕ ΤΗ ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΗ ΠΡΟΤΥΠΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό κατασκευάζουμε μοντέλο με τη μέθοδο των Πεπερασμένων στοιχείων και με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου MSC Marc στην έκδοση του 2011 που διαθέτει προς χρήση το εργαστήριο του τομέα Τεχνολογίας των Υλικών.

4.2 Ιστορική αναδρομή και παρουσίαση παρόμοιων εργασιών

Η μελέτη των κοπών αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης των ερευνητών για πάνω από 100 χρόνια. Η πρώτη έρευνα γύρω από τις κοπές μετάλλων πραγματοποιήθηκε από τον Cocquilhat το 1851, ο οποίος εστίασε στις ενέργειες που απαιτούνται για την αφαίρεση υλικού με τη κατεργασία της διάτρησης. Στη συνέχεια ο Tresca το 1873, ήταν ο πρώτος που προσπάθησε να εξηγήσει το τρόπο διαμόρφωσης του αποβλήτου. Έπειτα οι Ernest και Merchant το 1941 ανέπτυξαν πρώτοι το απλούστερο και το πιο διαδεδομένο μοντέλο κοπών που χρησιμοποιείται ακόμα και στις μέρες μας. Το παραπάνω μοντέλο εξελίχθηκε και βελτιώθηκε από τις προσπάθειες των Lee και Shaffer το 1951, όπως επίσης και από τους Kobayashi και Thomsen το 1962. Το επόμενο μεγάλο βήμα συντελέστηκε από τους Oxley και Welsch το 1963 οι οποίοι εισήγαγαν το πρώτο μοντέλο διατμητικής ζώνης με παράλληλες πλευρές διαμόρφωσης αποβλήτου και τη θεωρία προβλεψιμότητας των κατεργασιών. Γνωστά βιβλία έχουν γραφτεί από τον Armerago το 1969, από τον Boothroyd το 1981, τον Shaw το 1984 και τον Trent το 2000. Επίσης χρήσιμες εκδόσεις γύρω από τις εισαγωγικές τους έννοιες, αποτελούν το βιβλίο του Kalpakjian του 2006 [38] και του Degarmo το 1997 [39].

Η πειραματική προσέγγιση για τη μελέτη των μηχανικών κατεργασιών αποτελεί μια ακριβή και χρονοβόρα διαδικασία, ειδικά όταν περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος παραμέτρων όπως τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου, το χρησιμοποιούμενο υλικό, τις συνθήκες κοπής κτλ. Εξαιτίας αυτών των δυσκολιών αναπτύχθηκαν εναλλακτικές προσεγγίσεις, όπως η μαθηματική προσομοίωση που χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση των εκάστοτε ζητημάτων. Από τις παραπάνω αριθμητικές μεθόδους η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων αποδείχτηκε η πιο χρήσιμη και η πιο διαδεδομένη.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων χαρακτηρίζεται από το διαχωρισμό ενός συστήματος σε μικρότερα στοιχεία. Το κάθε στοιχείο παραγράφεται και χαρακτηρίζεται από ιδιότητες σε μητρική μορφή. Από το άθροισμα των παραπάνω στοιχείων προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων από την επίλυση των οποίων μας δίδεται η συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος.

Η βασική ιδέα της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων μελετήθηκε στις αρχές του 1940. Ο Courant το 1943 ανέπτυξε τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων χρησιμοποιώντας τμηματική παρεμβολή πολυωνύμων σε τριγωνικές περιοχές, ώστε να μοντελοποιήσει προβλήματα συστροφής. Ο πρώτος που χρησιμοποίησε τον όρο Πεπερασμένα στοιχεία ήταν ο Clough το 1960. Το πρώτο σύγγραμμα για την θεωρία των Πεπερασμένων Στοιχείων γράφτηκε από τους Ziekiewicz και Cheung το 1967. Στη συνέχεια γράφτηκαν κι άλλα αξιολογικά βιβλία όπως από τον Cook το 1989, τον Mohr το 1992 και από τους Chandrupatla και Belegundu το 2002.

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων έχει εξαιρετική εφαρμογή στη μοντελοποίηση ορθογωνικών κοπών (2D) και λοξών κοπών μετάλλου (3D). Το 1973 ο Klamecki ανέπτυξε ένα από τα πρώτα μοντέλα Πεπερασμένων Στοιχείων για κατεργασίες κοπής μετάλλου, χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο και ελαστοπλαστικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιούσε μια εκσυγχρονισμένη εκδοχή της θεωρίας Lagrange. Ο Usui και ο Shirakashi το 1982 κατασκεύασαν τη πρώτη δισδιάστατη προσομοίωση ορθογωνικής κοπής σε μόνιμη κατάσταση, με τη χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων. Για να το πραγματοποιήσουν χρησιμοποίησαν μια ειδική υπολογιστική μέθοδο, η οποία ονομάστηκε Επαναληπτική Μέθοδο Σύγκλισης. Το 1984 ο Iwata και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν μια μέθοδο αριθμητικής μοντελοποίησης για την επίπεδη ορθογωνική κοπή, στη βάση ενός rigid-plastic μοντέλου, στο οποίο η επίδραση της θερμοκρασίας δεν λαμβάνονταν υπόψη. Στη συνέχεια ο Strenkowski και ο Carroll το 1985 δημιούργησαν ένα αριθμητικό μοντέλο ορθογωνικής κοπής χωρίς προσχηματισμένο απόβλητο. Το μοντέλο τους βασίστηκε σε κώδικα updated Lagrange επικεντρωμένο στις μεγάλες παραμορφώσεις. Το 1991 οι Κομβόπουλος και Egrenbeck εισήγαγαν εάν κριτήριο διαχωρισμού του αποβλήτου, χρησιμοποιώντας τις απόψεις του distance tolerance criterion για να μελετήσουν το σχηματισμό του αποβλήτου. Ο Liu με τον Lin το 1992 εισήγαγαν ένα κριτήριο διαχωρισμού του αποβλήτου χρησιμοποιώντας τα επιχειρήματα της ενέργειας παραμόρφωσης. Η μελέτη τους επικεντρώθηκε στη γεωμετρία του αποβλήτου, στις παραμένουσες τάσεις στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου, στη κατανομή των θερμοκρασιών στο απόβλητο και δυνάμεις κοπείς του κοπτικού εργαλείου. Ο Ceretti το 1996 κατασκεύασε ένα μοντέλο κοπής, το οποίο αφαιρούσε στοιχεία, όταν αυτά έφταναν τη κρίσιμη τιμή του κριτηρίου της συσσωρευτικής καταστροφής (accumulated damage critical value).[11]

Με εξέλιξη της τεχνολογίας και την αλματώδη πρόοδο που συντελέστηκε στον τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των εμπορικών λογισμικών προσομοιώσεων Πεπερασμένων Στοιχείων, ξεπεράστηκαν αρκετοί περιορισμοί στη μοντελοποίηση και στις υπολογιστικές δυσκολίες του παρελθόντος. Έτσι δόθηκε η δυνατότητα στους ερευνητές να εστιάσουν τις μελέτες τους σε πιο εξειδικευμένα ζητήματα όπως στις δισδιάστατες προσομοιώσεις κοπών μετάλλων. Ο Bil το 2004 [10] συνέκρινε τα αποτελέσματα προσομοιώσεων κοπών με τη χρήση τριών διαφορετικών λογισμικών Πεπερασμένων στοιχείων (MSC Marc, Thirdwave Advantedge και το Deform 2D), με τα αποτελέσματα πειραμάτων. Έπειτα οι Ozel και Felice το 2004, χρησιμοποίησαν το Deform 2D, για να μελετήσουν την επίδραση διαφορετικών μοντέλων τριβής στα αποτελέσματα των κοπών. Ο Atanasio το 2008 ανέπτυξε μια προοδευτική προσέγγιση για τη μοντελοποίηση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας της διαφάνειας κοπτικού εργαλείου-αποβλήτου. Στις αριθμητικές του προσομοιώσεις χρησιμοποίησε το Deform 3D για να μελετήσει

τη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Έπειτα το 2009 οι Davim και Maranhο χρησιμοποίησαν το πρόγραμμα MSC.Marc για να διερευνήσουν τις πλαστικές παραμορφώσεις και την επίδραση του ρυθμού πλαστικών παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια κατεργασιών υψηλής ταχύτητας (High Speed Machining-HSM). Ο Kilicaslan το 2009 [11] κατασκεύασε ένα μοντέλο ορθογωνικής κοπής και μελέτησε την επίδραση στα αποτελέσματα κοπής τριών δριαφορετικών μοντέλων υλικού (Oxley,Johnson-Cook, και Zerilli-Armstrong) με τη χρήση του λογισμικού Abaqus.

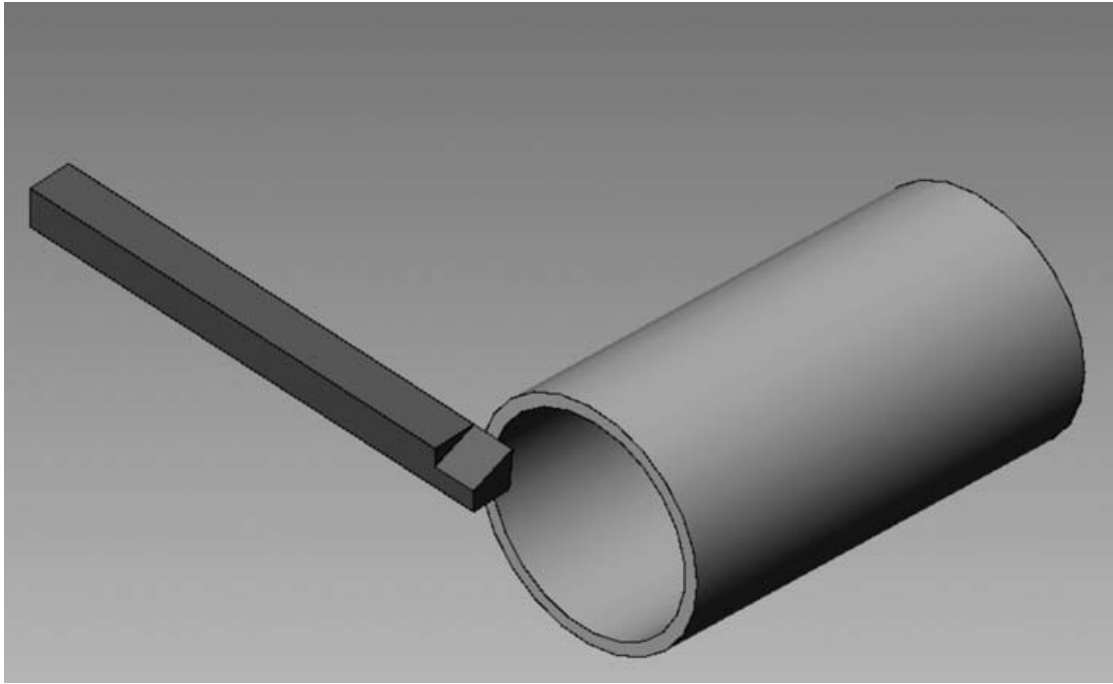
4.3 Πειραματική διαδικασία

Στην εργασία του Halil Bil διεξήχθη και μελετήθηκε η κατεργασία της τόννευσης[10]. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή την εργασία αποτέλεσαν αντικείμενο περαιτέρω μελέτης καθώς επίσης και αυτά που θα συγκριθούν με το μοντέλο της Μεθόδου των Πεπερασμένων της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τα στοιχεία προς σύγκριση είναι τα ακόλουθα:

- οι δυνάμεις κοπής
- οι δυνάμεις άπωσης
- το μήκος επαφής στην πλευρά κόψης αποβλήτου-κοπτικού εργαλείου
- το πάχος αποβλήτου

Μετά τη διεξαγωγή της τόννευσης, τα παραχθέντα απόβλητα μετρήθηκαν σε μικροσκόπιο ως προς τους γεωμετρικούς παράγοντες όπως, τη γωνία διάτμησης κτλ. Η πειραματική διαδικασία έλαβε χώρα σε τόρνο. Η τόννευση ήταν μετωπική όποτε την κοπή μπορούμε να τη θεωρήσουμε ορθογωνική. Αυτή την κοπή θα προσομοιώσουμε με τα μοντέλα μας χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Το κατεργαζόμενο τεμάχιο ήταν κυλινδρικό και κούφιο από μέσα με διάμετρο εξωτερικά 56 mm και εσωτερικά 51,1 mm. Η πρόωση είχε επιλεγεί από τις διαθέσιμες επιλογές του τόρνου, ίση με 0,1 mm/rev στο πρώτο και 0,05 mm/rev στο δεύτερο πείραμα. Η ταχύτητα περιστροφής του τόρνου ήταν 125 rpm και στις δύο περιπτώσεις. Η ταχύτητα κοπής v (m/min) δίδεται από τη σχέση:

$$v = \pi D n \quad (3.1)$$



Εικόνα 4.1: Η Ορθογωνική τόννευση

Στην πράξη οι μονάδες που χρησιμοποιούνται είναι D σε (mm), n σε (rpm). Οπότε η εξίσωση παίρνει την μορφή $v = \pi D n / 1000$ (mm/min). Συνεπώς για τη τόννευση ίσχυε ταχύτητα κοπής 21,6 m/sec.

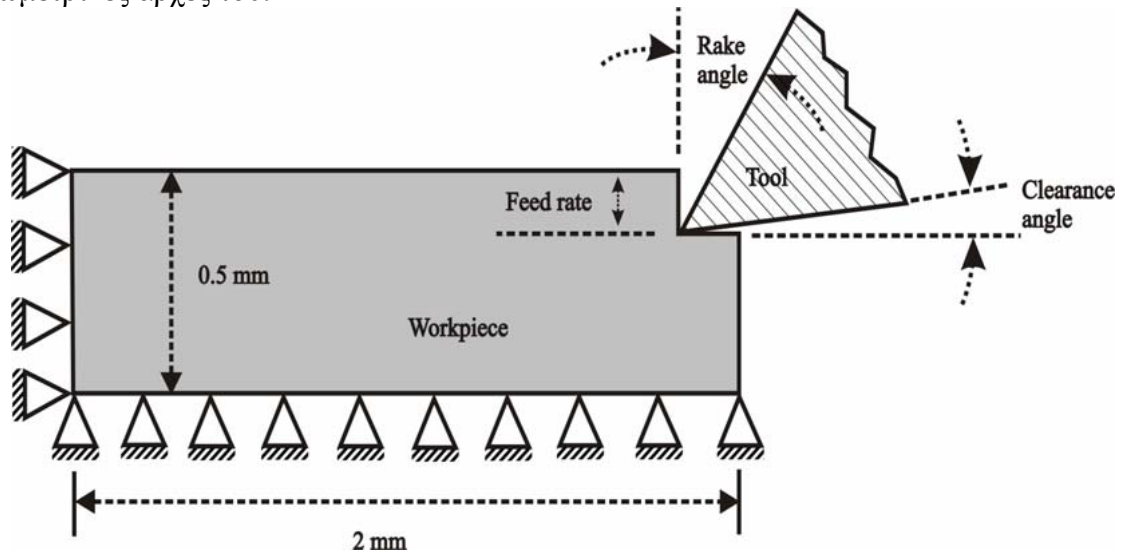
4.4 Κατασκευή μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων με το MSC Marc

4.4.1 Σχεδίαση του τεμαχίου.

Κατασκευάζουμε ένα μοντέλο επίπεδης παραμόρφωσης με συνδυασμό θερμομηχανικών ιδιοτήτων και με ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Η υπόθεση επίπεδης παραμόρφωσης είναι έγκυρη εάν το πάχος κοπής είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το πάχος απαραμόρφωτου αποβλήτου. Το μοντέλο κατασκευάζεται με ύψος κοπής 10 φορές μεγαλύτερο από το πάχος αποβλήτου και με μήκος 20 φορές την πρόωση. Με αυτό τον τρόπο τα προβλεπόμενα αποτελέσματα δε θα είναι ευαίσθητα στις οριακές συνθήκες της μετατόπισης και βεβαιώνουμε ότι θα έχει επέλθει η μόνιμη κατάσταση. Ακόμα χάρις σε αυτές τις συνθήκες ικανοποιείται και η συνθήκη επίπεδης παραμόρφωσης.

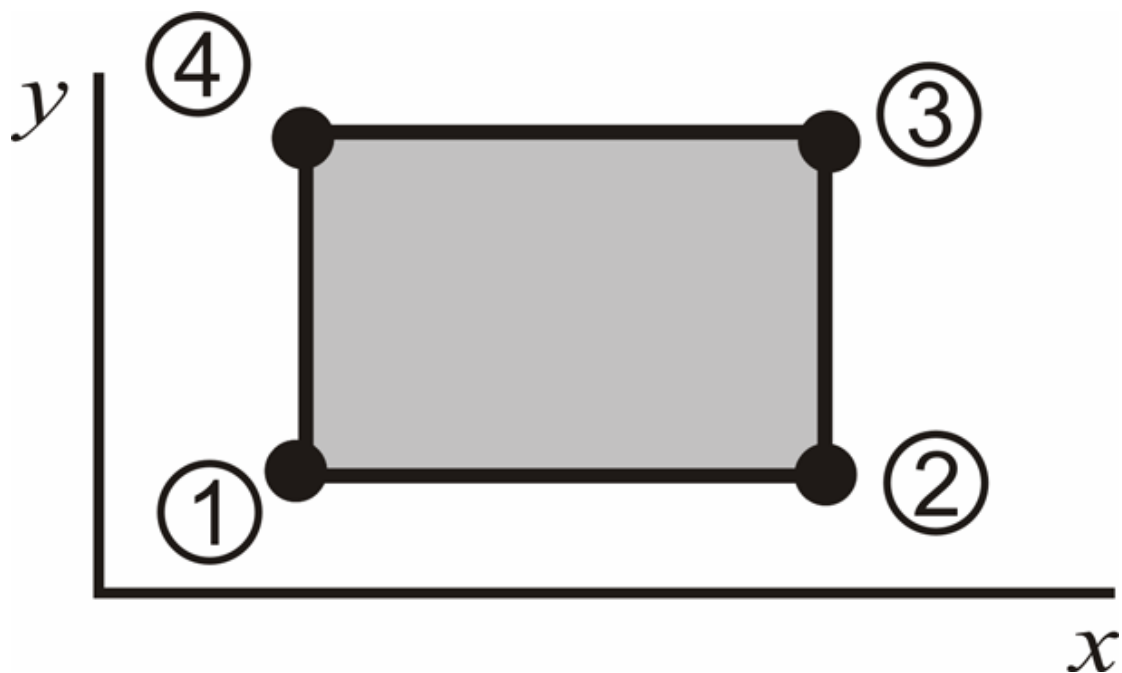
Στην παρακάτω εικόνα εμφανίζεται το μοντέλο σχεδιασμένο για εισαγωγή στο Marc. Το δοκίμιο έχει διαστάσεις 2 mm σε πλάτος και 0,5 mm σε ύψος. Το δοκίμιο σχεδιάζεται πακτωμένο, έτσι ώστε οι κόμβοι και τα στοιχεία που βρίσκονται στη βάση και στη πλάγια επιφάνεια να είναι πακτωμένα. Συνεπώς δεν μπορούν να κινηθούν κατά τη διεύθυνση των αξόνων x, y . Για να επιτύχουμε το παραπάνω σχεδιάζουμε τοιχία που τα λογίζουμε ως άκαμπτες καμπύλες για την βάση και την αριστερή επιφάνεια που βρίσκονται σε επαφή με το τεμάχιο. Αυτό θα μπορούσαμε να το επιτύχουμε και με τη χρήση οριακών συνθηκών. Όμως, το MSC.Marc παρουσίαζε

αρκετές δυσκολίες λόγω της επιλογής global remeshing, οπότε το αποφύγαμε με τη χρήση των τοιχιών. Τα άκαμπτα τοιχία είχαν διαστάσεις μεγαλύτερες του τεμαχίου και εκτίνονταν κατά 0.1 mm σε κάθε διάσταση. Η πάνω επιφάνεια καθώς και η δεξιά του δοκιμίου παρέμειναν ελεύθερες για τη ροή του υλικού και το σχηματισμό του αποβλήτου. Ακόμα το κατεργαζόμενο τεμάχιο σχεδιάστηκε με βάθος 1,45 mm ως προς τη τρίτη διάσταση. Ακολουθεί το σχέδιο του δοκιμίου με τις βασικές γεωμετρικές αρχές του.



Εικόνα 4.2: Η Γεωμετρία του δοκιμίου μας [10]

Για τη διακριτοποίηση του τεμαχίου χρησιμοποιούμε αρχικά 451 κόμβους και 400 τετράπλευρα στοιχεία τύπου 11 (Advancing Front Quad) από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος. Τα παραπάνω στοιχεία έχουν ευρεία εφαρμογή σε εφαρμογές επίπεδων παραμορφώσεων και παράδειγμα της γεωμετρίας του φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.

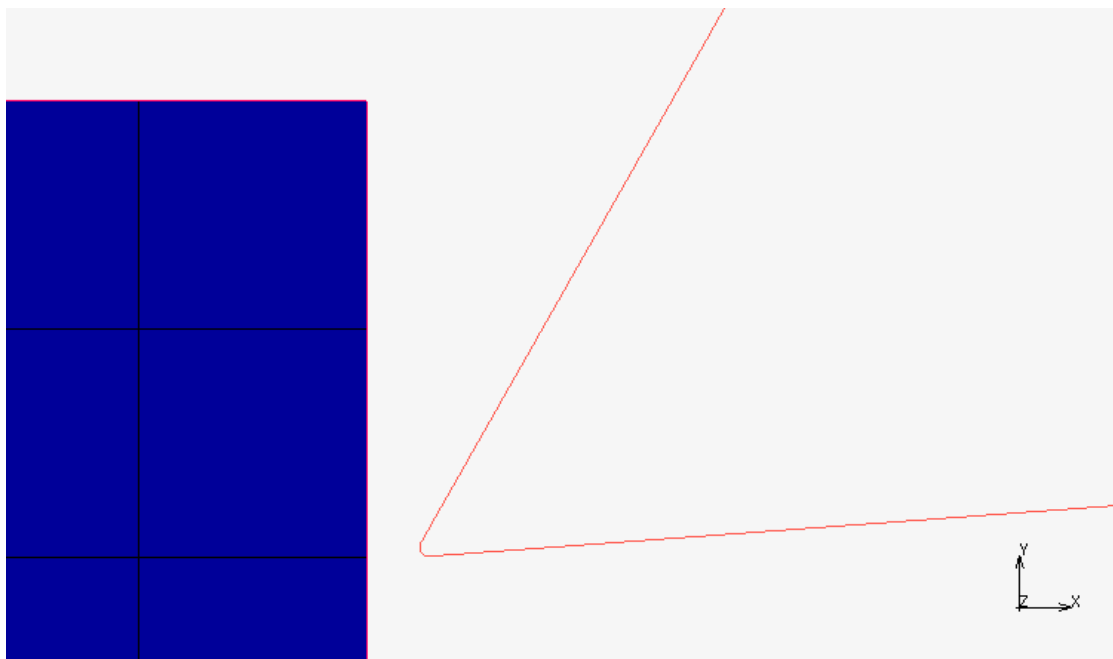


Εικόνα 4.3: Τετράπλευρο στοιχείο

Στη συνέχεια για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων εκμεταλλευόμενοι τη λειτουργία του Autoremeshing θα αυξήσουμε τον αριθμό των στοιχείων στις 5000. Τότε κάθε στοιχείο θα έχει διαστάσεις πλευράς 0,014 από 0,05 mm που είχε αρχικά.

4.4.2 Σχεδίαση του κοπτικού εργαλείου

Για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων θεωρούμε ότι το κοπτικό εργαλείο δεν μπορεί να παραμορφωθεί. Συνεπώς, θα θεωρηθεί άκαμπτο για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης της κοπής και θα το ορίσουμε ως καμπύλη. Για τη σχεδίαση, χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό πρόγραμμα της Autodesk, Autocad. Με τη χρήση του παραπάνω σχεδιαστικού προγράμματος ήταν ευκολότερη η εύρεση των συντεταγμένων των σημείων του εργαλείου. Η κορυφή της μύτης του κοπτικού ορίστηκε ως το σημείο (2.01,0.4,0) για πρόωση 0,1 και το (2.01,0.45) για πρόωση 0,05. Οι γεωμετρικές παράμετροι του εργαλείου μας είναι η γωνία ελευθερίας, η γωνία αποβλήτου και η καμπυλότητα της κοπτικής ακμής. Από τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου έχουμε γωνία ελευθερίας $\alpha=5^\circ$ και γωνία αποβλήτου $\gamma=25^\circ$. Τα σημεία του κοπτικού με τη παραπάνω γεωμετρία έχουν συντεταγμένες (2.53,1.31,0) και (3.36,0.5,0) για το πάνω όριο και το δεξιά αντίστοιχα. Η κοπτική ακμή σχεδιάστηκε με ακτίνα 0,002 mm κάνοντας fillet στην κοπτική ακμή της. Το κοπτικό εργαλείο έχει την παρακάτω μορφή:

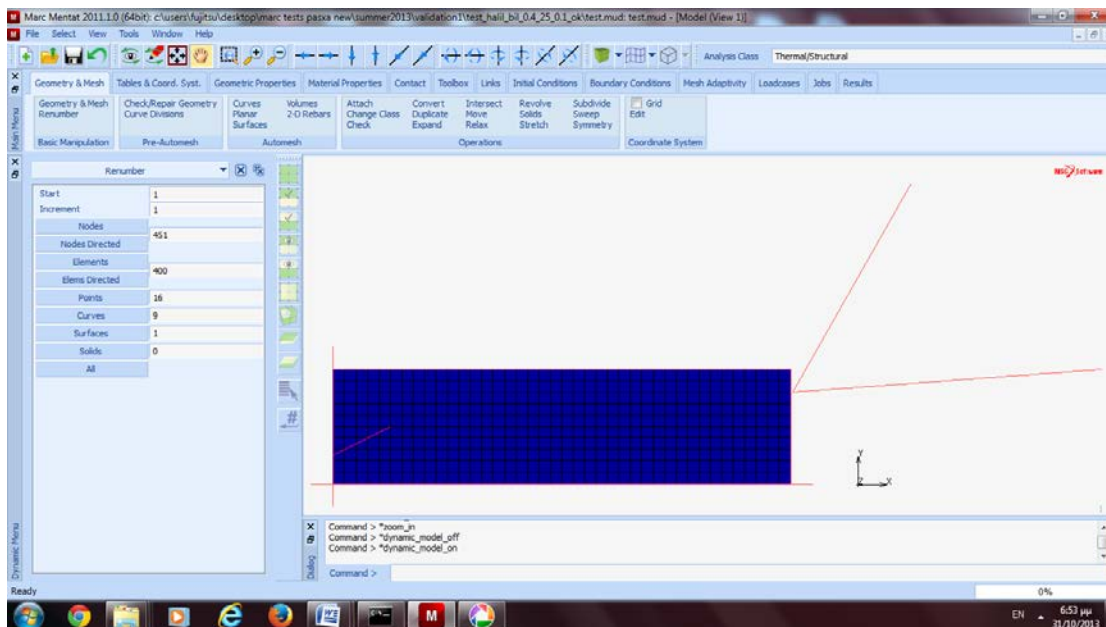


Εικόνα 4.4: Η καμπύλη κοπτική ακμή του κοπτικού εργαλείου

Γωνία αποβλήτου $\gamma(^{\circ})$	Γωνία ελευθερίας α $(^{\circ})$	Ακτίνα κοπτικής ακμής (mm)
25	5	0,002

Πίνακας 4.1: Γεωμετρικοί παράμετροι κοπτικού εργαλείου

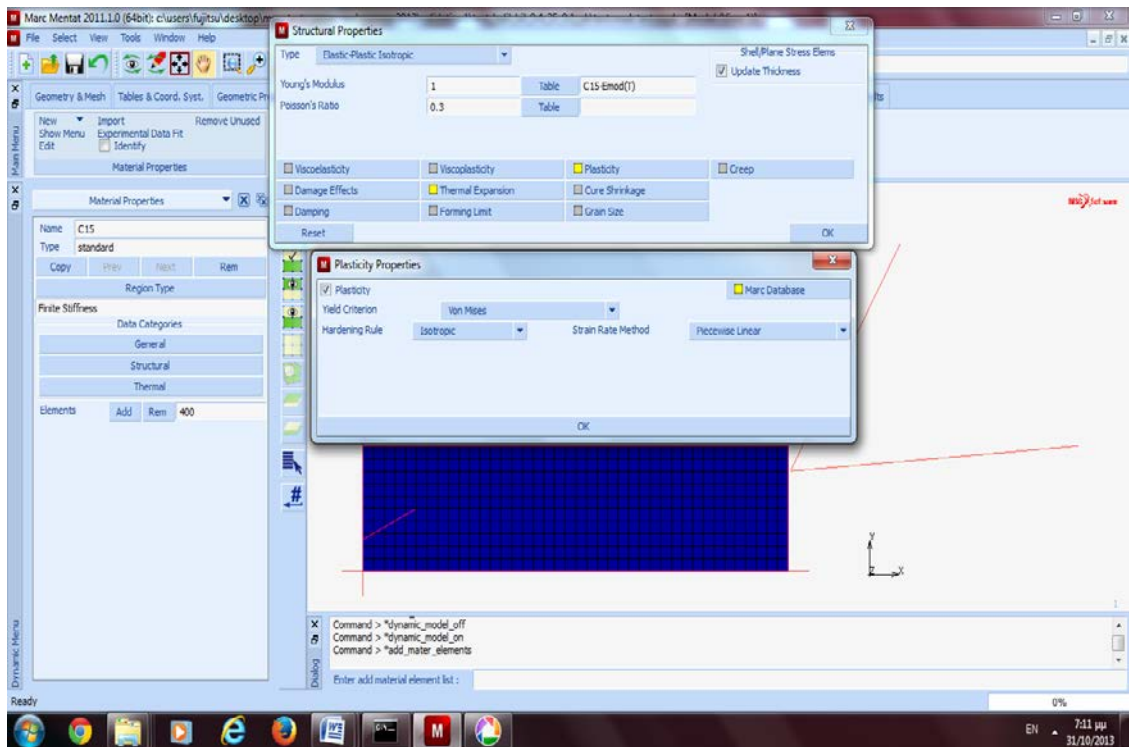
Λαμβάνοντας υπόψη τη σχεδίαση του τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου προκύπτει η παρακάτω εικόνα του μοντέλου :



Εικόνα 4.5: Το βασικό μοντέλο στο MSC. Marc

4.5 Γεωμετρικές ιδιότητες και ιδιότητες υλικού του τεμαχίου

Στη συνέχεια ορίζουμε το υλικό του μοντέλου. Το δοκίμιο της εργασίας είναι ένας "κούφιος" κύλινδρος κατασκευασμένος από χάλυβα C15. Αυτός είναι χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ή μαλακός χάλυβας και η αντίστοιχη ονομασία του κατά το πρότυπο AISI είναι 1015. Η εξωτερική και η εσωτερική διάμετρος του δοκιμίου είναι 56 και 53,1mm αντίστοιχα. Συνεπώς, το βάθος κοπής ισούται με 1.45mm. Για την εισαγωγή και τον ορισμό του χάλυβα χρησιμοποιήσαμε την βιβλιοθήκη υλικών του MSC Marc όπως φαίνεται παρακάτω:



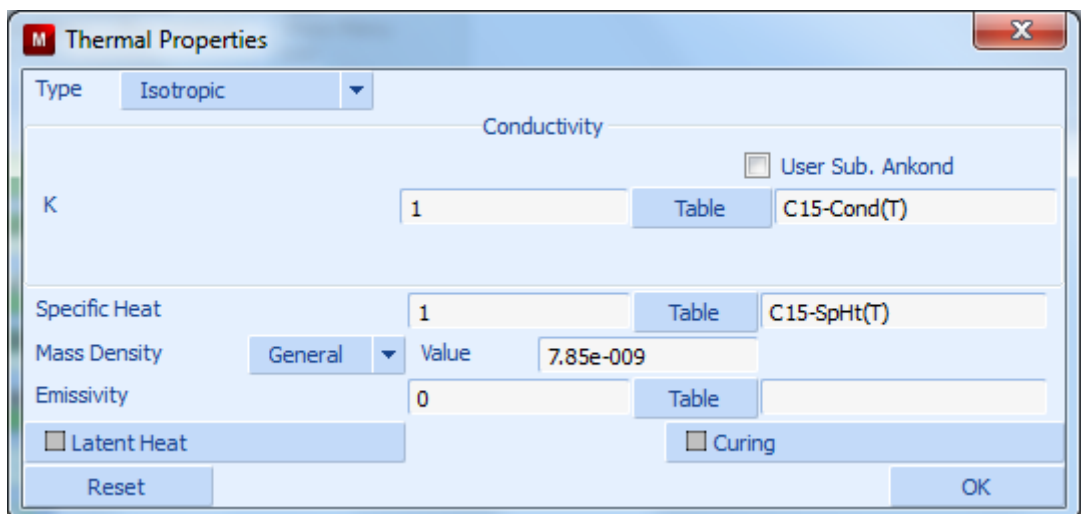
Εικόνα 4.6: Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικού στο MSC Marc.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η χημική σύσταση του χάλυβα C15.

C	Si	Mn
0.15	0.20	0.45

Πίνακας 4.2: Χημική σύσταση του χάλυβα C15 % w/w

Μετά την ολοκλήρωση και τον ορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων υλικού εισάγουμε τις θερμικές ιδιότητες που θα ληφθούν υπόψη κατά τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων και αφορούν το χάλυβα C15:

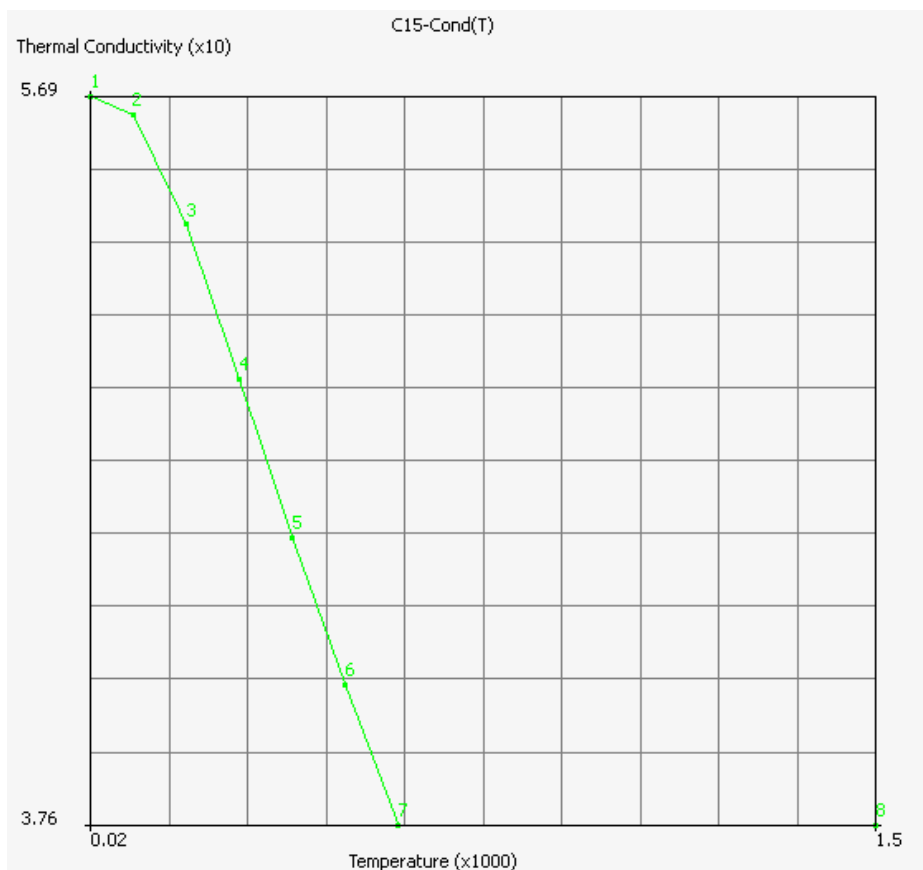


Εικόνα 4.7: Εισαγωγή θερμικών ιδιοτήτων του υλικού

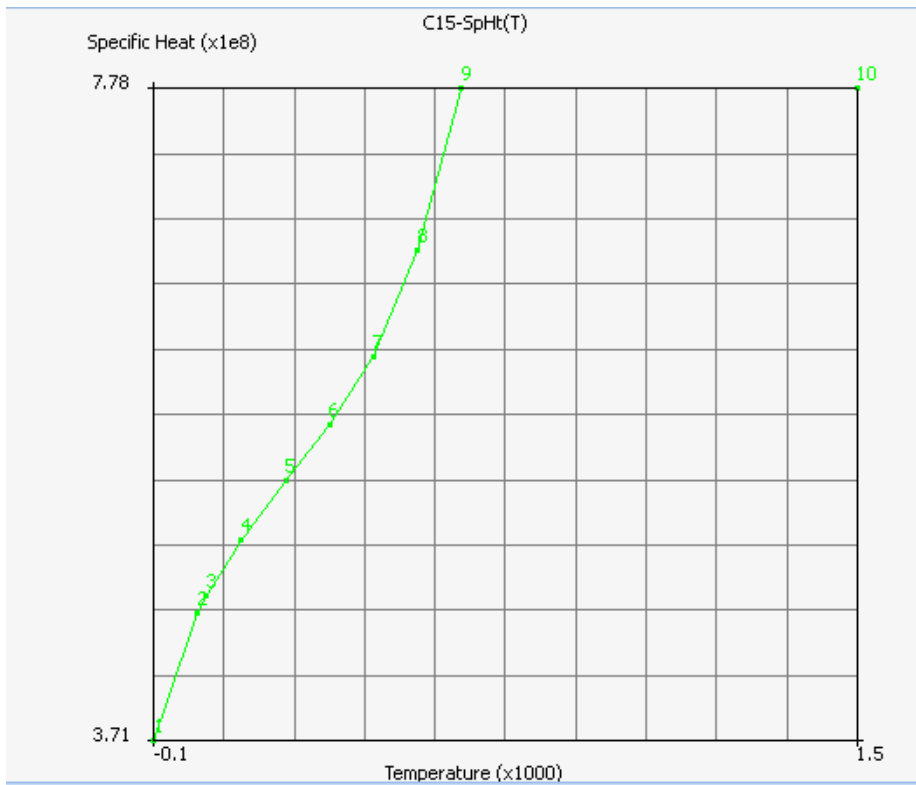
Λόγος Poisson	Πυκνότητα (gr/ cm ³)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/m.K)	Ειδική Θερμότητα (J/g.K)	Συντελεστής Θερμικής Διαστολής(m/m.K)
0,3	7,85	210	58,6	0,46	14,9x10 ⁻⁶

Πίνακας 4.3: Μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του χάλυβα C15[10]

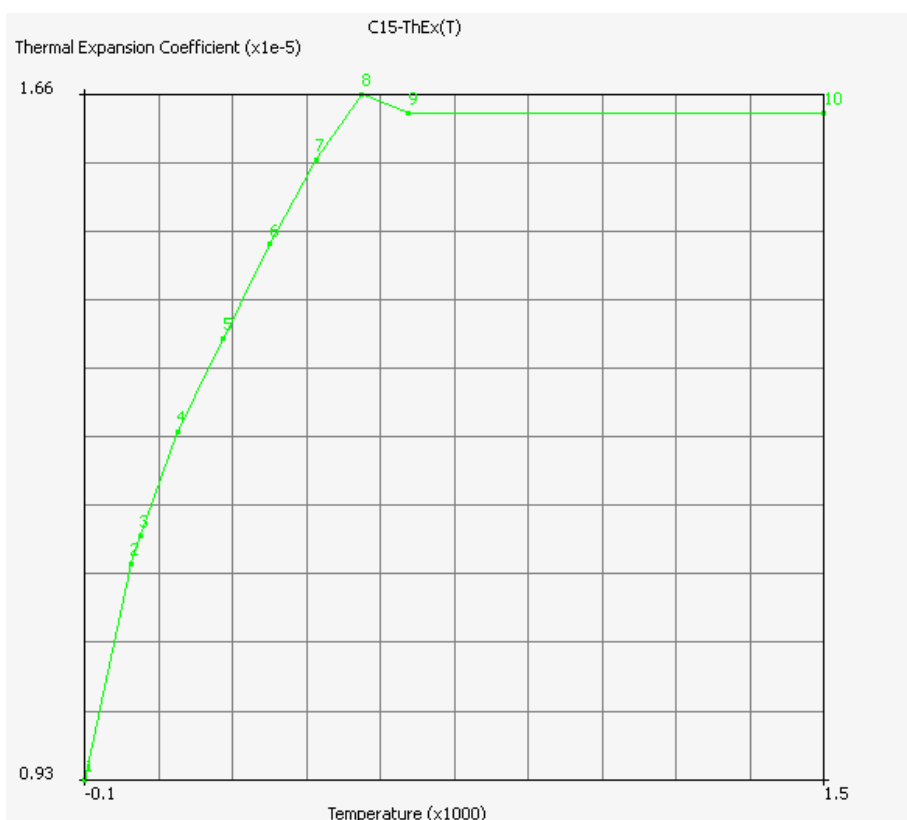
Για τις θερμικές ιδιότητες του χάλυβα C15 λάβαμε υπόψη τους πίνακες θερμικών ιδιοτήτων της βιβλιοθήκης του MSC.Marc που αφορούν την θερμική αγωγιμότητα, την ειδική θερμότητα και το συντελεστή θερμικής διαστολής του υλικού. Οι παραπάνω θερμικοί παράγοντες εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και απαιτούνται για τους υπολογισμούς που αφορούν την μεταφορά θερμότητας. Οι πίνακες παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 4.8: Θερμική αγωγιμότητα



Εικόνα 4.9: Ειδική θερμότητα



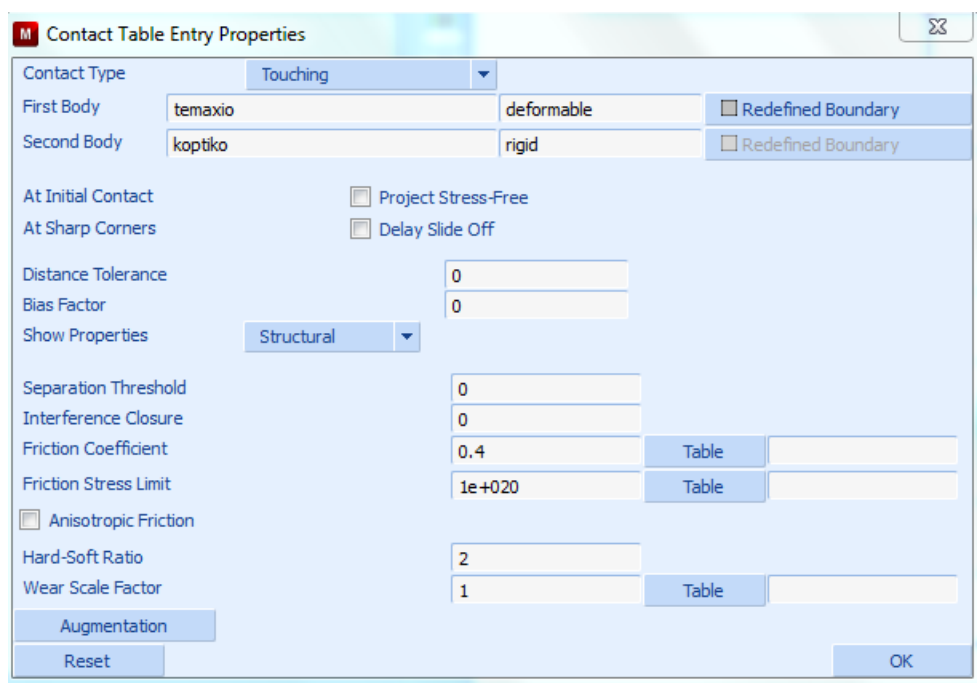
Εικόνα 4.10: Συντελεστής Θερμικής Διαστολής

4.6 Ορισμός των επαφών και των αρχικών συνθηκών.

Έπειτα ορίζουμε τις επαφές μεταξύ των επιφανειών και τις αρχικές συνθήκες όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:

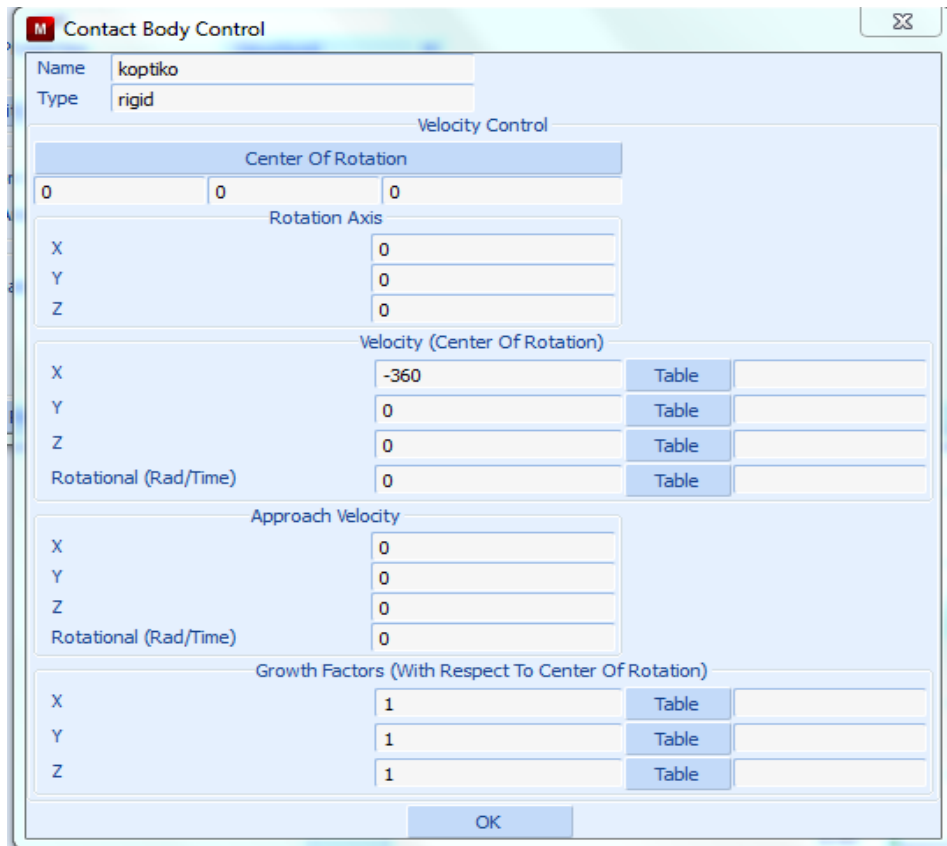


Εικόνα 4.11: Ορισμός επαφών επιφανειών και των ιδιοτήτων τους



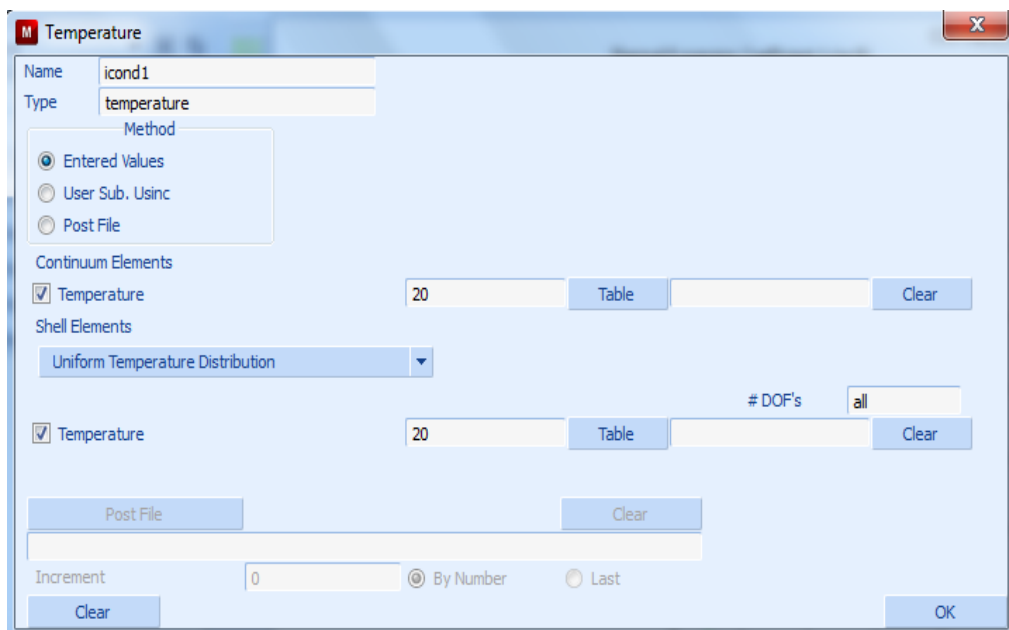
Εικόνα 4.12: Ιδιότητες επαφής

Από την καρτέλα των επαφών ορίζουμε και την ταχύτητα του κοπτικού μας εργαλείου. Το κοπτικό κινείται με ταχύτητα $U_x = 21,6 \text{ m}/60 \text{ sec} = -360 \text{ mm}/\text{sec}$ κατά την διεύθυνση του άξονα των x.



Εικόνα4.13: Σχετική ταχύτητα κοπτικού εργαλείου.

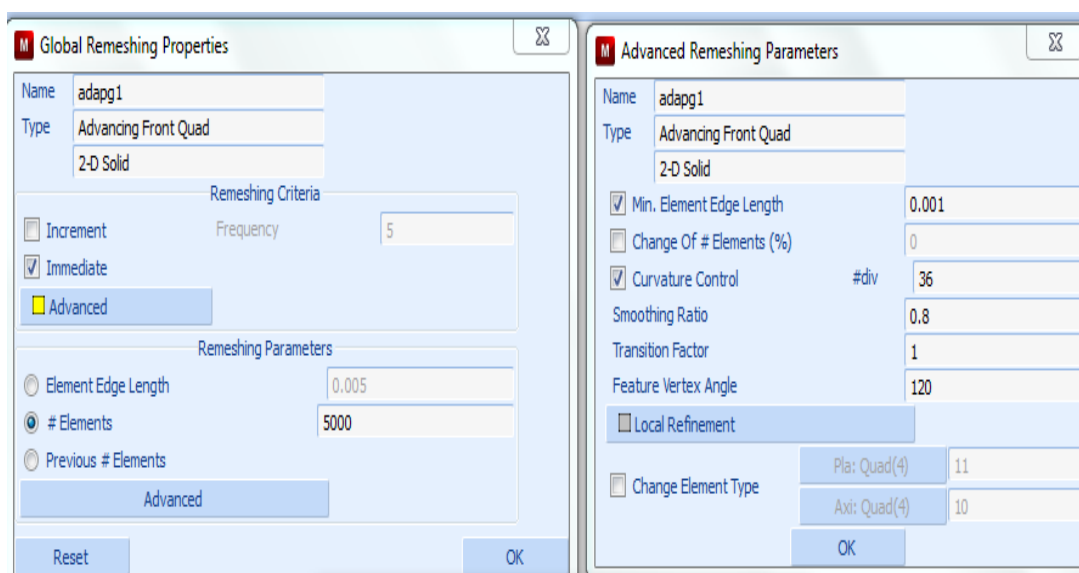
Για τις αρχικές συνθήκες θεωρούμε ότι η κατεργασία λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία δωματίου 20°C και ότι η θερμοκρασία είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Τα δεδομένα εισάγονται στην παρακάτω καρτέλα όπως φαίνεται στην εικόνα:



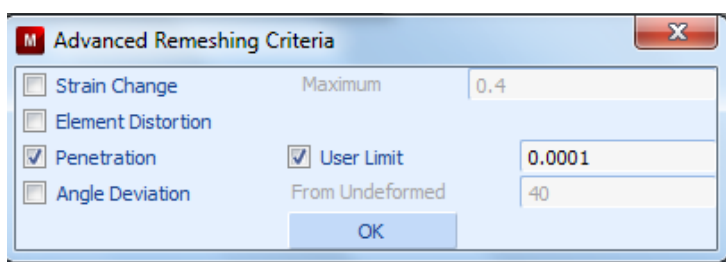
Εικόνα 4.14: Εισαγωγή αρχικής θερμοκρασίας τεμαχίου

4.7 Προσαρμογή του πλέγματος (Mesh Adaptivity)

Έπειτα σειρά παίρνει ο καθορισμός του πλέγματος καθώς επίσης και ο ορισμός των παραμέτρων του global remeshing. Ο τύπος του πλέγματος επιλέχθηκε να είναι τετραγωνικός Advancing Front Quad. Στη συνέχεια ορίζεται το penetration ίσο με 0,0001 που προέκυψε μετά από σειρά δοκιμών. Ο αριθμός των στοιχείων του πλέγματος καθορίστηκε στις 5000 με άμεσο remeshing. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι τα 400 αρχικά στοιχεία του τεμαχίου αυξάνονται στις 5000 με την εκκίνηση της σχετικής κίνησης του κοπτικού εργαλείου. Προτιμήθηκε έναντι του remeshing με την πρώτη επαφή λόγω ατελειών που παρουσιαζόντουσαν στο φινίρισμα της επιφάνειας του τεμαχίου. Ακόμα ορίζεται το ελάχιστο μήκος στοιχείου σε 0,001. Έτσι κατορθώσαμε να εφαρμοστεί τοπική αύξηση της πυκνότητας των στοιχείων για να αποδοθεί καλύτερα η μικροκοπή. Η εισαγωγή των στοιχείων δίδεται στις παρακάτω εικόνες.



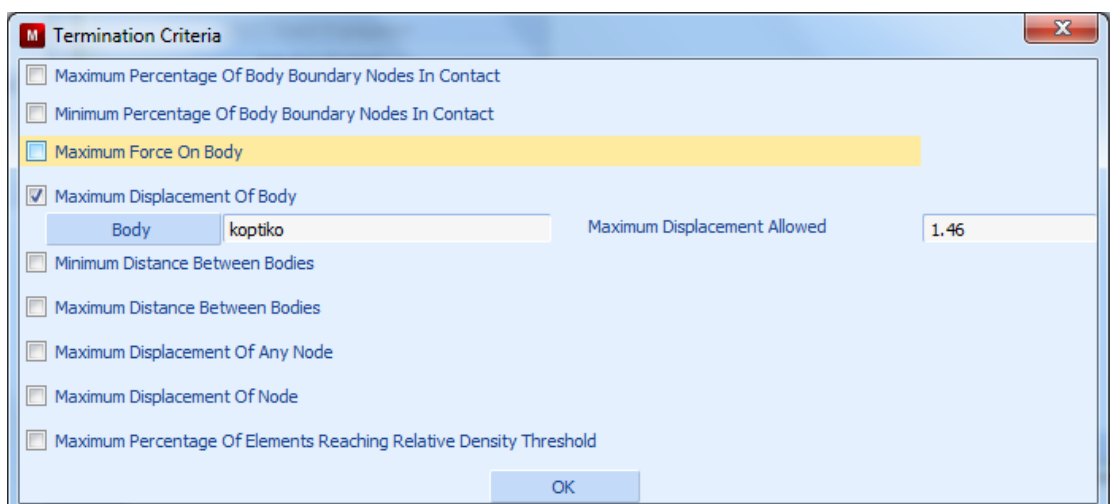
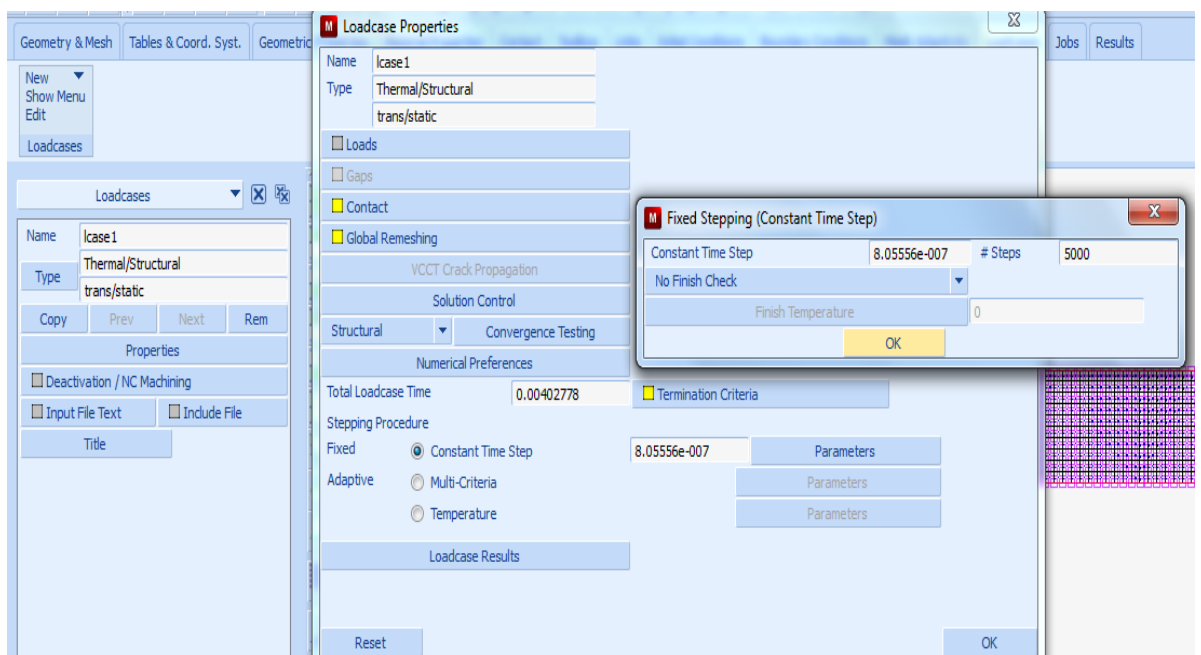
Εικόνα 4.15: Εισαγωγή ιδιοτήτων και παραμέτρων του remeshing



Εικόνα 4.16: Καθορισμός του Penetration

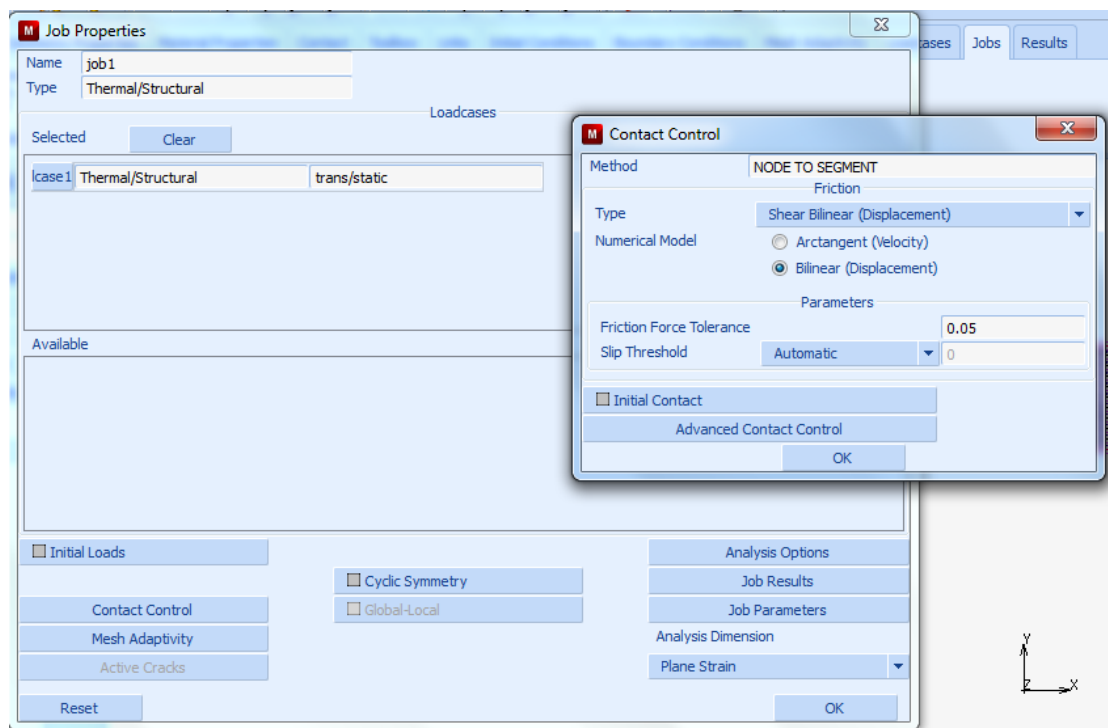
4.8 Ιδιότητες φόρτισης

Για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων, το επόμενο βήμα ήταν ο ορισμός των ιδιοτήτων των φορτίσεων. Στο βήμα αυτό συνοψίζονται τα προηγούμενα βήματα και ορίζονται αυτά που θα ληφθούν υπόψη. Έτσι ορίζεται ο χρόνος που θα χρειαστεί για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, ίσος με $t=$



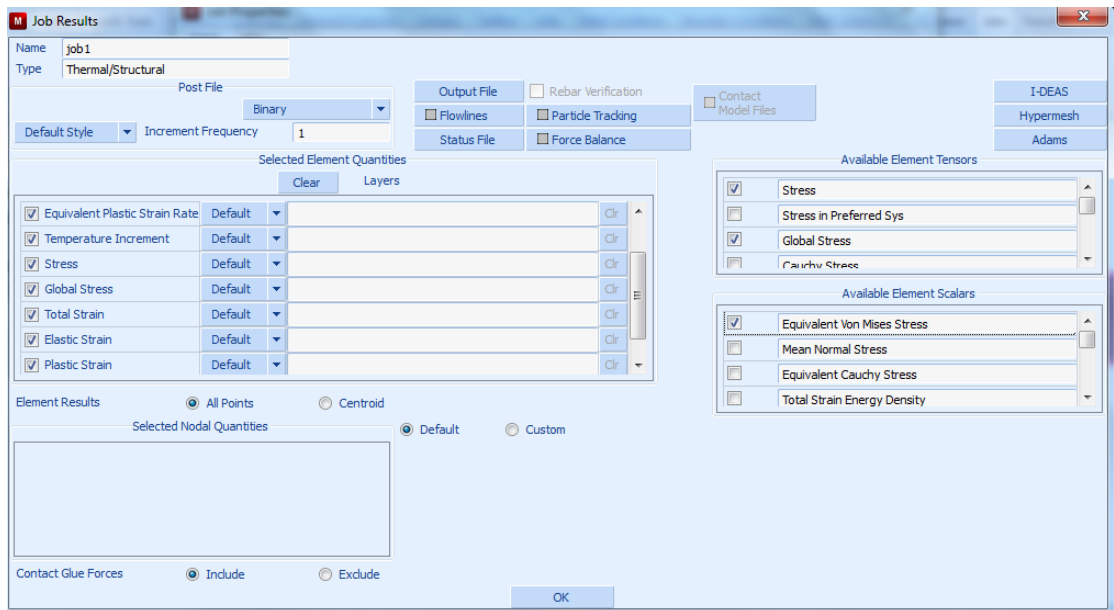
4.9 Τελική ρύθμιση και εκκίνηση της προσομοίωσης

Οι τελικές ρυθμίσεις πριν την εκκίνηση της προσομοίωσης του μοντέλου, λαμβάνουν χώρα στην καρτέλα Jobs. Στην καρτέλα αυτή θα γίνει ο τελευταίος έλεγχος των ρυθμίσεων μας καθώς επίσης θα ρυθμιστούν και οι τελευταίες παράμετροι. Στις διαθέσιμες χρήσιμες ρυθμίσεις συγκαταλέγονται ο ορισμός μέγιστου αριθμού κόμβων και στοιχείων από την επιλογή Mesh Adaptivity. Στην επιλογή Contact Control ρυθμίζονται παράμετροι χρήσιμες για την επαφή των δύο σωμάτων όπως ο τύπος του συντελεστή τριβής, οι ανοχές της και η μέθοδο που θα ακολουθηθεί. Ο ορισμός των παραπάνω φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



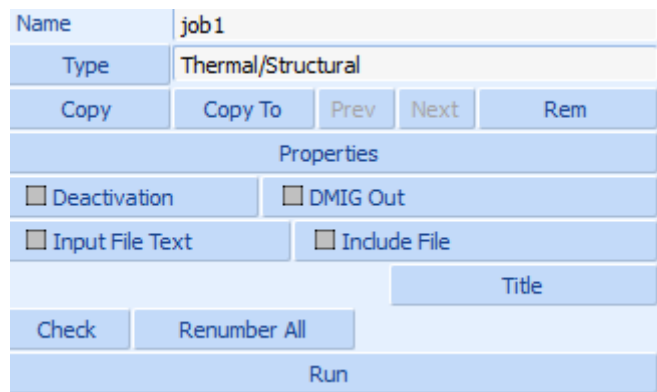
Εικόνα 4.19: Ιδιότητες της εργασίας

Ακόμα μέσω της επιλογής Job Results ρυθμίζουμε τις μεταβλητές που θα προκύψουν από την προσομοίωση. Στα αποτελέσματα αυτά συγκαταλέγονται μονόμετρα μεγέθη όπως θερμοκρασίες και παραμορφώσεις, καθώς επίσης και διανυσματικά μεγέθη όπως δυνάμεις και τάσεις. Η επιλογή των παραμέτρων που θα μελετηθούν φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.20: Επιλογή των μεταβλητών των αποτελεσμάτων

Τέλος, πριν την εκκίνηση της εκάστοτε προσομοίωσης, γίνεται ο έλεγχος για τυχόν σφάλματα και επιδιόρθωση του κώδικα πριν το ξεκίνημα της προσομοίωσης με το πάτημα της επιλογής Run, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 4.21: Τελευταίος έλεγχος και εκκίνηση της προσομοίωσης

4.10 Διεξαγωγή Προσομοιώσεων

Μετά την ολοκλήρωση και τη κατασκευή των μοντέλων, διεξάγονται δύο προσομοιώσεις με δύο διαφορετικές τιμές πρόωσης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν τα συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων, καθώς επίσης και με τις τιμές των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων της εργασίας του Halil Bil. Οι συνθήκες των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

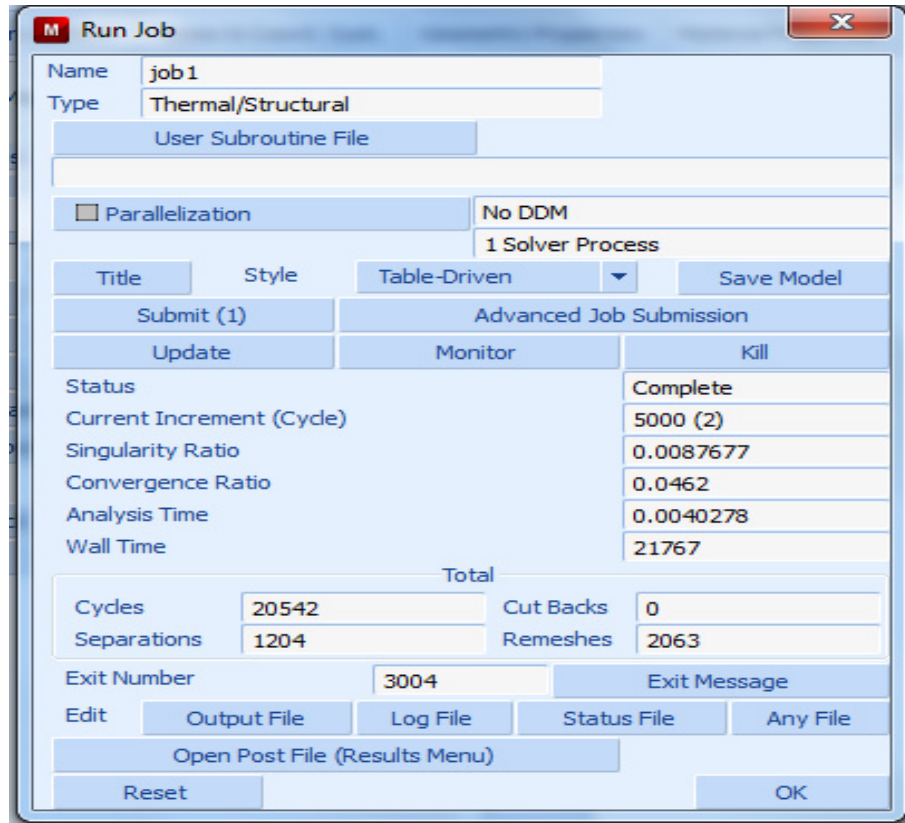
Γωνία Αποβλήτου, γ°	Γωνία ελευθερίας, α°	Συντελεστής τριβής, μ	Ταχύτητα κοπής, V_c (m/min)	Ρυθμός Πρόωσης, f (mm/rev)	Βάθος Κοπής
0	5°	0,4	21,6	0,05 0,1	1,45

Πίνακας 4.4: Συνθήκες Προσομοιώσεων

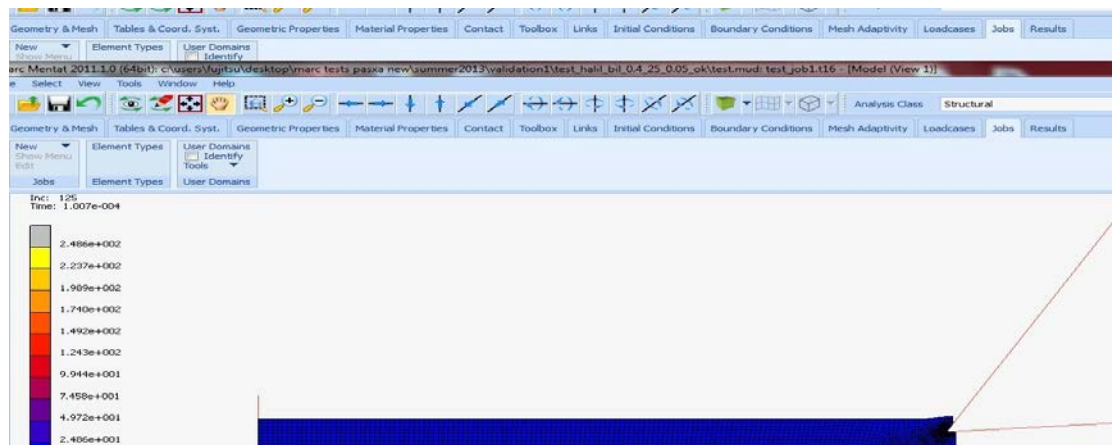
Πρώτη Προσομοίωση Μοντέλου

Shear Bilinear με $f=0,05$, $\gamma=25^\circ$ $m=0,4$

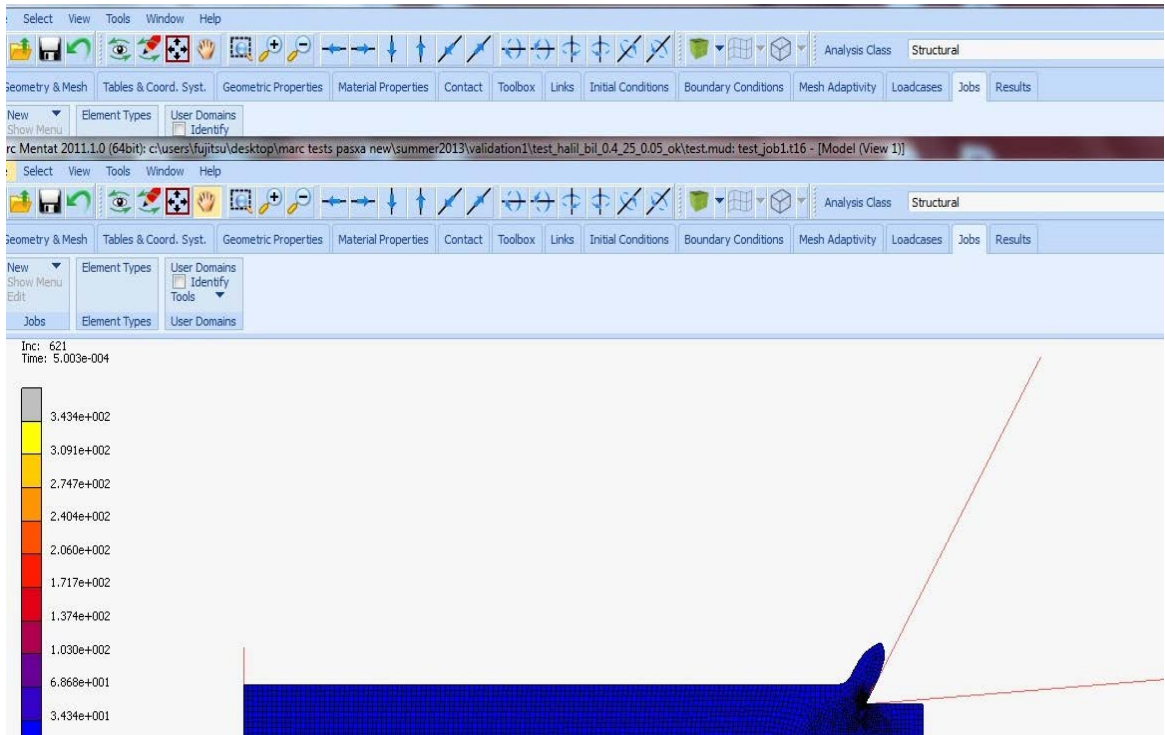
Στοιχεία προσομοίωσης



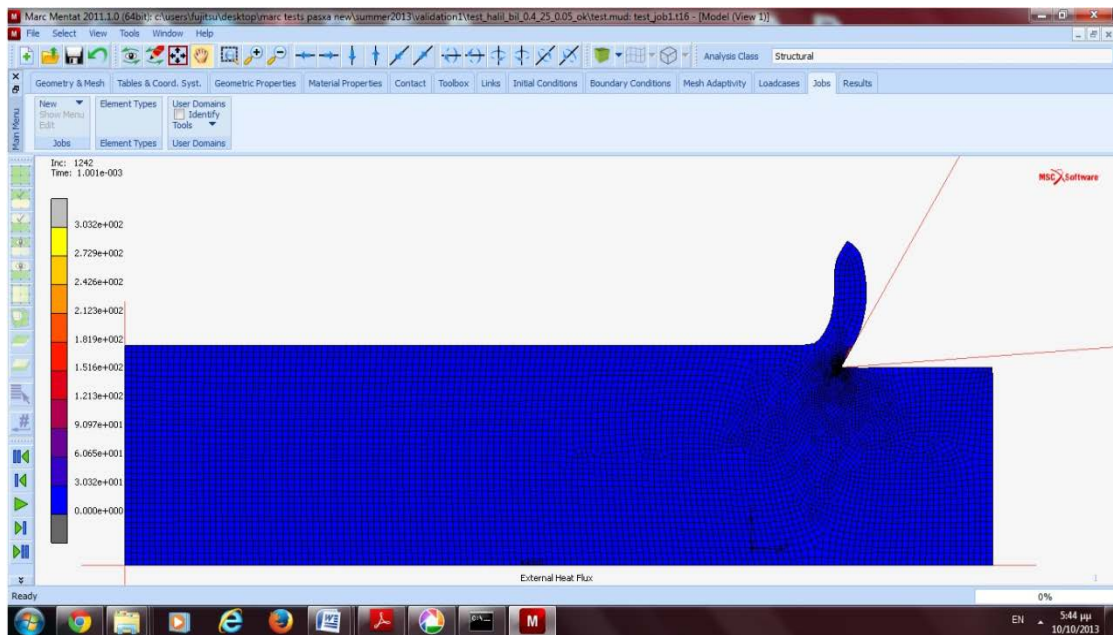
Από την διεξαγωγή της προσομοίωσης προέκυψαν τα ακόλουθα στιγμιότυπα:



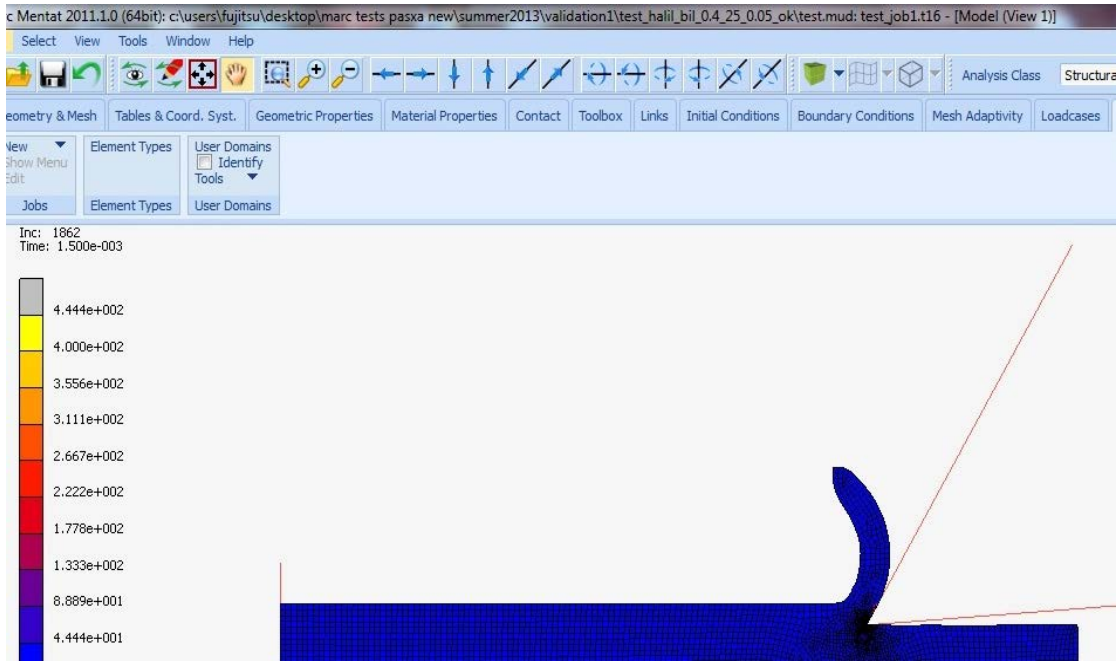
$t=0,0001\text{sec}$ $T_{\max}=246^\circ\text{C}$



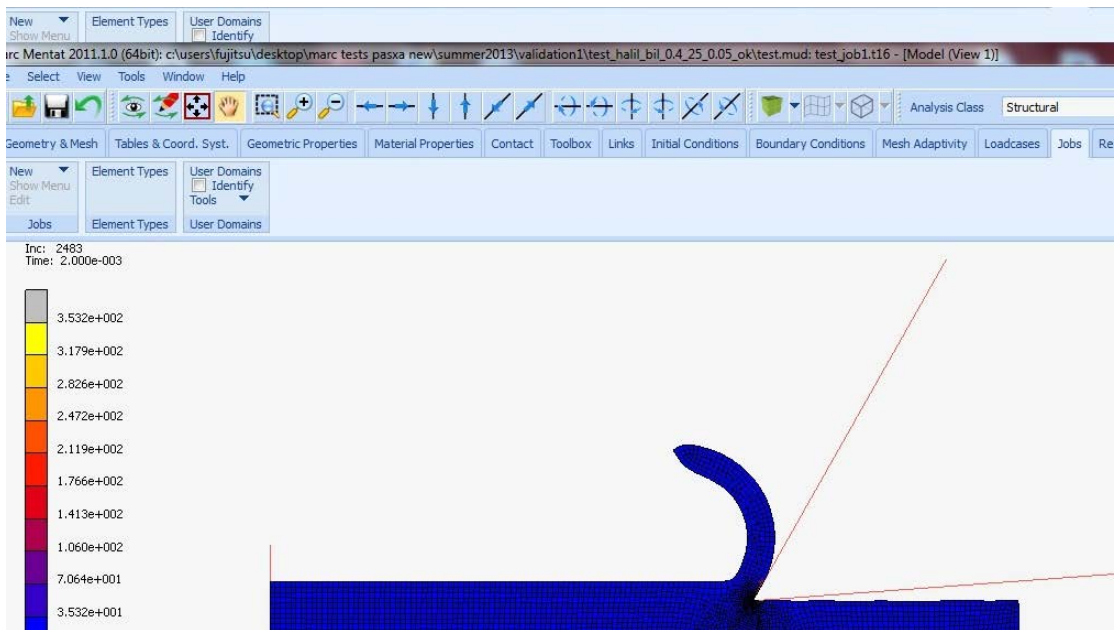
$t=0,0005 \text{ sec } T_{\max}=343 \text{ }^{\circ}\text{C}$



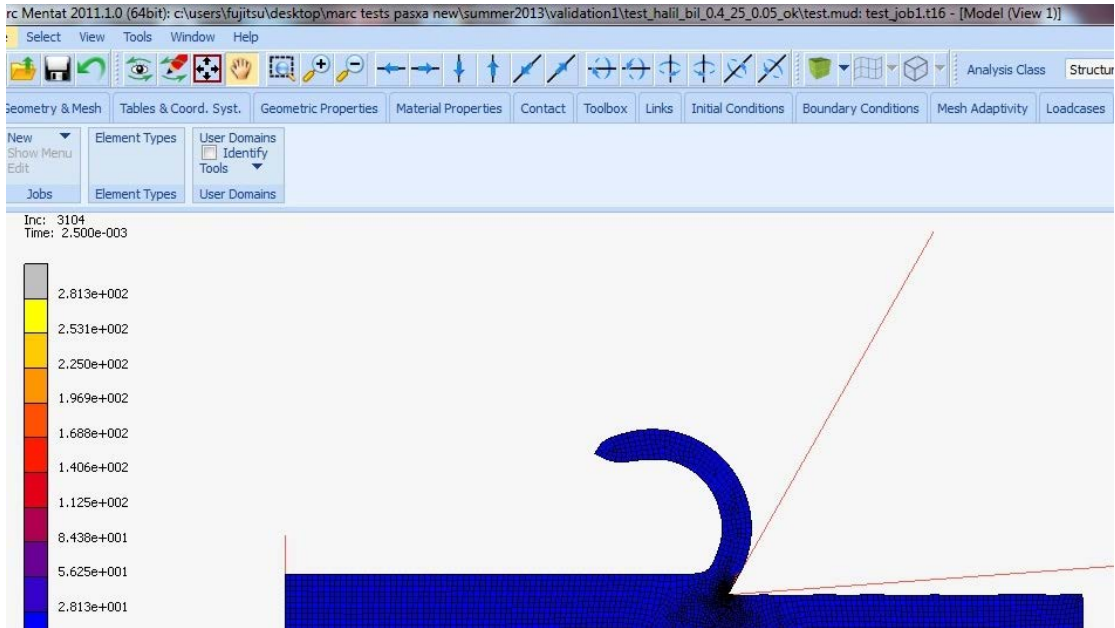
$t=0,0001 \text{ sec } T_{\max}=303,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$



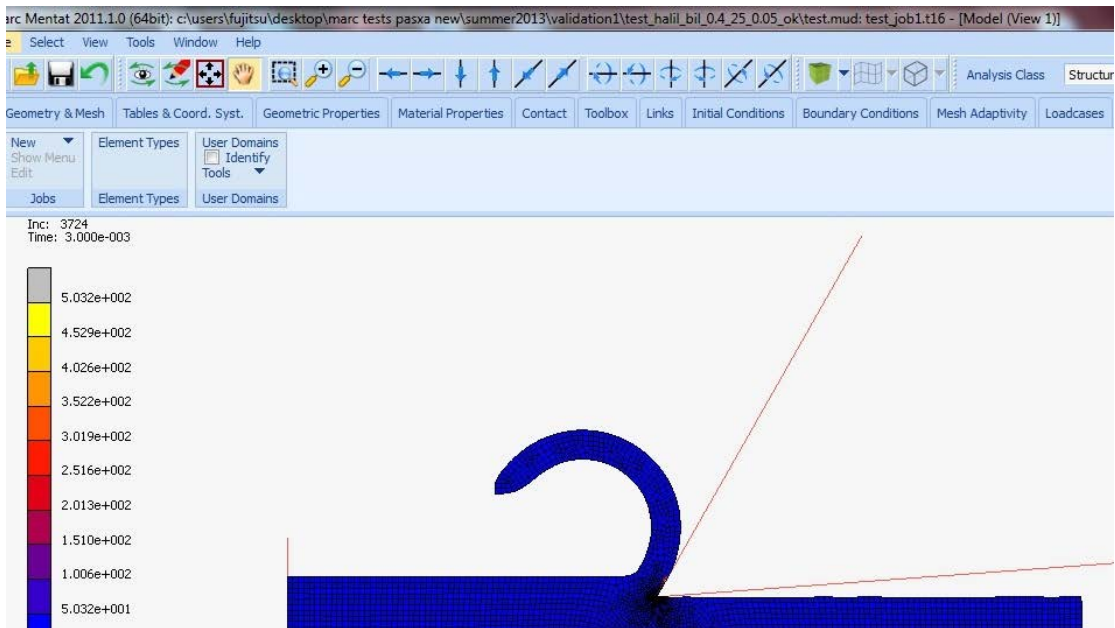
$t=0,00015 \text{ sec } T_{\max}=444,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$



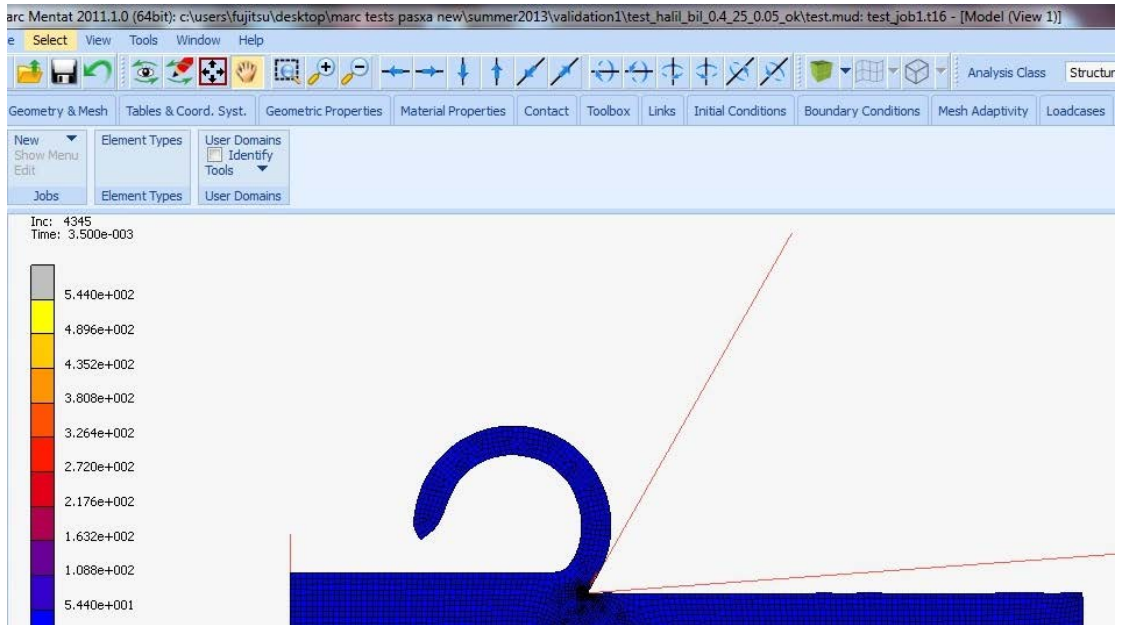
$t=0,00020 \text{ sec } T_{\max}=353,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$



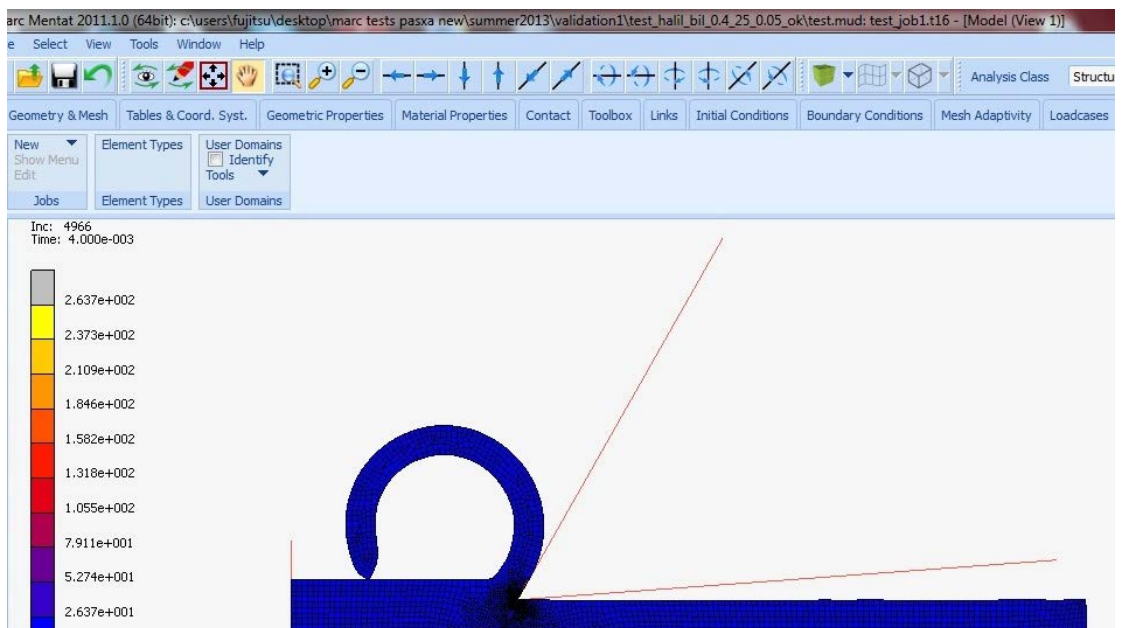
$t=0,00025 \text{ sec } T_{\max}=281,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$



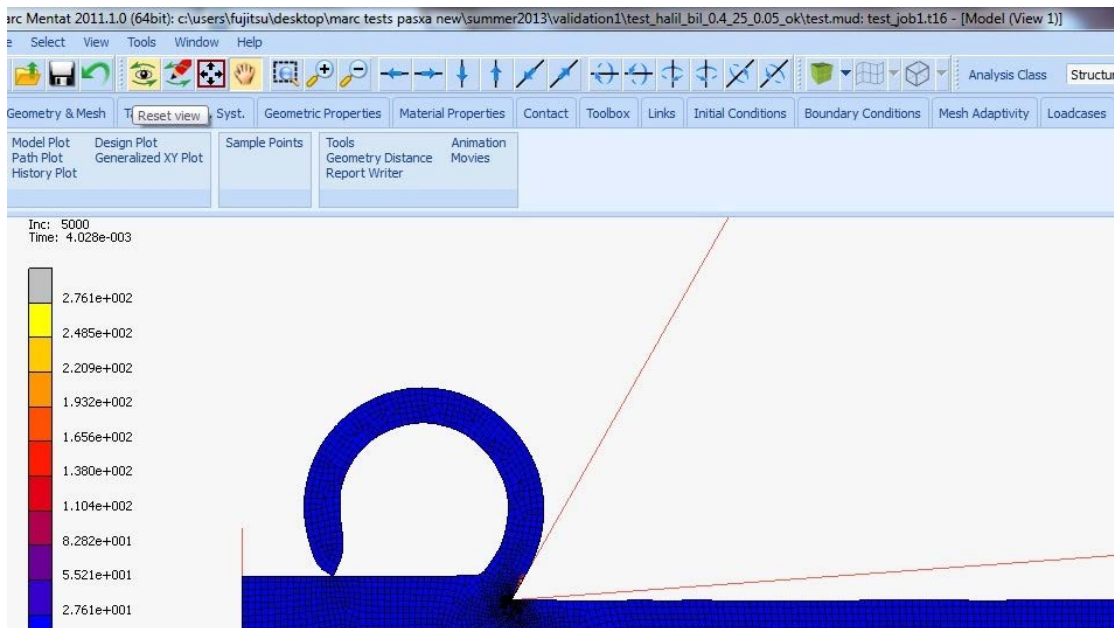
$t=0,00030 \text{ sec } T_{\max}=503,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$t=0,00035 \text{ sec } T_{\max}=544,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$t=0,00040 \text{ sec } T_{\max}=263,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$

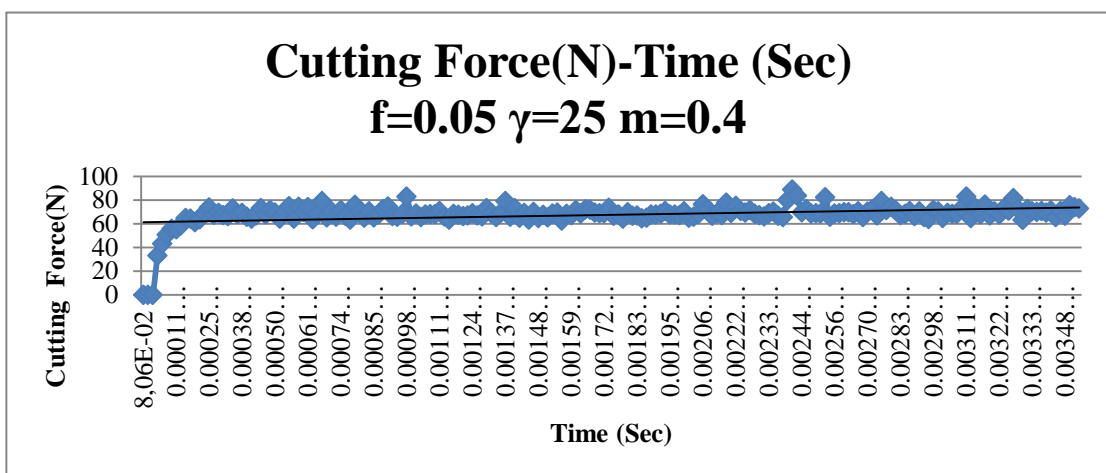


$t=0,0004028 \text{ sec}$ $T_{\max}=276,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Από τα στιγμιότυπα της πρώτης προσομοίωσης προκύπτει ότι η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο απόβλητο είναι $T_{\max}=544,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Δυνάμεις κοπής

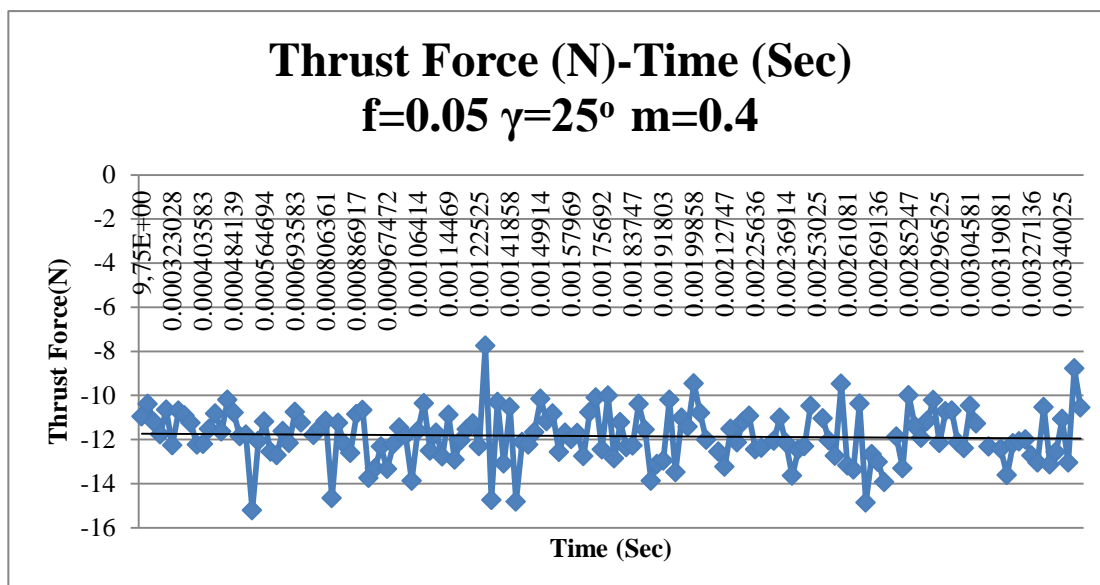
Από τον υπολογισμό των κοπτικών δυνάμεων κατά τον άξονα των x, προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα της κοπής:



Διάγραμμα 4.1

Από τους υπολογισμούς των δυνάμεων προέκυψε ότι κατά τη μόνιμη κατάσταση η μέση τιμή των δυνάμεων κοπής κατά τον άξονα των x, είναι **69N**. Η τιμή αυτή προκύπτει και από το διάγραμμα.

Αντίστοιχα υπολογίστηκαν μέσω του Marc και οι δυνάμεις κοπής κατά τον άξονα των y και προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 4.2

Από τις τιμές των δυνάμεων του παραπάνω γραφήματος προκύπτει η μέση τιμή της δύναμης ίση με **-12 N**.

Για των υπολογισμό των δυνάμεων τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εξήχθησαν σε υπολογιστικό φύλλο Excel λαμβάνοντας υπόψη λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων, τις τιμές ανά 20 βήματα.

Γεωμετρία του αποβλήτου

Μετρώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του παραχθέντος αποβλήτου δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας:

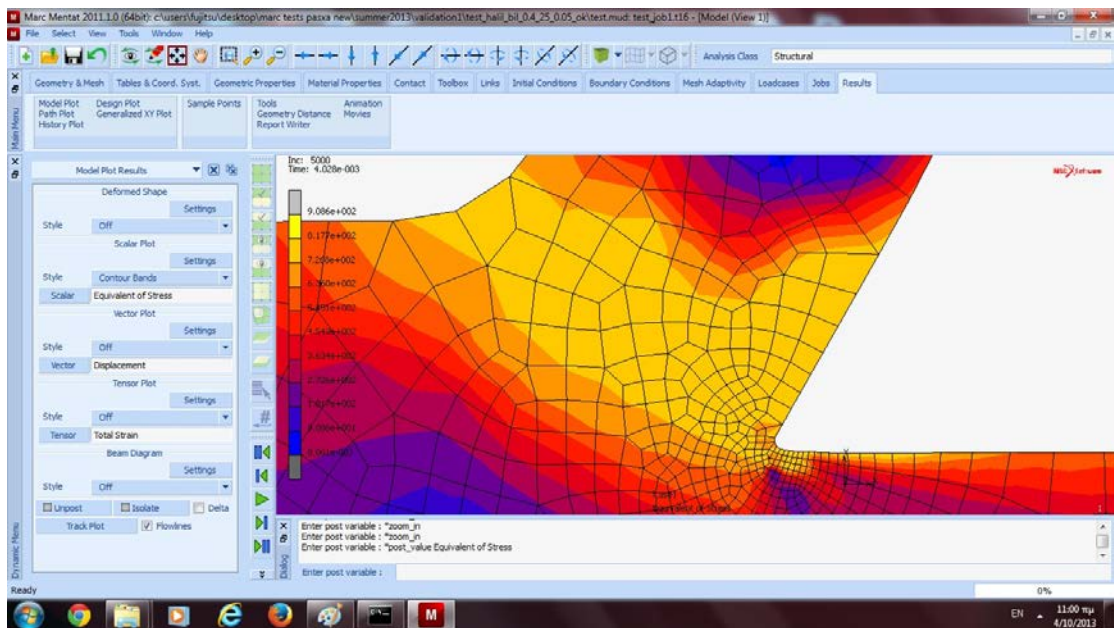
$\gamma(^{\circ})$	f (mm)	t_c (mm)	L_c (mm)	$\varphi (^{\circ})$
25^ο	0,05	0,087	0,061	36,26

Πίνακας 4.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αποβλήτου

Μηχανικοί και θερμικοί παράμετροι

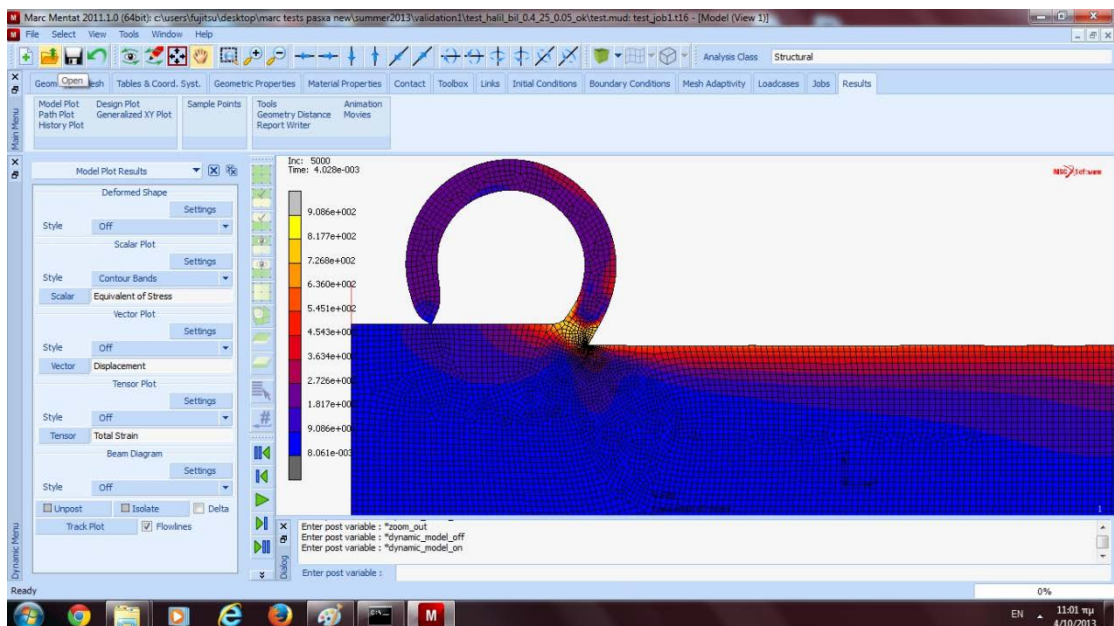
Από την αριθμητική επίλυση του μοντέλου προέκυψαν αποτελέσματα χρήσιμα για τη μελέτη, που αφορούσαν παραμέτρους όπως η πλαστική παραμόρφωση, ο ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης και οι τάσεις στην ζώνη παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα αυτά δύσκολα μετρώνται πειραματικά και παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν:

Τάσεις



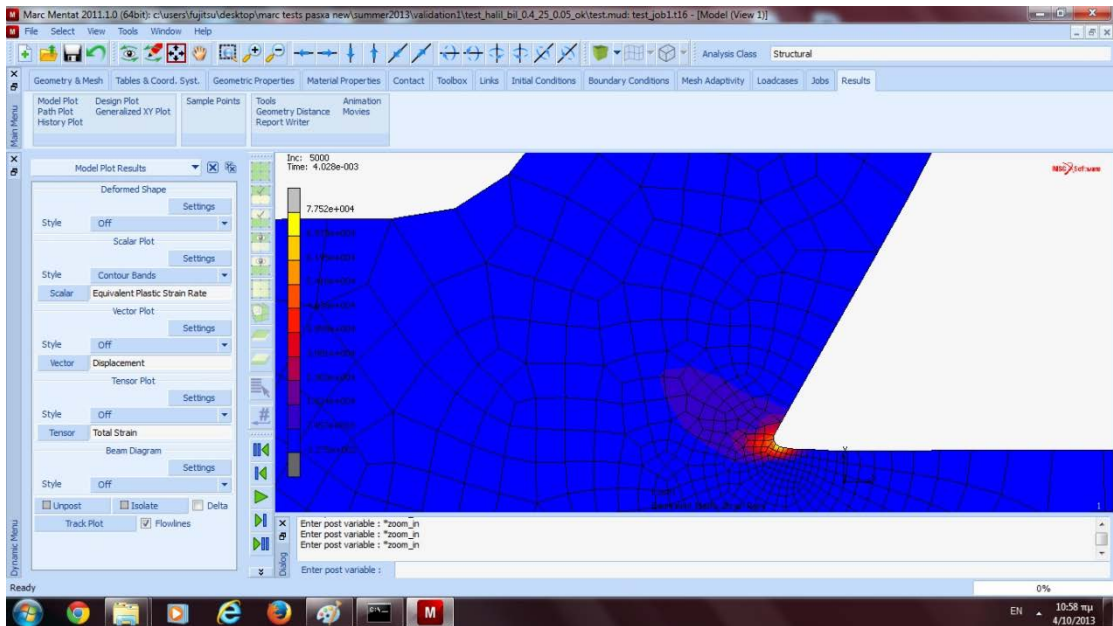
Εικόνα 4.22: Τάσεις 908,6 MPa στην κύρια ζώνη και 726,8 MPa στη δευτερεύουσα ζώνη παραμόρφωσης.

Από την κατανομή των τάσεων διακρίνουμε ότι η μέγιστη τιμή την λαμβάνεται στην κύρια διατμητική ζώνη όπου έχουμε την εμφάνιση της μέγιστης παραμόρφωσης και του μέγιστου ρυθμού παραμόρφωσης.



Εικόνα4.23: Η κατανομή των τάσεων σε όλο το τεμάχιο.

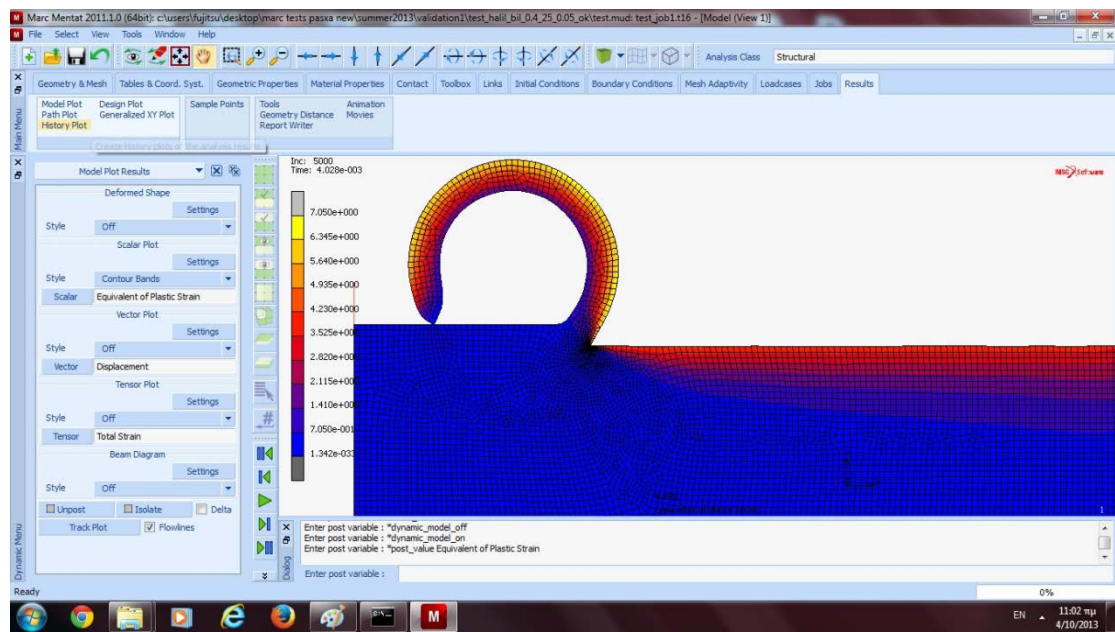
Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης



Εικόνα 4.24: Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης 77520 ((mm/mm)/sec) στην πρωτογενή ζώνη παραμόρφωσης

Όπως φαίνεται και στην εικόνα υψηλοί ρυθμοί παραμόρφωσης εμφανίζονται κυρίως κατά μήκος της κύριας διατμητικής ζώνης, η οποία καλύπτει ένα μικρό μέρος. Η μέγιστη τιμή των **77520 ((mm/mm)/sec)** εμφανίζεται ακριβώς στην κορυφή της κοπτικής ακμής του κοπτικού εργαλείου. Ο ρυθμός παραμόρφωσης μειώνεται σταδιακά καθώς απομακρυνόμαστε από την κορυφή, αλλά παραμένει σχεδόν σταθερός κατά μήκος της ζώνης.

Πλαστική παραμόρφωση



Εικόνα 4.25: Κατανομή πλαστικής παραμόρφωσης

Παρατηρώντας κανείς την κατανομή της πλαστικής παραμόρφωσης παρατηρεί ότι οι υψηλές τιμές της εμφανίζονται στην δευτερεύουσα διατμητική ζώνη όπου εμφανίζονται και οι μέγιστες θερμοκρασίες. Ακόμα, υψηλές τιμές εμφανίζονται και παραμένουν στην ήδη κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου. Στην κύρια διατμητική ζώνη παρατηρούνται μικρότερες τιμές πλαστικής παραμόρφωσης εξαιτίας κυρίως της υψηλής παραμόρφωσης σκλήρυνσης και των χαμηλότερων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στην περιοχή.

Δεύτερη Προσομοίωση Μοντέλου,

Shear Bilinear με $f=0,1$, $\gamma=25^\circ$ $m=0,4$

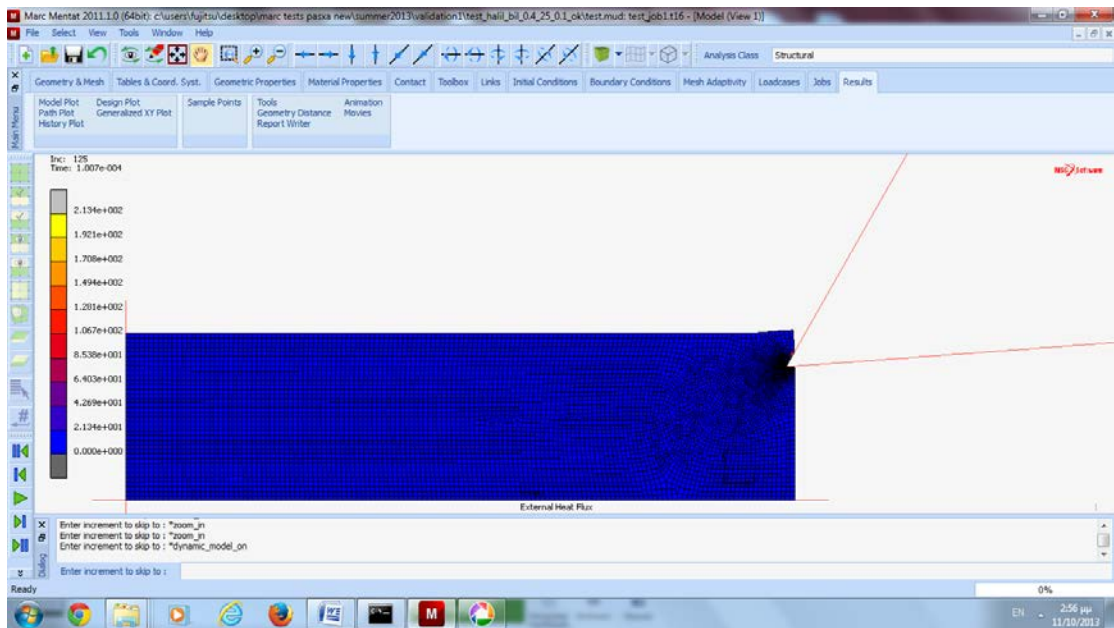
Στοιχεία προσομοίωσης

The screenshot shows the 'Run Job' dialog box with the following details:

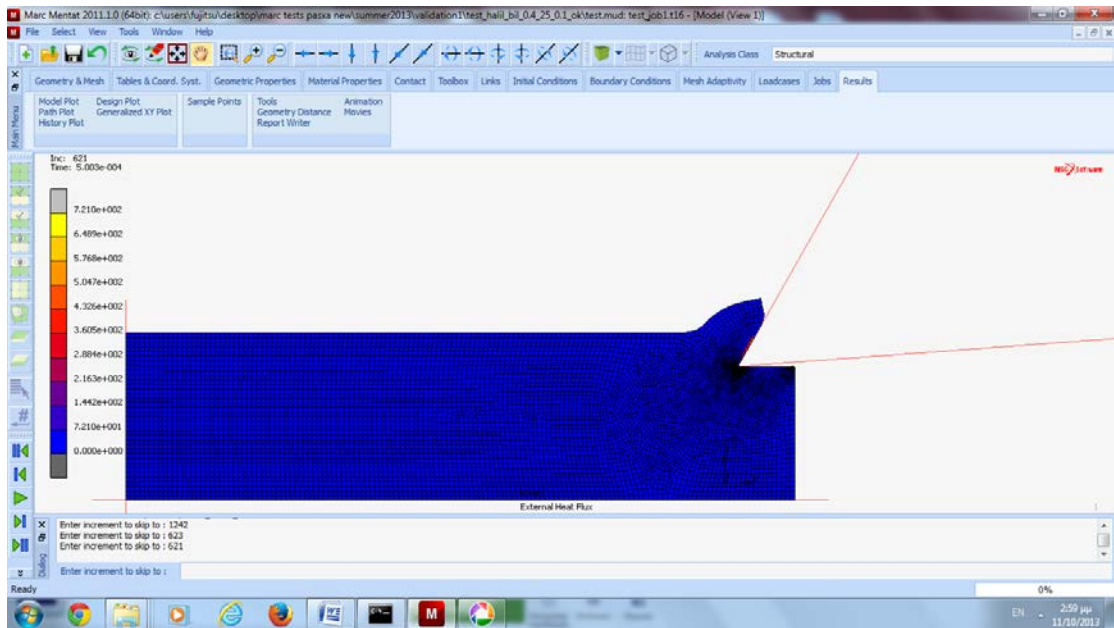
- Name: job1
- Type: Thermal/Structural
- User Subroutine File: (empty)
- Parallelization: Parallelization, No DDM, 1 Solver Process
- Title: Table-Driven
- Buttons: Submit (1), Update, Monitor, Kill, Save Model, Advanced Job Submission
- Status: Complete
- Current Increment (Cycle): 5000 (2)
- Singularity Ratio: 0.010579
- Convergence Ratio: 0.1504
- Analysis Time: 0.0040278
- Wall Time: 22358
- Total Statistics:

Cycles	18566	Cut Backs	0
Separations	1066	Remeshes	1938
- Exit Number: 3004
- Buttons: Edit, Output File, Log File, Status File, Any File, Open Post File (Results Menu), Reset, OK

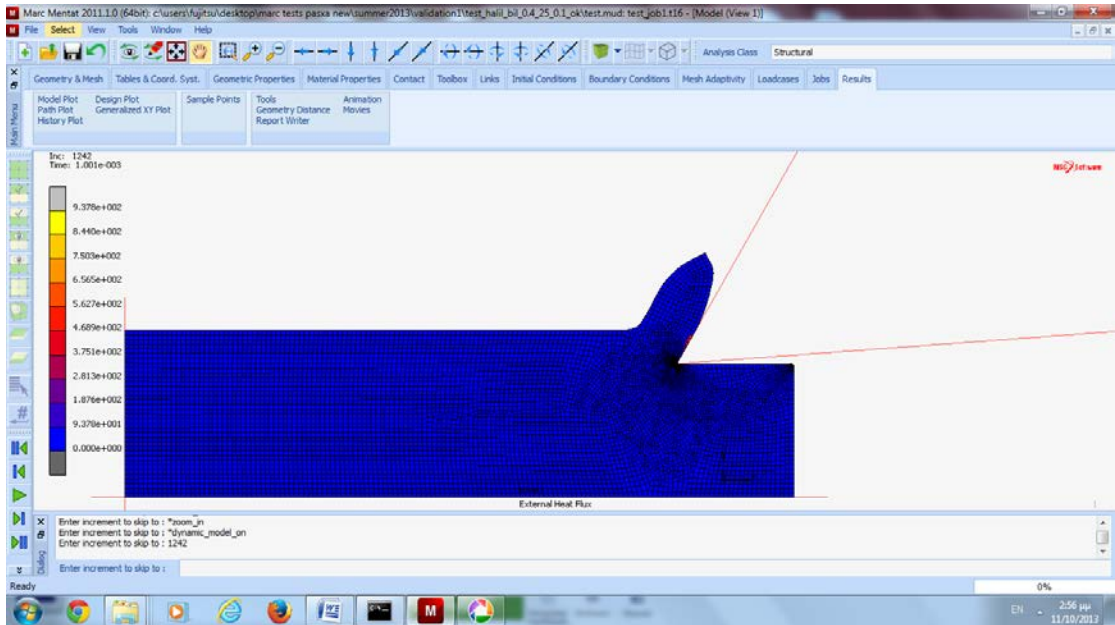
Από την διεξαγωγή της προσομοίωσης προέκυψαν τα ακόλουθα στιγμιότυπα:



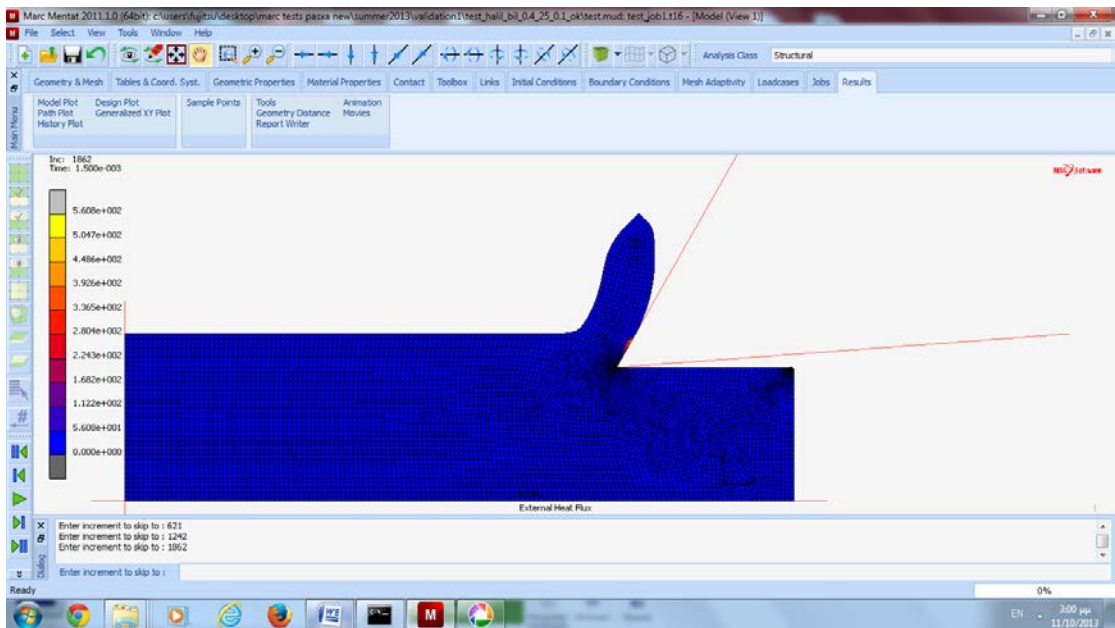
$t=0,0001\text{sec } T_{\text{max}}=213,4\text{ }^{\circ}\text{C}$



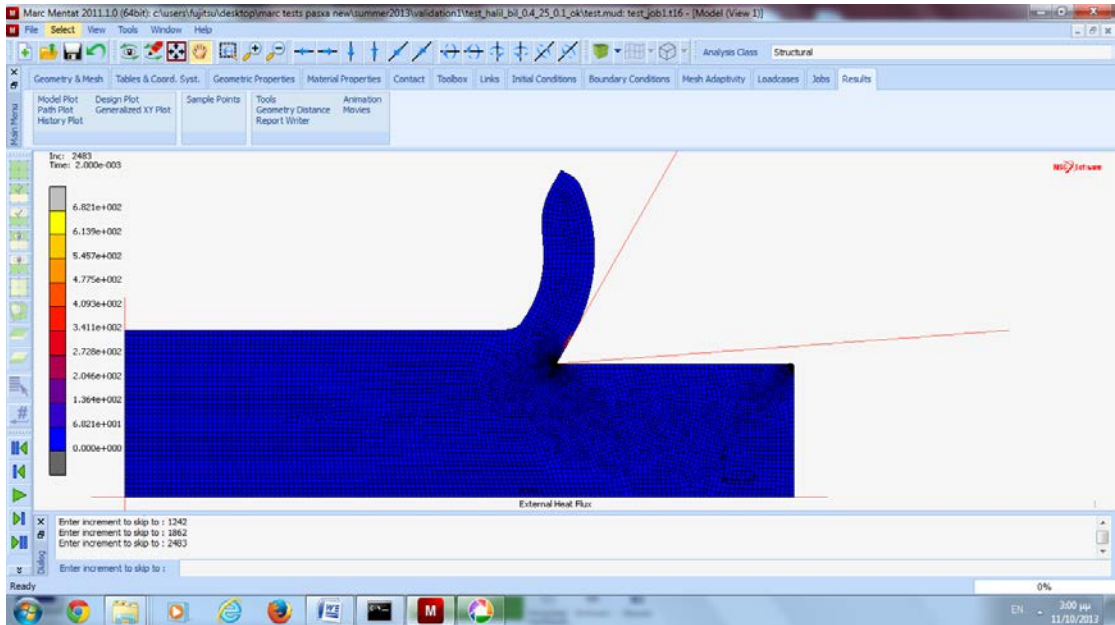
$t=0,0005\text{ sec } T_{\text{max}}=721,0\text{ }^{\circ}\text{C}$



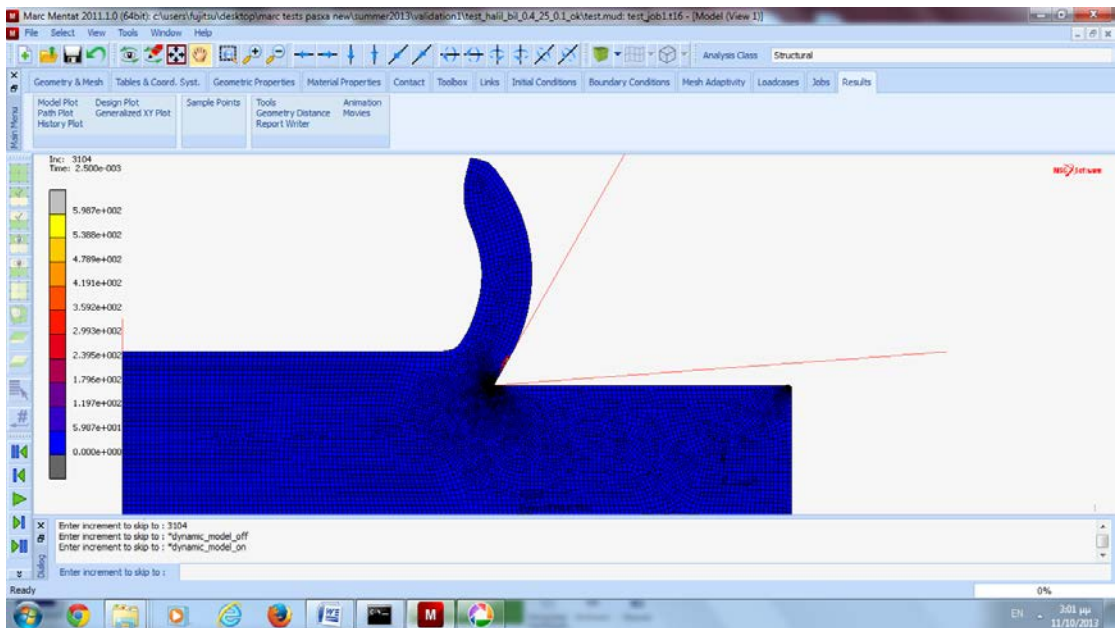
$t=0,001 \text{ sec } T_{\max}=937,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$



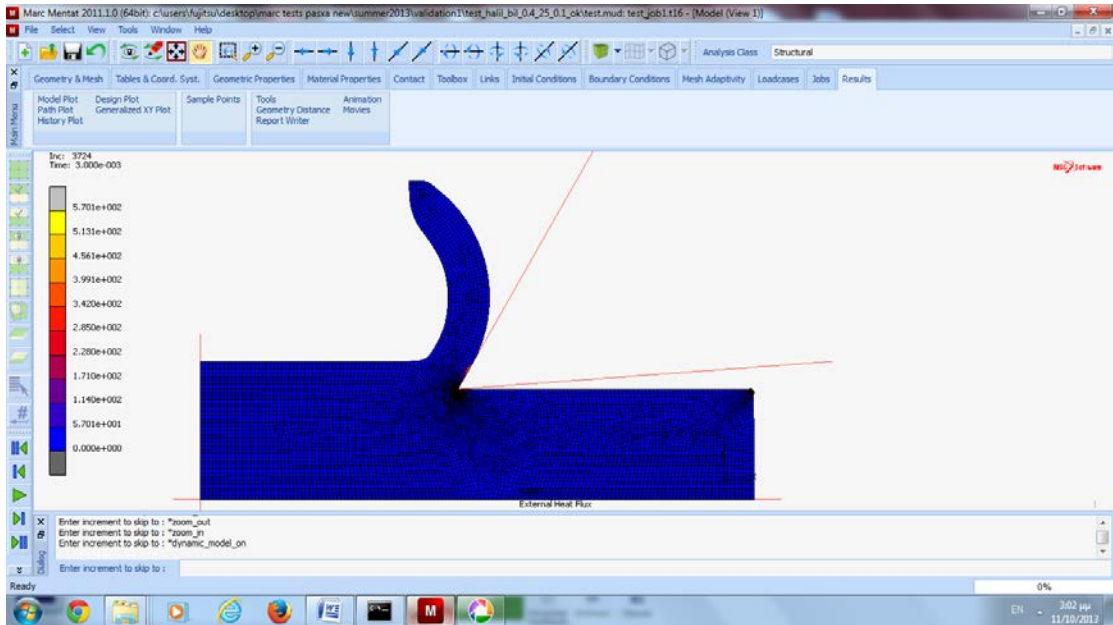
$t=0,0015 \text{ sec } T_{\max}=560,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$



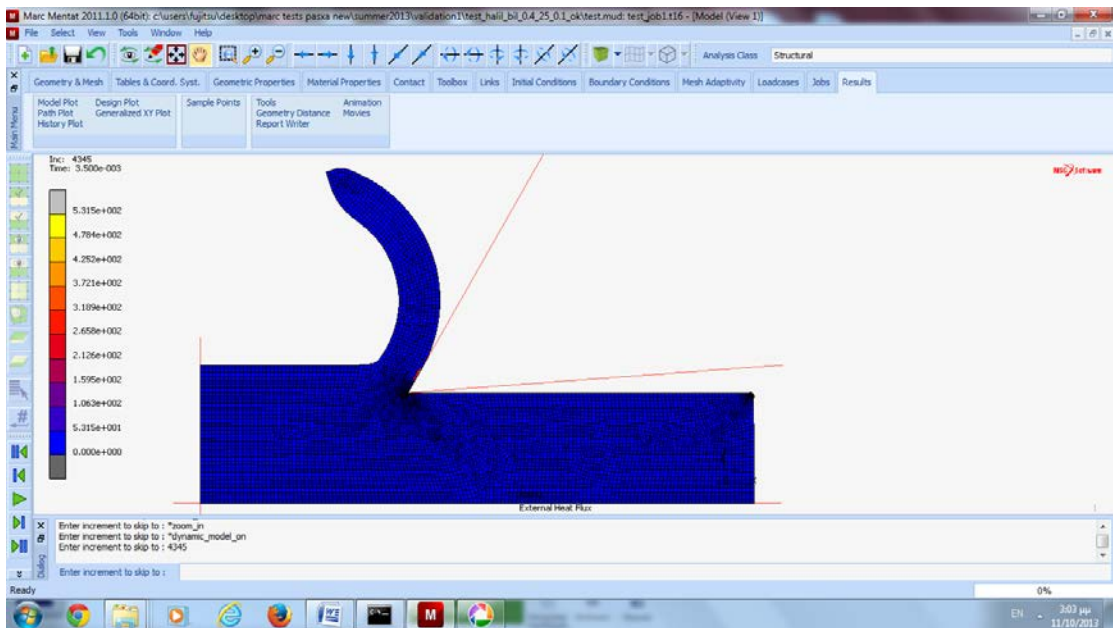
$t=0,0020$ sec $T_{\max}=682,1$ °C



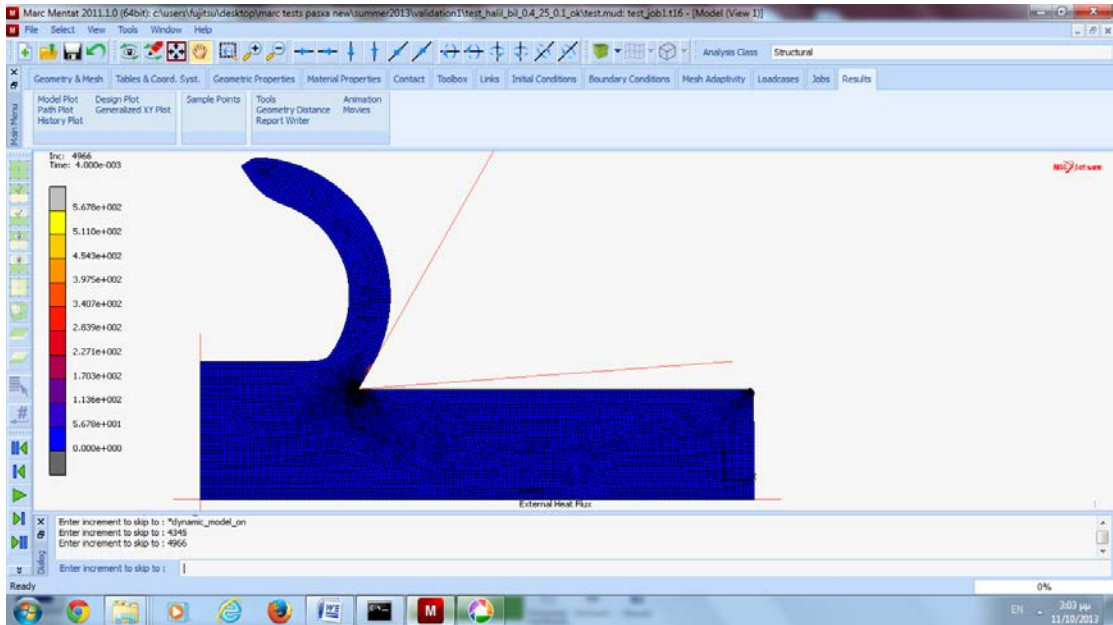
$t=0,0025$ sec $T_{\max}=598,7$ °C



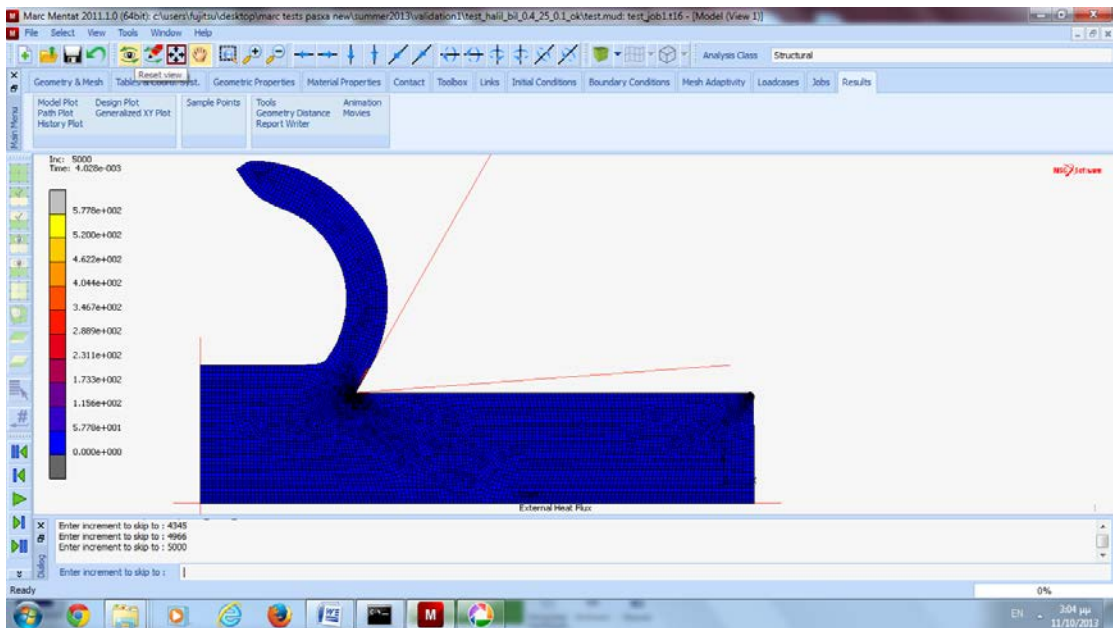
$t=0,00030 \text{ sec } T_{\max}=570,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$t=0,00035 \text{ sec } T_{\max}=531,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$t=0,00040 \text{ sec } T_{\max}=567,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

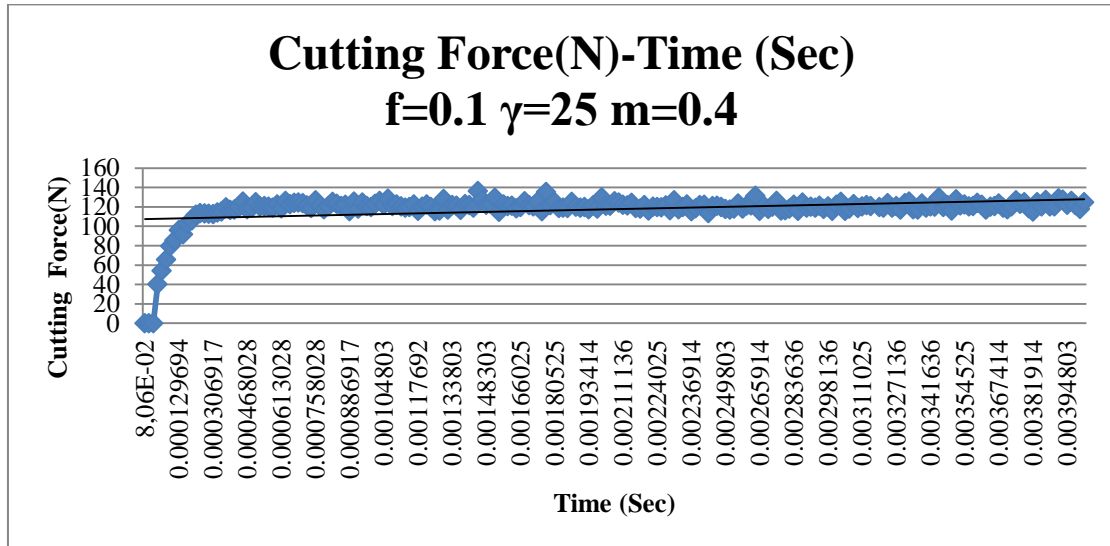


$t=0,0004028 \text{ sec } T_{\max}=577,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Από τα στιγμιότυπα της πρώτης προσομοίωσης προκύπτει ότι η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο απόβλητο είναι $T_{\max}=937,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Δυνάμεις κοπής

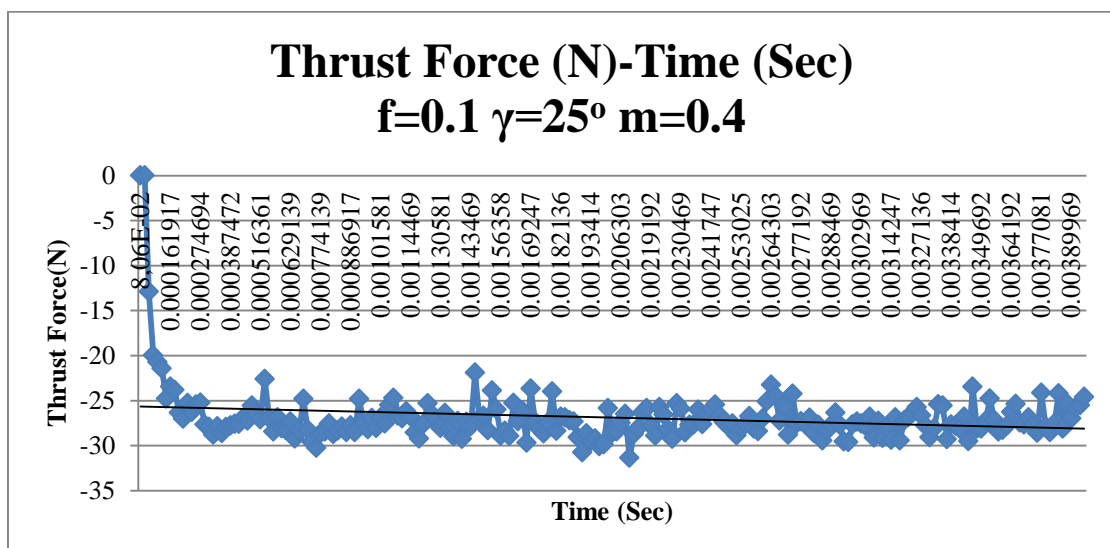
Από τον υπολογισμό των κοπτικών δυνάμεων κατά τον άξονα των x, προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα της κοπής:



Διάγραμμα 4.3

Από τους υπολογισμούς των δυνάμεων προέκυψε ότι κατά τη μόνιμη κατάσταση η μέση τιμή των δυνάμεων κοπής κατά τον άξονα των x, είναι **121 N**. Η τιμή αυτή προκύπτει και από το διάγραμμα.

Αντίστοιχα υπολογίστηκαν μέσω του Marc και οι δυνάμεις κοπής κατά τον άξονα των y και προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 4.4

Από τις τιμές των δυνάμεων του παραπάνω γραφήματος προκύπτει η μέση τιμή της δύναμης ίση με **-27 N**.

Γεωμετρία του αποβλήτου

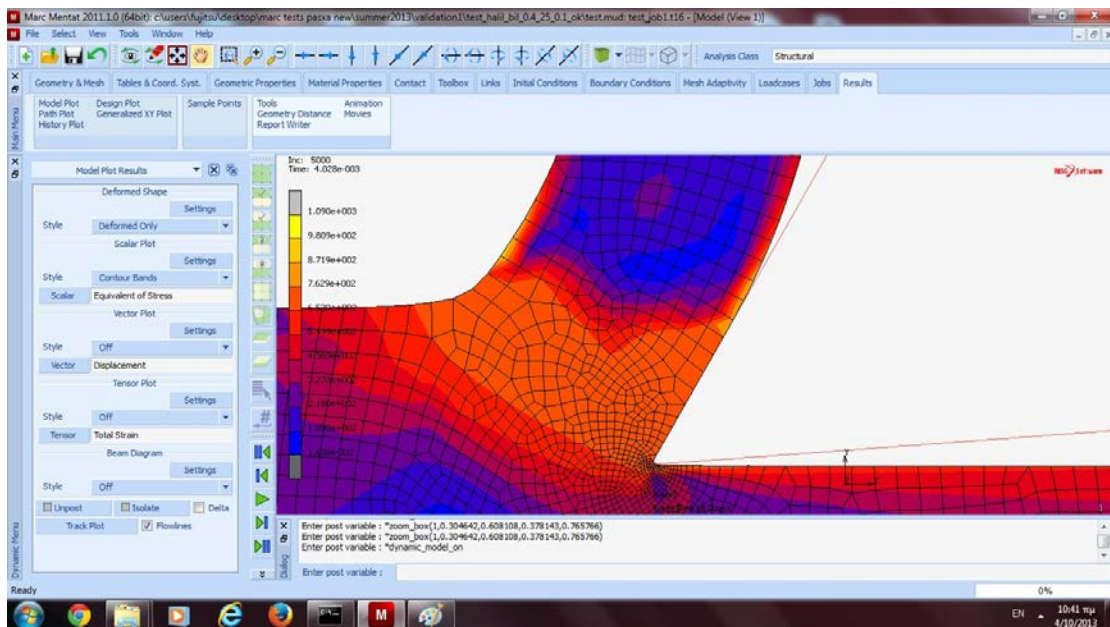
Μετρώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του παραχθέντος αποβλήτου δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας:

$\gamma(^{\circ})$	f (mm)	t_c (mm)	L_c (mm)	$\phi(^{\circ})$
25°	0,1	0,19	0,104	33,8

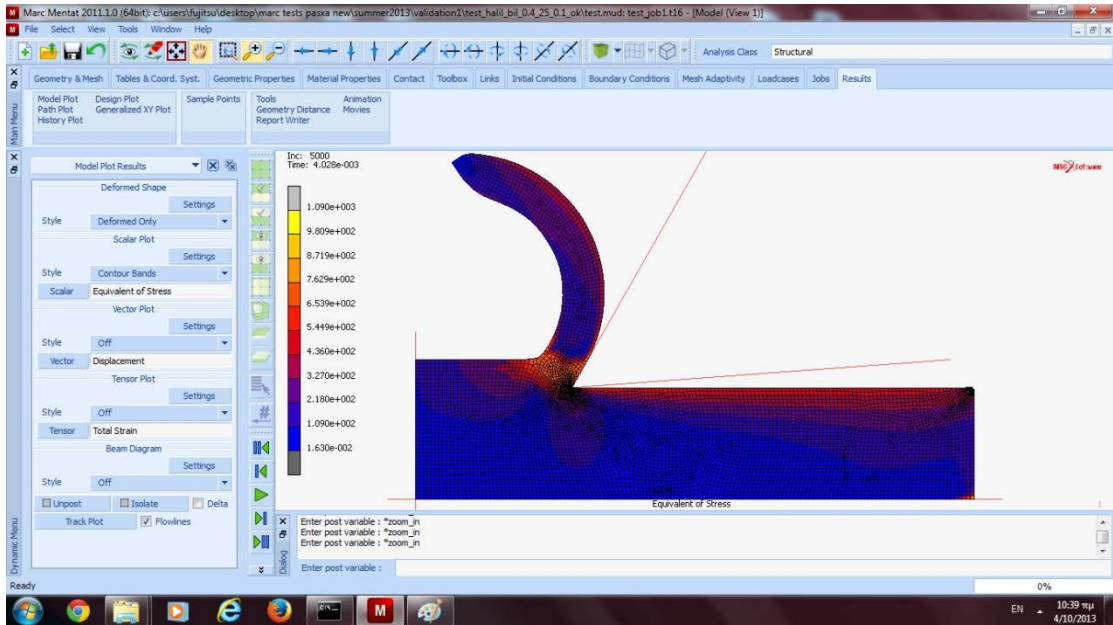
Πίνακας 4.6: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αποβλήτου

Μηχανικές και θερμικές παράμετροι

Τάσεις

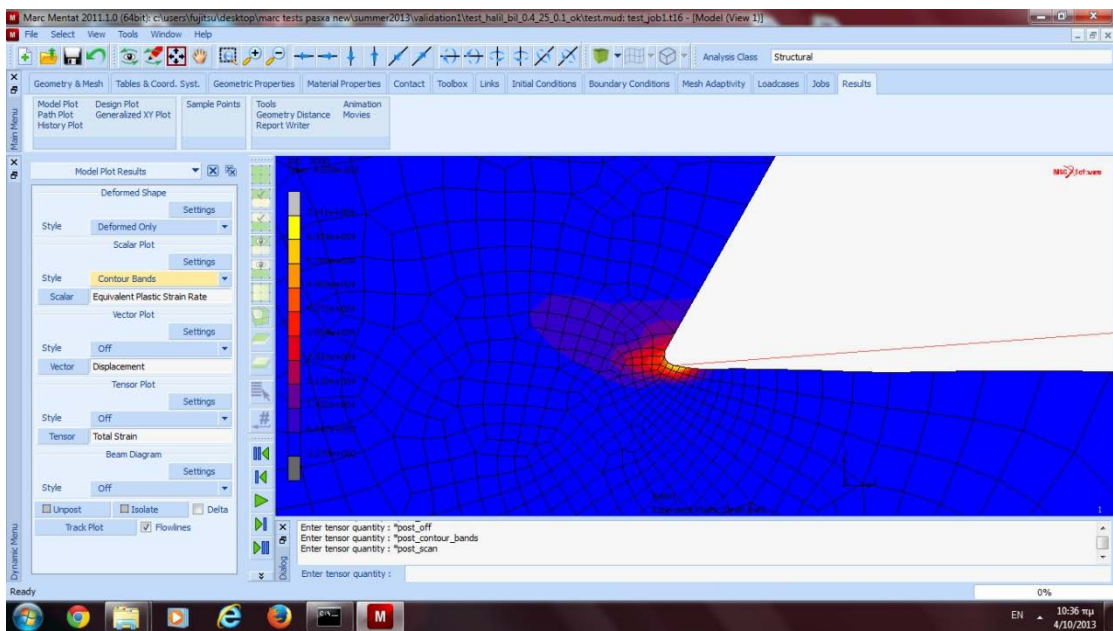


Εικόνα 4.27: Τάσεις 1090 MPa στην κύρια ζώνη και 980,9 MPa στη δευτερεύουσα ζώνη παραμόρφωσης.



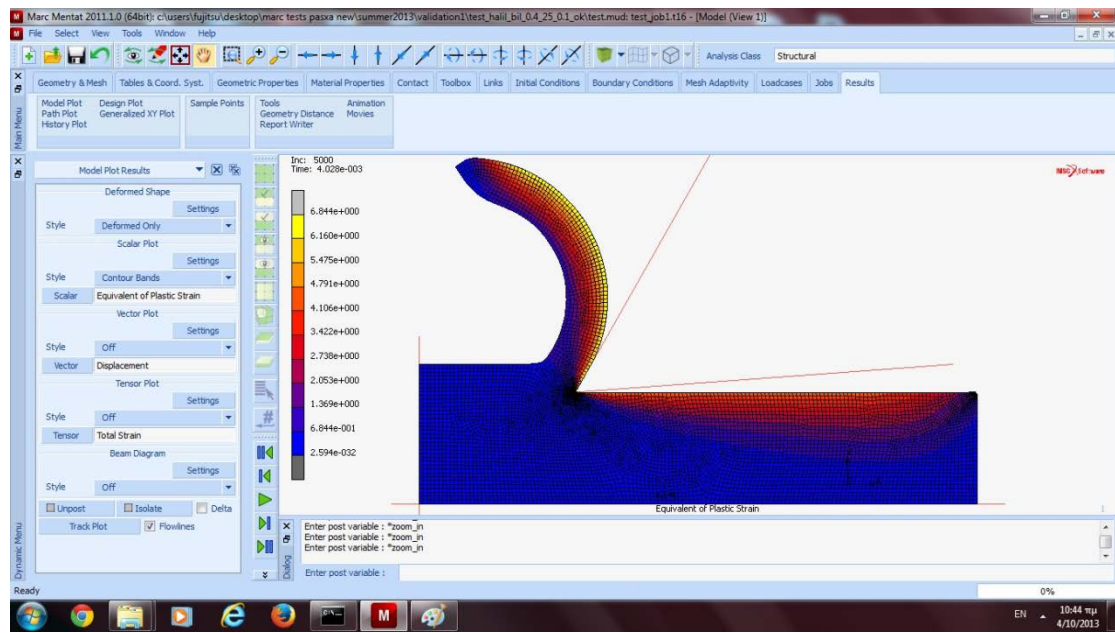
Εικόνα 4.28: Η κατανομή των τάσεων σε όλο το τεμάχιο.

Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης



Εικόνα4.29: Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης 71410 ((mm/mm)/sec) στην κόρια ζώνη παραμόρφωσης

Πλαστική παραμόρφωση



Εικόνα 4.30: Κατανομή πλαστικής παραμόρφωσης

Σύγκριση αποτελεσμάτων και γραφήματα προσομοιώσεων

Στη συνέχεια συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δύο παραπάνω προσομοιώσεων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διεξαγωγή των αντίστοιχων προσομοιώσεων από την εργασία με του Halil Bil, καθώς επίσης και με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη πειραματική εργασία πάνω στην οποία βασίστηκαν οι παραπάνω προσομοιώσεις.

Πειραματικά αποτελέσματα

$\gamma (^{\circ})$	f (mm)	t_c (mm)	$\phi (^{\circ})$	L_c (mm)
25^0	0,05	0,12	24,62	1,00
	0,1	0,21	28,24	0,90

Πίνακας 4.7: Πειραματικά αποτελέσματα των γεωμετρικών παραμέτρων του αποβλήτου

Προσομοίωση Halil Bil

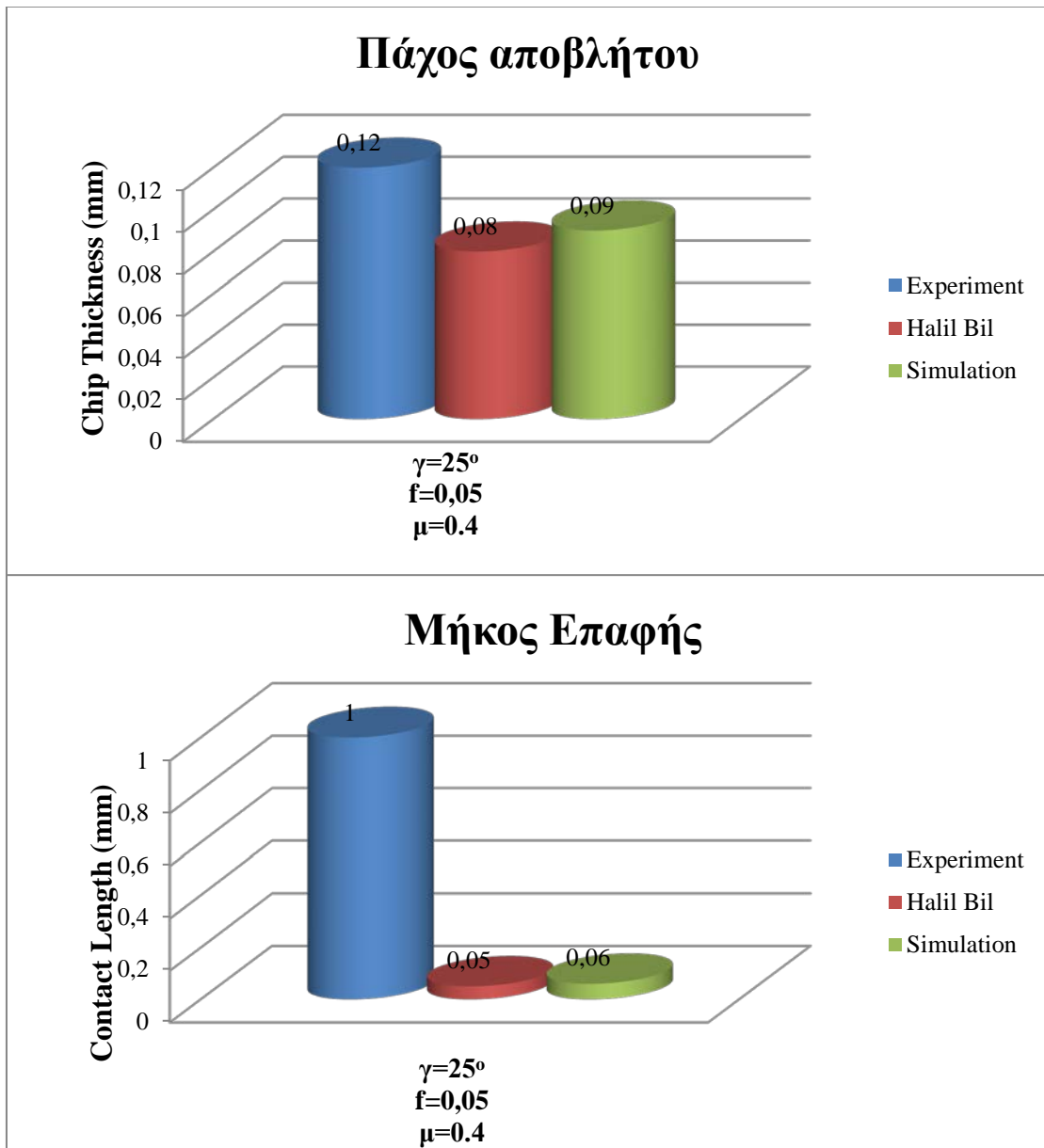
$\gamma (^{\circ})$	f (mm)	t_c (mm)	$\phi (^{\circ})$	L_c (mm)
25^0	0,05	0,08	32,39	0,05
	0,1	0,18	29,01	0,15

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα γεωμετρικών παραμέτρων προσομοίωσης Halil Bil

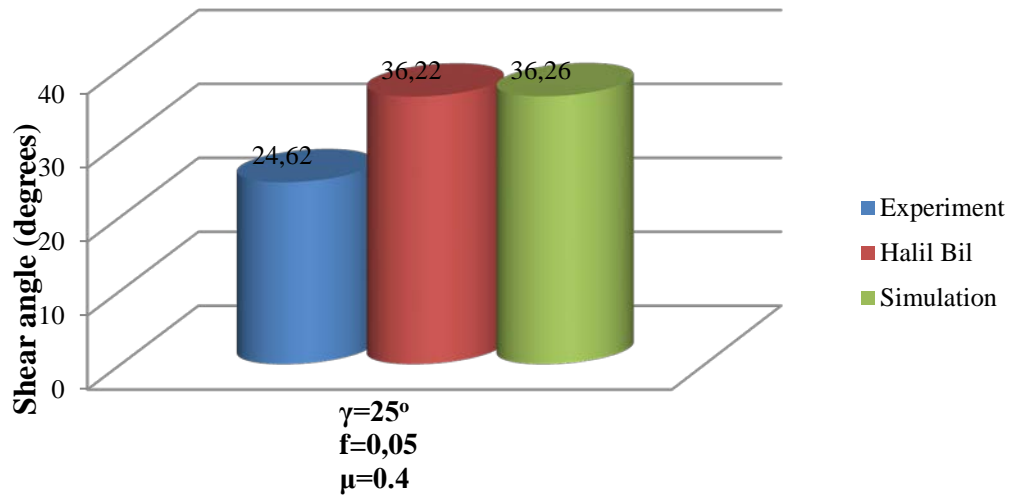
Σύγκριση της γεωμετρία του αποβλήτου

Παρακάτω ακολουθούν τα γραφήματα από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Εδώ, πρέπει να επισημανθεί ότι τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν τη γεωμετρία του αποβλήτου όπως το πάχος του αποβλήτου, το μήκος κοπής μεταξύ αποβλήτου και της πλευράς κόψης του κοπτικού εργαλείου, είχαν μετρηθεί με τη χρήση μικροσκοπίου. Επιπλέον, στον πίνακα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των γεωμετρικών παραμέτρων του αποβλήτου όπου γ είναι η γωνία αποβλήτου, f η πρόωση (πάχος απαραμόρφωτου αποβλήτου για 0° γωνία πλευρικής κοπτικής ακμής), t_c είναι το πάχος αποβλήτου, ϕ η γωνία διάτμησης και L_c το μήκος επαφής μεταξύ του αποβλήτου και της πλευράς κόψης του κοπτικού εργαλείου.

Πρώτη προσομοίωση

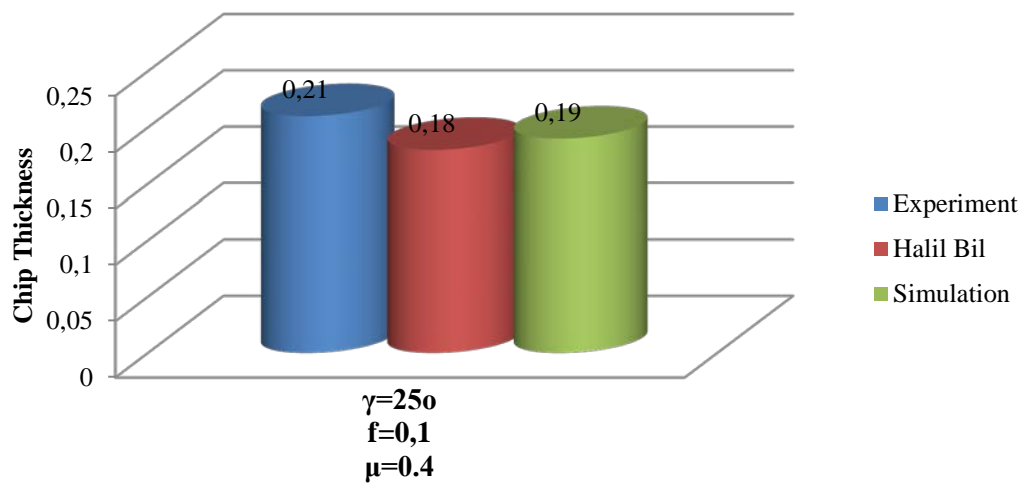


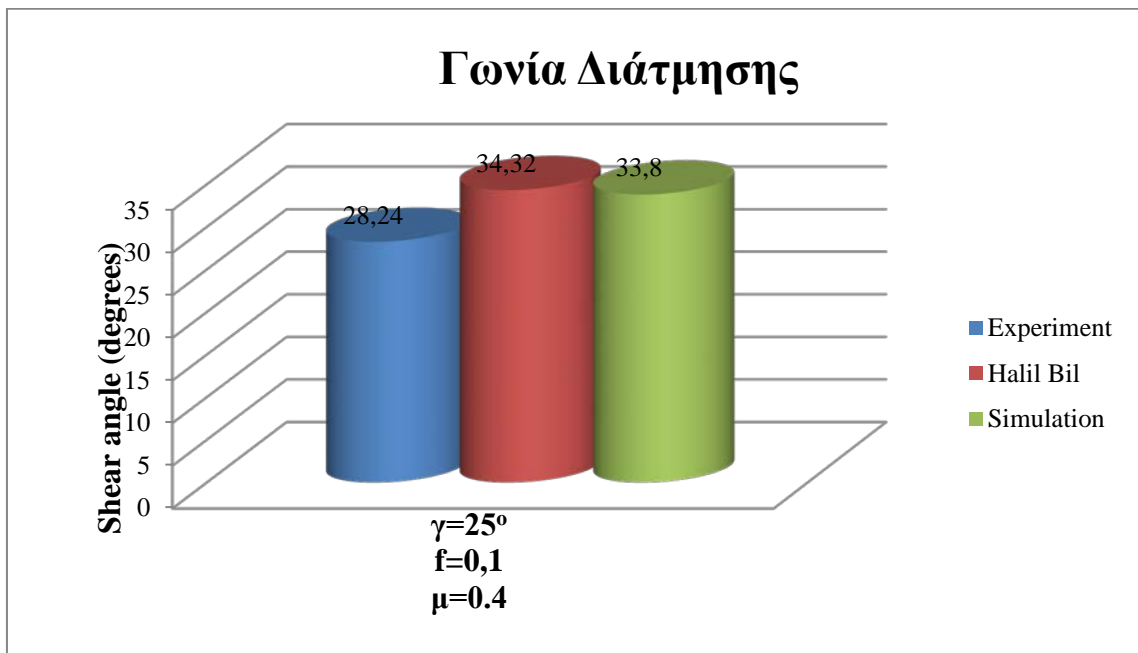
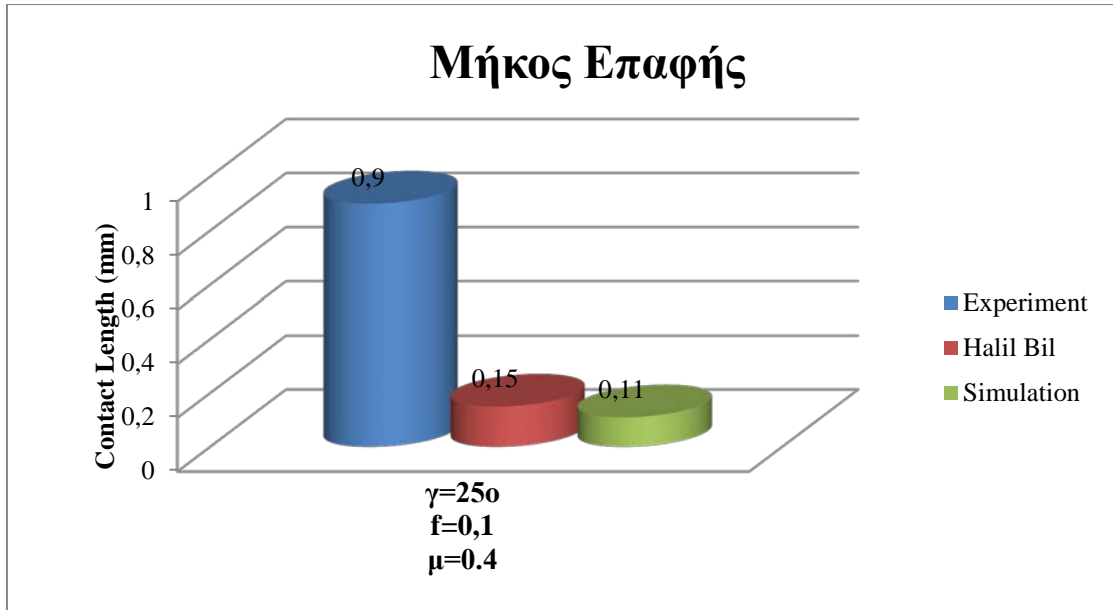
Γωνία Διάτμησης



Δεύτερη προσομοίωση

Πάχος αποβλήτου





Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και συγκρίνοντας τα με τα αντίστοιχα πειραματικά καθώς επίσης και με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αντίστοιχες προσομοιώσεις που πραγματοποίησε ο Halil Bil, εύκολα διακρίνει κανείς ότι το πάχος αποβλήτου και οι τιμές της διατμητικής γωνίας είναι πολύ κοντινές. Απεναντίας τα αποτελέσματα μας όσον αφορά το μήκος επαφής προσεγγίζουν κατά πολύ αυτά της αντίστοιχης προσομοίωσης του Halil Bil, αλλά απέχουν σημαντικά από τις πειραματικές τιμές.

Σύγκριση των δυνάμεων κοπής

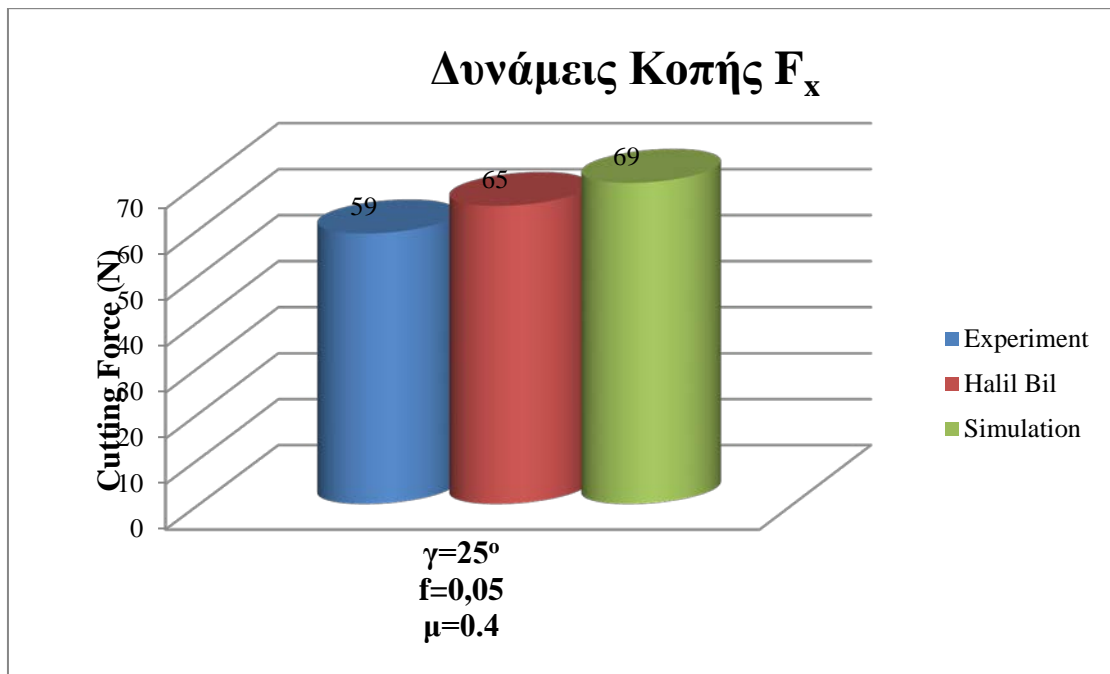
$\gamma(^{\circ})$	f (mm)	F_x (N)	F_y (N)
25 ⁰	0,05	59	50
	0,1	128	57

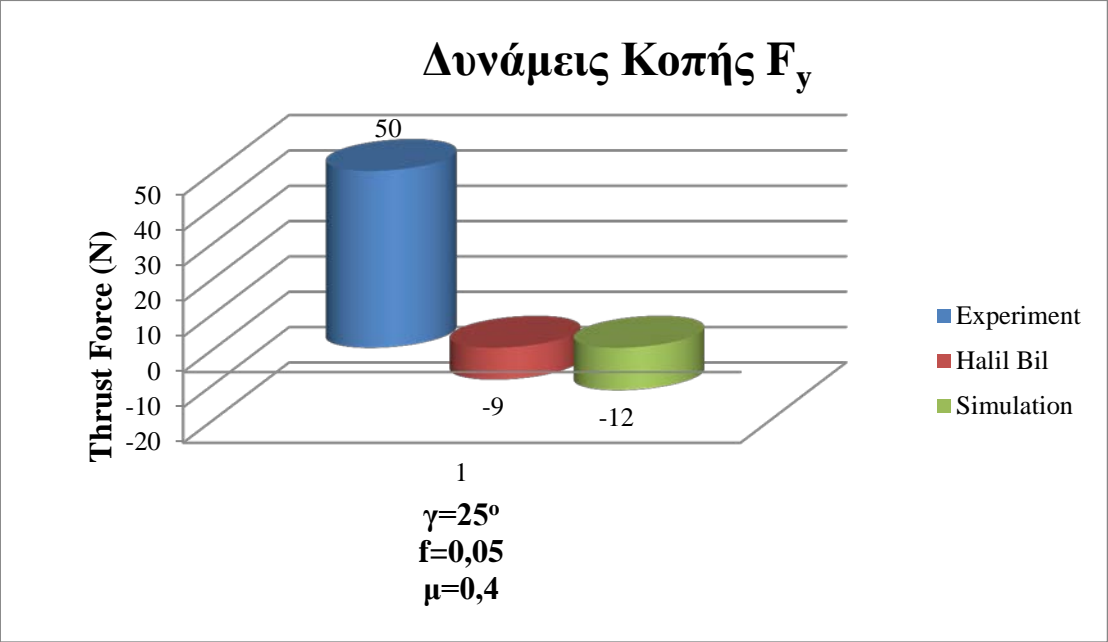
Πίνακας 4.9: Πειραματικά αποτελέσματα δυνάμεων κοπής

$\gamma(^{\circ})$	f (mm)	F_x (N)	F_y (N)
25 ⁰	0,05	65	-9
	0,1	139	-5

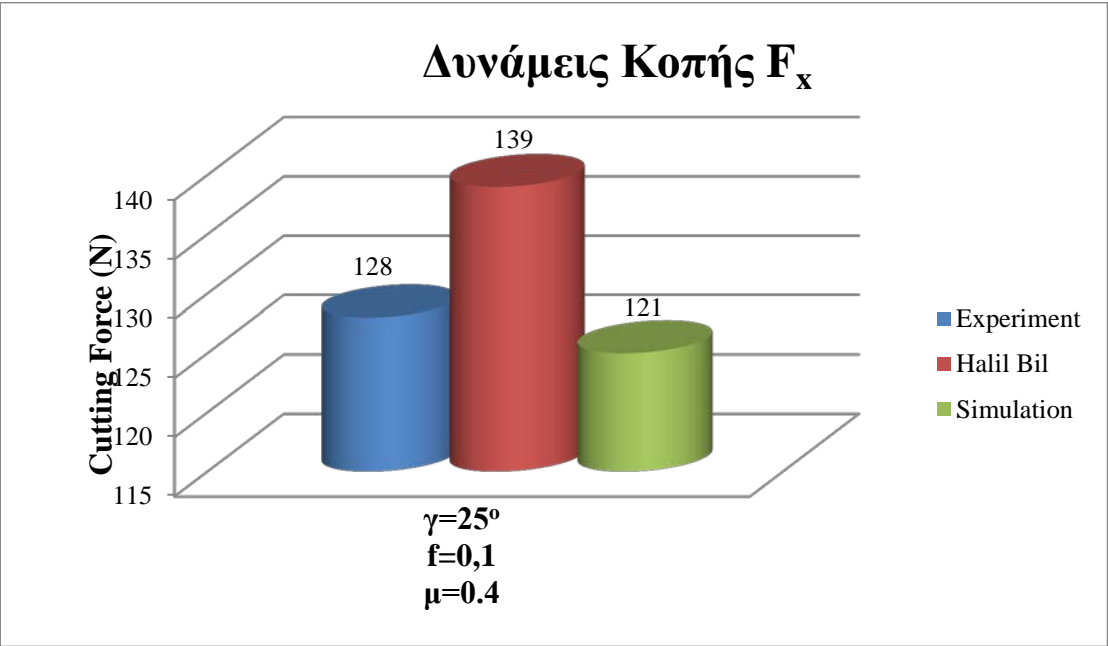
Πίνακας 4.10: Προσομοίωση Halil Bil - αποτελέσματα δυνάμεων κοπής

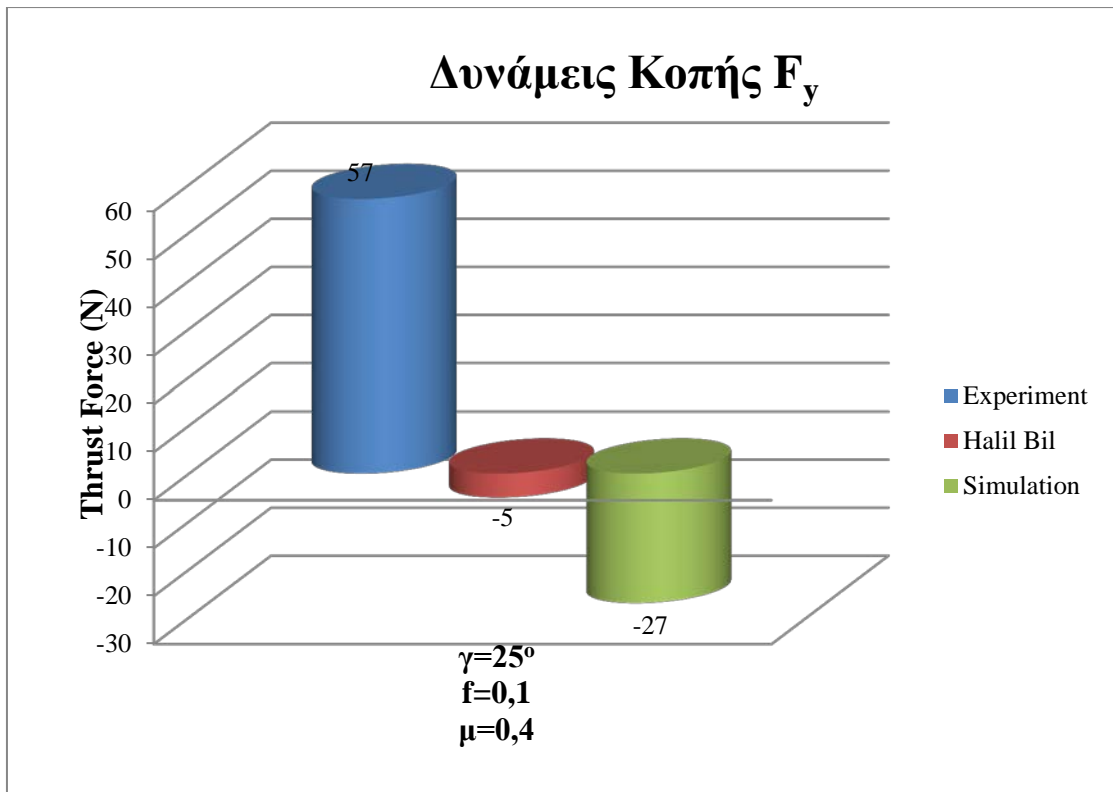
Πρώτη Προσομοίωση



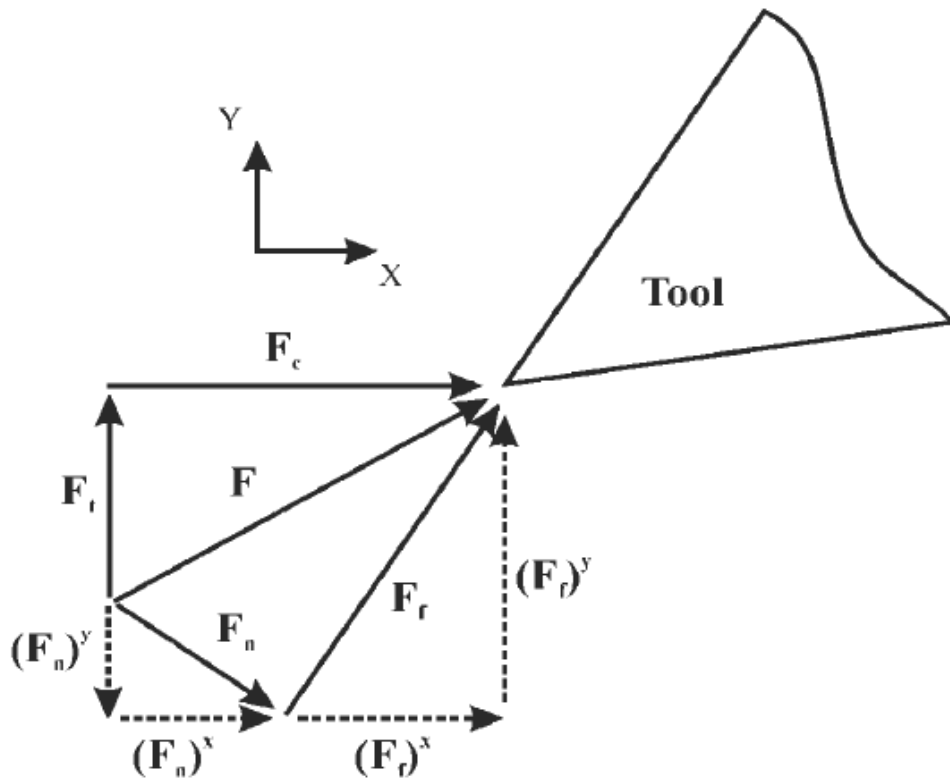


Δεύτερη Προσομοίωση





Από τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, καθώς επίσης και με αυτά που προέκυψαν από την αντίστοιχη εργασία του Halil Bil, συμπεραίνεται ότι οι τιμές των δυνάμεων κοπής F_x είναι πολύ κοντινές μεταξύ τους. Από την άλλη ούτε οι προσομοιώσεις της εργασίας, ούτε αυτές που διεξήγαγε ο Halil Bil κατάφεραν να προσεγγίσουν τις πειραματικές τιμές και παρουσιάζουν σημαντική διαφορά. Και οι δύο αυτές προσομοιώσεις στα αποτελέσματά τους έδειξαν αρνητικές τιμές για τις δυνάμεις F_y .



Εικόνα 4.31: Δυνάμεις κοπής F_x - Δυνάμεις άπωσης F_y

Αυτό γιατί όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα 4.31 για μικρές τιμές του συντελεστή τριβής η κάθετη συνιστώσα της κάθετης δύναμης τριβής $(F_n)^y$ ξεπερνάει τη κάθετη συνιστώσα της δύναμης τριβής $(F_f)^y$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

Μοντελοποίηση της τριβής

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί μελετάται η μοντελοποίηση της τριβής. Αρχικά θα παρουσιαστούν τα διάφορα μοντέλα τριβής τα οποία χρησιμοποιούνται στις διάφορες προσομοιώσεις κοπών. Στη συνέχεια εφαρμόζονται στο μοντέλο που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο δυο μοντέλα τριβής τα οποία και χρησιμοποιούνται στις κοπές και προτιμούνται ολοένα και περισσότερο από τους ερευνητές. Τέλος, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σχετικά με τα δύο μοντέλα τριβής.

5.2 Μοντέλα τριβής

Η μοντελοποίηση στη δευτερεύουσα ζώνη διάτμησης, δηλαδή στην επαφή του αποβλήτου και της πλευράς κοπής του κοπτικού εργαλείου, είναι ίσης σημαντικότητας με τη μοντελοποίηση υλικού που θα μελετήσουμε και θα διερευνηθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Το μοντέλο τριβής διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό των δυνάμεων κοπής, όπως επίσης της φθοράς του κοπτικού εργαλείου και της ποιότητας της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Οπότε, οι ερευνητές επικεντρώνονται στην επιλογή του κατάλληλου μοντέλου τριβής, έτσι ώστε να αναπαραστήσουν την πραγματική συμπεριφορά της κατεργασίας και να επιτευχθεί όσο το δυνατό καλύτερο αποτέλεσμα. Δηλαδή, όσο πιο κοντά στην πραγματικότητα. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα τριβής στις προσομοιώσεις κοπών παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

5.3 Μοντέλο Coulomb (Constant Coulomb)

Στις πρώτες προσομοιώσεις κοπών, χρησιμοποιήθηκε το απλό μοντέλο τριβής του Coulomb για όλη την επιφάνεια επαφής, με ένα σταθερό συντελεστή τριβής. Ισχύει συνεπώς ο νόμος τριβής του Coulomb. Η δύναμη της τριβής ολίσθησης είναι ανάλογη με την εφαρμοζόμενη κάθετη φόρτιση. Ο λόγος αυτών των δύο είναι ο συντελεστής τριβής μ , ο οποίος και διατηρείται σταθερός για το μήκος επαφής μεταξύ του αποβλήτου και του κοπτικού εργαλείου. Έτσι ορίζεται η παρακάτω σχέση:

$$\tau = \mu \sigma_n$$

όπου τ η τάση τριβής, σ_n η κάθετη τάση και μ ο συντελεστής τριβής.

Όμως όσο αυξάνεται η κάθετη δύναμη και υπερβαίνει ένα κρίσιμο όριο, η παραπάνω εξίσωση αποτυγχάνει να δίνει ακριβή και ρεαλιστικά αποτελέσματα. Από την πειραματική διερεύνηση έχει αποδειχθεί ότι το μήκος κοπής μπορεί να διακριθεί

σε δύο περιοχές επαφής. Στην περιοχή ολίσθησης και στη περιοχή sticking. Έτσι προέκυψε το μοντέλο τριβής Stick-Slip που μελέτησε ποιοτικά ο Zorev και το οποίο θα παρουσιαστεί στη συνέχεια

5.4 Μοντέλο τριβής της διάτμησης (Shear)

Στο μοντέλο τριβής διάτμησης, η τάση τριβής στη πλευρά κοπής του κοπτικού εργαλείου θεωρείται σταθερή και λόγω της περιορισμένης διακύμανσης των τάσεων τ και σ_n , δεν λαμβάνονται υπόψη. Συνεπώς από τα παραπάνω προκύπτει η παρακάτω σχέση :

$$\tau = mk$$

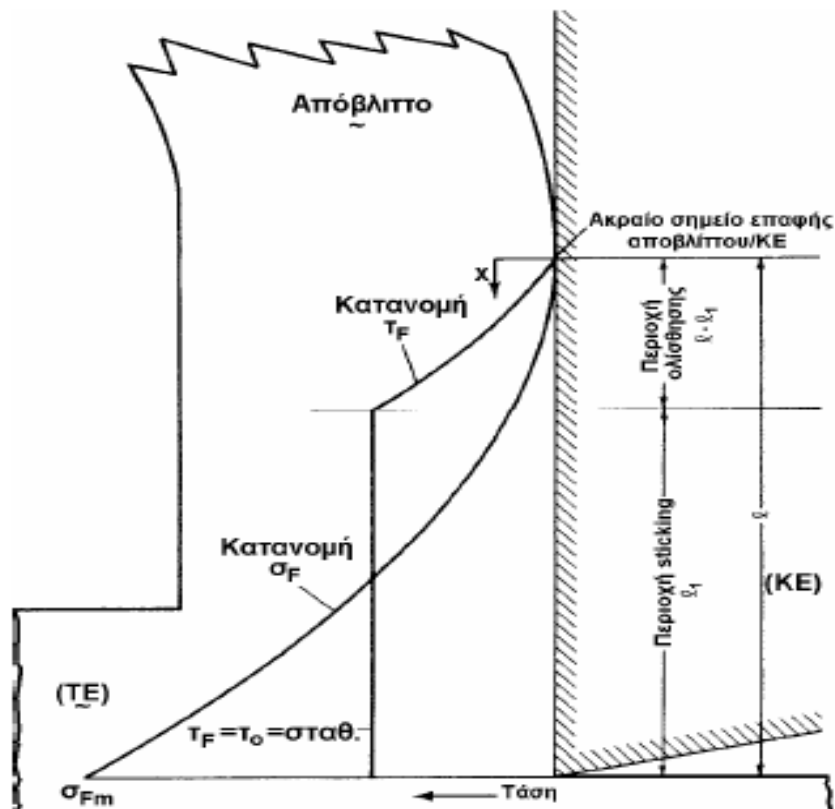
όπου m ο συντελεστής τριβής και k η διατμητική τάση ροής του υλικού του δοκιμίου. Από το συνδυασμό των δύο παραπάνω μοντέλων τριβής προέκυψε το μοντέλο τριβής του Stick Slip.

5.5 Μοντέλο τριβής του Zorev, Stick-Slip

Σύμφωνα με τη μελέτη του Zorev (1963) [40], στην πλευρά κοπής του κοπτικού εργαλείου εμφανίζονται δύο περιοχές τριβής. Η πρώτη περιοχή είναι η ζώνη Sticking, όπου η τάση τριβής παραμένει σταθερή. Η δεύτερη περιοχή είναι η περιοχή ολίσθησης όπου η κάθετη δύναμη είναι μικρή. Έτσι στη ζώνη Sticking ισχύει το μοντέλο τριβής της διάτμησης και στη περιοχή ολίσθησης η θεωρία τριβής του Coulomb. Αυτό εκφράζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} \tau &= \mu \sigma_n \text{ όταν } \mu \sigma_n < k_{\text{chip}} \text{ (ολίσθηση)} \\ \tau &= k, \text{ όταν } \mu \sigma_n \geq k_{\text{chip}} \text{ (Sticking)} \end{aligned}$$

όπου τ είναι η τάση τριβής, σ_n η κανονική τάση, μ ο συντελεστής τριβής και k_{chip} η διατμητική τάση του αποβλήτου. Η κατανομή της κανονικής διατμητικής τάσης και της διατμητικής τάσης τριβής στη επιφάνεια αποβλήτου – εργαλείου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 5.1: Καμπύλες που αναπαριστούν την κατανομή κανονικής τάσης και τάσης τριβής στην επιφάνεια αποβλήτου[21]

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν συμπεράσματα τα οποία συνοψίζονται παρακάτω:

Στην περιοχή μήκους L_1 , (Περιοχή Sticking), λαμβάνει χώρα πλαστική παραμόρφωση του υλικού απόβλητου λόγω διάτμησης. Η τάση τριβής τ είναι σταθερή και ίση με το όριο διαρροής σε διάτμηση τ_0 του υλικού

Στην περιοχή $(L-L_1)$, (Περιοχή Ολίσθησης) επικρατούν συνθήκες ξηρής τριβής ολίσθησης με σταθερό συντελεστή τριβής μ .

Η κατανομή της ορθής τάσης σ είναι παραβολική σε όλο το μήκος της επιφάνειας επαφής ΚΕ/αποβλήτου και μπορεί να περιγραφεί με ικανοποιητική προσέγγιση από τη σχέση:

$$\sigma = q x^y$$

όπου q, y σταθερές και $x \in [0, L]$. [21]

Σημαντική παράμετρος στη χρησιμοποίηση του παραπάνω συνδυαστικού μοντέλου τριβής αποτελεί ο καθορισμός του μήκους της ζώνης Sticking και της ζώνης ολίσθησης. Σύμφωνα με τη δημοσίευση του Shatla [41], το μήκος της περιοχής Sticking μπορεί να θεωρηθεί ίσο με το διπλάσιο του άκοπου πλάτους του αποβλήτου. Όμως παρατηρήθηκε ότι με αυτό τον τρόπο η Sticking περιοχή κάλυπτε ολόκληρο το μήκος επαφής. Αργότερα ο Ozel [17] πρότεινε ως ενδεικτικό μήκος της περιοχής Sticking, μήκος ίσο με το άκοπο πλάτος αποβλήτου. Στις προσομοιώσεις αυτού του

κεφαλαίου με μοντέλο τριβής το μοντέλο τριβής Stick-Slip του Zoren λήφθηκε υπόψη τιμή συντελεστή τριβής Coulomb $\mu=1,05$. Η τιμή αυτή είναι η ενδεικτική τιμή του προγράμματος μας και επαληθεύεται και από τη σχέση:

$$\mu =$$

Τρίτη Προσομοίωση Μοντέλου

Coulomb Bilinear με $f=0.05$, $\gamma=25^\circ$ $\mu=0.4$

Στοιχεία προσομοίωσης

Run Job

Name: job1
Type: Thermal/Structural
User Subroutine File:
 Parallelization: No DDM
1 Solver Process

Title: Table-Driven | Style:
Submit (1) | Advanced Job Submission
Update | Monitor | Kill

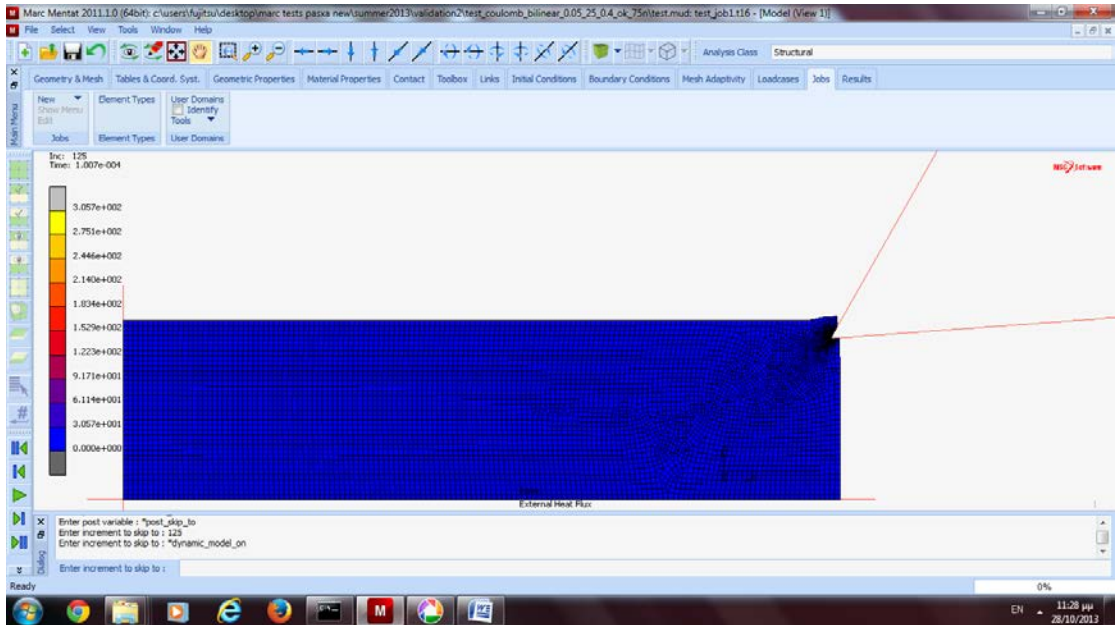
Status	Complete
Current Increment (Cycle)	5000 (2)
Singularity Ratio	0.0062645
Convergence Ratio	0.04721
Analysis Time	0.0040278
Wall Time	21175

Total

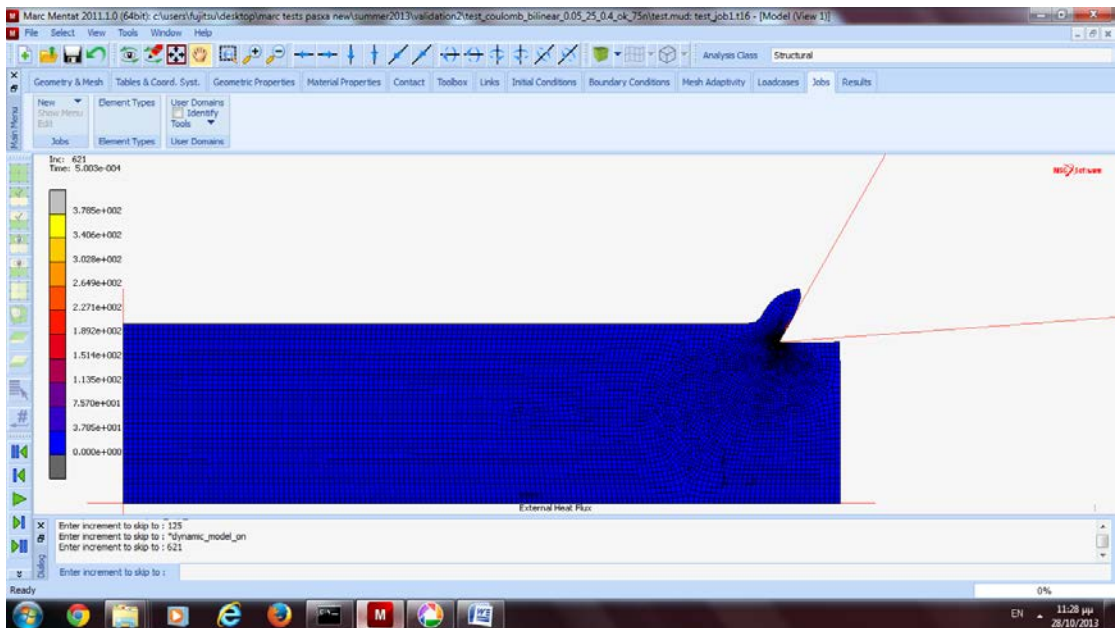
Cycles	20527	Cut Backs	0
Separations	1052	Remeshes	1951

Exit Number: 3004 | Exit Message:
Edit: Output File | Log File | Status File | Any File
Open Post File (Results Menu)
Reset | OK

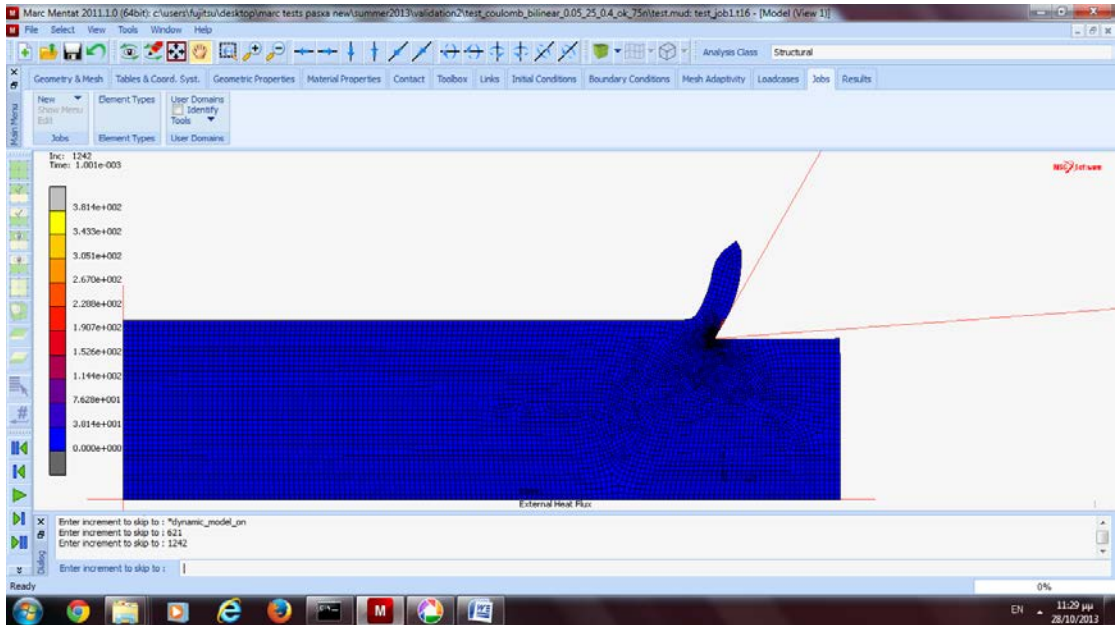
Από την διεξαγωγή της προσομοίωσης προέκυψαν τα ακόλουθα στιγμιότυπα:



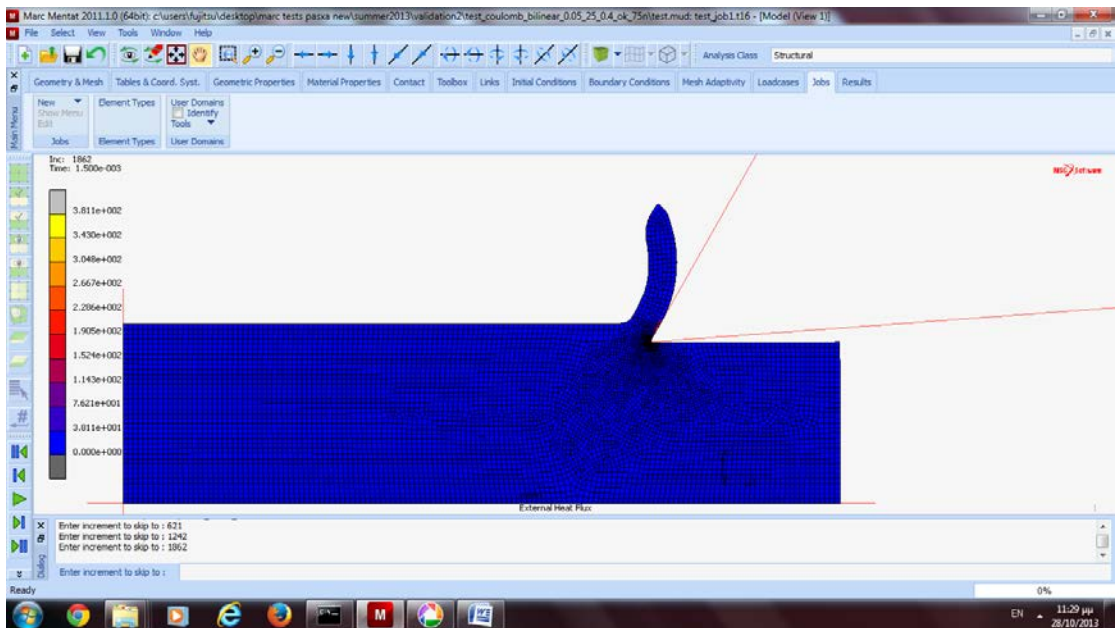
$t=0,0001\text{sec } T_{\max}=305,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$



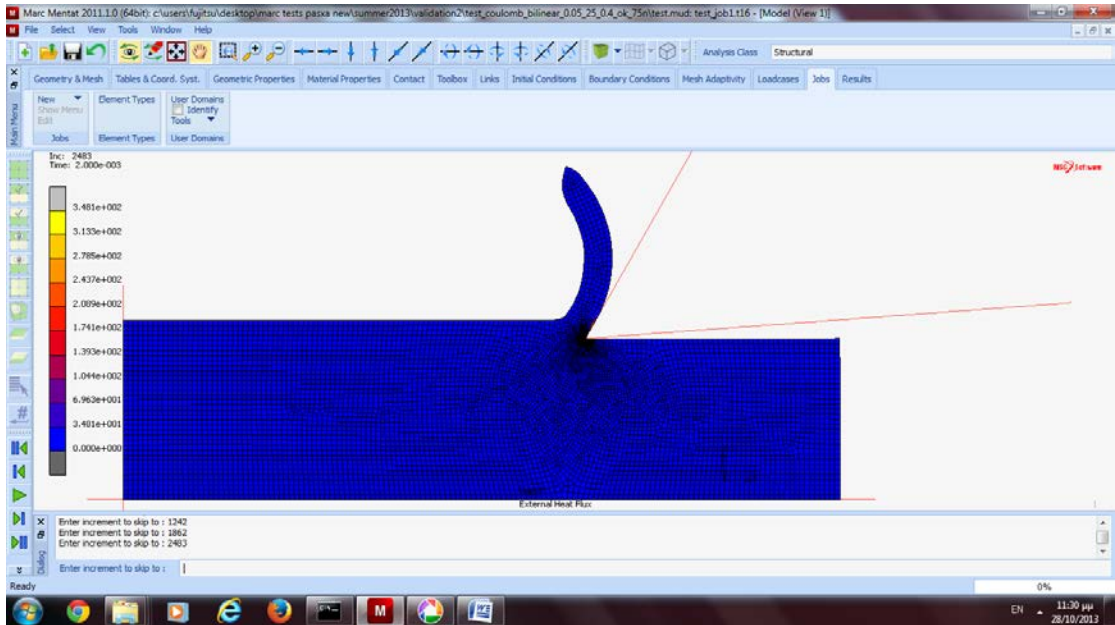
$t=0,0005 \text{ sec } T_{\max}=378,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$



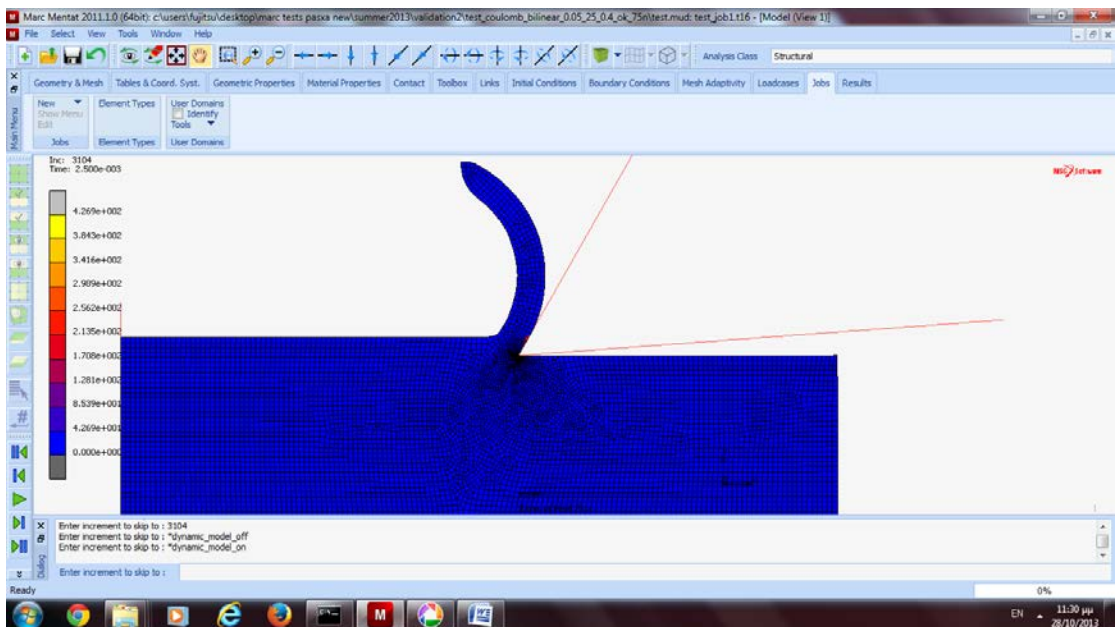
$t=0,0001 \text{ sec } T_{\max}=381,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$



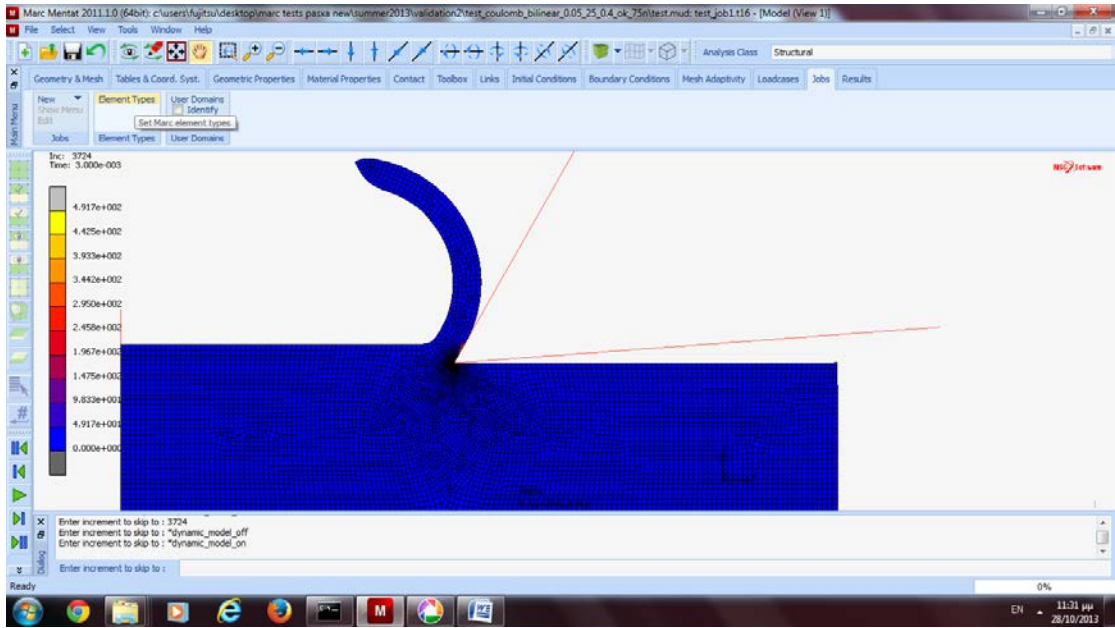
$t=0,00015 \text{ sec } T_{\max}=381,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$



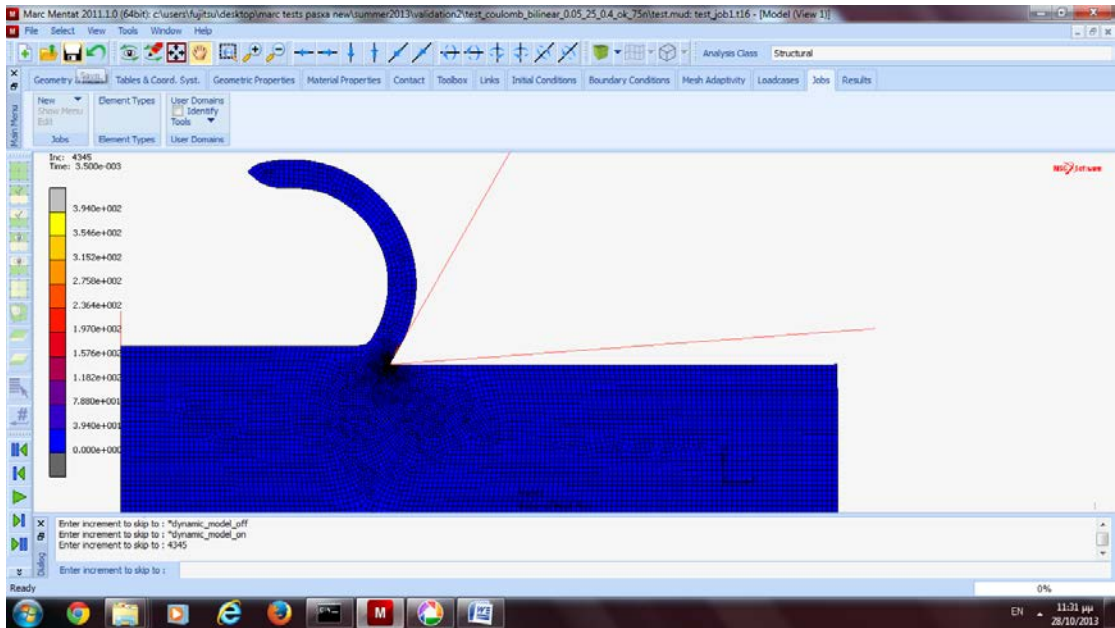
$t=0,00020 \text{ sec } T_{\max}=348,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$



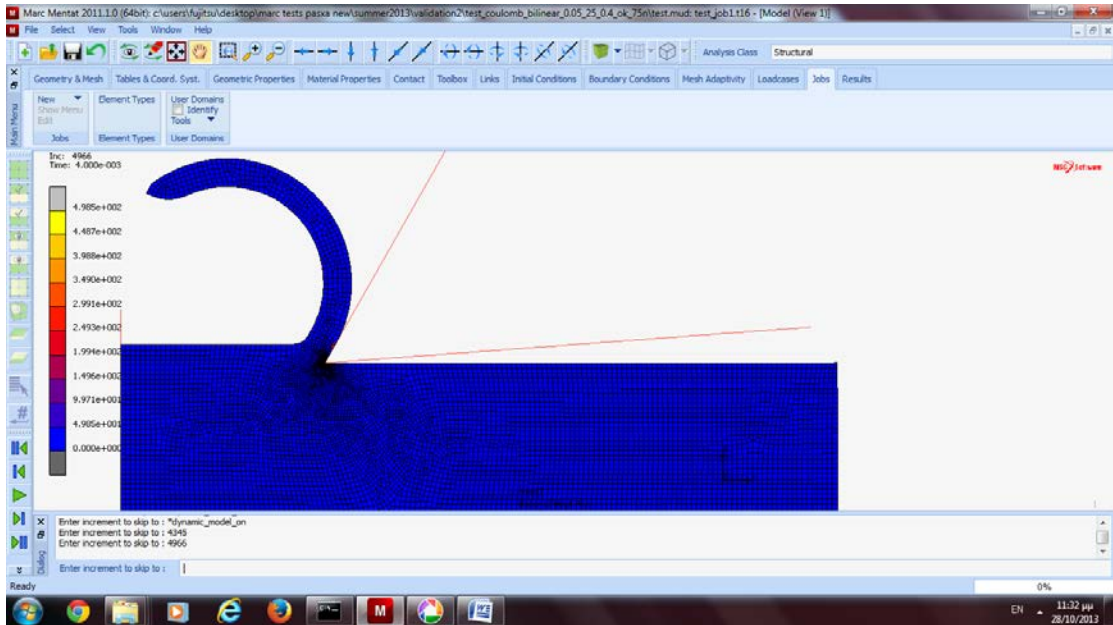
$t=0,00025 \text{ sec } T_{\max}=426,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$



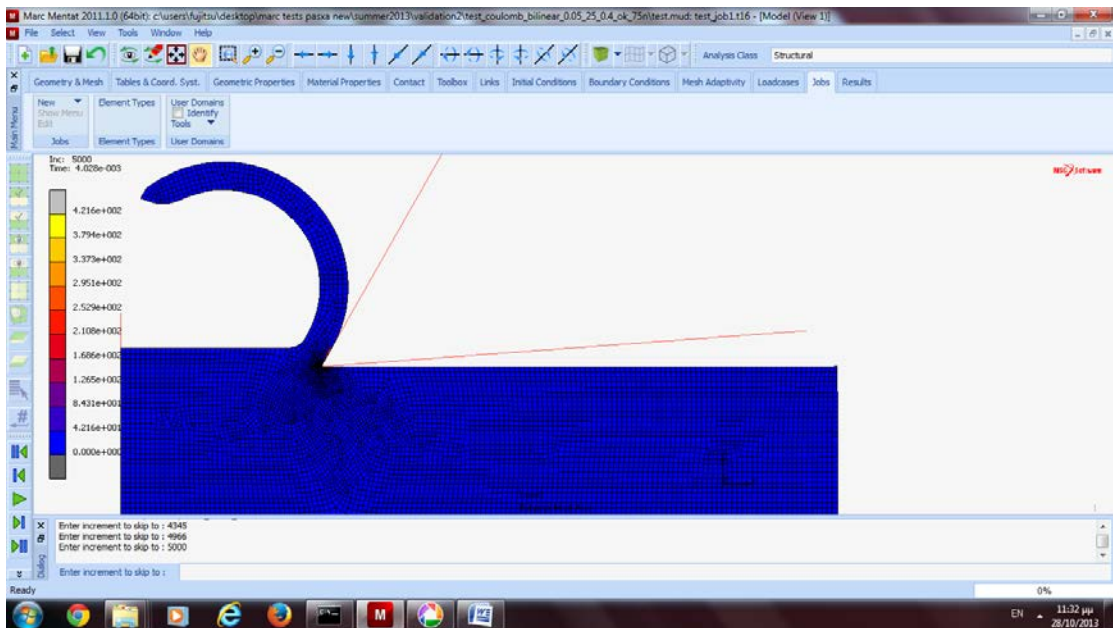
t=0,00030 sec $T_{\max}=491,7\text{ }^{\circ}\text{C}$



t=0,00035 sec $T_{\max}=394,0\text{ }^{\circ}\text{C}$



$t=0,00040 \text{ sec } T_{\max}=498,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

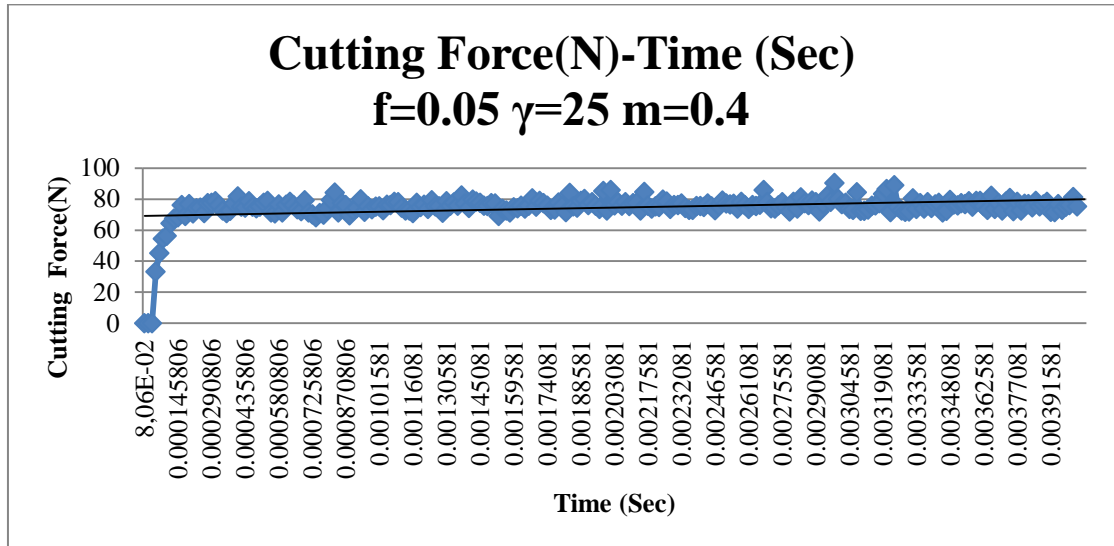


$t=0,0004028 \text{ sec } T_{\max}=349,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Από τα στιγμιότυπα της τρίτης προσομοίωσης προκύπτει ότι η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο απόβλητο είναι $T_{\max}=498,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Δυνάμεις κοπής

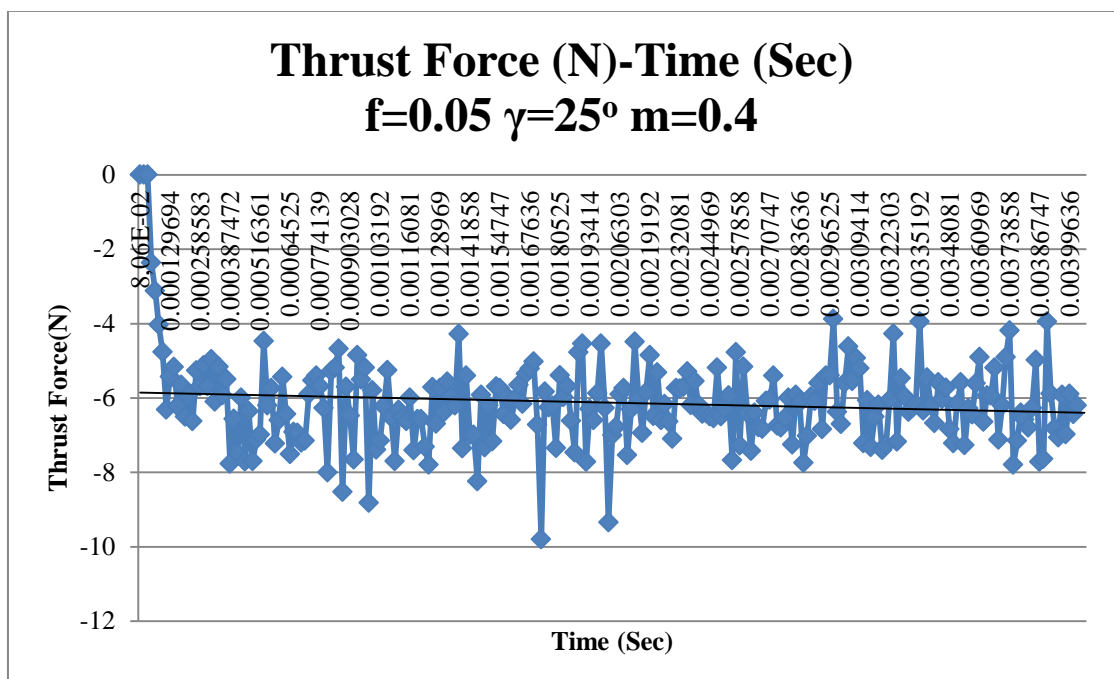
Από τον υπολογισμό των κοπτικών δυνάμεων κατά τον άξονα των x, προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα της κοπής:



Διάγραμμα 5.1

Από τους υπολογισμούς των δυνάμεων προέκυψε ότι κατά τη μόνιμη κατάσταση η μέση τιμή των δυνάμεων κοπής κατά τον άξονα των x, είναι 75N. Η τιμή αυτή προκύπτει και από το διάγραμμα.

Αντίστοιχα υπολογίστηκαν μέσω του Marc και οι δυνάμεις κοπής κατά τον άξονα των y και προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 5.2

Από τις τιμές των δυνάμεων του παραπάνω γραφήματος προκύπτει η μέση τιμή της δύναμης ίση με **-6 N**.

Γεωμετρία του αποβλήτου

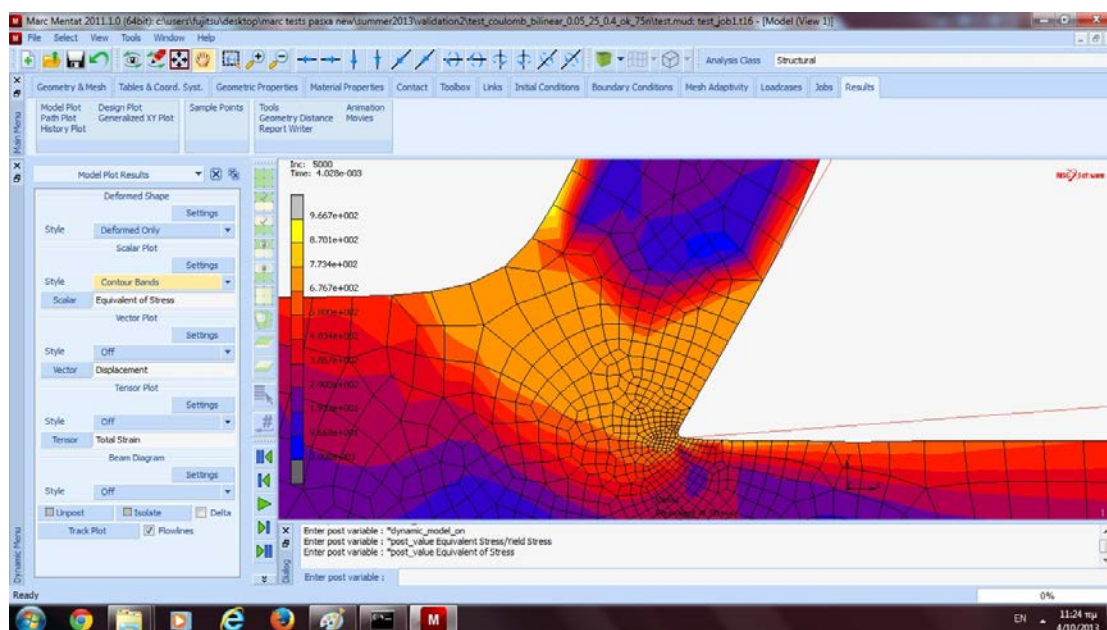
Μετρώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του παραχθέντος αποβλήτου δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας:

$\gamma(^{\circ})$	f (mm)	t_c (mm)	L_c (mm)	$\phi(^{\circ})$
25^ο	0,05	0,10	0,06	29,95

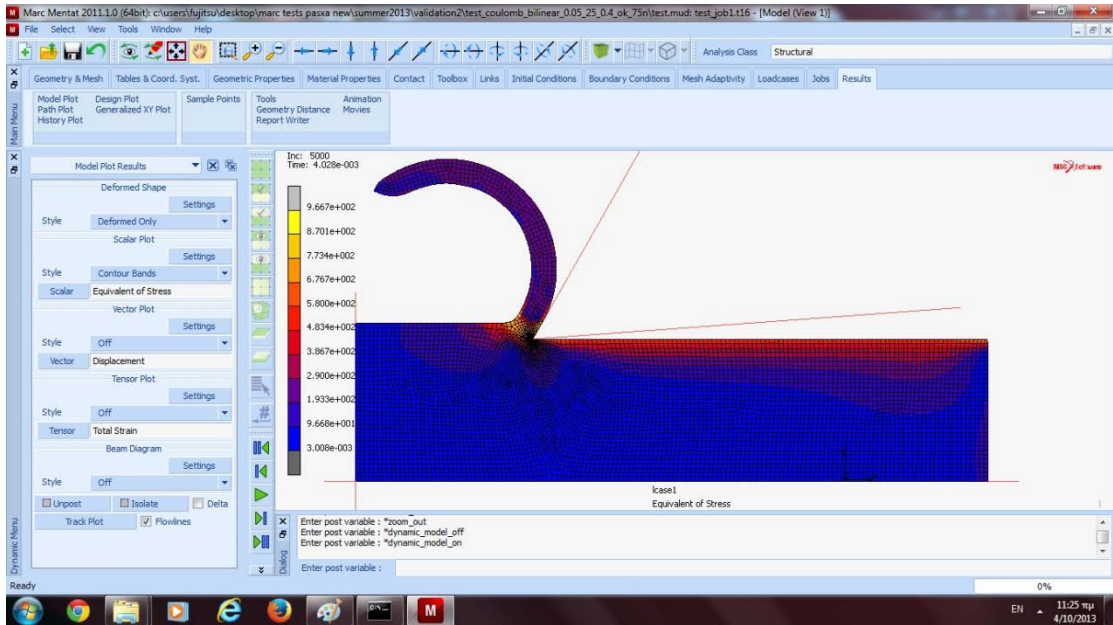
Μηχανικές και θερμικές παράμετροι

Από την αριθμητική επίλυση του μοντέλου προέκυψαν αποτελέσματα χρήσιμα για τη μελέτη, που αφορούν παραμέτρους όπως η πλαστική παραμόρφωση, ο ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης και οι τάσεις στη ζώνη παραμόρφωσης οι οποίοι παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν:

Τάσεις

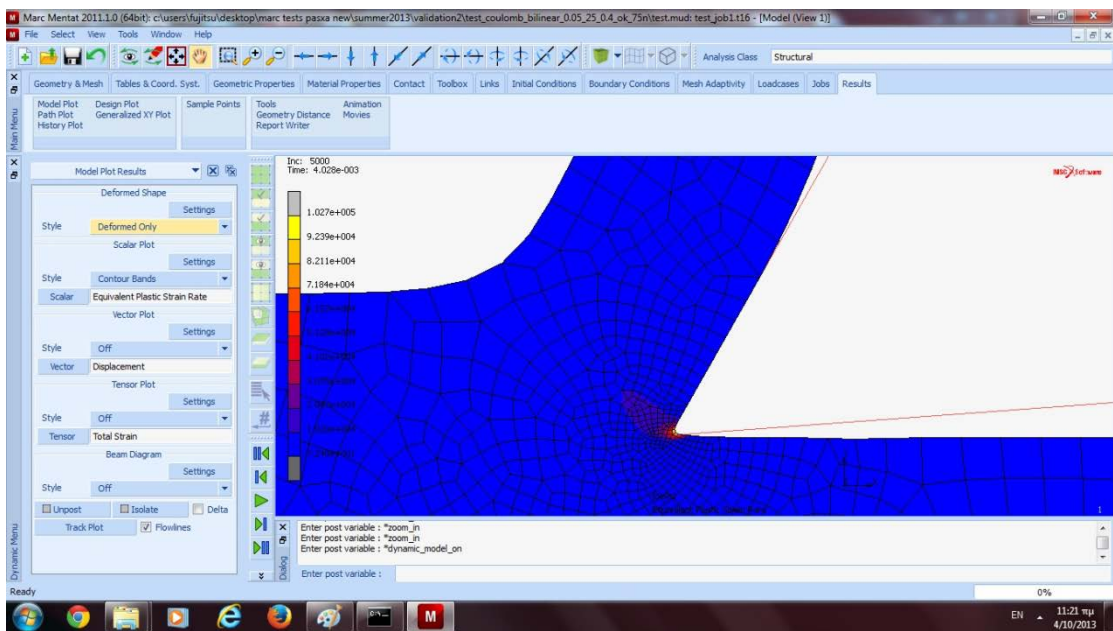


Εικόνα 5.2: Τάσεις 966,7 MPa στην κύρια ζώνη και 775,4 MPa στη δευτερεύουσα ζώνη παραμόρφωσης.



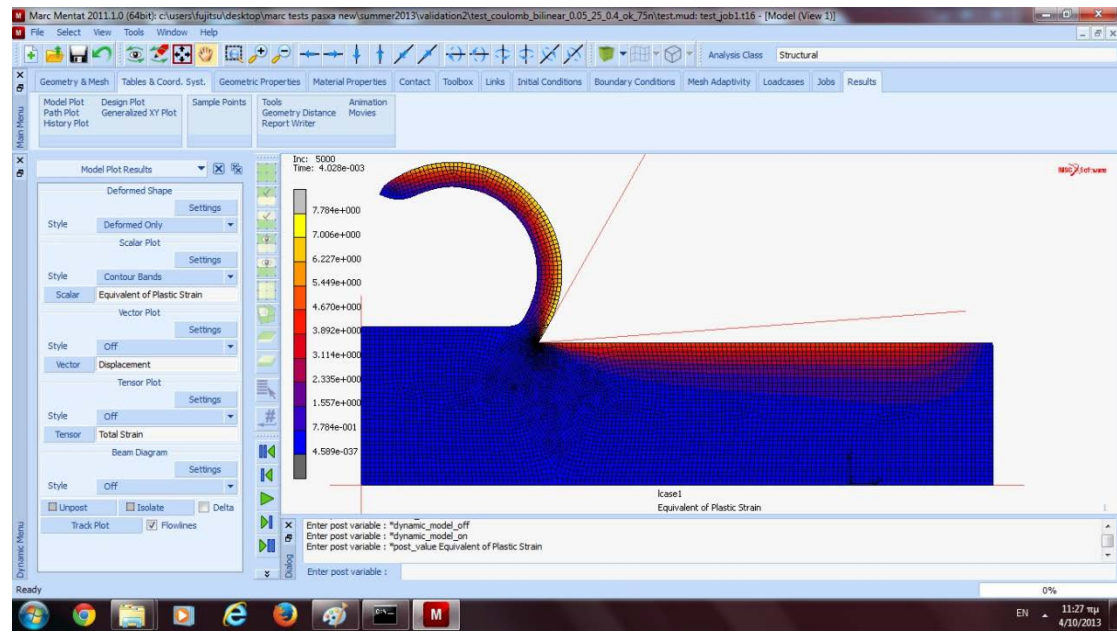
Εικόνα 5.3: Η κατανομή των τάσεων σε όλο το τεμάχιο.

Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης



Εικόνα 5.4: Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης 102700 ((mm/mm)/sec) στην κύρια ζώνη παραμόρφωσης

Πλαστική παραμόρφωση



Εικόνα 5.5: Κατανομή πλαστικής παραμόρφωσης

Προσομοιώσεις Μοντέλων τριβής Stick-Slip

Τέταρτη Προσομοίωση Μοντέλου

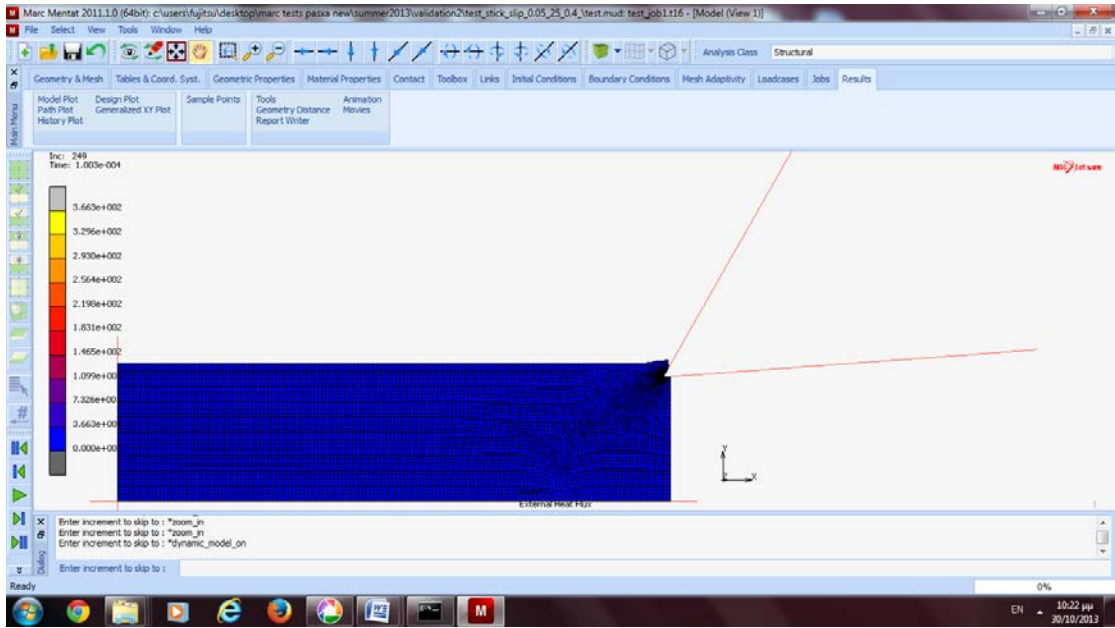
Stick-slip με $f=0,05$, $\gamma=25^\circ$ $\mu=1,05$ $m=0,4$

Στοιχεία προσομοίωσης

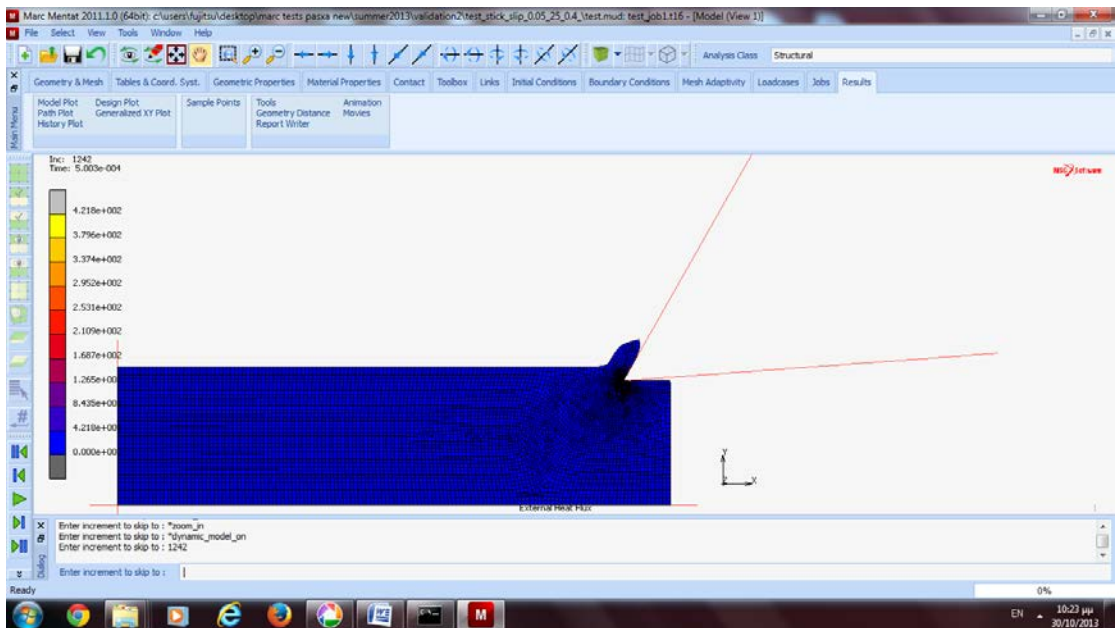
The screenshot shows the 'Run Job' dialog box with the following information:

Name	job1		
Type	Thermal/Structural		
User Subroutine File			
<input type="checkbox"/> Parallelization			
		No DDM	
		1 Solver Process	
Title	Style	Table-Driven	Save Model
Submit (1)		Advanced Job Submission	
Update	Monitor	Kill	
Status	Complete		
Current Increment (Cycle)	9999 (3)		
Singularity Ratio	0.010691		
Convergence Ratio	0.01908		
Analysis Time	0.0040274		
Wall Time	39492		
Total			
Cycles	52134	Cut Backs	0
Separations	1417	Remeshes	2452
Exit Number	3004	Exit Message	
Edit	Output File	Log File	Status File
			Any File
Open Post File (Results Menu)			
Reset	OK		

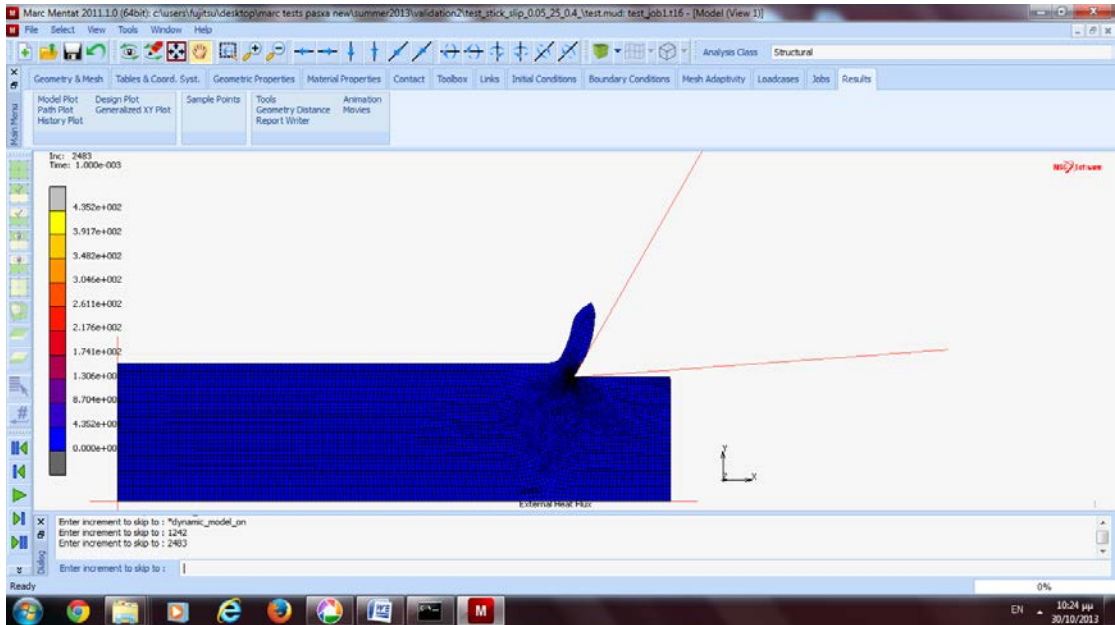
Από τη διεξαγωγή της προσομοίωσης προέκυψαν τα ακόλουθα στιγμιότυπα:



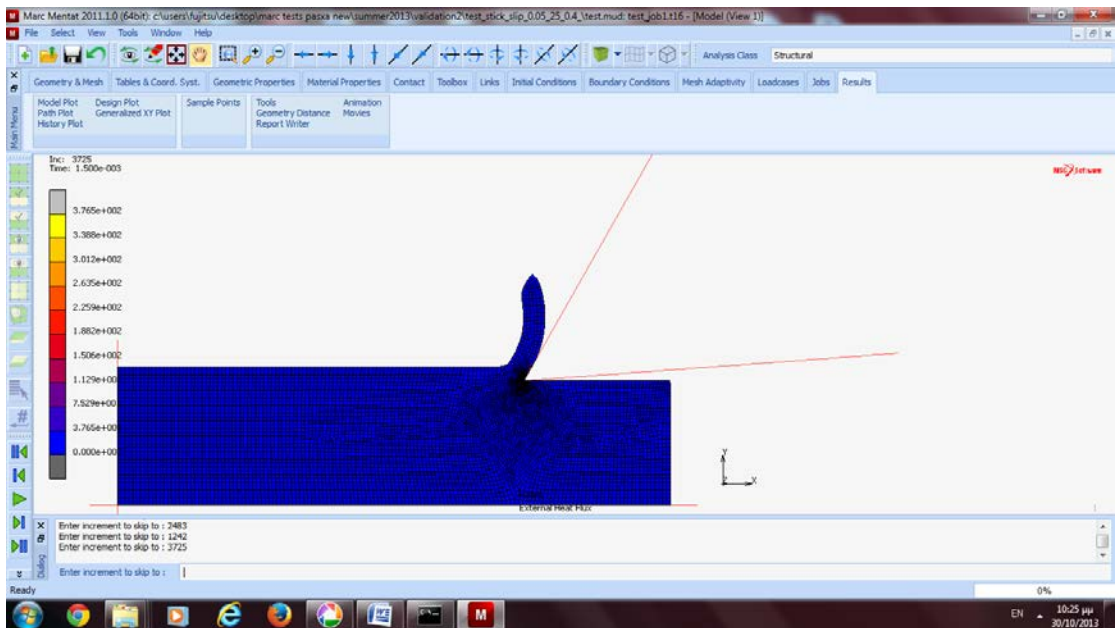
$t=0,0001\text{sec } T_{\max}=366,3\text{ }^{\circ}\text{C}$



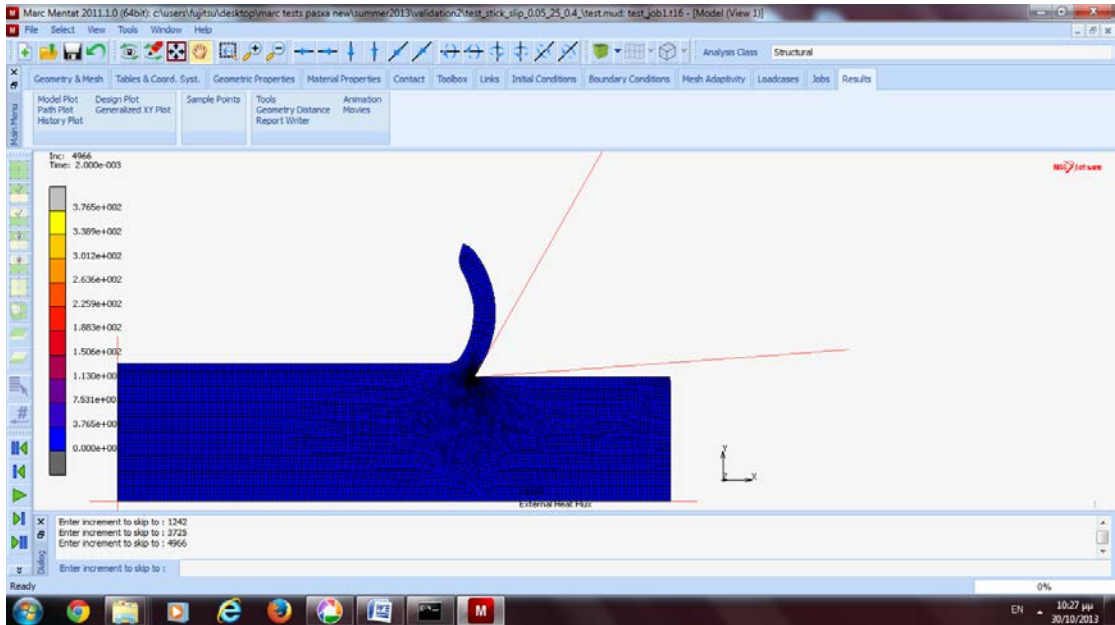
$t=0,0005\text{ sec } T_{\max}=421,8\text{ }^{\circ}\text{C}$



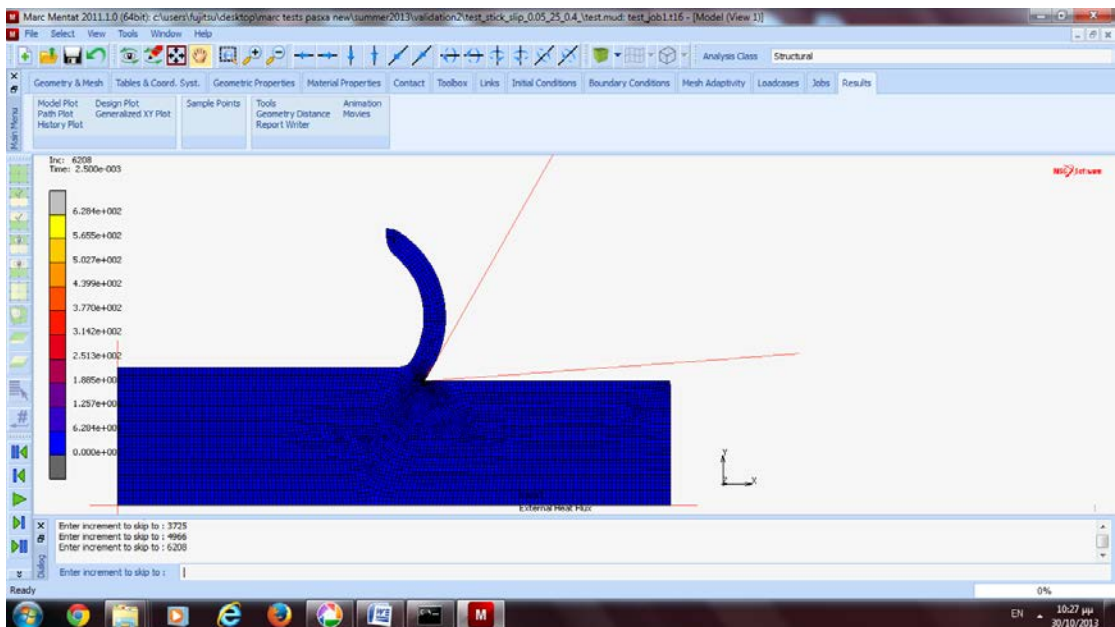
$t=0,001 \text{ sec } T_{\max}=435,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$



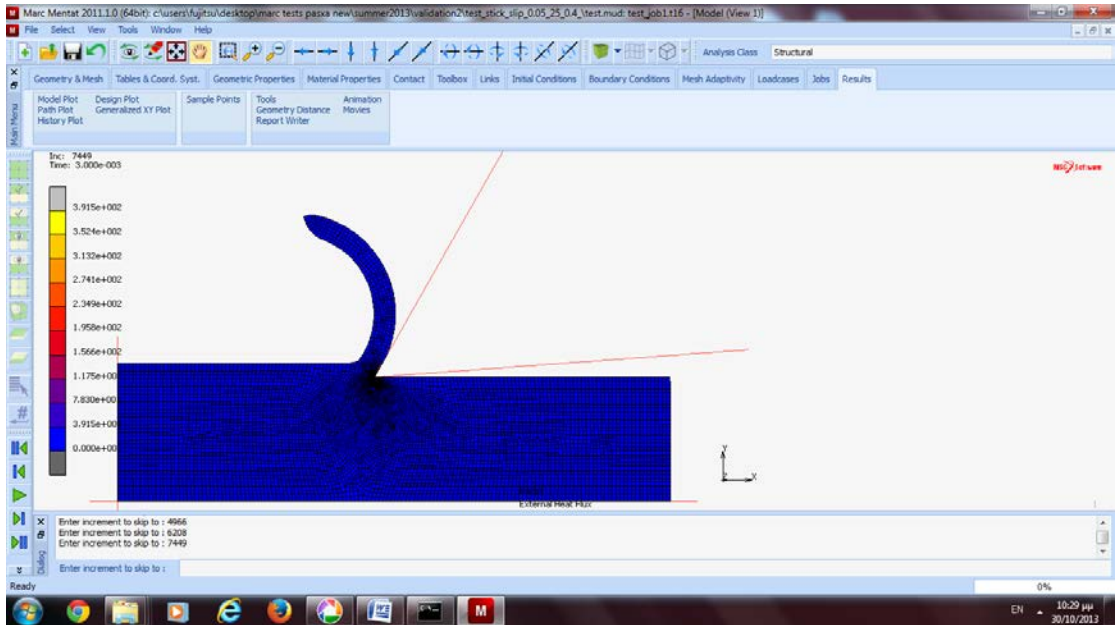
$t=0,0015 \text{ sec } T_{\max}=376,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$



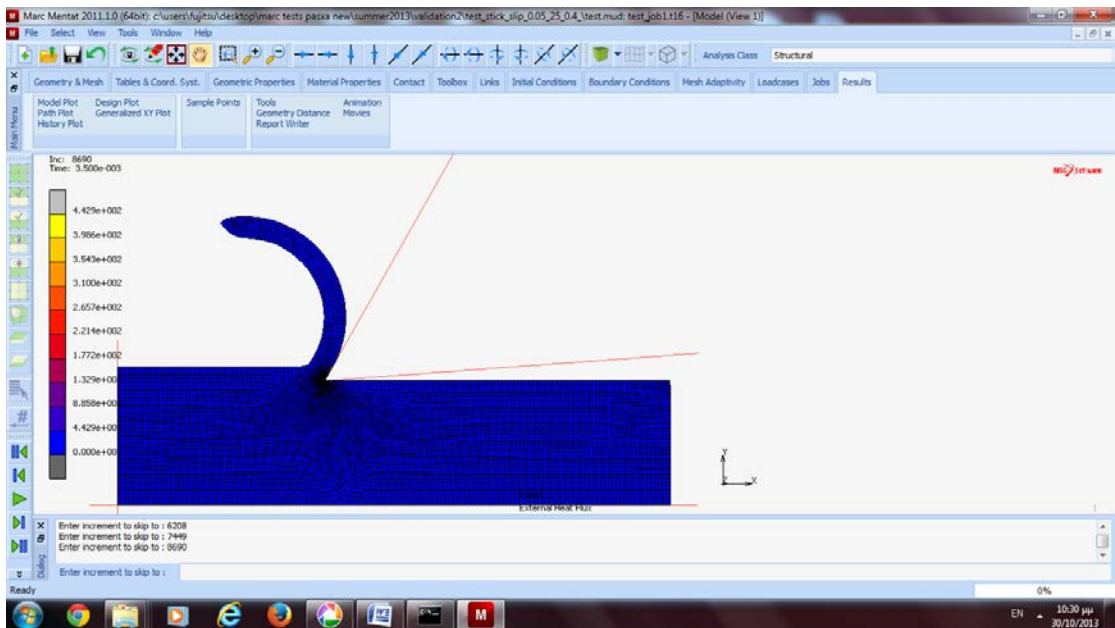
$t=0,0020 \text{ sec } T_{\max}=376,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$



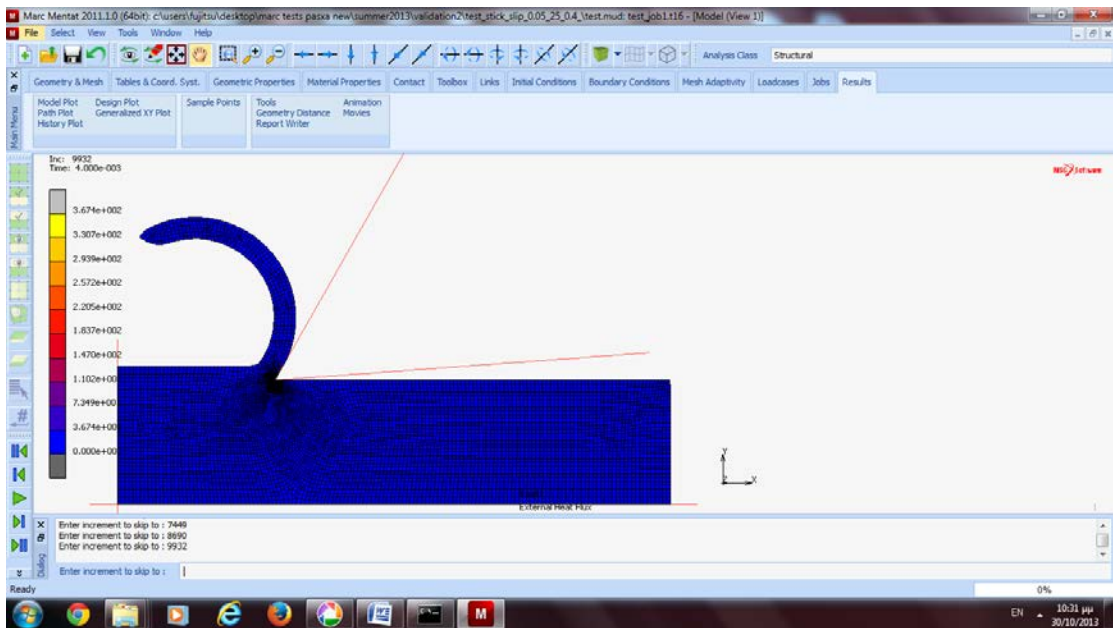
$t=0,0025 \text{ sec } T_{\max}=628,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$



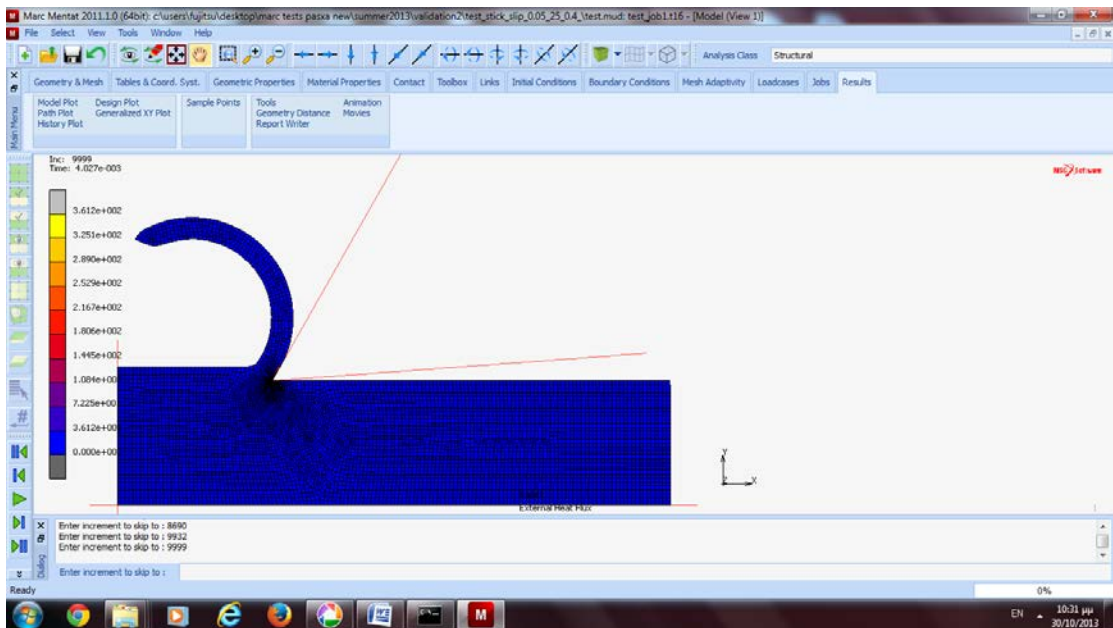
$t=0,00030 \text{ sec } T_{\max}=391,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$t=0,00035 \text{ sec } T_{\max}=442,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$t=0,00040 \text{ sec}$ $T_{\max}=367,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$

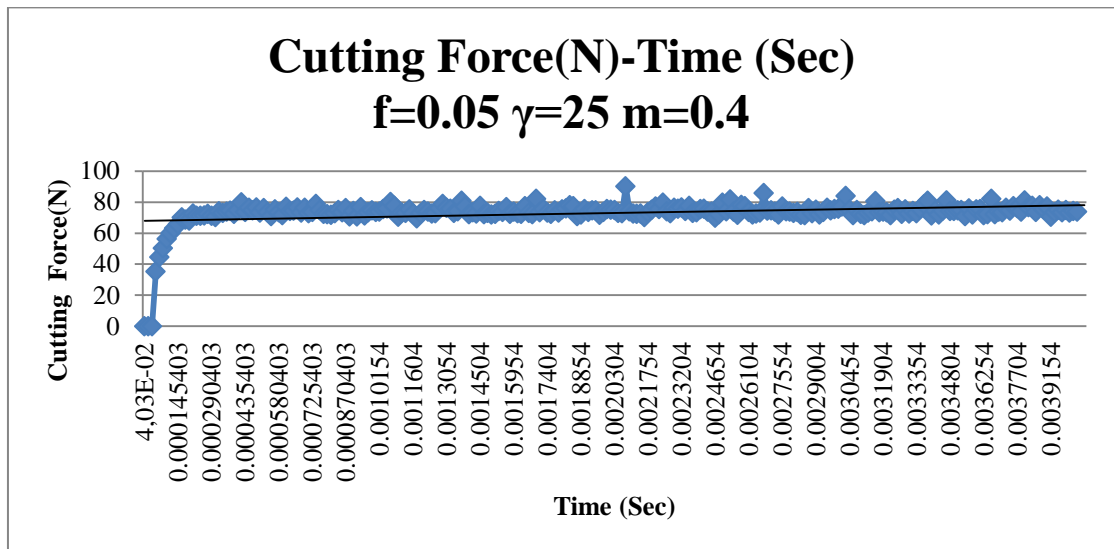


$t=0,0004028 \text{ sec}$ $T_{\max}=361,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Από τα στιγμιότυπα της πρώτης προσομοίωσης προκύπτει ότι η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο απόβλητο είναι $T_{\max}=628,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Δυνάμεις κοπής

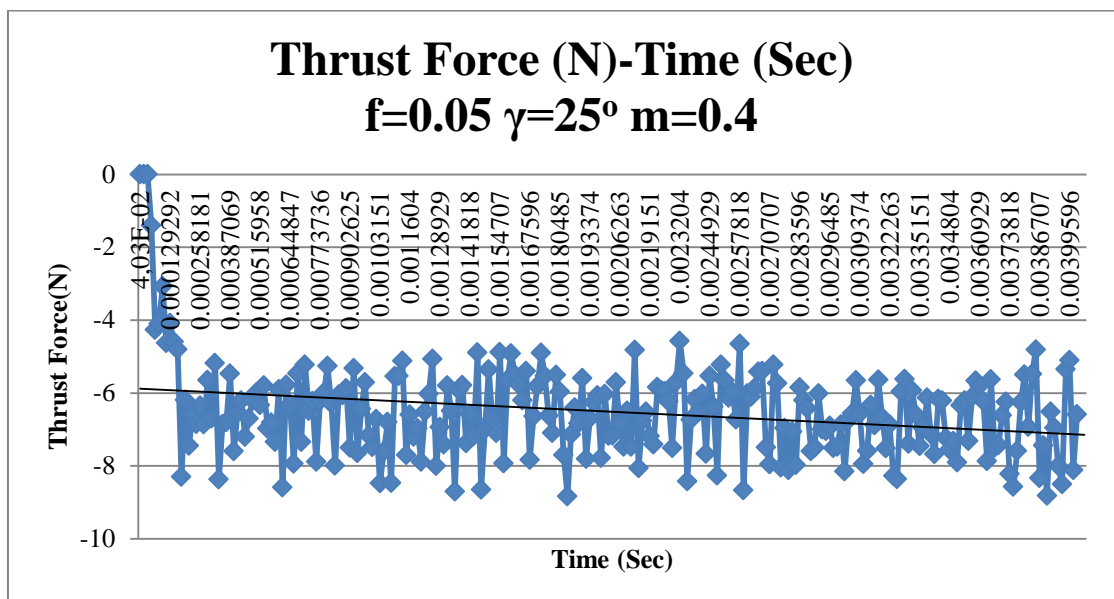
Από τον υπολογισμό των κοπτικών δυνάμεων κατά τον άξονα των x, προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 5.3

Από τους υπολογισμούς των δυνάμεων προέκυψε ότι κατά τη μόνιμη κατάσταση η μέση τιμή των δυνάμεων κοπής κατά τον άξονα των x, είναι **74 N**. Η τιμή αυτή προκύπτει και από το διάγραμμα.

Αντίστοιχα υπολογίστηκαν μέσω του Marc και οι δυνάμεις κοπής κατά τον άξονα των y και προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 5.4

Από τις τιμές των δυνάμεων του παραπάνω γραφήματος προκύπτει η μέση τιμή της δύναμης ίση με -7 N .

Γεωμετρία του αποβλήτου

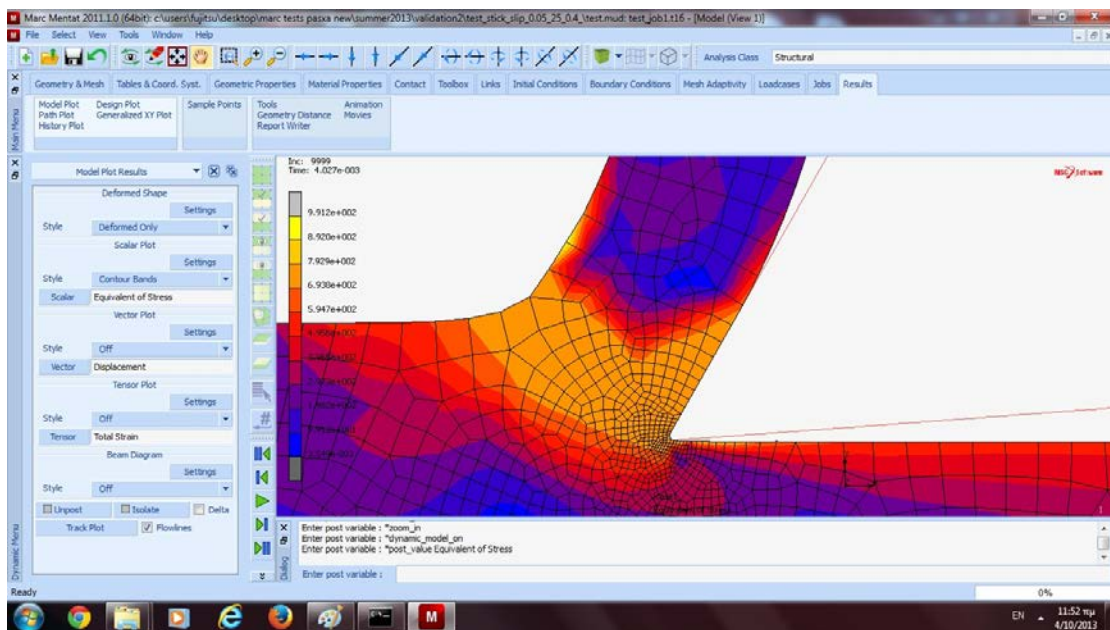
Μετρώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του παραχθέντος αποβλήτου δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας:

$\gamma (^{\circ})$	f (mm)	t_c (mm)	L_c (mm)	$\phi (^{\circ})$
25°	0,05	0,0994	0,062	30,26

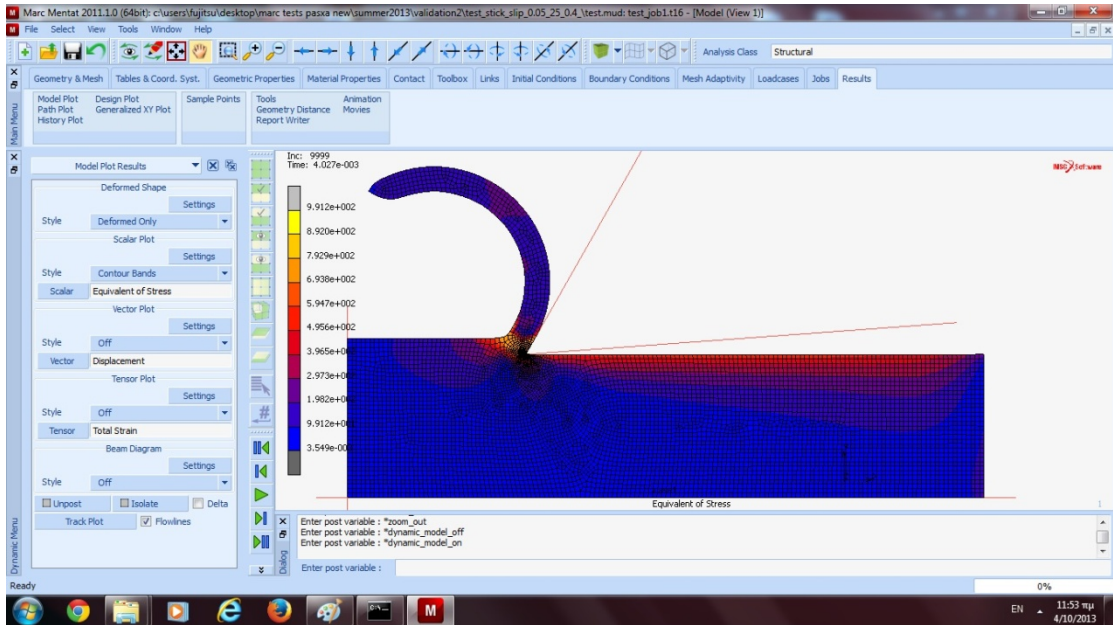
Μηχανικές και θερμικές παράμετροι

:

Τάσεις

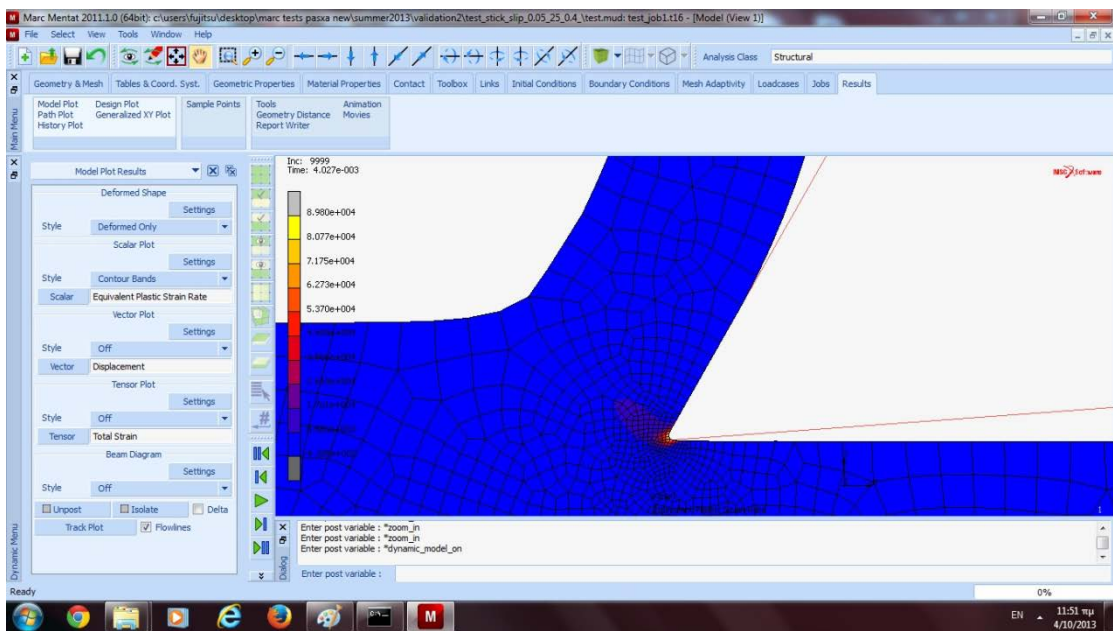


Εικόνα 5.5: Τάσεις 991,2 MPa στην κύρια ζώνη και 693 MPa στη δευτερεύουσα ζώνη παραμόρφωσης.



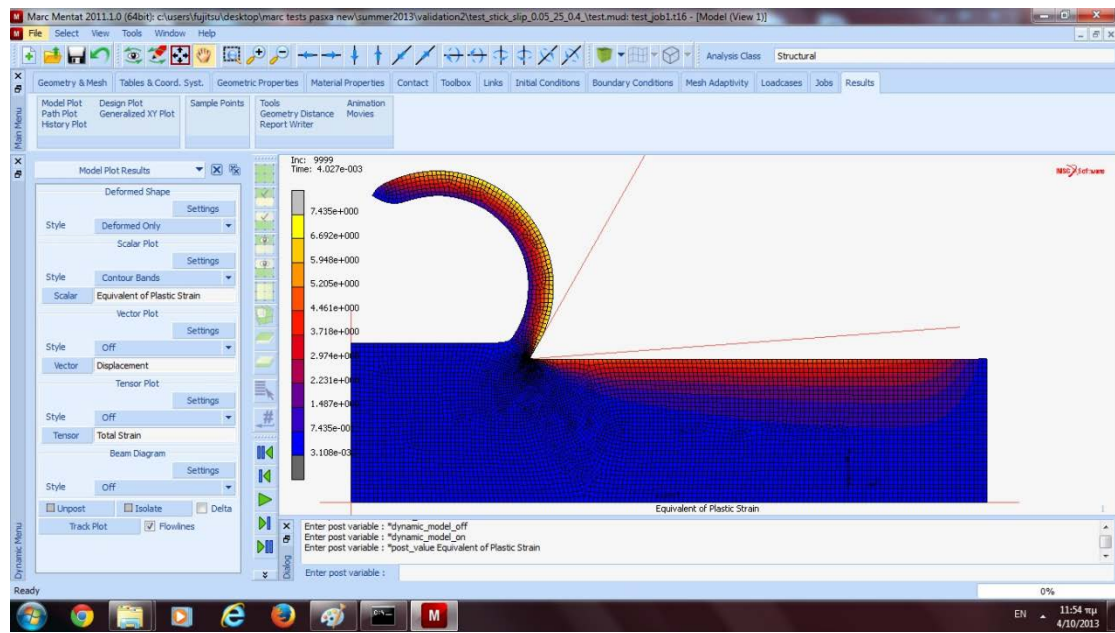
Εικόνα 5.6: Η κατανομή των τάσεων σε όλο το τεμάχιο.

Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης



Εικόνα 5.7: Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης 89800 ((mm/mm)/sec) στην κύρια ζώνη παραμόρφωσης

Πλαστική παραμόρφωση



Εικόνα 5.8: Κατανομή πλαστικής παραμόρφωσης

Πέμπτη Προσομοίωση Μοντέλου

Stick-slip με $f=0,05$, $\gamma=25^\circ$ $\mu=1,05$ $m=0,2$

Στοιχεία προσομοίωσης

Run Job

Name: job1
Type: Thermal/Structural
User Subroutine File:
 Parallelization: No DDM
1 Solver Process

Title: Table-Driven | Style: Save Model

Submit (1) | Advanced Job Submission

Update | Monitor | Kill

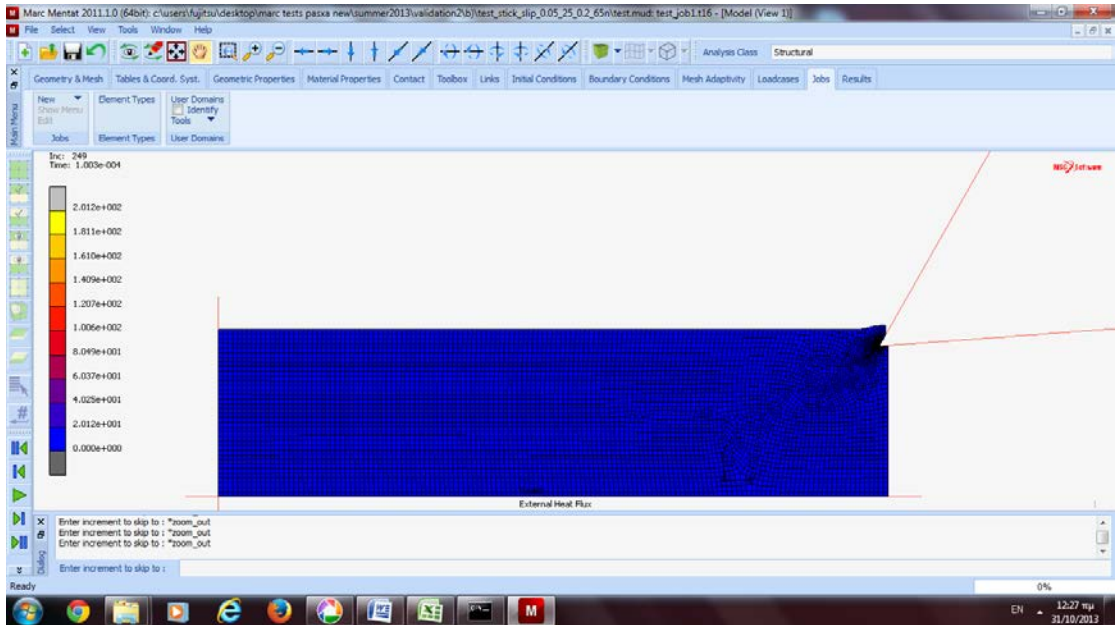
Status	Complete
Current Increment (Cycle)	9999 (3)
Singularity Ratio	0.0029899
Convergence Ratio	0.02351
Analysis Time	0.0040274
Wall Time	42294

Total

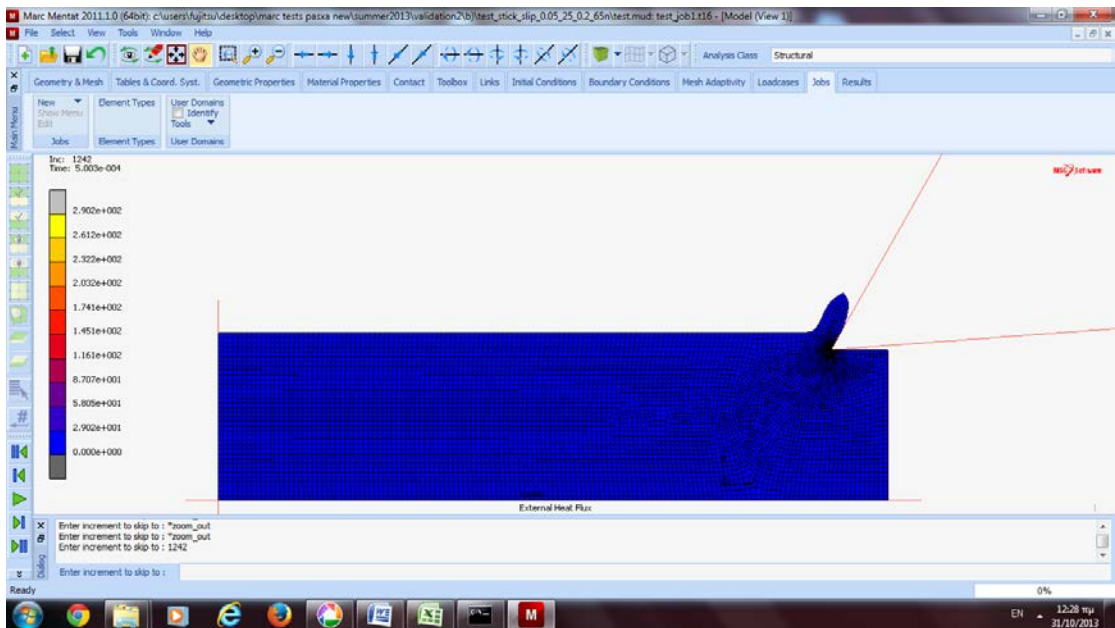
Cycles	58494	Cut Backs	0
Separations	1684	Remeshes	2900

Exit Number: 3004 | Exit Message:
Edit: Output File | Log File | Status File | Any File
Open Post File (Results Menu)
Reset | OK

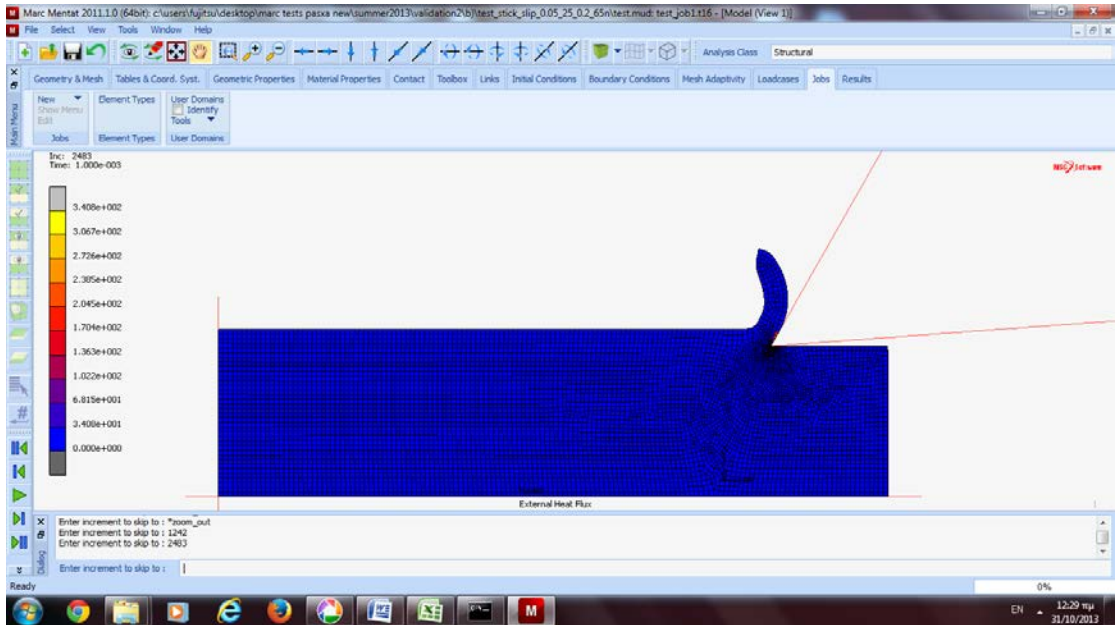
Από τη διεξαγωγή της προσομοίωσης προέκυψαν τα ακόλουθα στιγμιότυπα:



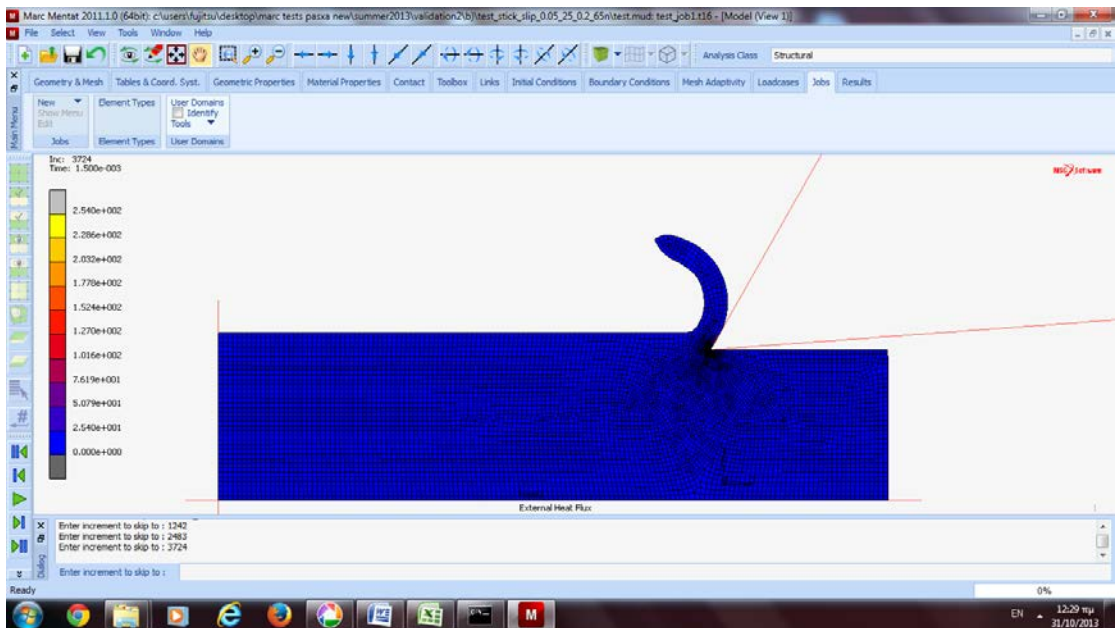
$t=0,0001\text{sec } T_{\text{max}}=201,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$



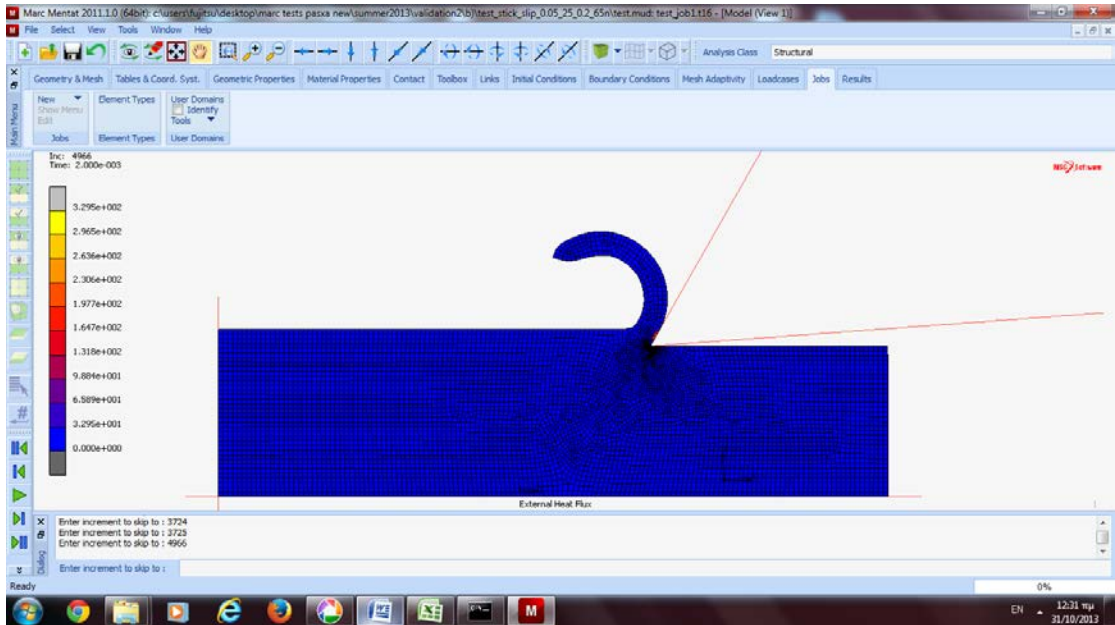
$t=0,0005 \text{ sec } T_{\text{max}}=290,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$



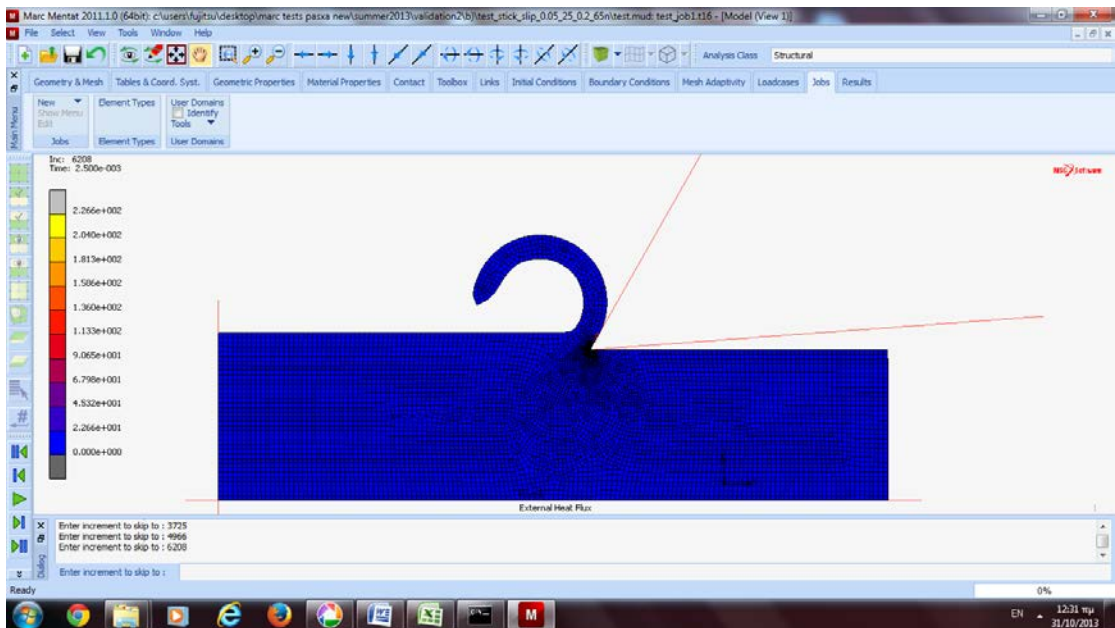
$t=0,001 \text{ sec } T_{\max}=340,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$



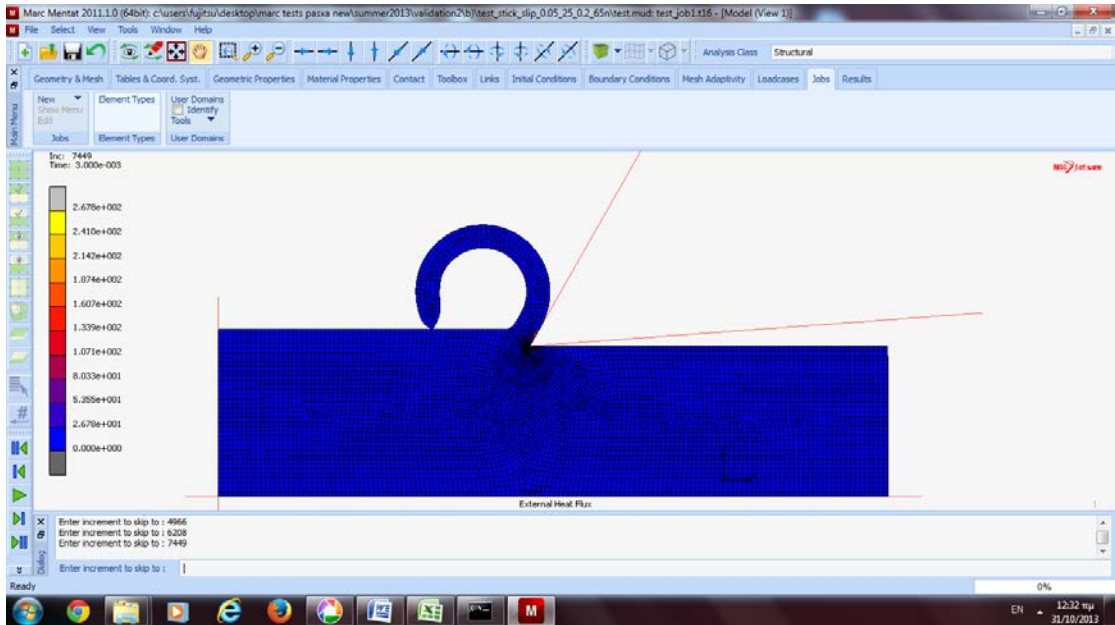
$t=0,0015 \text{ sec } T_{\max}=254,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$



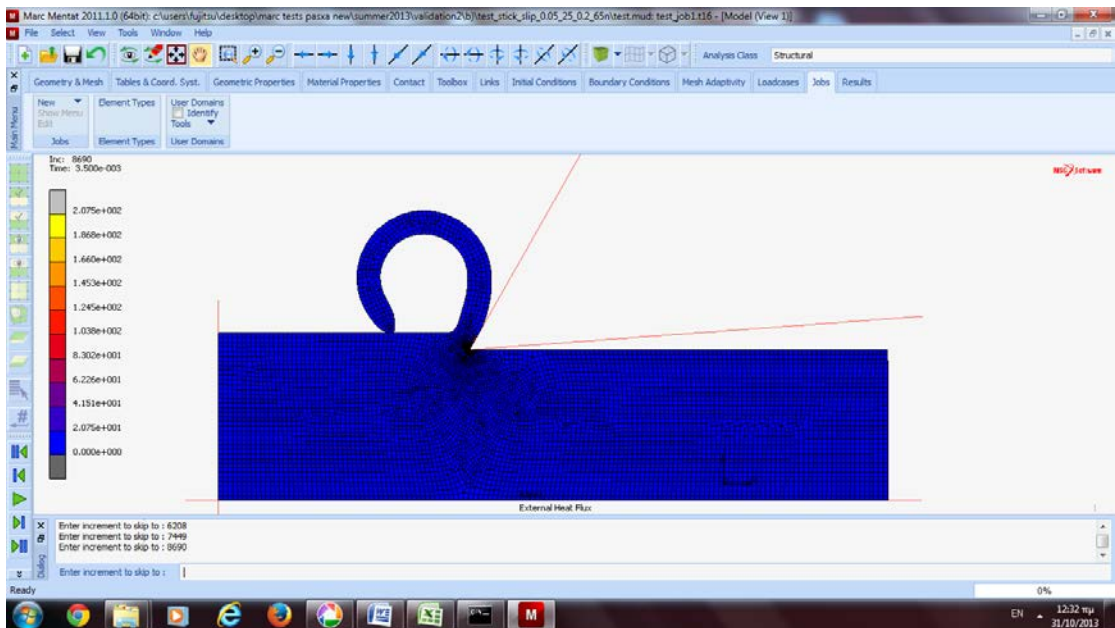
$t=0,0020 \text{ sec } T_{\max}=329,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$



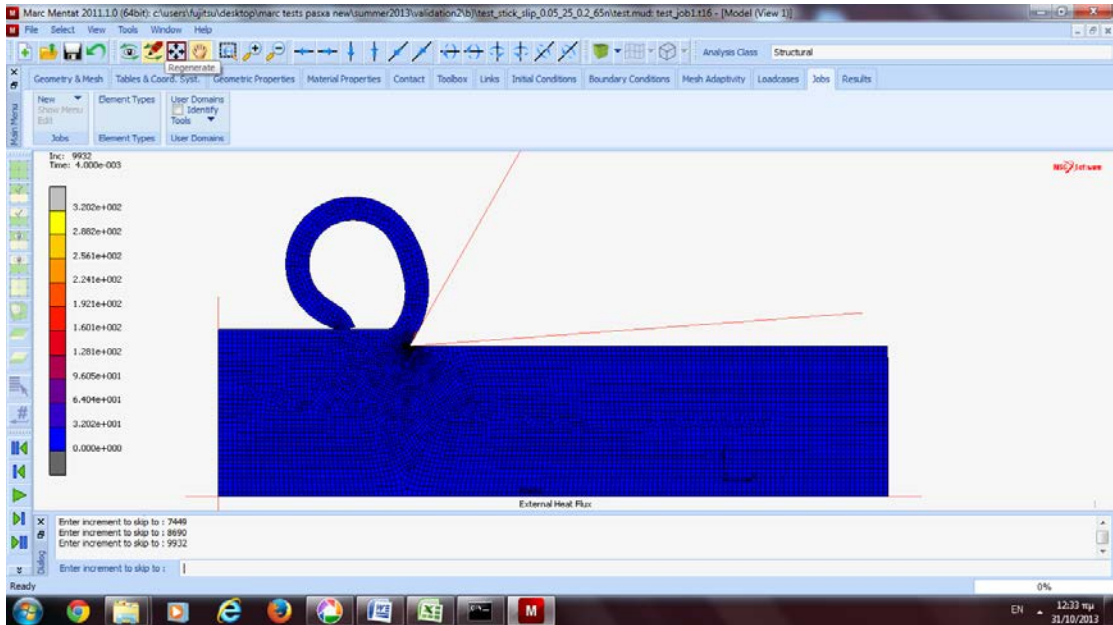
$t=0,0025 \text{ sec } T_{\max}=226,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$



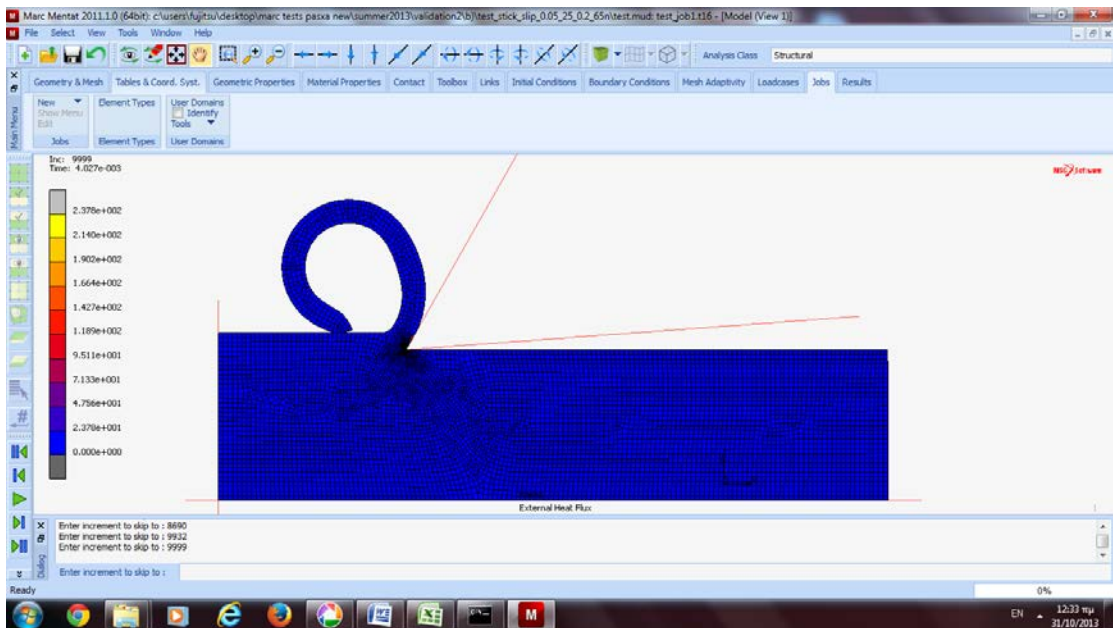
$t=0,00030 \text{ sec}$ $T_{\max}=267,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$t=0,00035 \text{ sec}$ $T_{\max}=207,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$t=0,00040 \text{ sec}$ $T_{\max}=320,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

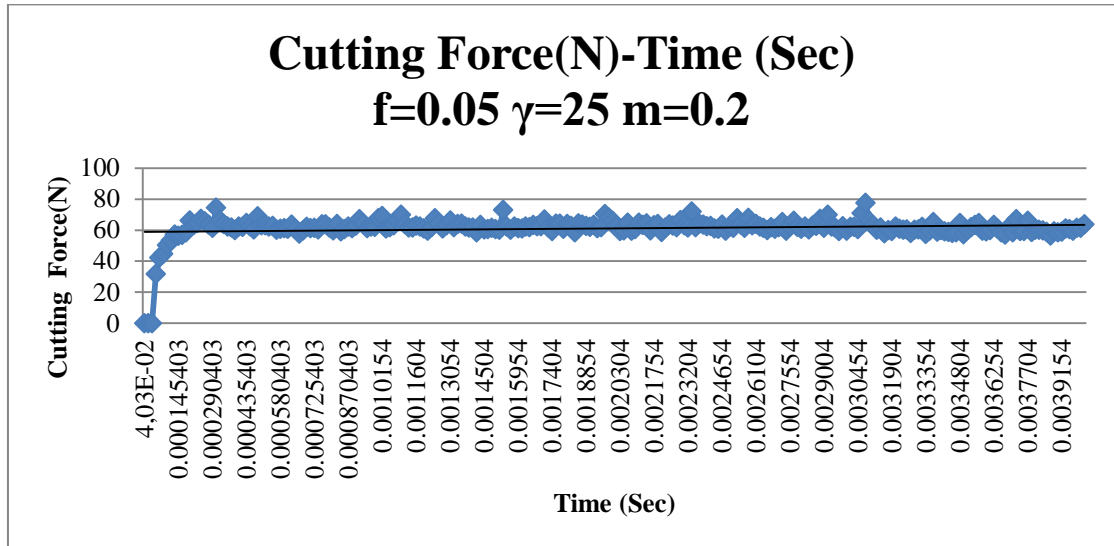


$t=0,0004028 \text{ sec}$ $T_{\max}=237,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Από τα στιγμιότυπα της πρώτης προσομοίωσης προκύπτει ότι η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο απόβλητο είναι $T_{\max}=340,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Δυνάμεις κοπής

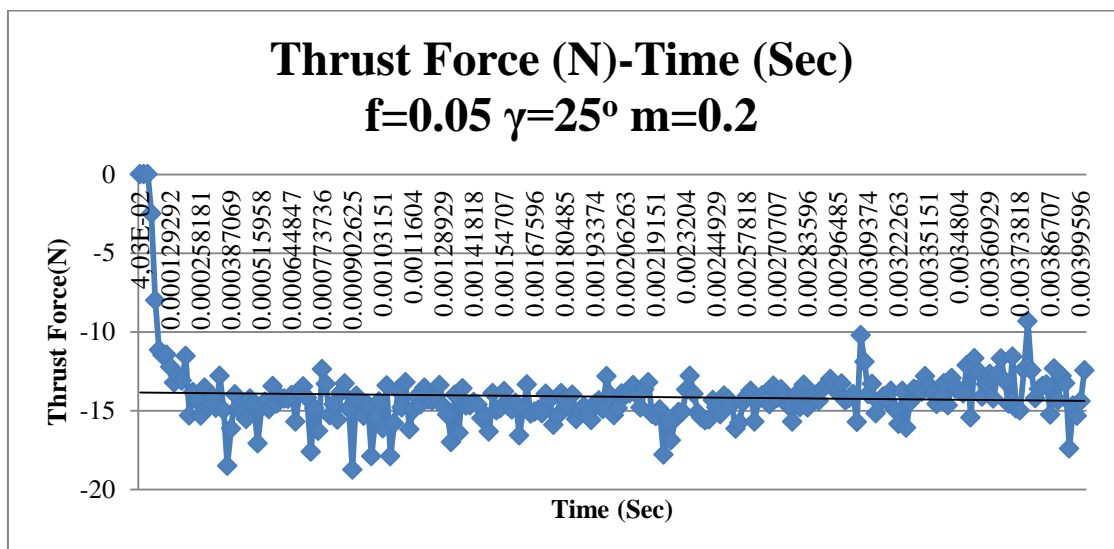
Από τον υπολογισμό των κοπτικών δυνάμεων κατά τον άξονα των x, προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 5.6

Από τους υπολογισμούς των δυνάμεων προέκυψε ότι κατά τη μόνιμη κατάσταση η μέση τιμή των δυνάμεων κοπής κατά τον άξονα των x, είναι **62N**. Η τιμή αυτή προκύπτει και από το διάγραμμα μας.

Αντίστοιχα υπολογίστηκαν μέσω του Marc και οι δυνάμεις κοπής κατά τον άξονα των y και προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 5.7

Από τις τιμές των δυνάμεων του παραπάνω γραφήματος προκύπτει η μέση τιμή της δύναμης ίση με **-14 N**.

Γεωμετρία του αποβλήτου

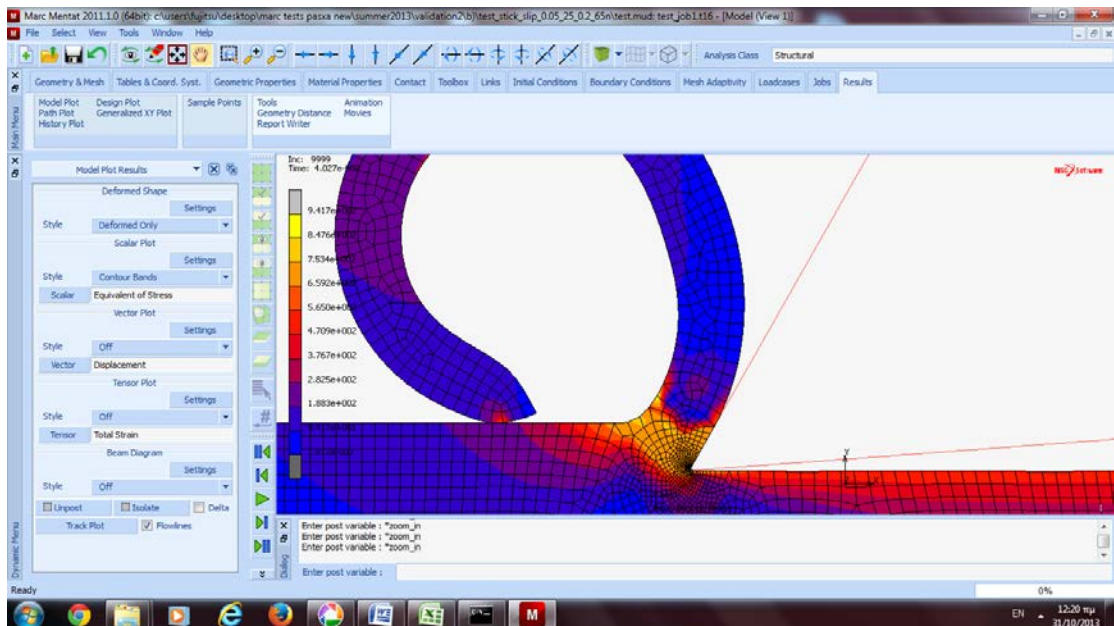
Μετρώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του παραχθέντος αποβλήτου δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας:

$\gamma (^{\circ})$	f (mm)	t_c (mm)	L_c (mm)	$\varphi (^{\circ})$
25^ο	0,05	0,0837	0,050	36,35

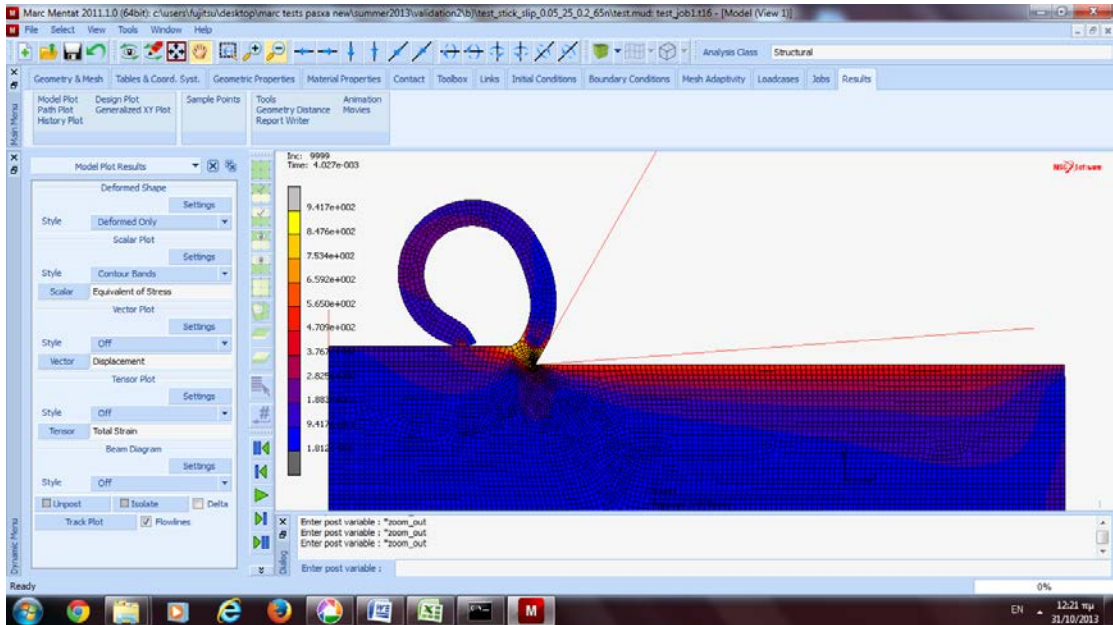
Μηχανικές και θερμικές παράμετροι

:

Τάσεις

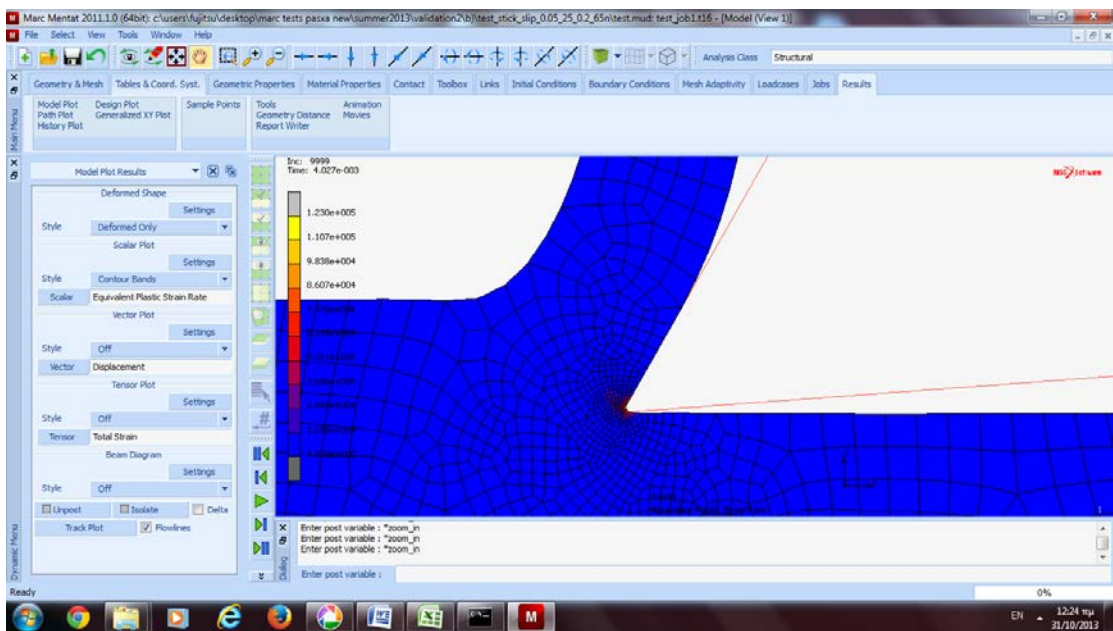


Εικόνα 5.9: Τάσεις 941,7 MPa στην κύρια ζώνη και 659,2 MPa στη δευτερεύουσα ζώνη παραμόρφωσης.



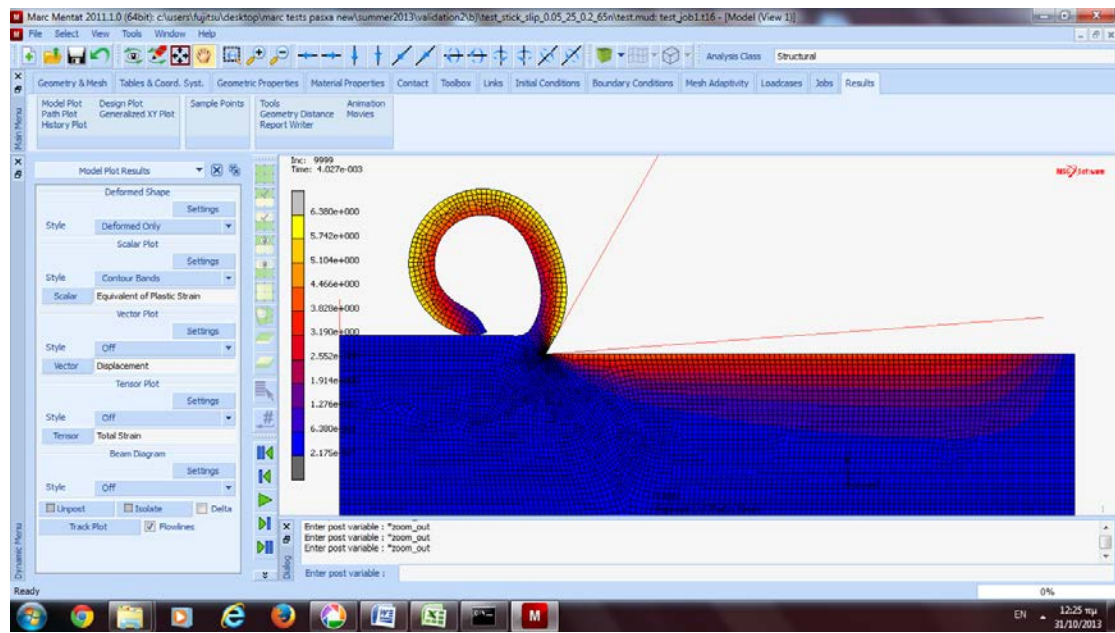
Εικόνα 5.10: Η κατανομή των τάσεων σε όλο το τεμάχιο.

Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης



Εικόνα 5.11: Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης 123000 ((mm/mm)/sec) στην πρωτογενή ζώνη παραμόρφωσης

Πλαστική παραμόρφωση



Εικόνα 5.12: Κατανομή πλαστικής παραμόρφωσης

Έκτη Προσομοίωση Μοντέλου

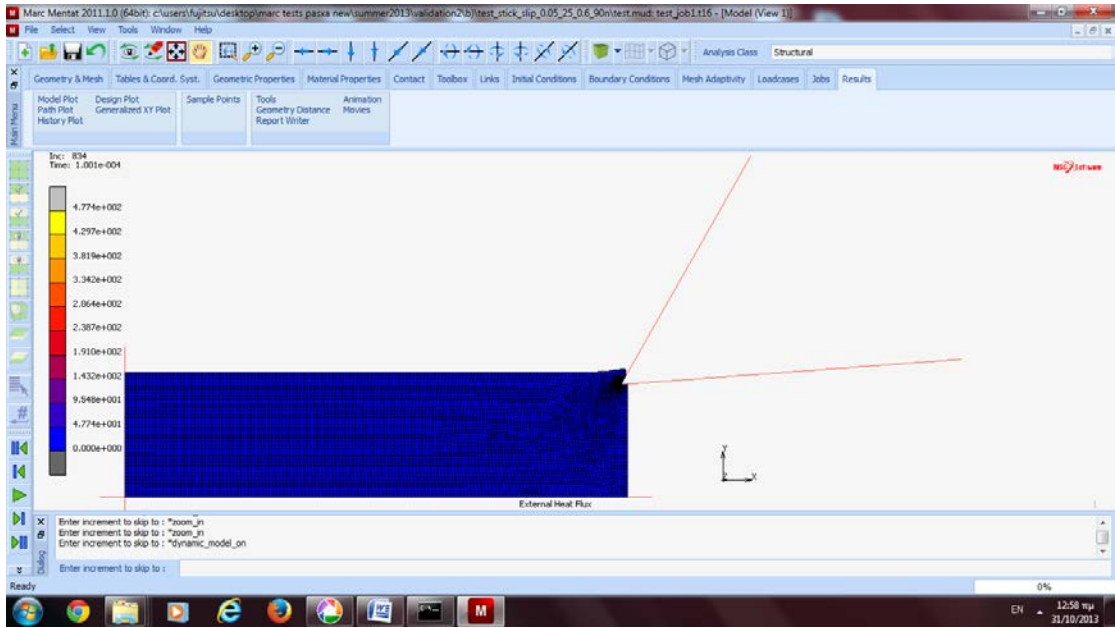
Stick-slip με $f=0,05$, $\gamma=25^\circ$, $\mu=1,05$, $m=0,6$

Στοιχεία προσομοίωσης

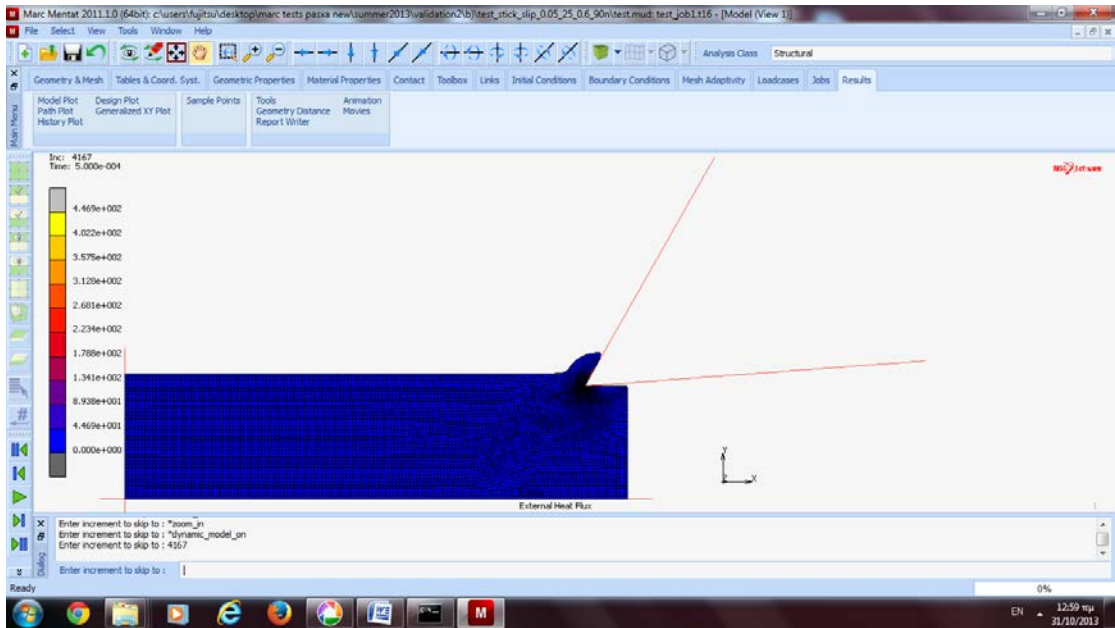
Run Job

Name: job1
Type: Thermal/Structural
User Subroutine File: [Empty]
Parallelization: No DDM
1 Solver Process
Title: [Empty] Style: [Empty] Table-Driven: [Dropdown] Save Model: [Button]
Submit (1) [Button] Advanced Job Submission [Button]
Update [Button] Monitor [Button] Kill [Button]
Status: Complete
Current Increment (Cycle): 23221 (16)
Singularity Ratio: 0.0033258
Convergence Ratio: 0.4157
Analysis Time: 0.0027864
Wall Time: 52606
Total
Cycles: 93827 Cut Backs: 0
Separations: 1335 Remeshes: 1951
Exit Number: 9991 Exit Message: [Empty]
Edit: Output File [Button] Log File [Button] Status File [Button] Any File [Button]
Open Post File (Results Menu) [Button]
Reset [Button] OK [Button]

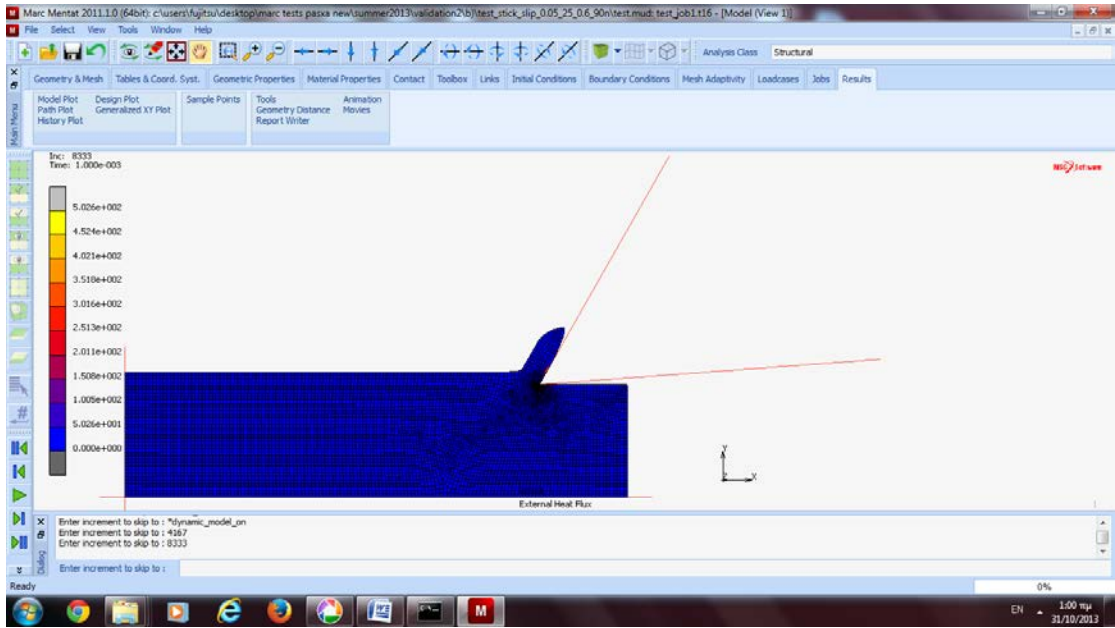
Από τη διεξαγωγή της προσομοίωσης προέκυψαν τα ακόλουθα στιγμιότυπα:



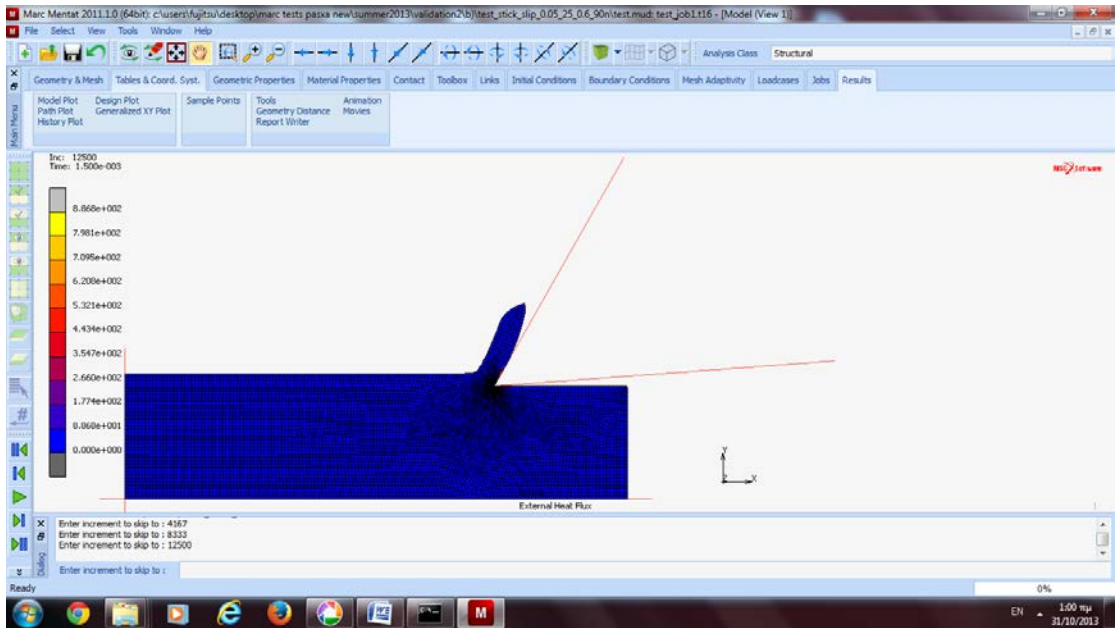
$t=0,0001\text{sec } T_{\text{max}}=477,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$



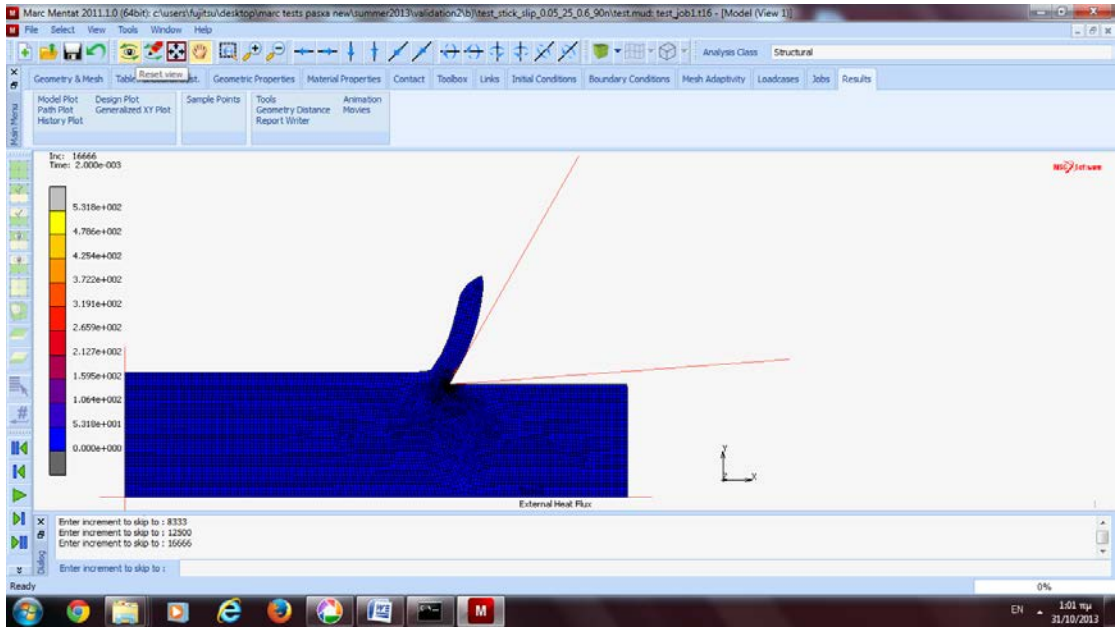
$t=0,0005 \text{ sec } T_{\text{max}}=446,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$



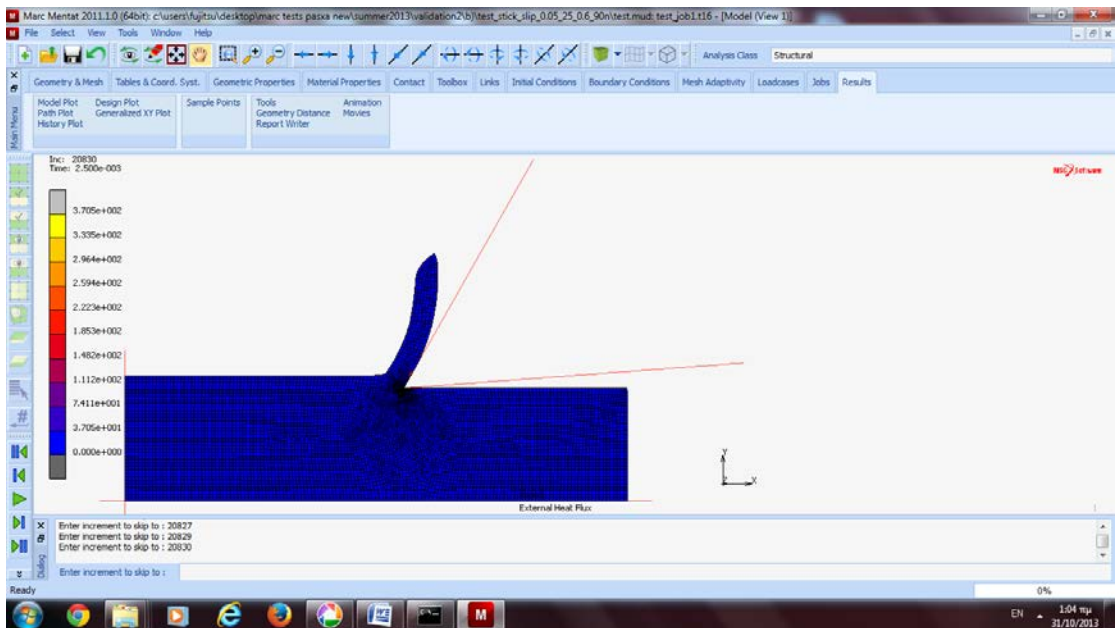
$t=0,001 \text{ sec } T_{\max}=502,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$



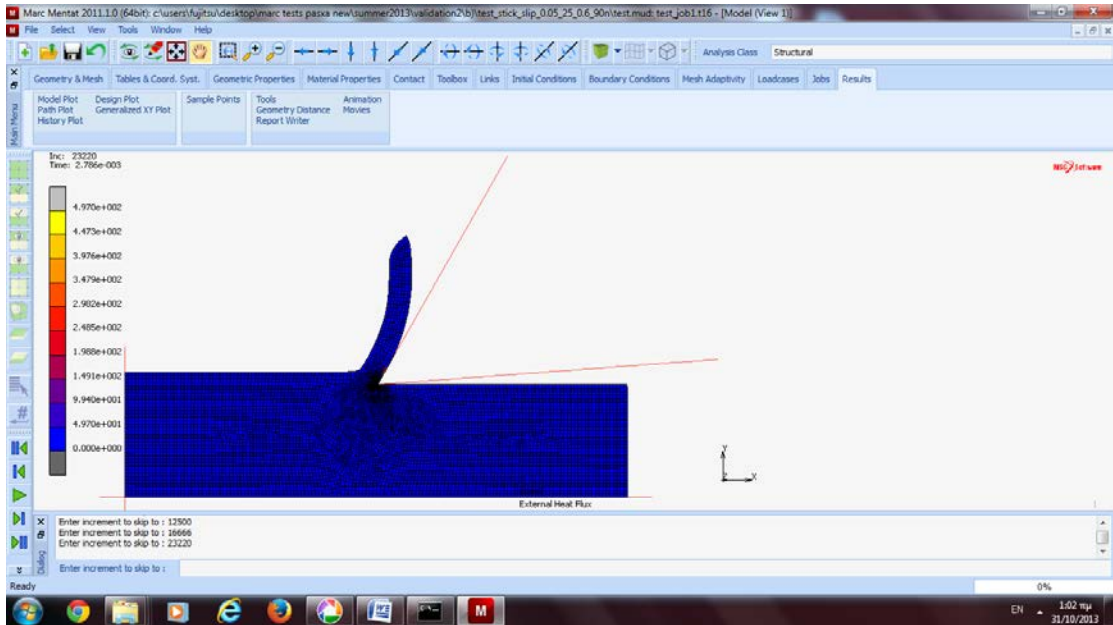
$t=0,0015 \text{ sec } T_{\max}=886,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$t=0,0020 \text{ sec } T_{\max}=531,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$t=0,0025 \text{ sec } T_{\max}=370,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

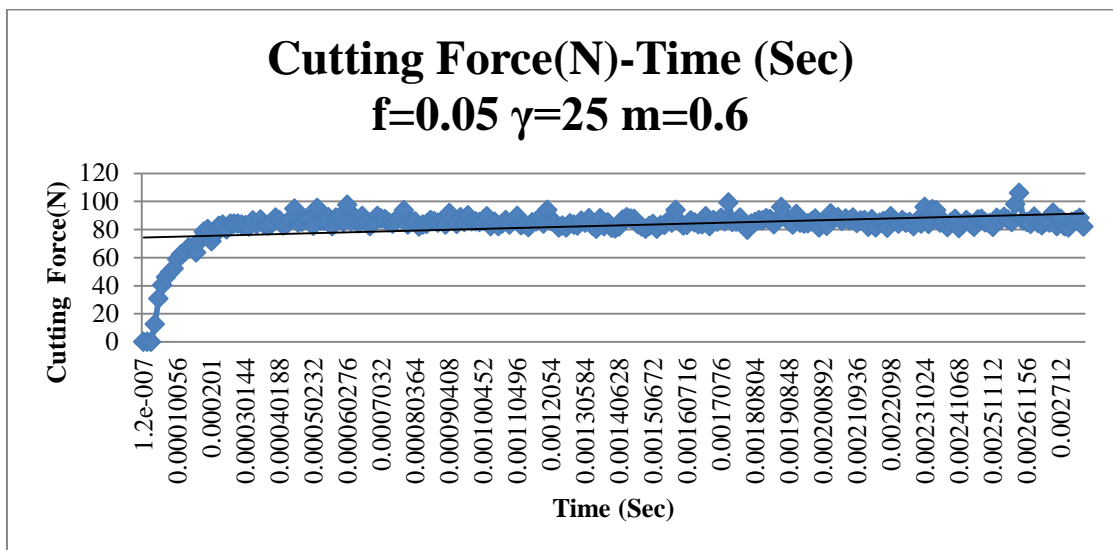


$t=0,002786 \text{ sec } T_{\max}=497,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Από τα στιγμιότυπα της πρώτης προσομοίωσης προκύπτει ότι η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο απόβλητο είναι $T_{\max}=886,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Δυνάμεις κοπής

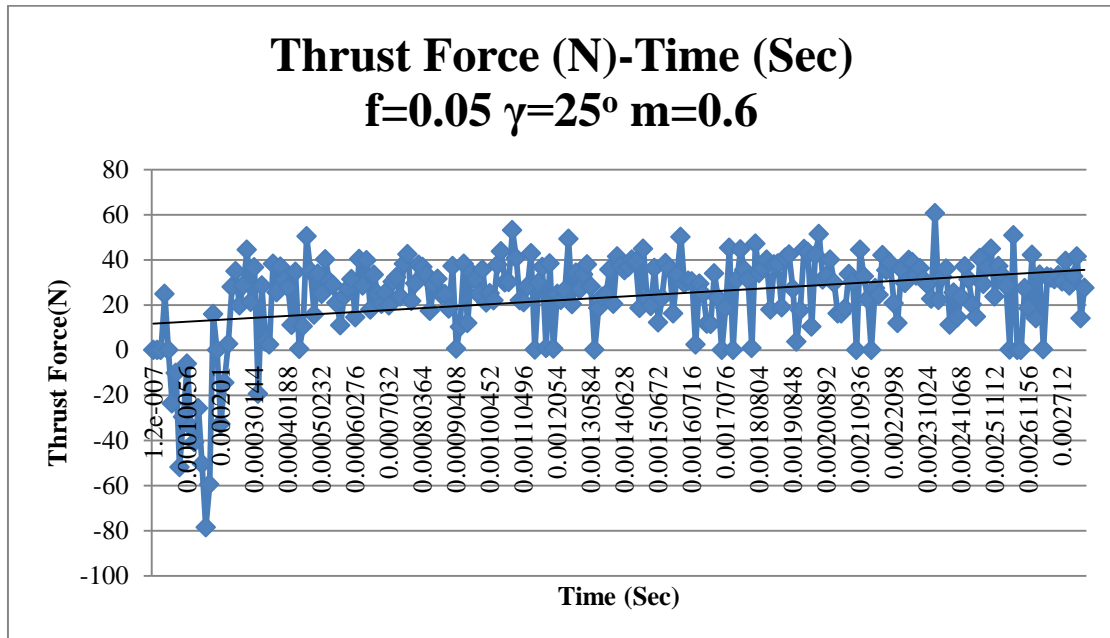
Από τον υπολογισμό των κοπτικών δυνάμεων κατά τον άξονα των x, προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα της:



Διάγραμμα 5.7

Από τους υπολογισμούς των δυνάμεων προέκυψε ότι κατά τη μόνιμη κατάσταση η μέση τιμή των δυνάμεων κοπής κατά τον άξονα των x, είναι **86 N**. Η τιμή αυτή προκύπτει και από το διάγραμμα.

Αντίστοιχα υπολογίστηκαν μέσω του Marc και οι δυνάμεις κοπής κατά τον άξονα των y και προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 5.8

Από τις τιμές των δυνάμεων του παραπάνω γραφήματος προκύπτει η μέση τιμή της δύναμης ίση με 25 N.

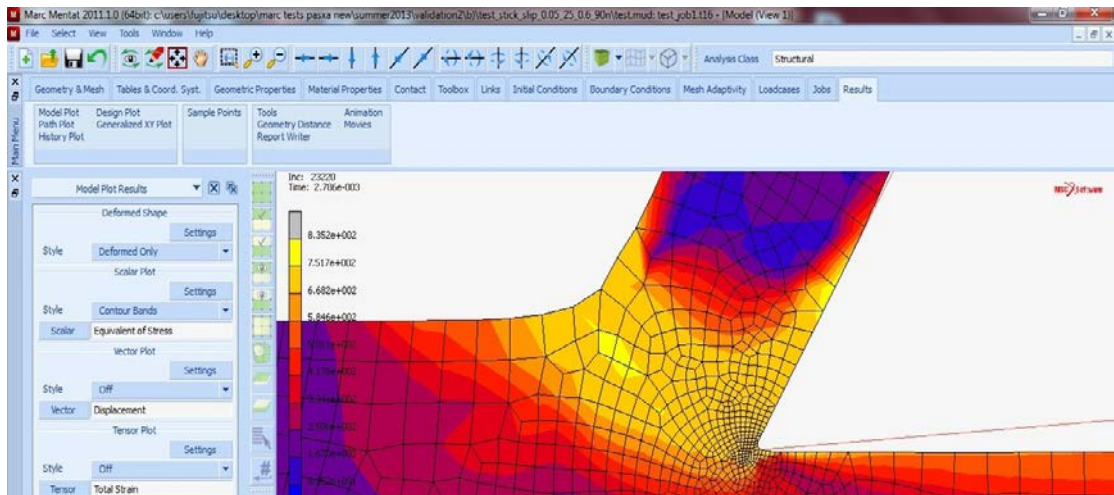
Γεωμετρία του αποβλήτου

Μετρώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του παραχθέντος αποβλήτου δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας:

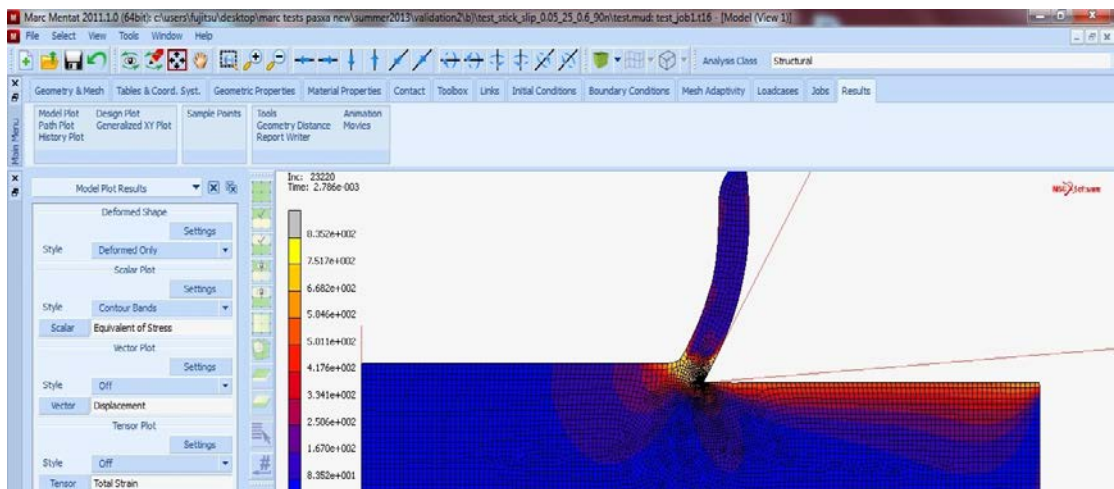
$\gamma(^{\circ})$	f (mm)	t_c (mm)	L_c (mm)	$\varphi (^{\circ})$
25 ^ο	0,05	0,011	0,082	28,43

Μηχανικές και θερμικές παράμετροι

Τάσεις

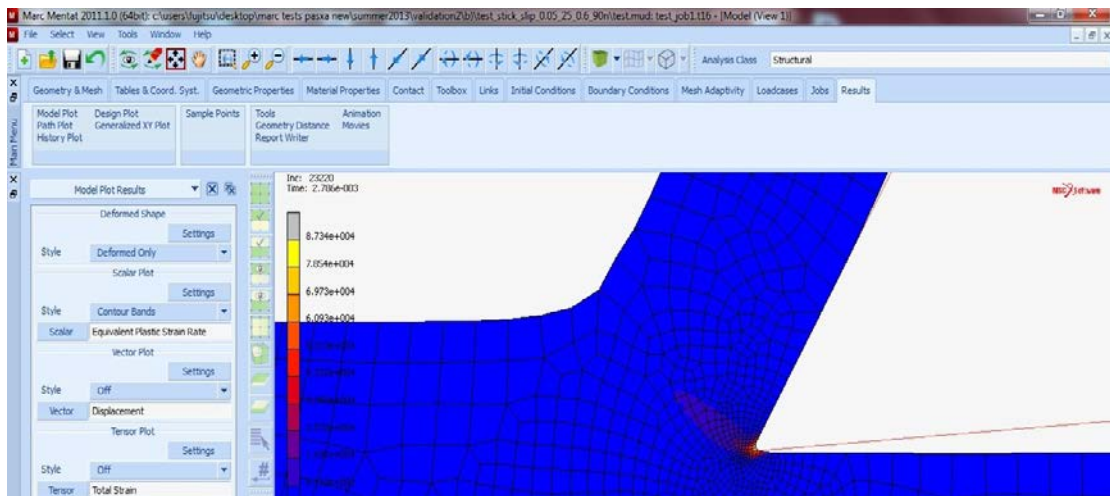


Εικόνα 5.13: Τάσεις 835,2 MPa στην κύρια ζώνη και 584,6 MPa στη δευτερεύουσα ζώνη παραμόρφωσης.



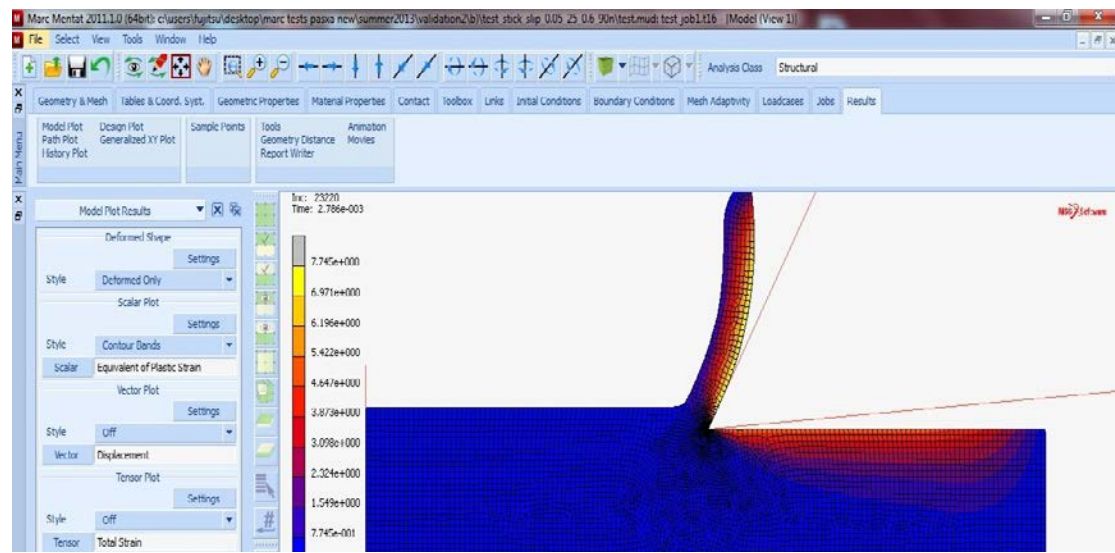
Εικόνα 5.14: Η κατανομή των τάσεων σε όλο το τεμάχιο.

Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης



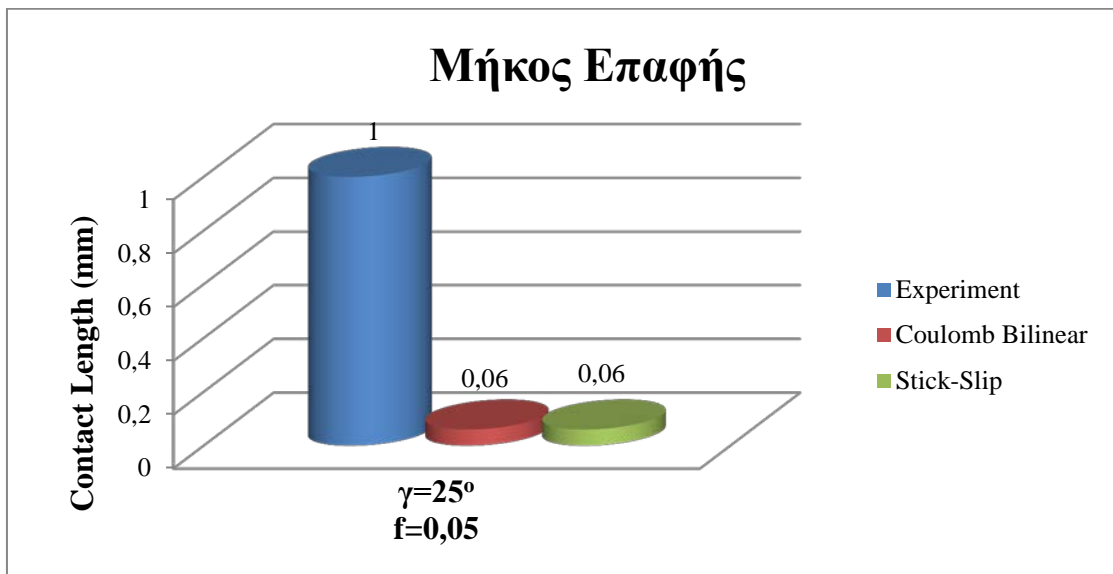
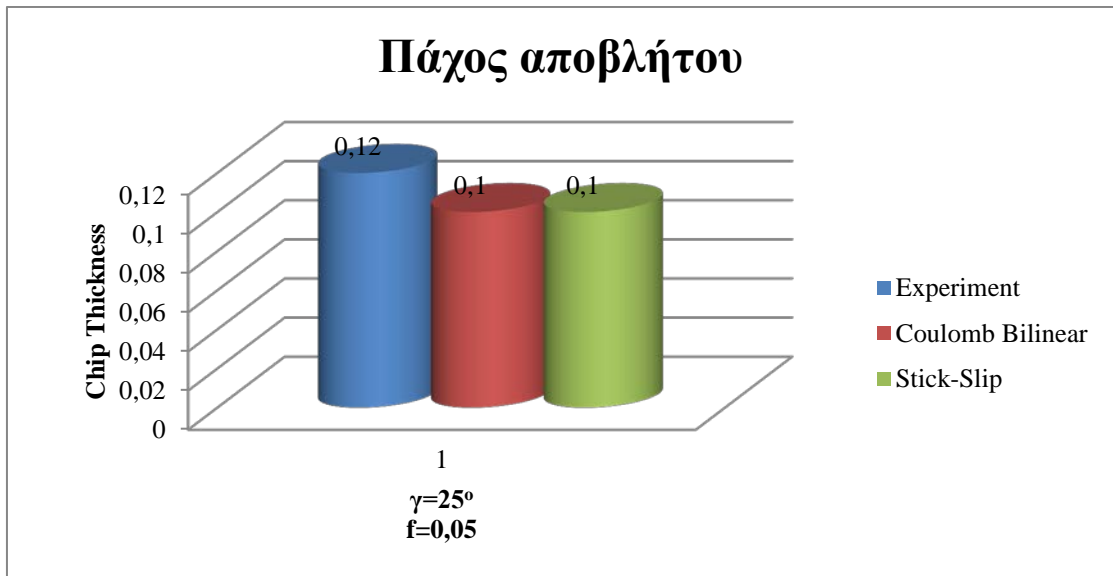
Εικόνα 5.15: Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης 87340 ((mm/mm)/sec) στην κύρια ζώνη παραμόρφωσης

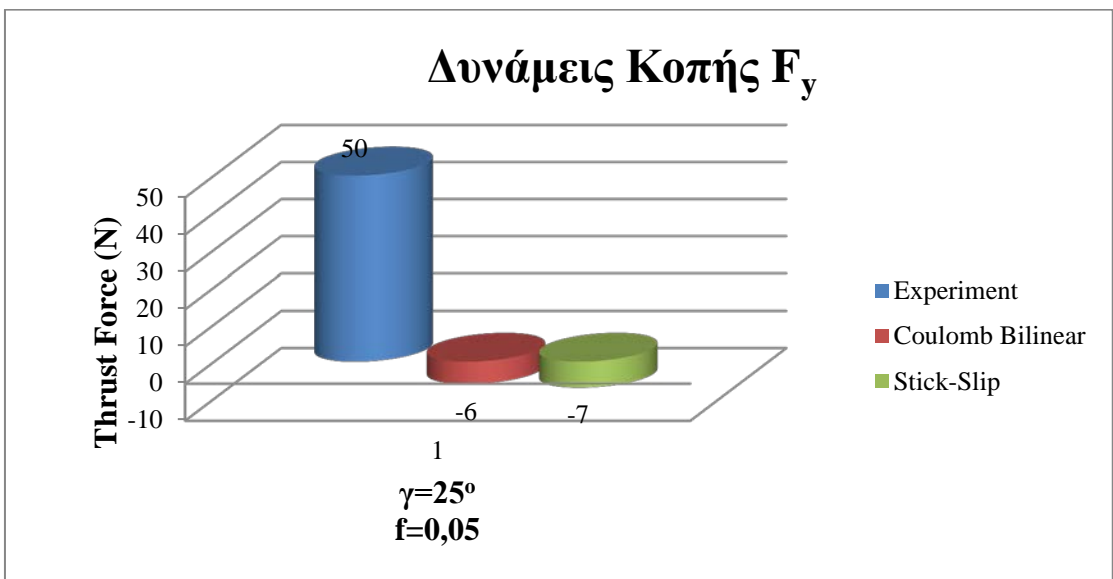
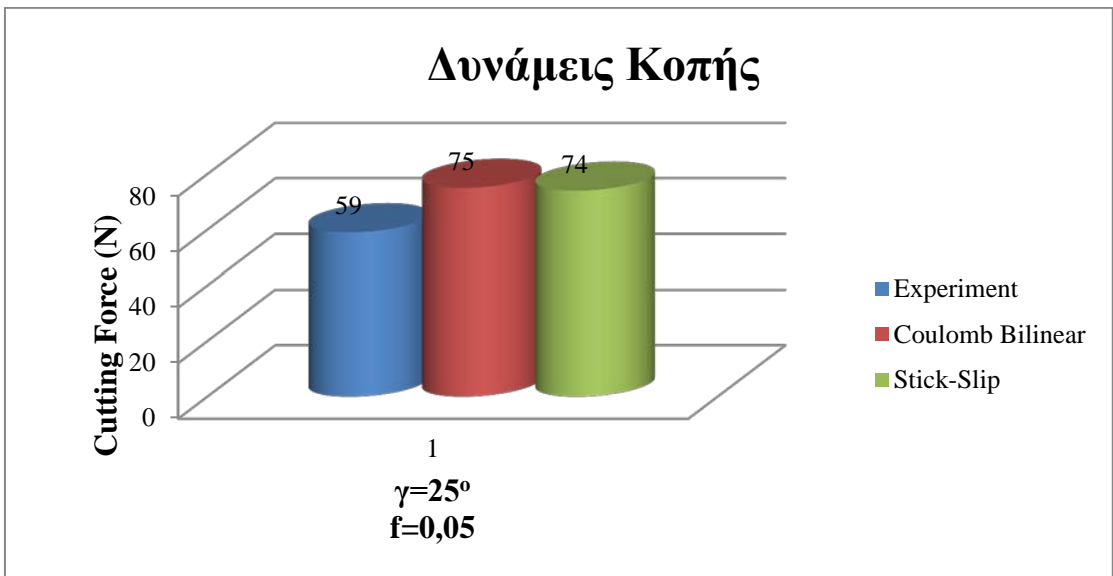
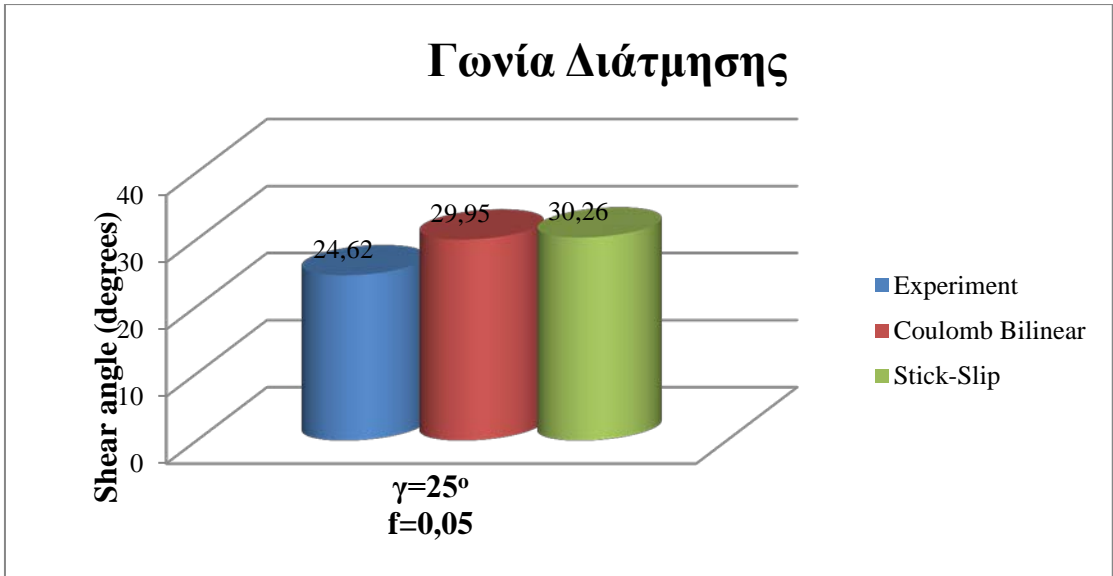
Πλαστική παραμόρφωση



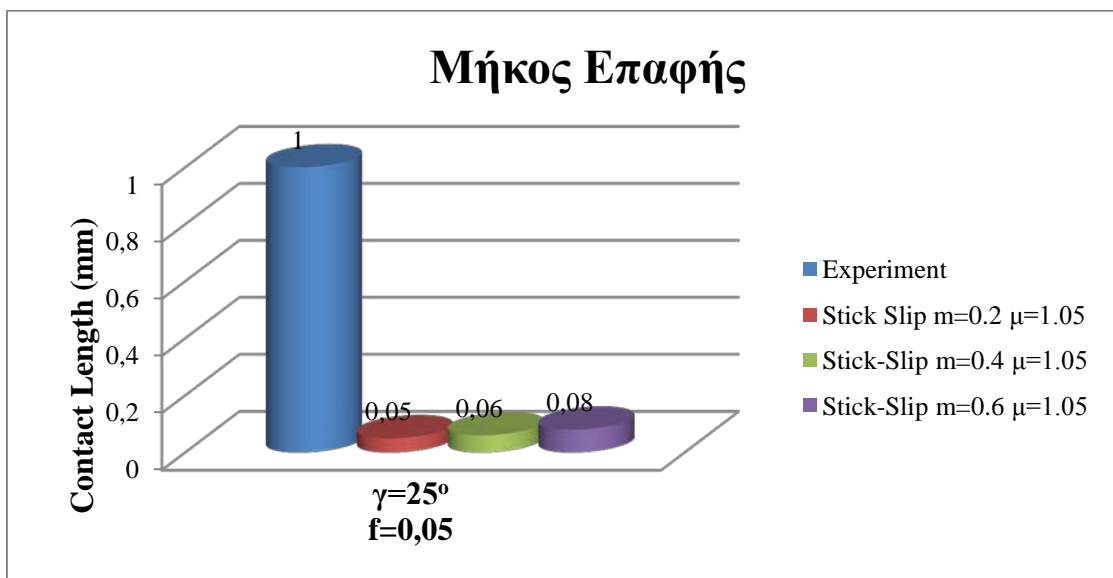
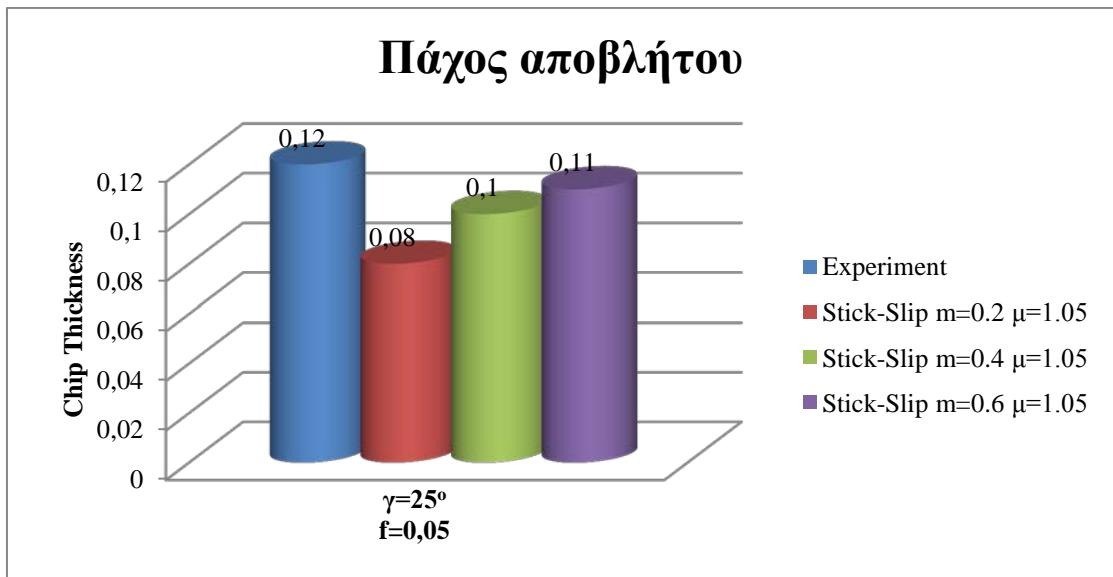
Εικόνα 5.16: Κατανομή πλαστικής παραμόρφωσης

Σύγκριση τρίτης με τέταρτη προσομοίωση

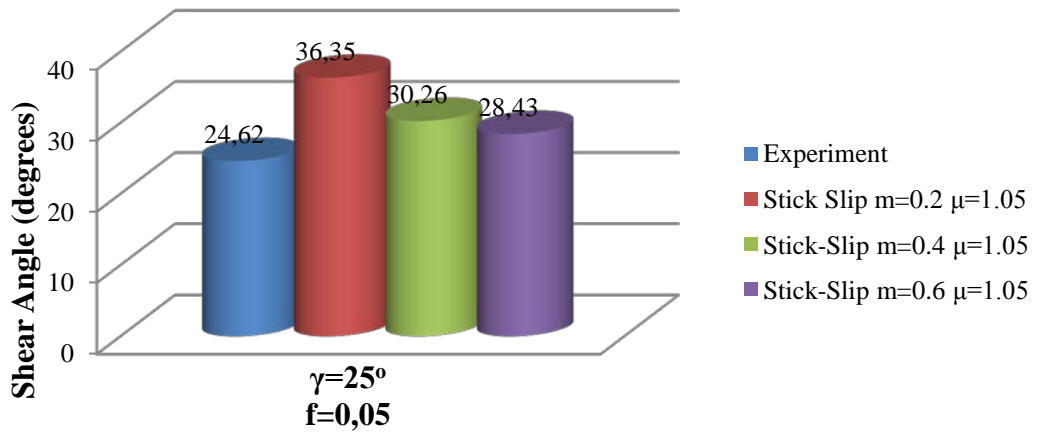




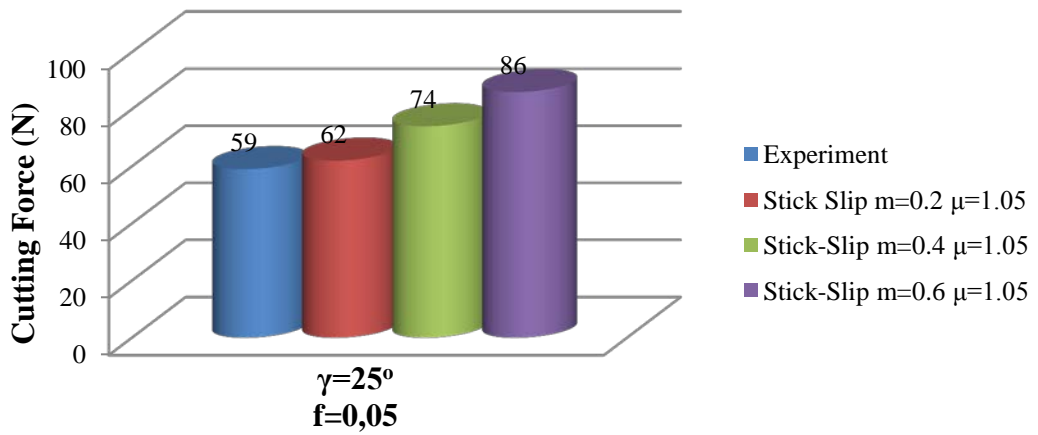
Σύγκριση μοντέλων τριβής Stick-Slip με συντελεστές τριβής 0,2-0,4-0,6



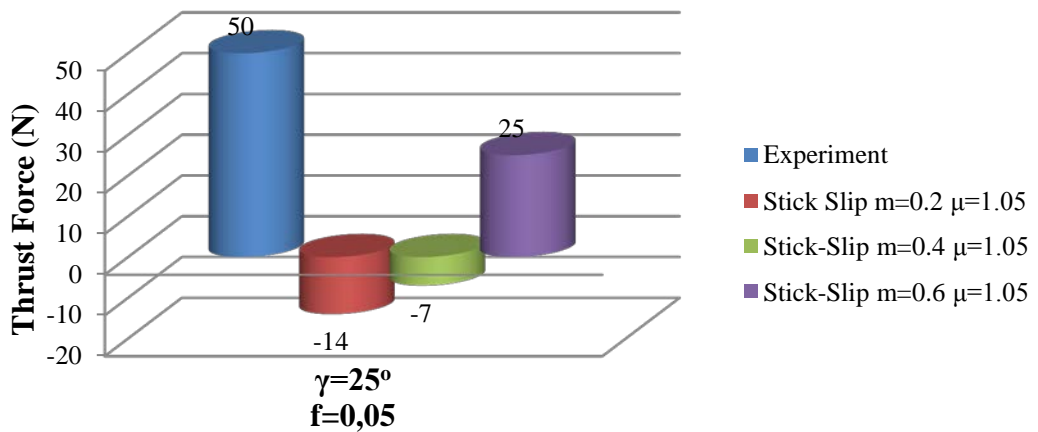
Γωνία Διάτμησης



Δυνάμεις κοπής



Δυνάμεις Κοπής F_y



Ανακεφαλαίωση και σχολιασμός κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η επίδραση του μοντέλου τριβής. Για τη μελέτη αυτή σε αντίθεση με το προηγούμενο κεφάλαιο που χρησιμοποιήσαμε τον τύπο τριβής Shear bilinear, χρησιμοποιήσαμε δύο διαφορετικά μοντέλα τριβής. Στο πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων MSC.MARC έχουν εισαχθεί στις τελευταίες εκδόσεις του διάφορα μοντέλα τριβής. Εκμεταλλευόμενοι τη δυνατότητα αυτή σε συνδυασμό με την αύξηση των δημοσιεύσεων που προκρίνουν άλλα μοντέλα τριβής για τις κοπές, τρέξαμε το μοντέλο με δύο διαφορετικούς τύπους τριβής. Το μοντέλο τριβής του Coulomb και το μοντέλο τριβής Stick-Slip. Έτσι διατηρώντας σταθερό τον συντελεστή τριβής $\mu=0,4$ και ίδιες τις συνθήκες με την δεύτερη προσομοίωση, διεξήχθησαν η τρίτη και η τέταρτη προσομοίωση του μοντέλου. Από τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων αυτών παρατηρούμε ότι ως προς το πάχος αποβλήτου επέτυχαν παραπλήσια αποτελέσματα και μάλιστα καλύτερα από τη δεύτερη προσομοίωση ως προς τα πειραματικά αποτελέσματα. Ακόμα ούτε αυτοί οι τύποι τριβής μπόρεσαν να επαληθεύσουν τα πειραματικά αποτελέσματα ως προς το μήκος επαφής και παρουσίασαν σημαντικά σφάλματα. Επιπλέον μελετώντας τις δυνάμεις κοπής παρατηρούμε ότι διατηρώντας σταθερό το συντελεστή τριβής αυξήθηκαν οι τιμές των δυνάμεων κοπής. Οι δυνάμεις απώσεις παρέμειναν και για αυτούς τους τύπους τριβής αρνητικές και παρουσίασαν σημαντικά σφάλματα σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Από την άλλη οι δύο αυτοί τύποι τριβής πέτυχαν καλύτερα αποτελέσματα ως προς τη τιμή της γωνίας διάτμησης και προσέγγισαν καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα. Ως προς τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες το μοντέλο τριβής του Coulomb παρουσιάζει μικρότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τους άλλους δύο τύπους τριβής και το μοντέλο Stick-Slip τις υψηλότερες. Ακόμα ως προς το ρυθμό πλαστικής παραμόρφωσης το μοντέλο τριβής shear εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές και μοντέλο τριβής του Coulomb τις υψηλότερες. Στο μοντέλο τριβής Stick-Slip παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες τιμές της τάσης στην κύρια ζώνη και της πλαστικής παραμόρφωσης.

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση του συντελεστή τριβής. Εφαρμόστηκαν στο μοντέλο τριβής Stick-Slip οι τιμές του συντελεστή τριβής 0,2,-0,4-0,6. Από τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων και την μελέτη των αποτελεσμάτων προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά για τον μικρότερο συντελεστή τριβής η μορφή του αποβλήτου ήταν πιο καμπυλωτή και έφτανε στο σημείο μάλιστα να έρχεται η κορυφή του αποβλήτου σε επαφή με το τεμάχιο. Ακόμα παρατηρήσαμε ότι αυξανόμενου του συντελεστή τριβής αυξάνεται η παραγόμενη θερμότητα, αυξάνονται οι τιμές των δυνάμεων κοπής και άπωσης. Μάλιστα για συντελεστή τριβής 0,6 οι τιμές των δυνάμεων άπωσης είναι θετικές και αυτές με το μικρότερο σφάλμα. Επιπλέον όσο αυξάνεται ο συντελεστής τριβής αυξάνεται και το πάχος αποβλήτου και προσεγγίζει καλύτερα τις πειραματικές τιμές. Για τις τιμές των τάσεων, αυτές μειώνονται αυξανόμενου του συντελεστή τριβής και το αντίστοιχο συμβαίνει για το ρυθμό πλαστικής παραμόρφωσης και τη πλαστική παραμόρφωση..

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

Μοντελοποίηση του υλικού

6.1 Εισαγωγή

Το παρακάτω κεφάλαιο πραγματεύεται τη Μοντελοποίηση του υλικού. Η μοντελοποίηση της τάσης ροής του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου, ώστε να μας προσφέρει πραγματικά αποτελέσματα, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που τίθενται σε μια προσομοίωση κοπής. Η τάση ροής είναι η στιγμιαία τάση διαρροής και εξαρτάται από την παραμόρφωση, από το ρυθμό παραμόρφωσης και τη θερμοκρασία. Η αναπαράσταση του γίνεται με μαθηματικές σχέσεις σε μορφή καταστατικών εξισώσεων. Από τη βιβλιογραφική μελέτη και από τις τελευταίες δημοσιεύσεις, το μοντέλο υλικού των Johnson-Cook [45] έχει καταστεί το επικρατέστερο και το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο για την μοντελοποίηση των υλικών. Άλλα συνήθη μοντέλα αποτελούν α) το μοντέλο των Usui, Maekawa και Shirakashi [42], β) το μοντέλο του Oxley [43], γ) το μοντέλο των Zirilli-Armstrong [44]. Στο παρακάτω κεφάλαιο θα αναφερθούμε εκτενέστερα και θα παρουσιάσουμε τα παραπάνω μοντέλα υλικών. Στη συνέχεια θα κατασκευάσουμε, θα μελετήσουμε και θα σχολιάσουμε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν για το μοντέλο υλικού των Johnson-Cook το οποίο και θα προσομοιώσουμε στο Marc για δύο διαφορετικούς τύπους τριβής και θα το συγκρίνουμε με το μοντέλο υλικού του Oxley που χρησιμοποιεί η βιβλιοθήκη υλικών του MSC.MARC.

6.2 Η Μοντελοποίηση υλικού

Η μοντελοποίηση του υλικού στις κατεργασίες είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία. Ειδικότερα, οι ιδιότητες της ροής του υλικού των κατεργαζόμενων τεμαχίων και οι αντίστοιχες εξισώσεις τους που περιλαμβάνονται στα Πεπερασμένα Στοιχεία, έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης μελέτης. Αυτές οι καταστατικές εξισώσεις περιγράφουν την ροή των τάσεων ή την ακαριαία διαρροή στην οποία το κατεργαζόμενο υλικό αρχίζει να διαμορφώνεται πλαστικά ή να ρέει. Στις κοπές οι ελαστικές παραμορφώσεις είναι κατά πολύ μικρότερες από τις πλαστικές και έτσι το υλικό του δοκιμίου ρέει πλαστικά προς τη ζώνη κοπής. Τα καταστατικά μοντέλα που παρουσιάζονται στην διεθνή βιβλιογραφία είναι κυρίως ελαστο-πλαστικά (elasto-plastic), ελαστικοβισκοπλαστικά (elasto-viscoplastic), ακαμπτοπλαστικά (rigid-plastic) και ακαμπτοβισκοπλαστικά (rigid-viscoplastic).

Σε συνθήκες κατεργασιών κοπής, το υλικό του τεμαχίου υπόκειται σε υψηλά επίπεδα παραμόρφωσης, αυξημένα ποσοστά παραμόρφωσης και μεγάλες θερμοκρασίες, τα οποία επηρεάζουν σημαντικά τις τάσεις ροής. Στην κύρια ζώνη παραμορφώσεως οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι της τάξης των 150-250 °C και στη δευτερεύουσα ζώνη παραμορφώσεως κατά πολύ υψηλότερες, της τάξης των 800-1200 °C. Ο ρυθμός παραμορφώσεως λαμβάνει τιμές από $2 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ έως και 10^5 s^{-1} στις 2 ζώνες [46]. Αν σ η τάση, ϵ η πλαστική παραμόρφωση, $\dot{\epsilon}$ ο ρυθμός

πλαστικής παραμόρφωσης και T η θερμοκρασία, προκύπτει η ακόλουθη καταστατική εξίσωση της μορφής:

$$f(\sigma) = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$$

Το πρόβλημα είναι η έλλειψη δεδομένων για υψηλές τάσεις, μεγάλους ρυθμούς παραμόρφωσης και αυξημένες θερμοκρασίες, σαν τις συνθήκες που παρατηρούνται σε μια κοπή. Σε αρκετές περιπτώσεις τα καταστατικά δεδομένα λαμβάνονται από πρότυπες καταστατικές δοκιμές, και συνεπώς δεν είναι επαρκή για να ληφθούν υπόψη σε προβλήματα κατεργασιών. Έτσι απαιτούνται δυναμικές πειραματικές δοκιμές υλικού, όπως οι δοκιμές επιπτώσεων Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB). Εκεί στα υπό δοκιμή τεμάχια ασκούνται υψηλές ταχύτητες συμπίεσης, με ρυθμό παραμόρφωσης μέχρι και 10^5 s^{-1} , καθώς επίσης και θερμοκρασίες μέχρι και $700 \text{ }^\circ\text{C}$. Όμως τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων δεν είναι επαρκή για να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών. ειδικά σε κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων. Οι τιμές ξεπερνούν κατά πολύ τα αποτελέσματα των δοκιμών και προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή. Οι Astakhov και Outeiro, άσκησαν κριτική για τη χρήση των αποτελεσμάτων της μεθόδου (SHPB) στο τομέα των κατεργασιών [47]. Υποστήριξαν ότι τα διαθέσιμα δεδομένα δεν προέρχονται από εξειδικευμένα εργαστήρια. Σε γενικές γραμμές η αντίθεση τους προέκυψε α) από το ότι η μέθοδο SHPB απαιτεί τη χρήση ειδικού εξοπλισμού, β) από το γεγονός ότι στις κοπές δεν ασκούνται υψηλοί ρυθμοί παραμόρφωσης και γ) στο ότι οι κοπές είναι μια ψυχρή διεργασία παρότι το απόβλητο και μόνο βρίσκεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς, δεν είναι ξεκάθαρος ο συσχετισμός των αποτελεσμάτων των μονοαξονικών δοκιμών της μεθόδου SHPB με αυτά υλικών υπό τριαξονικές τάσεις όπως αυτές που ασκούνται στις κοπές μετάλλων. Άλλες δοκιμές που εφαρμόζονται είναι οι torsion tests, οι δοκιμές compression ring tests και οι δοκιμές projectile impact tests.

Παρά το γεγονός ότι πολλές καταστατικές εξισώσεις έχουν εφαρμοστεί για την περίπτωση των κοπών, παρακάτω παραθέτονται και αναλύονται οι κυριότερες. Η πρώτη είναι η καταστατική εξίσωση των Usui, Maekawa και Shirakashi [9,48,49]

$$\sigma = B \left[\frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right]^M e^{-kT} \left[\frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right]^m \left\{ \int_{Path} e^{kT/N} \left[\frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right]^{-m/N} d\epsilon \right\}^N$$

Στην παραπάνω εξίσωση όπου B ο συντελεστής αντοχής, M ο ρυθμός ευαισθησίας παραμόρφωσης, n ο δείκτης σκλήρυνσης παραμόρφωσης. Όλες οι μεταβλητές της θερμοκρασίας T , το k και το m θεωρούνται σταθερές. Το ολοκλήρωμα, υπολογίζει την επίδραση της παραμόρφωσης και της θερμοκρασίας σε σχέση με το ρυθμό παραμόρφωσης. Απαλείφοντας αυτή την επίδραση, η εξίσωση απλοποιείται στην παρακάτω μορφή:

$$\sigma = B \left[\frac{\dot{\varepsilon}}{1000} \right]^M \varepsilon^N$$

6.3 Μοντέλο υλικού του Oxley

Ο Oxley το 1990 πρότεινε μια σχέση για να εκφράσει τη τάση ροής του υλικού για τους ανθρακούχους χάλυβες, την [43]

$$\sigma = \sigma_1 \varepsilon^n$$

όπου σ_1 η ροή τάσης του υλικού για $\varepsilon=1$ και n εμπειρικός εκθέτης εργοσκληρυνσης του υλικού. Και οι δύο παράγοντες είναι συναρτήσεις της τροποποιημένης θερμοκρασίας, η σχέση της οποίας αποδείχθηκε από τους Macgregor and Fisher [11]. Έτσι ορίζεται η τροποποιημένη θερμοκρασία T_{mod} ως εξής,

$$T_{\text{mod}} = T \left(1 - \nu \log \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)$$

όπου ν και ε_0 οι σταθερές υλικού του τεμαχίου, οι οποίες έχουν τιμές 0,09 και 0,1 για τους ανθρακούχους χάλυβες.

6.4 Μοντέλο υλικού των Johnson-Cook (JC)

Το 1993 ο Johnson και ο Cook ανέπτυξαν ένα μοντέλο υλικού βασισμένο στη στρέψη και στη δυναμική μέθοδο δοκιμών Hopkinson Bar για ένα μεγάλο εύρος ρυθμού παραμορφώσεων και θερμοκρασιών. Το μοντέλο αυτό των Johnson-Cook συγκαταλέγεται σε ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα υλικού. Το μοντέλο είναι θερμό-ελαστικό-βισκο-πλαστικό και περιγράφεται από την παρακάτω καταστατική εξίσωση:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_a}{T_m - T_a} \right)^m \right]$$

Η εξίσωση αποτελείται από τρεις όρους. Ο πρώτος όρος είναι ο ελαστοπλαστικός παράγοντας και εκπροσωπεί την εργοσκήληση. Ο δεύτερος όρος της εξίσωσης είναι το $\dot{\epsilon}$ και μας δείχνει ότι η τάση ροής του υλικού αυξάνεται όταν το υλικό εκτίθεται σε υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης. Ο τελευταίος όρος είναι ο όρος εξομάλυνσης της θερμοκρασίας. Στην καταστατική εξίσωση έχουμε: $\dot{\epsilon}_0$ τη τιμή του ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης, T_a τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, T_m τη θερμοκρασία τήξης του υλικού και T τη στιγμιαία θερμοκρασία. Ακόμα τα A , B , C , n , και m είναι σταθερές και εξαρτώνται από το υλικό. Ο προσδιορισμός τους γίνεται με τη χρήση πειραμάτων δοκιμών υλικού ή εκτιμώνται. Το μοντέλο υλικού των Johnson-Cook υποθέτει ότι ροή τάσεων επηρεάζεται ξεχωριστά από τη παραμόρφωση, το λόγο παραμόρφωσης και τη θερμοκρασία.

Η επιρροή των σταθερών Johnson-Cook διερευνήθηκε από τους Umbrello, Saoubi και Outeiro, σε σχέση με το τελικό αποτέλεσμα της μοντελοποίησης των κατεργασιών. Από την ερευνά τους [50] προέκυψε ότι τα αποτελέσματα με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι ευαίσθητα και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις τιμές αυτών των σταθερών. Με τη σειρά τους και αυτές εξαρτώνται από τη μέθοδο δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των τιμών τους. Από την άλλη, τα αποτελέσματα μιας μεθόδου δοκιμών μπορούν να προσαρμοστούν σε διάφορες καταστατικές εξισώσεις και η επιλογή του μοντέλου υλικού μπορεί να επηρεάσει τα τελικά προβλεπόμενα αποτελέσματα.

6.5 Μοντέλο υλικού Zerilli-Armstrong

Το 1987 ο Zerilli και ο Armstrong ανέπτυξαν δύο μικροδομικές καταστατικές εξισώσεις, θεωρώντας τη δομή των υλικών ως κρυσταλλική [44]. Στην ερευνά τους κατασκεύασαν δύο διαφορετικά μοντέλα μετάλλων. Ένα Κυβικό χωροκεντρωμένο σύστημα (Body-Cubic-Centered -BCC) και ένα το Κυβικό ενδοκεντρωμένο σύστημα (face cubic centered FCC). Στην εργασία τους ανέλυσαν την απόκριση των υλικών σε διάφορες θερμοκρασίες και σε υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης. Έτσι παρατήρησαν ευδιάκριτες και σαφείς διαφορές μεταξύ αυτών των υλικών.

Η καταστατική εξίσωση για τα μέταλλα με τη BCC δομή είναι:

$$\sigma = C_0 + C_1 \exp\left(-C_3 T + C_4 T \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) + C_5 \epsilon^n$$

Αντίστοιχα η τάση διαρροής για τα μέταλλα με τη FCC δομή είναι:

$$\sigma = C_0 + C_2 \epsilon^{-1/2} \exp\left(-C_3 T + C_4 T \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις το C_0 είναι ο παράγοντας της τάσης που ευθύνεται για την ανομοιομορφία πυκνότητας της τάσης διαρροής. Οι μεταβλητές C_1 - C_5 και n

είναι σταθερές του υλικού και T η απόλυτη θερμοκρασία. Οι σταθερές αυτές προκύπτουν πειραματικά, π.χ από τη μέθοδο SHPB. Από την πρώτη εξίσωση προκύπτει ότι η παραμόρφωση δεν επηρεάζεται από το ρυθμό παραμόρφωσης και τη θερμοκρασία, σε αντίθεση με τη σχέση για τα μέταλλα με την FCC δομή.

Στον πίνακα που ακολουθεί είναι συγκεντρωμένα τα μοντέλα υλικού με τις εξισώσεις τους, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στη μοντελοποίηση των κατεργασιών μετάλλων.

Πίνακας 6.1 Μοντέλα υλικού στη μοντελοποίηση των κοπών.

Μοντέλο	Καταστατική εξίσωση
Usui et al.	$\sigma = B \left[\frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right]^M e^{-kT} \left[\frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right]^m \left\{ \int_{Path} e^{kT/N} \left[\frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right]^{-m/N} d\epsilon \right\}^N$
Oxley	$\sigma = \sigma_1 \epsilon^n$
Johnson-Cook	$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_a}{T_m - T_a} \right)^m \right]$
Zerilli-Armstrong	$\sigma = C_o + C_1 \exp[-C_3 T + C_4 T \ln(\dot{\epsilon})] + C_5 \epsilon^n$ $\sigma = C_o + C_2 \epsilon^n \exp[-C_3 T + C_4 T \ln(\dot{\epsilon})]$

Στις περισσότερες προσομοιώσεις και αναλύσεις μοντέλων το κοπτικό εργαλείο θεωρείται άκαμπτο σώμα (rigid body), παρότι υπάρχουν και άλλες μελέτες όπως [51-54]. Το εργαλείο δεν είναι παραμορφώσιμο. Παρόλα αυτά αντικείμενο μελέτης αποτελεί η θερμική ανάλυση του εργαλείου και ειδικότερα της κοπτικής του ακμής, για τον προσδιορισμό των θερμοκρασιών. Αν το κοπτικό αποτελείται από στρώσεις επένδυσης (coatings), τότε μοντελοποιείται συνήθως σαν ελαστικό υλικό και οι μόνες ιδιότητες υλικού που απαιτούνται είναι για τη μεταφορά θερμότητας και για την ελαστικότητα του υλικού.

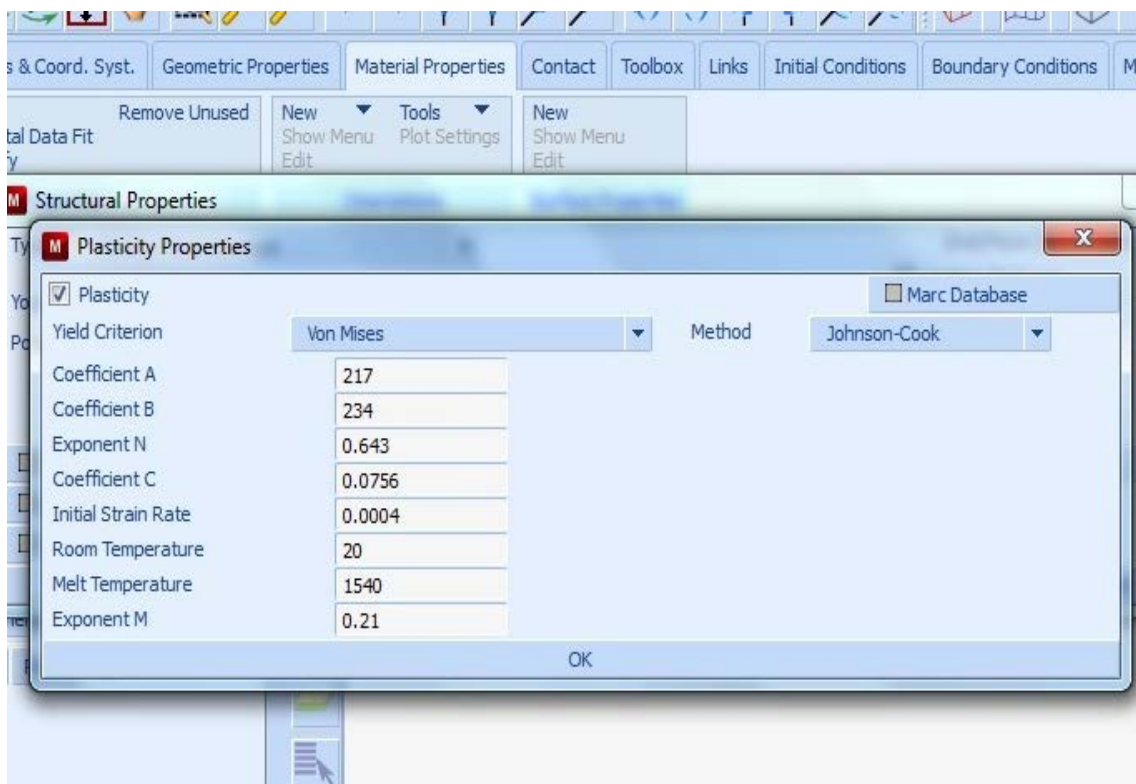
6.6 Προσομοίωση Μοντέλων Υλικού

Όπως προαναφέρθηκε, στη συνέχεια κατασκευάζονται δύο μοντέλα προσομοιώσεων που υποστηρίζουν την καταστατική εξίσωση υλικού των Johnson-Cook και μελετώνται για δύο διαφορετικά μοντέλα τριβής. Το μοντέλο τριβής της διάτμησης (Shear Bilinear) και το μοντέλο τριβής του Zorev, Stick-Slip. Για τη κατασκευή του Μοντέλου Υλικού Johnson-Cook, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των παραμέτρων και των μεταβλητών που αφορούν τους μαλακούς χάλυβες, όπως ο C15 του πειράματος και προήλθαν από τη βιβλιογραφία [55]. Οι συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθοι:

Parameter	Value
Density	7850 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Modulus of Elasticity	207 GPa
Poisson's Ratio	0.3
Johnson-Cook $\dot{\epsilon}_0$	1 $\frac{1}{\text{s}}$
Johnson-Cook A	217 MPa
Johnson-Cook B	233.7 MPa
Johnson-Cook n	0.6428
Johnson-Cook C	0.0756

(a) Mild Steel

Λαμβάνοντας υπόψη τις βιβλιογραφικές πηγές για τις τιμές των συντελεστών Johnson-Cook, τις ιδιότητες του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε και τις συνθήκες περιβάλλοντος που απαιτούνται [10], εισάγονται οι τιμές στο Marc για να κατασκευαστεί η καταστατική εξίσωση του υλικού. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ο πίνακας δεδομένων του Marc με τις παραμέτρους του υλικού.



Εικόνα 6.1:Εισαγωγή παραμέτρων Johnson-Cook στο Marc

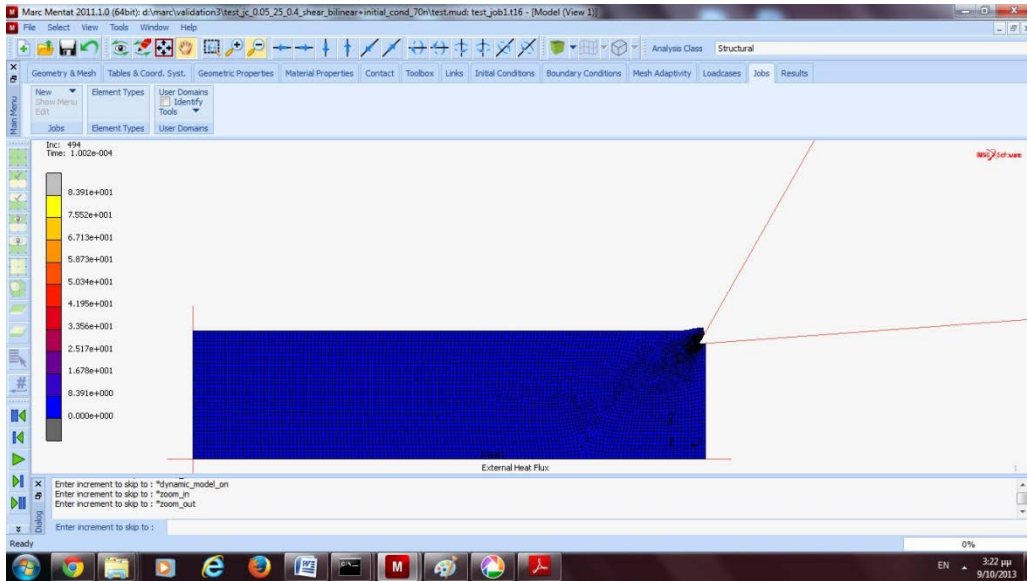
Έβδομη Προσομοίωση

Μοντέλο Υλικού Johnson-Cook, Shear Bilinear με $f=0,05$, $\gamma=25^\circ$
 $m=0,4$

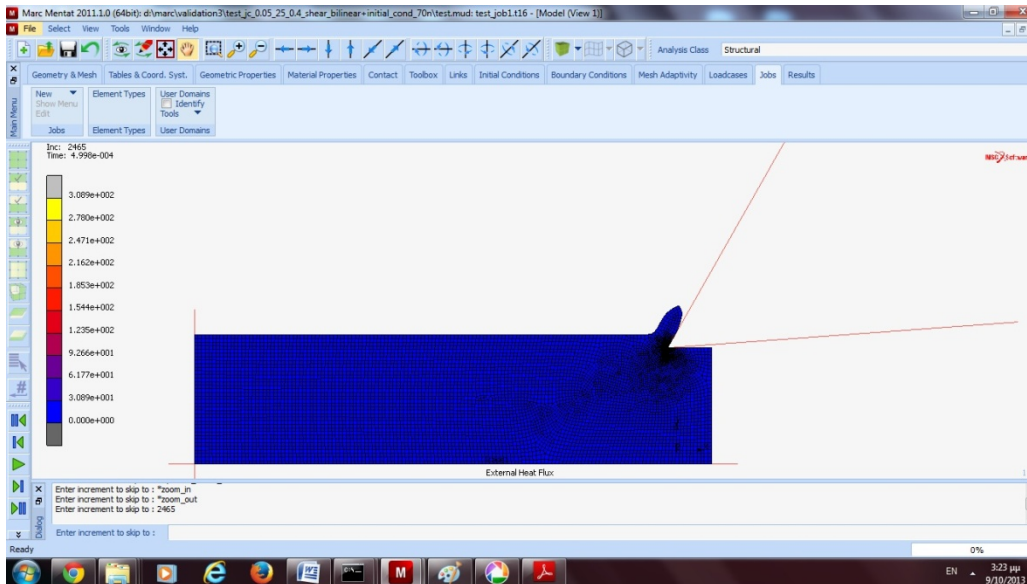
Στοιχεία προσομοίωσης

Title	Style	Table-Driven	Save Model	
Submit (1)	Advanced Job Submission			
Update	Monitor	Kill		
Status	Complete			
Current Increment (Cycle)	14916 (1)			
Singularity Ratio	0.77497			
Convergence Ratio	0.05963			
Analysis Time	0.0030244			
Wall Time	32390			
Total				
Cycles	44442	Cut Backs	0	
Separations	1198	Remeshes	2172	
Exit Number	4001	Exit Message		
Edit	Output File	Log File	Status File	Any File
Open Post File (Results Menu)				
Reset	OK			

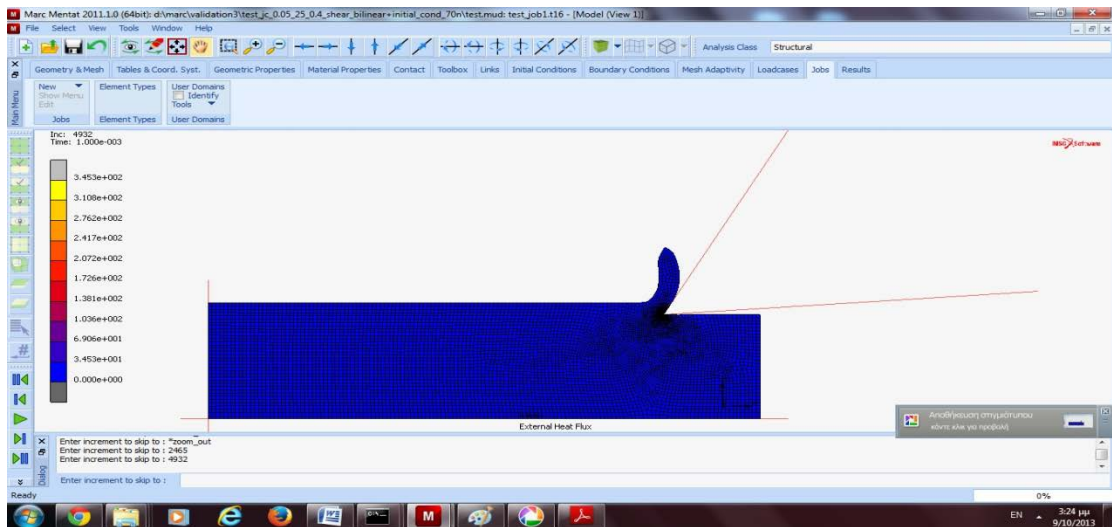
Μετά την κατασκευή της καταστατικής εξίσωσης των Johnson-Cook για το μοντέλο προσομοιώθηκαν οι συνθήκες κοπής $f=0,05$, $\gamma=25^\circ$ $m=0,4$ χρησιμοποιώντας το μοντέλο τριβής της διάτμησης Shear Bilinear. Όλες οι άλλες παράμετροι, οι γεωμετρικοί παράγοντες και οι συνθήκες κοπής παρέμειναν σταθερές. Από τη διεξαγωγή της προσομοίωσης παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα της κοπής που ακολουθούν:



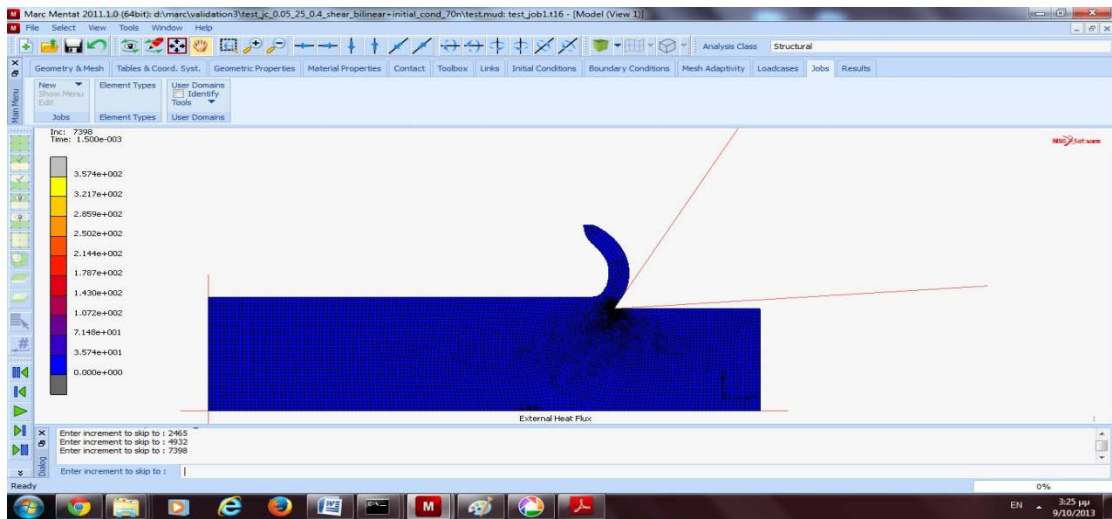
$t=0.0001$ $T_{\max}=83,9^{\circ}\text{C}$



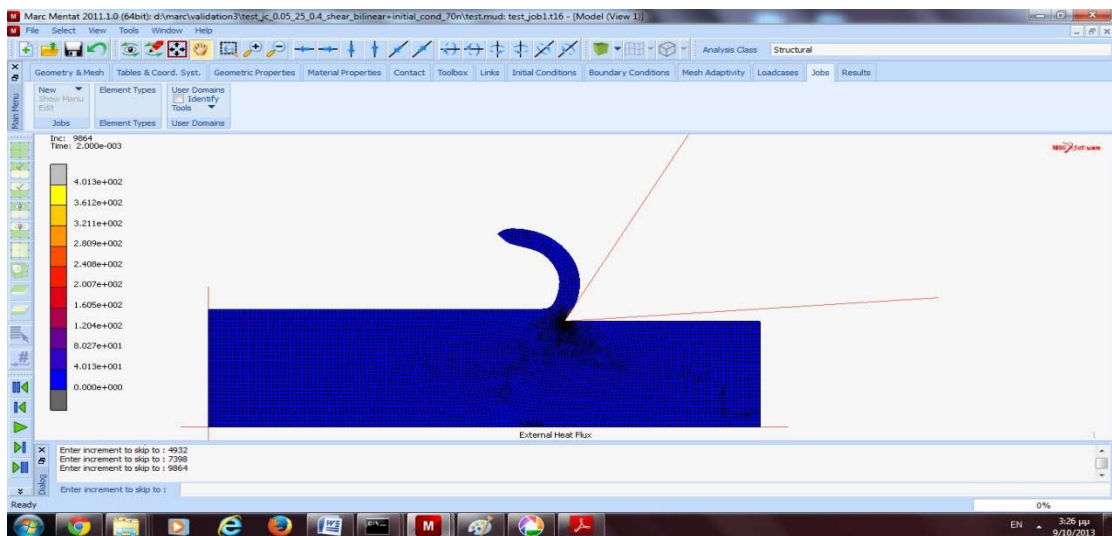
$t=0.0005$ $T_{\max}=308,9^{\circ}\text{C}$



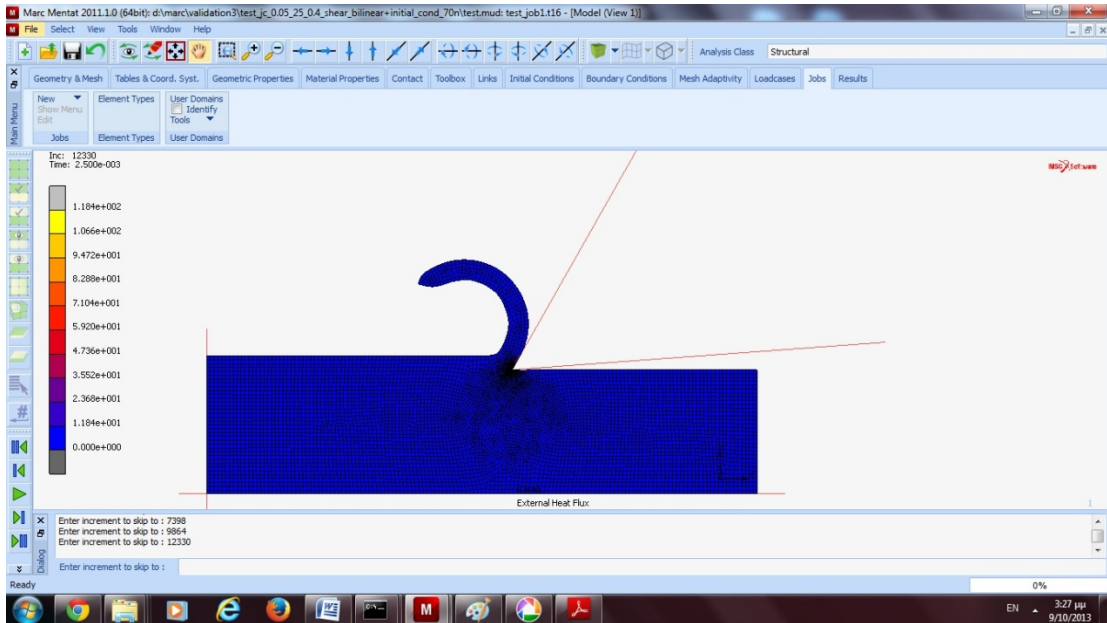
$t=0.0010$ $T_{\max}=345,3^{\circ}\text{C}$



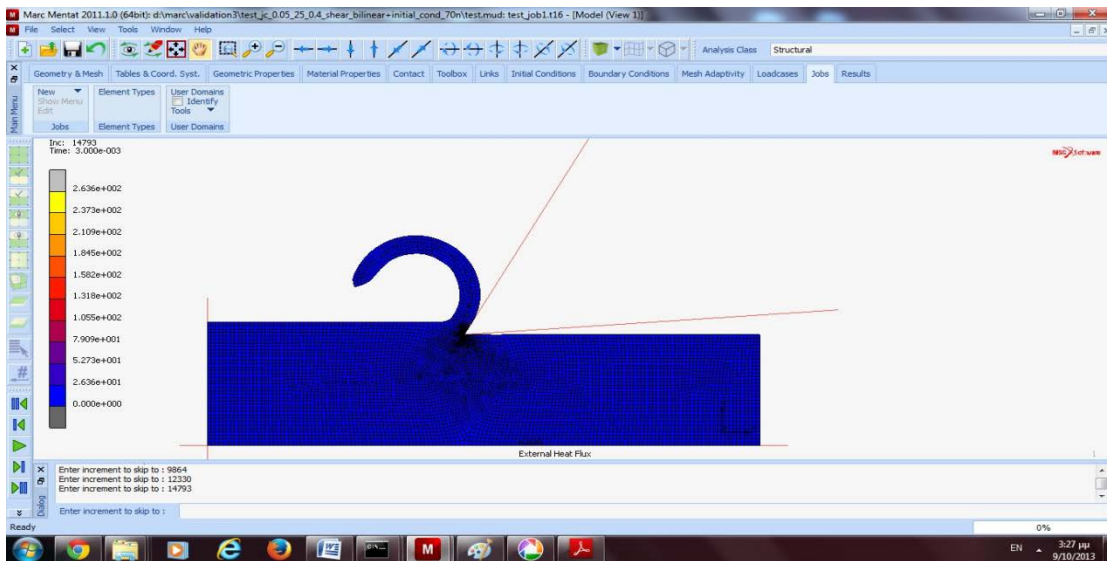
$t=0.0015$ $T_{\max}=357,4^{\circ}\text{C}$



$t=0.0020$ $T_{\max}=401,3^{\circ}\text{C}$



$$t=0.0025 \quad T_{\max}=118,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

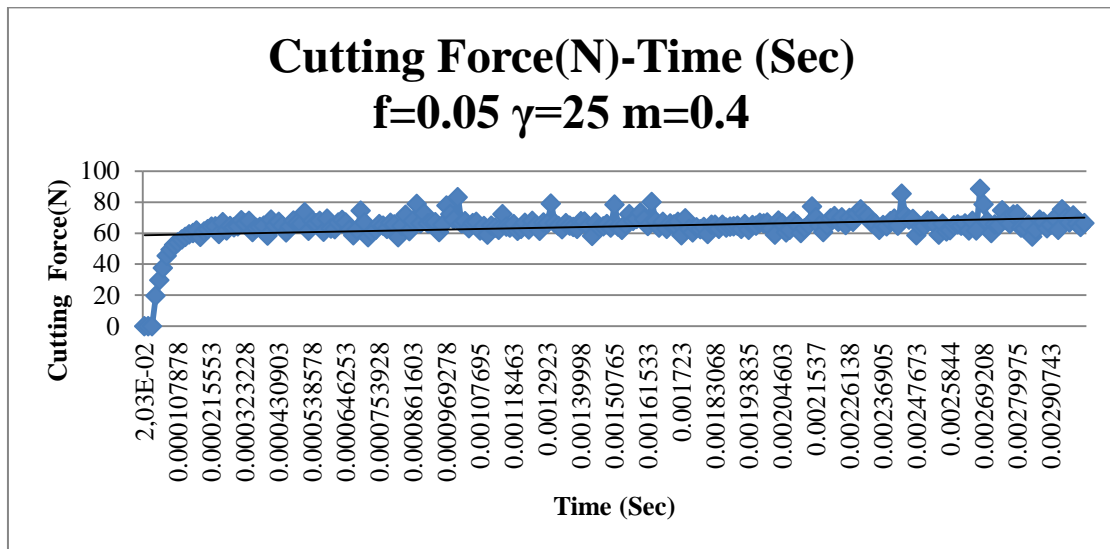


$$t=0.003 \quad T_{\max}=308,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Από τα παραπάνω στιγμιότυπα γίνεται φανερή η διαδικασία σχηματισμού του αποβλήτου, καθώς επίσης και ότι η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά τη κοπή είναι της τάξεως των $T_{\max}=401,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Δυνάμεις κοπής

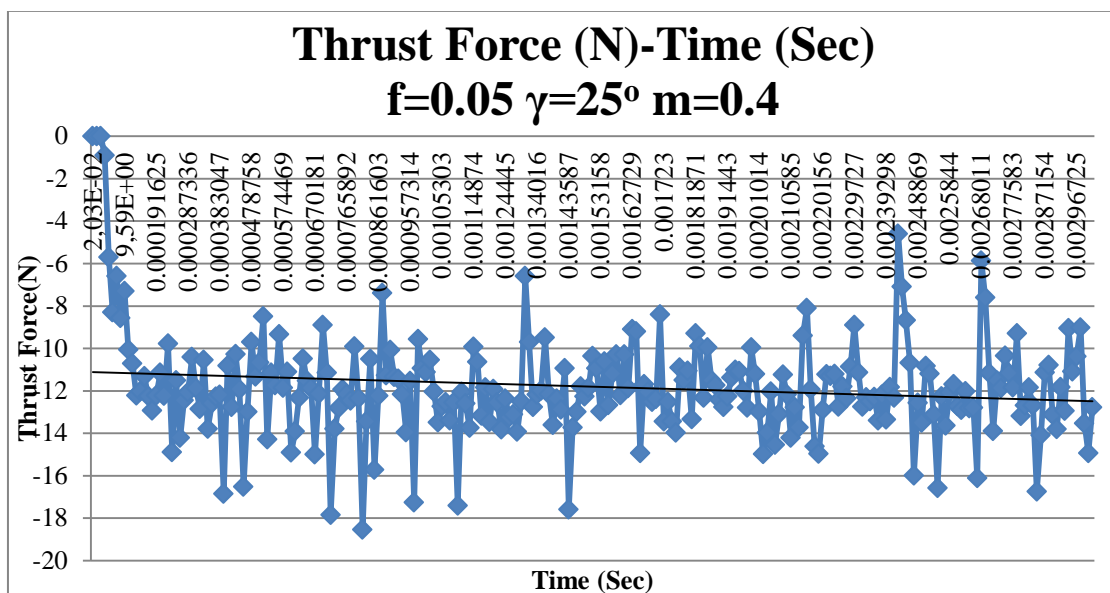
Από τον υπολογισμό των κοπτικών δυνάμεων κατά τον άξονα των x προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 6,1

Από τους υπολογισμούς των δυνάμεων προέκυψε ότι κατά τη μόνιμη κατάσταση η μέση τιμή των δυνάμεων κοπής κατά τον άξονα των x είναι **66 N**. Η τιμή αυτή προκύπτει ολοφάνερα και από το διάγραμμα.

Αντίστοιχα υπολογίστηκαν μέσω του Marc και οι δυνάμεις κοπής κατά τον άξονα των y και προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 6,2

Από τις τιμές των δυνάμεων του παραπάνω γραφήματος προκύπτει η μέση τιμή της δύναμης ίση με **-12 N**.

Γεωμετρία του αποβλήτου

Μετρώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του παραχθέντος αποβλήτου δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας:

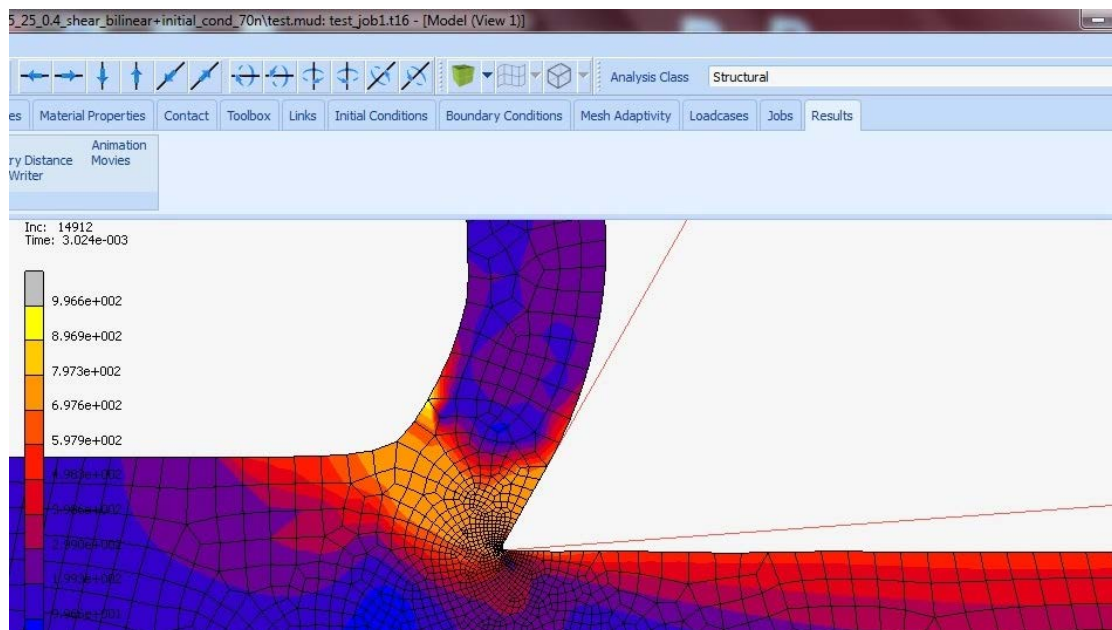
$\gamma(^{\circ})$	f (mm)	t_c (mm)	L_c (mm)	$\phi(^{\circ})$
25°	0,05	0,0975	0,05025	31,03

Πίνακας 6,2

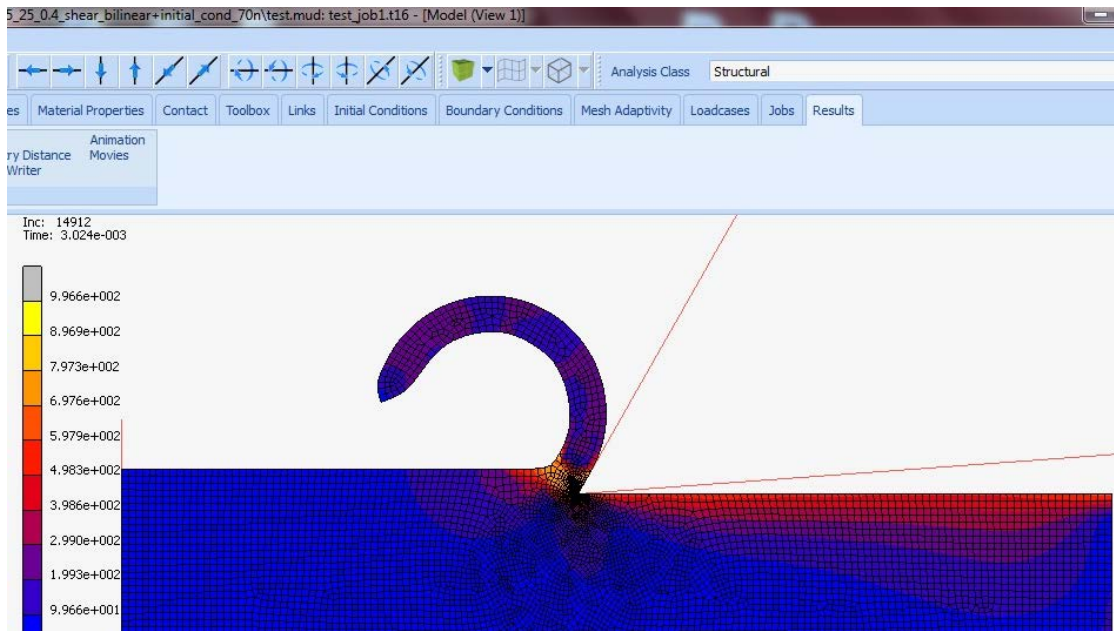
Μηχανικές και θερμικές παράμετροι

Από την αριθμητική επίλυση του μοντέλου προέκυψαν αποτελέσματα χρήσιμα για τη μελέτη, που αφορούσαν παραμέτρους όπως η πλαστική παραμόρφωση, ο ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης και οι τάσεις στην ζώνη παραμόρφωσης. Τα παρακάτω αποτελέσματα δύσκολα μετρώνται πειραματικά και παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν:

Τάσεις

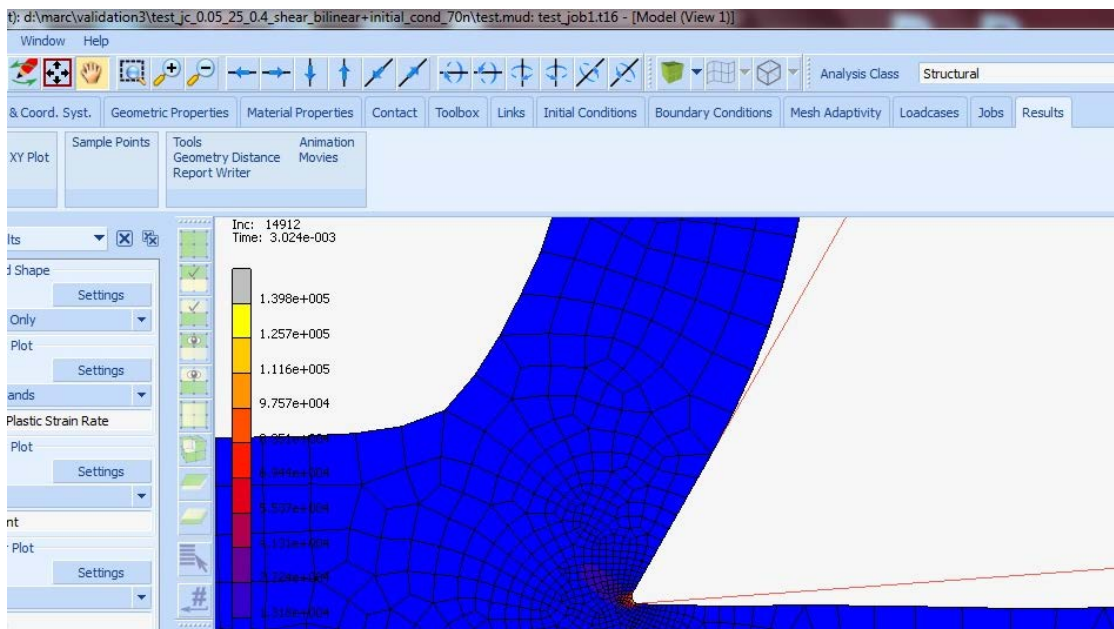


Εικόνα 6.2 : Τάσεις 996,6 MPa στην κύρια ζώνη και 797,3 στη δευτερεύουσα ζώνη παραμόρφωσης.



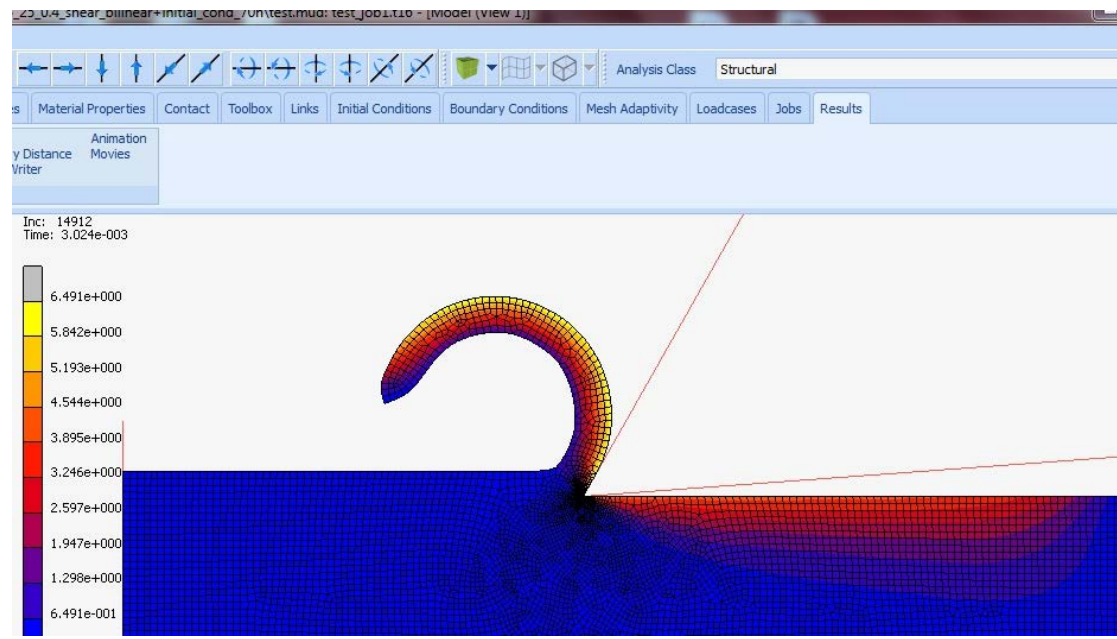
Εικόνα 6.3 : Η κατανομή των τάσεων σε όλο το τεμάχιο.

Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης



Εικόνα 6.4: Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης 139800 ((mm/mm)/sec) στην κύρια ζώνη παραμόρφωσης

Πλαστική παραμόρφωση



Εικόνα 6.5 : Κατανομή πλαστικής παραμόρφωσης

Όγδοη Προσομοίωση

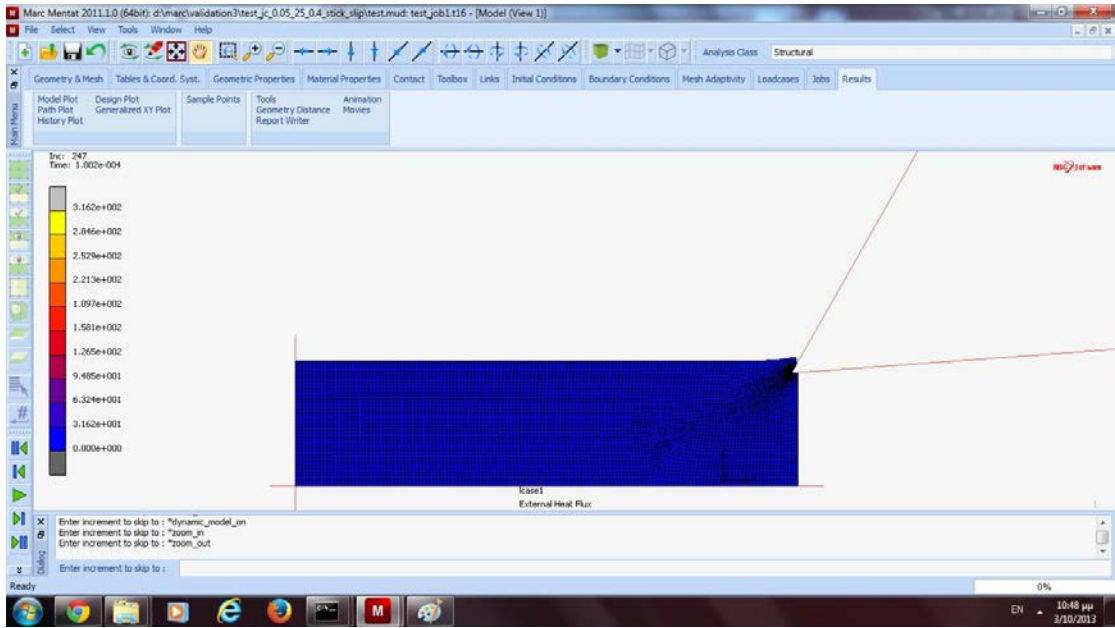
Μοντέλο Υλικού Johnson-Cook, Stick-Slip με $f=0,05$, $\gamma=25^\circ$ $m=0,4$,
 $\mu=1,05$

Στοιχεία προσομοίωσης

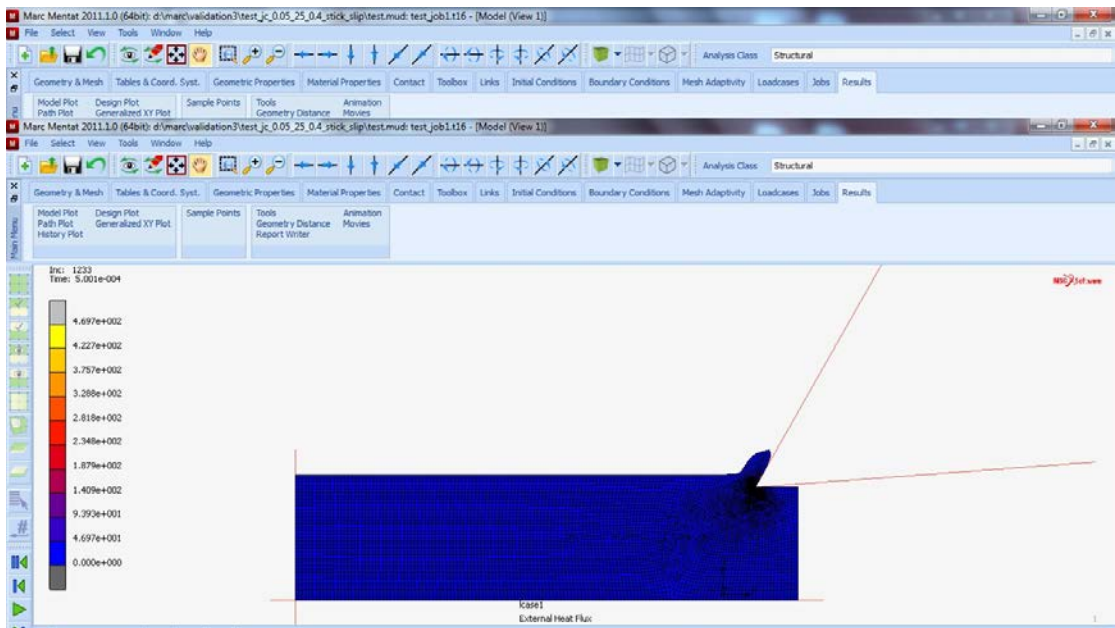
The screenshot shows the 'Run Job' dialog box with the following details:

Name	job1		
Type	Thermal/Structural		
User Subroutine File			
<input type="checkbox"/> Parallelization			
		No DDM	
		1 Solver Process	
Title	Style	Table-Driven	Save Model
Submit (1)	Advanced Job Submission		
Update	Monitor	Kill	
Status	Complete		
Current Increment (Cycle)	9925 (21)		
Singularity Ratio	0.00038054		
Convergence Ratio	0.1204		
Analysis Time	0.0040251		
Wall Time	40347		
Total			
Cycles	51956	Cut Backs	0
Separations	1355	Remeshes	2407
Exit Number	5059	Exit Message	
Edit	Output File	Log File	Status File
			Any File
Open Post File (Results Menu)			
Reset	OK		

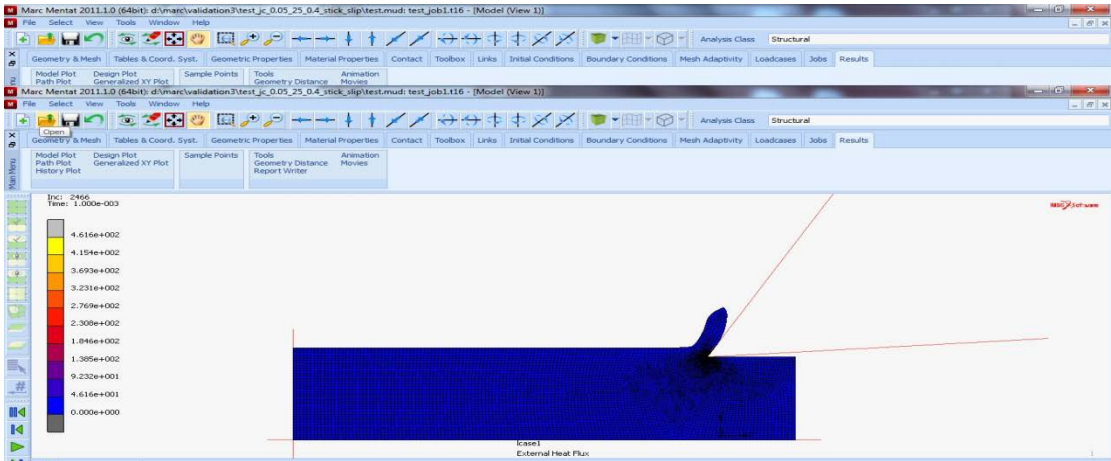
Χρησιμοποιώντας το ίδιο Μοντέλο Υλικού Johnson-Cook, επαναλαμβάνεται η προσομοίωση εφαρμόζοντας το Μοντέλο τριβής Stick-Slip με συντελεστές $m=0,4$ και $\mu=1,05$ και προκύπτει η παρακάτω προσομοίωση:



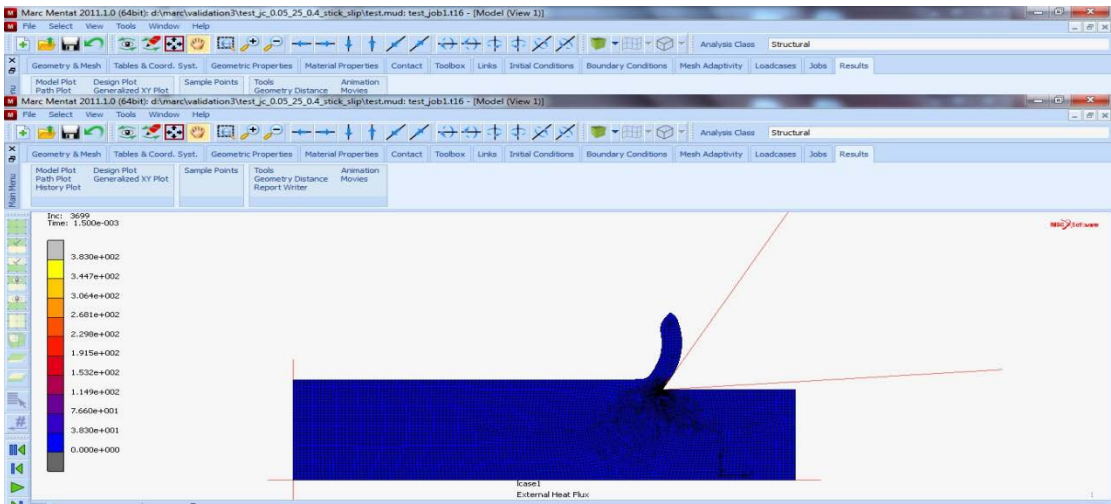
$t=0.0001 \text{ sec } T_{\max}=316,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$



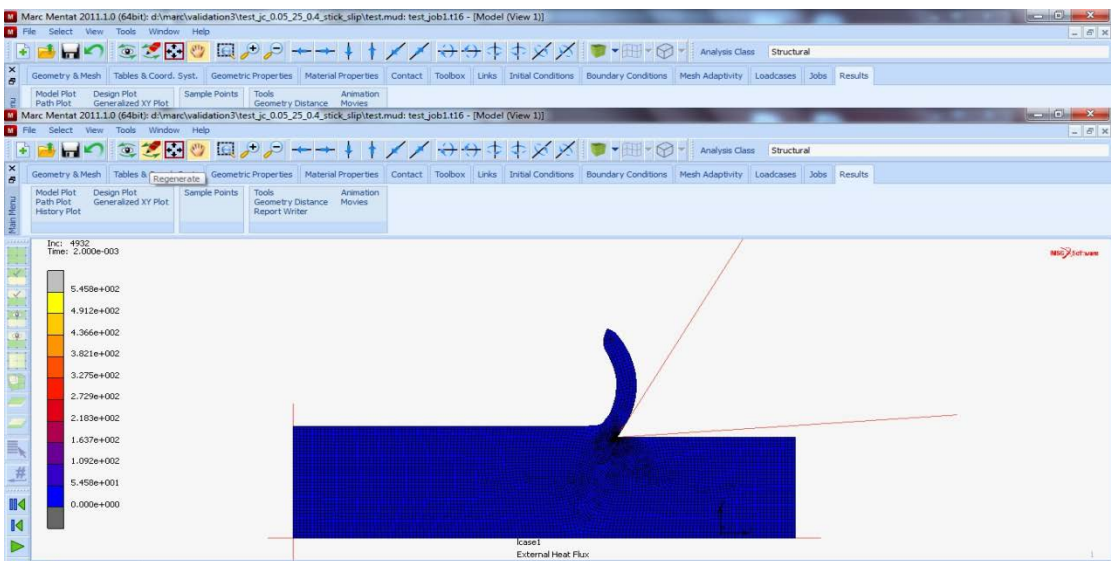
$t=0.0005 \text{ sec } T_{\max}=469,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$



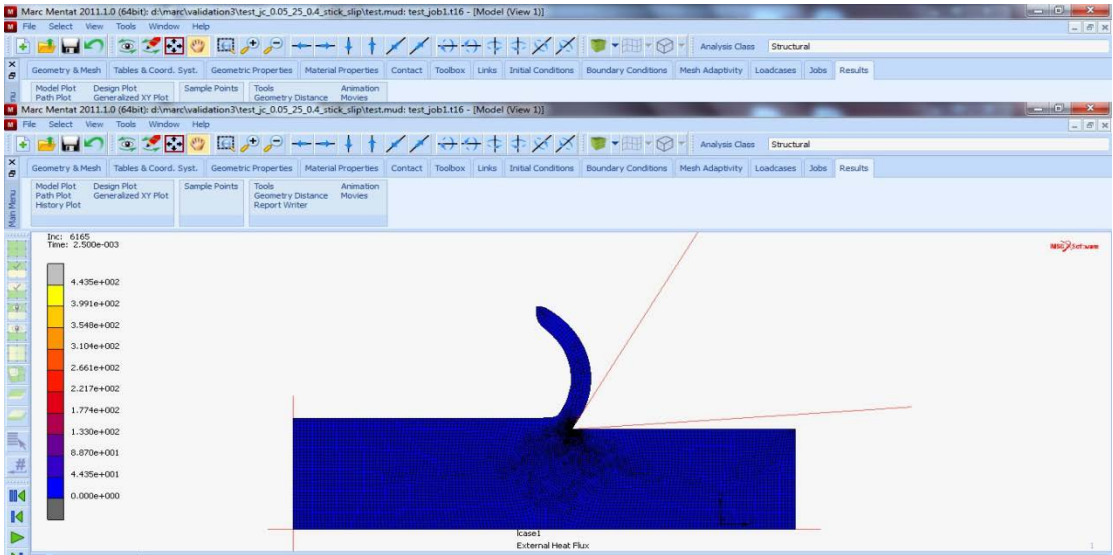
$t=0.001 \text{ sec } T_{\max}=461,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$



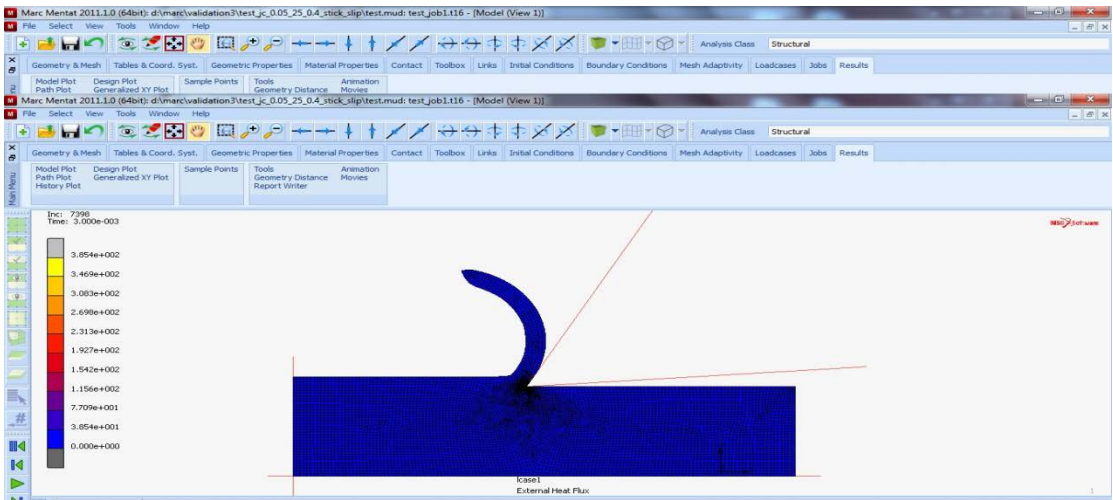
$t=0.0015 \text{ sec } T_{\max}=383,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$



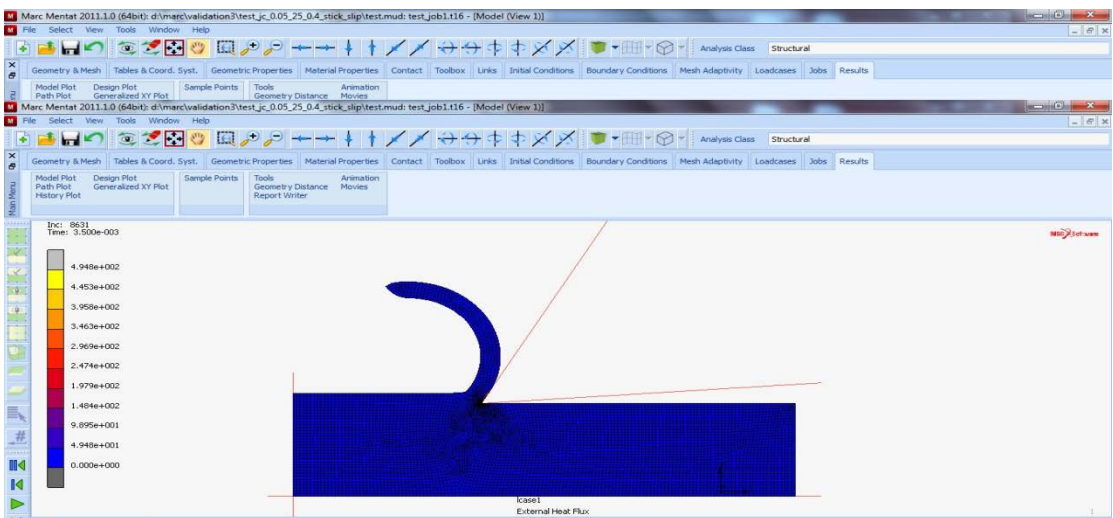
$t=0.0020 \text{ sec } T_{\max}=545,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$



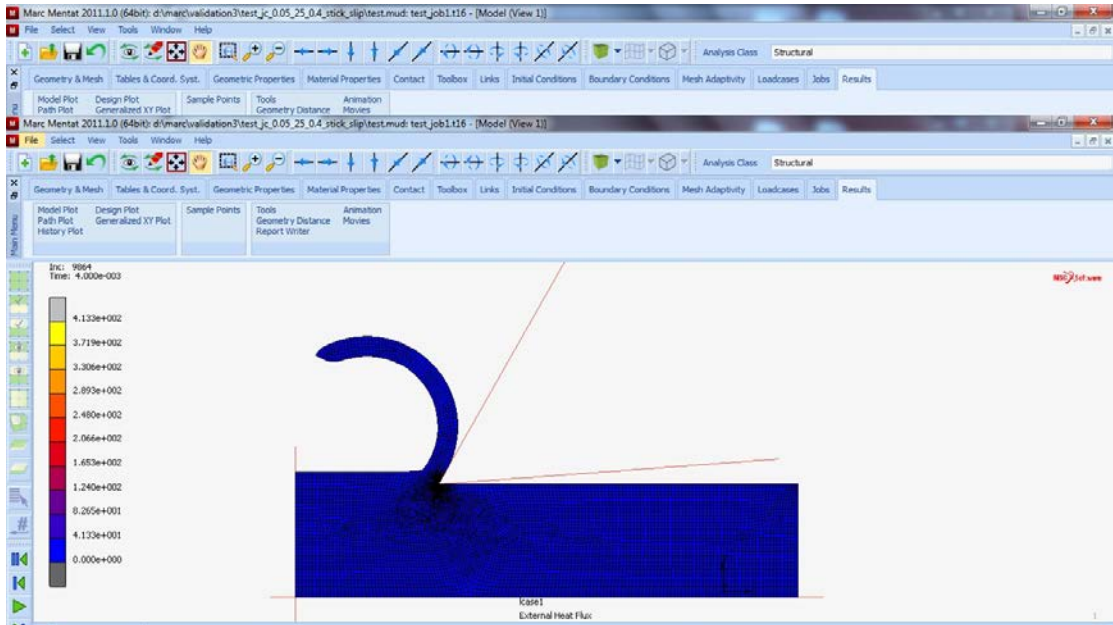
$t=0.0025 \text{ sec } T_{\max}=443,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$t=0.0030 \text{ sec } T_{\max}=385,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$t=0.0035 \text{ sec } T_{\max}=494,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

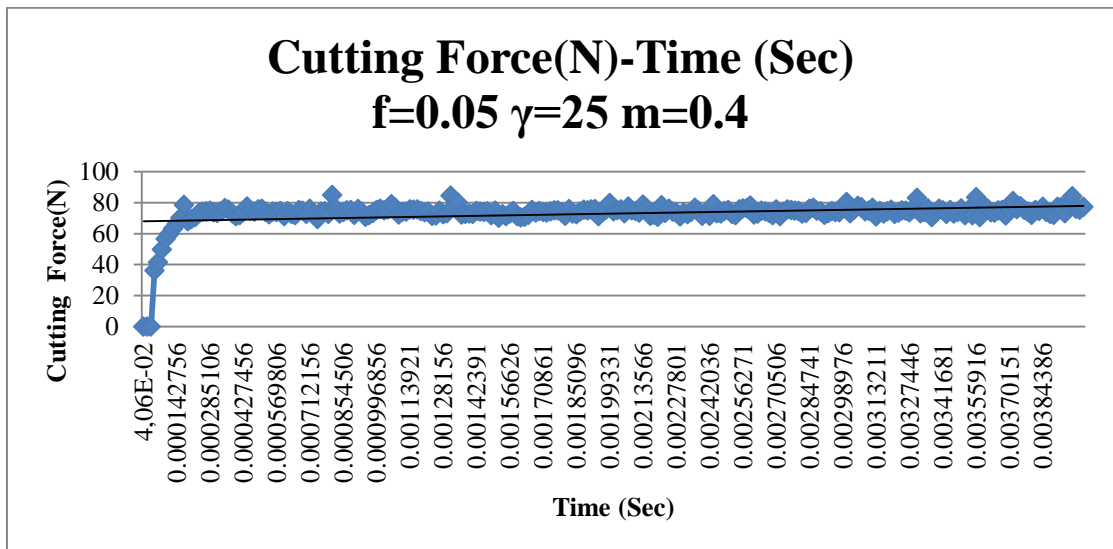


$t=0.0040 \text{ sec } T_{\max}=413,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Από τα προηγούμενα στιγμιότυπα προκύπτει ότι η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την προσομοίωση της παραπάνω κοπής είναι της τάξης των $T_{\max}=545 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Δυνάμεις κοπής

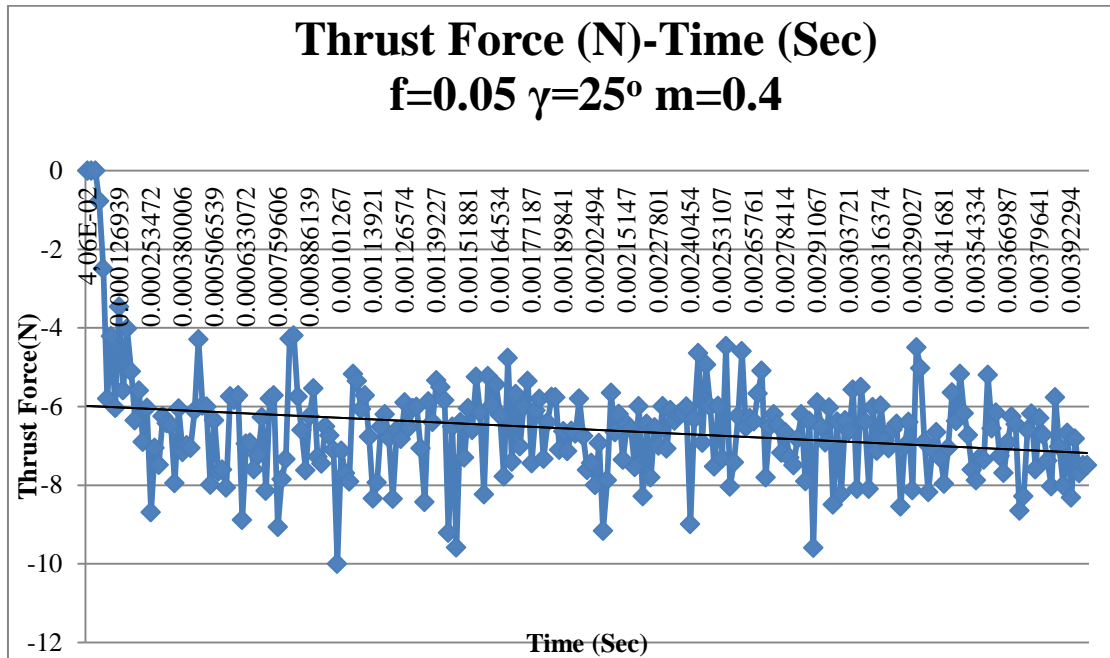
Από τον υπολογισμό των κοπτικών δυνάμεων κατά τον άξονα των x προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 6.3

Από τους υπολογισμούς των δυνάμεων προέκυψε ότι κατά τη μόνιμη κατάσταση η μέση τιμή των δυνάμεων κοπής κατά τον άξονα των x είναι **74N**. Η τιμή αυτή φαίνεται και από τη κατανομή των δυνάμεων στο διάγραμμα μας.

Αντίστοιχα υπολογίστηκαν μέσω του Marc και οι δυνάμεις κοπής κατά τον άξονα των y και προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 6.4

Η μέση τιμή των δυνάμεων κατά τον άξονα των x προκύπτει **-7N**.

Γεωμετρία του αποβλήτου

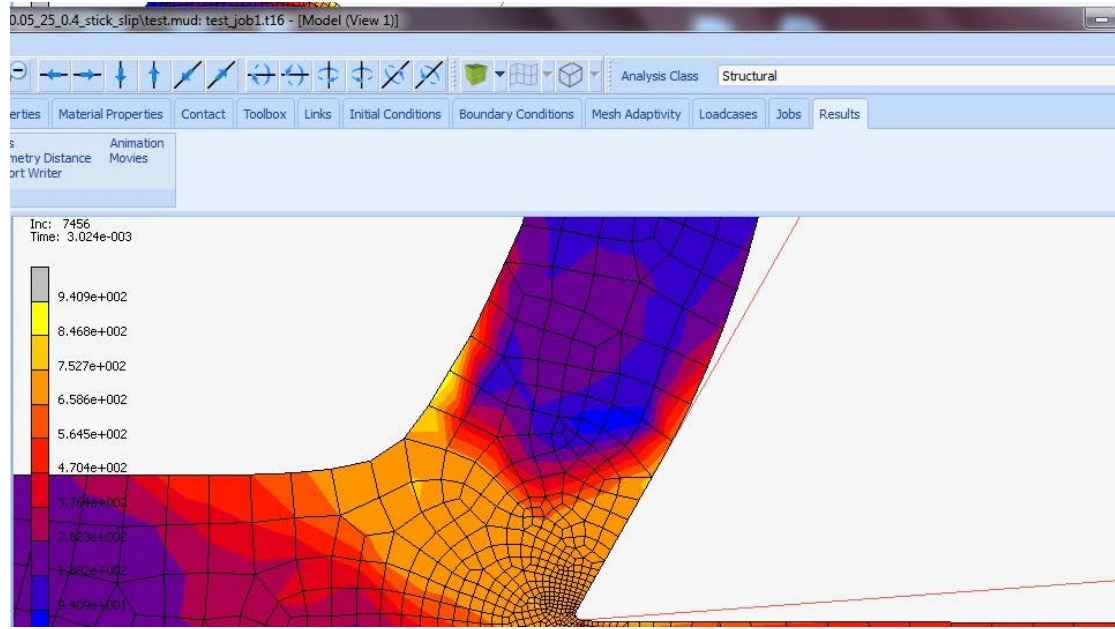
Μετρώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του παραχθέντος αποβλήτου δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας:

$\gamma(^{\circ})$	f (mm)	t_c (mm)	L_c (mm)	$\phi (^{\circ})$
25^ο	0,05	0.1010	0,0636	30,35

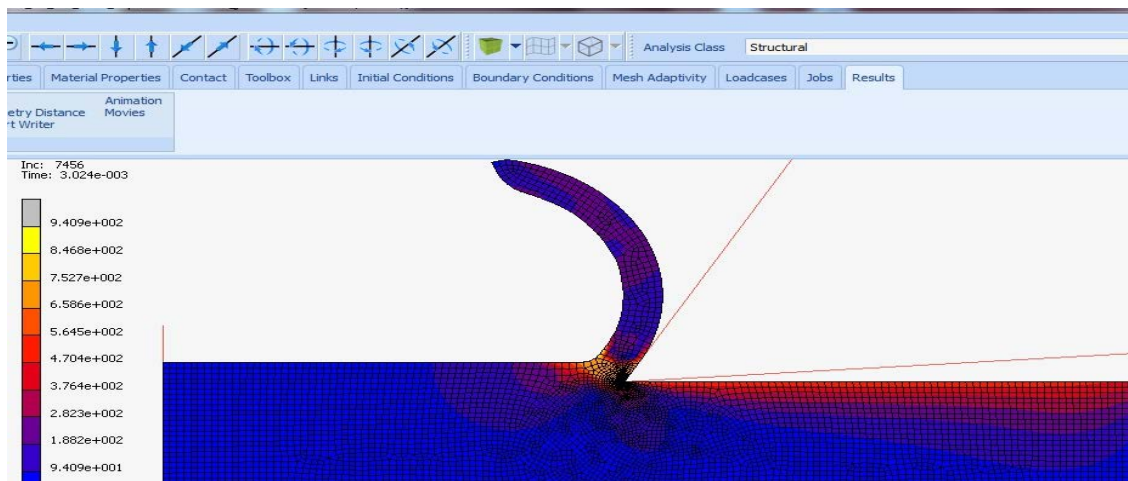
Πίνακας 6.3

Μηχανικές και θερμικές παράμετροι

Τάσεις

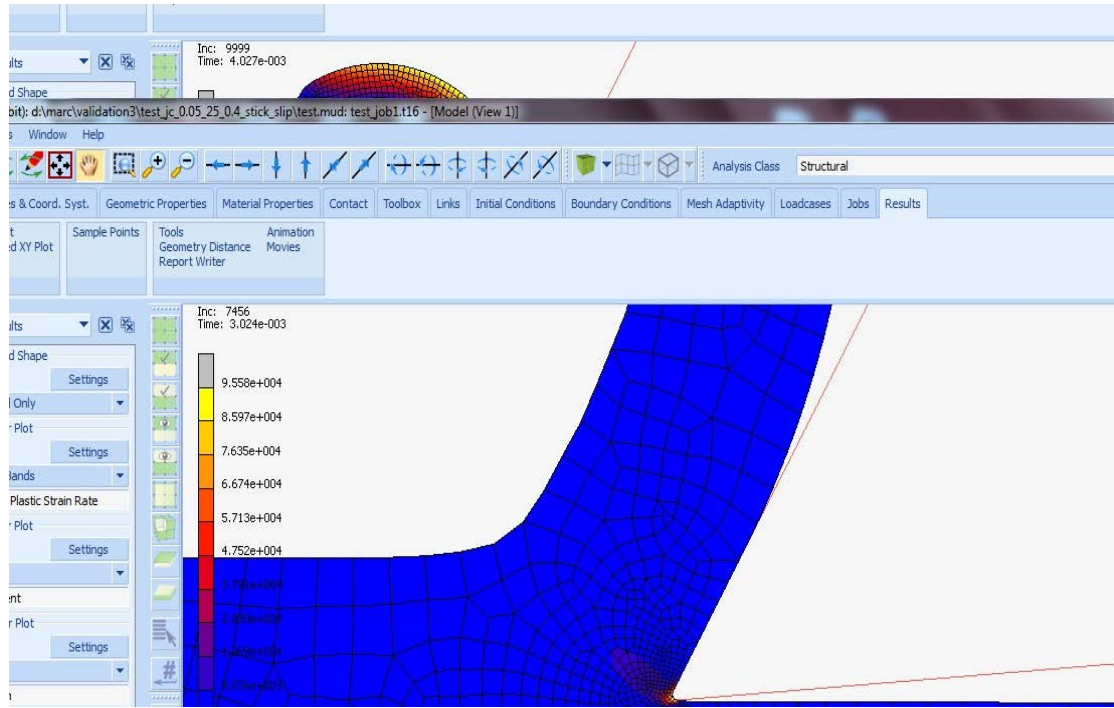


Εικόνα 6.6: Τάσεις με μέγιστη τιμή τα 940 MPa στη κύρια και 752 MPa στη δευτερεύουσα ζώνη παραμόρφωσης.



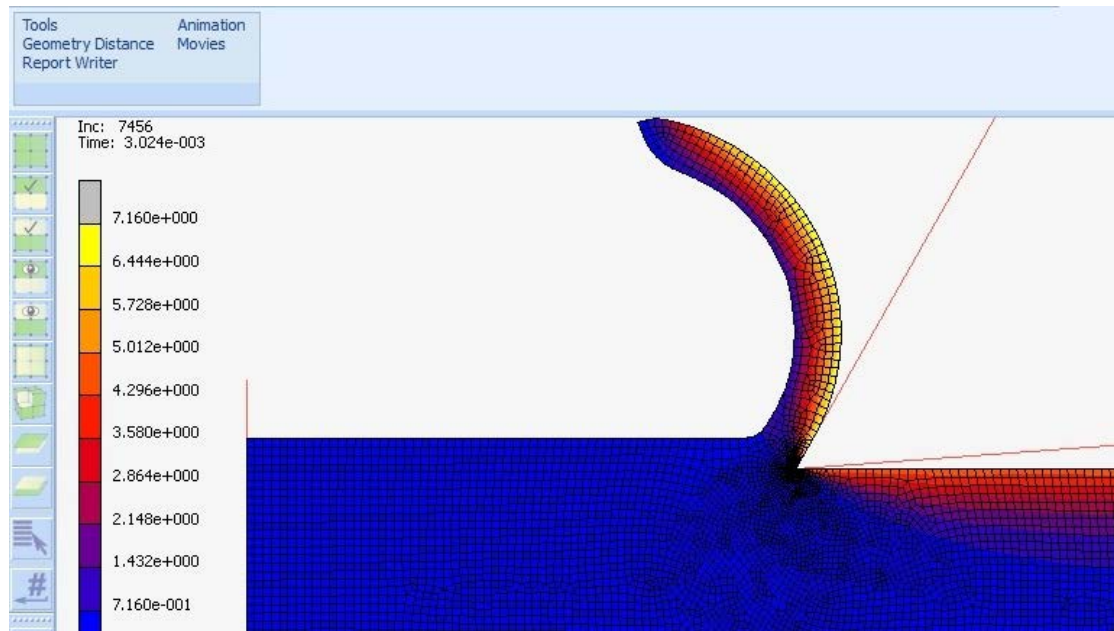
Εικόνα 6.7 : Κατανομή των τάσεων στο δοκίμιο

Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης



Εικόνα 6.8: Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης 95580 ((mm/mm)/sec) στην κύρια ζώνη παραμόρφωσης

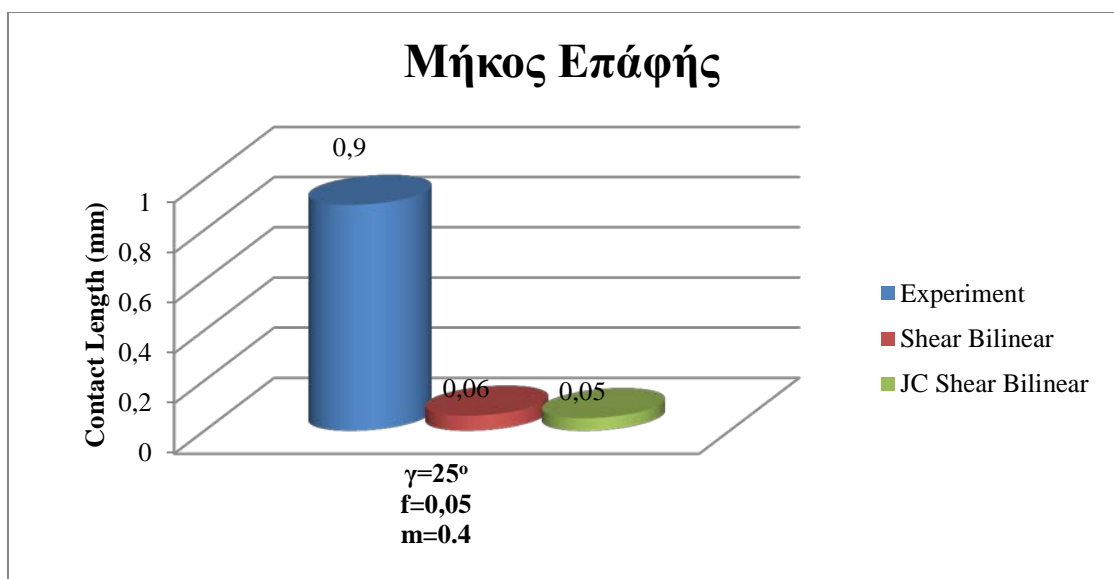
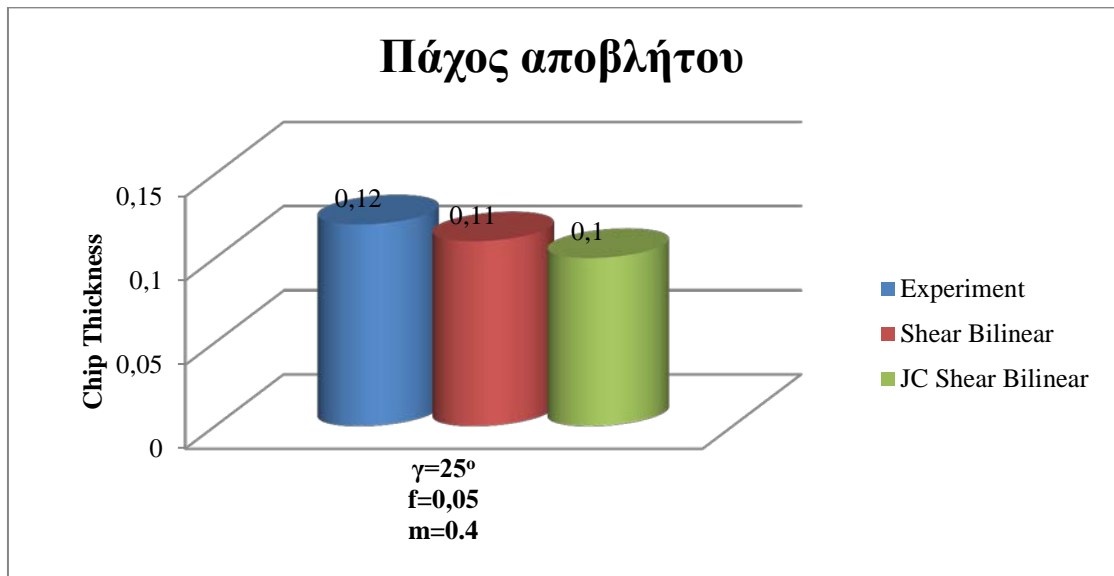
Πλαστική παραμόρφωση



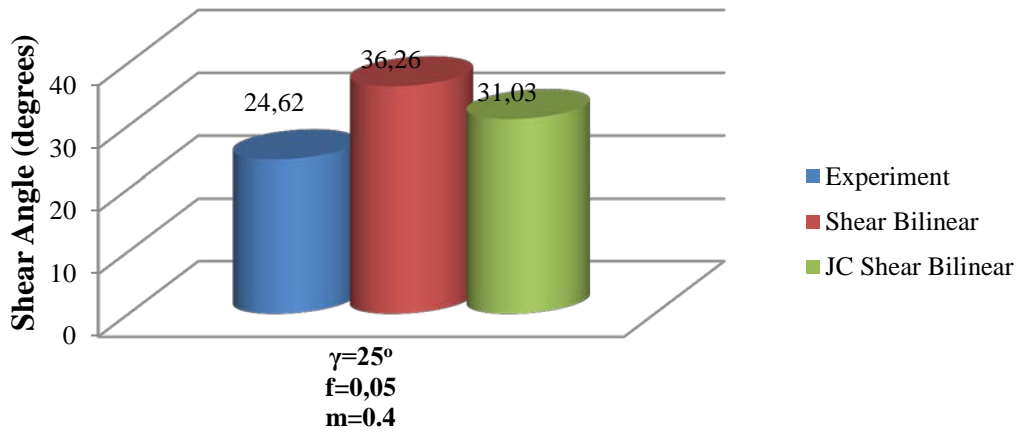
Εικόνα 6.9: Κατανομή Πλαστικής παραμόρφωσης στο δοκίμιο

Σύγκριση πρώτης με την έβδομη προσομοίωση

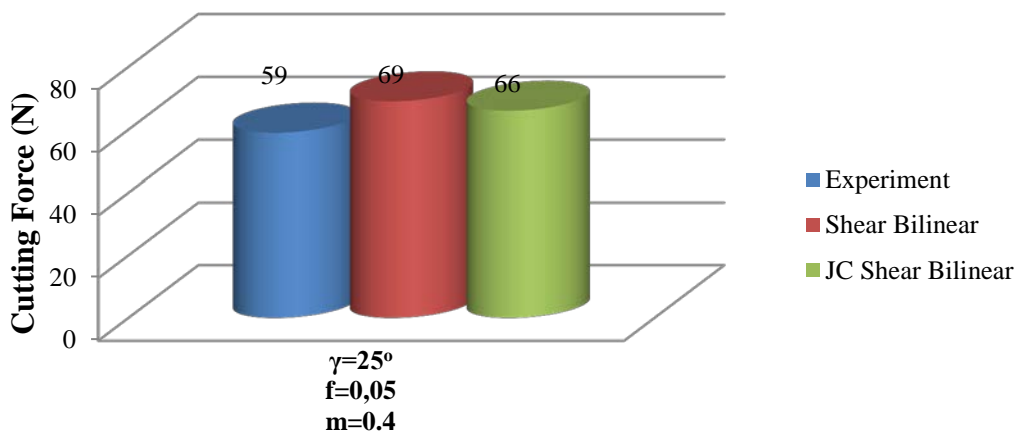
Συγκρίνοντας την πρώτη με την έβδομη προσομοίωση προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα:



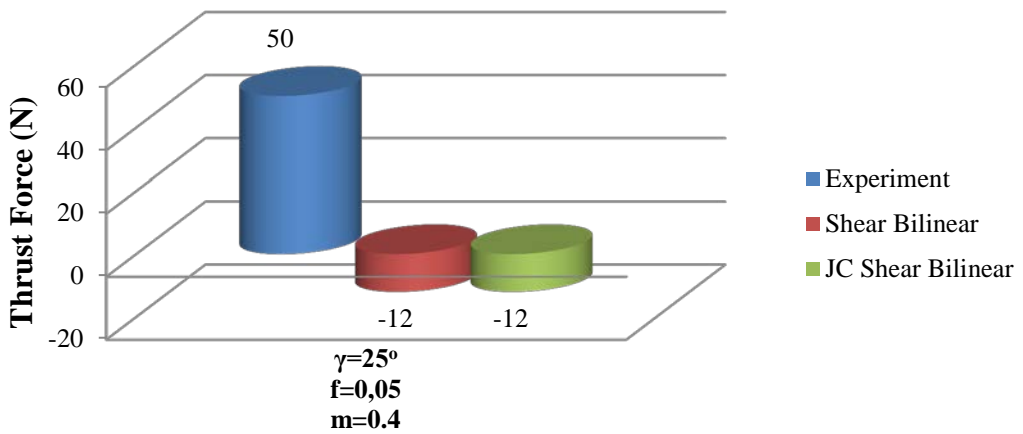
Γωνία Διάτμησης



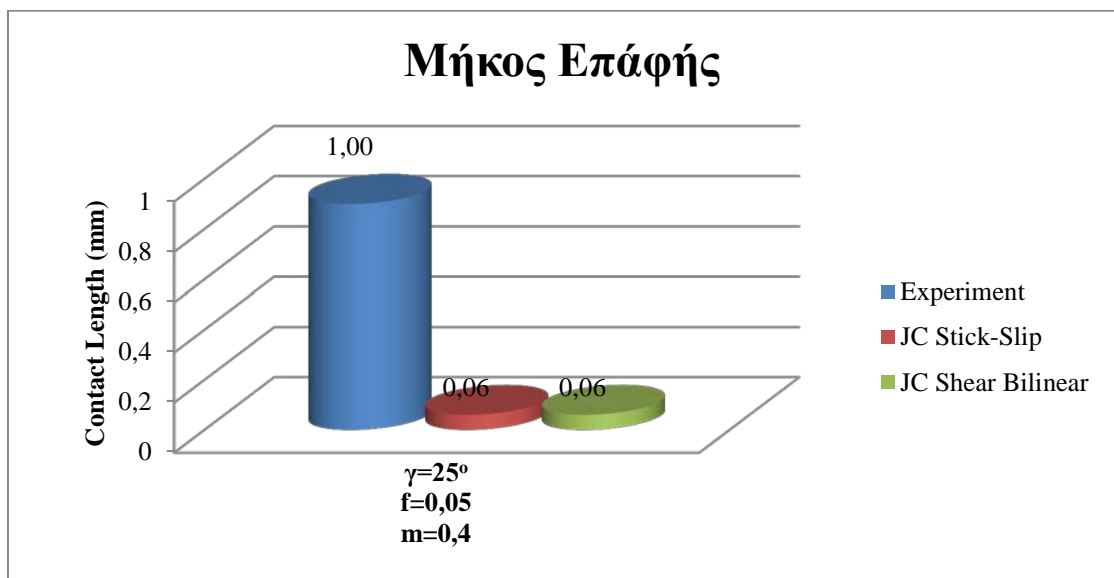
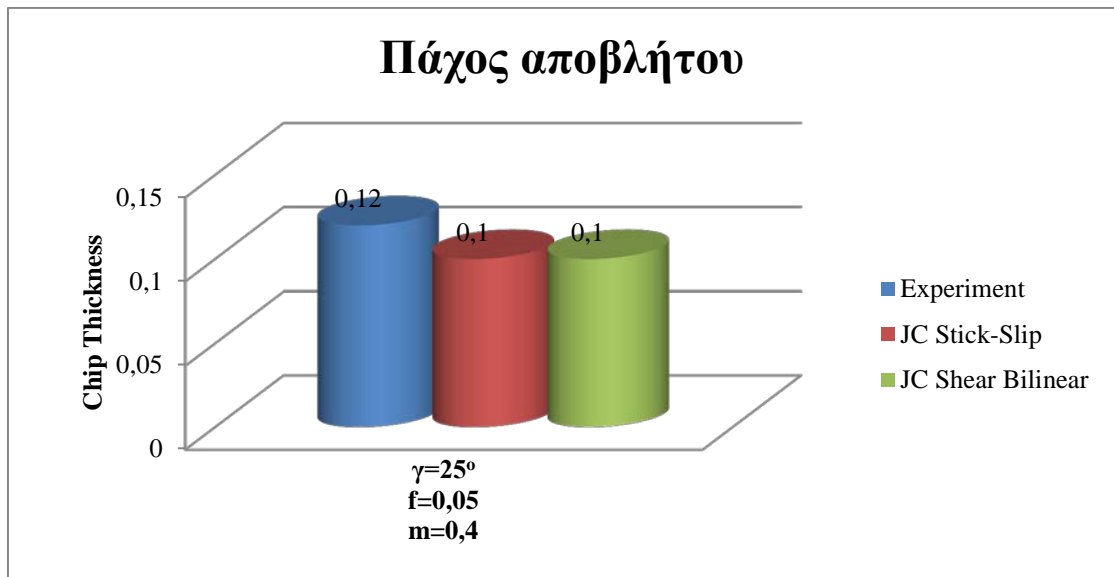
Δυνάμεις κοπής



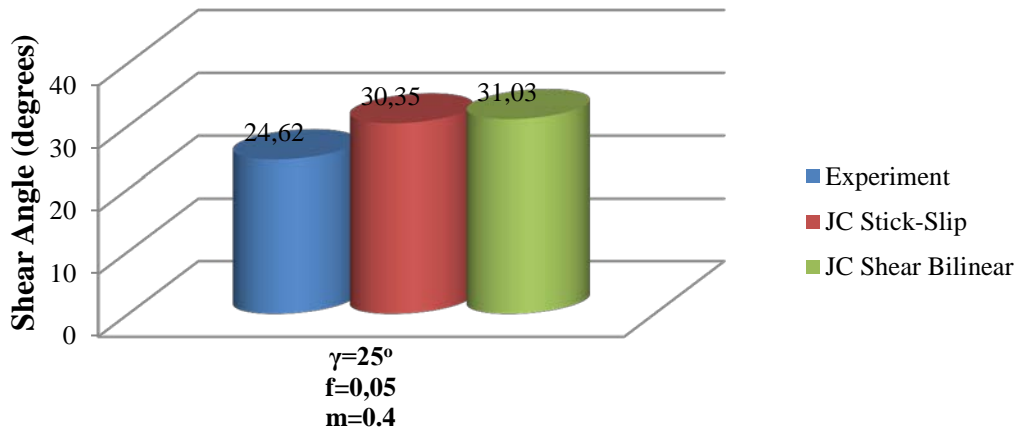
Δυνάμεις Κοπής F_y



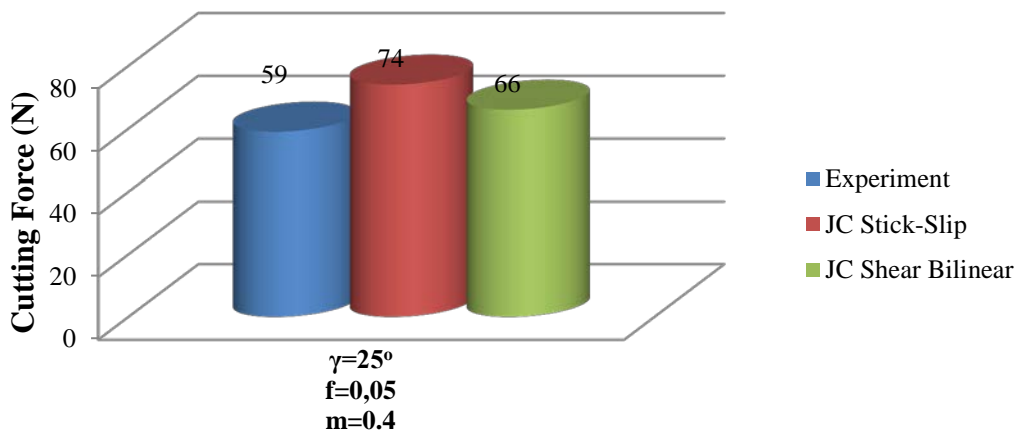
Σύγκριση έβδομης με όγδοη προσομοίωση



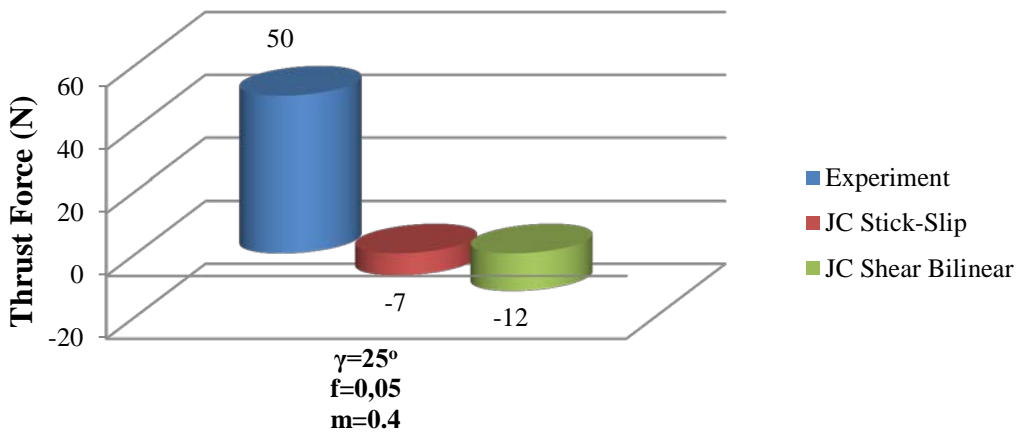
Γωνία Διάτμησης



Δυνάμεις κοπής



Δυνάμεις Κοπής F_y



Ανακεφαλαίωση-Σχολιασμός

Στο παραπάνω κεφάλαιο μελετήθηκε η Μοντελοποίηση του Υλικού. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο υλικού των Johnson-Cook. Εισήχθησαν στο πρόγραμμα μας οι τιμές της καταστατικής εξίσωσης του Μοντέλου υλικού των Johnson-Cook και διεξήχθησαν δύο προσομοιώσεις. Στην έβδομη συνολικά του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο τριβής Shear και διατηρήθηκαν σταθερές οι συνθήκες και ίδιες με την πρώτη προσομοίωση. Τρέξαμε δηλαδή την προσομοίωση αλλάζοντας μόνο το μοντέλο του υλικού. Από τη σύγκριση των δύο αυτών προσομοιώσεων παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο υλικού των Johnson-Cook εμφανίζει χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με το μοντέλο Υλικού του Oxley που είναι το βασικό μοντέλο υλικού που χρησιμοποιεί η βιβλιοθήκη του MSC.MARC. Οι τιμές των δυνάμεων κοπής προσεγγίζουν καλύτερα τις πειραματικές, όπως επίσης και οι τιμές της γωνίας διάτμησης. Όμοια οι τιμές των δυνάμεων άπωσης παρουσιάζουν σημαντικά σφάλματα. Αντίστοιχα παρατηρούνται καλύτερες τιμές ως προς το μήκος επαφής αλλά και πάλι με σημαντικά σφάλματα από τα πειραματικά αποτελέσματα. Ακόμα με τη χρήση του Μοντέλου υλικού των Johnson-Cook παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές τάσεων, μεγαλύτεροι ρυθμοί πλαστικής παραμόρφωσης και λίγο μικρότερες τιμές πλαστικής παραμόρφωσης σε σχέση με το βασικό μοντέλο υλικού.

Στη συνέχεια διεξήχθει η όγδοη και τελική προσομοίωση της εργασίας. Στην προσομοίωση αυτή χρησιμοποιήθηκε το Μοντέλο υλικού των Johnson-Cook και τον τύπο τριβής του Stick Slip με συντελεστές $m=0,4$, $\mu=1,05$. Από τη σύγκριση των δύο προσομοιώσεων παρατηρήθηκε ότι στην όγδοη προσομοίωση με τον τύπο τριβής Stick-Slip εμφανίζονται αυξημένες θερμοκρασίες. Ακόμα η προσομοίωση με τον τύπο τριβής Shear εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα δυνάμεων κοπής, αλλά υπολογίζει χειρότερα τη γωνία διάτμησης. Επίσης, η όγδοη προσομοίωση εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα ως προς το μήκος επαφής, αλλά και πάλι απέχουν και οι δύο σημαντικά από τις πειραματικές τιμές. Επιπλέον οι δύο αυτές προσομοιώσεις εμφανίζουν παραπλήσιες τιμές τάσεων, αλλά στην όγδοη προσομοίωση εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης και μικρότερες τιμές για τη πλαστική παραμόρφωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΌΓΔΟΟ

Ανακεφαλαίωση

8.1 Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε ένα σύγχρονο θέμα όπως είναι ο τομέας της Μικρομηχανικής. Η ζήτηση στις μέρες μας είναι ολοένα αυξανόμενη για μικροεξαρτήματα της τάξης των μm . Το ενδιαφέρον των ερευνητών έχει στραφεί στη μελέτη και την επίδραση που έχουν διάφοροι παράμετροι όπως είναι οι δυνάμεις κοπής, η κατανομή των τάσεων κτλ. Για να διεξαχθεί μια τέτοια μελέτη απαιτείται η κατασκευή μοντέλων και η διεξαγωγή προσομοιώσεων. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η κατασκευή ενός μοντέλου μικροκοπής και η εξέταση της επίδρασης διαφόρων θεωριών για την μοντελοποίηση της τριβής και της καταστατικής εξίσωσης του τεμαχίου.

Κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας κατασκευάστηκε με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων και με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου MSC.Marc που διαθέτετε προς χρήση το εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, ένα θερμομηχανικό μοντέλο μικροκοπής. Στο πρώτο μέρος της διπλωματικής εργασίας διεξήχθησαν με το παραπάνω μοντέλο δύο προσομοιώσεις με δύο διαφορετικές τιμές πρόωσης. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων, καθώς επίσης και με τις τιμές των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων της εργασίας του Halil Bil [10].

Στη συνέχεια μελετήθηκε η μοντελοποίηση της τριβής. Στο μοντέλο που παρουσιάστηκε στο πρώτο μέρος εφαρμόστηκαν δυο μοντέλα τριβής τα οποία και χρησιμοποιούνται στις κοπές και προτιμούνται ολοένα και περισσότερο από τους ερευνητές. Το μοντέλο τριβής του Coulomb και το μοντέλο τριβής Stick Slip του Zorev. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών συγκρίθηκαν μεταξύ τους σχετικά με τα δύο μοντέλα τριβής. Ακόμα για το μοντέλο τριβής Stick-Slip μελετήθηκε η επίδραση της τιμής του συντελεστή τριβής.

Στο τελευταίο μέρος της παρούσας διπλωματικής μελετήθηκε η μοντελοποίηση του υλικού του τεμαχίου. Διεξήχθησαν δύο προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας το Μοντέλο υλικού των Johnson-Cook για δύο διαφορετικούς τύπους τριβής.

Από τη σύγκριση των παραπάνω μοντέλων προέκυψε το επικρατέστερο, το οποίο ήταν και το πιο πετυχημένο. Αυτό είναι το μοντέλο της έβδομης προσομοίωσης που χρησιμοποιεί το μοντέλο υλικού των Johnson-Cook και τύπο τριβής Shear.

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων των παραπάνω προσομοιώσεων προέκυψε ότι η επιλογή του μοντέλου τριβής καθώς επίσης και των συντελεστών τριβής, έχουν μεγάλη επίδραση στα αποτελέσματα των τιμών των δυνάμεων κοπής F_x , των δυνάμεων άπωσης, στη μορφή του αποβλήτου καθώς επίσης και των θερμικών ροών.

Στο μοντέλο τριβής του Coulomb υπερεκτιμούνται οι δυνάμεις κοπής αλλά υπολογίζονται καλύτερα οι γωνίες διάτμησης. Στο μοντέλο τριβής Shear και στο μοντέλο τριβής Stick-Slip υπολογίζονται καλύτερα οι δυνάμεις αλλά υπερεκτιμούν τη τιμή της γωνίας διάτμησης. Όλα τα παραπάνω μοντέλα τριβής αποτυγχάνουν να υπολογίσουν ορθά τις τιμές των δυνάμεων άπωσης και υποτιμούν τις τιμές του μήκους επαφής.

Από τη μελέτη του συντελεστή τριβής παρατηρήθηκε ότι αυξανόμενου του συντελεστή τριβής αυξάνονται οι δυνάμεις κοπής, μειώνεται η γωνία διάτμησης, μειώνεται καμπυλότητα της μορφής του αποβλήτου αυξάνεται το μήκος επαφής και το πάχος αποβλήτου. Ακόμα οι τιμές των δυνάμεων άπωσης F_y υπολογίζονται καλύτερα για συντελεστές τριβής μεγαλύτερους του 0,6 όπου εμφανίζουν θετικές τιμές.

Ακόμα από τη μελέτη της Μοντελοποίησης του Υλικού παρατηρήθηκε ότι στο μοντέλο Υλικού των Johnson-Cook σε σχέση με το μοντέλο υλικού του Oxley εμφανίζονται χαμηλότερες θερμοκρασίες, μικρότερες τιμές δυνάμεων κοπής, μικρότερες τιμές πλαστικής παραμόρφωσης μεγαλύτερες τιμές τάσεων, μεγαλύτερες τιμές ρυθμού πλαστικής παραμόρφωσης και παραπλήσιες τιμές μήκους επαφής και πάχους αποβλήτου.

8.2 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω συμπεράσματα προκύπτει η σημαντικότητα της επίδρασης του μοντέλου τριβής, της τιμής του συντελεστή τριβής και του μοντέλου του υλικού στην έκβαση των αποτελεσμάτων μια προσομοίωσης μικροκοπής. Συνεπώς θα πρότεινα ως αντικείμενο για περαιτέρω διερεύνηση τη μελέτη του μοντέλου υπό άλλο υπολογιστικό πρόγραμμα που να υποστηρίζει περισσότερους τύπους τριβής και περισσότερα μοντέλα υλικού. Ακόμα θα πρότεινα τη διερεύνηση του μοντέλου τριβής Stick-Slip και τη βελτιστοποίηση της εύρεσης του κατάλληλου μήκους της κάθε περιοχής. Ακόμα θα πρότεινα την βελτίωση του ήδη υπάρχοντος μοντέλου και τη κατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου έτσι ώστε να έχουμε μια ακόμη καλύτερη απεικόνιση της κατεργασίας της μικροκοπής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Mamalis AG, Markopoulos A and Manolakos DE (2005) Micro and nanoprocessing techniques and applications. *Nanotechnology Perceptions*, 1: 31-52
- [2] Grzesik W (2008) *Advanced machining processes of metallic materials. Theory, modelling and applications*. Elsevier, Oxford
- [3] Masuzawa T (2000) State of the art of micromachining. *Annals of the CIRP*, 49 (2): 473-488
- [4] Byrne G, Dornfeld D and Denkena B (2002) Advancing cutting technology. *Annals of the CIRP*, 52(2): 483-507
- [5] Σημειώσεις του μαθήματος “Μικρο-Νανοκατεργασίες”, Άγγελος Μαρκόπουλος, Αθήνα 2005
- [6] Grzesik W (2008) *Advanced machining processes of metallic materials. Theory modelling and applications*. Elsevier, Oxford
- [7] van Luttervelt CA, Childs THC, Jawahir IS, Klocke F, Venuvinod PK (1998) Present situation and future trends in modeling of machining operations. In: Progress report of the CIRP working group “modeling and machining operations”. *Annals of the CIRP*, vol 47/2,
- [8] Stephenson DA, Agapiou JS (2006) *Metal cutting theory and practice*, 2nd edn. CRC Press, FL
- [9] Markopoulos A.P. (2012) *Finite Element Method in Machining Processes*. Springer, London, UK
- [10] H. Bil, *Simulation of Orthogonal Metal Cutting by Finite Element Analysis*, M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey (2003)
- [11] Kilicaslan Cenk “Modelling and Simulation of Metal Cutting by FEM” MSc. Thesis, 2009, Izmir Institute of Technology, Austria
- [12] Harewood FJ and McHugh PE (2007) Comparison of the Implicit and Explicit Finite Element Methods using Crystal Plasticity. *Computational Materials Science*, 39: 481–494
- [13] Shih AJ (1996) Finite Element Analysis of Rake Angle Effects in Orthogonal Metal Cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 38: 1-17
- [14] Αγγέλου Μαρκοπούλου, “Κατεργασίες Αποβολής Υλικού Λίαν Υψηλής Ακριβείας”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2006

[15] W. Grzesik, M. Bartoszek, P. Nieslony, “ Finite element modeling of temperature distribution in the cutting zone in turning processes with differently coated tools”, *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, 2005

[16] T. D. Marusich, Jeffrey D. Thiele, Christopher J. Brand, “Simulation and Analysis of Chip Breakage in Turning Processes”, *Journal at Third Wave Systems*, 2001

[17] Özel T (2006) The Influence of Friction Models on Finite Element Simulations of Machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46

[18] Petrarius, V., Amorande, D. and Alaci, S. 2008. Study about Finite Element Analysis of High Speed Drilling. *Fascile of Management and Technological Engineering* 11

[19] Ambati, R. 2008. Simulation and Analysis of Orthogonal Cutting and Drilling Processes using LS-DYNA. *Msc. Thesis*. University of Stuttgart

[20] <http://www.mscsoftware.com/product/marc>

[21] Σημειώσεις του μαθήματος «Κατεργασίες ΙΙ» του καθηγητή ΕΜΠ Δ. Μανωλάκου

[22] Σημειώσεις του μαθήματος «Εισαγωγή στη μηχανουργική Τεχνολογία» του καθηγητή ΕΜΠ Γ. Βοσνιάκου

[23] Λαζάρου Ε. Λαζαρίδη, “Μηχανουργική Τεχνολογία”, Ίδρυμα Ευγενίδου, 1997

[24] Πέτρου Γ. Πετροπούλου, “Μηχανουργική Τεχνολογία”, Ίδρυμα Ευγενίδου, 1998

[25] <http://www.productionmachining.com/articles/anatomy-of-free-machining-steel>

[26] Γεωργία Μανταλιά, “Μελέτη των δυνάμεων κοπής στις κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2009

[27] Ernst H and Merchant ME (1941) Chip Formation, Friction and High Quality Machined Sur-faces. *Surface Treatment of Metals*. American Society of Metals, 29: 299-378

[28] Xiaozhou Li, Huadong Yu and Jinkai Xu, 2009, “Model of Micro-cutting and Analysis of Micro Cutting Force”, *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, August 9 - 12, Changchun, China

[29] Kai Liu, 2005, “Process modeling of micro-cutting including strain gradient effects”, Georgia Institute of Technology

- [30] E.J.A. Armarego and R.H. Brown, 1962, "On the size effect in metal cutting", *International Journal of Production Research.*, 1, n3, pp. 75-99
- [31] Finnie I (1963) A comparison of stress strain behavior in cutting with that in other materials tests. *International Research in Production Engineering* , ASME: 76–82
- [32] Ikawa N, Shimada S, Tanaka H and Ohmori G (1991) Atomistic Analysis of Nanometric Chip Removal as Affected by Tool-Work Interaction in Diamond Turning. *Annals of the CIRP* 40(1): 551–554
- [33] Weule H, Huntrup V and Tritschle H (2001) Micro-Cutting of Steel to Meet New Require-ments in Miniaturization. *Annals of the CIRP*, 50(1): 61–64
- [34] Kim CJ, Bono M and Ni J (2002) Experimental Analysis of Chip Formation in Micro-Milling. *Transactions NAMRI/SME*, 30: 1–8
- [35] Kim JD and Kim DS (1995) Theoretical analysis of micro-cutting characteristics in ultra-precision machining. *Journal of Materials Processing Technology* 49
- [36] Malekian M, Mostofa MG, Park SS and Jun MBG (2012) Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum. *Journal of Materials Processing Technology*, 212
- [37] Atkins AG (2003) Modeling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantita-tive explanations for some longstanding problems. *International Journal of Mechanical Sci-ences*, 45
- [38] Kapakjian, S. and Schmid, S.R. 2006. *Manufactruing Engineering and Technology*. New Jersey: Prentice-Hall
- [39] DeGarmo, E.P., Black, J.T. and Kosher, R.A. 1997. *Materials and Processes inManufacturing* New Jersey: Prentice-Hall
- [40] Zorev, N.N. 1963. Inter-relationship between Shear Processes Occurring along the Tool Face and Shear Plane in Metal Cutting. *International Research in Production Enginerring ASME* 42-49
- [41] Shatla, M., Kerk, C. and Altan, T. 2001. Process Modelling in Machining. Part II:Validation and Applications of the Determined Flow Stress Data.*International Journal of Tools and Manufacturing* 41: 1659-1680
- [42] Usui E and Shirakashi T (1982) Mechanics of Machining – from "Descriptive" to "Predic-tive" Theory". In: Kops L and Ramalingam S (eds.) *On the Art of Cutting Metals – 75 Years Later: a Tribute to F.W. Taylor*, Proceedings of the Winter Annual Meeting of the ASME PED, 7: 13-35
- [43] Oxley PLB (1989) *The Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Ma-chinability*. Ellis Horwood, Chichester, UK

[44] Zerilli, F.J. and Armstrong, R.W. 1987. Dislocation Mechanics Based Constitutive Relations for Materials Dynamics Calculations. *Journal of Applied Physics* 5:61.

[45] Johnson, G.R. and Cook, W.H. 1993. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain-rates and High Temperatures. *Seventh International Symposium on Ballistics* 7: 541-547.

[46] Jaspers SPFC and Dautzenberg JH (2002) Material Behaviour in Metal Cutting: Strains, Strain Rates and Temperatures in Chip Formation. *Journal of Material Processing Technology*, 121: 123-135

[47] Astakhov VP and Outeiro JC (2008) Metal Cutting Mechanics, Finite Element Modelling. In: Davim, JP (Ed.), *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, Springer-Verlag Limited UK

[48] Usui E, Maekawa K and Shirakashi T (1981) Simulation Analysis of Built-up Edge Formation in Machining Low Carbon Steels. *Bulletin, Japanese Society of Precision Engineering*, 15: 237-242

[49] Maekawa K, Shirakashi T and Usui E (1983) Flow Stress of Low Carbon Steel at High Temperature and Strain Rate (Part 2). *Bulletin, Japanese Society of Precision Engineering*, 17(3): 167-172

[50] Umbrello D, M'Saoubi R and Outeiro JC (2007) The Influence of Johnson-Cook Material Constants on Finite Element Simulation of Machining of AISI 316L Steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47: 462-470

[51] Strenkowski JS, Carrol JT III (1986) Finite element models of orthogonal cutting with application to single point diamond turning. *Int J Mech Sci* 30:899-920

[52] Kishawy HA, Rogers RJ, Balihodzic N (2002) A numerical investigation of the chip-tool interface in orthogonal machining. *Mach Sci Technol* 6:397-414

[53] Klocke F, Raedt H-W, Hoppe S (2001) 2D-FEM simulation of the orthogonal high speed cutting process. *Mach Sci Technol* 5:323-340

[54] Madhavan V, Adibi-Sedeh AH (2005) Understanding of finite element analysis results under the framework of oxley's machining model. *Mach Sci Technol* 9:345-36

[55] Steven Ning (2009) *Reinventing the Automobile: Designing a Lighter Class of Road Vehicle*, Harvey Mudd College

[56] Ng, E.-G., El-Wardany, T., Dumitrescu, M., and Elbestawi, M. A., Proc. 5th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, West Lafayette, IN, USA, May 20-21, 2002, pp. 1-19.