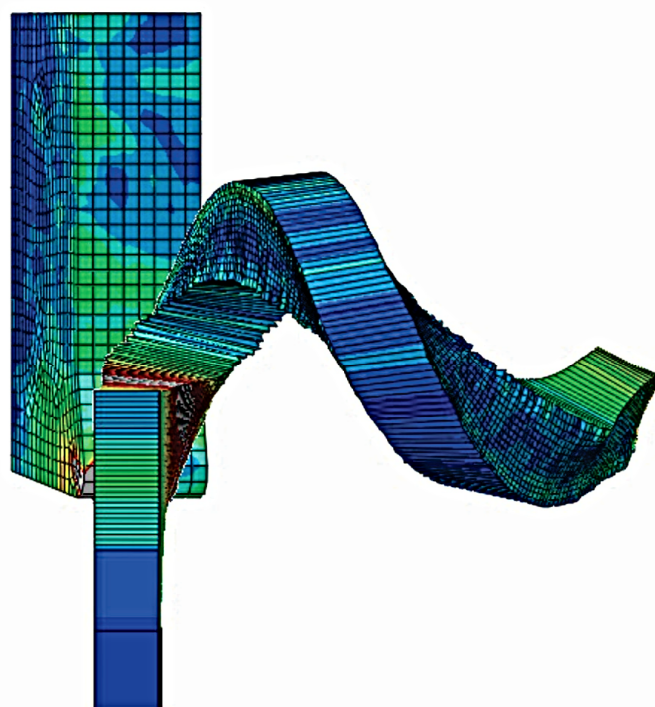


## **ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΛΟΞΗΣ ΚΟΠΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



**ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ  
ΚΑΣΤΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ:**

**ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**Διπλ. Μηχ. (MSc) ΧΑΡΑ ΕΥΣΤΑΘΙΟΥ**

Στους γονείς μου, Πέτρο και Χριστίνα, που ποτέ δεν έχασαν  
τη πίστη τους σε μένα, και στον αδελφό μου Ιωάννη-Γεώργιο, που  
μου έδινε κουράγιο όλα αυτά τα χρόνια.



Έχοντας πλέον τελειώσει την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Αριστομένη Αντωνιάδη για όλη τη βοήθεια αλλά και την υπομονή που μου έδειξε, καθώς και τη Χαρά Ευσταθίου, χωρίς την πολύτιμη βοήθεια της οποίας δεν θα μπορούσα να γράψω ούτε μισή παράγραφο από αυτή την εργασία.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1	Αντικείμενο της Εργασίας.....	5
1.2	Διάρθρωση Κεφαλαίων.....	5
2.	ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ.....	7
2.1	Κατεργασίες με Αφαίρεση Υλικού.....	7
2.1.1	Τεχνολογίες Κοπής.....	7
2.1.2	Οι Εργαλειομηχανές.....	7
2.1.3	Βασικές Αρχές της Κοπής.....	9
2.1.4	Παράμετροι της κοπής.....	9
2.1.5	Κύρια Χαρακτηριστικά Κοπτικών Εργαλείων Κατεργασιών Κοπής.....	10
2.2	Ορθογωνική Κοπή.....	10
2.2.1	Ορισμός Ορθογωνικής Κοπής.....	10
2.2.2	Προϋποθέσεις και Μηχανική Κοπής.....	11
2.2.3	Δυνάμεις στη Λοξή Κοπή.....	13
2.2.4	Διαφορές Ορθογωνικής και Λοξής Κοπής.....	14
2.3	Είδη Αποβλίπτου.....	15
2.3.1	Δημιουργία του Αποβλίπτου.....	15
2.3.2	Κατηγοριοποίηση Αποβλίπτων.....	16
2.3.3	Παράγοντες που επιδρούν στον σχηματισμό αποβλίπτου.....	17
2.3.4	Ψευδόκοψη.....	18
2.4	Τα Πεπερασμένα Στοιχεία.....	18
2.4.1	Βασικοί Ορισμοί Πεπερασμένων Στοιχείων.....	18
2.4.2	Το Πλέγμα Πεπερασμένων Στοιχείων.....	20
2.4.3	Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών.....	21
2.4.4	Γενική Μεθοδολογία Ανάλυσης με Πεπερασμένα Στοιχεία.....	22
2.4.5	Πεδία Εφαρμογής της Ανάλυσης με Πεπερασμένα Στοιχεία.....	23
2.5	Τα Πεπερασμένα Στοιχεία στις Κοπές.....	24
2.5.1	Μέθοδοι Μοντελοποίησης με Πεπερασμένα Στοιχεία στις Κοπές.....	24
2.5.2	Μοντελοποίηση μορφής Lagrange.....	24
2.5.3	Μοντελοποίηση μορφής Euler.....	25
2.5.4	Συζευγμένη Μοντελοποίηση τύπου ALE.....	25
3.	ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	27
3.1	Το Λογισμικό Προσομοίωσης.....	27
3.2	Στάδια Ανάπτυξης του Μοντέλου.....	28
3.2.1	Εισαγωγικοί Ορισμοί.....	28
3.2.2	Καθορισμός της Γεωμετρίας των Τμημάτων.....	28
3.2.3	Ορισμός των Υλικών της Προσομοίωσης.....	32

3.2.4	Συναρμολόγηση των Τμημάτων στον Χώρο .....	36
3.2.5	Προσδιορισμός του Χρονικού Βήματος και των Δεδομένων Εξόδου .....	38
3.2.6	Δημιουργία Πλέγματος Πεπερασμένων Στοιχείων .....	40
3.2.7	Ορισμός Συνοριακών Συνθηκών .....	45
3.2.9	Ορισμός Επαφής Κοπτικού Εργαλείου-Τεμαχίου .....	46
3.3	Υποβολή Αρχείου και Ολοκλήρωση της Ανάλυσης .....	48
3.4	Μετεπεξεργασία της Ανάλυσης .....	50
4.	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	52
4.1	Ανάλυση Ορθογωνικής Κοπής .....	52
4.2	Ανάλυση Λοξής Κοπής με $\lambda_s=15^\circ$ .....	54
4.3	Ανάλυση Λοξής Κοπής με $\lambda_s=30^\circ$ .....	56
4.4	Γενικά Συμπεράσματα .....	57
5.	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	58
5.1	Πύκνωση του Πλέγματος .....	58
5.2	Διαφορετική Εισαγωγή Υλικών .....	58
5.3	Χρησιμοποίηση Διαφορετικών Στοιχείων .....	59
5.4	Υιοθέτηση ALE .....	59
6.	ΣΥΝΟΨΗ .....	60
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	61
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	64

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Αντικείμενο της Εργασίας

Σε αυτή την εργασία μελετήθηκαν δυο περιπτώσεις κοπής, η ορθογωνική και η λοξή. Αυτές οι δυο περιπτώσεις αν και ιδανικές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξαχθούν πολλά χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά τη μηχανική των κοπών αλλά και πιο συγκεκριμένα για να μελετηθούν οι επιπτώσεις που έχουν οι κατεργασίες κοπής μετάλλων στα κοπτικά εργαλεία μελετώντας τις αναπτυσσόμενες τάσεις κατά τη κατεργασία.

Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων ένα μοντέλο προσομοίωσης. Σκοπός αυτού του μοντέλου είναι να προσομοιώσει με όσο το δυνατόν περισσότερη ακρίβεια τα φαινόμενα της ορθογωνικής και της λοξής κοπής για διαφορετικές περιπτώσεις κοπτικών εργαλείων και προώσεων.

Οι περιπτώσεις που προσομοιώθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Πρόωση	f	200	300	mm/min	
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0,04	0,08	mm	
Γωνία αποβλίπτου	$\gamma$	15	30	degrees	
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	0	15	30	degrees

Πίνακας 1.1: Περιπτώσεις που μελετήθηκαν

Δημιουργήθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης για κάθε συνδυασμό των παραπάνω περιπτώσεων. Σε κάθε περίπτωση, το προς κοπή τεμάχιο ήταν του ίδιου μεγέθους και το υλικό προς κοπή ήταν το κράμα αλουμινίου 2024. Ως υλικό κοπτικού λήφθηκε ένα καρβίδιο του βολφραμίου.

Σκοπός των προσομοιώσεων ήταν να μελετηθούν οι αναπτυσσόμενες τάσεις στο κοπτικό εργαλείο και η εξαγωγή κάποιων σχέσεων των μέγιστων τάσεων με τη πρόωση, την ακτίνα καμπυλότητας και τη γωνία αποβλίπτου του κοπτικού εργαλείου καθώς και με τη γωνία κλίσης της κόψης.

### 1.2 Διάρθρωση Κεφαλαίων

Στο **Κεφάλαιο 1** έγινε μια σύντομη εισαγωγή στη δομή και τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 2** έγινε μια αναδρομή στην αναγκαία στάθμη των γνώσεων σχετικών και με τις κοπές αλλά και με τα πεπερασμένα στοιχεία έτσι ώστε να μπορέσει να γίνει πιο εύκολα κατανοητή η θεωρία αλλά και το κατασκευασμένο μοντέλο.

Στο **Κεφάλαιο 3** έγινε η αναλυτική περιγραφή του μοντέλου πεπερασμένου στοιχείων που κατασκευάστηκε αλλά και οι γενικές δυνατότητες που έχει το χρησιμοποιούμενο λογισμικό.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάστηκαν τα εξαγόμενα συμπεράσματα και σχέσεις για τις μέγιστες τάσεις όπως αυτές προέκυψαν από τις προσομοιώσεις.

Στο **Κεφάλαιο 5** έγιναν κάποιες προτάσεις βελτίωσης του ήδη κατασκευασμένου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων έτσι ώστε να γίνει πιο γενικό και να μπορέσει να συμπεριλάβει και άλλες περιπτώσεις κοπής με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Στο **Κεφάλαιο 6** έγινε μια σύνοψη των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τις προσομοιώσεις.

Στη συνέχεια αναφέρεται η **Βιβλιογραφία** που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να συγγραφεί η παρούσα εργασία.

Τέλος, συντάχθηκε το **Παράρτημα** το οποίο περιέχει πληροφορίες για τα αποτελέσματα κάθε προσομοίωσης.

## 2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ

### 2.1 Κατεργασίες με Αφαίρεση Υλικού

#### 2.1.1 Τεχνολογίες Κοπής

Οι κατεργασίες με αφαίρεση υλικού (ή κοπές) είναι ένα σύνολο τεχνολογιών που αποσκοπούν στην αφαίρεση ανεπιθύμητου υλικού από ένα τεμάχιο. Αυτές οι κατεργασίες συνήθως αφορούν ένα τεμάχιο το οποίο έχει προέλθει από πρωτογενείς διαδικασίες παραγωγής όπως η χύτευση, η έλαση, η ολκή και η σφυρηλάτηση και ήδη πληροί τις σχεδιαστικές του προδιαγραφές. Γενικά, σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις που απαιτείται μεγάλη διαστατική ακρίβεια, αυτή έχει προκύψει από κάποια κατεργασία με αφαίρεση υλικού. Στις κατεργασίες κοπής που αφορούν μεταλλικά προϊόντα, αφαιρείται προσδευτικά υλικό από το ακατέργαστο τεμάχιο με τη βοήθεια κοπτικού εργαλείου υπό τη μορφή αποβλίπτου λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού. Και το ακατέργαστο τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο έχουν προκαθορισμένο σχήμα και υλικό κατασκευής. Αυτές οι κατεργασίες, υλοποιούνται με τη βοήθεια ειδικών μηχανών οι οποίες πρέπει να εκτελούν μεταξύ άλλων τις ακόλουθες λειτουργίες:

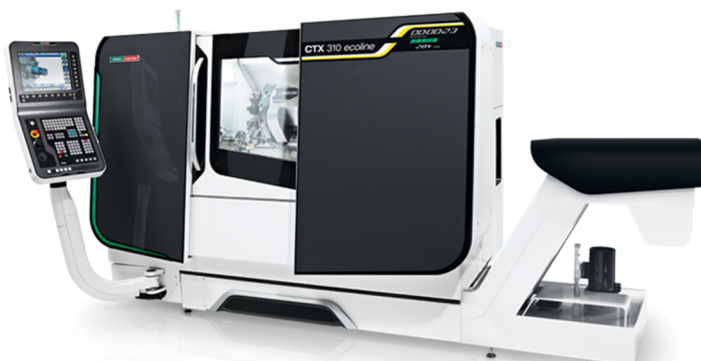
- Παροχή αναγκαίας ισχύος για την πραγματοποίηση της κατεργασίας.
- Ασφαλής συγκράτηση του τεμαχίου και του εργαλείου.
- Εκτέλεση των αναγκαίων κινήσεων τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου.

Οι μηχανές αυτές ονομάζονται εργαλειομηχανές και διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το είδος της κατεργασίας που καλούνται να εκτελέσουν, τη πρωτεύουσα κίνηση τους, την ακρίβεια που παρέχουν καθώς και άλλες παραμέτρους που έχουν να κάνουν με τη φύση της κατεργασίας.

#### 2.1.2 Οι Εργαλειομηχανές

Μια από τις κυριότερες εργαλειομηχανές που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιομηχανία είναι ο τόννος. Ο τόννος είναι η εργαλειομηχανή που εξασφαλίζει με ακρίβεια τις απαραίτητες κινήσεις του κοπτικού και του τεμαχίου κατά τη τόννευση. Τα κύρια δομικά μέρη του τόννου είναι το κιβώτιο ταχυτήτων, το εργαλειοφορείο, το κιβώτιο προώσεων, η άτρακτος προώσεων, η κουκουβάγια και η άτρακτος εμπλοκής. Ο τόννος αποτελεί μια από τις περισσότερο παραγωγικές εργαλειομηχανές και το 40% των κατεργασιών κοπής μετάλλων γίνονται μέσω της τόννευσης. Το μέγεθος του τόννου εξαρτάται κυρίως από το μέγιστο μέγεθος τεμαχίων που μπορεί να κατεργαστεί, από το μήκος του κρεβατιού, από τον αριθμό στροφών, το πλήθος των ταχυτήτων και τη συνολική ισχύ του ηλεκτροκινητήρα. Οι πιο παλιοί τόννοι, συνήθως απαιτούν καθοδήγηση από έναν χειριστή όπως άλλωστε και οι περισσότερες εργαλειομηχανές, προσφέροντας πολύ περιορισμένο βαθμό αυτοματοποίησης. Στον τόννο, η κύρια κίνηση είναι η περιστροφική κίνηση του τεμαχίου προς κατεργασία και δευτερεύουσα η μεταφορική κίνηση του κοπτικού εργαλείου. Τη σύγχρονη εποχή, κατασκευάζονται τόννοι ψηφιακής καθοδήγησης όπου οι κινήσεις απαιτούν ελάχιστη συμμετοχή από τον χρήστη και αναλαμβάνονται από μια ηλεκτρονική μονάδα καθοδήγησης χειριζόμενη από έναν προγραμματιστή.

Είτε ο τόννος είναι συμβατικός χειροκίνητος είτε ψηφιακά αυτοματοποιημένος, οι αρχές κοπής είναι ίδιες. Ως αποτέλεσμα, τα βασικά μεγέθη της κοπής ορίζονται από το χρήστη. Η τάση αυτοματοποίησης των τελευταίων ετών δεν μπορεί να εκφυλίσει την αναγκαιότητα γνώσης των υλικών, της φθοράς και όλων των παραμέτρων των τεχνολογιών κοπής.



Σχήμα 2.1: Ψηφιακά καθοδηγούμενος τórνος CTX 210 eco

Κατά την τórνευση, το κοπτικό εργαλείο πρέπει να συγκρατείται έτσι ώστε το ελεύθερο μήκος του να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Σε αντίθετη περίπτωση, δύναται να υπάρξει αναπήδηση του εργαλείου κατά τη κατεργασία και αυτό να οδηγήσει σε κακή ποιότητα επιφάνειας. Τα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται κατά την τórνευση έχουν δυο



μήκη, το στέλεχος και το κοπτικό άκρο. Το στέλεχος συγκρατεί το εργαλείο στον εργαλειοδέτη και το κοπτικό άκρο είναι αυτό το οποίο περιλαμβάνει τις κοπτικές ακμές που συμμετέχουν στην κατεργασία. Το στέλεχος κατασκευάζεται από πιο μαλακό υλικό έτσι ώστε να απορροφά τα φορτία και τις καταπονήσεις κατά τη διάρκεια της κατεργασίας χωρίς να επέρχεται θραύση.

Σχήμα 2.2: Κοπτικό τórνου

Μια εξίσου σημαντική εργαλειομηχανή η οποία χρησιμοποιείται στην κατεργασία μετάλλων είναι η φραιζα. Κατά το φραιζάρισμα, χρησιμοποιείται ένα κοπτικό εργαλείο που λέγεται κονδύλι, προκειμένου να αφαιρεθεί υλικό από ένα μέταλλο. Η κίνηση και εδώ όπως και στον τórνο δίδεται μέσω ηλεκτρικού κινητήρα αλλά η αυξομείωση της ταχύτητας γίνεται μέσω κλιμακωτών τροχαλιών και όχι κιβωτίου όπως στον τórνο. Η κύρια κίνηση είναι η περιστροφική του κοπτικού. Με διάφορους συνδυασμούς της πρωτεύουσας κίνησης και της μεταφορικής του τεμαχίου είναι δυνατό να επιτευχθεί μεγάλη ποικιλία εργασιών. Τα βασικά δομικά μέρη των συμβατικών φραιζών είναι το σώμα στο οποίο στηρίζονται τα υπόλοιπα μέρη της φραιζας, η κύρια άτρακτος που προσφέρει την περιστροφική κίνηση και το τραπέζι στο οποίο συγκρατούνται τα κατεργαζόμενα τεμάχια. Οι συμβατικές φρέζες χωρίζονται στις οριζόντιες και στις κατακόρυφες, ανάλογα με τη θέση του εργαλειοφόρου άξονα σε σχέση με το τραπέζι. Όπως και στον τórνο έτσι και στη φραιζα, υπάρχει μεγάλη τάση αυτοματοποίησης με αποτέλεσμα να έχουν κατασκευαστεί φρέζες ψηφιακής καθοδήγησης χωρίς αυτό να εκμηδενίζει σε καμία περίπτωση τη σημασία της γνώσης των κύριων παραμέτρων τεχνολογιών κοπής.

Σε αντίθεση με τη διάτρηση, κατά το φραιζάρισμα το κοπτικό εργαλείο συνήθως μετακινείται κάθετα στον άξονα του, έτσι ώστε η αφαίρεση υλικού συμβαίνει περιμετρικά του κοπτικού εργαλείου. Τα περισσότερα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στο φραιζάρισμα, έχουν πολλές κοπτικές ακμές σε όλη την επιφάνειά τους.

Στο μετωπικό φραιζάρισμα, το κοπτικό τοποθετείται κάθετα προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια και συμμετέχουν στην κοπή οι ακμές του κοπτικού που βρίσκονται στην περιφέρεια αλλά και στο εμπρός πρόσωπο του. Στο περιφερικό φραιζάρισμα, στην κοπή συμμετέχουν οι κοπτικές ακμές που βρίσκονται στην περιφέρεια του κοπτικού και το κοπτικό έχει τοποθετηθεί παράλληλα προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια. Σε κάθε περίπτωση, είναι ζωτικής σημασίας για την ομαλή πορεία της κοπής, να είναι γνωστά τα φορτία που δέχεται το κοπτικό εργαλείο, έτσι ώστε να επιλεγεί το βέλτιστο κοπτικό για την εκάστοτε κατεργασία, λαμβάνοντας υπόψη το βέλτιστο κέρδος αλλά και τον κύκλο ζωής του κοπτικού.

### 2.1.3 Βασικές Αρχές της Κοπής

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η κοπή θα πρέπει να λάβει χώρα μια σχετική κίνηση μεταξύ τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου. Αυτή η κίνηση επιτυγχάνεται με δυο βασικές κινήσεις οι οποίες είναι η πρωτεύουσα κίνηση και η κίνηση προώσεως.

Η πρωτεύουσα κίνηση είναι αυτή που δίνεται είτε στο εργαλείο είτε στο τεμάχιο μέσω της ατράκτου της εργαλειομηχανής και χρησιμοποιεί το μεγαλύτερο τμήμα της ισχύος. Η κίνηση προώσεως είναι μεταφορική και δίνεται και αυτή είτε στο τεμάχιο είτε στο εργαλείο. Ο συνδυασμός αυτών των δυο κινήσεων δίνει τη συνισταμένη κίνηση κοπής.

Ορίζουμε ως **ταχύτητα κοπής** (m/min) τη στιγμιαία ταχύτητα της πρωτεύουσας κίνησης σε κάποιο σημείο της κόψης του εργαλείου και δίδεται από τον παρακάτω τύπο:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad \text{όπου:}$$

- d η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου σε mm
- n η ταχύτητα περιστροφής σε rpm

Ορίζουμε ως πρόωση (mm/min) τη στιγμιαία ταχύτητα κατά την κατεύθυνση προώσεως ορισμένου σημείου στην κόψη του εργαλείου και δίδεται από τον παρακάτω τύπο:

$$v_f = f_n \cdot n \quad \text{όπου } f_n \text{ η πρόωση ανά περιστροφή σε mm/rev}$$

Μέσω αυτής της κίνησης, γίνεται η αφαίρεση υλικού στο τεμάχιο σε προκαθορισμένο βάθος, το **βάθος κοπής**. Το υλικό του τεμαχίου που απομακρύνεται, ονομάζεται **απόβλιπτο** και ανάλογα τις συνθήκες κατεργασίας και το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου, μπορεί να έχει διαφορετικές μορφές. Στις κατεργασίες κοπής, η απαιτούμενη ενέργεια, δαπανάται στον σχηματισμό του αποβλίπτου. Ως αποτέλεσμα, η μελέτη σχηματισμού του αποβλίπτου και των παραμέτρων του αποκτά ιδιαίτερα μεγάλη σημασία. Όμως, η μεγάλη ποικιλία των κατεργασιών κοπής έχει ως αποτέλεσμα τη χρησιμοποίηση πολλών κοπτικών εργαλείων με διαφορετικές όψεις και γεωμετρίες που μπορεί να ακολουθούν διαφορετικές κινηματικές. Έτσι, για τη μελέτη σχηματισμού του αποβλίπτου, εξετάζεται μια απλουστευμένη περίπτωση κοπής που ονομάζεται ορθογωνική κοπή

### 2.1.4 Παράμετροι της κοπής

Οι μεταβλητές που άμεσα επηρεάζουν μια κατεργασία κοπής παρουσιάζονται παρακάτω:

- Το υλικό τόσο του κοπτικού εργαλείου όσο και του τεμαχίου προς κατεργασία.
- Το σχήμα και η ποιότητα της επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου.
- Η ταχύτητα κοπής, το βάθος κοπής και η πρόωση.
- Το ψυκτικό μέσο της κοπής.
- Τα γενικότερα χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής.



Οι μεταβλητές οι οποίες επηρεάζονται από πιθανές αλλαγές των προαναφερθέντων μεταβλητών είναι:

- Ο τύπος του παραγόμενου αποβλήτου.
- Οι δυνάμεις και η καταναλισκόμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.
- Η φθορά και η πιθανή καταστροφή του κοπτικού εργαλείου.
- Η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας.

#### **2.1.5 Κύρια Χαρακτηριστικά Κοπτικών Εργαλείων Κατεργασιών Κοπής**

Τα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στις κατεργασίες κοπής θα πρέπει να μπορούν να λειτουργούν σε υποβολή ακραίων τασικών και θερμοκρασιακών συνθηκών. Ως αποτέλεσμα ορισμένες από τις ιδιότητες των υλικών κατασκευής τους συμπεριλαμβάνουν:

- Υψηλή σκληρότητα ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες ώστε να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα κατά τη κοπή.
- Ανθεκτικότητα έτσι ώστε οι απότομα μεταβαλλόμενες δυνάμεις που δέχονται να μην αποτελέσουν απότομη θραύση του κοπτικού εργαλείου.
- Αντοχή σε φθορά ούτως ώστε ο κύκλος ζωής τους να είναι αρκετά μεγάλος και να μην χρειάζεται συχνή αντικατάσταση.
- Παραδεκτό κόστος κτήσεως καθιστώντας την κατεργασία αποδοτική.

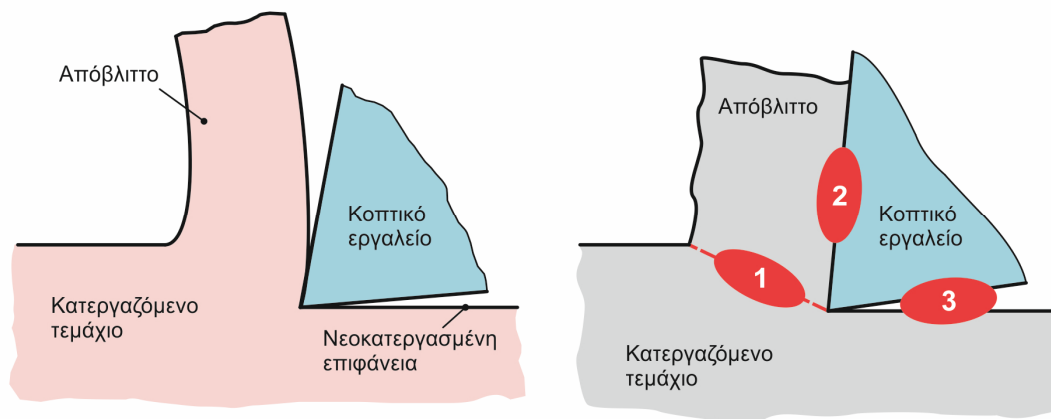
Η σημαντικότητα κάθε ιδιότητας έχει να κάνει με την εκάστοτε κατεργασία, την απαιτούμενη ακρίβεια και ποσότητα του τελικού τεμαχίου καθώς και με το επίπεδο αυτοματοποίησης και την ποιότητα της εργαλειομηχανής. Τα κυριότερα υλικά κατασκευής κοπτικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται για κατεργασίες κοπής μετάλλων είναι:

- ανθρακούχοι χάλυβες
- ταχυχάλυβες
- χυτοκράματα (στελλίτες)
- σκληρομέταλλα
- κεραμικά υλικά
- υπέρσκληρα υλικά (διαμάντι)

## **2.2 Ορθογωνική Κοπή**

### **2.2.1 Ορισμός Ορθογωνικής Κοπής**

Στην ορθογωνική κοπή, το εργαλείο έχει μορφή σφήνας με την κύρια ακμή κοπής να είναι κάθετη στην κύρια διεύθυνση της κοπής. Στο Σχήμα 2.3 συνοψίζεται το σύστημα τεμαχίου, κοπτικού και αποβλήτου.



Σχήμα 2.3: Ορθογωνική κοπή

Στην ορθογωνική κοπή γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Η περιοχή διάτμησης του υλικού μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα επίπεδο, το οποίο ονομάζεται επίπεδο διάτμησης.
- Το απόβλιττο συμπεριφέρεται σαν ένα στιβαρό σώμα και βρίσκεται σε ισορροπία εξαιτίας της δράσης των δυνάμεων που μεταφέρονται από το εργαλείο προς το απόβλιττο και αυτών που μεταφέρονται στο απόβλιττο μέσω του επιπέδου διάτμησης.
- Η γωνία της διάτμησης θα πρέπει να πάρει μια τιμή έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το έργο κοπής.

Οι πλευρές που διαθέτει το κοπτικό εργαλείο, παρουσιάζουν τις ακόλουθες χαρακτηριστικές γωνίες οι οποίες ονομάζονται γωνίες κοπής:

- γωνία αποβλίττου  $\gamma$ : σχηματίζεται μεταξύ της επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου που εφάπτεται στο απόβλιττο και την κάθετη ευθεία στην κατεύθυνση της κοπής.
- γωνία ελευθερίας  $\alpha$ : σχηματίζεται μεταξύ της επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου που βρίσκεται προς τη κατεργασμένη επιφάνεια και την παράλληλη ευθεία στην κατεύθυνση της κοπής.
- γωνία σφήνας  $\beta$ : σχηματίζεται μεταξύ της επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου που εφάπτεται στο απόβλιττο και της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού.

Για τις τρεις χαρακτηριστικές γωνίες κοπής ισχύει η παρακάτω ιδιότητα:

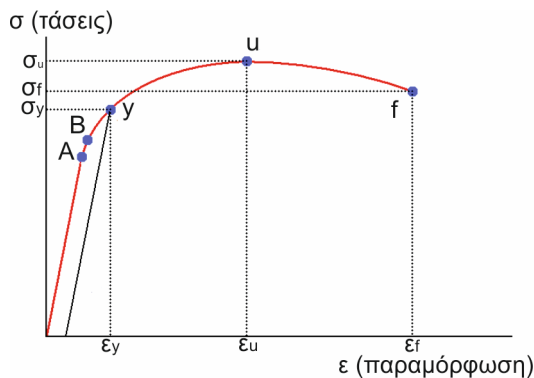
$$\hat{\alpha} + \hat{\beta} + \hat{\gamma} = 90^\circ$$

Από αυτή τη σχέση προκύπτει το ασφαλές συμπέρασμα ότι οι γωνίες αυτές είναι αλληλοεξαρτώμενες και τυχόν αλλαγές στη μια θα επηρεάσουν σίγουρα και τις άλλες. Η σημαντικότερη των γωνιών κοπής είναι η γωνία αποβλίττου. Όσο μεγαλώνει η τιμή αυτής της γωνίας τόσο μικραίνει η δύναμη κοπής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όμως την γρηγορότερη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Η γωνία ελευθερίας είναι ίδια σχεδόν σε όλα τα κοπτικά εργαλεία και κυμαίνεται μεταξύ **6 και 8 μοιρών**.

## 2.2.2 Προϋποθέσεις και Μηχανική Κοπής

Η κοπή πραγματοποιείται με την πλαστική παραμόρφωση του μετάλλου. Προκειμένου να επέλθει αυτή η πλαστική παραμόρφωση θα πρέπει να ασκηθεί μια δύναμη. Επιπλέον, θα πρέπει να υπερνικηθούν οι δυνάμεις τριβής μεταξύ του αποβλίττου και του κοπτικού

εργαλείου και μεταξύ του εργαλείου και της κατεργασμένης επιφάνειας. Παρακάτω φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων ενός μετάλλου:



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης

Τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης διαφόρων υλικών προκύπτουν από πειράματα εφελκυσμού και διαφορετικά πειράματα για το ίδιο υλικό μπορεί να δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα τη θερμοκρασία και την ταχύτητα φόρτισης. Παρόλα αυτά μπορούν να διακριθούν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ των διαγραμμάτων ίδιων υλικών. Ανάλογα αυτών των κοινών χαρακτηριστικών, ταξινομούμε τα υλικά σε δυο μεγάλες κατηγορίες, τα **ψαθυρά** και τα **όλκιμα** υλικά.

Στο παραπάνω διάγραμμα, αρχικά παρατηρείται μια σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης. Σε αυτή τη περιοχή, το υλικό συμπεριφέρεται πλήρως ελαστικά και υπακούει στον νόμο του Hooke. Στη συνέχεια μετά από μια κρίσιμη τιμή  $\sigma_y$  της τάσης το υλικό υφίσταται μια πολύ μεγάλη παραμόρφωση σε σχετική μικρή αύξηση του φορτίου και το δοκίμιο πλέον συμπεριφέρεται πλαστικά. Αυτή η παραμόρφωση προκαλείται κυρίως από την ολίσθηση του υλικού σε πλάγιες επιφάνειες και οφείλεται κυρίως στις διατμητικές τάσεις. Αφού το φορτίο έχει αποκτήσει κάποια μέγιστη τιμή  $\sigma_u$  η διάμετρος ενός τμήματος του δοκιμίου αρχίζει να ελαττώνεται εξαιτίας της τοπικής αστάθειας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **λαιμός**. Αφού επέλθει η δημιουργία λαιμού, αρκούν μικρότερα φορτία προκειμένου να διατηρηθεί η περεταίρω παραμόρφωση του υλικού ώσπου να συμβεί η θραύση στην παραμόρφωση  $\epsilon_f$ . Η τάση  $\sigma_f$  η οποία αντιστοιχεί σε θραύση ονομάζεται τάση θραύσης ή αντοχή σε θραύση.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η κοπή, θα πρέπει το κοπτικό εργαλείο να κινείται με ταχύτητα **V** ενάντια στο πακτωμένο τεμάχιο και ως αποτέλεσμα να συμβεί μια συνεχόμενη πλαστική διάτμηση που λαμβάνει χώρα μπροστά από την κόψη του εργαλείου. Το παραγόμενο απόβλιπτο κινείται επάνω στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και απομακρύνεται ενώ η τελική παραγόμενη επιφάνεια του τεμαχίου προκύπτει από συνεχόμενη θραύση του υλικού του. Η πλαστική διάτμηση γίνεται σε μια στενή περιοχή που ονομάζεται **ζώνη διάτμησης**, έχει ως αποτέλεσμα το υλικό του τεμαχίου που περνά από τη ζώνη αυτή να εφελκύεται.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η κοπή, θα πρέπει οι εργαλειομηχανές να ασκήσουν μια δύναμη η οποία θα προκαλέσει τις αντίστοιχες τάσεις οι οποίες θα υπερνικήσουν την αντίσταση του κατεργαζόμενου υλικού σε πλαστική παραμόρφωση καθώς και την αντίσταση σχηματισμού της νεοκατεργασμένης επιφάνειας. Η γνώση των δυνάμεων και κατά συνέπεια των τάσεων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της κοπής στο κοπτικό εργαλείο παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον τόσο για τους κατασκευαστές εργαλειομηχανών όσο και για τους τελικούς χρήστες των εργαλειομηχανών.

## Mechanics of the Metal Cutting Process. II. Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting\*

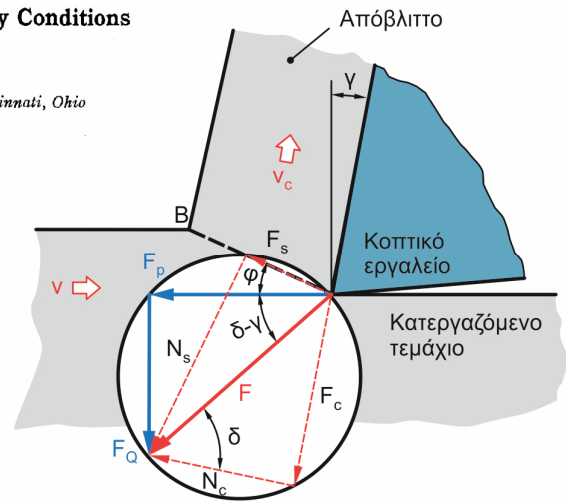
M. EUGENE MERCHANT

Research Department, The Cincinnati Milling Machine Company, Cincinnati, Ohio

(Received November 15, 1944)

$F_p$ : η συνιστώσα στην κατεύθυνση της κίνησης που είναι η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής

$F_q$ : κάθετη συνιστώσα στην κίνηση



Σχήμα 2.5: Διάγραμμα ελευθέρου σώματος κοπτικού εργαλείου σύμφωνα με τον κύκλο Merchant

Παράγοντες που επηρεάζουν τις δυνάμεις κοπής και κατά συνέπεια της τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη κοπή είναι οι ακόλουθοι:

- Η μέθοδος κατεργασίας και το είδος του αποβλίττου.
- Η πρόωση, το βάθος κοπής, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου, η ταχύτητα κοπής, η ψύξη κτλ.
- Το κοπτικό εργαλείο, η γεωμετρία των κόψεων και η φθορά.

Οι δυνάμεις που φαίνονται στο διάγραμμα ελευθέρου σώματος αναλύονται ως εξής:

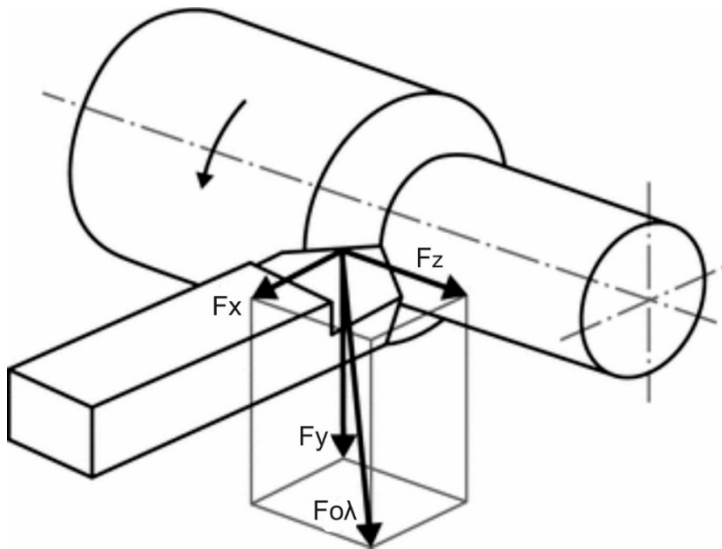
- F:** Συνισταμένη των δυνάμεων που μεταφέρονται από το εργαλείο προς το απόβλιττο, η οποία είναι ίση με την συνισταμένη των δυνάμεων που μεταφέρονται στο απόβλιττο μέσω του επιπέδου διάτμησης.
- $F_p$ :** Συνιστώσα κοπής.
- $F_q$ :** Συνιστώσα κάθετη στην κίνηση.
- $F_c$ :** Συνιστώσα κάθετη στην ταχύτητα.
- $N_s$ :** Συνιστώσα κάθετη στο στο επίπεδο διάτμησης.
- $N_c$ :** Συνιστώσα παράλληλη στο επίπεδο διάτμησης.
- $F_s$ :** Συνιστώσα διάτμησης.
- $F_c$ :** Δύναμη τριβής..
- $\delta$ :** Γωνία τριβής.
- $\phi$ :** Γωνία διάτμησης.
- $\delta-\gamma$ :** Γωνία επενέργειας της τριβής. Η γωνία αυτή εξαρτάται από τη ταχύτητα κοπής της οποίας η μεταβολή μεταβάλλει και τον μέσο συντελεστή τριβής αποβλίττου και εργαλείου με αντίστοιχη μεταβολή και της γωνίας τριβής  $\delta$ .

Η γωνία αποβλίττου επίσης επιδρά σημαντικά στον μέσο συντελεστή τριβής και μάλιστα με αύξηση της γωνίας αποβλίττου επέρχεται αύξηση του μέσου συντελεστή τριβής ή της μέσης φαινόμενης γωνίας τριβής (συμπληρωματική της  $\beta$ ).

### 2.2.3 Δυνάμεις στη Λοξή Κοπή

Το πρότυπο της ορθογωνικής κοπής που παρουσιάστηκε, είναι μια απλοποιημένη εκδοχή της πραγματικής κοπής, η οποία είναι η λοξή κοπή. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζονται οι

δυνάμεις στη λοξή κοπή. Σε αυτή τη περίπτωση, η δύναμη κοπής αναλύεται σε τρεις συνιστώσες, κάθε μια για κάθε άξονα του χώρου, οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους.



Σχήμα 2.6: Σύστημα δυνάμεων στη λοξή κοπή

Οι δυνάμεις έχουν ως εξής:

- $F_x$ : Δύναμη απώθησης
- $F_z$ : Δύναμη στην κατεύθυνση της πρόωσης
- $F_y$ : Κύρια δύναμη κοπής
- $F_{ολ}$ : Συνισταμένη δύναμη κοπής

Για τον υπολογισμό της κύριας δύναμης κοπής, διατυπώθηκε από τον Otto Kienzle μια αναλυτική σχέση η οποία λαμβάνει υπόψη της τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις δυνάμεις κοπής:

$$F_z = b * K_{s1,1} * h^{1-z} \text{ όπου}$$

- $F_z$ : Συνισταμένη δύναμη κοπής
- $b$ : Πλάτος αποβλήττου
- $h$ : Πάχος αποβλήττου
- $K_{s1,1}$ : Ειδική αντίσταση κοπής
- $z$ : Σταθερά κατεργαζόμενου υλικού

Οι τιμές της ειδικής αντίστασης κοπής προσδιορίζονται πειραματικά. Οι τιμές της εξαρτώνται από το κατεργαζόμενο υλικό, το υλικό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου και τις συνθήκες κοπής. Επίσης εξαρτώνται από τη μεταβολή του πάχους του αποβλήττου. Για μεγάλα πάχη η ειδική αντίσταση κοπής μειώνεται.

#### 2.2.4 Διαφορές Ορθογωνικής και Λοξής Κοπής

Στη πράξη, κατά κύριο λόγο συναντάται η λοξή κοπή τόσο για κατεργασίες με εργαλείο με μία κύρια κόψη (π.χ. τόννευση, πλάνισμα), όσο και για κατεργασίες με εργαλείο πολλών κυρίων κόψεων (π.χ. φραιζάρισμα, αυλάκωση).

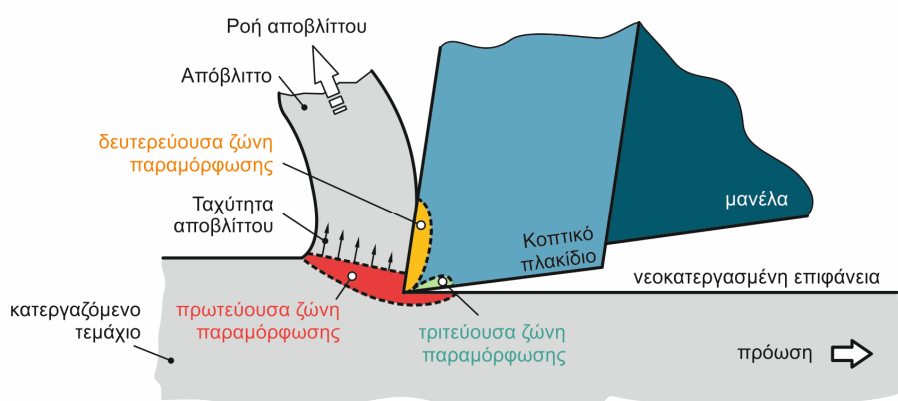
Παρακάτω συνοψίζονται οι κύριες διαφορές των δυο περιπτώσεων της ορθογωνικής και της λοξής κοπής.

- Όσον αφορά την κοπτική ακμή στην ορθογωνική κοπή, είναι πάντα κάθετη στη κατεύθυνση της κοπής ενώ στη περίπτωση της λοξής κοπής, η κοπτική ακμή σχηματίζει σταθερή γωνία μικρότερη των  $90^\circ$  με τη κατεύθυνση της κοπής.
- Η κατεύθυνση του αποβλίττου είναι πάντα κάθετη στην κοπτική ακμή για την περίπτωση της ορθογωνικής κοπής ενώ στη περίπτωση της λοξής κοπής το απόβλιττο κυλάει υπό γωνία επάνω στην κοπτική ακμή.
- Στην ορθογωνική κοπή, το απόβλιττο συνήθως έχει μια σπειροειδή μορφή ενώ στην λοξή κοπή, το απόβλιττο κυλάει προς μια πλευρά από τα πλάγια υπό τη μορφή μιας μεγάλης έλικας.
- Για ίδια πρόωση και βάθος κοπής, στην περίπτωση της ορθογωνικής κοπής η δύναμη διάτμησης επιδρά σε μικρότερα εμβαδά οπότε η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου μειώνεται. Σε αντίθετη περίπτωση, στη λοξή κοπή η δύναμη διάτμησης επιδρά σε μεγαλύτερες περιοχές οπότε η διάρκεια ζωής του κοπτικού είναι αυξημένη σε σχέση με την ορθογωνική κοπή.
- Η ορθογωνική κοπή παράγει αιχμηρές άκρες στο κατεργαζόμενο υλικό ενώ η λοξή παράγει λοξοτμήσεις στο τέλος της κοπής.
- Μικρότερο τμήμα της κοπτικής ακμής έρχεται σε επαφή με το κατεργαζόμενο τεμάχιο στην περίπτωση της ορθογωνικής κοπής ενώ για το ίδιο βάθος κοπής μεγαλύτερη επιφάνεια έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο κατά τη λοξή κοπή.
- Στην ορθογωνική κοπή η δύναμη κοπής έχει δυο συνιστώσες ενώ στη λοξή κοπή η δύναμη κοπής έχει τρεις συνιστώσες.

## 2.3 Είδη Αποβλίττου

### 2.3.1 Δημιουργία του Αποβλίττου

Κατά την ορθογωνική κοπή, καθώς το κατεργαζόμενο τεμάχιο πλησιάζει το επίπεδο διάτμησης δεν ξεκινά η παραμόρφωση του παρά μόνο όταν το τεμάχιο φτάσει σε αυτό το επίπεδο. Στο επίπεδο διάτμησης, το τεμάχιο παραμορφώνεται με απλή διάτμηση καθώς κινείται κατά μήκος της λεπτής ζώνης διάτμησης με μικρό ποσό παραμόρφωσης στη δευτερεύουσα ζώνη διάτμησης που θεωρείται αμελητέα όπως και η παραμόρφωση στη τριτεύουσα ζώνη διάτμησης η οποία είναι ισοδύναμη με τη τριβή ολίσθησης με σταθερό συντελεστή τριβής. Οι ζώνες διάτμησης κατά την ορθογωνική κοπή φαίνονται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Ζώνες παραμόρφωσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η **πρωτεύουσα ζώνη διάτμησης**, δημιουργείται λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης του μετάλλου. Στα όλκιμα υλικά, η πρωτεύουσα ζώνη διάτμησης έχει πολύ μικρό πλάτος και η πλαστική παραμόρφωση συμβαίνει σχεδόν κατά μήκος ενός επιπέδου το οποίο καλείται επίπεδο διάτμησης. Η παραμόρφωση που δημιουργείται στην περιοχή επαφής κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου ονομάζεται **δευτερεύουσα ζώνη**

**διάτμησης.** Η **τριτεύουσα ζώνη διάτμησης** είναι αυτή που δημιουργείται στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου.

Η παραμόρφωση του αποβλίττου, συμβαίνει κυρίως στη περιορισμένου πλάτους πρωτεύουσα ζώνη διάτμησης. Επιπλέον, δεδομένου του ότι το απόβλιττο συνεχίζει να παράγεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της κοπής, συμπεραίνουμε ότι το πίσω μέρος του αποβλίττου τείνει να τραχυνθεί λόγω πλαστικής παραμόρφωσης. Αυτή η παραμόρφωση έχει ως συνέπεια το βάθος κοπής, δηλαδή το θεωρητικό πάχος του αποβλίττου, να μεγαλώνει μιας και το απόβλιττο όταν περνά από τη πρωτεύουσα ζώνη διάτμησης εφελκύεται. Το μέτρο που χαρακτηρίζει τη πλαστική παραμόρφωση του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου ονομάζεται **λόγος συμπίεσης** και ισούται με:

$$\lambda = \frac{h_2}{h_1} \text{ όπου:}$$

- $h_2$  το πραγματικό πάχος αποβλίττου
- $h_1$  το θεωρητικό πάχος αποβλίττου (βάθος κοπής).

Ένας ακόμη λόγος που το βάθος κοπής διαφέρει από το πάχος του αποβλίττου είναι ότι μετά τη πρωτεύουσα ζώνη διάτμησης, το παραμορφωμένο απόβλιττο κινείται επάνω στην επιφάνεια του κοπτικού, στη δευτερεύουσα ζώνη διάτμησης. Εκεί δημιουργούνται τριβές οι οποίες δίνουν μεγαλύτερο πάχος στο πραγματικό πάχος του αποβλίττου λόγω θερμικής διαστολής.

### 2.3.2 Κατηγοριοποίηση Αποβλίττων

Ανάλογα με την αντοχή σε διάτμηση και το βαθμό παραμόρφωσης του κατεργαζόμενου υλικού, το παραγόμενο απόβλιττο μπορεί να είναι συνεχές ή ασυνεχές.

Στο **συνεχές** απόβλιττο συμβαίνει συνεχή πλαστική παραμόρφωση του κατεργαζόμενου υλικού στη πρωτεύουσα ζώνη διάτμησης. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια τη διαρροή του υλικού και τη ροή του ως ταινία πάνω στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου. Τέτοιο είδος αποβλίττου συναντάται κυρίως σε όλκιμα υλικά σε υψηλές ταχύτητες κοπής. Υψηλές ταχύτητες κοπής συνδυάζονται με χρήση κοπτικών εργαλείων από σκληρομέταλλα. Η παρουσία συνεχούς αποβλίττου είναι ιδιαίτερα επιθυμητή και δείχνει ευνοϊκές συνθήκες κοπής αλλά δυσχεραίνει με το μεγάλο μήκος του την όλη κατεργασία.

Ευνοϊκές συνθήκες κοπής όσον αφορά τη δημιουργία συνεχούς αποβλίττου επιτυγχάνονται με τις εξής συνθήκες:

- Μεγάλη ταχύτητα κοπής.
- Μικρή πρόωση.
- Μεγάλη γωνία αποβλίττου.



















Στο **ασυνεχές** απόβλιττο συμβαίνει περιοδική θραύση του μετάλλου στην πρωτεύουσα ζώνη διάτμησης λόγω υπέρβασης του ορίου θραύσεως. Αυτό το είδος του αποβλίττου παρατηρείται στην κοπή ψαθυρών υλικών ή σε περιπτώσεις με χαμηλές ταχύτητες κοπής, μεγάλες προώσεις και κοπτικά εργαλεία με μικρές γωνίες αποβλίττου. Το ασυνεχές απόβλιττο έχει τις εξής συνέπειες:

- Προκαλεί χειροτέρευση της τραχύτητας της κατεργαζόμενης επιφάνειας, με αποτέλεσμα να εμφανιστούν μικρορωγμές με δυσμενή αποτελέσματα στην αντοχή σε κόπωση.
- Είναι μια πηγή εξαναγκασμένων ταλαντώσεων στο σύστημα κατεργασίας με αποτέλεσμα τη χειροτέρευση της ποιότητας κατεργασίας.



- Μειώνει την επιφάνεια επαφής κατεργαζόμενου τεμαχίου-κοπτικού εργαλείου με αποτέλεσμα την ιδιαίτερη αύξηση των τάσεων κοντά στην ακμή του εργαλείου προκαλώντας περιορισμούς όσον αφορά τη γεωμετρία του.
- Σαν θετική επίπτωση έχει την εύκολη απομάκρυνση του αποβλίττου αυξάνοντας έτσι την κατεργαστικότητα του μετάλλου.

Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται μια πιο ολοκληρωμένη ταξινόμηση των μορφών των αποβλίττων κατά το ISO 3685 του 1977. Το σύστημα αυτό αποτελείται από οκτώ ομάδες οι οποίες υποδιαιρούνται σε περεταίρω 1-4 υποομάδες σύμφωνα με το μέγεθος και τις μορφολογικές ιδιαιτερότητες των αποβλίττων.

Ταινιοειδή	Σωληνοειδή	Ελικοειδή	Ελικοειδή τύπου ροδέλας	Κωνικά ελικοειδή	Σπειροειδή	Τεμάχια σπειροειδούς	Βελονοειδή
1.1 μακρύ 	2.1 μακρύ 	3.2 επίπεδο 	4.1 μακρύ 	5.1 μακρύ 	6.1 ενωμένο 		
1.2 κοντό 	2.2 κοντό 	3.2 κωνικό 	4.2 κοντό 	5.2 κοντό 	6.2 θρυμματισμένο 		
1.3 περιπλεγμένο 	2.3 περιπλεγμένο 		4.3 περιπλεγμένο 	5.3 περιπλεγμένο 			

Σχήμα 2.8: Ταξινόμηση αποβλίττων κατά ISO 3685

### 2.3.3 Παράγοντες που επιδρούν στον σχηματισμό αποβλίττου

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στο σχηματισμό του αποβλίττου είναι η ταχύτητα κοπής η οποία μεταβάλλει τη γωνία διάτμησης αλλά επιδρά και στο όριο διαρροής του υλικού μέσω της ταχύτητας παραμόρφωσης. Επιπλέον η γωνία αποβλίττου επιδρά στο σχηματισμό του αποβλίττου διότι καθορίζει τη κατεύθυνση που αυτό ακολουθεί κατά το σχηματισμό του αλλά και επειδή το μέγεθος της είναι αντιστρόφως ανάλογο με την απαιτούμενη πλαστική παραμόρφωση που πρέπει να υποστεί το προς κατεργασία υλικό. Ως αποτέλεσμα, αύξηση της γωνίας αποβλίττου έχει ως επακόλουθο τη μείωση της απαιτούμενης πλαστικής παραμόρφωσης, άρα ομαλότερες συνθήκες σχηματισμού του αποβλίττου.

Ονομαστικά, για τους παράγοντες που έχουν να παίξουν κάποιο σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό του αποβλίττου μπορεί να ισχυριστεί:

- Η αύξηση της ταχύτητας κοπής για όλες τις προώσεις οδηγεί σε πιο ευνοϊκές συνθήκες κοπής που μάλιστα γίνονται ευνοϊκότερες όσο μειώνεται η πρόωση.
- Η μείωση της πρόωσης σε όλα τα βάθη κοπής οδηγεί επίσης σε ευνοϊκές συνθήκες κοπής που μάλιστα γίνονται ευνοϊκότερες όσο αυξάνεται το βάθος κοπής.
- Η αύξηση του βάθους κοπής οδηγεί σε πιο επιθυμητή μορφή αποβλίττου.
- Η αύξηση της γωνίας αποβλίττου οδηγεί σε ομαλότερη ροή και καλύτερο σχηματισμό αποβλίττου.
- Μικρότερη γωνία τοποθέτησης του εργαλείου οδηγεί σε ομαλότερη κατεργασία.



Στην περίπτωση που το συνεχές απόβλιττο αποκτήσει μεγάλο μήκος με αποτέλεσμα να επιφέρει δυσκολίες αλλά και κινδύνους κατά τη διάρκεια της κατεργασίας χρησιμοποιούνται κατάλληλες διαμορφώσεις του κοπτικού εργαλείου που ονομάζονται **γρεζοθραύστες**. Οι γρεζοθραύστες είναι είτε διαμορφώσεις της επιφάνειας αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου, συνήθως καμπυλότρες ή αυλακώσεις είτε ένα επιπρόσθετο εμπόδιο στην κίνηση του αποβλίττου. Το έργο που εκτελούν οι γρεζοθραύστες είναι η μείωση της ακτίνας καμπυλότητας του αποβλίττου.

#### 2.3.4 Ψευδόκοψη

Στην περίπτωση του συνεχούς αποβλίττου με ψευδόκοψη, σχηματίζεται ένα σφηνοειδές σώμα από ισχυρά σκληρυμένο λόγω παραμόρφωσης μέταλλο πάνω στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου. Το σώμα αυτό αποτελείται από πολλά επάλληλα λεπτά στρώματα μετάλλου, ενώ η κορυφή της ψευδόκοψης είναι ασταθής. Η ψευδόκοψη αυξάνεται με την πρόοδο της κοπής μέχρι ένα ορισμένο σημείο ενώ στη συνέχεια τμήματα της αποκολλώνται προς τη πλευρά του αποβλίττου και προς τη πλευρά της κατεργασμένης επιφάνειας χειροτερεύοντας τη τραχύτητα. Αυτά τα τμήματα της δεν έχουν κανένα πρακτικό ενδιαφέρον διότι το απόβλιττο απομακρύνεται στις κατεργασίες κοπής για ανακύκλωση.

Οι συνέπειες της ψευδόκοψης συνοψίζονται στη συνέχεια:

- Χειροτέρευση της τραχύτητας της κατεργαζόμενης επιφάνειας.
- Επίδραση στις μηχανικές, μεταλλουργικές και φυσικές ιδιότητες της επιφάνειας όπως δημιουργία παραμενουσών τάσεων, μεταβολή στη κρυσταλλική δομή και μείωση της αντοχής σε κόπωση λόγω της δημιουργίας μικρορωγμών.
- Μείωση της διάρκειας ζωής και αύξηση του κόστους παραγωγής του κοπτικού εργαλείου.
- Δημιουργία ταλαντώσεων στο κατεργαστικό σύστημα.
- Αύξηση της γωνίας αποβλίττου διότι η κοπή πλέον πραγματοποιείται με την ψευδόκοψη και όχι με την κοπτική ακμή του εργαλείου.
- Μείωση της επιφάνειας επαφής μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του αποβλίττου.

Η αποφυγή ή ο περιορισμός της ψευδόκοψης μπορεί να επιτευχθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

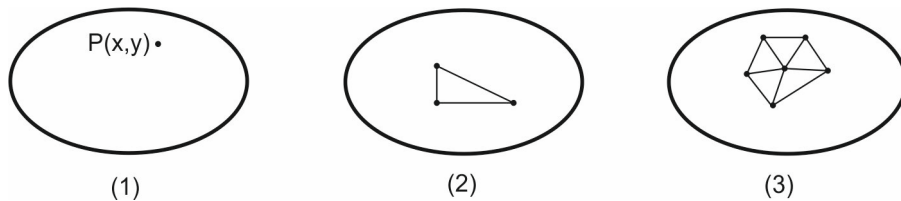
- Αύξηση της ταχύτητας κοπής.
- Χρησιμοποίηση εργαλείου με μεγαλύτερη γωνία αποβλίττου.
- Μείωση της πρόωσης.
- Με τη χρήση κατάλληλου υγρού κοπής.
- Ισχυρότερη κράτυνση του μετάλλου.

## 2.4 Τα Πεπερασμένα Στοιχεία

### 2.4.1 Βασικοί Ορισμοί Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία είναι μια υπολογιστική τεχνική που χρησιμοποιείται σε προβλήματα **συνοριακών συνθηκών** στη μηχανική. Ένα πρόβλημα συνοριακών συνθηκών είναι ένα μαθηματικό πρόβλημα στο οποίο μια ή και περισσότερες εξαρτημένες μεταβλητές πρέπει να ικανοποιούν μια διαφορική εξίσωση μέσα σε ένα γνωστό πεδίο ορισμού ανεξάρτητων μεταβλητών ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούν συγκεκριμένες συνθήκες των ορίων αυτού του πεδίου ορισμού. Οι εξαρτημένες μεταβλητές είναι τα **δεδομένα εξόδου** τα οποία πρέπει να υπολογιστούν και κυβερνώνται από τη διαφορική εξίσωση. Οι συνοριακές συνθήκες είναι συγκεκριμένες τιμές των δεδομένων εξόδου (εξαρτημένες μεταβλητές) ή και οι παράγωγοι τους στα όρια του προβλήματος που διερευνούμε. Ανάλογα τη φύση του προβλήματος που μελετάται, τα δεδομένα εξόδου μπορεί

να είναι μετατόπιση, θερμοκρασία, ταχύτητα ρευστού κτλ. Προκειμένου να οριστούν και να κατανοηθούν καλύτερα τα πεπερασμένα στοιχεία ως θεωρηθεί ένας όγκος συγκεκριμένου υλικού με γνωστές φυσικές ιδιότητες όπως στο Σχήμα 2.9. Ο όγκος αντιπροσωπεύει το πεδίο ορισμού του προβλήματος συννοριακών συνθηκών που πρέπει να επιλυθεί. Για λόγους ακριβείας υποθέτεται μια περίπτωση δυο διαστάσεων με μια μεταβλητή εξόδου  $\phi(x,y)$  που πρέπει να υπολογισθεί σε κάθε σημείο  $P(x,y)$  έτσι ώστε να ικανοποιείται μια ή και περισσότερες διαφορικές εξισώσεις.



Σχήμα 2.9: (1) ένα δισδιάστατο πεδίο ορισμού μιας μεταβλητής  $\phi(x,y)$   
 (2) ένα πεπερασμένο στοιχείο τριών κόμβων στο πεδίο ορισμού  
 (3) περισσότερα στοιχεία που απαρτίζουν ένα στοιχειώδες πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στο πεδίο ορισμού

Αξίζει να σημειωθεί, ότι σύμφωνα με τα παραπάνω αποκτάται μια ακριβή μαθηματική επίλυση. Δηλαδή, η λύση βρίσκεται σε μια αλγεβρική έκφραση των ανεξάρτητων μεταβλητών. Σε πρακτικά προβλήματα, το πεδίο ορισμού μπορεί να είναι γεωμετρικά υψηλής πολυπλοκότητας και ως αποτέλεσμα η διαφορική εξίσωση ή εξισώσεις που το περιγράφουν να αποτρέπει από το να αποκτήθει μια λύση ικανοποιητικής ακρίβειας. Για αυτό το λόγο, σε σύγχρονα προβλήματα μηχανικής, αποκτώνται προσεγγιστικές λύσεις που βασίζονται σε αριθμητικές μεθόδους και ψηφιακούς υπολογιστές. Η μέθοδος ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία αποτελεί μια πολύ ισχυρή τεχνική για την απόκτηση προσεγγιστικών αποτελεσμάτων μεγάλης ακρίβειας.

Στο Σχήμα 2.9 (3) φαίνεται ένα μικρό τριγωνικό στοιχείο το οποίο περιβάλλει ένα πεπερασμένο τμήμα του πεδίου ορισμού. Είναι υψίστης σημασίας να αναφερθεί ότι το εν λόγω στοιχείο δεν είναι ένα διαφορικό στοιχείο αμελητέου μήκους  $dx$ . Ένας **κόμβος**, είναι ένα συγκεκριμένο στοιχείο του πεπερασμένου στοιχείου στο οποίο υπολογίζεται η τιμή της μεταβλητής εξόδου. Οι εξωτερικοί κόμβοι βρίσκονται στα όρια του πεπερασμένου στοιχείου και χρησιμοποιούνται για να ενώσουν ένα στοιχείο με άλλα γειτονικά του πεπερασμένα στοιχεία. Οι κόμβοι που δεν βρίσκονται στα όρια των πεπερασμένων στοιχείων ονομάζονται εσωτερικοί κόμβοι και δεν συνδέονται με κανένα άλλο στοιχείο. Το τριγωνικό πεπερασμένο στοιχείο του Σχήματος 2.9 (2) έχει μόνο εσωτερικούς κόμβους.

Όπως είναι προφανές, στα προβλήματα μηχανικής, ενδιαφέρει να υπολογιστούν οι τιμές μιας μεταβλητής όχι μόνο στους κόμβους αλλά και σε άλλα σημεία των πεπερασμένων στοιχείων. Οι τιμές που λαμβάνονται στους κόμβους, χρησιμοποιούνται για να προσεγγίσουν τις τιμές εκτός κόμβων μέσω παρεμβολής. Για το πεπερασμένο στοιχείο του Σχήματος 2.9 (2), στο οποίο όλοι οι κόμβοι είναι εξωτερικοί, η σχέση που συνδέει τη τιμή μιας μεταβλητής εξόδου  $\phi(x,y)$  είναι:

$$\phi(x,y) = N_1(x,y) * \phi_1 + N_2(x,y) * \phi_2 + N_3(x,y) * \phi_3$$

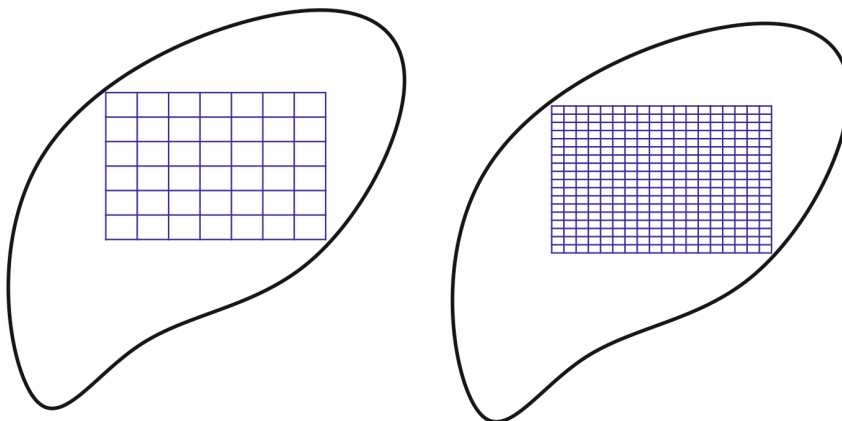
όπου  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  είναι οι τιμές της μεταβλητής εξόδου στους τρεις κόμβους και  $N_1, N_2, N_3$  είναι οι συναρτήσεις παρεμβολής. Στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, οι κομβικές τιμές της

μεταβλητής εξόδου είναι άγνωστες σταθερές τιμές που πρέπει να υπολογιστούν. Οι συναρτήσεις παρεμβολής συνήθως είναι πολυωνυμικές μορφές των ανεξάρτητων μεταβλητών που έχουν παραγωγισθεί προκειμένου να ικανοποιούν ορισμένες συνθήκες στους κόμβους. Επεξηγηματικά, οι συναρτήσεις παρεμβολής είναι γνωστές συναρτήσεις των ανεξάρτητων μεταβλητών και περιγράφουν τη μεταβολή της μεταβλητής εξόδου στο εσωτερικό του πεπερασμένου στοιχείου.

Το τριγωνικό πεπερασμένο στοιχείο του Σχήματος 2.9 (2) λέγεται ότι έχει τρεις **βαθμούς ελευθερίας** διότι τρεις κομβικές τιμές της μεταβλητής εξόδου χρειάζονται προκειμένου να περιγραφεί η τιμή της οπουδήποτε στο εσωτερικό του πεπερασμένου στοιχείου. Εάν η μεταβλητή εξόδου ήταν η διανυσματική μετατόπιση και το πεδίο ορισμού του Σχήματος 2.9 ήταν ένα λεπτό στερεό σώμα τότε θα έπρεπε να υπολογιστούν δύο τιμές σε κάθε κόμβο (μία κάθε άξονα). Σε αυτή τη περίπτωση το τριγωνικό πεπερασμένο στοιχείο θα είχε έξι βαθμούς ελευθερίας. Γενικά, ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας είναι ίσος με το γινόμενο του αριθμού των κόμβων επί τον αριθμό των τιμών της μεταβλητής εξόδου (ίσως και των παράγωγων της) που πρέπει να υπολογιστούν σε κάθε κόμβο. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, έχουν τέτοια δόμη έτσι ώστε οι τιμές μιας μεταβλητής εξόδου σε έναν κόμβο που ανήκει σε πολλά στοιχεία να είναι η ίδια ανεξαρτήτως του αριθμού των στοιχείων που ανήκει. Αυτή η τεχνική προλαμβάνει την ύπαρξη κενών στο εσωτερικό του πεδίου ορισμού. Σε δομικά προβλήματα μηχανικής, τέτοιου είδους κενά θα αντιπροσώπευαν μια ασυνέχεια στη δομή του υλικού, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι σε αυτά τα κενά το υλικό χάνει τις φυσικές του ιδιότητες, κάτι που είναι αδύνατο. Παρόλο που εξασφαλίζεται συνέχεια της μεταβλητής εξόδου από στοιχείο σε στοιχείο δεν υπάρχει πάντα διαστοιχειακή συνέχεια των παραγώγων της μεταβλητής. Αυτό χρήζει ιδιαίτερης προσοχής διότι σε πολλές περιπτώσεις ενδιαφέρουν περισσότερο οι παράγωγοι της μεταβλητής εξόδου παρά η μεταβλητή εξόδου αυτή καθαυτή. Παρόλα αυτά, το μέγεθος των ασυνεχειών των παραγώγων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί η ακρίβεια της λύσης.

#### 2.4.2 Το Πλέγμα Πεπερασμένων Στοιχείων

Η διαδικασία συμβολισμού ενός φυσικού πεδίου με πεπερασμένα στοιχεία ονομάζεται **πλεγματοποίηση** και το σύνολο από πεπερασμένα στοιχεία που προκύπτει ονομάζεται πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα στοιχεία έχουν ευθείες ακμές οπότε είναι αδύνατον να συμπεριληφθεί ολόκληρο το πεδίο ορισμού στο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων εάν το πεδίο έχει καμπύλες επιφάνειες. Στο Σχήμα 2.10 φαίνεται ένα τέτοιο πεδίο το οποίο έχει πλεγματοποιηθεί δυο φορές, μια με αραιό και μια με πιο πυκνό πλέγμα.



Σχήμα 2.10: Αυθαίρετη πλεγματοποίηση καμπύλου τμήματος με τετραγωνικά στοιχεία

Εάν οι συναρτήσεις παρεμβολής ικανοποιούν ορισμένες μαθηματικές προϋποθέσεις, τότε η λύση που προσφέρουν τα πεπερασμένα στοιχεία προσεγγίζει με πολύ μεγάλη ακρίβεια τη λύση του προβλήματος. Όσο ο αριθμός των στοιχείων αυξάνεται και οι φυσικές διαστάσεις τους μειώνονται, η λύση αλλάζει δραματικά. Με την πύκνωση του πλέγματος, η ακριβής λύση προσδιορίζεται ασυμπτωτικά.

Στα προβλήματα μηχανικής, το κύριο δεδομένο εξόδου είναι η μετατόπιση. Αλλά το κύριο ενδιαφέρον σε τέτοιου είδους προβλήματα είναι οι **αναπτυσσόμενες τάσεις** που προκαλούνται από ειδικές φορτίσεις. Οι τάσεις υπολογίζονται από τις κατάλληλες σχέσεις που συνδέουν τάσεις με μετατοπίσεις (παραμορφώσεις). Αυτές οι σχέσεις εκφράζονται από μια σειρά διαφορικών εξισώσεων. Οπότε, οι τάσεις προκύπτουν από παραγωγή κάποιων αποτελεσμάτων μετατοπίσεων σύμφωνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Όπως προαναφέρθηκε, η διατύπωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για ένα δεδομένο πρόβλημα, προϋποθέτει ότι η κύρια μεταβλητή εξόδου δεν παρουσιάζει κενά από στοιχείο σε στοιχείο, αλλά δεν μπορεί να ειπωθεί το ίδιο και για τις παραγώγους της κύριας μεταβλητής εξόδου. Η σύγκλιση ενός αποτελέσματος με μια αριθμητική μέθοδο, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, σε μια προσεγγιστική τιμή, δεν αποτελεί καμία εγγύηση ότι αυτή η σύγκλιση είναι προς τη σωστή τιμή. Προκειμένου να υιοθετηθούν τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από μια ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία θα πρέπει πρώτα να τηρηθούν οι εξής προϋποθέσεις:

- Να συγκλίνει αριθμητικά σε μια τιμή.
- Να βγάζει λογικό αποτέλεσμα.
- Να ικανοποιούνται οι φυσικοί περιορισμοί του προβλήματος.
- Να βγαίνουν λογικές ασυνέχειες μεταξύ των παραγώγων των μεταβλητών εξόδου στα όρια των πεπερασμένων στοιχείων.

#### 2.4.3 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μια ακόμη αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνά για τη προσέγγιση λύσεων προβλημάτων που υπακούν σε διαφορικές εξισώσεις. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στον ορισμό της παραγώγου μιας συνάρτησης:

$$\frac{df(x)}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

όπου  $x$  η ανεξάρτητη μεταβλητή. Στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, οι παράγωγοι υπολογίζονται από τη παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιώντας μικρές αλλά πεπερασμένες τιμές του  $\Delta x$  για να καταλήξει στη παρακάτω μορφή:

$$\frac{df(x)}{dx} \approx \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

Από τη θεωρία επίλυσης διαφορικών εξισώσεων, είναι γνωστό ότι η λύση μιας πρωτοτάξιας διαφορικής εξίσωσης περιέχει μια σταθερά ολοκλήρωσης. Εάν είναι γνωστή μια αρχική συνθήκη (ή συνοριακή) συνθήκη στο πρόβλημα γίνεται να υπολογιστεί αυτή η σταθερά ολοκλήρωσης. Εάν είναι γνωστά τα παραπάνω, γίνεται να βρεθεί ένας αναδρομικός τύπος ο οποίος θα δώσει μια προσεγγιστική λύση. Ανάλογα τον αριθμό των  $\Delta x$ , θα αυξάνεται και η ακρίβεια της λύσης.

Μια πολύ σημαντική διαφορά των δυο μεθόδων είναι ότι στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων οι παραλλαγές των μεταβλητών εξόδου είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι της όλης διαδικασίας. Βάσει των επιλεγμένων συναρτήσεων παρεμβολής, οι παραλλαγές των μεταβλητών εξόδου μέσα σε ένα πεπερασμένο στοιχείο είναι τμήμα της μεθόδου. Εν

αντιθέσει, στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, οι μεταβλητές εξόδου υπολογίζονται μόνο σε συγκεκριμένα σημεία. Άμεση συνέπεια των ανωτέρω, είναι ότι στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μπορούν να υπολογιστούν οι παράγωγοι των μεταβλητών εξόδου ενώ στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών μπορούμε να έχουμε αποτελέσματα μόνο για τη μεταβλητή εξόδου. Για παράδειγμα, σε ένα δομικό πρόβλημα και οι δυο μέθοδοι παρέχουν αποτελέσματα για τη μετατόπιση αλλά μόνο η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να δώσει αποτελέσματα για τις καταπονήσεις.

Μια αναλογία που μπορεί να παρατηρηθεί μεταξύ των δυο μεθόδων είναι η έννοια των κόμβων στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και τα σημεία ολοκλήρωσης στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, τα οποία απέχουν μεταξύ τους  $\Delta x$ . Επιπλέον, όσο μειώνεται το μήκος  $\Delta x$  στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών τόσο αυξάνεται η ακρίβεια της προσεγγισμένης λύσης, όπως και στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων όσο πυκνώνεται το πλέγμα τόσο πλησιάζουμε στην ακριβή λύση. Και στις δυο περιπτώσεις, μια διαδικασία εκκαθάρισης εκφυλίζει το μαθηματικό μοντέλο από πεπερασμένο σε απειροελάχιστο. Επίσης και στις δυο μεθόδους ξεκινάμε από διαφορετικές εξισώσεις και καταλήγουμε σε αλγεβρικές.

Μια ακόμη μεγάλη διαφορά, είναι ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών μοντελοποιεί τις διαφορετικές εξισώσεις του προβλήματος και χρησιμοποιεί μαθηματική ολοκλήρωση για να υπολογίσει τις λύσεις σε συγκεκριμένα σημεία ενώ η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων μοντελοποιεί ολόκληρο το πεδίο ορισμού του συστήματος και χρησιμοποιεί γνωστές αρχές της φυσικής ώστε να αναπτύξει αλγεβρικές σχέσεις που περιγράφουν τη προσέγγιση της λύσης. Όπως είναι προφανές, η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών μοντελοποιεί εξισώσεις ενώ η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων μοντελοποιεί το πρόβλημα από μια πιο φυσική σκοπιά.

#### **2.4.4 Γενική Μεθοδολογία Ανάλυσης με Πεπερασμένα Στοιχεία**

Όποια και αν είναι η φύση του προβλήματος που καλείται να αναλυθεί με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, ορισμένα βήματα είναι κοινά. Ορισμένα από αυτά τα βήματα έχουν υιοθετηθεί αυτούσια από τα εμπορικά πακέτα επίλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.

Αρχικά, πρέπει να οριστεί το κομμάτι της προεπεξεργασίας:

- Ορισμός της γεωμετρίας του προβλήματος.
- Ορισμός των κατάλληλων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν.
- Ορισμός των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα.
- Ορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των στοιχείων.
- Ορισμός της συνδεσμολογίας των στοιχείων, δηλαδή η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων.
- Ορισμός των φυσικών περιορισμών, δηλαδή των συνοριακών συνθηκών.
- Ορισμός των φορτίσεων του προβλήματος.

Σε αυτό το στάδιο δημιουργείται το μοντέλο της ανάλυσης και είναι ζωτικής σημασίας να οριστούν όλοι οι παράμετροι του σωστά προκειμένου να επιλυθεί το σωστό πρόβλημα.

Επόμενο στάδιο της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία είναι η επίλυση του συστήματος. Προκειμένου να επιλυθεί το σύστημα, συγκεντρώνονται οι αλγεβρικές εξισώσεις σε μητρική μορφή και υπολογίζονται οι τιμές των κύριων μεταβλητών εξόδου. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της αντικατάστασης, μέσω των ήδη υπολογισμένων τιμών, υπολογίζονται οι παράγωγοι των μεταβλητών εξόδου. Συνήθως, στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να επιλυθούν δεκάδες χιλιάδες εξισώσεις, οπότε υιοθετούνται ειδικές

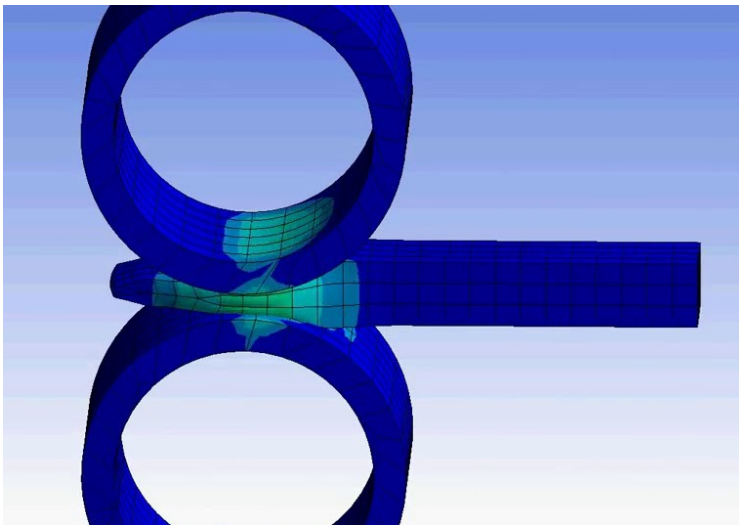


τεχνικές επίλυσης συστημάτων έτσι ώστε να εξοικονομηθεί αποθηκευτικός χώρος και υπολογιστικός χρόνος.

Το τελευταίο βήμα της ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων είναι η μετεπεξεργασία των δεδομένων. Αυτή αποτελεί την ανασκόπηση των λύσεων του συστήματος μέσω ταξινομήσεων, εμφάνιση αποτελεσμάτων με χρήση χρωματικής κλίμακας, σχεδίαση σχετικών γραφημάτων, υπολογισμό συντελεστών ασφαλείας καθώς και δυναμική αναπαράσταση της συμπεριφοράς του μοντέλου. Ενώ τα δεδομένα των λύσεων μπορούν να μορφοποιηθούν με πολλούς και διάφορους τρόπους στη μετεπεξεργασία, το σημαντικότερο είναι να κριθούν με βάση την ορθή επιστημονική σκέψη έτσι ώστε να καθοριστεί εάν τα αποτελέσματα είναι φυσικώς σωστά και ακριβή.

#### **2.4.5 Πεδία Εφαρμογής της Ανάλυσης με Πεπερασμένα Στοιχεία**

Τα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται ευρέως σε μια πληθώρα δραστηριοτήτων πολλών ειδικοτήτων επιστημόνων και μηχανικών. Αναφορικά, γίνονται αναλύσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε αεροναυπηγικές, εμβιομηχανικές, δραστηριότητες αλλά και σε τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η ναυπήγηση. Πολλά σύγχρονα πακέτα επίλυσης με πεπερασμένα στοιχεία περιέχουν λειτουργικότητες όπως θερμικές, ηλεκτρομαγνητικές, ρευστομηχανικές και δομικές δυνατότητες ανάλυσης. Οι αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία μπορούν να προσφέρουν απτά αποτελέσματα όσον αφορά τις δυναμικές απεικονίσεις καθώς και την μείωση βάρους ορισμένων κατασκευών. Επιπλέον, απεικονίζουν τα σημεία που οι κατασκευές λυγίζουν ή ακόμα και αστοχούν και προσδιορίζουν τη κατανομή των τάσεων.



Σχήμα 2.11: Προσομοίωση έλασης μετάλλου με χρήση πακέτου πεπερασμένων στοιχείων

Η ενσωμάτωση των αναλύσεων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων στη βιομηχανία έχει μειώσει δραματικά το χρόνο που χρειάζονται τα προϊόντα προκειμένου να μεταβούν από το στάδιο της σχεδίασης στο στάδιο της παραγωγής μέσω της βελτίωσης της σχεδίασης βέλτιστων πρωτοτύπων. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία περιλαμβάνουν:

- Αυξημένη ακρίβεια.
- Βέλτιστο σχεδιασμό και ορθότερη πρόβλεψη κρίσιμων σχεδιαστικών παραμέτρων.
- Εικονική πρωτοτυπία.
- Γρήγορο και φθηνότερο σχεδιαστικό κύκλο.
- Αυξημένη παραγωγικότητα.
- Αυξημένα κέρδη.

## 2.5 Τα Πεπερασμένα Στοιχεία στις Κοπές

### 2.5.1 Μέθοδοι Μοντελοποίησης με Πεπερασμένα Στοιχεία στις Κοπές

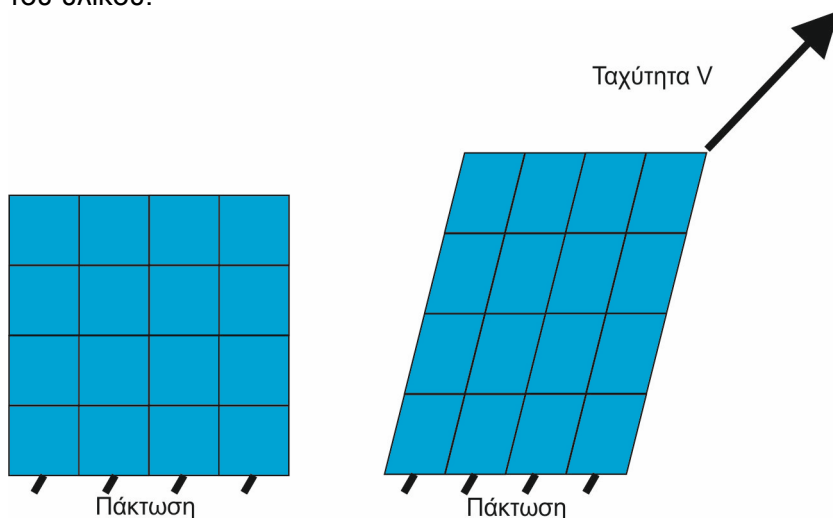
Η χρήση της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για τον προσδιορισμό δυνάμεων και παραμέτρων κοπής χρησιμοποιείται ευρέως από τους ερευνητές από τη δεκαετία του '70. Τέτοιου είδους αναλύσεις είναι πολλά υποσχόμενες εξαιτίας των ανακαλύψεων και των βελτιώσεων των λογισμικών και των υπολογιστικών εργαλείων που χρειάζονται τέτοιου είδους προσομοιώσεις. Τρεις μέθοδοι μοντελοποίησης είναι πολύ διαδεδομένοι στις προσομοιώσεις κοπών μέσω πεπερασμένων στοιχείων:

- Μοντελοποίηση μορφής Lagrange
- Μοντελοποίηση μορφής Euler
- Συζευγμένη μοντελοποίηση τύπου ALE (Arbitrary-Lagrangian Eulerian formulation)

Κάθε μια από αυτές τις μεθόδους έχει τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τη κατεργασία που πρέπει να προσομοιωθεί καθώς και από τα αποτελέσματα που πρέπει να ληφθούν.

### 2.5.2 Μοντελοποίηση μορφής Lagrange

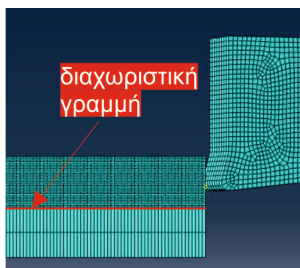
Η προσέγγιση που ακολουθεί η μοντελοποίηση της μορφής Lagrange χρησιμοποιείται συνήθως για διαδικασίες μοντελοποίησης με πολύ μικρές παραμορφώσεις όπως τα προβλήματα στατικής. Σύμφωνα με αυτή τη μορφή μοντελοποίησης τα πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων είναι πλήρως συνδεδεμένα στο υλικό. Στο [Σχήμα 2.12](#) βλέπουμε την αρχική θέση του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων και του υλικού καθώς και τη τελική θέση του υλικού. Είναι προφανές ότι το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων είναι προσκολλημένο στο υλικό και παραμορφώνεται σύμφωνα με τη κατεύθυνση παραμόρφωσης του υλικού.



Σχήμα 2.12: Αρχική και τελική θέση πλέγματος και υλικού

Υπάρχει ένα πολύ μεγάλο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου μοντελοποίησης. Διότι το πλέγμα είναι προσκολλημένο στο υλικό, σε μια ανάλυση κοπής θα υπάρχει καταστροφή του πλέγματος, άρα και καταστροφή των πεπερασμένων στοιχείων. Προκειμένου να προσομοιωθεί σωστά το φαινόμενο χρειάζεται μια προκαθορισμένη διαχωριστική γραμμή μεταξύ των επιφανειών που λαμβάνει χώρα η κοπή ώστε να προληφθεί η υπερβολική παραμόρφωση του πλέγματος στην διαδικασία της προσομοίωσης της κοπής.

Δηλαδή, στη περίπτωση προσομοίωσης ορθογωνικής κοπής, το τμήμα του τεμαχίου που



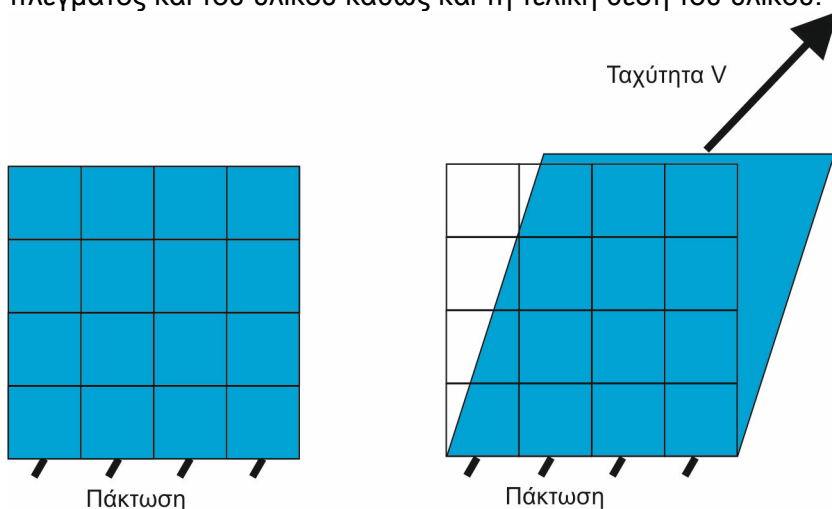
θα αποτελέσει τουλάχιστον το απόβλιπτο μετά το πέρας της προσομοίωσης, θα πρέπει να έχει πιο πυκνό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων από το υπόλοιπο τεμάχιο προς κατεργασία.

Σχήμα 2.13: Διαχωριστική γραμμή σε προσομοίωση λοξής κοπής

Για πολύ μεγάλες προώσεις, ίσως χρειαστεί να οριστούν και διαφορετικές ιδιότητες πλαστικής αστοχίας μεταξύ των δυο τμημάτων που ορίζει η διαχωριστική γραμμή.

### 2.5.3 Μοντελοποίηση μορφής Euler

Σε αυτή τη μέθοδο μοντελοποίησης, το υλικό δεν είναι συνδεδεμένο στο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων εν αντιθέσει με τη μέθοδο μοντελοποίησης Lagrange. Σε αυτή τη περίπτωση, το υλικό έχει την ικανότητα να κυλάει ανάμεσα από το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων το οποίο είναι σταθερό στο χώρο. Στο Σχήμα 2.14 φαίνεται η αρχική θέση του πλέγματος και του υλικού καθώς και τη τελική θέση του υλικού.



Σχήμα 2.14: Αρχική και τελική θέση πλέγματος και υλικού

Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου μοντελοποίησης είναι ότι υποθέτεται ένα ιξωδοπλαστικό μοντέλο χωρίς καθόλου ελαστικές ιδιότητες και ως αποτέλεσμα δεν μπορούν να υπολογιστούν οι τάσεις στις επιφάνειες του τεμαχίου.

### 2.5.4 Συζευγμένη Μοντελοποίηση τύπου ALE

Και οι δυο προαναφερθείσες μέθοδοι έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους αλλά όσον αφορά τις κοπές καμία δεν μπορεί να δώσει μια πιο γενική λύση. Η συζευγμένη μοντελοποίηση τύπου ALE είναι μια μέθοδος μοντελοποίησης που συνδυάζει και τις δυο αυτές μεθόδους έτσι ώστε να εκμεταλλευτεί τα πλεονεκτήματά τους και να εξαλείψει τα μειονεκτήματά τους ως έναν βαθμό. Σε αυτή τη μέθοδο, το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων δεν είναι συνδεδεμένο στο υλικό ούτε σε σταθερά σημεία στο χώρο. Το πλέγμα, έχει μια κίνηση ανεξάρτητη από αυτήν του υλικού. Παρόλα αυτά, πολλές μελέτες έδειξαν ότι και αυτή η μέθοδος δεν μπορούσε να εξαλείψει πλήρως την υπερβολική παραμόρφωση του πλέγματος κυρίως κοντά στην περιοχή καμπυλότητας του κοπτικού. Μια προτεινόμενη λύση που λειτούργησε σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι η πύκνωση του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων κοντά στην ακτίνα καμπυλότητας του κοπτικού εργαλείου. Μια ακόμη λύση είναι η στοχευμένη μοντελοποίηση τύπου Euler κοντά στην ακτίνα καμπυλότητας του κοπτικού ενώ τα υπόλοιπα τμήματα πλεγματοποιούνται σύμφωνα με τον τύπο Lagrange.

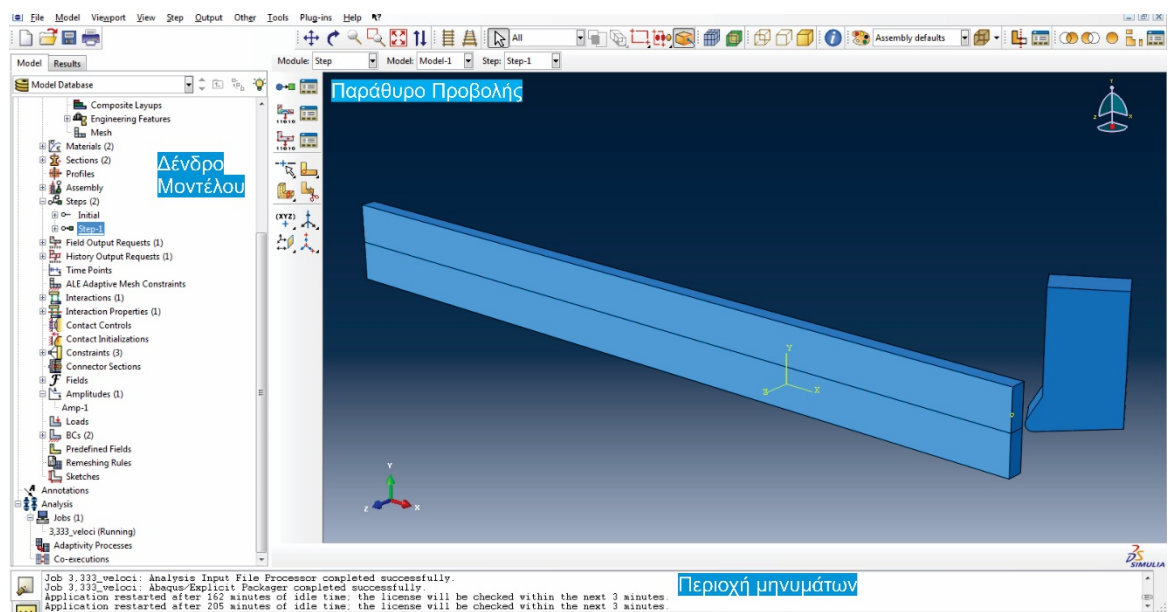


Στη ουσία, η μέθοδος ALE αλλάζει συνεχώς το αρχικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων χωρίς αυτό να έχει δεχθεί κάποιο φορτίο το οποίο να επιφέρει αυτή την αλλαγή. Ως αποτέλεσμα, οι λύσεις που θα δώσει στο τέλος της ανάλυσης θα αναφέρονται σε ένα πλέγμα το οποίο θα διαφέρει κατά έναν πολύ μεγάλο βαθμό από αυτό που ορίστηκε. Οπότε στην ουσία θα έχει λυθεί ένα πρόβλημα διαφορετικό από αυτό που θέλουμε. Για αυτό το λόγο η συγκεκριμένη μέθοδος θα πρέπει να χρησιμοποιείται με πολύ μεγάλη προσοχή και σε πολύ συγκεκριμένα προβλήματα. Για δυναμικά φαινόμενα όπως οι κοπές με μικρές ή και μεσαίες προώσεις, καλό είναι να υιοθετούνται οι άλλες δυο μέθοδοι μοντελοποίησης.

### 3. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

#### 3.1 Το Λογισμικό Προσομοίωσης

Το λογισμικό προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε για να αναλύσει τις περιπτώσεις της ορθογωνικής και της λοξής κοπής είναι ένα πακέτο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία αλλά και για ακαδημαϊκούς σκοπούς. Το λογισμικό αυτό αποτελεί ένα ολοκληρωμένο πακέτο CAE (Computer Aided Engineering) το οποίο επίσης ενσωματώνει εργαλεία CAD (Computer Aided Design). Προσφέρει τη δυνατότητα προεπεξεργασίας (pre-processing), επίλυσης (solver) και μετεπεξεργασίας (post-processing) δεδομένων. Το λογισμικό έχει τη δυνατότητα άμεσης (explicit) και δυναμικής (dynamic) επίλυσης προβλημάτων όπου μοντελοποιεί κάθε πρόβλημα ως πρόβλημα διάδοσης κυμάτων, δηλαδή λαμβάνει τις δυνάμεις ως διάδοση κυμάτων μεταξύ γειτονικών στοιχείων. Βασικό γνώρισμα αυτού του λογισμικού μοντελοποίησης είναι η γενικότητα και η εργονομικότητά του, γεγονότα που το κάνουν εξαιρετικά φιλικό στο χρήστη αλλά ταυτόχρονα απαιτεί υψηλό επίπεδο γνώσεων.



Σχήμα 3.1: Περιβάλλον λογισμικού προσομοίωσης

Σχεδόν όλοι οι παράμετροι που εισάγονται στο πρόγραμμα καθορίζονται εξαρχής από τον χρήστη. Για λόγους ευκολίας υπάρχουν ορισμένες τιμές κάποιων παραμέτρων που το πρόγραμμα τις συμπληρώνει αυτόματα, όπως επίσης υπάρχει και η αυτόματη συμπλήρωση κάποιων παραμέτρων με τρόπο ώστε να συμφωνούν με τιμές που είχε εισάγει ο χρήστης σε νωρίτερο χρόνο, κυρίως στο σχεδιαστικό κομμάτι. Το λογισμικό έχει βασιστεί στην επιστημονική γλώσσα προγραμματισμού PYTHON και διαθέτει επίσης τη δυνατότητα εισαγωγής υπορουτίνων γραμμένων σε PYTHON για διάφορες παραμέτρους προκειμένου να επιτευχθεί μια πιο αναλυτική λύση για προβλήματα που το CAE από μόνο του δεν μπορεί να επιλύσει.

## 3.2 Στάδια Ανάπτυξης του Μοντέλου

### 3.2.1 Εισαγωγικοί Ορισμοί

Στα επόμενα κεφάλαια θα παρουσιαστεί η δομή που ακολουθήθηκε προκειμένου να δημιουργηθούν τα μοντέλα της προσομοίωσης της ορθογωνικής και της λοξής κοπής καθώς και οι τιμές που έλαβαν όλες οι παράμετροι του προγράμματος από τον χρήστη. Οι παράμετροι αυτοί προσδιορίστηκαν με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία σχετικά με τη μηχανική και τους γενικότερους μηχανισμούς της κοπής αλλά και σχετικά με άλλες υπάρχουσες παρόμοιες μελέτες.

Προκειμένου να μοντελοποιηθεί το πρόβλημα έλαβαν χώρα τα εξής βήματα:

- Καθορισμός της γεωμετρίας των τμημάτων (parts) που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο.
- Επιλογή και ορισμός των υλικών μέσω προσδιορισμού των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων καθώς και ιδιοτήτων που παρουσιάζονται σε θέματα μελέτης κοπών.
- Συναρμολόγηση των τμημάτων στον τρισδιάστατο χώρο.
- Εισαγωγή περιορισμών στη γεωμετρία της συναρμολογημένης διάταξης.
- Προσδιορισμός της διάρκειας και των παραμέτρων του χρονικού βήματος καθώς και των δεδομένων εξόδου.
- Προσδιορισμός των σωστών συνοριακών συνθηκών.
- Καθορισμός του τύπου των στοιχείων και δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων.
- Προσδιορισμός της επαφής των επιφανειών του τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου που θα αλληλεπιδράσουν κατά τη διάρκεια της ανάλυσης.
- Υποβολή αρχείου στον επιλυτή και παρακολούθηση της ανάλυσης.

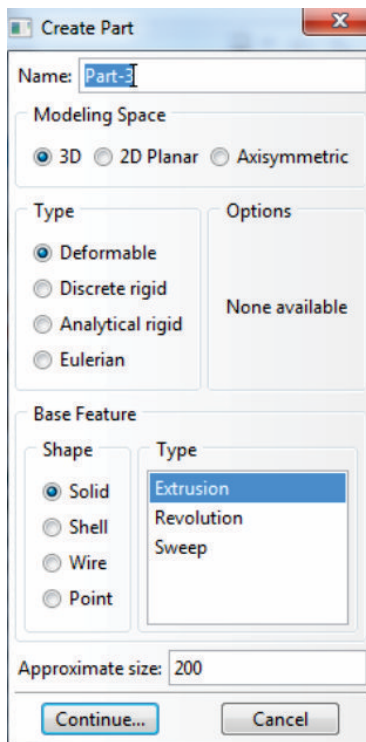
### 3.2.2 Καθορισμός της Γεωμετρίας των Τμημάτων

Το πρωταρχικό στάδιο στη μοντελοποίηση των περιπτώσεων της κοπής είναι η σχεδίαση των τμημάτων που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο. Αρχικά, πρέπει να καθοριστεί το είδος του σώματος. Αυτό ορίζεται μέσω των ακόλουθων επιλογών:

- Αν το σώμα θα είναι δισδιάστατο, τρισδιάστατο ή αξονοσυμμετρικό.
- Αν το σώμα θα συμπεριφέρεται ως παραμορφώσιμο ή απαραμόρφωτο.
- Αν η φύση του σώματος θα είναι στερεή, κελύφους, σύρματος ή σημειακή.
- Ορισμός μιας τυπικής διάστασης προκειμένου να υπολογισθεί το μέγεθος της επιφάνειας εργασίας κατά τη διαδικασία σχεδίασης του τεμαχίου.
- Καθορισμός του είδους της φύσης του σώματος δηλαδή αν αυτό θα προκύψει από εξώθηση (Extrusion), περιστροφή (Revolution) κτλ.

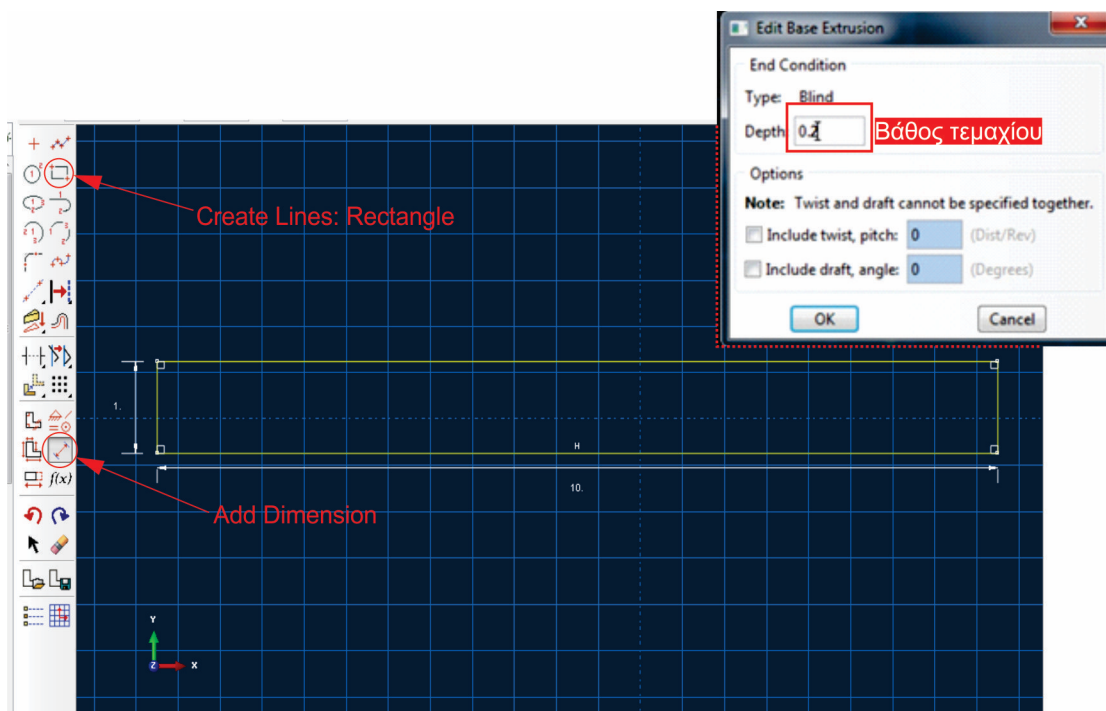
Αξίζει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο, ότι το λογισμικό δεν έχει κάποιον built-in τύπο μονάδων, αλλά τα μεγέθη και η τάξη τους που εισάγει ο χρήστης θα πρέπει να συμφωνούν μεταξύ τους.

Αυτές οι επιλογές συνοψίζονται στο Σχήμα 3.2 όπου φαίνεται το παράθυρο δημιουργίας νέου τμήματος (Create Part) του λογισμικού.



Το όρισμα **Approximate size** του Σχήματος 3.2 έχει να κάνει με έναν τυπικό αριθμό μήκους ο οποίος λογίζεται ως αδιάστατος για το λογισμικό και χρησιμοποιείται στο **Sketcher** του. Δηλαδή, αναλόγως το πρόβλημα, εάν εισαχθεί ο αριθμός 1000 και πρέπει να παρασταθεί 1 μέτρο, τότε όλες οι διαστάσεις και όλες οι μονάδες μέτρησης που έχουν να κάνουν με μήκος θα πρέπει να είναι εκφρασμένες σε χιλιοστά (1 μέτρο=1000 χιλιοστά). Όπως είναι προφανές, το λογισμικό δεν χρησιμοποιεί κανέναν είδους περιορισμό όσον αφορά τα συστήματα μονάδων όπως το μετρικό και το αγγλοσαξονικό, αρκεί όλα τα μεγέθη να είναι εκφρασμένα στο ίδιο σύστημα.

Σχήμα 3.2: Παράθυρο δημιουργίας νέου τμήματος



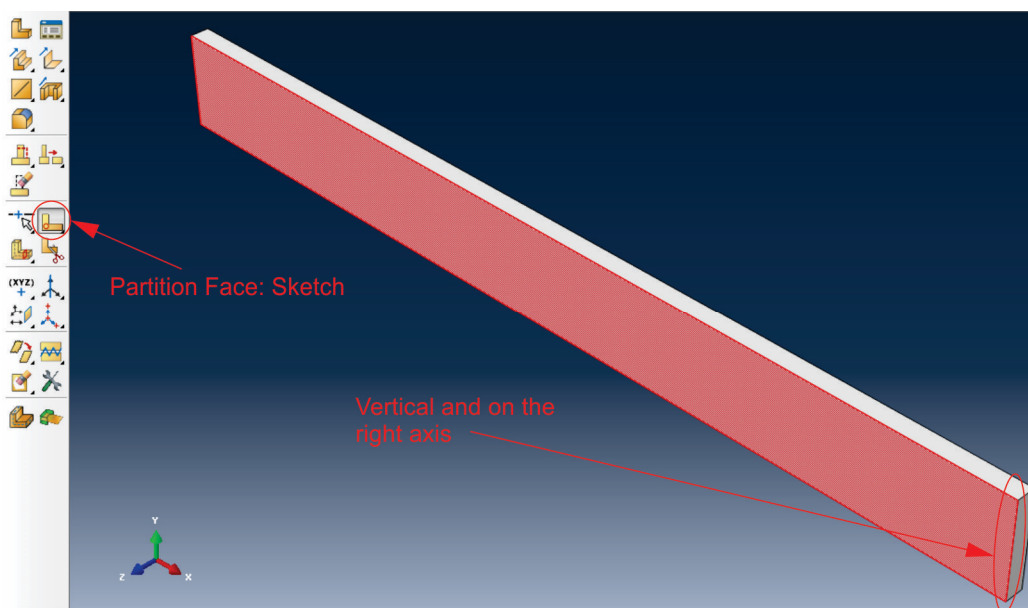
Σχήμα 3.3: Σχεδίαση και βάθος τεμαχίου

Στη συγκεκριμένη περίπτωση δημιουργήθηκαν δυο τμήματα, ένα για το τεμάχιο και ένα για το κοπτικό εργαλείο. Και τα δυο αυτά τεμάχια λήφθηκαν ως τρισδιάστατα (**3D**) παραμορφώσιμα (**Deformable**) στερεά (**Solid**) και προέκυψαν από εξώθηση μιας διατομής. Το τυπικό μέγεθος σχεδίασης (**Approximate size**) λήφθηκε 15 και για τα δύο τεμάχια.

Η διατομή του τεμαχίου ήταν αρκετά απλή και σχεδιάστηκε στο sketcher του λογισμικού το οποίο ανοίγει αμέσως μόλις καθοριστούν οι παράμετροι στο παράθυρο δημιουργίας νέου τμήματος.

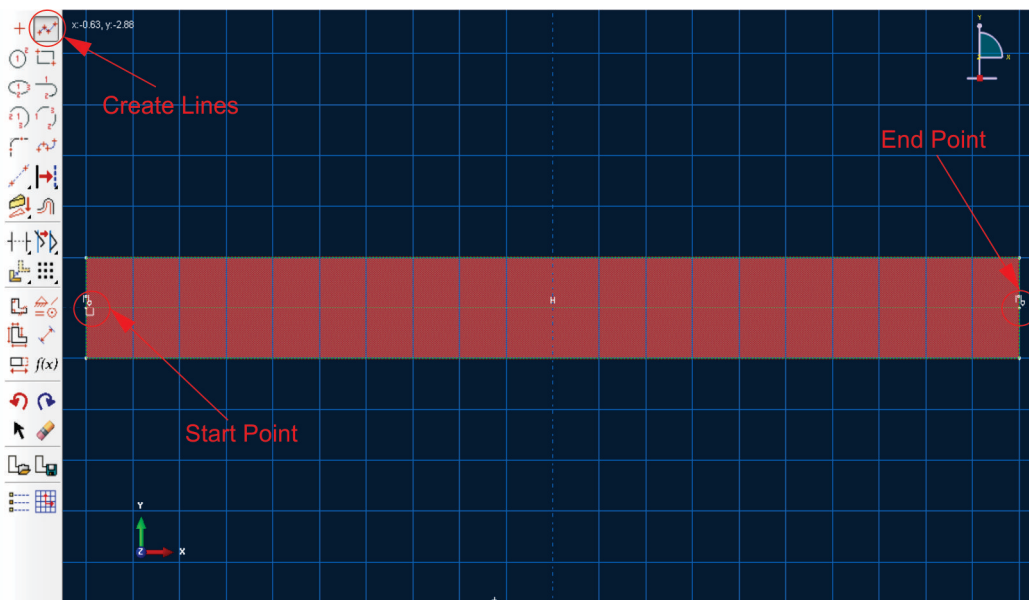
Επιλέχθηκε το εργαλείο σχεδίασης **Create Lines: Rectangle** για να σχεδιασθεί ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο το οποίο και ήταν το τεμάχιο προς κατεργασία για κάθε προσομοίωση που έγινε. Στη συνέχεια, με χρήση του εργαλείου **Add Dimension**, επιλέχθηκαν δυο κάθετες πλευρές του ορθογωνίου και δόθηκαν οι διαστάσεις 1 για τη κάθετη και 10 για την οριζόντια πλευρά. Σημειώνεται ότι οι διαστάσεις στο συγκεκριμένο πρόβλημα δόθηκαν σε **χιλιοστά**, δηλαδή το τεμάχιο έχει διαστάσεις 10x1mm.

Αφού σχεδιάστηκε και η διατομή του τεμαχίου προς κατεργασία, σειρά έχει να ολοκληρωθεί η εξώθηση δίνοντας κάποιο βάθος (**Depth**). Αυτό έγινε αμέσως μόλις δώσαμε την εντολή ολοκλήρωσης σχεδίασης της διατομής στο επόμενο παράθυρο που εμφανίζει το λογισμικό. Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, το τεμάχιο μοντελοποιήθηκε με τον τρόπο Lagrange για αυτό και χρειάστηκε το ανώτερο τμήμα του να έχει ένα πιο πυκνό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να μην υπάρξει το πρόβλημα υπερβολικής παραμόρφωσης των στοιχείων. Για να εξυπηρετηθεί αυτός ο σκοπός, δημιουργήθηκε ένα χώρισμα στη διατομή του τελικού τεμαχίου, το οποίο στη συνέχεια επεκτάθηκε σε όλη την έκταση του τεμαχίου. Το χώρισμα αυτό έγινε με το εργαλείο **Partition Face: Sketch** και ως επιφάνεια σχεδιασμού επιλέχθηκε το επίπεδο που σχηματίζουν οι άξονες X και Y επάνω στο τεμάχιο. Στη συνέχεια, το λογισμικό απαίτησε τον ορισμό ενός άξονα ο οποίος θα εμφανιστεί κάθετα και στα δεξιά στο επίπεδο που θα σχεδιαστεί το χώρισμα. Ο άξονας αυτός και η προαναφερθείσα επιφάνεια φαίνονται ξεκάθαρα στο Σχήμα 3.4.



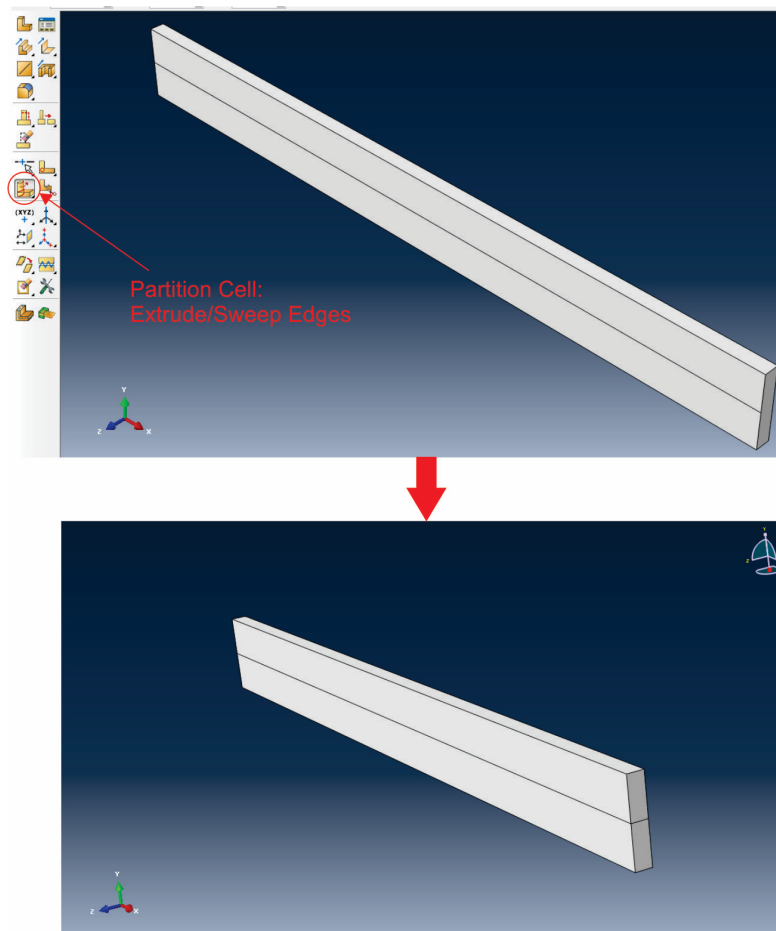
Σχήμα 3.4: Δημιουργία χωρίσματος

Αφού ορίστηκαν όλα τα προηγούμενα, το λογισμικό εμφανίζει ένα ακόμα παράθυρο του Sketcher όπου πρέπει να σχεδιασθεί η διατομή που πρέπει να έχει το χώρισμα στο τεμάχιο. Σε αυτή τη περίπτωση, το χώρισμα πρέπει να είναι μια απλή γραμμή η οποία τοποθετείται στο ήμισυ του συνολικού ύψους του τεμαχίου.



Σχήμα 3.5: Σχεδίαση χωρίσματος

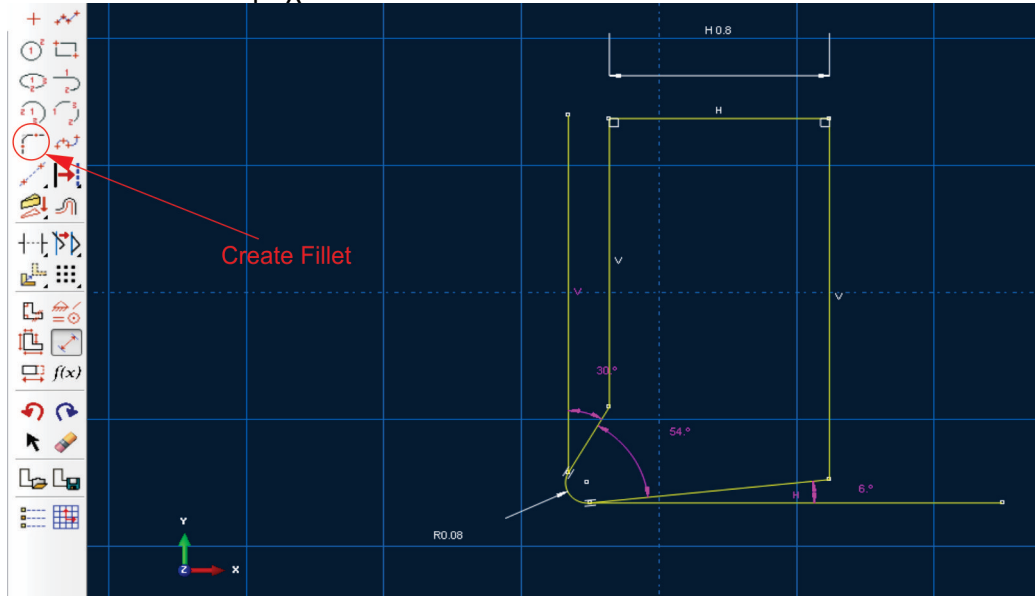
Χρησιμοποιώντας το εργαλείο **Create Line** δημιουργείται μια γραμμή η οποία ξεκινάει από την μια ακμή του τεμαχίου και καταλήγει στην απέναντι. Έτσι έχει τελειώσει το χωρίσμα στην μια πλευρά του τεμαχίου. Προκειμένου να επεκταθεί το χωρίσμα σε όλο το μήκος και το πλάτος του τεμαχίου χρησιμοποιείται η εντολή **Partition Cell: Extrude/Sweep Edges** και επιλέγεται τη γραμμή που μόλις σχεδιάστηκε στο Partition Face: Sketch.



Σχήμα 3.6: Ολοκλήρωση σχεδιασμού χωρίσματος του τεμαχίου

Με αυτά ολοκληρώνεται ο σχεδιασμός του τεμαχίου. Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε το κοπτικό εργαλείο. Σημειώνεται, ότι ενώ σε κάποιες προσομοιώσεις το κοπτικό διέφερε, το τεμάχιο ήταν πάντα το ίδιο.

Για να δημιουργηθεί το κοπτικό εργαλείο, ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία μόνο που προφανώς η διατομή που σχεδιάστηκε ήταν διαφορετική, και το πλάτος του κοπτικού ήταν το διπλάσιο από αυτό του τεμαχίου.



Σχήμα 3.7: Σχεδίαση κοπτικού εργαλείου

Η περιοχή καμπυλότητας του κοπτικού εργαλείου δημιουργήθηκε με την εντολή **Create Fillet**. Αυτή η εντολή, χρειάζεται ως όρισμα τις δυο ευθείες το σημείο τομής των οποίων πρέπει να σχηματίσει τόξο κύκλου καθώς και την ακτίνα που πρέπει να έχει αυτό το τόξο του κύκλου. Οι υπόλοιπες διαμορφώσεις του κοπτικού εργαλείου δημιουργήθηκαν με την εντολή **Create Line** και τους δόθηκαν οι αντίστοιχες διαστάσεις. Προκειμένου να μπορέσουν να οριστούν με ακρίβεια οι τιμές των γωνιών αποβλίττου και ελευθερίας, σχεδιάστηκαν ακόμα δυο γραμμές έτσι ώστε να δεσμευθούν οι αντίστοιχες τιμές των γωνιών, οι οποίες και διεγράφησαν προτού δοθεί το κατάλληλο βάθος στο κοπτικό. Οι ακτίνες καμπυλότητας που μελετήθηκαν ήταν **0,04** και **0,08mm** και οι γωνίες αποβλίττου ήταν **15°** και **30°**. Η γωνία ελευθερίας ήταν πάντα **6°**.

Στις προσομοιώσεις που έγιναν, κάθε φορά που χρειαζόταν να αλλαχθεί το κοπτικό, απλά άλλαζε η δοσμένη διάσταση είτε στη γωνία αποβλίττου είτε στην ακτίνα καμπυλότητας.

### 3.2.3 Ορισμός των Υλικών της Προσομοίωσης

Εν συνεχεία, ορίστηκαν τα υλικά των τμημάτων της ανάλυσης και ανατέθηκαν στα αντίστοιχα σώματα της συναρμολόγησης. Το είδος των ιδιοτήτων του τεμαχίου που εισήχθησαν στο μοντέλο παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1.



ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ		
ΦΥΣΙΚΕΣ	Πυκνότητα ρ	
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ	Ελαστικότητα	Μέτρο Ελαστικότητας E
		Συντελεστής Poisson ν
	Πλαστικότητα	Μοντέλο Johnson-Cook
	Μοντέλο Αστοχίας	Μοντέλο Δυναμικής Αστοχίας Johnson-Cook
ΘΕΡΜΙΚΕΣ		Θερμική Αγωγιμότητα k
		Ειδική Θερμότητα c <sub>p</sub>
		Ποσοστό έργου που μετατρέπεται σε θερμότητα

Πίνακας 3.1: Ιδιότητες των υλικών του μοντέλου προσομοίωσης

Το μοντέλο που περιγράφει την πλαστική παραμόρφωση του υλικού που επιλέχθηκε για αυτό το σύνολο προσομοιώσεων είναι το μοντέλο πλαστικότητας **Johnson-Cook**. Αυτό το μοντέλο έχει χρησιμοποιηθεί σε πάρα πολλές μελέτες προσομοίωσης κατεργασιών στις οποίες ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι πολύ υψηλός. Συγκεκριμένα, το μοντέλο αυτό:

- Είναι ένα μοντέλο πλαστικής παραμόρφωσης με αναλυτικές μορφές των νόμων σκλήρυνσης και της εξάρτησης του ρυθμού παραμόρφωσης.
- Είναι κατάλληλο για πολύ γρήγορες παραμορφώσεις πολλών υλικών, συμπεριλαμβανομένων πολλών μετάλλων.
- Χρησιμοποιείται σε θερμικά αδιαβατικές δυναμικές προσομοιώσεις.
- Χρησιμοποιείται παράλληλα με το μοντέλο δυναμικής αστοχίας Johnson-Cook.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί παράλληλα με το μοντέλο της δυναμικής αστοχίας προκειμένου να προσδιοριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι νόμοι που διέπουν την εξέλιξη της παραμόρφωσης στην κοπή.
- Πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το μοντέλο ελαστικότητας.

Σύμφωνα με το μοντέλο πλαστικότητας Johnson-Cook, το **όριο διαρροής** του υλικού δίδεται από τον τύπο:

$$\bar{\sigma} = \left[ A + B \left( \bar{\epsilon}^{pl} \right)^n \right] \left[ 1 + C \times \left( \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] (1 - \theta^m) \text{ όπου:}$$

$\bar{\epsilon}^{pl}$  η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση και A, B, C, m, n οι παράμετροι του υλικού που έχουν προκύψει πειραματικά.

Το μοντέλο δυναμικής αστοχίας Johnson-Cook είναι ένα μοντέλο που έχει δημιουργηθεί συγκεκριμένα για χρήση μαζί με το μοντέλο πλαστικής παραμόρφωσης Johnson-Cook και είναι κατάλληλο μόνο για καταπονήσεις μετάλλων σε πολύ υψηλό ρυθμό. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην τιμή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στα πεπερασμένα στοιχεία ενώ η αστοχία συμβαίνει όταν η παράμετρος της παραμόρφωσης υπερβεί τη μονάδα. Η παράμετρος της παραμόρφωσης δίδεται από τη σχέση:

$$\omega = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}}$$

Όπου  $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$  είναι ένα διάστημα της πλαστικής παραμόρφωσης,  $\bar{\epsilon}_f^{pl}$  είναι η καταπόνηση στη θραύση του υλικού και το άθροισμα υπολογίζεται σε όλη την ανάλυση. Αυτή η καταπόνηση  $\bar{\epsilon}_f^{pl}$  στη θραύση του υλικού υποθέτεται ότι εξαρτάται από έναν **αδιάστατο ρυθμό πλαστικής παραμόρφωσης**  $\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0}$  όπου η σχέση που τα συνδέει είναι:



$$\overline{\varepsilon_f^{pl}} = [d_1 + d_2 e^{\frac{d_3 \times p}{q}}][1 + d_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\varepsilon_0}](1 + d_5 \theta) \text{ όπου:}$$

$d_1$ - $d_5$  είναι παράμετροι αστοχίας που έχουν προκύψει πειραματικά κάτω από τη θερμοκρασία μετάβασης και  $\varepsilon_0$  ο αναφορικός ρυθμός παραμόρφωσης.

Όταν ικανοποιείται αυτό το κριτήριο δυναμικής αστοχίας, τότε τα στοιχεία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων χάνουν την ικανότητα τους να αντέξουν το οποιοδήποτε φορτίο και υπάρχει η επιλογή να τα απομακρύνουμε από την ανάλυση όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Σημειώνεται, ότι όταν ξεκινήσει να συμβαίνει η δυναμική παραμόρφωση, οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων δεν μπορούν να αναπαραστήσουν το φαινόμενο με ικανοποιητική ακρίβεια διότι το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων σταματάει στη θραύση. Αυτές οι σχέσεις θα εμφάνιζαν μια πολύ ισχυρή εξάρτηση του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων σε τοπικές παραμορφώσεις. Ο **Hillerborg**, πρότεινε μια σχέση η οποία περιλαμβάνει την ενέργεια θραύσης  $G_f$  έτσι ώστε να μειώσει την εξάρτηση του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων από τη παραμόρφωση του υλικού. Η σχέση αυτή δίδεται από την εξίσωση:

$$G_f = \int_{\varepsilon_0^{pl}}^{\overline{\varepsilon_f^{pl}}} L \sigma_y d\varepsilon^{pl} = \int_0^{\overline{u_f^{pl}}} \sigma_y d\overline{u^{pl}} \text{ όπου:}$$

- $\overline{u^{pl}}$  η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση ως το έργο της θραύσης αφού έχει ξεπεραστεί το όριο διαρροής.
- $L$  το χαρακτηριστικό μήκος των στοιχείων του πλέγματος. Το μήκος αυτό εξαρτάται από το είδος του στοιχείου της ανάλυσης και για διάφορα στοιχεία διαφέρει. Αυτό συμβαίνει διότι δεν είναι γνωστή εξ αρχής η κατεύθυνση που θα έχει η παραμόρφωση.

Πρίν ξεκινήσει η παραμόρφωση, η παράμετρος  $\overline{u^{pl}}$  είναι ίση με 0. Όταν επέλθει κάποιο όριο, η δυσκαμψία του υλικού μειώνεται και η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση γίνεται  $\overline{u^{pl}} = L\varepsilon$ . Το πρόγραμμα δέχεται ως όρισμα την **ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση στην θραύση**  $\overline{u_f^{pl}}$ .

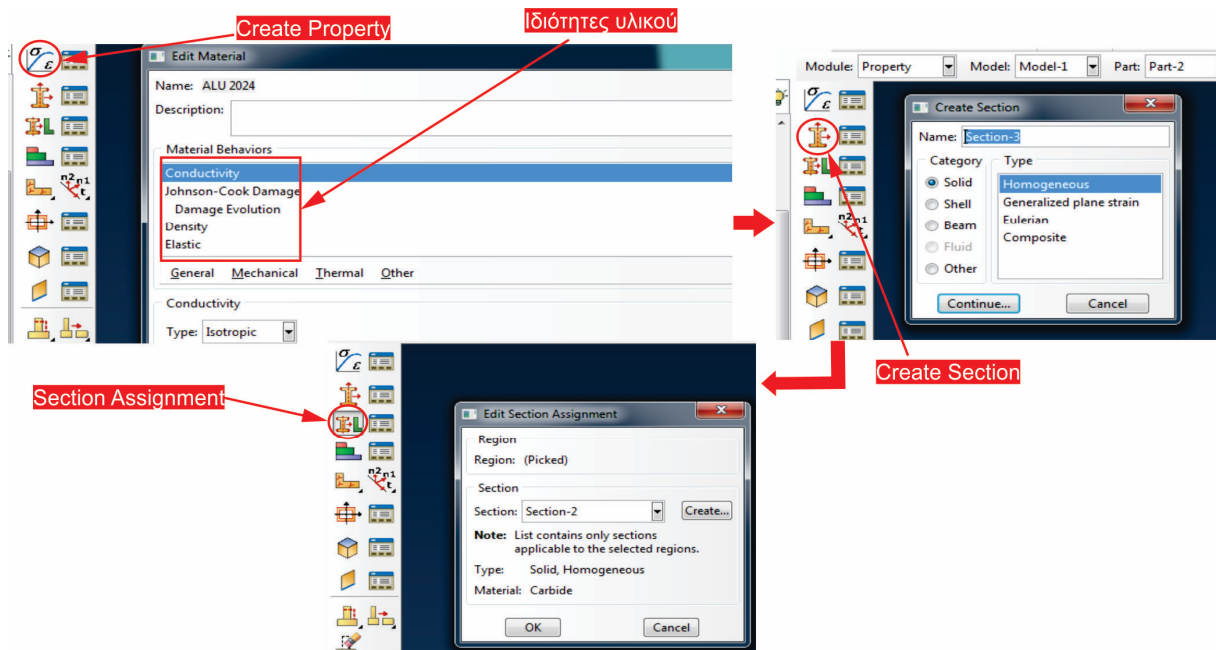
Στο Σχήμα 3.8 συνοψίζονται όλα τα παραπάνω σε έναν πίνακα που διαθέτει όλες τις παραμέτρους των υλικών του τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.

Το υλικό του κοπτικού εργαλείου ήταν ένα καρβίδιο του βολφραμίου (Tungsten Carbide) και δεδομένου ότι οι παραμορφώσεις που υφίσταται δεν είναι τόσο δυναμικής φύσεως όσο του τεμαχίου, δεν λήφθηκε υπόψη κάποιο μοντέλο πλαστικής παραμόρφωσης ή δυναμικής αστοχίας.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ				Al2024-T3	Tungsten Carbide
ΦΥΣΙΚΕΣ		Πυκνότητα ρ	[g/mm <sup>3</sup> ]	0.00278	0.0119
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ	Μέτρο ελαστικότητας, E	[MPa]	73100	534000
		Λόγος Poisson, ν		0.33	0.22
	ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ JOHNSON-COOK	Αρχική τάση διαρροής, A	[MPa]	369	
		Μέτρο σκλήρυνσης, B	[MPa]	684	
		Δείκτης θερμικής χαλάρωσης, m		1.7	
		Συντελεστής ρυθμού παραμόρφωσης, C		0.0083	
		n		0.73	
		Θερμοκρασία μετάβασης T <sub>trans</sub>	[K]	298	
		Θερμοκρασία τήξης T <sub>melt</sub>	[K]	823	
		Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης, $\dot{\epsilon}_0$	s <sup>-1</sup>	1	
	ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ JOHNSON-COOK	d <sub>1</sub>		0.112	
		d <sub>2</sub>		0.123	
		d <sub>3</sub>		-1.5	
		d <sub>4</sub>		0.011	
		d <sub>5</sub>		0	
ΘΕΡΜΙΚΕΣ		Θερμική αγωγιμότητα, k	[W/mm·k ]	150	
		Ειδική θερμότητα, c <sub>p</sub>	[mJ/tonne·K ]	890	
		Ποσοστό έργου που μετατρέπεται σε θερμότητα, γ		0.9	

Πίνακας 3.2: Ιδιότητες Al 2024 και κοπτικού εργαλείου που εισήχθησαν στο μοντέλο.

Για να εισαχθούν οι ιδιότητες αυτές στο μοντέλο προσομοίωσης, επιλέχθηκε το εργαλείο **Create Property** και συμπληρώθηκαν στο παράθυρο που άνοιξε. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν δυο διατομές στερεών (solid) για κάθε υλικό με την εντολή **Create Section** και προσδόθηκαν στα αντίστοιχα τμήματα με την εντολή **Section Assignment**. Η διαδικασία φαίνεται στο Σχήμα 3.8.

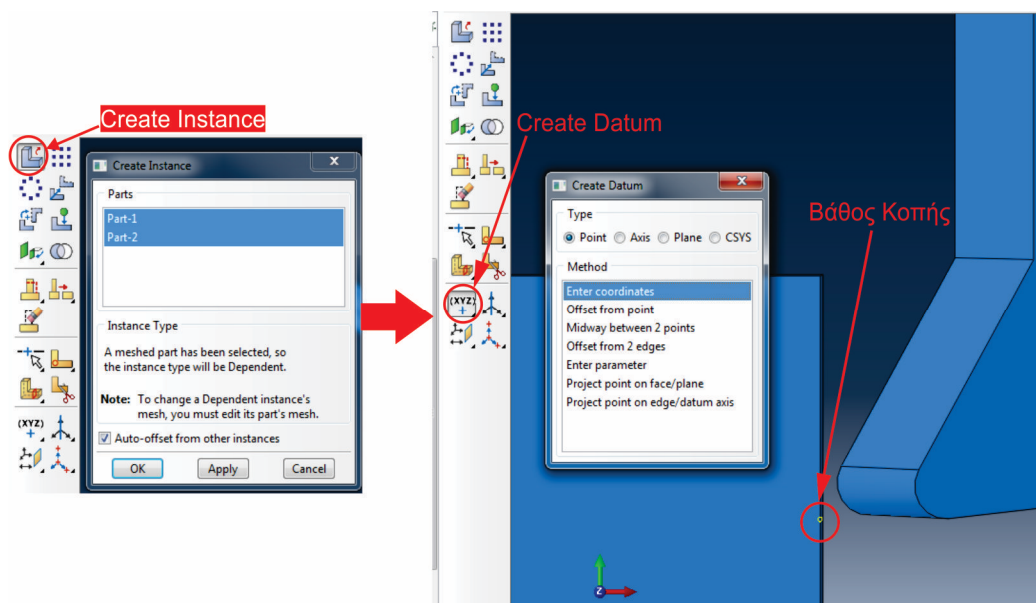


Σχήμα 3.8: Δημιουργία υλικών και διατομών

Με την ανάθεση των διατομών στα τμήματα της συναρμολόγησης, τελειώνει και αυτό το στάδιο του μοντέλου της προσομοίωσης.

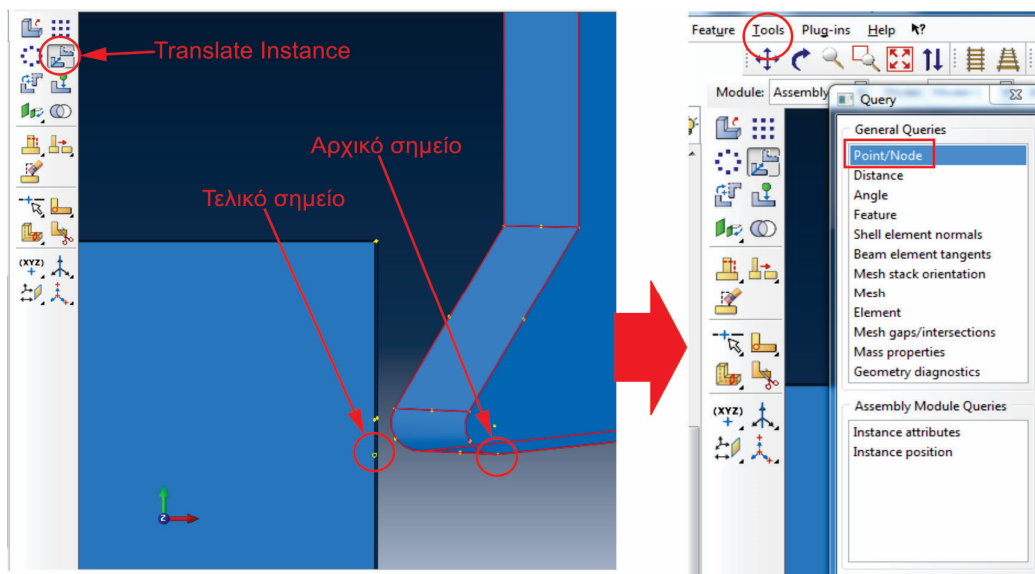
### 3.2.4 Συναρμολόγηση των Τμημάτων στον Χώρο

Έχοντας σχεδιάσει και καθορίσει όλες τις ιδιότητες των μεμονωμένων τμημάτων που θα λάβουν μέρος στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, μένει να συναρμολογηθούν σε μια αρχική θέση από την οποία θα ξεκινήσει η ανάλυση. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο **Create Instance**, με ενεργοποιημένη την εντολή που δεν επιτρέπει την αλληλοεπικάλυψη όγκων μεταξύ των τμημάτων, για να εισαχθούν τα δυο ήδη σχεδιασμένα τμήματα στον τρισδιάστατο χώρο. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένα σημείο με την εντολή **Create Datum**, το οποίο απέχει 0,3mm από την κορυφή του τεμαχίου έτσι ώστε να καθορισθεί με όσο το δυνατόν περισσότερη ακρίβεια το βάθος κοπής. Τα παραπάνω φαίνονται αναλυτικά στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9: Εισαγωγή τμημάτων στη συναρμολόγηση και δημιουργία βάθους κοπής

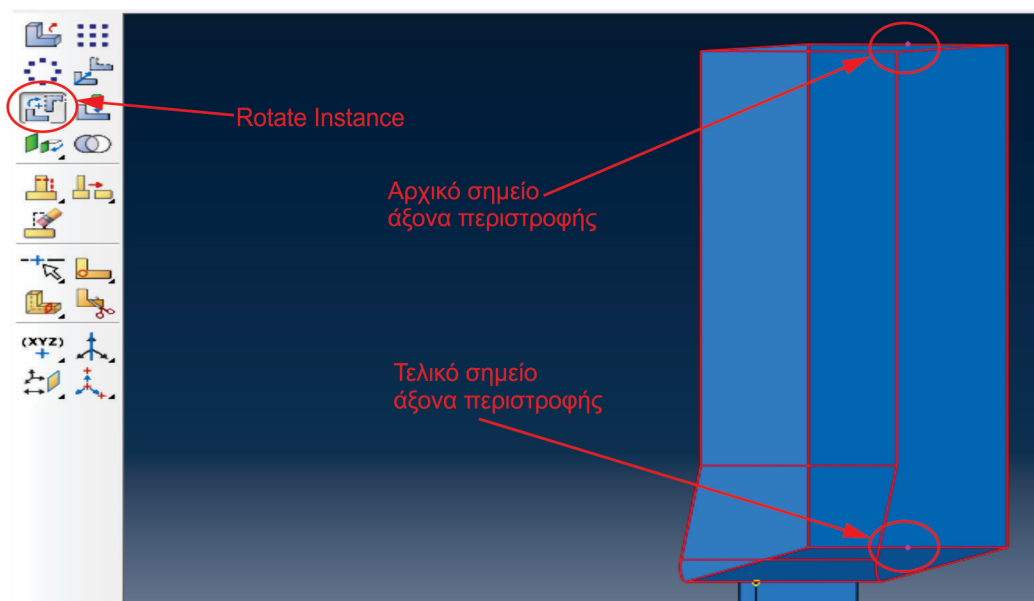
Στη συνέχεια μετακινήθηκε το κοπτικό εργαλείο στο σημείο που δημιουργήθηκε. Αυτό έγινε με την εντολή **Translate Instance**.



Σχήμα 3.10: Τελική τοποθέτηση τμημάτων

Αφού επιλέχθηκε αυτή η εντολή επιλέχθηκε ένα σημείο του κοπτικού εργαλείου το οποίο ήταν και το αρχικό σημείο και το σημείο που δημιουργήθηκε με την εντολή **Create Datum**. Έπειτα με τις εντολές **Tools->Query->Point/Node** βρέθηκαν οι ακριβείς συντεταγμένες του τελικού σημείου και πάλι με την εντολή **Translate Instance** το κοπτικό μετακινήθηκε τόσο ώστε να μην υπάρχει αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των τμημάτων δίδοντας μια απόσταση της τάξης του δεκάτου του χιλιοστού μεταξύ των δυο τμημάτων.

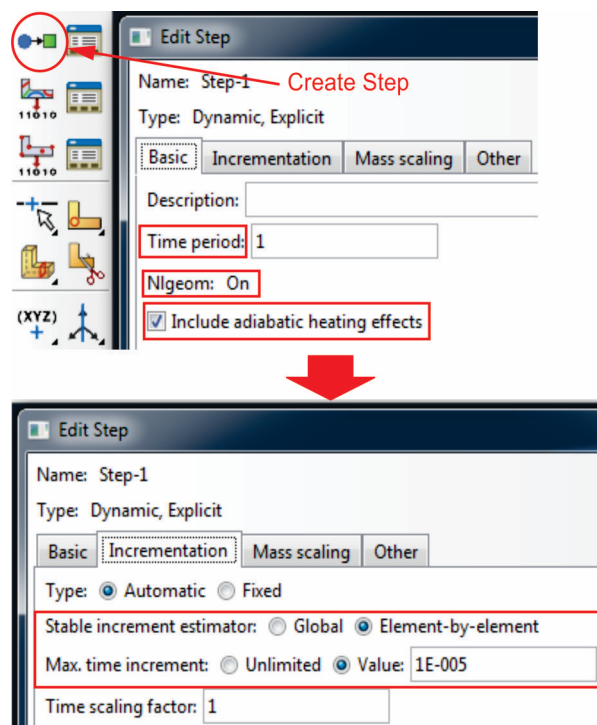
Για τις περιπτώσεις της λοξής κοπής, έπρεπε να συμβεί και μια περιστροφή γύρω από έναν άξονα που περνάει από το κέντρο του κοπτικού εργαλείου. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, χρησιμοποιήθηκε η εντολή **Rotate Instance**. Στη συνέχεια το πρόγραμμα χρειαζόταν ως όρισμα το αρχικό και το τελικό σημείο αυτού του άξονα περιστροφής. Αυτά τα σημεία επιλέχθηκαν ως φαίνεται στο Σχήμα 3.11. Οι γωνίες κλίσης που μελετήθηκαν ήταν  $15^\circ$  και  $30^\circ$ .



Σχήμα 3.11: Ορισμός άξονα περιστροφής

### 3.2.5 Προσδιορισμός του Χρονικού Βήματος και των Δεδομένων Εξόδου

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε το χρονικό βήμα στο οποίο θα εκτυλιχθεί η ανάλυση. Χρησιμοποιώντας την εντολή **Create Step** δημιουργήθηκε ένα βήμα άμεσης και δυναμικής (dynamic, explicit) ανάλυσης προκειμένου να προσομοιωθεί σωστά ένα φαινόμενο πολύ υψηλών παραμορφώσεων σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Στο παράθυρο που εμφανίζει το λογισμικό αφού ορισθεί το είδος του βήματος που πρέπει, ζητείται να ορισθεί η διάρκεια του χρονικού βήματος. Η διάρκεια του χρονικού βήματος ήταν κάτι που άλλαζε ανάλογα με τη πρόωση που είχαμε στο κοπτικό. Σε κάθε περίπτωση, σκοπός ήταν το κοπτικό εργαλείο να διανύει την ίδια απόσταση με διαφορετική πρόωση ανεξαρτήτως χρόνου. Οι χρονικές διάρκειες των βημάτων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν **1,5sec** για τη πρόωση των **200mm/min** και **1sec** για τη πρόωση των **300mm/min**. Σε κάθε περίπτωση, η απόσταση που διένυε το κοπτικό εργαλείο ήταν 5mm. Εκτός από τη διάρκεια του χρονικού βήματος, στο ίδιο παράθυρο δεχθήκαμε να συμπεριληφθούν αδιαβατικά θερμικά φαινόμενα στην ανάλυση. Επιπλέον, επειδή η κοπή είναι ένα δυναμικό φαινόμενο, στον ορισμό του χρονικού βήματος συμπεριλήφθησαν στη μελέτη και τα μη γραμμικά φαινόμενα επιλέγοντας τη λειτουργία **Nonlinear: On**.



Σχήμα 3.12: Δημιουργία χρονικού βήματος και καθορισμός παραμέτρων του

Το λογισμικό, στην αρχή της ανάλυσης θα χωρίσει τη διάρκεια του χρονικού βήματος σε άλλα επιμέρους μικρότερα έτσι ώστε να μπορέσει να εκτελέσει τους απαραίτητους υπολογισμούς. Στην προκειμένη περίπτωση λήφθηκε αυτή η διακριτοποίηση να γίνεται αυτόματα. Ειδικά, θα έπρεπε να ορισθεί μια τιμή για την απόσταση στα επιμέρους χρονικά διαστήματα που θα έπρεπε να χωριστεί ή θα μπορούσε να υπολογιστεί αυτόματα από το λογισμικό λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων. Αφού επιλέχθηκε να γίνεται αυτόματα, σειρά είχε να επιλεγεί εάν στον υπολογισμό του θα λάβει υπόψη το μέγεθος των στοιχείων όπως αυτό εξελίσσεται στην ανάλυση ή όχι. Επιλέχθηκε να το λάβει υπόψη και στη συνέχεια δόθηκε μια μέγιστη τιμή για το χρονικό διάστημα που μπορεί το πρόγραμμα να υπολογίσει. Προκειμένου να υπάρχει μια σταθερότητα στη μέθοδο, επιλέχθηκε η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει το χρονικό διάστημα να είναι **0.00001s**. Το χρονικό διάστημα αυτό (**Stable Time Increment**) ορίζεται ως εξής

$$\Delta t = \frac{L}{C_d} \text{ όπου:}$$

- L το χαρακτηριστικό μήκος των πεπερασμένων στοιχείων.
- $C_d$  η ταχύτητα του κύματος των τάσεων.

Αυτή η ταχύτητα  $C_d$  δίδεται από τον τύπο:

$$C_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ όπου:}$$

- E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.
- $\rho$  η πυκνότητα του υλικού.

Σε προβλήματα με πολύ υψηλό ρυθμό παραμορφώσεων όπως οι κοπές, η απότομη μείωση του μήκους L έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του χρονικού διαστήματος. Ως αποτέλεσμα, εάν αυτό το χρονικό διάστημα έμενε σταθερό ενώ μειωνόταν το χαρακτηριστικό μήκος των πεπερασμένων στοιχείων η ταχύτητα διάδοσης της τάσης θα μειωνόταν ενώ η πραγματική ταχύτητα παραμόρφωσης θα παρέμενε σε πολύ υψηλά επίπεδα. Όταν η τιμή του  $\Delta t$  ξεπεράσει τη μονάδα, η ανάλυση τερματίζεται με σφάλμα. Όλες αυτές οι δυσκολίες ξεπερνιούνται εάν επιλεγεί ο αυτόματος υπολογισμός του χρονικού διαστήματος δίδοντας απλά μια μέγιστη τιμή.

Στη συνέχεια, καθορίστηκαν τα δεδομένα εξόδου που έπρεπε να υπολογιστούν στην ανάλυση. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα να επιλεγεί κάθε πότε πρέπει να κρατήσει αρχείο για τα αποτελέσματα των δεδομένων εξόδου. Αυτό μπορεί να γίνεται για όλο το μοντέλο ή μόνο για κάποιες συγκεκριμένες λειτουργίες του. Στη περίπτωση της ανάλυσης της κοπής ήταν αρκετό να επιλεγούν όλα τα δεδομένα εξόδου που είχε by default το λογισμικό για μια άμεση και δυναμική ανάλυση και να προστεθεί άλλο ένα που είχε να κάνει με την κατάσταση των στοιχείων του πλέγματος. Σύμφωνα με το δεδομένο εξόδου **STATUS** του λογισμικού, επιτρέπεται στην ανάλυση να απομακρύνει όσα στοιχεία έχουν παραμορφωθεί πέρα από το επιτρεπτό όριο όπως αυτό έχει ορισθεί από τις παραμέτρους των υλικών του μοντέλου. Επιπλέον, δόθηκε η εντολή στο λογισμικό να κρατάει τα αποτελέσματα ανά 20 ίσα χρονικά διαστήματα. Αυτό έχει ως αντίκτυπο, να φανούν 20 στιγμιότυπα στο τέλος της ανάλυσης καθώς και 20 διαφορετικές τιμές για τα δεδομένα εξόδου όπου αυτά υπολογίζονται.

Στον Πίνακα 3.3 φαίνονται συγκεντρωμένα όλα τα δεδομένα εξόδου που χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις προσομοιώσεις. Όσον αφορά το ιστορικό εξόδου, στο λογισμικό δόθηκε η εντολή να κρατήσει αρχείο για τις συνολικές ενέργειες του μοντέλου προσομοίωσης.

Κατηγορία δεδομένων εξόδου	Λέξη κλειδί	Περιγραφή
ΤΑΣΕΙΣ	S	Όλες οι συνιστώσες των κύριων τάσεων καθώς και η ισοδύναμη τάση Von Mises
	SVAVG	
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ	PE	Όλες οι συνιστώσες της πλαστικής παραμόρφωσης Μέση πλαστική παραμόρφωση
	PEAVG	
	PEEQ	Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση
	PEEQAVG	Μέση ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση
	LE	Λογαριθμική παραμόρφωση – όλες οι συνιστώσες
ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΙΣ	U	Όλες οι συνιστώσες και η συνισταμένη των γραμμικών και γωνιακών μετατοπίσεων
	V	Όλες οι συνιστώσες και η συνισταμένη των γραμμικών και γωνιακών ταχυτήτων

	A	Όλες οι συνιστώσες και η συνισταμένη των γραμμικών και γωνιακών επιταχύνσεων
ΔΥΝΑΜΕΙΣ	RF	Δυνάμεις αντίδρασης
	NFORCE	Δυνάμεις στους κόμβους (λόγω τάσεων)
ΕΠΑΦΗ	CSTRESS	Τάσεις λόγω επαφής
	CFORCE	Δυνάμεις λόγω επαφής
ΑΣΤΟΧΙΑ	SDEG	Υποβάθμιση της δυσκαμψίας των στοιχείων
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	STATUS	Κατάσταση των στοιχείων (ύπαρξη ή μη)

Πίνακας 3.3: Δεδομένα εξόδου

### 3.2.6 Δημιουργία Πλέγματος Πεπερασμένων Στοιχείων

Ίσως το βασικότερο στάδιο στην ανάπτυξη οποιουδήποτε μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, είναι η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Τα συνεχή σώματα χωρίζονται σε τριεδρικά, τετραεδρικά ή εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία τα οποία έχουν πλευρές, ακμές και κορυφές. Το λογισμικό αυτό δίνει τη δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε κατηγορίες στοιχείων, ανάλογα με το πρόβλημα που πρέπει να μοντελοποιηθεί. Οι κατηγορίες χωρίζονται με βάση τις ιδιότητες των στοιχείων που είναι αυτές οι οποίες χαρακτηρίζουν και καθορίζουν τη συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Η κατηγοριοποίηση των στοιχείων γίνεται με βάση:

- Την οικογένεια τους.
- Τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας τους.
- Τον αριθμό των κόμβων τους.
- Τη μαθηματική διατύπωση τους.
- Το βαθμό ολοκλήρωσης τους.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, οι μετατοπίσεις υπολογίζονται πρώτα στους κόμβους των στοιχείων και στη συνέχεια μέσω παρεμβολής, υπολογίζονται και στα υπόλοιπα σημεία των στοιχείων. Συνήθως η σειρά της παρεμβολής καθορίζεται από τον αριθμό των κόμβων του στοιχείου. Ενδεικτικά:

- Στοιχεία που περιέχουν κόμβους μόνο στις κορυφές τους χρησιμοποιούν γραμμική παρεμβολή σε κάθε κατεύθυνση και καλούνται γραμμικά στοιχεία ή στοιχεία πρώτης τάξης.
- Στοιχεία που περιέχουν κόμβους εκτός από τις κορυφές και στο μέσο των ακμών τους χρησιμοποιούν τετραγωνική παρεμβολή και καλούνται τετραγωνικά στοιχεία ή στοιχεία δεύτερης τάξης.
- Τριγωνικά ή τετραεδρικά στοιχεία που περιέχουν κόμβους και στο μέσο των ακμών τους, χρησιμοποιούν τροποποιημένη παρεμβολή δεύτερης τάξης και καλούνται τροποποιημένα στοιχεία ή τροποποιημένα στοιχεία δεύτερης τάξης.

Η μαθηματική διατύπωση των στοιχείων εξαρτάται από τον τρόπο που μοντελοποιείται το πρόβλημα. Στην πλειοψηφία των προβλημάτων όπου οι μεταβλητές εξόδου είναι οι μετατοπίσεις και κατά συνέπεια οι παραμορφώσεις, χρησιμοποιείται ο τρόπος μοντελοποίησης κατά Lagrange όπου το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων μετατοπίζεται μαζί με το υλικό. Στον τρόπο μοντελοποίησης κατά Euler, το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων είναι σταθερό στο χώρο ενώ το υλικό ρέει στο χώρο. Αυτός ο τρόπος μοντελοποίησης χρησιμοποιείται περισσότερο σε προβλήματα μηχανικής ρευστών. Στις προσομοιώσεις ορθογωνικής και λοξής κοπής χρησιμοποιήθηκε ο τρόπος μοντελοποίησης κατά Lagrange.

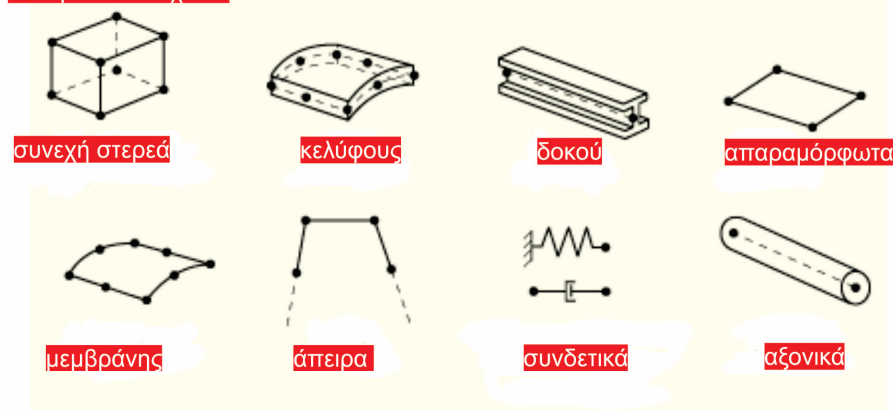


Όσον αφορά την ολοκλήρωση, το λογισμικό χρησιμοποιεί διάφορες τεχνικές ολοκλήρωσης προκειμένου να υπολογίσει διάφορα μεγέθη του όγκου κάθε στοιχείου επιτρέποντας έτσι να υπάρχει μια γενικότητα στη συμπεριφορά κάθε υλικού. Για τα περισσότερα στοιχεία, το λογισμικό χρησιμοποιεί **τετραγωνισμό Gauss** για να υπολογίσει τη συμπεριφορά του υλικού στα σημεία ολοκλήρωσης. Μερικά συνεχή στοιχεία μπορούν να έχουν τη δυνατότητα ολοκλήρωσης ή **μειωμένης ολοκλήρωσης**, γεγονός που έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Ο τετραγωνισμός Gauss για τον υπολογισμό ενός ολοκληρώματος έχει τον ακόλουθο τύπο:

$$\int_{-1}^1 f(x) = \sum_{i=1}^n w_i f(x_i)$$

Όπου  $f(x)$  η συνάρτηση προς ολοκλήρωση και  $w_i$  τα βάρη της μεθόδου. Τα άκρα υπολογισμού του ολοκληρώματος αποφασίζονται από το πρόγραμμα. Με τη μειωμένη ολοκλήρωση, μειώνονται τα ζεύγη στοιχείων  $(x_i, f(x_i))$  που χρειάζεται ο προσεγγιστικός τύπος. Προφανώς, όσο περισσότερα είναι αυτά τα στοιχεία, τόσο πιο ακριβής είναι και η τελική λύση αλλά αυτό πρέπει να ζυγιστεί έναντι του συνολικού υπολογιστικού χρόνου. Χρησιμοποιώντας τη μειωμένη ολοκλήρωση, θα υπάρχει μειωμένος υπολογιστικός χρόνος αλλά και ένα αντίκτυπο στην ακρίβεια υπολογισμών των στοιχείων. Σε μη γραμμικά προβλήματα υψηλών ρυθμών παραμορφώσεων η μειωμένη ολοκλήρωση βοηθάει, διότι το λογισμικό τείνει να υπολογίζει υπερβολικά πολλά σημεία ολοκλήρωσης τα οποία δεν έχουν κάποια ιδιαίτερη σημασία διότι αλλάζουν ταχύτατα. Στο Σχήμα 3.13 φαίνονται ενδεικτικά κάποιοι χωρισμοί πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιεί το λογισμικό. Ανάλογα τις ιδιότητες των υλικών και τις επιλογές που γίνονται όσον αφορά τον σχεδιασμό των τμημάτων, το λογισμικό αρχικά διαλέγει αυτόματα έναν τύπο στοιχείων για να δημιουργήσει το πλέγμα. Αυτός ο τύπος μπορεί να αλλάξει αναλόγως τις επόμενες κινήσεις που θα γίνουν σχετικά με την τοπολογία των κόμβων αλλά και τις ιδιότητες των στοιχείων όπως αυτές θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

#### Οικογένεια στοιχείων

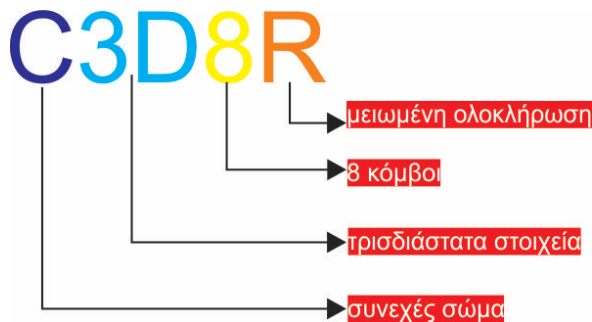


#### Αριθμός κόμβων



Σχήμα 3.13: Κατηγοριοποίηση στοιχείων

Στο συγκεκριμένο μοντέλο, επιλέχθηκαν τα **C3D8R τρισδιάστατα εξαεδρικά** στοιχεία τριών βαθμών ελευθερίας και 8 κόμβων λόγω της δυνατότητας που προσφέρουν για τη δημιουργία ενός δομημένου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 3.14: Κωδική ονομασία στοιχείων της προσομοίωσης

Για να δημιουργηθεί το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στο κοπτικό εργαλείο χρησιμοποιήθηκε αρχικά την εντολή **Mesh->Mesh Controls** και επιλέχθηκε να γίνει ένα **Swept mesh**. Σύμφωνα με αυτή την επιλογή η οποία χρησιμοποιείται για την πλεγματοποίηση πολύπλοκων τρισδιάστατων τεμαχίων:

- Δημιουργείται ένα πλέγμα σε μια επιφάνεια του τεμαχίου, το οποίο ονομάζεται πηγαίο πλέγμα.
- Στη συνέχεια το λογισμικό αντιγράφει τους κόμβους αυτού του πλέγματος, ένα στοιχείο τη φορά, μέχρι την αντίθετη επιφάνεια. Το λογισμικό αντιγράφει τους κόμβους κατά μήκος μιας ακμής του τεμαχίου, η οποία ονομάζεται ακμή σαρώσεως.

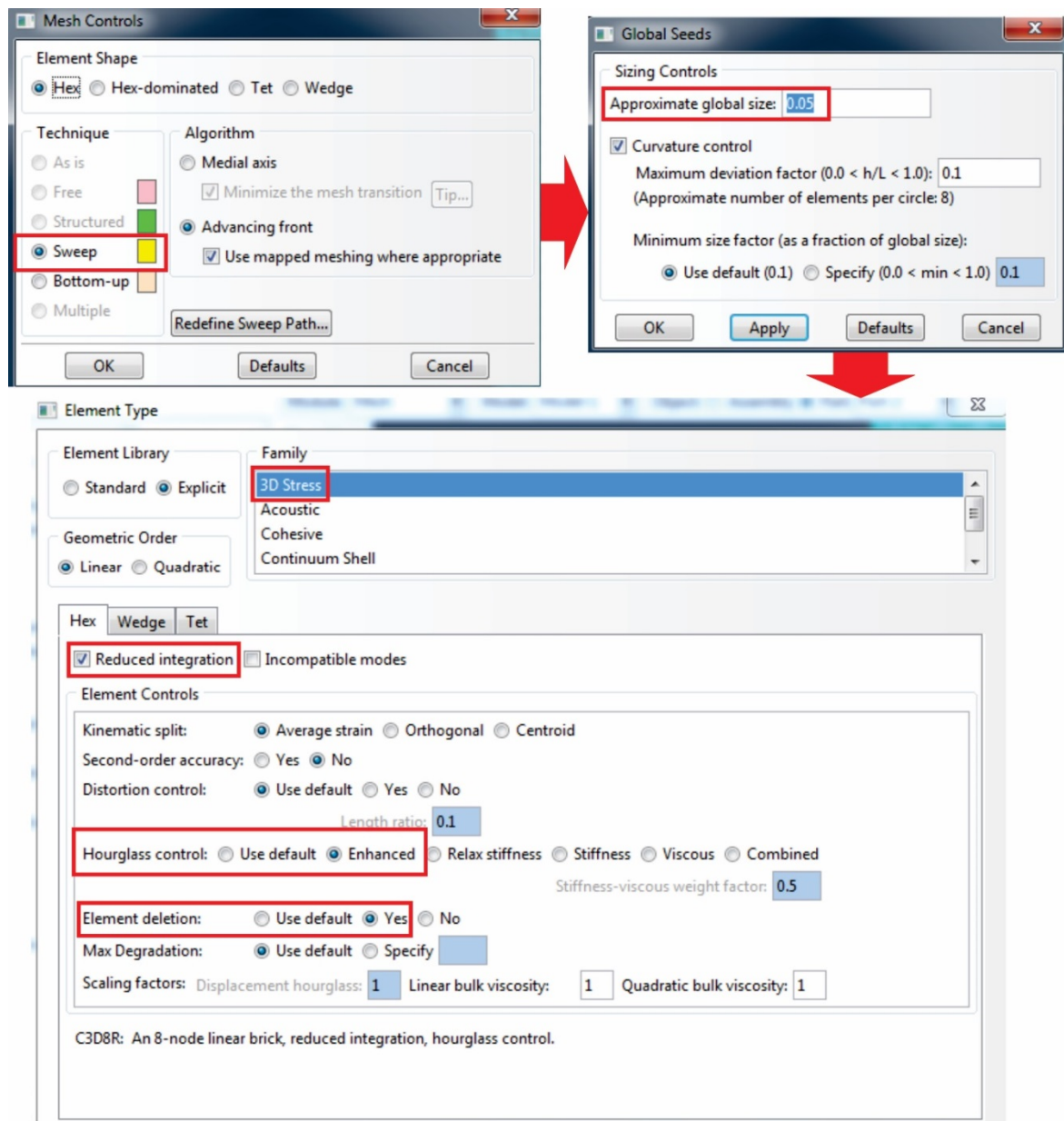
Στη συνέχεια, με την εντολή **Seed Part** δώθηκε το μέσο μέγεθος που έπρεπε να έχουν τα πεπερασμένα στοιχεία με τα οποία θα πλεγματοποιηθεί το τεμάχιο. Έπειτα, με τις εντολές **Mesh->Element Type** καθορίστηκε το είδος των στοιχείων του κοπτικού εργαλείου σύμφωνα με τα παραπάνω. Ολόκληρη η διαδικασία φαίνεται στο Σχήμα 3.15. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε και η επιλογή **Enhanced hourglass control**. Το φαινόμενο hourglassing, συμβαίνει σε συνεχή στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης όπως και αυτά που χρησιμοποιούνται σε αυτή την ανάλυση και έχει να κάνει με τον μηδενισμό κάποιων ενεργειών παρόλο που υπάρχει παραμόρφωση.



Σχήμα 3.15: Hourglassing

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.18, εάν ασκηθούν δυο ίδιες αλλά αντίρροπες ροπές στο σώμα, θα αλλάξει το σχήμα του αλλά το μήκος των διακεκομμένων γραμμών θα παραμείνει σταθερό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι συγκεκριμένοι βαθμοί ελευθερίας να έχουν μηδενική μετατόπιση και κατά συνέπεια μηδενική τάση. Προκειμένου να αποφευχθούν τέτοια φαινόμενα, χρησιμοποιήθηκε η επιλογή για ενισχυμένο έλεγχο αυτού του φαινομένου.

Επιπλέον, διαλέχτηκε η επιλογή **Element Deletion** προκειμένου να διαγράφονται τα στοιχεία σύμφωνα με το μοντέλο πλαστικής αστοχίας που εισήχθηκε.



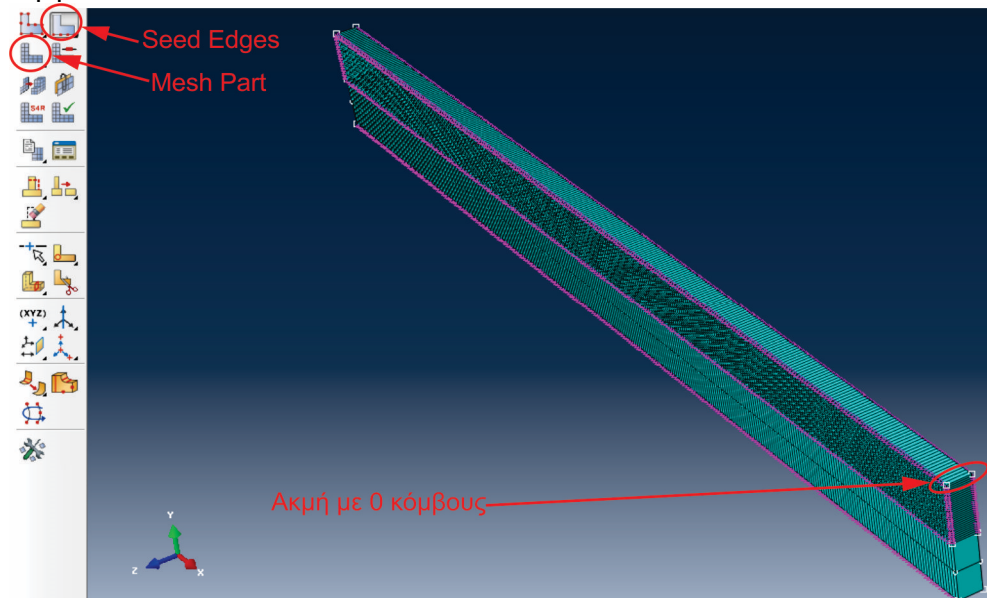
Σχήμα 3.16: Διαδικασία πλεγματοποίησης κοπτικού εργαλείου

Για την δημιουργία πλέγματος του τεμαχίου ακολουθήθηκε λίγο διαφορετική διαδικασία. Όπως αναφέρθηκε, εξαιτίας του τρόπου μοντελοποίησης Lagrange, το πλέγμα του τεμαχίου θα έπρεπε να είναι πυκνό κοντά στην περιοχή που συνέβαινε η κοπή. Για αυτό το ανώτερο τμήμα του τεμαχίου πλεγματοποιήθηκε με την επιλογή **Mesh->Mesh Controls** και επιλέχθηκε το **Structured**. Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκε ένα δομημένο πλέγμα χρησιμοποιώντας μια καθορισμένη τετραγωνική τοπολογία στοιχείων. Για το κατώτερο τμήμα του τεμαχίου, χρησιμοποιήθηκε η εντολή **Mesh->Mesh Controls** και επιλέχθηκε το **Sweep** όπως και στο κοπτικό εργαλείο.

Για να είναι πιο πυκνό το πλέγμα στο ανώτερο τμήμα του τεμαχίου καθώς και να έχει μορφή αλληπαλλήλων στρωμάτων έγιναν τα εξής βήματα:

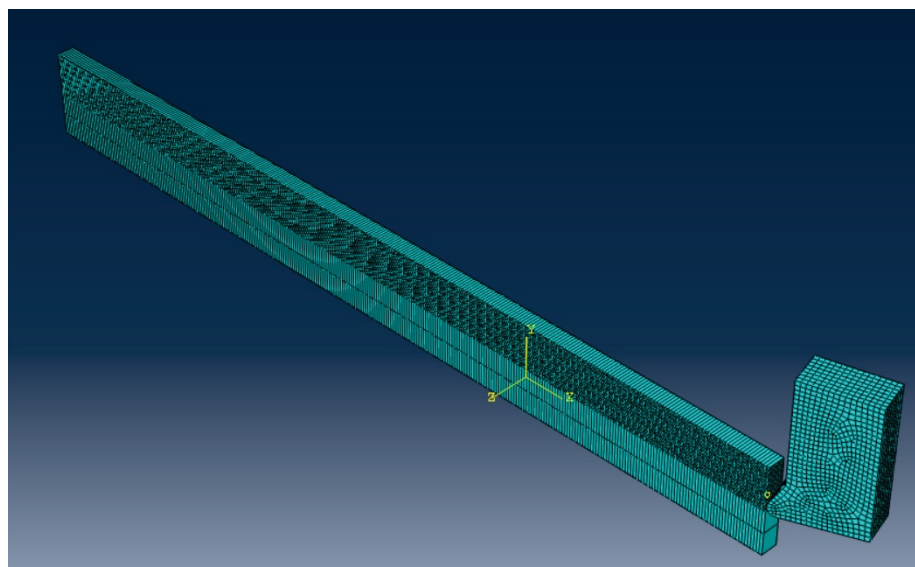
- Με την εντολή **Seed Edges** δόθηκε ο ίδιος αριθμός κόμβων στις απέναντι οριζόντιες πλευρές του ανώτερου τμήματος του τεμαχίου. Επίσης δόθηκε ο ίδιος αριθμός στις απέναντι κάθετες πλευρές του.
- Χρησιμοποιώντας την ίδια εντολή, φροντίστηκε η ακμή η οποία καθόρισε το βάθος του τεμαχίου να μην έχει καθόλου κόμβους έτσι ώστε τα στοιχεία να έχουν τη μορφή

ορθογωνίων παραλληλεπιπέδων τα οποία είναι πάντα κάθετα στην διεύθυνση κίνησης του κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 3.17: Τελικό πλέγμα τεμαχίου

Στο Σχήμα 3.18 φαίνεται η τελική συναρμολόγηση μαζί με το τελικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Αξίζει να αναφερθεί, ότι εάν δεν είχε ληφθεί υπόψη η ακτίνα καμπυλότητας της μύτης του κοπτικού εργαλείου, θα πλεγματοποιούνταν και το κοπτικό με τη τεχνική **Structured** και όχι με την τεχνική **Sweep**. Με την τεχνική πλεγματοποίησης Structured, δημιουργείται ένα πλέγμα τα στοιχεία του οποίου δεν έχουν σημαντικές αλλαγές στο μέγεθος τους διότι βασίζονται στο ίδιο γεωμετρικό σχήμα αλλά όπως είναι προφανές, με αυτό τον τρόπο δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν τμήματα με πιο πολύπλοκες γεωμετρίες.



Σχήμα 3.18: Τελικό πλέγμα συναρμολόγησης

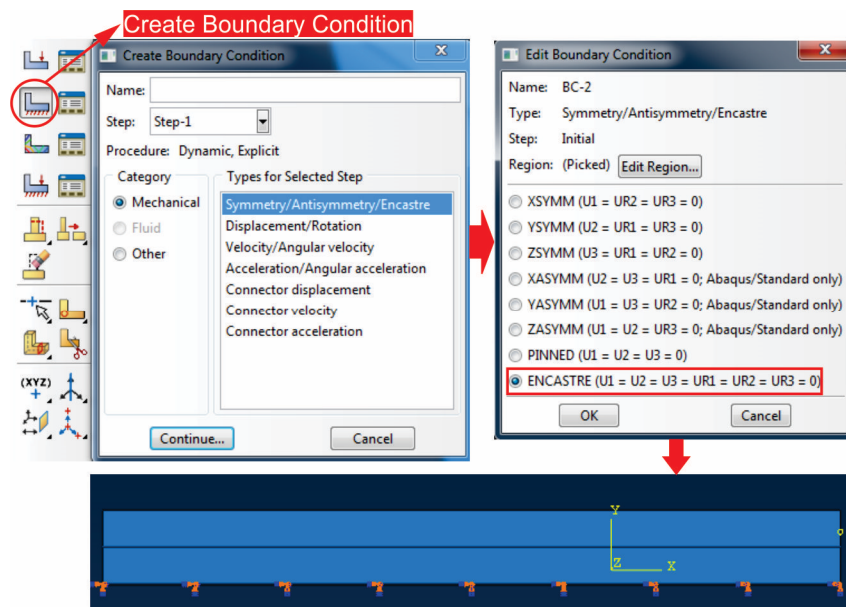
Προκειμένου να βρεθεί το κατάλληλο μέγεθος στοιχείων για το τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο, έγιναν πολλές δοκιμές στις οποίες άλλαζε η πλεγματοποίηση αλλά και ορισμένες από τις ιδιότητες των υλικών που εξαρτώνται από το μέγεθος των στοιχείων. Εν τέλει υιοθετήθηκε το πλέγμα το οποίο λειτούργησε για όλες τις περιπτώσεις και έδινε ρεαλιστικά

αποτελέσματα όσον αφορά τις τάσεις και τις μετατοπίσεις των κόμβων αλλά λαμβάνοντας υπόψη και τον παράγοντα του χρόνου της προσομοίωσης

### 3.2.7 Ορισμός Συνοριακών Συνθηκών

Αφού ορίστηκε και το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων ολόκληρης της συναρμολόγησης, σειρά έχει να οριστούν οι συνοριακές συνθήκες που επιτρέπουν την ομαλή διεξαγωγή της κοπής. Συνολικά σε κάθε προσομοίωση ορίστηκαν δυο συνοριακές συνθήκες. Μια συνθήκη ορίστηκε για την πάκτωση του τεμαχίου στον τρισδιάστατο χώρο και άλλη μια για την κίνηση του κοπτικού εργαλείου προς μια κατεύθυνση δεσμεύοντας κάθε άλλη κίνηση προς οποιαδήποτε άλλη κατεύθυνση.

Σε προβλήματα τρισδιάστατων μετατοπίσεων, το λογισμικό ορίζει για κάθε κόμβο έξι βαθμούς ελευθερίας. Αυτοί οι βαθμοί ελευθερίας έχουν να κάνουν με τη μετατόπιση στους τρεις άξονες του τρισδιάστατου χώρου και με τη περιστροφή στους τρεις αυτούς άξονες. Με τον ορισμό των συνοριακών συνθηκών δίδεται μια τιμή σε αυτούς τους βαθμούς ελευθερίας η οποία τιμή αποτελεί έναν οριακό περιορισμό φορτίων, μετατοπίσεων, ταχυτήτων ή επιταχύνσεων ανάλογα με το είδος της οριακής συνθήκης. Και οι δυο συνοριακές συνθήκες του μοντέλου ορίστηκαν από την εντολή **Create Boundary Condition** του λογισμικού. Η συνοριακή συνθήκη για την πάκτωση του τεμαχίου ορίστηκε στην κατώτατη επιφάνεια του. Έτσι, οι βαθμοί ελευθερίας στη περιφέρεια αλλά και στην περιοχή που συνέβαινε η κοπή παρέμειναν κενοί με αποτέλεσμα να υπάρχει πλήρης αντίδραση στους αντίστοιχους κόμβους έτσι ώστε τα αποτελέσματα να παρουσιάζαν τον μέγιστο δυνατό βαθμό ρεαλισμού. Σύμφωνα με την κατάσταση **ENCASTRE** της συνοριακής συνθήκης μηδενίστηκαν και οι έξι βαθμοί ελευθερίας της κατώτατης επιφάνειας του τεμαχίου. Αυτό σημαίνει, ότι η συγκεκριμένη επιφάνεια θα έχει μηδενική μετατόπιση στους τρεις άξονες του χώρου καθώς και μηδενική περιστροφή στους τρεις αυτούς άξονες.

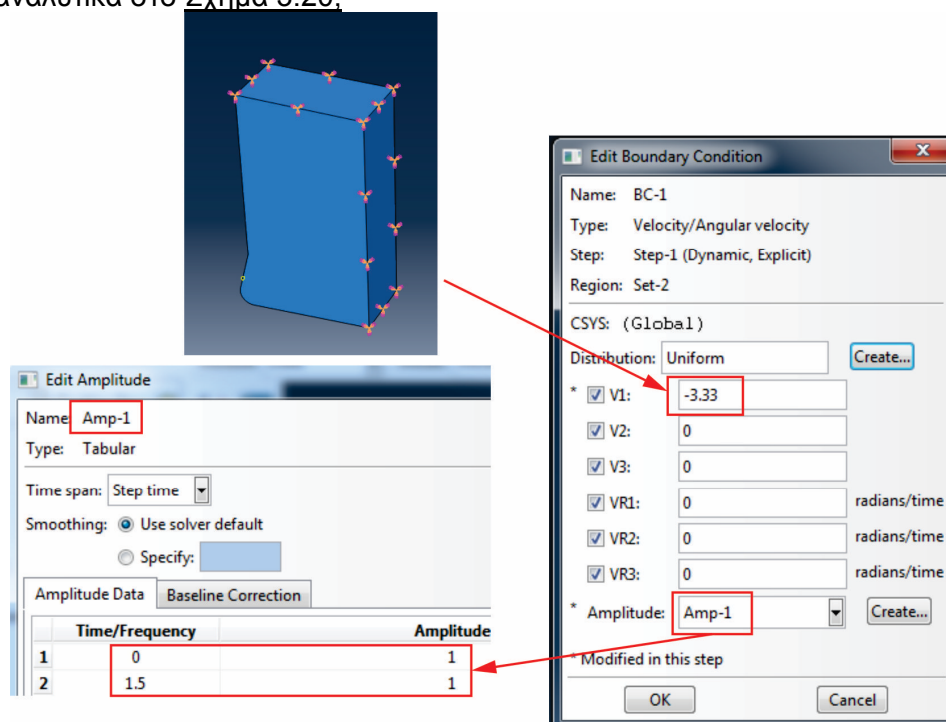


Σχήμα 3.19: Πάκτωση τεμαχίου

Για τον ορισμό της συνοριακής συνθήκης που δίνει τη κίνηση του κοπτικού εργαλείου δεσμεύτηκαν οι βαθμοί ελευθερίας δυο επιφανειών του κοπτικού. Εάν δεσμεύονταν οι βαθμοί ελευθερίας όλου του του κοπτικού εργαλείου, τότε θα είχε επιτευχθεί η επιθυμητή κίνηση του κοπτικού αλλά δεν θα ήταν δυνατόν να μελετηθούν οι τάσεις του διότι η αντίδραση θα ήταν μηδενική από τη στιγμή που η μόνη επιλογή θα ήταν να κινηθεί προς το τεμάχιο. Οι



επιφάνειες που επιλέχθηκε να δεσμευθούν ήταν οι δυο κάθετες μεταξύ τους επιφάνειες που βρίσκονται πιο μακριά από το σημείο επαφής έτσι ώστε να μην επηρεαστεί καθόλου η κοπή. Με αυτό τον τρόπο δεσμεύθηκαν οι τρεις βαθμούς μετατοπίσεων των δυο σετ. Στη συνέχεια από την εντολή **Create Boundary Condition**, δημιουργήθηκε μια συνοριακή συνθήκη για ταχύτητα **Velocity/Angular Velocity** και ως περιοχή επίδρασης της επιλέχθηκαν οι εν λόγω επιφάνειες. Προκειμένου να ορισθεί μια ταχύτητα σε ένα πρόβλημα δυναμικής και άμεσης επίλυσης, το λογισμικό απαιτεί την εισαγωγή ενός πλάτους (**Amplitude**) κατά το οποίο η ταχύτητα αυτή θα διαδοθεί στο χρόνο. Στη περίπτωση της κοπής δεν λήφθηκε υπόψη κάποια εξωτερική αντίσταση οπότε θεωρήθηκε σκόπιμο η διάδοση αυτή να είναι σταθερή για όλο το πέρας της διάρκειας του χρονικού βήματος. Οπότε χρησιμοποιήθηκε η εντολή **Create Amplitude** από το παράθυρο επεξεργασίας της οριακής συνθήκης έτσι ώστε από την αρχή μέχρι το τέλος το πλάτος διάδοσης της ταχύτητας να είναι το ίδιο. Για να γίνει αυτό δόθηκαν οι τιμές **0** και **1** στη πρώτη στήλη που σημαίνει ότι τη χρονική στιγμή **0** το κοπτικό θα έχει το **100%** της ταχύτητας που εισήχθηκε στη συνοριακή συνθήκη και τις τιμές **1,5** και **1** που σημαίνει ότι τη χρονική στιγμή **1,5** το κοπτικό θα έχει ακόμα το **100%** της ταχύτητας που εισήχθηκε στην συνοριακή συνθήκη. Οι τελικοί χρόνοι που εισήχθησαν στον ορισμό του πλάτους ήταν πάντα η **διάρκεια του εκάστοτε χρονικού βήματος** (1 ή 1,5). Το λογισμικό υπολογίζει την εισαγόμενη ταχύτητα ως **μονάδα μέτρησης μήκους/μονάδα χρόνου**. Όλα έχουν σχεδιαστεί βάση χιλιοστών και όλες οι διαστάσεις χρόνου που έχουν εισαχθεί είναι βάση δευτερολέπτων. Οπότε οι προώσεις θα πρέπει να εισαχθούν στη μορφή mm/sec. Σύμφωνα με τις μετατροπές αυτές, η πρόωση για **200mm/min** έπρεπε να εισαχθεί ως **3,33mm/sec** και η πρόωση για **300mm/min** έπρεπε να εισαχθεί ως **5mm/sec**. Η διαδικασία φαίνεται αναλυτικά στο Σχήμα 3.20.

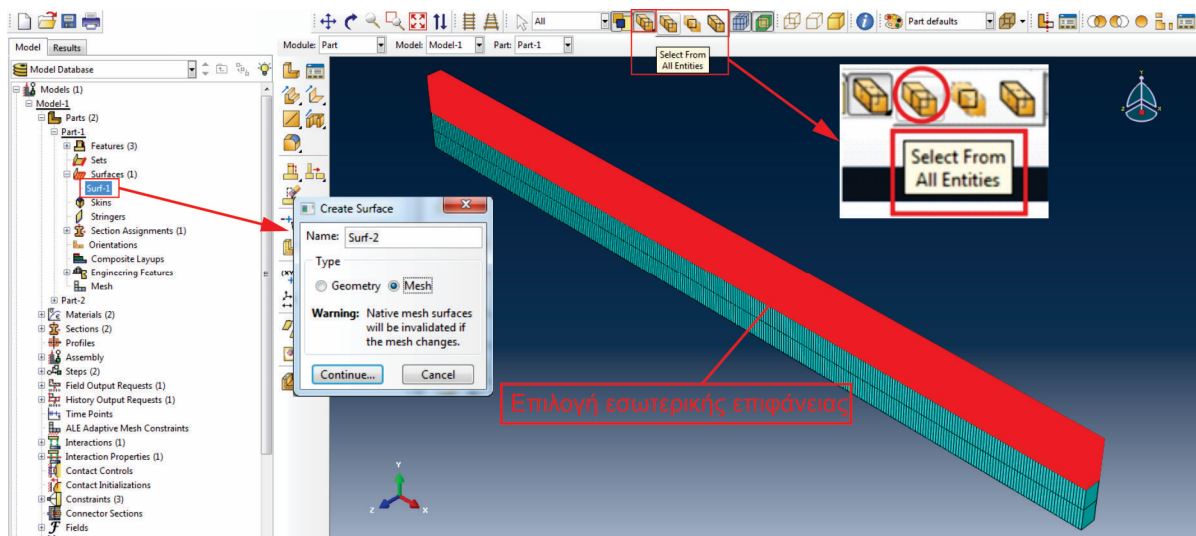


Σχήμα 3.20: Συνοριακή συνθήκη ταχύτητας κοπτικού για πρόωση 200mm/min

### 3.2.9 Ορισμός Επαφής Κοπτικού Εργαλείου-Τεμαχίου

Το λογισμικό έχει έναν πολύ ιδιαίτερο αλγόριθμο ονόματι **General Contact** ο οποίος μπορεί να ορίσει μια επαφή μεταξύ μιας επιφάνειας και όλων των άλλων που θα έρθει σε επαφή κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Μια μεγάλη δυσκολία που παρουσιάζεται είναι οι ορισμοί και οι περιορισμοί που έχει το λογισμικό στην έννοια επιφάνεια. Ως επιφάνειες, υπολογίζει μόνο

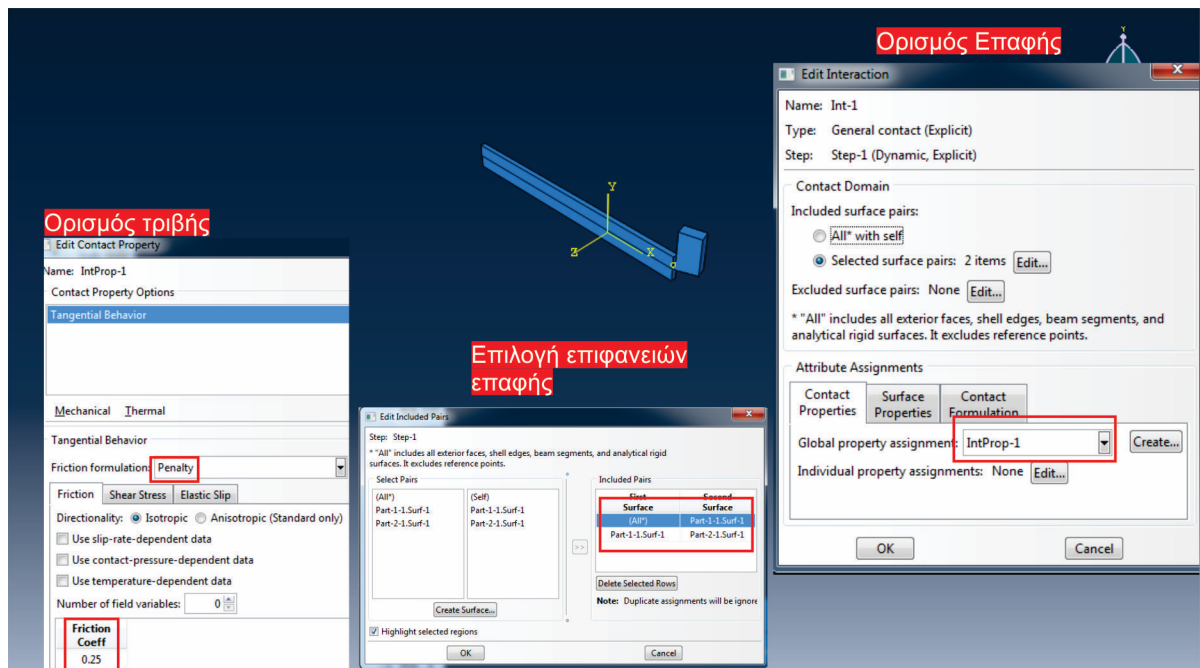
τις εξωτερικές γεωμετρικές επιφάνειες των σχεδιασμένων τμημάτων. Δηλαδή, εάν οριζόταν στον αλγόριθμο επαφής μόνο οι εξωτερικές επιφάνειες του κοπτικού και του τεμαχίου, τότε θα κοβόταν μόνο το πρώτο στρώμα στοιχείων και έπειτα τα στοιχεία απλά θα διαπερνούσαν το ένα το άλλο χωρίς να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Κατά τη προσομοίωση ενός σύνθετου και δυναμικού φαινομένου όπως είναι η κοπή στην οποία έχουμε παραμόρφωση και αποβολή υλικού με πολύ υψηλούς ρυθμούς, η επαφή συμβαίνει μεταξύ της επιφάνειας κόψης του κοπτικού εργαλείου και μεταξύ **όλων των εσωτερικών και εξωτερικών στοιχείων του τεμαχίου έως το βάθος κοπής**. Για να ορίσουμε αυτή την επαφή στο λογισμικό, έπρεπε πρώτα να οριστεί η κατάλληλη επιφάνεια στοιχείων του τεμαχίου. Για τον ορισμό αυτό, επιλέχθηκαν οι εντολές **Tools->Surface->Create**, έπειτα διαλέχτηκε η επιλογή **Mesh** και ενεργοποιήθηκε η επιλογή **Select from all entities**. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν όλα τα στοιχεία (εσωτερικά και εξωτερικά) του πυκνού πλέγματος του τεμαχίου.



Σχήμα 3.21: Δημιουργία εσωτερικής επιφάνειας τεμαχίου

Επόμενο βήμα στον ορισμό της επαφής του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου είναι να οριστεί η ιδιότητα της επαφής. Κατά τις κατεργασίες κοπής μετάλλων, ο συντελεστής τριβής παίρνει τιμές από 0,15 έως 0,3. Στις προσομοιώσεις ορθογωνικής και λοξής κοπής που έγιναν ο συντελεστής τριβής πήρε τη τιμή **0,25**. Αυτό έγινε χρησιμοποιώντας τις εντολές **Create Interaction Property->Contact** και από τις επιλογές που εμφάνισε το λογισμικό επιλέχθηκε από την κατηγορία **Mechanical** την **Tangential Behavior** και τέθηκε ο συντελεστής τριβής (**Friction Coeff**) ίσος με 0,25. Στη συνέχεια ,χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές **Interactions->Create->General Contact** για να οριστεί ο εν λόγω αλγόριθμος. Στο παράθυρο που εμφανίζει το λογισμικό ορίστηκαν οι επιφάνειες που συμμετέχουν στην επαφή καθώς και η ιδιότητα της επαφής.



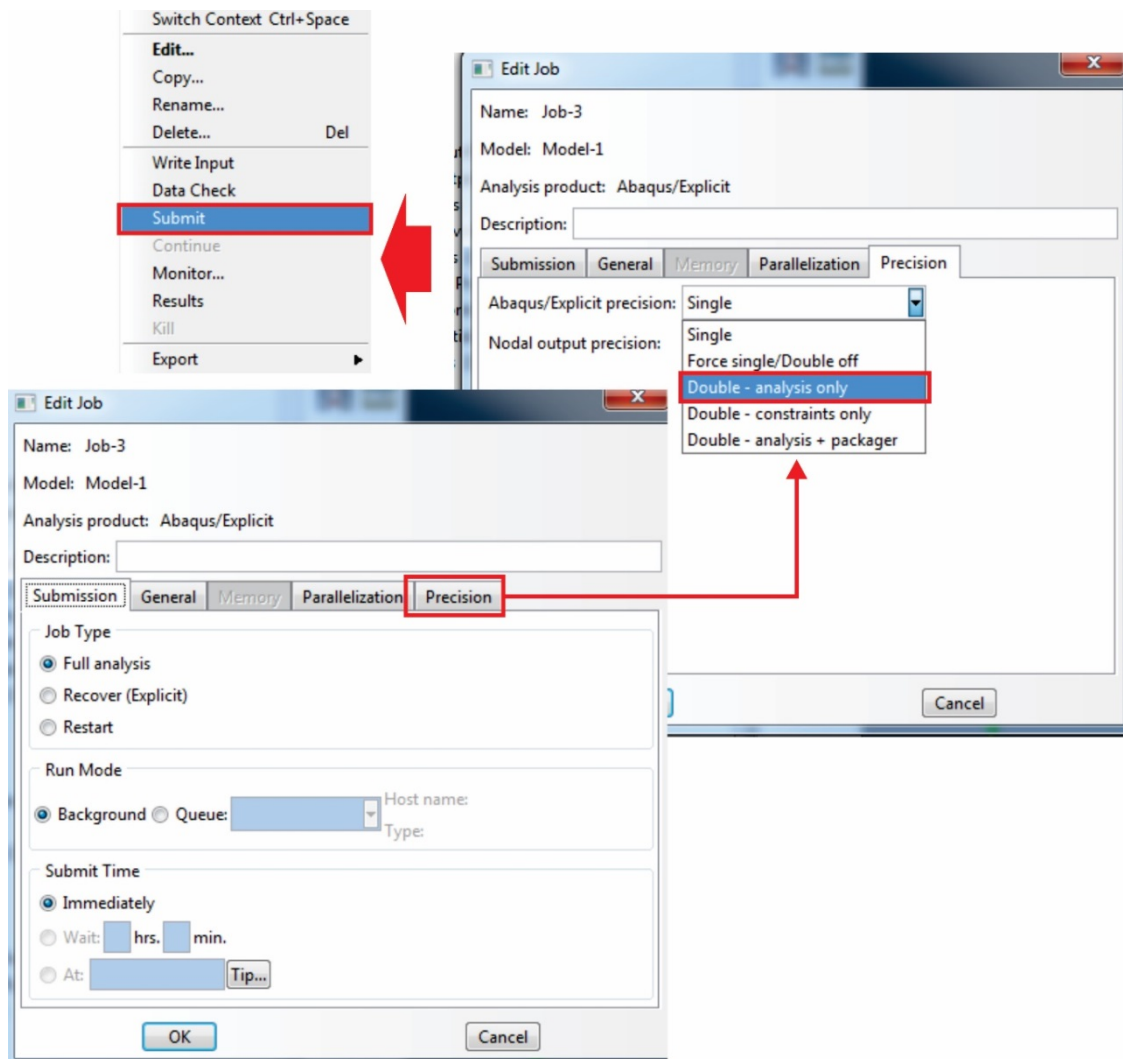


Σχήμα 3.22: Ορισμός επαφής

Με την ολοκλήρωση του ορισμού και της επαφής, μένει η υποβολή του αρχείου στον επιλυτή και η ολοκλήρωση της ανάλυσης.

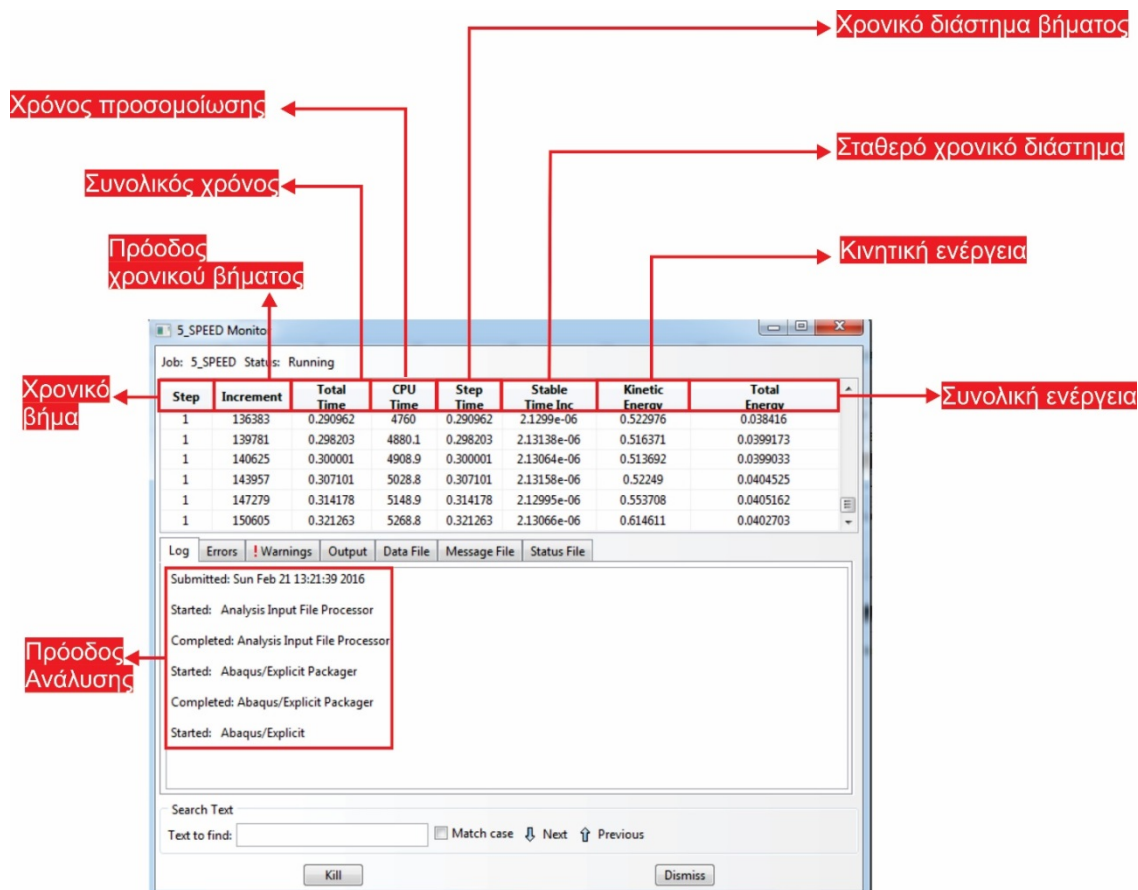
### 3.3 Υποβολή Αρχείου και Ολοκλήρωση της Ανάλυσης

Η υποβολή του αρχείου στον επιλυτή (**solver**) του λογισμικού γίνεται αρχικά με την εντολή **Create Job** και στη συνέχεια δίνοντας ένα όνομα στο αρχείο εξόδου που θα δημιουργηθεί. Στο παράθυρο που ανοίγει το λογισμικό έχει διάφορες καρτέλες που προσδιορίζουν το είδος της ανάλυσης. Διότι οι παραμορφώσεις είναι πολύ υψηλές και ο αριθμός των στοιχείων που παραμορφώνονται πολύ μεγάλος επιλέχθηκε η ακρίβεια της ανάλυσης να είναι διπλής ακρίβειας. Στη συνέχεια πατώντας την εντολή **Submit** εισήχθηκε το αρχείο στον επιλυτή.



Σχήμα 3.23: Εισαγωγή του αρχείου στον επιλυτή

Στη συνέχεια και για όλη τη διάρκεια της ανάλυσης μπορεί να παρακολουθείται η εξέλιξη της από την εντολή **Monitor** κάνοντας δεξί κλικ στο όνομα του αρχείου που έχει υποβληθεί. Το παράθυρο που ανοίγει το λογισμικό έχει πολλές καρτέλες με διάφορες χρήσιμες πληροφορίες για την εξέλιξη της ανάλυσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.24.

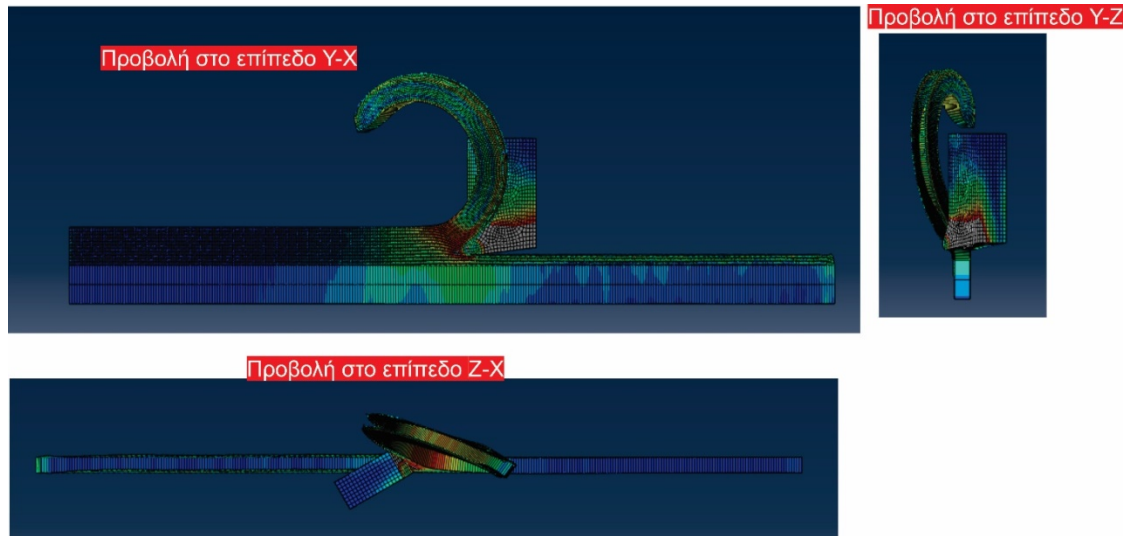


Σχήμα 3.24: Παρακολούθηση της ανάλυσης

### 3.4 Μετεπεξεργασία της Ανάλυσης

Το λογισμικό διαθέτει την ικανότητα να επεξεργαστεί με διάφορους τρόπους τα δεδομένα εξόδου όπως αυτά εξάγονται από τον επιλυτή. Ενδεικτικά, το λογισμικό έχει τη δυνατότητα να:

- Προβάλλει στιγμιότυπα της ανάλυσης σε συχνότητες που έχουν προκαθοριστεί από το χρήστη στην προεπεξεργασία καθώς και εγγραφή σε αρχεία βίντεο.
- Προβάλλει τα δεδομένα εξόδου με τη χρήση χρωματικής κλίμακας στα παραμορφωμένα σώματα.
- Σχεδιάζει τις τομές των σωμάτων στα τρία επίπεδα στο χώρο.
- Απομόνωση στοιχείων, ή και ολόκληρων τμημάτων για πιο λεπτομερή περιγραφή συγκεκριμένων περιοχών της συναρμολόγησης.
- Δημιουργία γραφικών παραστάσεων για τα δεδομένα εξόδου σε κόμβους, στοιχεία, βαρύκεντρα ή όπου αλλού αυτά εφαρμόζονται.
- Παραλλαγές των ορίων της χρωματικής κλίμακας έτσι ώστε απότομες αλλαγές των τάσεων να γίνονται πιο αισθητές σε όλο το μέγεθος της συναρμολόγησης.



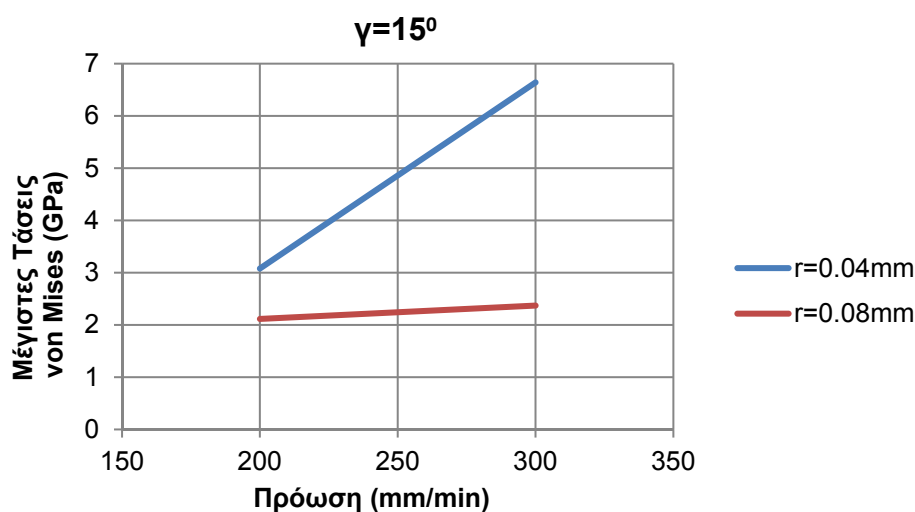
Σχήμα 3.25: Τρεις όψεις μιας κοπής

Στο Σχήμα 3.25 φαίνονται τρεις όψεις μιας περίπτωσης λοξής κοπής στο τέλος της προσομοίωσης με αλλαγμένα τα όρια της χρωματικής κλίμακας έτσι ώστε οι αυξομειώσεις των τάσεων να είναι πιο εμφανείς στην έκταση του τεμαχίου.

## 4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 4.1 Ανάλυση Ορθογωνικής Κοπής

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για μηδενική τιμή της γωνίας της κόψης  $\lambda_s$  δηλαδή για την απλή περίπτωση της ορθογωνικής κοπής. Για την επεξεργασία και την εξαγωγή συμπερασμάτων, χαράχθηκαν οι σχέσεις των μέγιστων τάσεων με τις αντίστοιχες προώσεις για κάθε γωνία αποβλίπτου και για κάθε καμπυλότητα. Στη περίπτωση της ορθογωνικής, σε κάθε προσομοίωση το απόβλιπτο χωριζόταν τουλάχιστον μια φορά από το τεμάχιο, οπότε συνέβαινε και κάποια εκτόνωση τάσεων σε ορισμένες περιπτώσεις. Ως αποτέλεσμα, οι τάσεις παρουσίαζαν μια αρκετά μεγάλη αυξομείωση κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

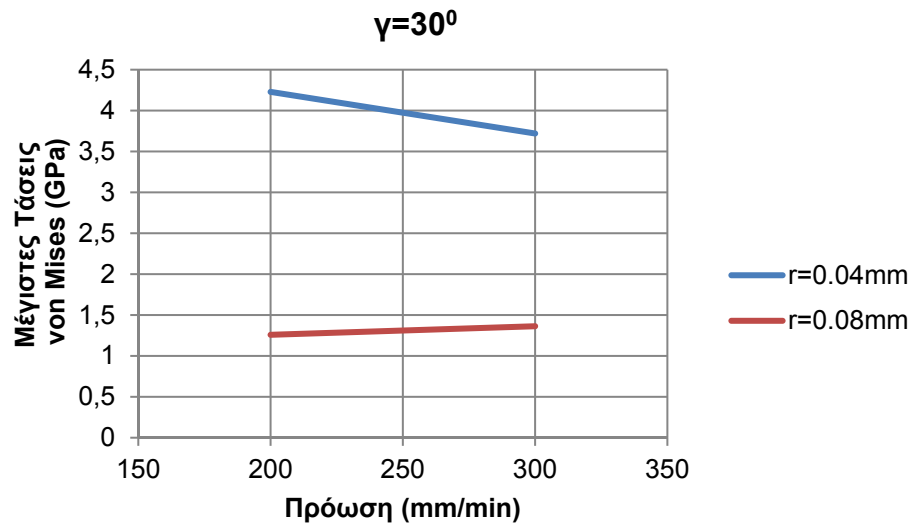


Σχήμα 4.1: Σχέσεις για  $\gamma=15^\circ$

Στο παραπάνω διάγραμμα, φαίνονται οι σχέσεις των μέγιστων τάσεων ανά πρόωση για τη γωνία αποβλίπτου  $15^\circ$  στην ορθογωνική κοπή. Παρατηρούμε ότι με αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας του κοπτικού εργαλείου οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις μειώνονται δραστικά. Επίσης, για μικρή ακτίνα καμπυλότητας, υπάρχει μια μεγάλη αύξηση των τάσεων με αύξηση της πρόωσης. Αντίθετα, για μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας οι μέγιστες τάσεις μένουν σε σχετικά σταθερά επίπεδα ανεξαρτήτως πρόωσης. Παρόλα αυτά, και στις δυο περιπτώσεις ακτινών καμπυλότητας παρατηρήθηκε αύξηση των ασκούμενων φορτίων με αύξηση της πρόωσης.

Συμπερασματικά, από το Σχήμα 4.1 μπορεί να ισχυρισθεί ότι μια μικρή ακτίνα καμπυλότητας έχει άμεσο αντίκτυπο στα ασκούμενα φορτία του κοπτικού εργαλείου. Εν αντίθεση, μια μεγαλύτερη πρόωση έχει μικρότερη επίδραση στα ασκούμενα φορτία από την ακτίνα καμπυλότητας, τουλάχιστον όσον αφορά την περίπτωση της ορθογωνικής κοπής.

Επόμενη ανάλυση ήταν η περίπτωση της ορθογωνικής κοπής για τη γωνία αποβλίπτου ίση με  $30^\circ$ . Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η ίδια με τη περίπτωση των  $15^\circ$ .



Σχήμα 4.2: Σχέσεις για  $\gamma=30^\circ$

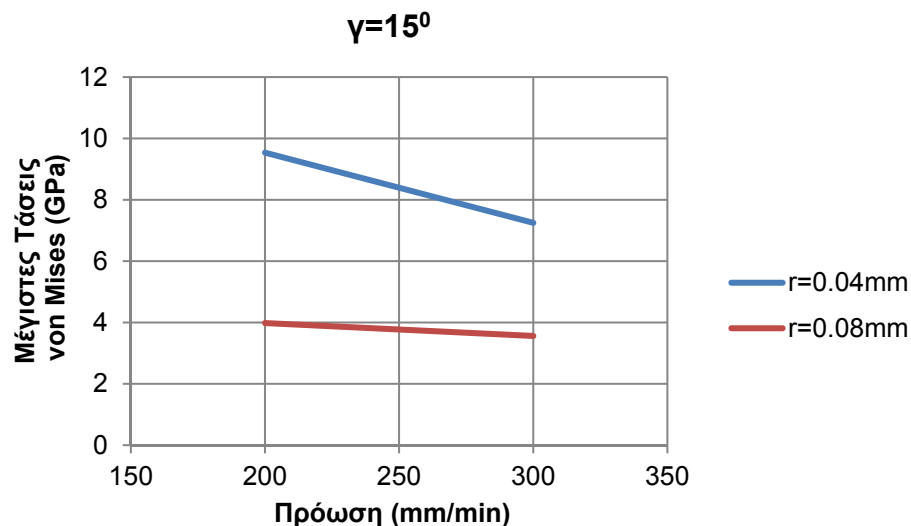
Σε αυτή τη περίπτωση, φαίνεται ότι για μικρή τιμή της ακτίνας καμπυλότητας και αύξηση της πρόωσης υπάρχει μια πτώση στις μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις ενώ στη περίπτωση της γωνίας αποβλίπτου  $15^\circ$  το συμπέρασμα αυτό ήταν αντίθετο. Η μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας και πάλι είχε άμεση επίδραση στις μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις με αποτέλεσμα να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας μειώνει τα φορτία που δέχεται το κοπτικό εργαλείο κατά την ορθογωνική κοπή. Επίσης, και σε αυτή τη περίπτωση η αυξομείωση που παρουσίασαν οι μέγιστες τάσεις για την μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας δεν ήταν μεγάλες ανεξαρτήτου προώσεως.

Μελετώντας και τα δύο παραπάνω διαγράμματα μπορεί να ισχυριστεί ότι στη περίπτωση της ορθογωνικής κοπής, πρωταρχικός παράγοντας στην ανάπτυξη των τάσεων είναι η ακτίνα καμπυλότητας και δευτερεύον η γωνία αποβλίπτου του κοπτικού εργαλείου. Όσο μεγαλώνει η ακτίνα καμπυλότητας αλλά και η γωνία αποβλίπτου, τόσο μειώνονται τα ασκούμενα φορτία επάνω στο κοπτικό εργαλείο. Ο παράγοντας της πρόωσης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βγει κάποιο ασφαλές συμπέρασμα όσον αφορά την ακτίνα καμπυλότητας των 0,04mm εξαιτίας των ασταθών αυξομειώσεων του. Όσον αφορά τη μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας, μια αύξηση της πρόωσης έδειξε να αυξάνει ελάχιστα τα μέγιστα ασκούμενα φορτία στο κοπτικό εργαλείο.

Γενικά και στις δυο περιπτώσεις ορθογωνικής κοπής, τα μεγέθη των μέγιστων τάσεων παραμένουν σε μικρά επίπεδα με την αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας να παίζει τον κυρίαρχο ρόλο στη μείωση των μέγιστων τάσεων.

## 4.2 Ανάλυση Λοξής Κοπής με $\lambda_s=15^\circ$

Τα αποτελέσματα που έδωσαν οι προσομοιώσεις λοξής κοπής παρουσιάζουν κάποιες ομοιότητες αλλά και διαφορές με τα αποτελέσματα της ορθογωνικής. Αυξάνοντας τη γωνία κλίσης της κόψης, αυξάνεται το εμβαδό του κοπτικού εργαλείου που έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο. Μια άλλη συνέπεια είναι ότι ο σχηματισμός του αποβλίττου σε κάθε προσομοίωση λοξής κοπής, ήταν πάντα συνεχής οπότε ποτέ δεν διακόπηκε και κατά συνέπεια δεν έγινε κάποια εκτόνωση τάσεων. Ως αποτέλεσμα, δεν υπήρξαν ιδιαίτερες αυξομειώσεις στις τάσεις όπως συνέβη στη περίπτωση της ορθογωνικής κοπής.



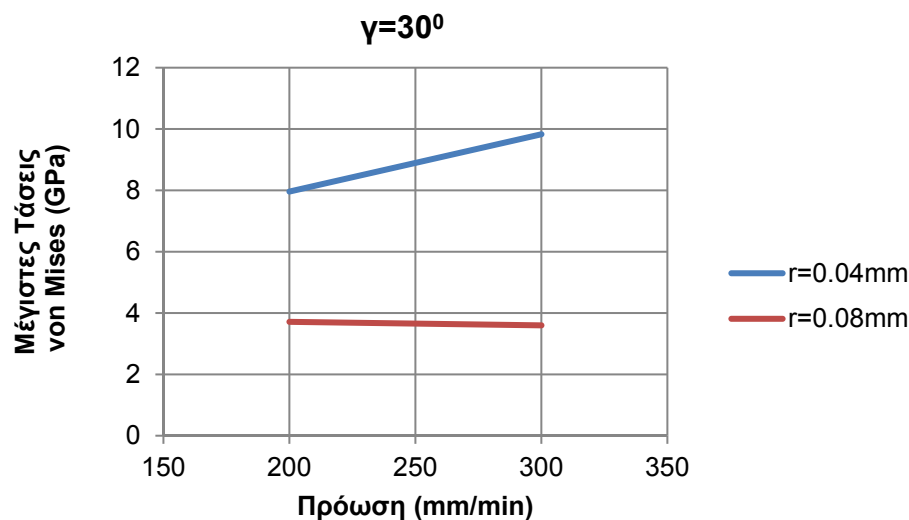
Σχήμα 4.3: Σχέσεις λοξής κοπής για  $\lambda_s=15^\circ$  και  $\gamma=15^\circ$

Οι προσομοιώσεις έδωσαν μεγαλύτερες τιμές τάσεων για τη λοξή κοπή συγκριτικά με την ορθογωνική. Από το διάγραμμα του Σχήματος 4.3 φαίνεται ότι και πάλι όσο μεγαλύτερη η ακτίνα καμπυλότητας του κοπτικού, τόσο πιο αισθητά μικρότερες θα είναι οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις. Επίσης, σε αυτή τη περίπτωση η πρόωση έδειξε να έχει μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση με τις μέγιστες τάσεις. Για ακόμα μια φορά, για μικρή τιμή της ακτίνας καμπυλότητας του κοπτικού εργαλείου, παρατηρείται μια σταθερότητα στις μέγιστες τάσεις ανεξαρτήτου προώσεως.

Μια μικρή ακτίνα καμπυλότητας, εκτός του ότι προσδίδει μεγαλύτερα φορτία στο κοπτικό εργαλείο, έχει ως αποτέλεσμα και μια αστάθεια στις τάσεις μεταξύ των προώσεων. Παρόλο που και για τις δυο προώσεις παρατηρείται μια μείωση στις μέγιστες τάσεις, για τη μικρή ακτίνα καμπυλότητας η πτώση αυτή είναι πιο ραγδαία από ότι για το κοπτικό με τη μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας.

Στη συνέχεια, αναλύθηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για αυτή τη γωνία λοξής κοπής και για γωνία αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου ίση με  $30^\circ$ .





Σχήμα 4.4: Σχέσεις λοξής κοπής για  $\lambda_s=15^\circ$  και  $\gamma=30^\circ$

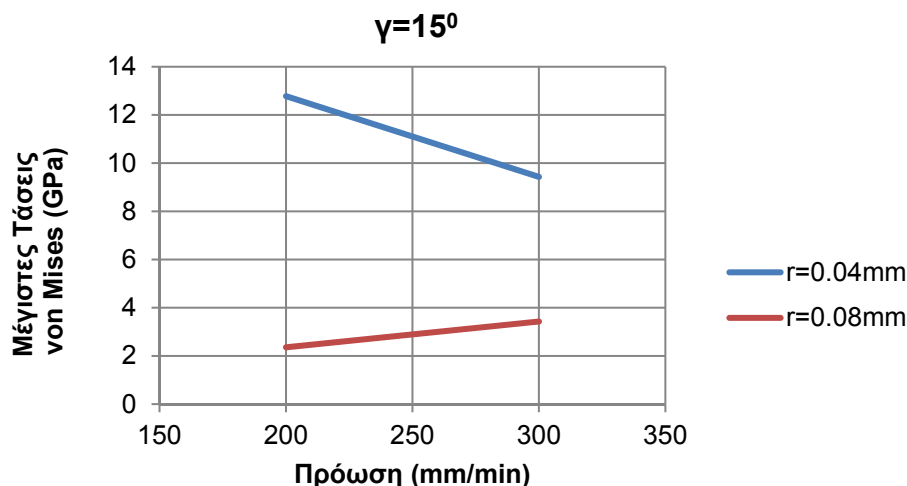
Όταν αυξηθεί η γωνία αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου, παρατηρείται μια αύξηση των τάσεων στη περίπτωση της μικρής ακτίνας καμπυλότητας σε ταυτόχρονη αύξηση της προώσεως. Στη περίπτωση της αύξησης της ακτίνας καμπυλότητας του κοπτικού εργαλείου και πάλι παρατηρείται δραστική μείωση των μέγιστων αναπτυσσόμενων τάσεων ανεξαρτήτως προώσεως όπως έχει παρατηρηθεί σε κάθε έως τώρα προσομοίωση. Σε αυτή τη περίπτωση δεν παρατηρήθηκε κάποια εξάρτηση μεταξύ των γωνιών αποβλίττου στη μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας καθώς το αποτέλεσμα είναι σχεδόν το ίδιο και για τις δυο τιμές των γωνιών αποβλίττου. Επιπλέον, μια αύξηση της γωνίας αποβλίττου σε αυτή τη περίπτωση λοξής κοπής είχε ως αποτέλεσμα την επιστροφή της αναλογικής σχέσης μεταξύ της πρόωσης και των μέγιστων τάσεων στη μικρή ακτίνα καμπυλότητας σε αντίθεση με τη μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας όπου παρατηρείται μια αμελητέα μείωση των μέγιστων τάσεων με την αύξηση της πρόωσης.

Αξίζει να σημειωθεί η σταθερότητα που παρατηρείται μεταξύ των μέγιστων τάσεων για τις μεγάλες ακτίνες καμπυλότητας σε κάθε πρόωση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση λοξής κοπής, φαίνεται μια σχεδόν αμελητέα διακύμανση μεταξύ των μέγιστων τάσεων και στις δυο περιπτώσεις γωνιών αποβλίττου στις μεγάλες ακτίνες καμπυλότητας.

Γενικά, η ακτίνα καμπυλότητας του κοπτικού εργαλείου είναι η παράμετρος που παίζει τον κυρίαρχο ρόλο μείωσης των μέγιστων τάσεων για όλες τις προώσεις και τις γωνίες αποβλίττου.

### 4.3 Ανάλυση Λοξής Κοπής με $\lambda_s=30^\circ$

Τα αποτελέσματα της λοξής κοπής με  $\lambda_s=30^\circ$  είναι πιο επιβαρυντικά για το κοπτικό εργαλείο από ότι τα αποτελέσματα με μικρότερες γωνίες κόψης. Αυξάνοντας ακόμα περισσότερο τη γωνία της κόψης αυξάνεται ακόμα περισσότερο το εμβαδό του κοπτικού εργαλείου που έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο. Επίσης και σε αυτή τη περίπτωση το απόβλιττο ήταν πάντα συνεχές.



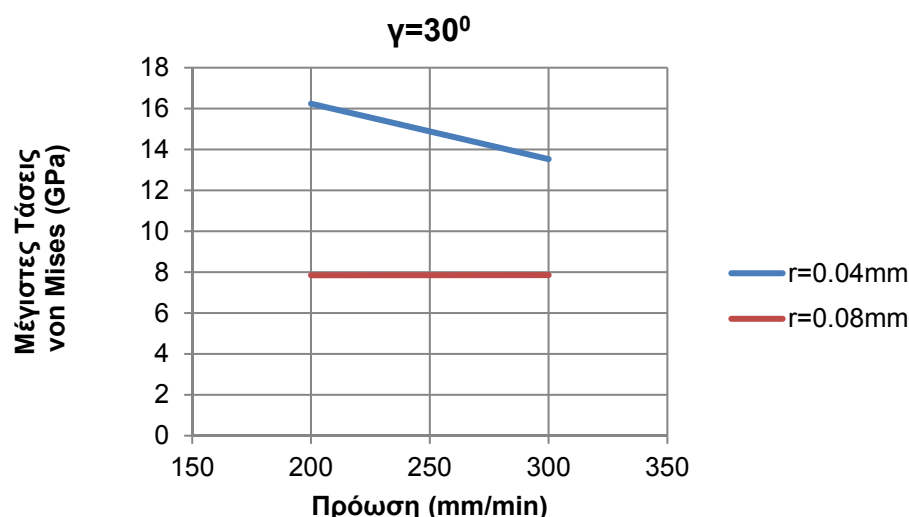
Σχήμα 4.5: Σχέσεις λοξής κοπής για  $\lambda_s=30^\circ$  και  $\gamma=15^\circ$

Σε αυτή τη περίπτωση λοξής κοπής παρατηρείται ακόμα μεγαλύτερη αύξηση στις μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται στο κοπτικό εργαλείο. Όσον αφορά τη μικρή ακτίνα καμπυλότητας, η αύξηση της πρόωσης δίνει αισθητή μείωση στις μέγιστες τάσεις όπως έγινε και για το ίδιο κοπτικό εργαλείο στη περίπτωση της προηγούμενης λοξής κοπής.

Και πάλι, πρωταρχικός παράγοντας στη μείωση των ασκούμενων φορτίων στο κοπτικό εργαλείο είναι η μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας. Είναι πιο εμφανές από όλες τις προηγούμενες προσομοιώσεις η διαφορά στις μέγιστες τάσεις στο κοπτικό εργαλείο με τη μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας. Επιπλέον, η σταθερότητα στη διακύμανση των μέγιστων τάσεων στο κοπτικό με τη μικρή ακτίνα καμπυλότητας ανεξαρτήτου προώσεως είναι πάλι εμφανή ειδικά σε σχέση με την μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας.

Στο κοπτικό με τη μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας, η αύξηση στη πρόωση έδωσε μια αύξηση κάποιας τάξης στις μέγιστες τάσεις, παρόλο που στο ίδιο κοπτικό αλλά για διαφορετική κλίση της κόψης είχε παρατηρηθεί μια πολύ μικρή μείωση. Γενικά, η αύξηση της πρόωσης είχε αντίστροφα αποτελέσματα στις αυξομειώσεις των δυο κοπτικών εργαλείων διαφορετικών ακτινών καμπυλότητας.

Η τελευταία ανάλυση είχε να κάνει με την ίδια γωνία κλίσης της κόψης, αλλά για γωνία αποβλίττου ίση με  $30^\circ$ .



Σχήμα 4.6: Σχέσεις λοξής κοπής για  $\lambda_s=30^\circ$  και  $\gamma=30^\circ$

Σε αυτή τη περίπτωση η αύξηση της γωνίας αποβλίπτου είχε ως αποτέλεσμα τη γενική αύξηση στα μέγιστα φορτία που ασκούνται στο κοπτικό εργαλείο. Το κοπτικό εργαλείο με τη μικρή ακτίνα καμπυλότητας παρουσίασε μια μείωση στις μέγιστες τάσεις με αύξηση της προώσεως ακριβώς όπως συνέβη και στην περίπτωση του κοπτικού με μικρότερη γωνία αποβλίπτου αλλά στην ίδια γωνία κλίσης της κόψης. Στο κοπτικό με τη μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας, η αύξηση της γωνίας αποβλίπτου είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των τάσεων αλλά αυτή η αύξηση παρέμεινε σταθερή και για τις δυο τιμές της πρόωσης και προφανώς παρέμεινε σε επίπεδα χαμηλότερα από αυτά του κοπτικού με τη μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας.

#### 4.4 Γενικά Συμπεράσματα

Το κυριότερο συμπέρασμα που προκύπτει από τις παραπάνω αναλύσεις είναι ότι πρωταρχικός ρόλος στη μείωση των μέγιστων τάσεων von Mises που ασκούνται στο κοπτικό εργαλείο σε οποιαδήποτε γωνία κόψης είναι η ακτίνα καμπυλότητας του εργαλείου. Τα αποτελέσματα κάθε προσομοίωσης έδειξαν πως η μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας του κοπτικού εργαλείου είναι σε θέση να μειώσει τα ασκούμενα φορτία περισσότερο από κάθε άλλο παράγοντα.

Επίσης, όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης της κόψης  $\lambda_s$  τόσο αυξάνονται και οι μέγιστες τάσεις διότι μειώνεται η απόσταση μεταξύ της δευτερεύουσας ζώνης παραμόρφωσης και της επιφάνειας του κοπτικού που βρίσκεται πιο κοντά στην πρωτεύουσα ζώνη παραμόρφωσης. Η αύξηση της γωνίας αποβλίπτου στην ορθογωνική κοπή παρουσίασε αύξηση του εμβαδού της δευτερεύουσας ζώνης παραμόρφωσης με αποτέλεσμα μια μείωση των τάσεων.

Ενδιαφέρον παρουσίασε και η σταθερότητα στις μέγιστες τάσεις που φάνηκε στα κοπτικά εργαλεία με μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας. Ενώ στη περίπτωση της μικρής ακτίνας καμπυλότητας η διακύμανση στις μέγιστες τάσεις εξαρτιόταν άμεσα από τη πρόωση, στη μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας παρουσιάστηκε πολύ μικρή διαφορά στις τάσεις ανάλογα τη πρόωση.

## 5. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

### 5.1 Πύκνωση του Πλέγματος

Ένας προφανής τρόπος βελτίωσης του υπάρχοντος μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να προσεγγιστεί η λύση του προβλήματος με μεγαλύτερη ακρίβεια είναι η πύκνωση του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Η προσέγγιση αυτή δύναται να ακολουθηθεί σε δυο στάδια.

Το πρώτο στάδιο είναι η ενδεχόμενη πύκνωση του πλέγματος του τεμαχίου. Αυτή η μέθοδος θα δώσει πιο ακριβή αποτελέσματα όσον αφορά τις αναπτυσσόμενες τάσεις στο τεμάχιο αλλά θα χρειαστεί να αλλαχθούν ορισμένες παράμετροι του υλικού του τεμαχίου που είναι άμεσα εξαρτημένοι από το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Μια τέτοια κίνηση θα πρέπει να υιοθετηθεί, μόνο λαμβάνοντας υπόψη και το συνολικό χρόνο της προσομοίωσης. Πύκνωση του πλέγματος έχει άμεση επίδραση στον υπολογιστικό χρόνο και θα πρέπει να υλοποιηθεί μόνο συναρτήσει με την απαιτούμενη ακρίβεια της προσέγγισης που πρέπει να γίνει.

Το δεύτερο στάδιο είναι η πύκνωση του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων του κοπτικού εργαλείου. Μια τέτοια προσέγγιση είναι πιο βιώσιμη από άποψης ευκολίας διότι δεν θα χρειαστούν αλλαγές οι παράμετροι του υλικού του κοπτικού μιας και οι ιδιότητες που εισήχθησαν δεν είχαν κάποια εξάρτηση από το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Μια τέτοια κίνηση ίσως είχε κάποιο αντίκτυπο όχι μόνο στην ακρίβεια υπολογισμού των αναπτυσσόμενων τάσεων αλλά και στην ορθότερη κατανομή τους στο κοπτικό εργαλείο.

Σε κάθε περίπτωση, μια ενδεχόμενη πύκνωση του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων σε οποιοδήποτε τμήμα που συμμετέχει στην ανάλυση, θα πρέπει να αντισταθμιστεί έναντι του αντίκτυπου που θα έχει στο συνολικό χρόνο προσομοίωσης.

### 5.2 Διαφορετική Εισαγωγή Υλικών

Στο ήδη υπάρχον μοντέλο, το υλικό του τεμαχίου εισήχθηκε στο λογισμικό σε τρία διαφορετικά σκέλη, το φυσικό, το μηχανικό και το θερμικό. Το μηχανικό χωρίστηκε σε τρεις υποκατηγορίες, το μοντέλο ελαστικότητας, το μοντέλο πλαστικότητας και το μοντέλο δυναμικής αστοχίας. Το μοντέλο δυναμικής αστοχίας Johnson-Cook που εφαρμόστηκε εισήγαγε την έννοια της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης κατά τη θραύση καθώς και την ενέργεια που δαπανάται κατά τη θραύση. Αυτά τα μεγέθη είναι άμεσα εξαρτημένα από το πλέγμα και μια αλλαγή στο πλέγμα συνεπάγεται αλλαγή και σε αυτά.

Κατά τη προσομοίωση κοπών όπου συμβαίνουν παραμορφώσεις με πολύ υψηλό ρυθμό, η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση για κάθε στοιχείο μπορεί να λάβει διαφορετική τιμή, ακόμα και αν τα στοιχεία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων έχουν το ίδιο μέγεθος μεταξύ τους. Κατά συνέπεια, κάποια ορίσματα του υλικού να πρέπει να αλλάζουν ανάλογα με την υπολογισμένη τάση στο εκάστοτε στοιχείο. Το CAE δεν δίνει κάποια τέτοια δυνατότητα προς το παρόν, αλλά έχει την επιλογή εισαγωγής ιδιοτήτων υλικού μέσω μιας υπορουτίνας γραμμένης στη γλώσσα προγραμματισμού PYTHON. Η χρήση αυτής της υπορουτίνας θα έχει ως αποτέλεσμα μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση της συμπεριφοράς του τεμαχίου μετά τη πλαστική παραμόρφωση, δηλαδή αφού επέλθει η θραύση.

### 5.3 Χρησιμοποίηση Διαφορετικών Στοιχείων

Μια διαφορετική προσέγγιση που θα μπορούσε να αυξήσει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, είναι η χρήση μιας ειδικής ομάδας στοιχείων που χρησιμοποιεί το λογισμικό και ονομάζεται στοιχεία επαφής (**contact elements**). Αυτά τα στοιχεία δεν έχουν εισαχθεί ακόμα στο CAE πράγμα που σημαίνει ότι ολόκληρο το αρχείο εισόδου θα πρέπει να γραφεί σε γλώσσα προγραμματισμού PYTHON και να εισαχθεί απευθείας στον επιλυτή.

Σύμφωνα με αυτά τα στοιχεία, το κοπτικό θα πρέπει να υπολογιστεί ως απαραμόρφωτο στερεό πράγμα που σημαίνει ότι δεν θα είναι δυνατόν να υπολογιστούν τάσεις επάνω στο κοπτικό εργαλείο. Αυτά τα στοιχεία (**rigid contact elements**) έχουν τη δυνατότητα να προσομοιώνουν μη-γραμμικά φαινόμενα επαφής μεταξύ κόμβων μιας απαραμόρφωτης επιφάνειας και μιας επιφάνειας των εν λόγω στοιχείων. Η ιδιαιτερότητα αυτών των στοιχείων, είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα προκειμένου να ορίσουν την εσωτερική επιφάνεια του τεμαχίου καθώς και να οριστούν διαφορετικές συνθήκες επαφής για το κάθε στοιχείο έτσι ώστε να οριστεί η επαφή με πιο αναλυτικούς και ρεαλιστικούς τρόπους.

### 5.4 Υιοθέτηση ALE

Η μέθοδος ALE όπως προαναφέρθηκε, είναι ένας συνδυασμένος τρόπος μοντελοποίησης των Euler και Lagrange σύμφωνα με την οποία το πλέγμα μετακινείται και αυτό στο χώρο. Για προώσεις όπως αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία δεν χρησιμοποιήθηκε το εν λόγω μοντέλο διότι οι προώσεις ήταν πολύ μικρές και η δυσκολία σωστού ορισμού του μοντέλου ALE έκανε περιττές όποιες βελτιώσεις θα μπορούσε να προσφέρει στην ακρίβεια.

Σε περίπτωση που πρέπει να διερευνηθούν μεγαλύτερες προώσεις για ίδια ή παρόμοια προβλήματα, το μοντέλο ALE είναι αναπόφευκτο να μη χρησιμοποιηθεί λόγω της αδυναμίας του πλέγματος να συμβαδίζει με τους ρυθμούς παραμορφώσεων.

## 6. ΣΥΝΟΨΗ

Σε αυτή την εργασία δημιουργήθηκε ένα μοντέλο ορθογωνικής και λοξής κοπής με χρήση ενός λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων το οποίο έδωσε αποτελέσματα τάσεων και χρησιμοποιήθηκαν για να εξαχθούν κάποιες σχέσεις μεταξύ των μέγιστων αναπτυσσόμενων τάσεων και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κοπτικού εργαλείου και της πρόωσης. Αφού έγινε μια ανάλυση της απαιτούμενης θεωρίας και μια ανασκόπηση στη δημιουργία του μοντέλου, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε μορφή γραφημάτων και εξάχθηκαν κάποιες σχέσεις και κάποια συμπεράσματα σχετικά με τη σχέση της γεωμετρίας των κοπτικών εργαλείων και τη πρόωση με τις μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις καθώς και ποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά μπορούν να μειώσουν τα φορτία αυτά, πάντα σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Το τελικό συμπέρασμα που βγήκε είναι ότι τα ασκούμενα φορτία μειώνονται δραστικά με την αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας του κοπτικού εργαλείου που χρησιμοποιείται σε οποιαδήποτε κοπή είτε αυτή είναι ορθογωνική είτε λοξή και τα εργαλεία με μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας δείχνουν μια σταθερότητα στις μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις ανεξαρτήτως προώσεως. Επίσης, στη περίπτωση της ορθογωνικής κοπής παρατηρήθηκε μείωση των τάσεων με την αύξηση της γωνίας αποβλίπτου του κοπτικού.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Y.C. Zhang, T. Mabrouki, D. Nelias, Y.D. Gong, "Chip formation in orthogonal cutting considering interface limiting shear stress and damage evolution based on fracture energy approach", *Finite Elements in Analysis and Design* 47 (2011) 850–863
- [2] C.R. Liu, Y.B. Guo, "Finite element analysis of the effect of sequential cuts and tool/chip friction on residual stresses in a machined layer", *International Journal of Mechanical Sciences* 42 1069-1086
- [3] J.D. Seidt, A. Gilat, "Plastic deformation of 2024-T351 aluminum plate over a wide range of loading conditions", *International Journal of Solids and Structures* 50 (2013) 1781–1790
- [4] L.J. Xiea, J. Schmidta, C. Schmidta, F. Biesingerb, "2D FEM estimate of tool wear in turning operation", *Wear* 258 (2005) 1479–1490
- [5] O. Pantal\_e, J.-L. Bacaria, O. Dalverny, R. Rakotomalala, S. Caperaa, "2D and 3D numerical models of metal cutting with damage effects", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 193 (2004) 4383–4399
- [6] Ding-Ni Zhang, Qian-Qian Shangguan, Can-Jun Xie, Fu Liu, "A modified Johnson–Cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-T6 aluminum alloy", *Journal of Alloys and Compounds* 619 (2015) 186–194
- [7] M.S. ElTobgy, E. Ng, M.A. Elbestawi, "Finite element modeling of erosive wear", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005) 1337–1346
- [8] Tarek Mabrouki, Francois Girardin, Muhammad Asad, Jean-Francois Rigal, "Numerical and experimental study of dry cutting for an aeronautic aluminium alloy (A2024-T351)", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008) 1187– 1197
- [9] C.E. Campbell, L.A. Bendersky, W.J. Boettinger, R. Ivester, "Microstructural characterization of Al-7075-T651 chips and work pieces produced by high-speed machining", *Materials Science and Engineering A* 430 (2006) 15–26
- [10] Eu-Gene Ng, David K. Aspinwall, "Modelling of hard part machining", *Journal of Materials Processing Technology* 127 (2002) 222–229
- [11] K. Li, X.-L. Gao, J.W. Sutherland, "Finite elements simulation of the orthogonal metal cutting process for qualitative understanding of the effects of crater wear on the chip formation process", *Journal Material Processing Technology* 127 (2002) 309-324
- [12] M. Barge, H. Hamdi, J. Rech, J.-M. Bergheau, "Numerical modelling of orthogonal cutting: influence of numerical parameters", *Journal of Materials Processing Technology* 164–165 (2005) 1148–1153
- [13] T. Mabrouki, J.-F. Rigal, "A contribution to a qualitative understanding of thermo-mechanical effects during chip formation in hard turning", *Journal of Materials Processing Technology* 176 (2006) 214–221
- [14] Christian Hortig, Bob Svendsen, "Simulation of chip formation during high-speed cutting", *Journal of Materials Processing Technology* 186 (2007) 66–76
- [15] Jaroslava Fulemova, Zdeněk Janda, "Influence of the Cutting Edge Radius and the Cutting Edge Preparation on Tool Life and Cutting Forces at Inserts with Wiper Geometry", *Procedia Engineering* 69 ( 2014 ) 565 – 573
- [16] Martin Madaja, Miroslav Piškaa, "On the SPH Orthogonal Cutting Simulation of A2024-T351 Alloy", *Procedia CIRP* 8 ( 2013 ) 152 – 157
- [17] M. Guediche, T. Mabrouki, C. Donnet, J.M. Bergheau, H. Hamdi, "A new procedure to increase the orthogonal cutting machining time simulated", *Procedia CIRP* 31 ( 2015 ) 299-303
- [18] Arvind Jeevannavar, Raja Hussain, "Process Modelling, Simulation and Experimental Validation for Prediction of Chip Morphology during High Speed Machining of AL 2024-T3", *SASTECH Journal* 80 Volume 13, Issue 1, April 2014



- [19] Badis Haddag, Samir Atlati, Mohammed Nouari, Claude Barlier, Mohammed Zenasni, "Analysis of the Cutting Parameters Influence During Machining Aluminium Alloy A2024-T351 with Uncoated Carbide Inserts", *Engng. Trans.* 60, 1, 31–39, 2012
- [20] Sohail Akram, Syed Husain Imran Jaffery, Mushtaq Khan, Aamir Mubashar, Liaqat Ali, "Numerical Investigation of Effects of Cutting Velocity and Feed Rate on Residual Stresses in Aluminum Alloy Al-6061", *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, Vol. 3, No. 1, February 2015
- [21] Wojciech Mieszczak, "FEM Model of Chip Formation Process with Failure Effects", 11th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2007, Hammamet, Tunisia, 05-09 September, 2007
- [22] C.Z.Duan, T.Dou, Y.J.Cai, Y.Y.Li, "Finite Element Simulation and Experiment of Chip Formation Process during High Speed Machining of AISI 1045 Hardened Steel", *AMAE Int. J. on Production and Industrial Engineering*, Vol. 02, No. 01, June 2011
- [23] Hamed Sadeghinia, M.R.Rafzar, Jafar Takabi, "2D finite element modeling of face milling with damage effects", 3rd WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mechanics, Spain, December 14-16, 2007
- [24] E. Uhlmann, M. Graf von der Schulenburg, R. Zettier, "Finite Element Modeling and Cutting Simulation of Inconel 718", *Annals of the CIRP* Vol. 56/1/2007
- [25] Bing Wang & Zhanqiang Liu, "Investigations on the chip formation mechanism and shear localization sensitivity of high-speed machining Ti6Al4V", *Int J Adv Manuf Technol* (2014) 75:1065–1076
- [26] P. J. Arrazola, A. Villar, D. Ugarte & S. Marya, "Serrated Chip Prediction In Finite Element Modeling Of The Chip Formation Process", *Machining Science and Technology*, 11:367–390
- [27] K. S. Vijay Sekar, M. Pradeep Kumar, "Finite Element Simulations of Ti6Al4V Titanium Alloy Machining to Assess Material Model Parameters of the Johnson-Cook Constitutive Equation", *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.* April-June 2011, Vol. XXXIII, No. 2 / 203
- [28] P.J.Arrazola, F.Meslin, J-C.Hamann and F.Le Maître, "Numerical Cutting Modeling with Abaqus/Explicit 6.1", 2002 ABAQUS Users' Conference
- [29] J. Paulo Davim, C. Maranhão, M. J. Jackson, "FEM analysis in high speed machining of aluminium alloy (Al7075-0) using polycrystalline diamond (PCD) and cemented carbide (K10) cutting tools", *Int J Adv Manuf Technol* (2008) 39:1093–1100
- [30] Shuhui Li, Bo Hou, "Material Behavior Modeling in Machining Simulation of 7075-T651 Aluminum Alloy", *Journal of Engineering Materials and Technology* January 2014, Vol. 136/011001
- [31] Zhao Yongjuan, Pan Yutian, Huang Meixia, "Numerical Simulation of Chip Formation in Metal Cutting Process", *TELKOMNIKA*, Vol.10, No.3, July 2012, pp. 486~492
- [32] Heyao Shen, Minghong Wang, "Finite Element Simulation Analysis of Three-Dimensional Cutting Process Based on AISI1045", *International Journal of Research in Engineering and Science* Issue 8 August 2015 PP.35-39
- [33] Nitin Sawarkar, Ghanshyam Boob, "Finite Element based Simulation of Orthogonal Cutting Process to Determine Residual Stress Induced", *International Journal of Computer Applications* (0975 - 8887)
- [34] E. J. Barbero, F. A. Cosso, R. Roman, T.L. Weadon, "Determination of Material Parameters for Abaqus Progressive Damage Analysis of E-Glass Epoxy Laminates", *Composite Part B*, 46:211-220, 2013
- [35] Walid Jomaa, Victor Songmene, Philippe Bocher, "Surface Finish and Residual Stresses Induced by Orthogonal Dry Machining of AA7075-T651", *Materials* 2014, 7, 1603-1624

- [36] Maria H. Miguelez, Ana Munoz-Sanchez, Jose L. Cantero, Jose A. Loya, "An Efficient Implementation Of Boundary Conditions In An ALE Model For Orthogonal Cutting", Journal of Theoretical and Applied Mechanics 47, 3, pp. 599-616, Warsaw 2009
- [37] G. Fang, P. Zeng," Effects of Tool Geometrical Parameters on the Chip Formation and Cutting Force in Orthogonal Cutting", Materials Science Forum Vols. 471-472 (2004) pp 16-20
- [38] Abena, A, Soo, SL & Essa, K 2015, "A finite element simulation for orthogonal cutting of UD-CFRP incorporating a novel fibre - matrix interface model", Procedia CIRP, vol 31, pp. 539-544., 10.1016
- [39] Abaqus Analysis User's Manual
- [40] Abaqus/CAE User's Manual
- [41] Jinyang Xu, Mohamed El Mansori, "Finite element analysis when orthogonal cutting of hybrid composite CFRP/Ti", IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 87 (2015)

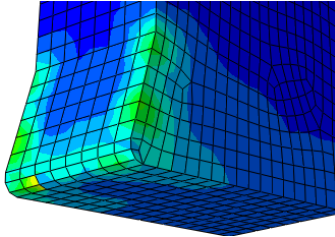




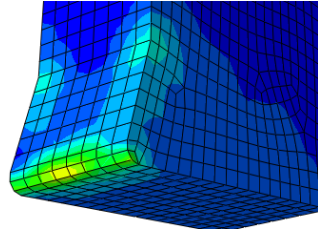
Πρόωση	f	200	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.04	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	15	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	0	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο

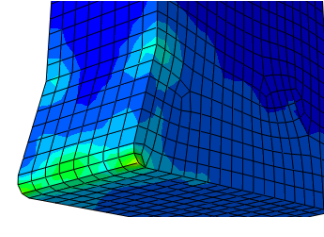
$S_{max}=2.31\text{GPa}$   $L=1.00\text{mm}$



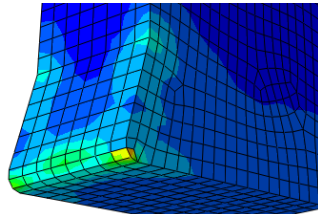
$S_{max}=2.23\text{GPa}$   $L=3.25\text{mm}$



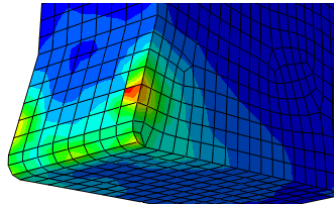
$S_{max}=2.23\text{GPa}$   $L=3.75\text{mm}$



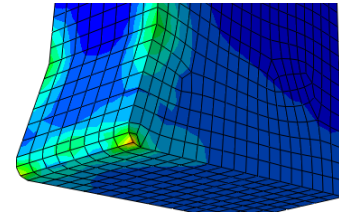
$S_{max}=2.33\text{GPa}$   $L=4.00\text{mm}$



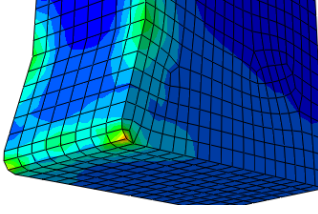
$S_{max}=3.08\text{GPa}$   $L=4.25\text{mm}$



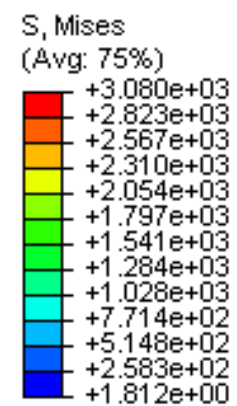
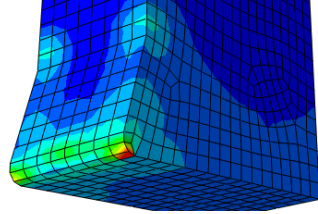
$S_{max}=2.69\text{GPa}$   $L=4.50\text{mm}$



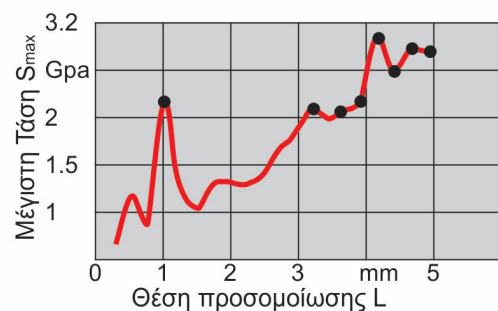
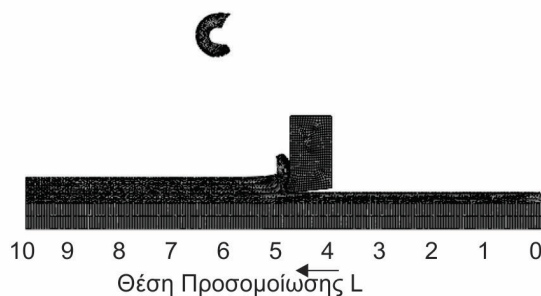
$S_{max}=2.92\text{GPa}$   $L=4.75\text{mm}$



$S_{max}=2.91\text{GPa}$   $L=5.00\text{mm}$



### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο

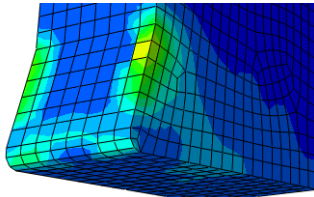




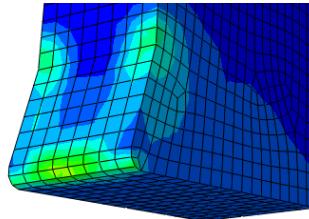
Πρόωση	f	300	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.04	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	15	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	0	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο

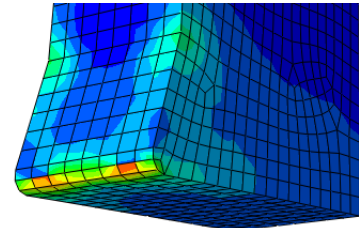
$S_{max}=1.95\text{GPa}$   $L=1.00\text{mm}$



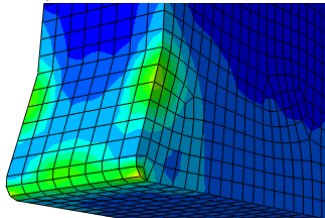
$S_{max}=2.11\text{GPa}$   $L=2.75\text{mm}$



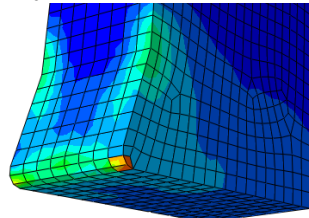
$S_{max}=2.34\text{GPa}$   $L=3.25\text{mm}$



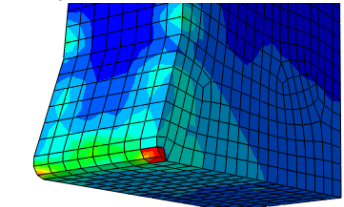
$S_{max}=2.07\text{GPa}$   $L=4.00\text{mm}$



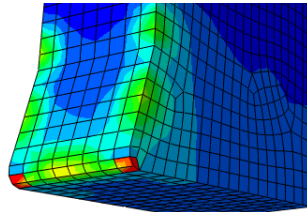
$S_{max}=2.23\text{GPa}$   $L=4.25\text{mm}$



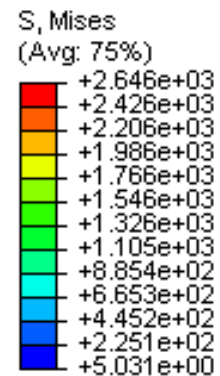
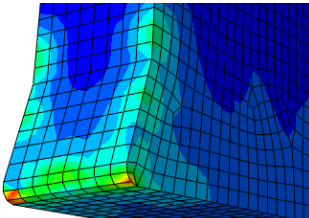
$S_{max}=2.64\text{GPa}$   $L=4.50\text{mm}$



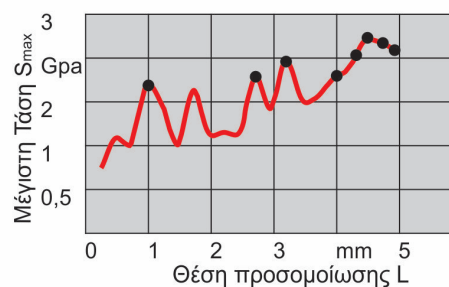
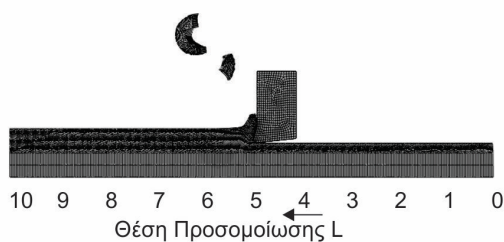
$S_{max}=2.64\text{GPa}$   $L=4.75\text{mm}$



$S_{max}=2.51\text{GPa}$   $L=5.00\text{mm}$



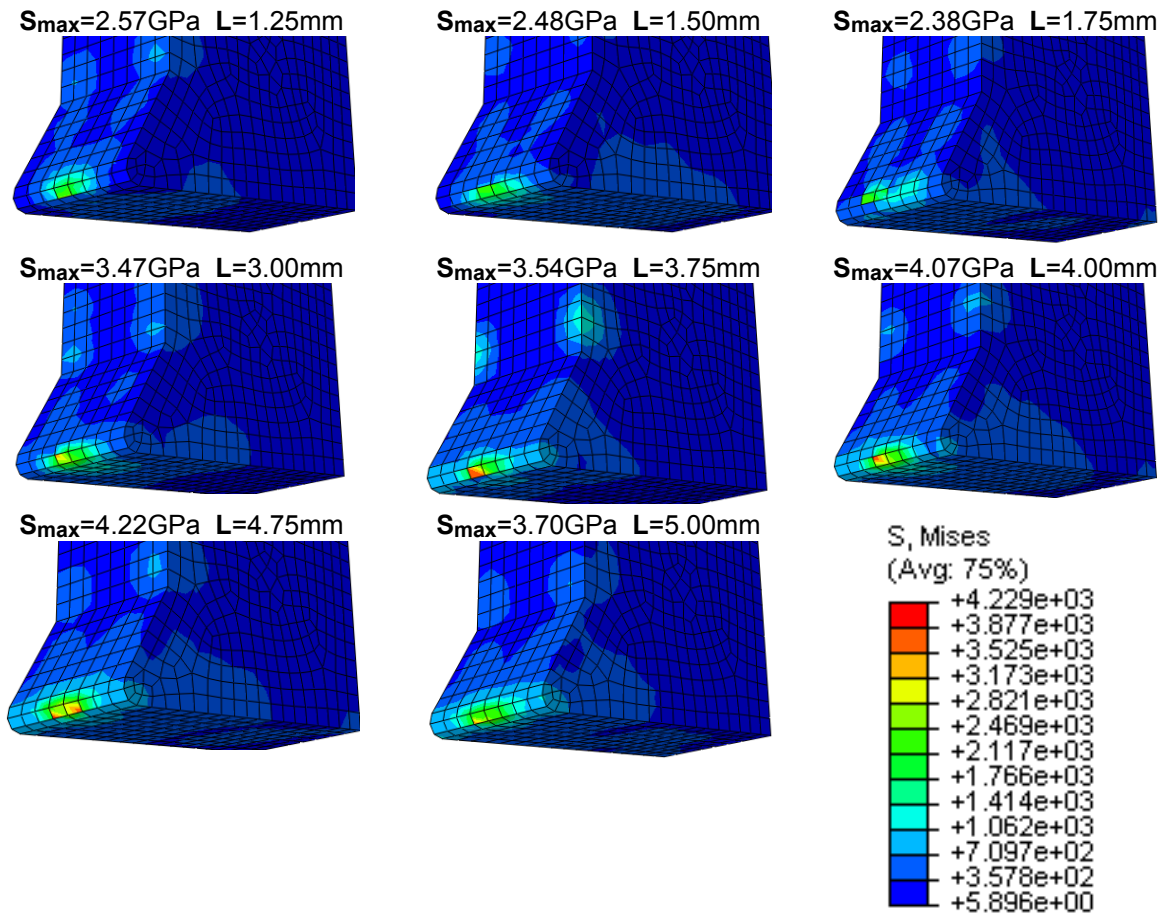
### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο



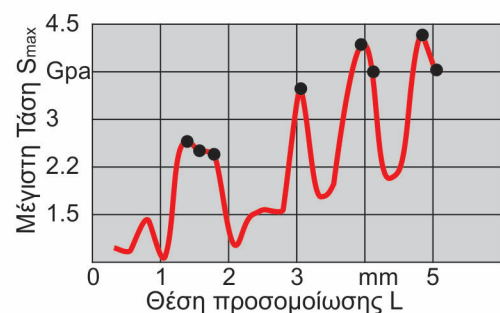
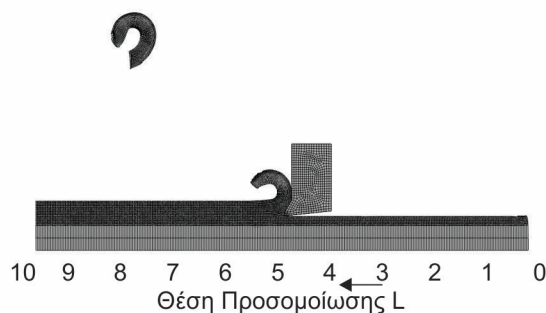


Πρόωση	f	200	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.04	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	30	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	0	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο



### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο

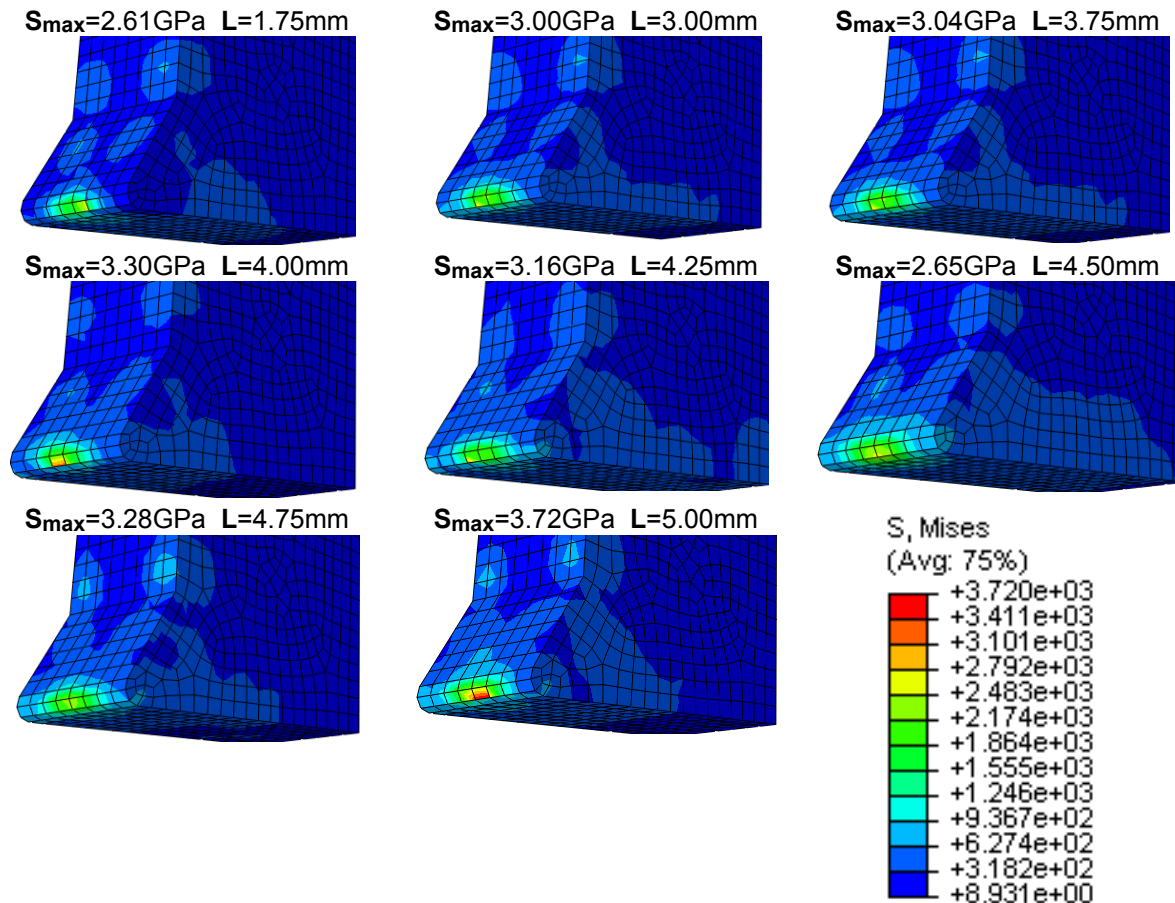




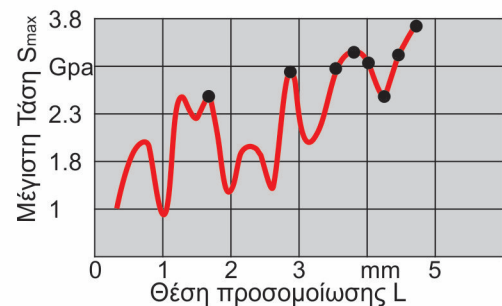
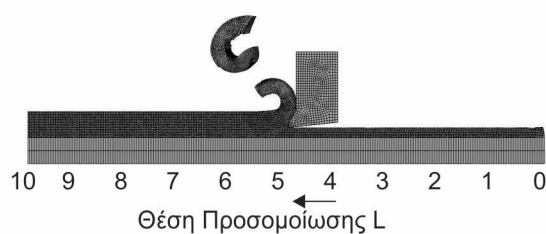


Πρόωση	f	300	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.04	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	30	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	0	deg

#### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο



#### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο

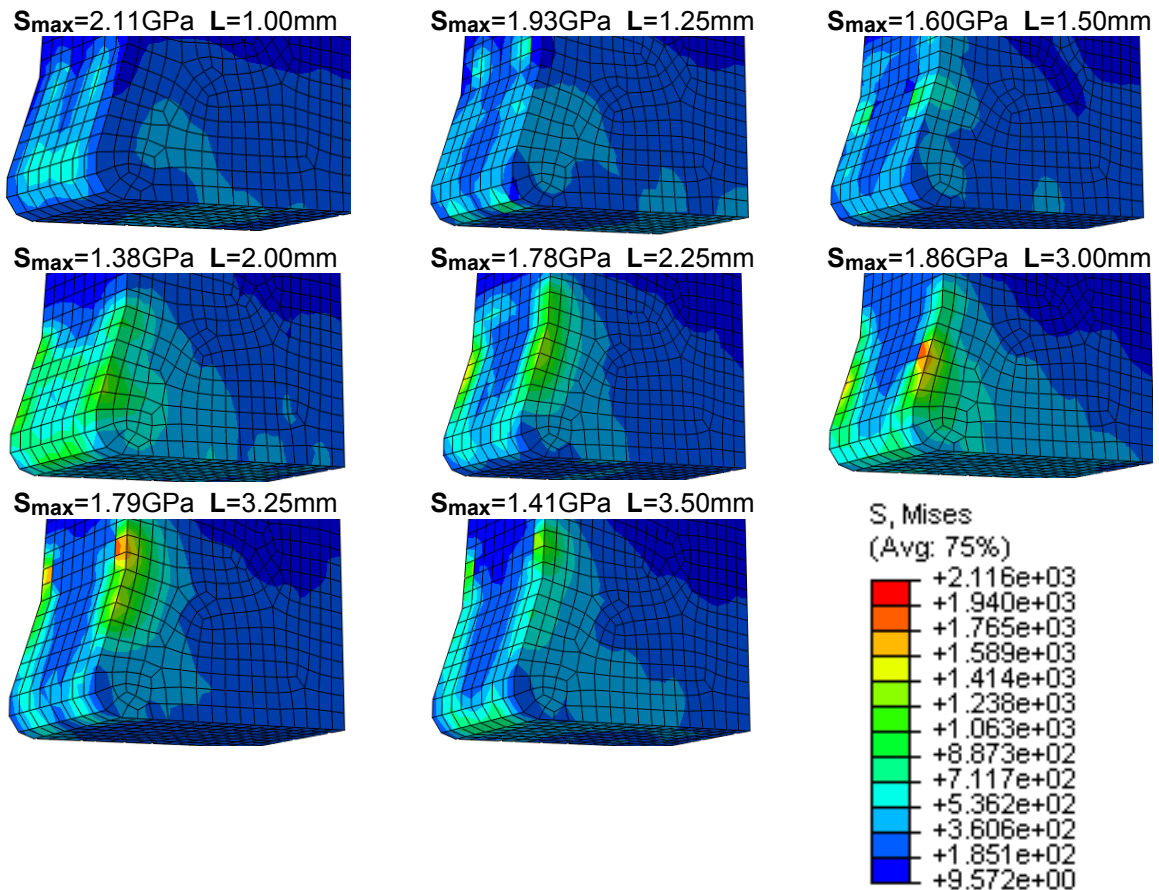




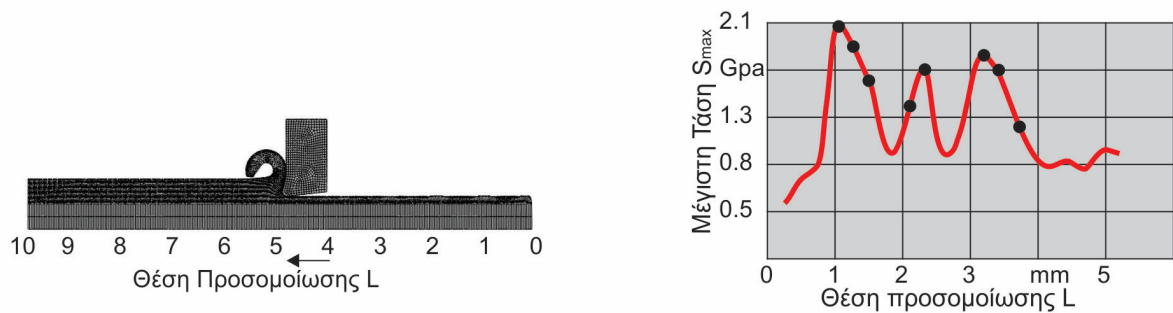


Πρόωση	f	200	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.08	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	15	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	0	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο



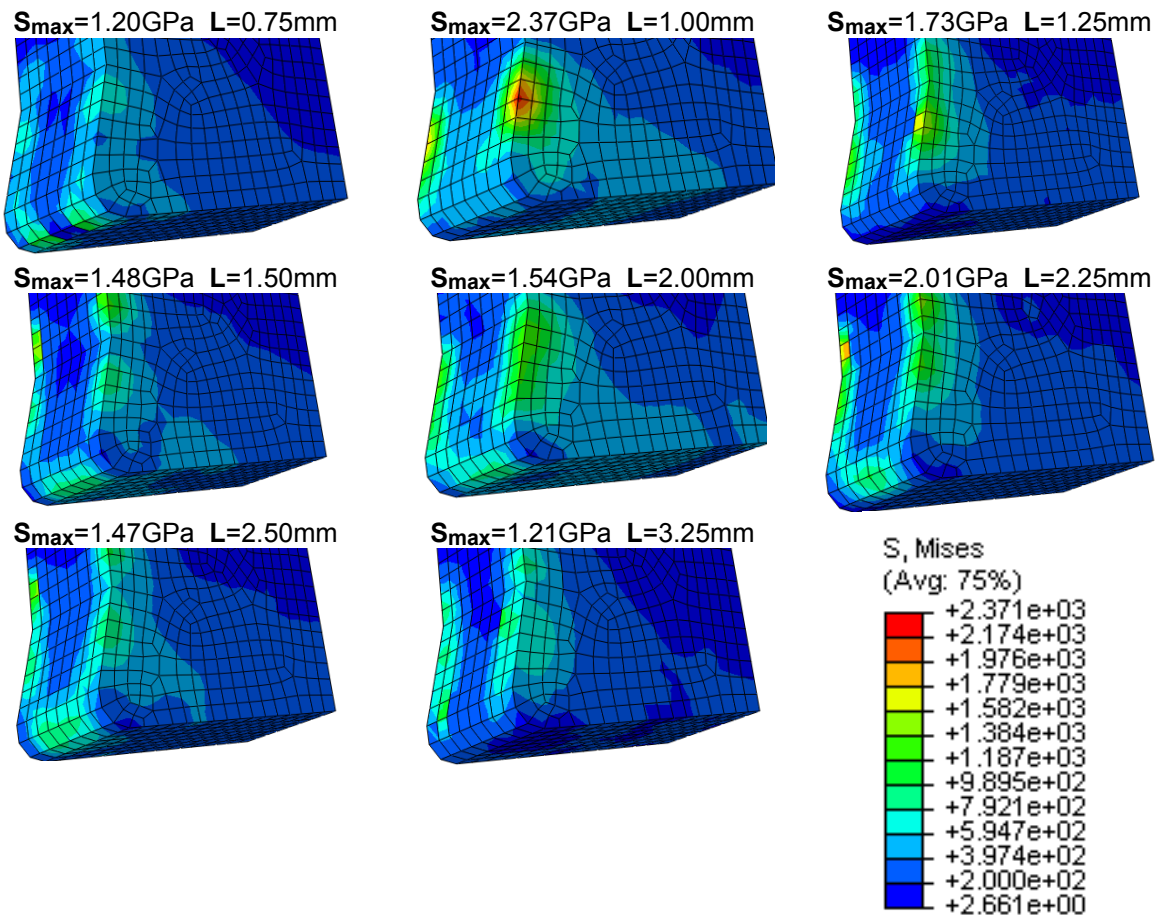
### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο



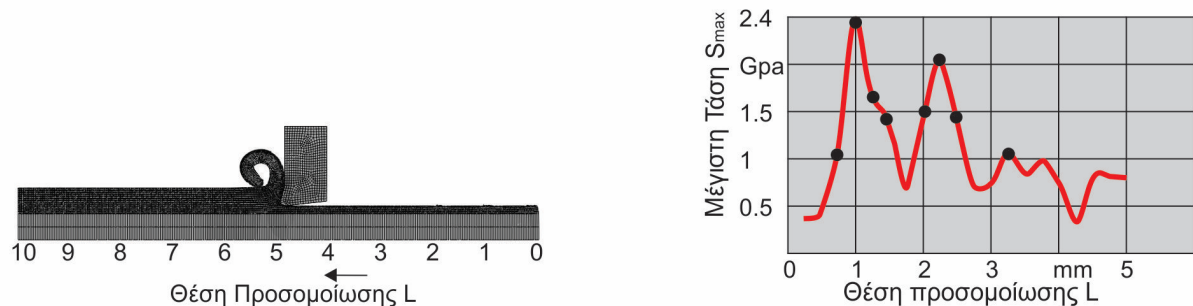


Πρόωση	f	300	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.08	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	15	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	0	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο



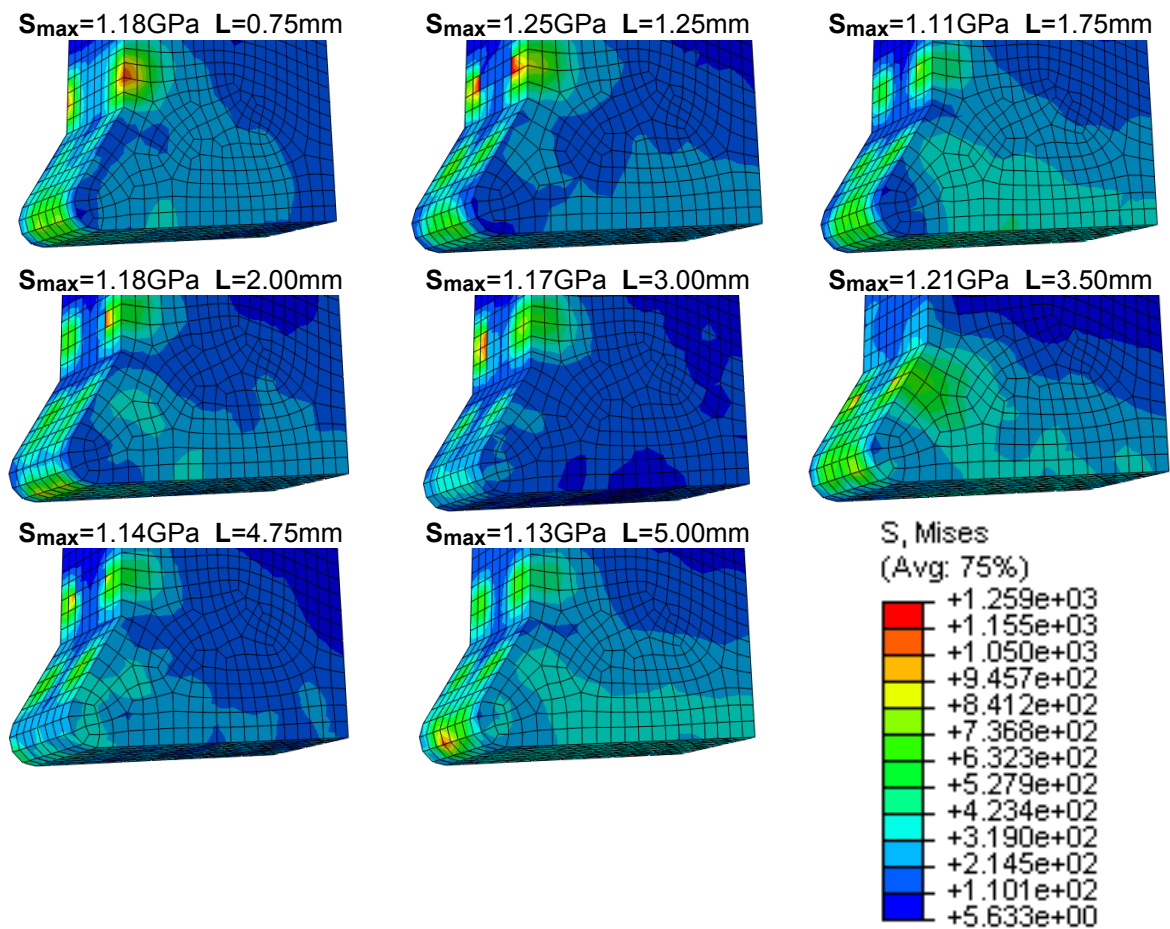
### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο



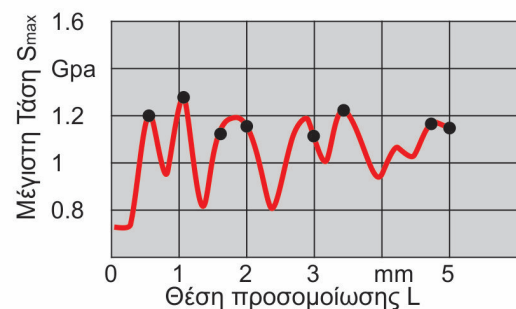
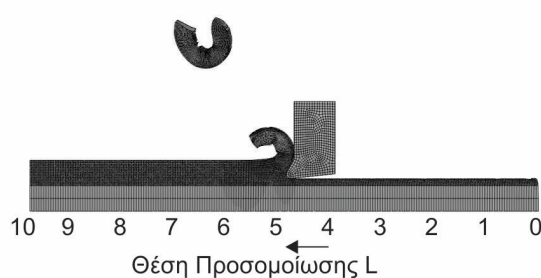


Πρόωση	f	200	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.08	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	30	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	0	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο



### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο

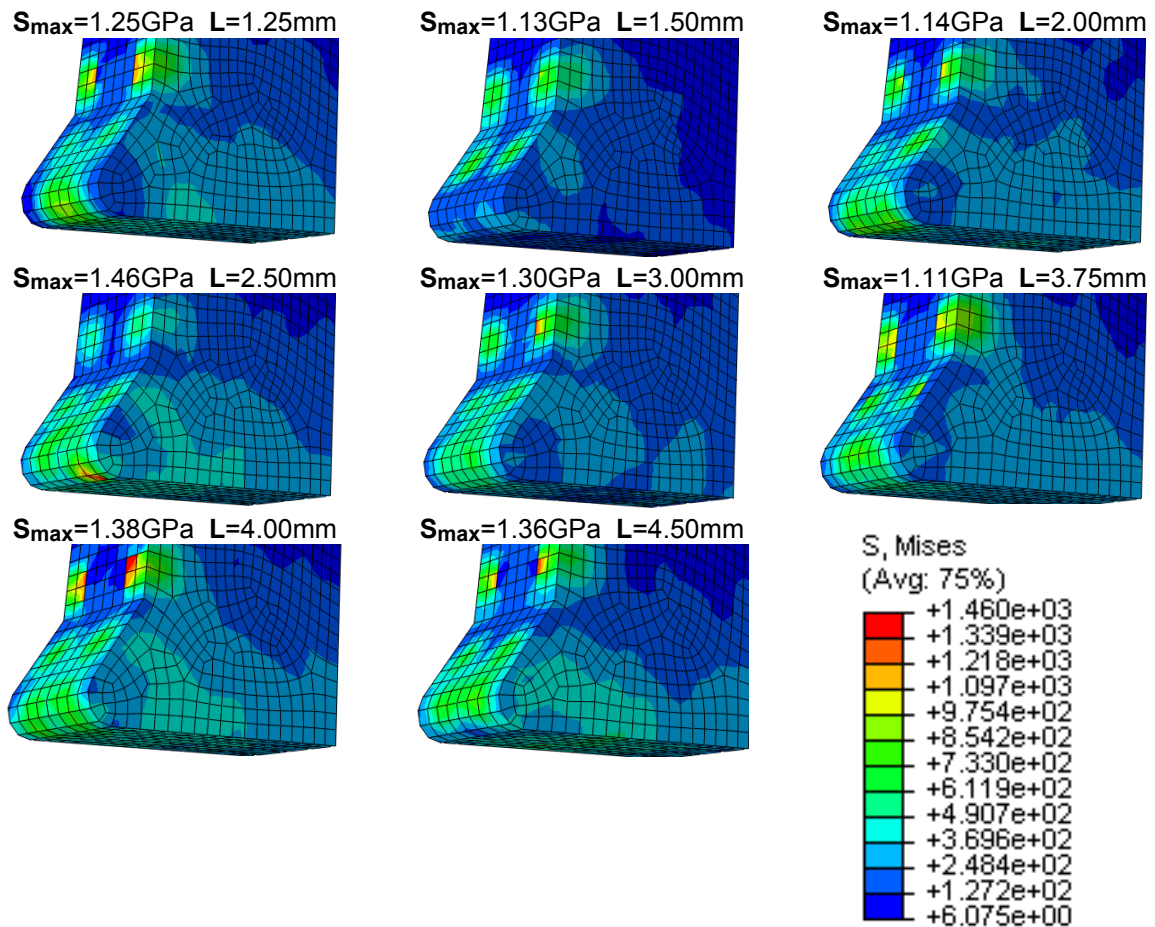




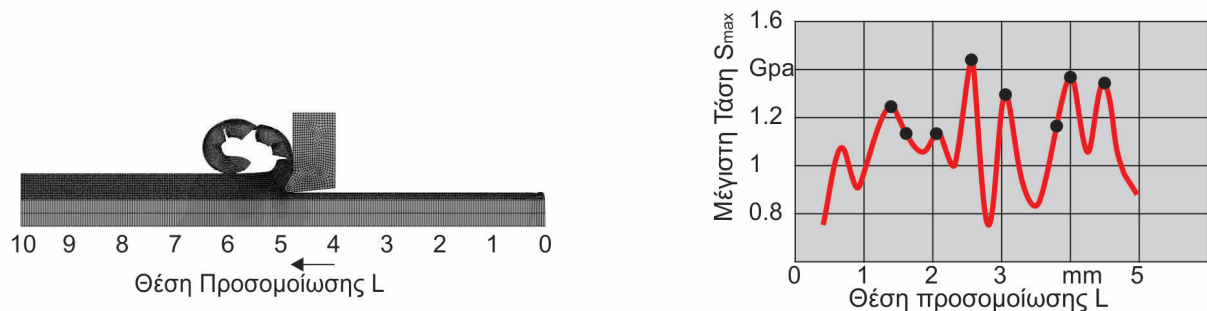


Πρόωση	f	300	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.08	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	30	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	0	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο



### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο

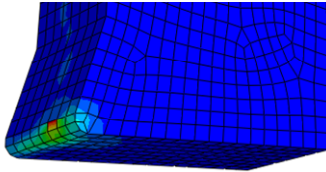




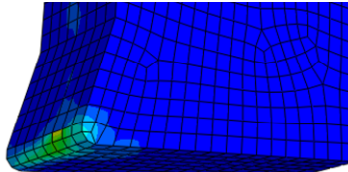
Πρόωση	f	200	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.04	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	15	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	15	deg

#### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο

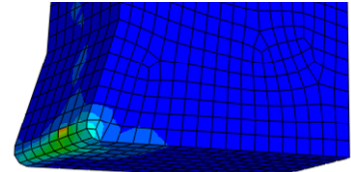
$S_{max}=9.53\text{GPa}$   $L=2.00\text{mm}$



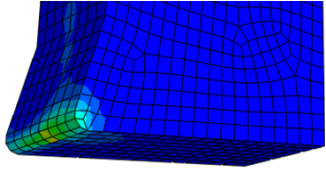
$S_{max}=7.11\text{GPa}$   $L=2.25\text{mm}$



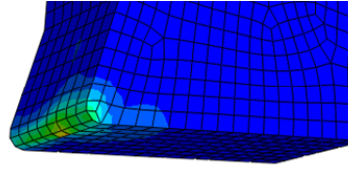
$S_{max}=7.93\text{GPa}$   $L=3.25\text{mm}$



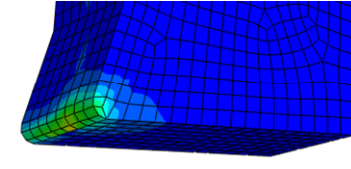
$S_{max}=7.28\text{GPa}$   $L=3.50\text{mm}$



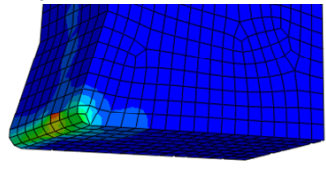
$S_{max}=7.60\text{GPa}$   $L=4.00\text{mm}$



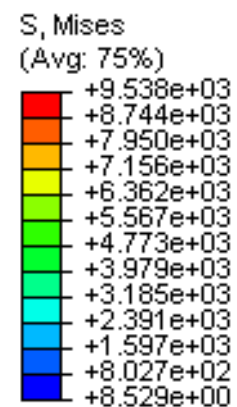
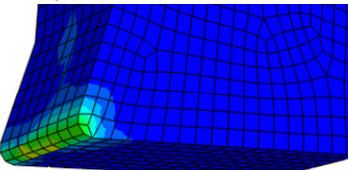
$S_{max}=7.31\text{GPa}$   $L=4.50\text{mm}$



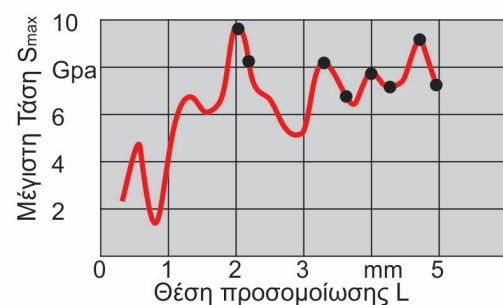
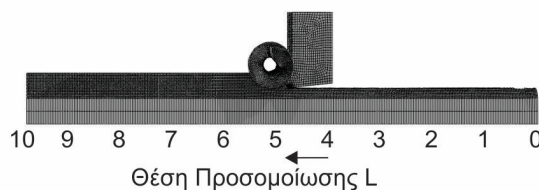
$S_{max}=8.96\text{GPa}$   $L=4.75\text{mm}$



$S_{max}=7.11\text{GPa}$   $L=5.00\text{mm}$



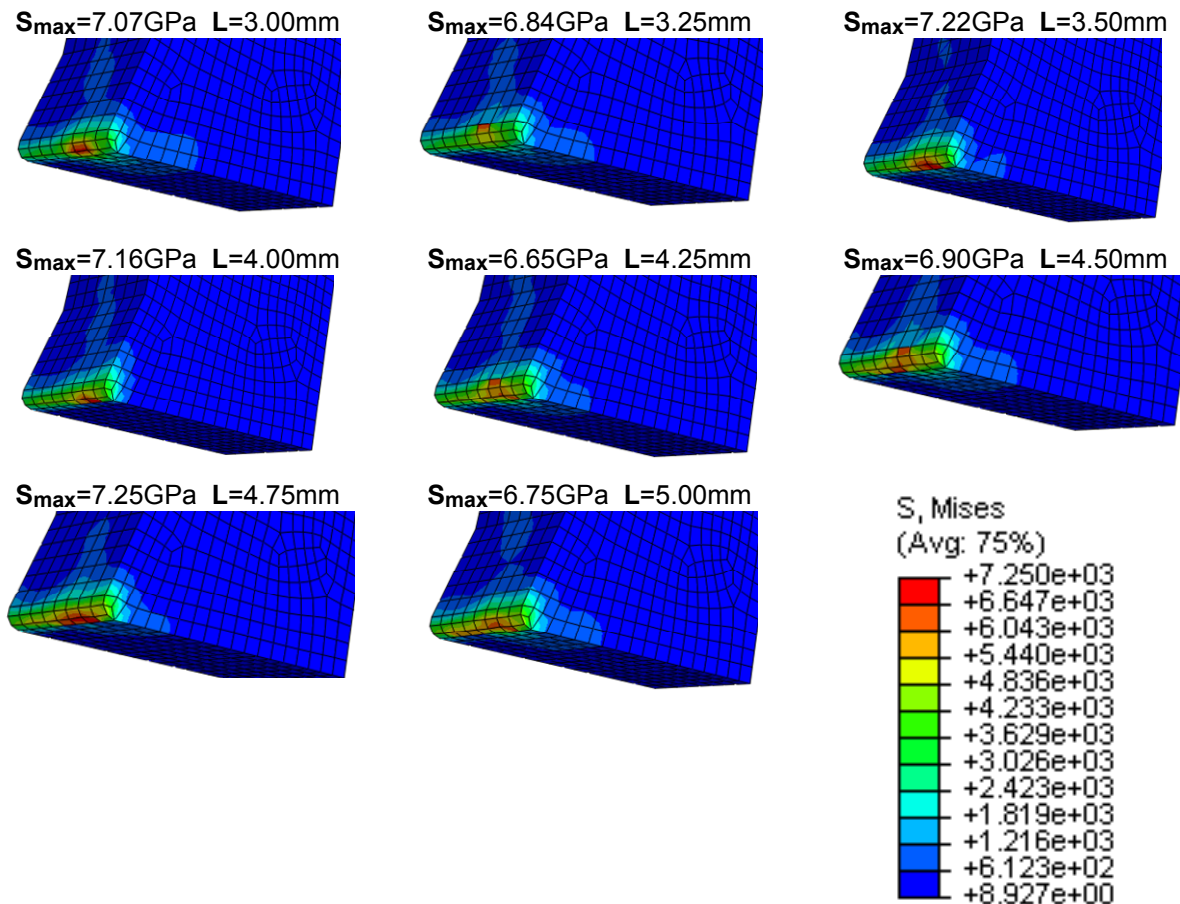
#### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο



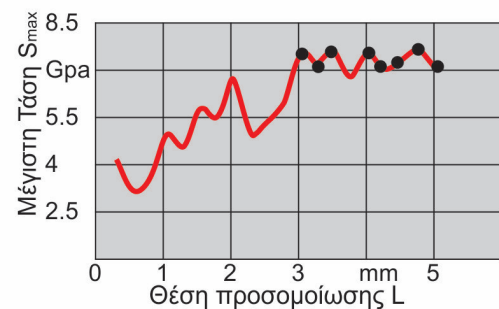
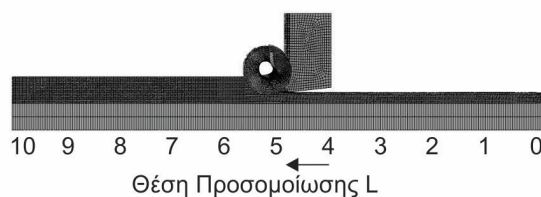


Πρώωση	f	300	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.04	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	15	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	15	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο



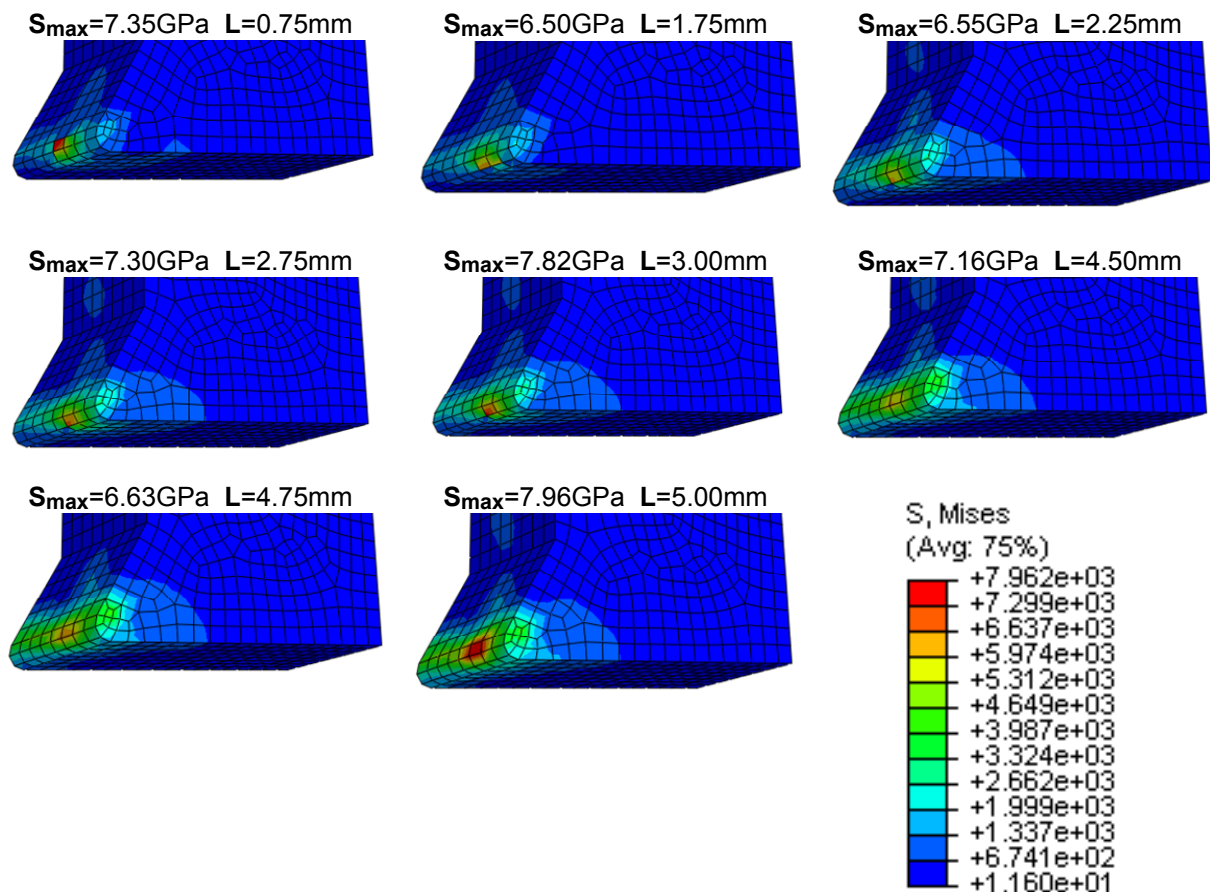
### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο



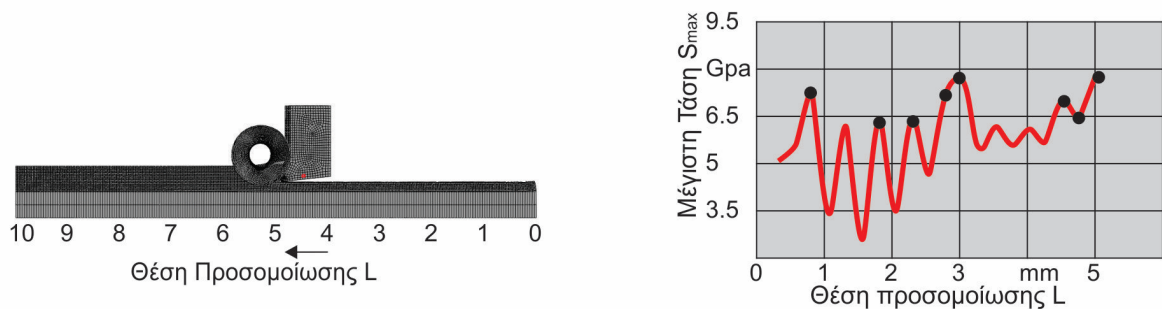


Πρώωση	f	200	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.04	mm
Γωνία αποβλίπτου	$\gamma$	30	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	15	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο



### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο

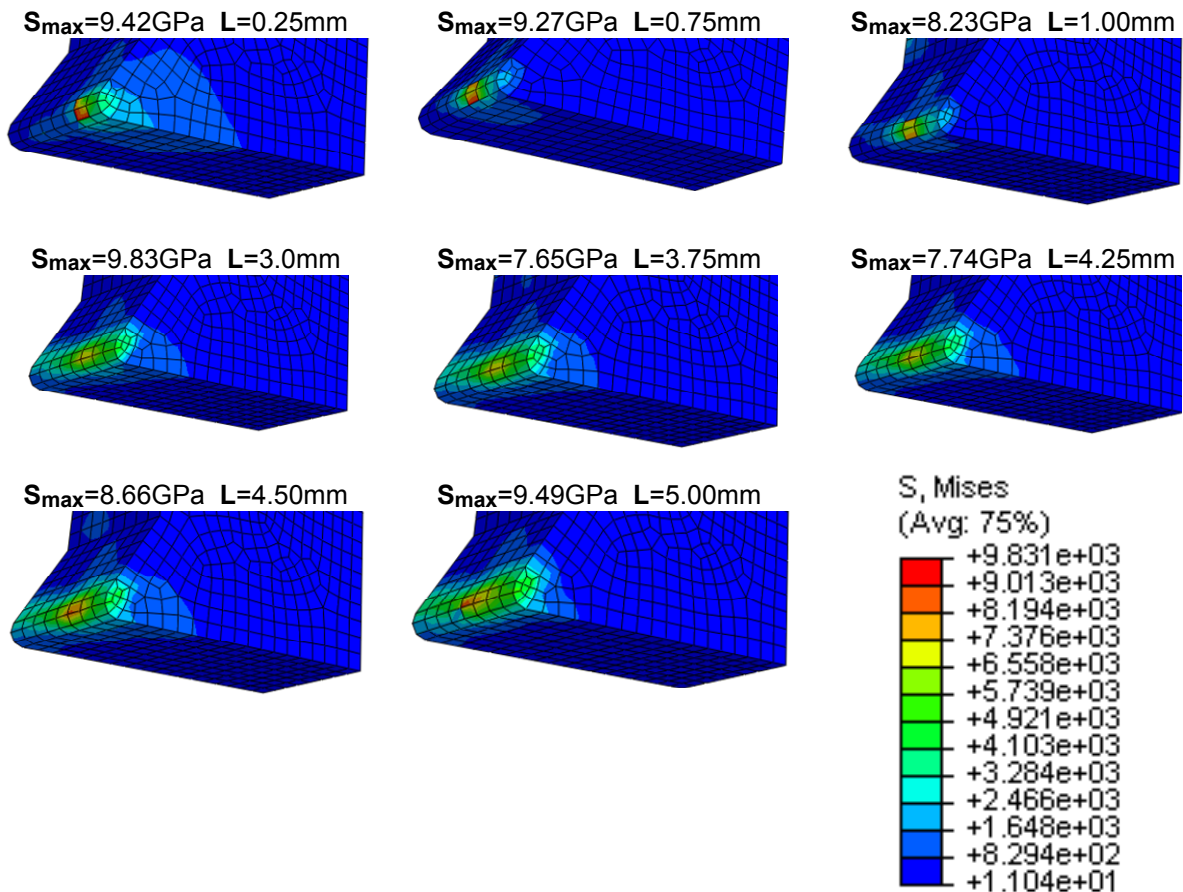




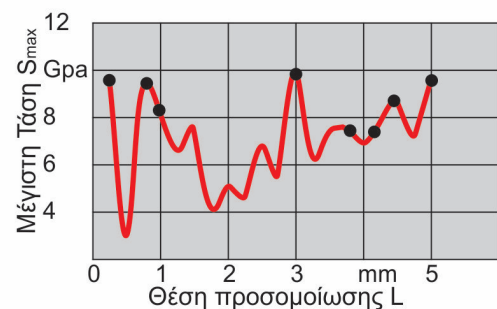
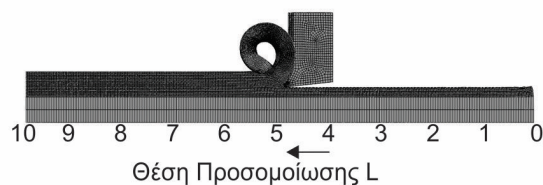


Πρόωση	f	300	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.04	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	30	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	15	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο



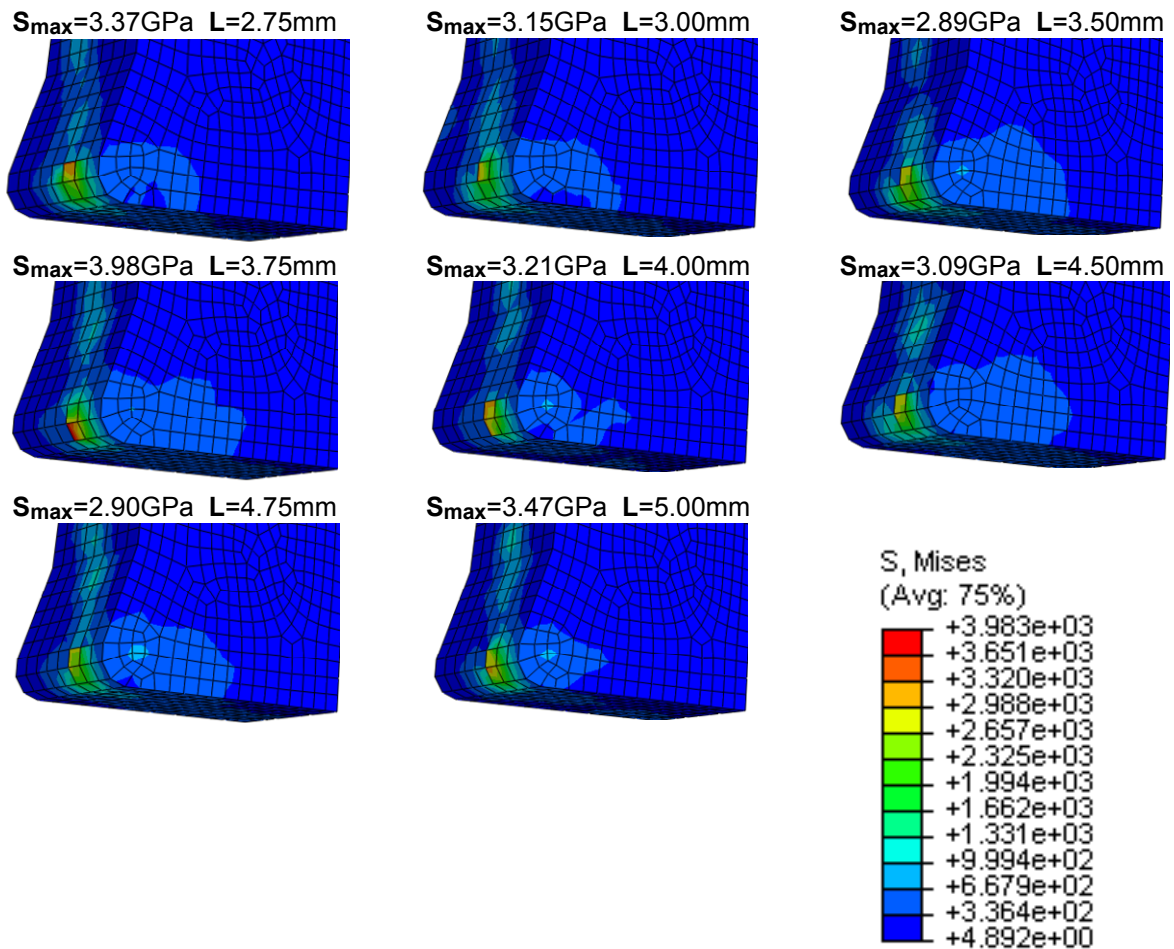
### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο



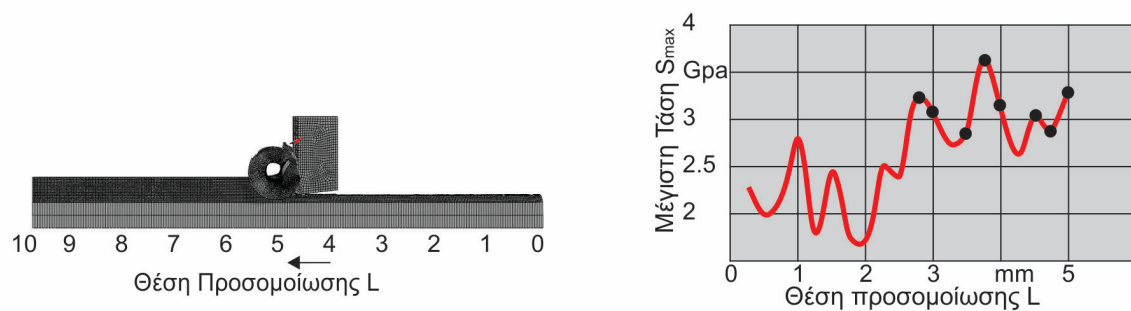


Πρόωση	f	200	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.08	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	15	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	15	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο



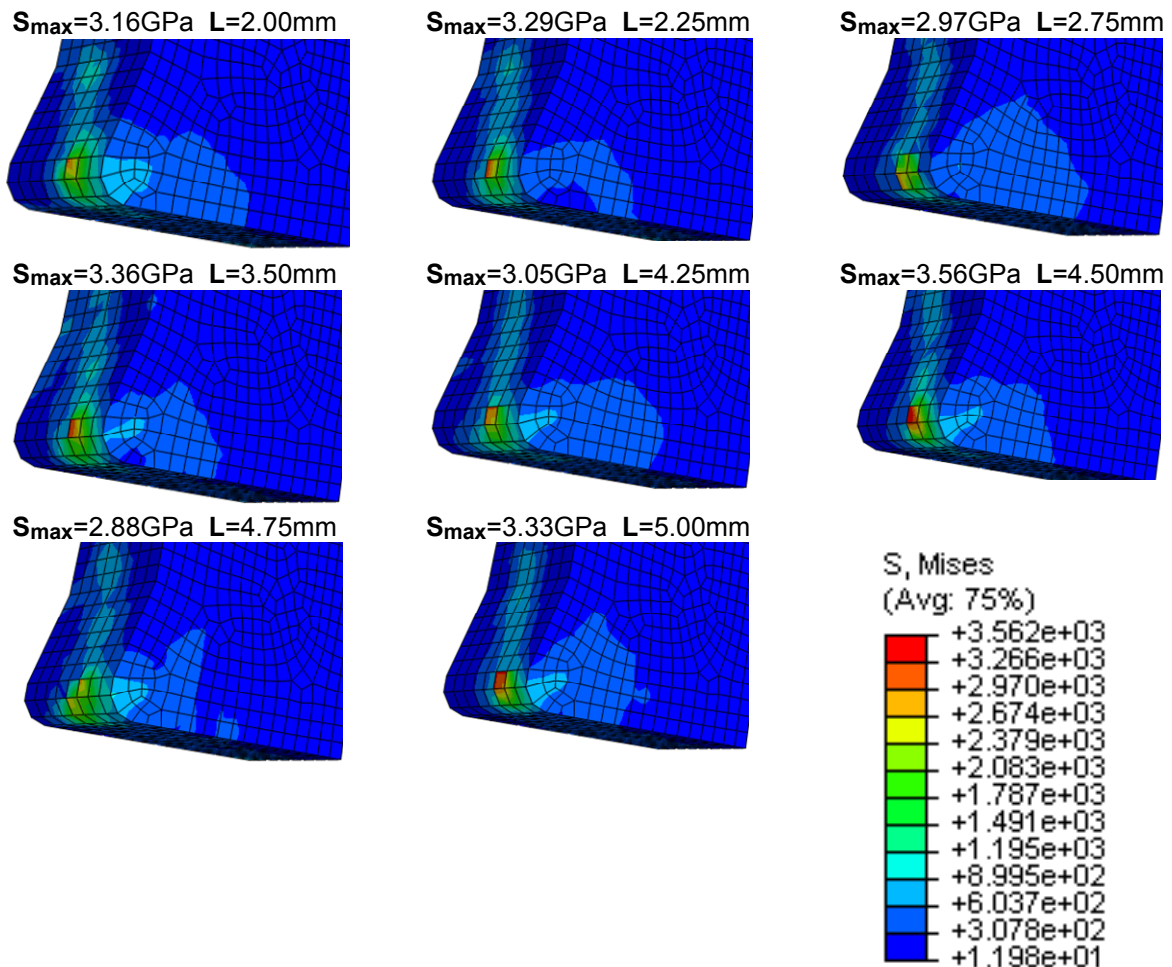
### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο



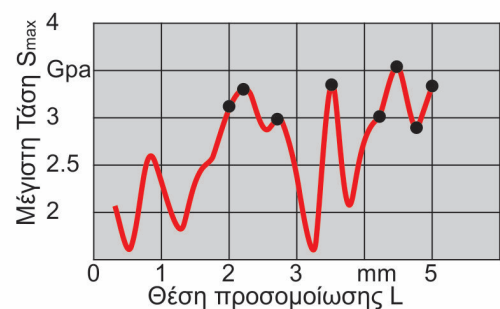
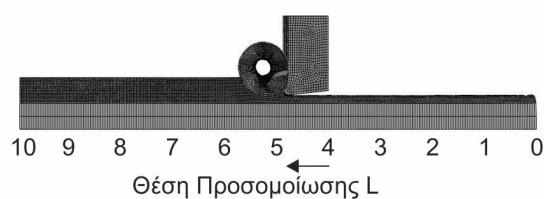


Πρόωση	f	300	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.08	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	15	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	15	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο



### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο

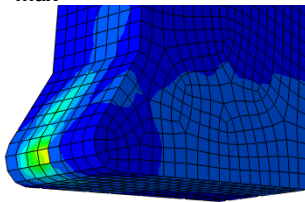




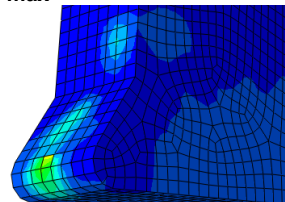
Πρόωση	f	200	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.08	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	30	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	15	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο

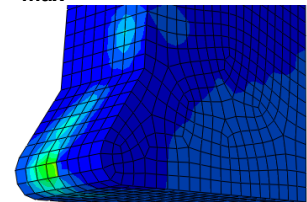
$S_{max}=2.84\text{GPa}$   $L=1.00\text{mm}$



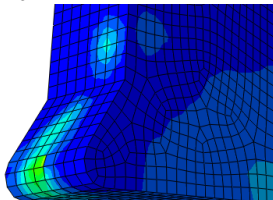
$S_{max}=2.63\text{GPa}$   $L=2.25\text{mm}$



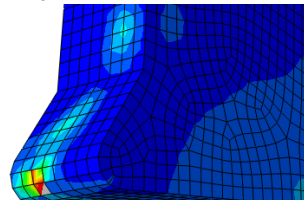
$S_{max}=2.30\text{GPa}$   $L=2.50\text{mm}$



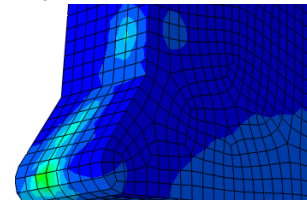
$S_{max}=2.24\text{GPa}$   $L=2.75\text{mm}$



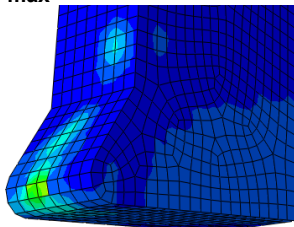
$S_{max}=3.71\text{GPa}$   $L=3.50\text{mm}$



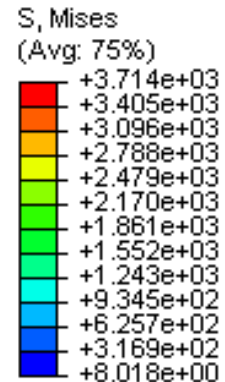
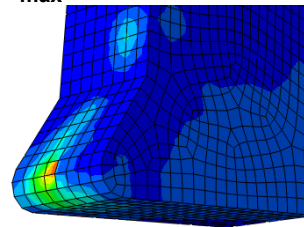
$S_{max}=2.34\text{GPa}$   $L=4.50\text{mm}$



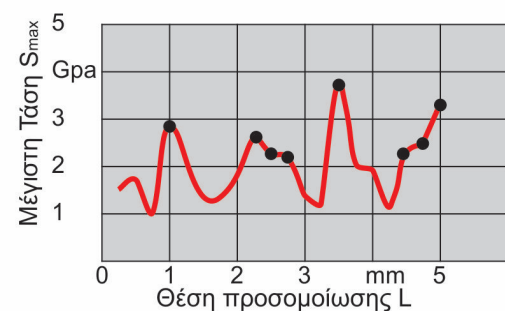
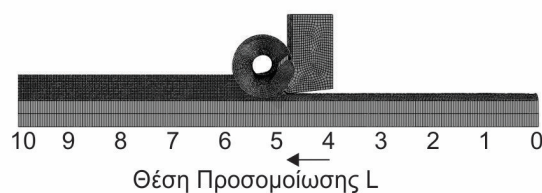
$S_{max}=2.53\text{GPa}$   $L=4.75\text{mm}$



$S_{max}=3.29\text{GPa}$   $L=5.00\text{mm}$



### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο

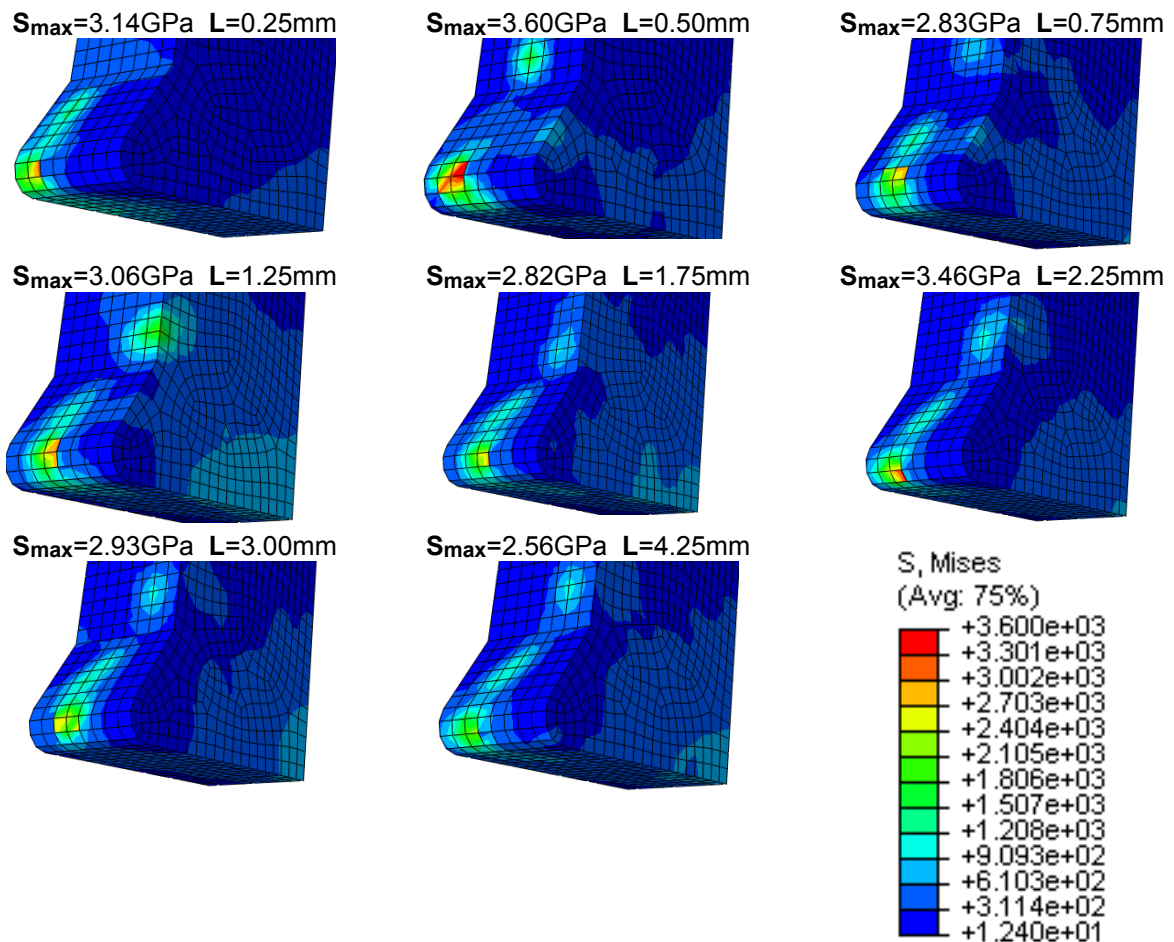




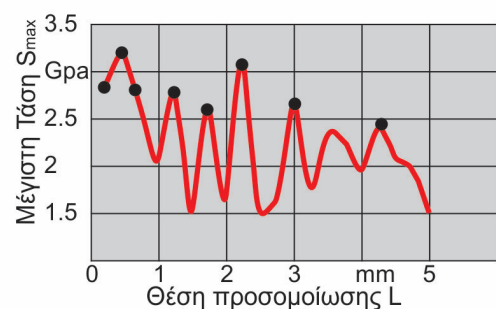
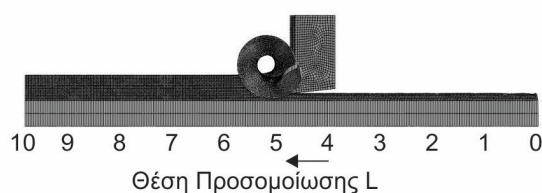


Πρόωση	f	300	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.08	mm
Γωνία αποβλίπτου	$\gamma$	30	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	15	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο



### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο

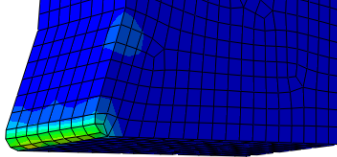




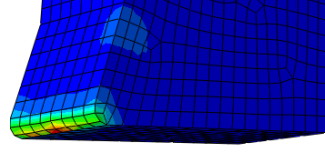
Πρόωση	f	200	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.04	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	15	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	30	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο

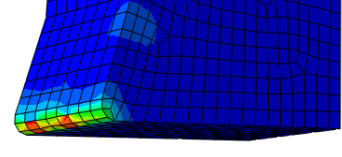
$S_{max}=9.53\text{GPa}$   $L=3.25\text{mm}$



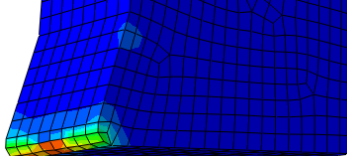
$S_{max}=12.15\text{GPa}$   $L=3.50\text{mm}$



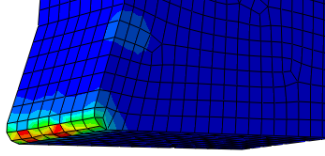
$S_{max}=12.25\text{GPa}$   $L=3.75\text{mm}$



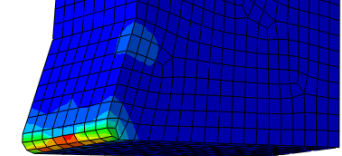
$S_{max}=11.47\text{GPa}$   $L=4.00\text{mm}$



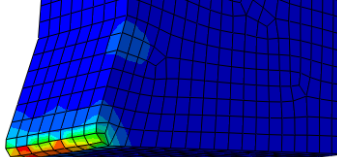
$S_{max}=12.78\text{GPa}$   $L=4.25\text{mm}$



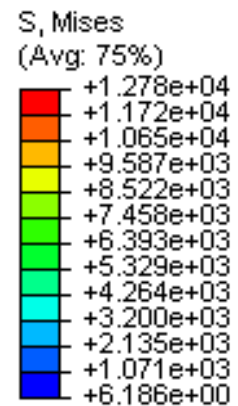
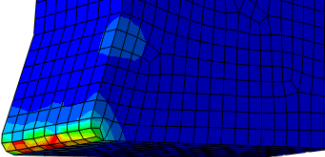
$S_{max}=11.78\text{GPa}$   $L=4.50\text{mm}$



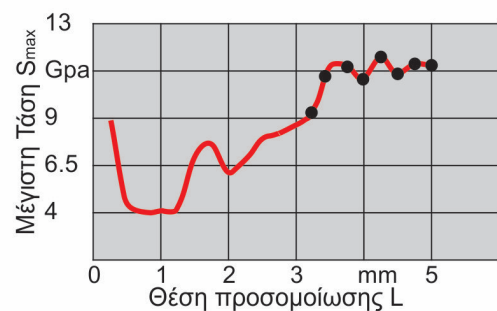
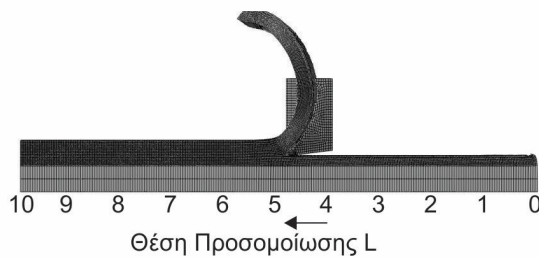
$S_{max}=12.35\text{GPa}$   $L=4.75\text{mm}$



$S_{max}=12.28\text{GPa}$   $L=5.00\text{mm}$



### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο

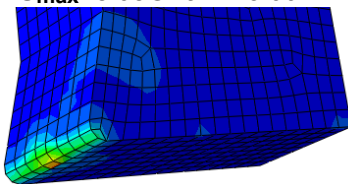




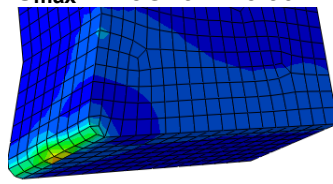
Πρώωση	f	300	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.04	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	15	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	30	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο

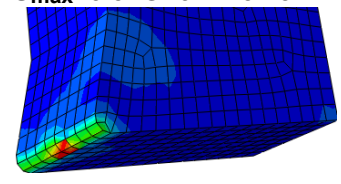
**S<sub>max</sub>=8.08GPa L=3.00mm**



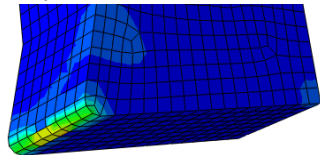
**S<sub>max</sub>=7.18GPa L=3.50mm**



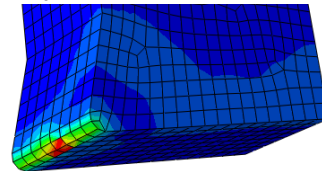
**S<sub>max</sub>=9.32GPa L=3.75mm**



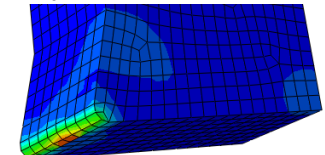
**S<sub>max</sub>=7.43GPa L=4.00mm**



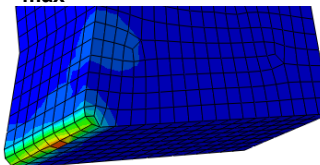
**S<sub>max</sub>=9.43GPa L=4.25mm**



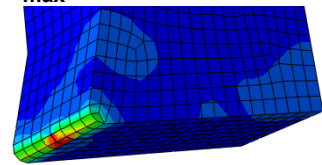
**S<sub>max</sub>=8.76GPa L=4.50mm**



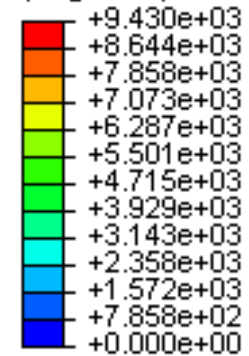
**S<sub>max</sub>=8.75GPa L=4.75mm**



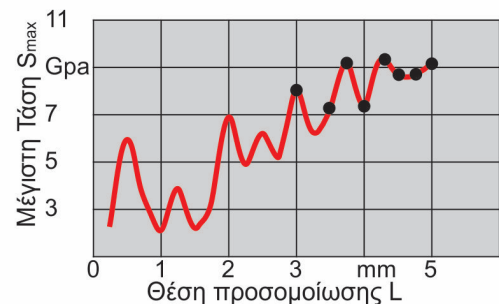
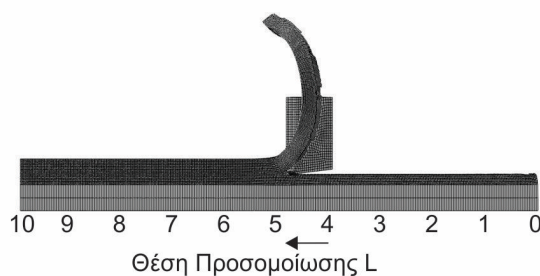
**S<sub>max</sub>=9.23GPa L=5.00mm**



S, Mises  
(Avg: 75%)



### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο

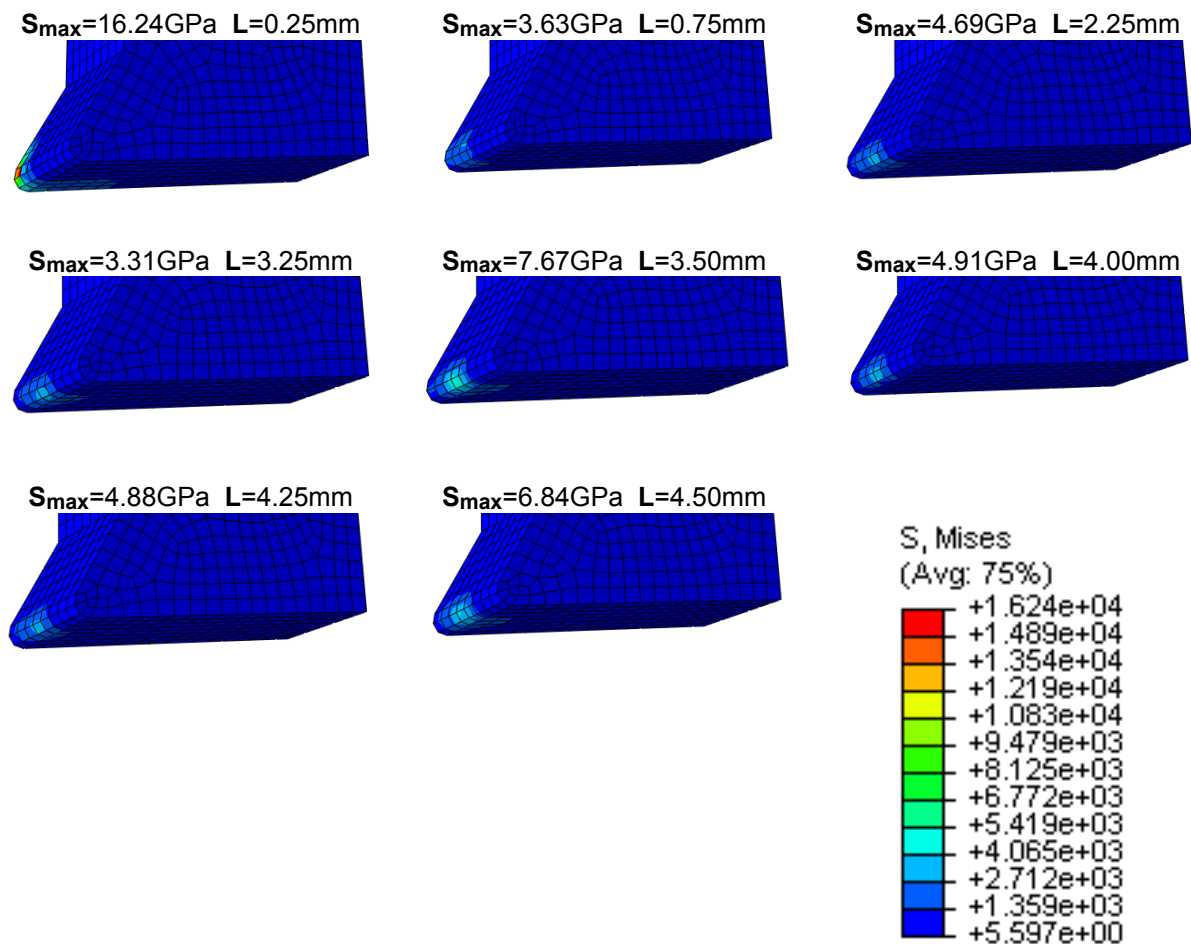




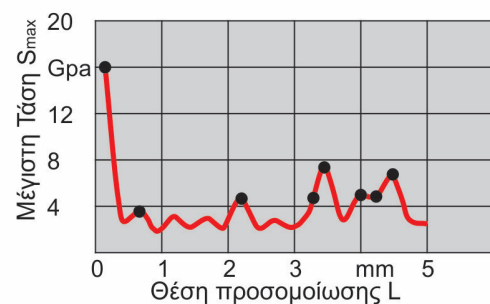
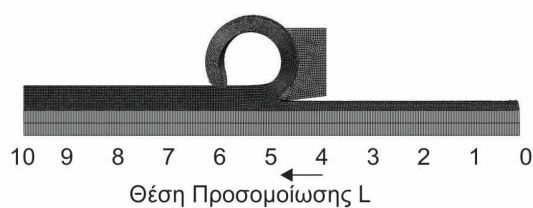


Πρόωση	f	200	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.04	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	30	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	30	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο



### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο

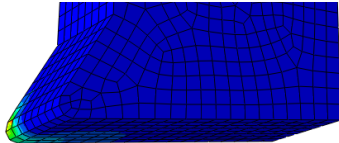




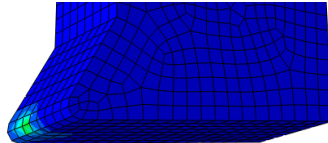
Πρόωση	f	300	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.04	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	30	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	30	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο

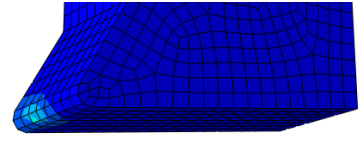
$S_{max}=13.53\text{GPa}$   $L=0.25\text{mm}$



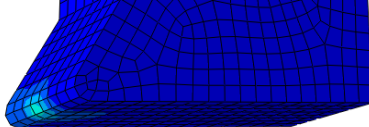
$S_{max}=7.69\text{GPa}$   $L=0.50\text{mm}$



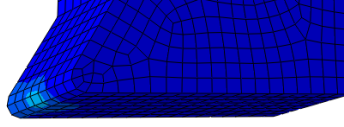
$S_{max}=4.74\text{GPa}$   $L=0.75\text{mm}$



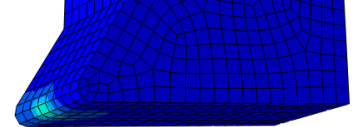
$S_{max}=5.77\text{GPa}$   $L=1.00\text{mm}$



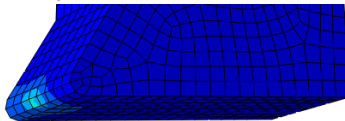
$S_{max}=4.66\text{GPa}$   $L=1.75\text{mm}$



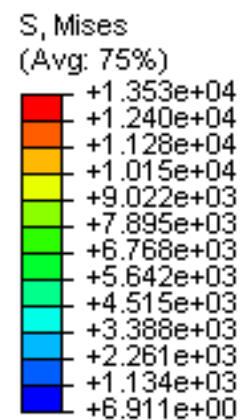
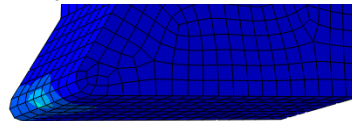
$S_{max}=6.43\text{GPa}$   $L=2.00\text{mm}$



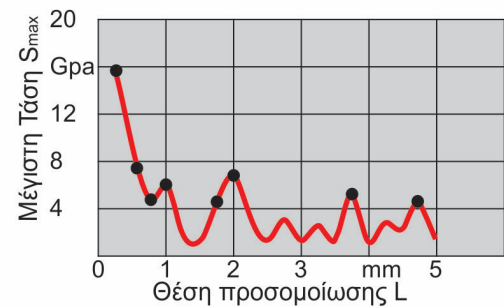
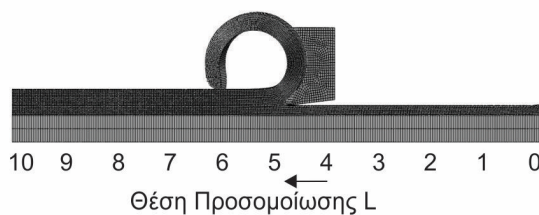
$S_{max}=5.18\text{GPa}$   $L=3.75\text{mm}$



$S_{max}=4.63\text{GPa}$   $L=4.75\text{mm}$



### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο

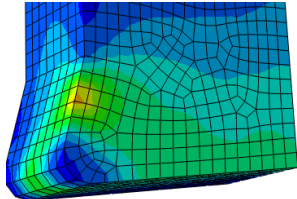




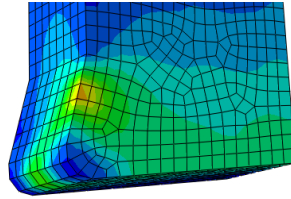
Πρόωση	f	200	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.08	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	15	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	30	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο

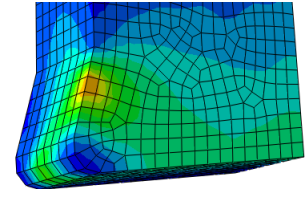
$S_{max}=2.08\text{GPa}$   $L=1.50\text{mm}$



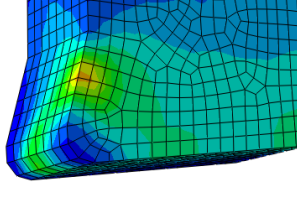
$S_{max}=2.13\text{GPa}$   $L=1.75\text{mm}$



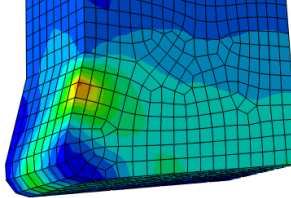
$S_{max}=2.25\text{GPa}$   $L=2.00\text{mm}$



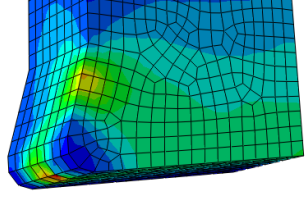
$S_{max}=2.08\text{GPa}$   $L=2.25\text{mm}$



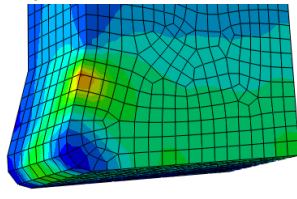
$S_{max}=2.22\text{GPa}$   $L=3.00\text{mm}$



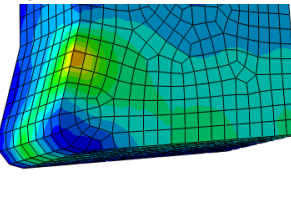
$S_{max}=2.36\text{GPa}$   $L=3.50\text{mm}$



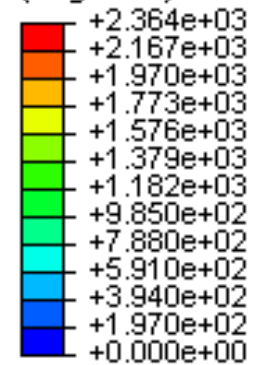
$S_{max}=2.19\text{GPa}$   $L=4.00\text{mm}$



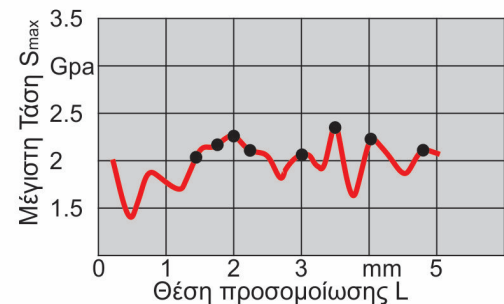
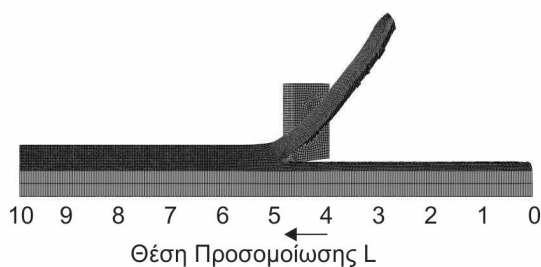
$S_{max}=2.07\text{GPa}$   $L=4.75\text{mm}$



S, Mises  
(Avg: 75%)



### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο

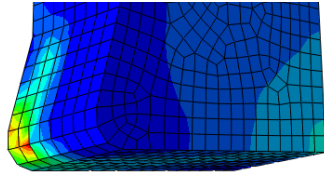




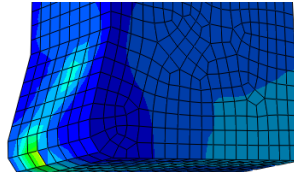
Πρώση	f	300	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.08	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	15	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	30	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο

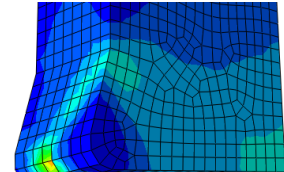
$S_{max}=3.43\text{GPa}$   $L=0.25\text{mm}$



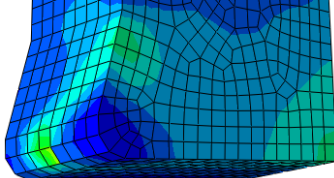
$S_{max}=2.38\text{GPa}$   $L=0.50\text{mm}$



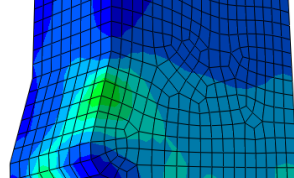
$S_{max}=2.94\text{GPa}$   $L=0.75\text{mm}$



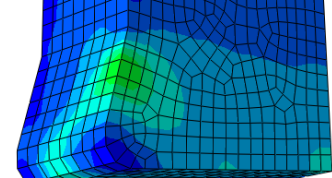
$S_{max}=2.27\text{GPa}$   $L=1.00\text{mm}$



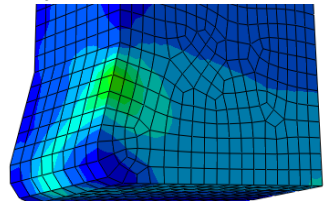
$S_{max}=1.89\text{GPa}$   $L=2.50\text{mm}$



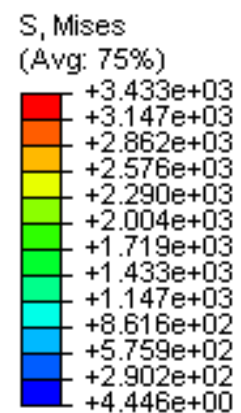
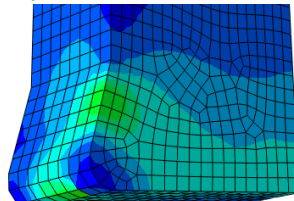
$S_{max}=1.93\text{GPa}$   $L=3.75\text{mm}$



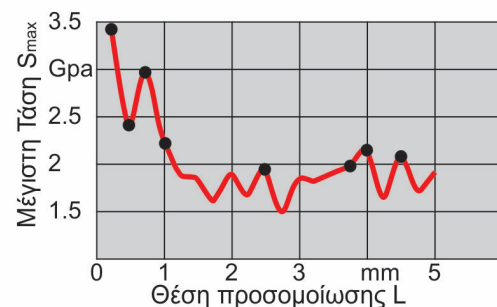
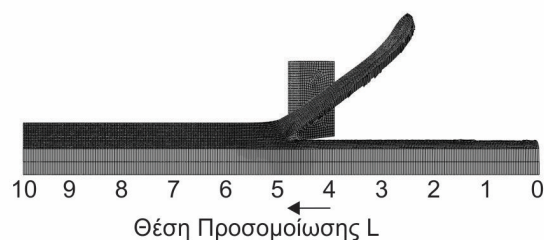
$S_{max}=2.11\text{GPa}$   $L=4.00\text{mm}$



$S_{max}=2.03\text{GPa}$   $L=4.50\text{mm}$



### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο

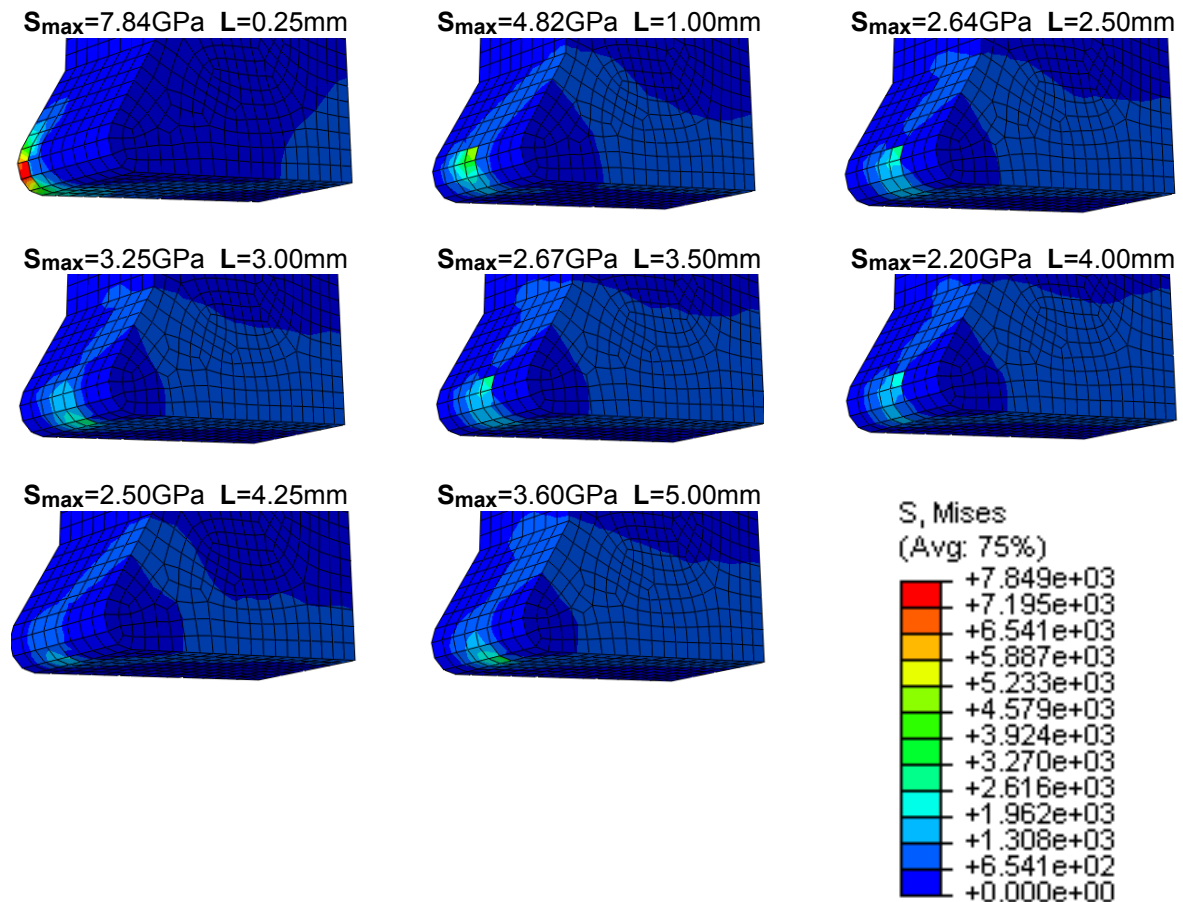




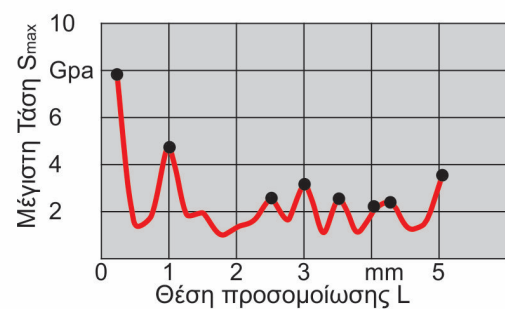
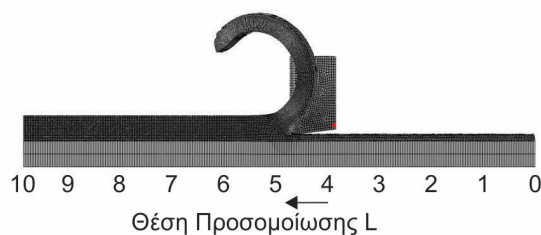


Πρόωση	f	200	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.08	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	30	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	30	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο



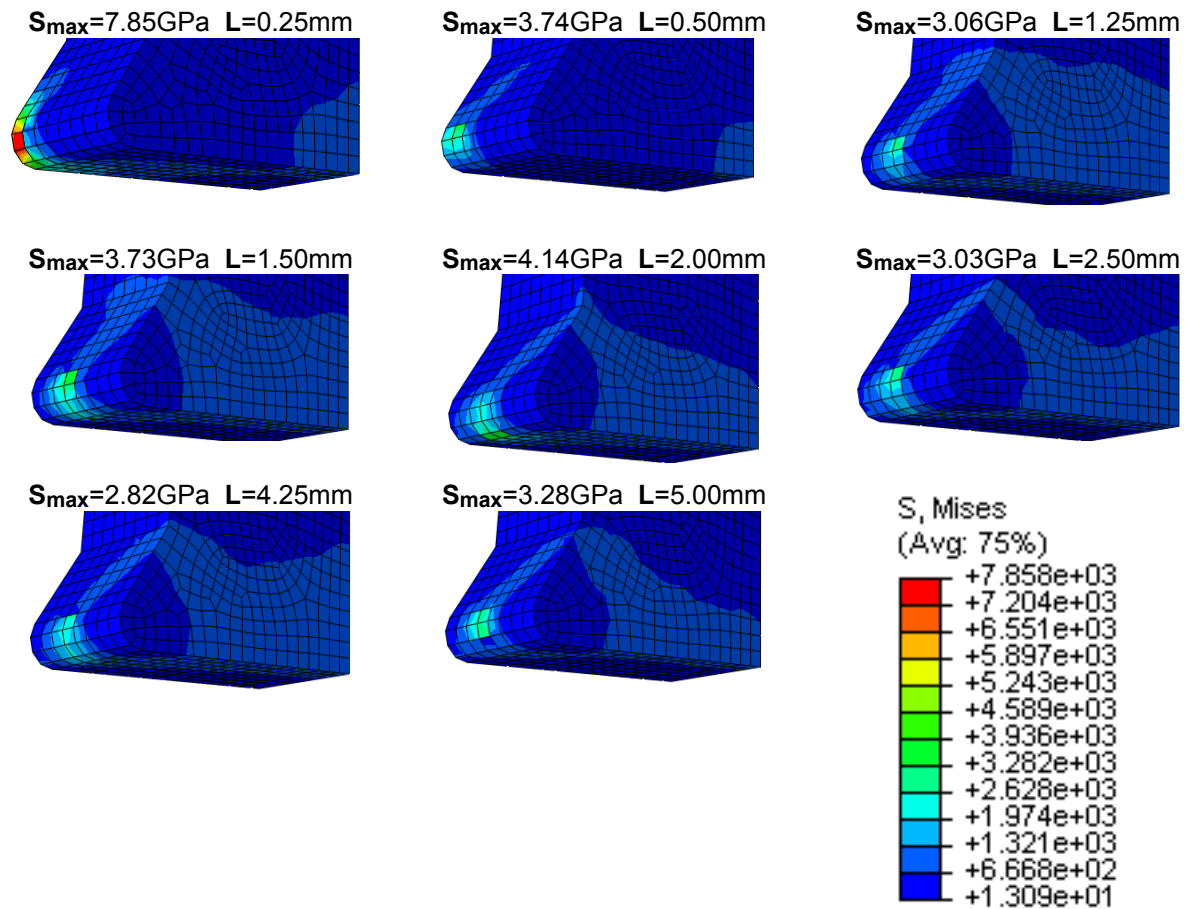
### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο





Πρόωση	f	300	mm/min
Ακτίνα καμπυλότητας	r	0.08	mm
Γωνία αποβλήτου	$\gamma$	30	deg
Γωνία κλίσης της κόψης	$\lambda_s$	30	deg

### Στιγμιότυπα ανάπτυξης τάσεων στο κοπτικό εργαλείο



### Θέσεις μέγιστης τάσης von Mises στο κοπτικό εργαλείο

