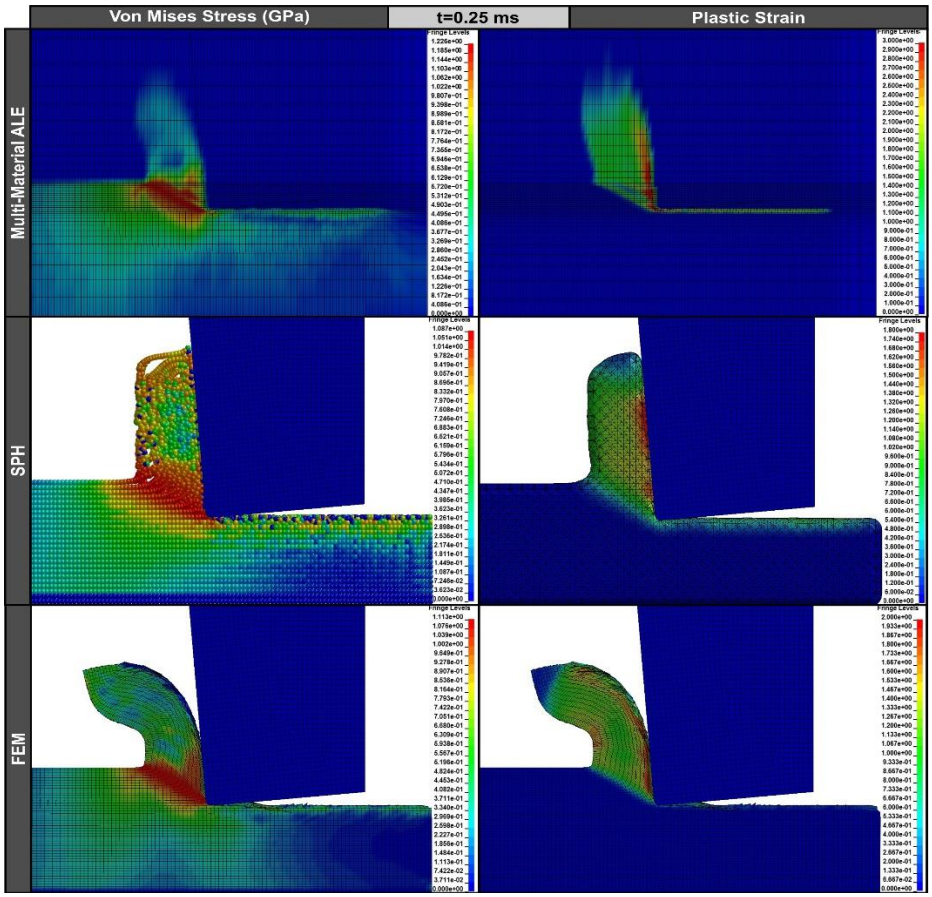
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Προσομοίωση αφαίρεσης υλικού κατεργασιών αναγόμενων σε ορθογωνική κοπή με πεπερασμένα στοιχεία και χρήση της ALE formulation



Βαριαντζά Ελένη

ΧΑΝΙΑ 2018

Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Δημητρίου Βασίλειος, Επίκουρος Καθηγητής

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Επίκουρο Καθηγητή Βασίλη Δημητρίου, του Τμήματος Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, για την δυνατότητα που μου έδωσε να πραγματοποιήσω την πτυχιακή μου εργασία. Οι σημαντικές υποδείξεις και συμβουλές του με κατεύθυναν σ' ένα σωστό τρόπο σκέψης και πάνω απ' όλα μου προσέφεραν σημαντικά εφόδια για την μετέπειτα ζωή μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον Μετά-Διδακτορικό Ερευνητή Δρ. Ευάγγελο Κασελούρη, για τη βοήθεια του και τις συμβουλές του στο επιστημονικό κομμάτι της εργασίας, και τον Παπαδουλή Θεόδωρο, Εργαστηριακό συνεργάτη του εργαστηρίου Προσομοιώσεων & Μηχανολογικών Κατασκευών – SMM, για την παροχή συμβουλών στην εργασία μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Μιχάλη Ταταράκη μέλος της τριμελούς επιτροπής για τις συμβουλές του και τις υποδείξεις του στην πτυχιακή μου εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές Τμήματος Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κρήτης για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΟΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 5
ABSTRACT 6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ 7
1.1 Μηχανουργικές Κατεργασίες 7
1.2 Εργαλειομηχανές αφαίρεσης υλικού 9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 12
Η κατεργασία της τόρνευσης 12
2.1 Μέθοδοι Τόρνευσης 13
2.2 Αρχιτεκτονική εργαλειομηχανής τόρνου 15
2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά τόρνου 16
2.4 Παράμετροι κοπής 17
2.5 Γεωμετρία κοπτικών εργαλείων τόρνου 18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 21
3. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων FEM 21
3.1 Σύντομη ιστορική περιγραφή 22
3.2 Βασικές έννοιες της FEM 23
3.3 Τα πεπερασμένα στοιχεία 25
3.4 Στάδια Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων 26
3.5 Η Μέθοδος ALE (Arbitrary-Lagrangian-Eulerian) των Πεπερασμένων Στοιχείων 26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 30
4. Προ-επεξεργασία μοντέλου τόρνευσης με τη μέθοδο ALE 30
4.1 Κατασκευή γεωμετρικού μοντέλου και παραμέτρων κοπής 31
4.2 Μοντελοποίηση κοπής με πεπερασμένα στοιχεία στο LS -DYNA 50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 56
5. Επίλυση και αποτελέσματα προσομοιώσεων ALE 56
5.1 Μετα-επεξεργασία (Post-processing) 56
5.2 Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων 60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 69
Συμπεράσματα 69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 70
Βιβλιογραφία 70

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Προσομοίωση αφαίρεσης υλικού κατεργασιών αναγόμενων σε ορθογωνική κοπή με πεπερασμένα στοιχεία και χρήση της ALE formulation

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται τη μελέτη των κατεργασιών αφαίρεσης υλικού που ανάγονται σε ορθογωνική κοπή (Orthogonal Cutting) με τη βοήθεια προσομοιώσεων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) και συγκεκριμένα με την προσέγγιση Arbitrary Lagrangian Eulerian formulation (ALE).

Αφού ολοκληρωθεί μια εισαγωγή στις μηχανουργικές κατεργασίες και τις εργαλειομηχανές αφαίρεσης υλικού στο 1^{ο} Κεφάλαιο, ακολουθεί η ανάλυση της κατεργασίας τόρνευσης, ως της βασικότερης για αναφορά, στην ορθογωνική κοπή. Στο 2^{ο} Κεφάλαιο παρατίθενται και εξηγούνται οι χαρακτηριστικές παράμετροι της τόρνευσης, που γενικευμένες προσδιορίζουν κάθε ορθογωνική κοπή. Στο Τρίτο Κεφάλαιο ακολουθεί εισαγωγή στη FEM και πιο ειδικά στην ALE μέθοδο υπολογιστικής προσομοίωσης. Στο 4^{ο} Κεφάλαιο περιγράφεται η μοντελοποίηση αντιπροσωπευτικής ορθογωνικής κοπής τόρνευσης, καθώς και τα στάδια υλοποίησης της προσομοίωσης της κατεργασίας. Ακολούθως, στο Κεφάλαιο πέντε, γίνεται η παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν παρατίθενται στο 6^{ο} Κεφάλαιο της εργασίας.

ABSTRACT

Simulations of cutting processes referenced to orthogonal cutting with the Finite Element Method and the ALE formulation

This Thesis deals with the study of the Orthogonal Cutting of materials, with the aid of simulations, based on the Finite Element Methods (FEM) and in particular on the Arbitrary Lagrangian Eulerian formulation (ALE).

After an introduction to machining and cutting machines in Chapter 1, the analysis of the turning process, as the reference of every orthogonal cutting process, follows. In Chapter 2, the characteristic parameters of the turning process, that generalized represent the orthogonal cutting processes, are described and explained. In Chapter 3, FEM and more specifically, the ALE formulation, is introduced. The modeling of a representative orthogonal cut, as well as the development of the cutting simulations, are described in Chapter 4. Subsequently, in the 5th Chapter the results of the simulations are present and analyzed. The resulting conclusions are presented at the 6th and final Chapter of the Thesis.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

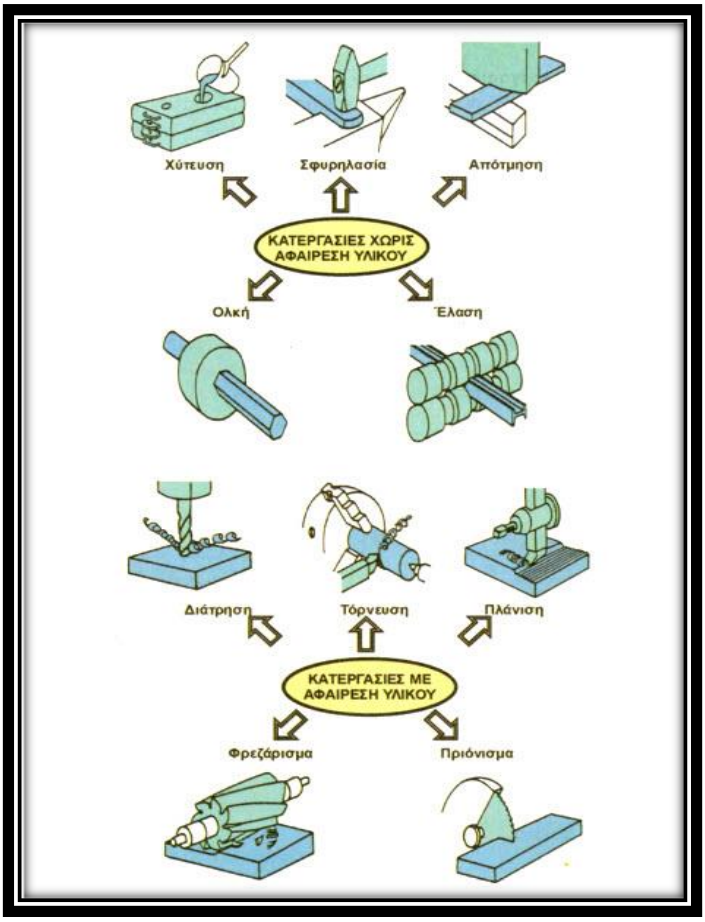
Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται τη μελέτη των κατεργασιών αφαίρεσης υλικού που ανάγονται σε ορθογωνική κοπή (Orthogonal Cutting) με τη βοήθεια προσομοιώσεων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) και συγκεκριμένα με την προσέγγιση Arbitrary Lagrangian Eulerian formulation (ALE). Στο παρόν Κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στις μηχανουργικές κατεργασίες και τις εργαλειομηχανές αφαίρεσης υλικού και ακολουθεί η ανάλυση της κατεργασίας τόρνευσης, ως της βασικότερης για αναφορά, στην ορθογωνική κοπή.

1.1 Μηχανουργικές Κατεργασίες

Για την κατασκευή οποιουδήποτε αντικειμένου, το οποίο αποτελείται από ένα ή και περισσότερα μέρη, απαιτείται συνδυασμός κατεργασιών. Οι κατεργασίες δύναται να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- **αρχέγονες:** χύτευση ή κονιομεταλλουργία
- **αφαίρεσης υλικού:** τόρνευση, φραιζάρισμα, διάτρηση, πλάνιση, λείανση, κ.α.
- **με παραμόρφωση:** απότμηση, εξέλαση, κ.α.
- **με προσθήκη:** συγκόλληση, επικάλυψη, κ.α.

Τα διάφορα μηχανολογικά εξαρτήματα παίρνουν την αρχική τους μορφή κατά κανόνα με κατεργασίες που δε περιλαμβάνουν την αφαίρεση υλικού (κυρίως χύτευση), αφήνοντας μικρή ποσότητα υλικού για την τελική κατεργασία. Στην Εικόνα 1.1 παρουσιάζονται οι βασικότερες κατεργασίες με και χωρίς αφαίρεση υλικού.



Εικόνα 1.1: Χαρακτηριστικές κατεργασίες [1].

Η τελική κατεργασία ενός τεμαχίου είναι κυρίως η αφαίρεση υλικού, καθώς αποδίδει μεγαλύτερη διαστατική ακρίβεια και καλύτερη ποιότητα τελικής επιφάνειας. Η αφαίρεση υλικού γίνεται είτε με την χρήση εργαλείων χειρός (π.χ. λίμα, πριόνι κ.α.), είτε με τη χρήση εργαλειομηχανών (τόρνος φραίζα, πλάνη, δράπανο κ.λπ.). Οι εργαλειομηχανές παρέχουν την δυνατότητα παραγωγής απλών κυλινδρικών ή επίπεδων τεμαχίων και ειδικών διαμορφώσεων, όπως το σπείρωμα, η οδόντωση και επιφάνειες διαφόρων μορφών.

Κάθε κατεργασία αφαίρεσης υλικού περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια:

- **αρχική κατεργασία:** αποτελεί το πρώτο «πέρασμα» του κοπτικού εργαλείου για την απομάκρυνση άχρηστων στρωμάτων υλικού από την προηγηθείσα διαμόρφωσή του
- **βασική κατεργασία:** το κοπτικό εργαλείο εκτελεί μια σειρά «περασμάτων», ώστε να δοθεί το επιθυμητό σχήμα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο
- **κατεργασία αποπερατώσεως (φινίρισμα):** είναι το τελικό «πέρασμα» του κοπτικού εργαλείου που επιτυγχάνει τις προδιαγραφές διαστατικής ακρίβειας και τελικής ποιότητας επιφανείας

1.2 Εργαλειομηχανές αφαίρεσης υλικού

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι βασικότερες κατεργασίες με αφαίρεση υλικού, οι εργαλειομηχανές που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση κάθε κατεργασίας, οι τεχνικές επιφάνειες καθώς και οι κινήσεις του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου αντίστοιχα.

Κατεργασία	Εργαλειομηχανή	Τεχνικές Επιφάνειες	Κίνηση Εργαλείου	Κίνηση Τεμαχίου
Τόρνευση	Τόρνος	Κυκλικές	Μετατόπιση	Περιστροφή
Φραιζάρισμα	Φραίζα	Επίπεδες Κυκλικές Εσοχές Αυλάκια Οδοντοτροχοί	Περιστροφή	Μετατόπιση
Διάτρηση	Δράπανο	Άνοιγμα οπών	Περιστροφή	Ακίνητο
Πλάνισμα	Πλάνη	Επίπεδες	Μετατόπιση	Μετατόπιση
Λείανση	Λειαντικός Τροχός	Επίπεδες Κυκλικές	Περιστροφή + Μετατόπιση	Μετατόπιση + Περιστροφή

Πίνακας 1.1: Οι βασικότερες κατεργασίες αφαίρεσης υλικού.

Οι εργαλειομηχανές με αφαίρεση υλικού κατατάσσονται με βάση τα ακόλουθα κριτήρια:

- ως προς το είδος της κατεργασίας
- ως προς το είδος της πρωτεύουσας κίνησης
    - Εργαλειομηχανές με περιστροφική κίνηση
        - Τόρνοι
            - ✓ οριζόντιοι
            - ✓ κατακόρυφοι
            - ✓ περιστροφικοί (ή Revolver)
            - ✓ αυτόματοι ή ημιαυτόματοι
        - Φραιζομηχανές
            - ✓ οριζόντιες
            - ✓ κατακόρυφες
            - ✓ αντιγραφής (παντογράφος)
        - Δράπανα
            - ✓ κατακόρυφα
            - ✓ οριζόντια
            - ✓ ακτινωτά
            - ✓ ειδικά (κατακόρυφα και οριζόντια με πολλές ατράκτους)
        - Φραιζοδράπανα
        - Λειαντικοί τροχοί
            - ✓ επιπέδων επιφανειών

        - ✓ κυλινδρικών επιφανειών
        - ✓ άνευ κέντρων
        - ✓ οδοντώσεων
        - ✓ σπειρωμάτων
        - ✓ ειδικά (π.χ. για στροφαλοφόρους άξονες)
        - ✓ τροχιστικά (π.χ. για κοπτικά εργαλεία)
    - Πριόνια
        - ✓ περιστροφικά
    - Μηχανήματα κοπής οδοντώσεων (γραναζοκόπτες)
        - ✓ παραλλήλων οδοντωτών τροχών
        - ✓ κωνικών οδοντωτών τροχών
- Εργαλειομηχανές με ευθύγραμμη πρωτεύουσα κίνηση
    - Πριόνια
        - ✓ παλινδρομικά
    - Πλάνες
        - ✓ εγκάρσιες
        - ✓ επιμήκεις
        - ✓ κατακόρυφες

➢ ως προς το βαθμό εξειδικεύσεως

- Εργαλειομηχανές γενικής χρήσεως (τόρνος)
- Εργαλειομηχανές ειδικής χρήσεως (γραναζοκόπτης, λειαντικός τροχός οδοντώσεων, κ.ά.)
- Εξειδικευμένες εργαλειομηχανές (εργαλειομηχανές που είναι μελετημένες μόνο για την εκτέλεση ορισμένης φάσης κατεργασίας σε ορισμένο κομμάτι)
- Εργαλειομηχανές μεταφοράς (ροϊκή παραγωγή)

➢ ως προς την ακρίβεια κατεργασίας

- Εργαλειομηχανές συνήθους ακριβείας
- Εργαλειομηχανές ακριβείας
- Εργαλειομηχανές μεγάλης ακριβείας
- Εργαλειομηχανές υψίστης ακριβείας

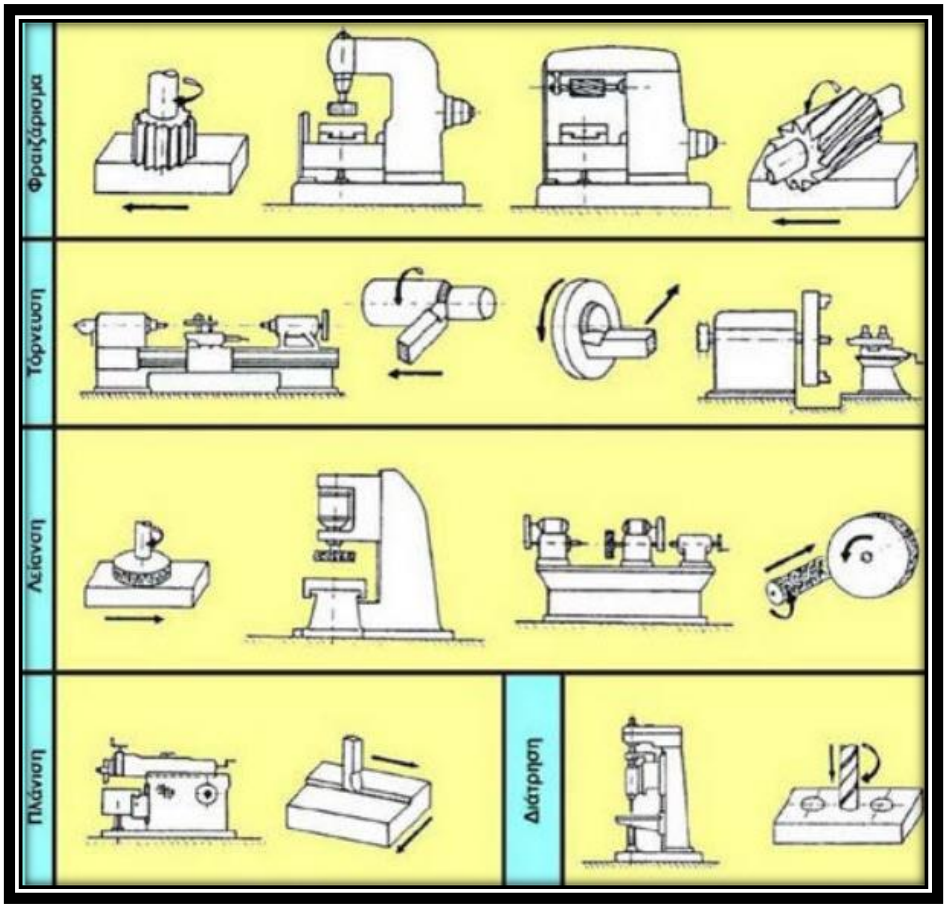
➢ ως προς το βάρος

- Εργαλειομηχανές ελαφρές (βάρος μικρότερο του 1 τόνου)
- Εργαλειομηχανές μέσου βάρους (βάρος μεταξύ 1 και 10 τόνων)
- Εργαλειομηχανές βαριές (βάρος μεγαλύτερο των 10 τόνων)

➢ ως προς το βαθμό αυτοματισμού

- Κοινές εργαλειομηχανές
- Ημιαυτόματες εργαλειομηχανές (οι κινήσεις γίνονται αυτόματα)
- Αυτόματες εργαλειομηχανές (οι κινήσεις και η τροφοδοσία γίνονται αυτόματες)

Στην Εικόνα 1.2 παρουσιάζονται σχηματικά οι βασικότερες κατεργασίες με αφαίρεση υλικού και οι αντίστοιχες εργαλειομηχανές [1].



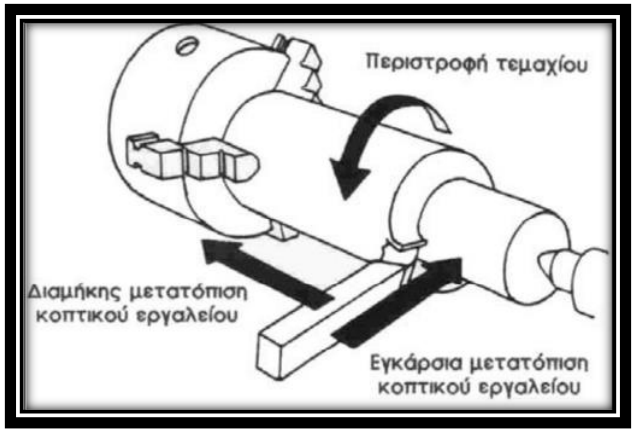
Εικόνα 1.2: Βασικότερες κατεργασίες με αφαίρεση υλικού και εργαλειομηχανές [1].

Για την παρούσα πτυχιακή εργασία η κατεργασία με αφαίρεση υλικού που επιλέχθηκε να μελετηθεί είναι η τόρνευση που περιγράφεται στο ακόλουθο κεφάλαιο 2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η κατεργασία της τόρνευσης

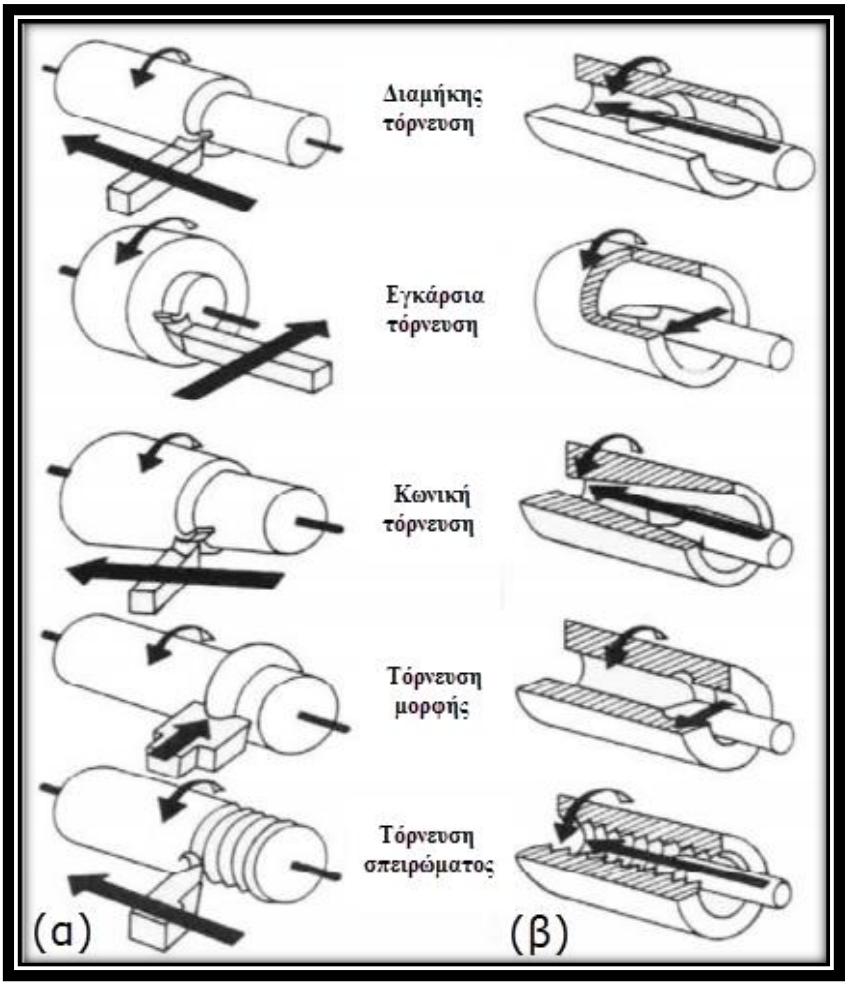
Ως τόρνευση ορίζεται μια κατεργασία με εργαλείο που έχει γεωμετρικά καθορισμένη κόψη και κυκλική κίνηση κοπής, κίνηση την οποία εκτελεί συνήθως το αντικείμενο προς κατεργασία. Το εργαλείο (κοπτική ακμή) είναι σταθερό και η κίνηση που εκτελεί είναι κατά μήκος της κατεργαζόμενης επιφάνειας, εφόσον η κοπή είναι διαμήκης.



Εικόνα 2.1: Κινηματική της τόρνευσης [4].

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1 το κατεργαζόμενο κομμάτι συγκρατείται από τον σφιγκτήρα (τσοκ) και περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του. Το κοπτικό εργαλείο έχει τη δυνατότητα διαμήκης μετακίνησης, όπου το εργαλείο μετακινείται ευθύγραμμα και παράλληλα προς τον άξονα του τεμαχίου ή εγκάρσιας μετακίνησης και μετακινείται σε ορθή γωνία ως προς τον άξονα του τεμαχίου.

Οι απαιτήσεις κίνησης ενός κατεργαζόμενου τεμαχίου για να αποκτήσει την τελική του μορφή δεν περιορίζονται μόνο στην χρήση διαμηκών ή εγκάρσιων μετατοπίσεων του κοπτικού, αλλά και στο είδος του κοπτικού που χρησιμοποιείται. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση εξαρτάται αφενός από το είδος της κατεργαζόμενης επιφάνειας και αφετέρου από το αν η τόρνευση είναι εξωτερική ή εσωτερική. Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζονται σχηματικά τα είδη τόρνευσης, μαζί με τις κινήσεις που απαιτούνται, κυλινδρικών και κωνικών επιφανειών, επιφανειών ειδικής μορφής και σπειρωμάτων για τις περιπτώσεις εσωτερικής και εξωτερικής τόρνευσης αντίστοιχα.



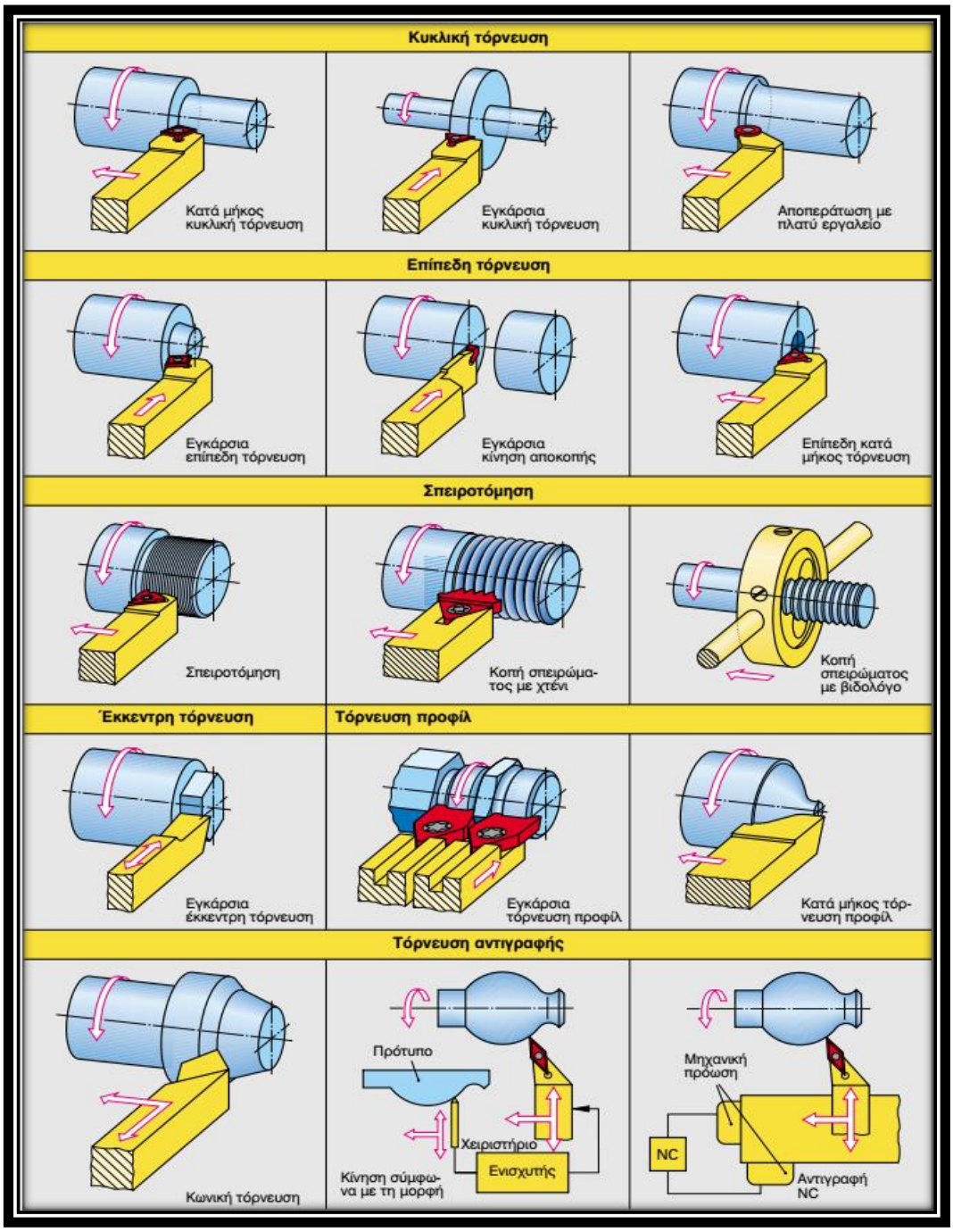
Εικόνα 2.2: Είδη εσωτερικής (α) και εξωτερικής τόρνευσης (β) [4].

2.1 Μέθοδοι Τόρνευσης

Με βάση την επιφάνεια που προκύπτει μετά την κατεργασία του τεμαχίου, μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις μεθόδους τόρνευσης σε: κυκλική, επίπεδη, σπειροτόμηση, έκκεντρη, προφίλ και τόρνευση με αντιγραφή. Στη συνέχεια αναφέρονται περιγραφικά οι μέθοδοι τόρνευσης και απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 2.3:

- **κυκλική τόρνευση,** παράγει μια κυλινδρική επιφάνεια. Η κίνηση της πρόωσης γίνεται είτε κατά την διεύθυνση του άξονα περιστροφής (κυκλική κατά μήκος τόρνευση), είτε κάθετα προς τον άξονα (κυκλική εγκάρσια τόρνευση). Κατά την διαδικασία της αποπεράτωσης (φινίρισμα) με πλατύ εργαλείο, χρησιμοποιείται μεγάλη πρόωση και μικρές γωνίες θέσης.
- **επίπεδη τόρνευση,** παράγει μια επίπεδη επιφάνεια κάθετη προς τον άξονα περιστροφής. Χωρίζεται σε εγκάρσια επίπεδη τόρνευση, εγκάρσια τόρνευση αποκοπής και κατά μήκος επίπεδη τόρνευση.
- **σπειροτόμηση,** γίνεται με τη χρήση ενός ειδικού εργαλείου, το οποίο δημιουργεί ελικοειδείς επιφάνειες και η πρόωσή του ανά στροφή είναι ίση με το βήμα της έλικας.

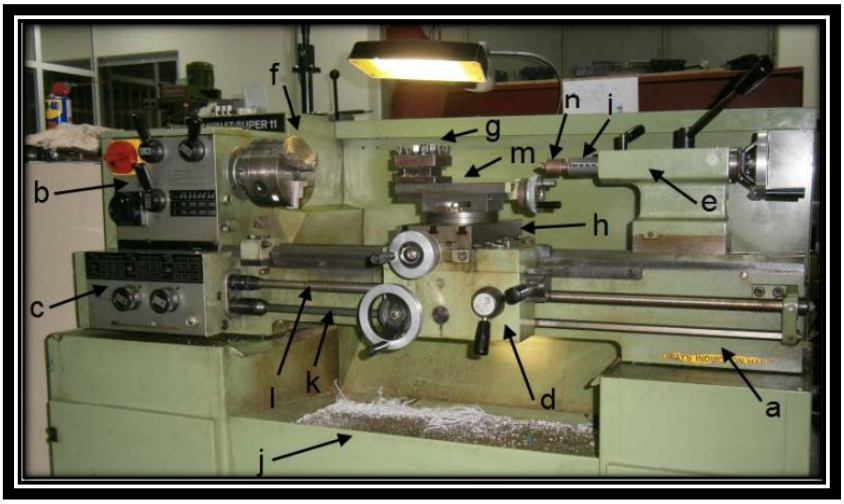
- **έκκεντρη τόρνευση**, κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής του αντικειμένου, μεταβάλλει τη θέση της κόψης του εργαλείου, ανάλογα με τη διατομή που θα παραχθεί.
- **τόρνευση προφίλ.** μεταφέρει τη μορφή του εργαλείου πάνω στο κατεργαζόμενο τεμάχιο.
- **τόρνευση αντιγραφής,** αποτελεί μια μέθοδο, σύμφωνα με την οποία ελέγχοντας την κίνηση της πρόωσης παράγεται η μορφή του αντικειμένου. Ο έλεγχος της πρόωσης γίνεται είτε με το χέρι (ελεύθερη αντιγραφή), είτε από κάποιο πρότυπο, είτε με αριθμητικό έλεγχο (αντιγραφή NC) [3].



Εικόνα 2.3: Κατάταξη μεθόδων τόρνευσης [3].

2.2 Αρχιτεκτονική εργαλειομηχανής τόρνου

Ο τόρνος αποτελείται από 14 βασικά μέρη τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.4:



Εικόνα 2.4: Δομή τόρνου.

Τα βασικά μέρη του τόρνου είναι:

a) Σώμα (κρεβάτι)

b) Κιβώτιο ταχυτήτων για την κίνηση της ατράκτου

c) Κιβώτιο προώσεων για την κίνηση του εργαλειοφορείου

d) Κιβώτιο κινήσεως εργαλειοφορείου

e) Κεντροφορέας

f) Τσοκ

g) Εργαλειοδέτης

h) Εγκάρσιο φορείο

i) Έμβολο

j) Λεκάνη αποβλήτων

k) Άξονας προώσεων

l) Άξονας σπειρωμάτων

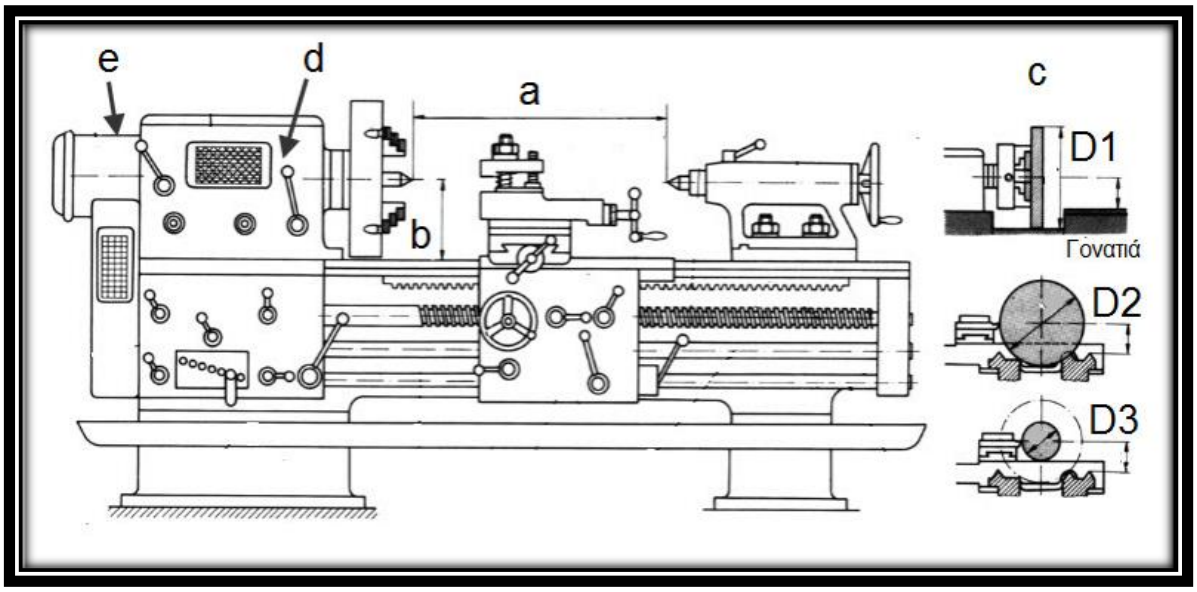
m) Εργαλειοφορείο

n) Πόντα

Εκτός από αυτά τα βασικά μέρη, υπάρχουν και κάποια δευτερεύοντα, εξίσου σημαντικά τα οποία θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν και ως βοηθητικά εξαρτήματα, όπως η αντλία παροχής ψυκτικού υγρού στη θέση κοπής, ο ηλεκτρικός πίνακας, τα καβαλέτα, το σύστημα φωτισμού και φυσικά οι συσκευές συγκράτησης όπως τσοκ τριών και τεσσάρων σιαγόνων και πλατό [2].

2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά τόρνου

Για να υλοποιηθεί μια κατεργασία τόρνευσης, σε οποιονδήποτε τόρνο, θα πρέπει να καθοριστούν οι βασικοί παράμετροι κοπής, οι οποίοι εξαρτώνται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του τόρνου. Στην Εικόνα 2.5 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του τόρνου.



Εικόνα 2.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά τόρνου.

Τα κύρια αυτά τεχνικά χαρακτηριστικά του τόρνου είναι:

a) Η απόσταση *L* που καθορίζει το μέγιστο μήκος του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

b) Το ύψος *H* του νοητού άξονα των κέντρων από το κρεβάτι. Καθορίζει τη μέγιστη διάμετρο του προς κατεργασία τεμαχίου.

c) Η μέγιστη διάμετρος D_1 και το μήκος τόρνευσης σε περίπτωση που υπάρχει «γονατιά». Οι διάμετροι D_2 και D_3 επάνω από το τραπέζι και το εργαλειοφορείο.

d) Το πλήθος των ταχυτήτων και ο μέγιστος και ελάχιστος αριθμός στροφών.

e) Η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα.

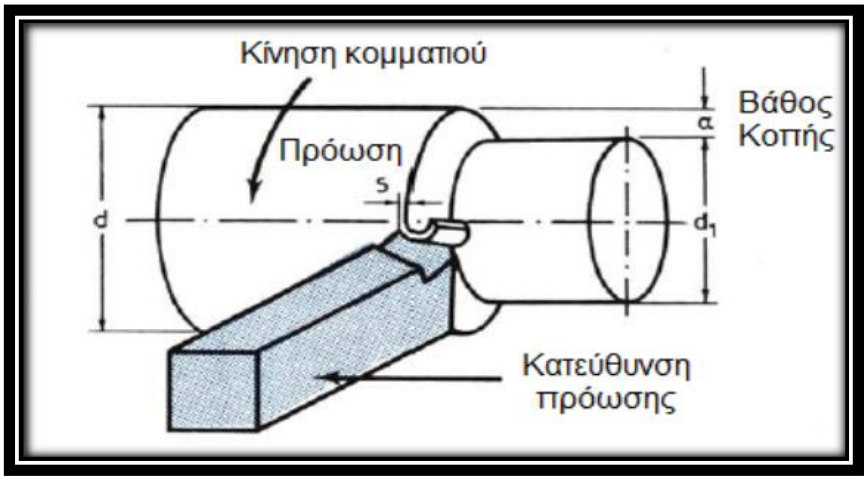
f) Το ολικό του βάρος.

g) Η διάμετρος οπής της ατράκτου. Καθορίζει την μέγιστη διάμετρο του τεμαχίου που μπορεί να δεθεί στο τσοκ και μπορεί να προεξέχει από τον καθρέπτη του τόρνου.

h) Η βαθμονόμηση των χειριστηρίων και χειροστροφάλων. Προσδιορίζει τη μέγιστη ακρίβεια κατασκευής τεμαχίων.

2.4 Παράμετροι κοπής

Στην Εικόνα 2.6 παρουσιάζονται οι συνθήκες κοπής, οι οποίες αποτελούνται από βασικές παραμέτρους, οι οποίες χαρακτηρίζουν την κάθε κατεργασία τόρνευσης και αναλύονται ακολούθως:



Εικόνα 2.6: Συνθήκες κοπής .

a) **Ταχύτητα κοπής:** η περιφερειακή ταχύτητα του κομματιού που τορνεύεται. Υπολογίζεται με βάση την διάμετρο *d* (mm) που είχε το κομμάτι πριν την τόρνευση και εκφράζεται σε μέτρα ανά λεπτό (m/min).

$$U_k = \frac{\pi d n}{1000} \text{ (m/min)}$$

Όπου:

- $\boldsymbol{U_k}$ η ταχύτητα κοπής σε m/min
- ***d*** η διάμετρος του κομματιού σε mm
- ***n*** ο αριθμός στροφών ανά λεπτό (rpm)

➢ η ταχύτητα κοπής δείχνει τα παραγόμενα μέτρα του μήκους του αποβλήτου ανά λεπτό.

b) **Πρόωση*:*** η μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου κατά τη διεύθυνση του νοητού άξονα τόρνευσης σε κάθε στροφή του κομματιού. Συμβολίζεται με *s* και εκφράζεται σε χιλιοστά ανά στροφή (mm/στροφή).

➢ η πρόωση χαρακτηρίζει το πάχος του αποβλήτου.

c) **Βάθος κοπής:** Είναι η απόσταση της ακατέργαστης από την κατεργασμένη επιφάνεια, όταν αυτή μετριέται κατά την ακτίνα. Συμβολίζεται με το γράμμα α και εκφράζεται σε χιλιοστά (mm) και είναι:

$$\alpha = \frac{d - d_1}{2} (\mathrm{mm})$$

- το βάθος κοπής α χαρακτηρίζει το πλάτος του αποβλήτου.

d) **Ταχύτητα προώσεως:** η συνολική μετατόπιση του εργαλείου παράλληλα προς τον νοητό άξονα του σε ένα λεπτό. Συμβολίζεται με το S και εκφράζεται σε mm/min. Αφού σε μία στροφή το εργαλείο μετατοπίζεται κατά την πρόωση s, σε ένα λεπτό, θα μετακινηθεί συνολικά κατά $s{\cdot}n$. Δηλαδή:

$$S = s \cdot n \ (mm/min)$$

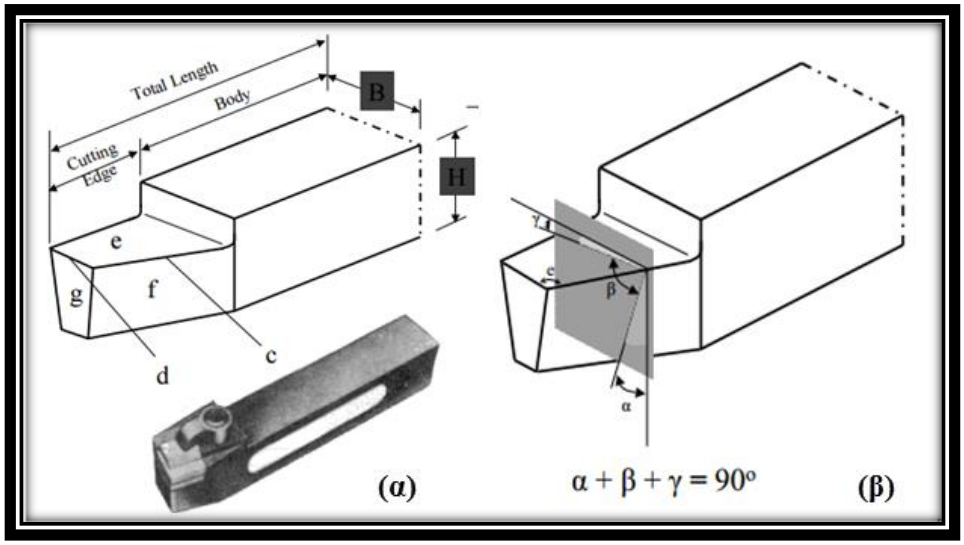
e) **Χρόνος κατεργασίας:** Έστω ότι τορνεύεται κομμάτι με μήκος l, με πρόωση s (mm/στροφή) και n (στροφές/min). Το κοπτικό εργαλείο του τόρνου, που σε μία στροφή προχωρεί κατά s, σε n στροφές στο λεπτό θα προχωρήσει κατά $S=s{\cdot}n$ (ταχύτητα προώσεως). Αν t (min) ο χρόνος τόρνευσης για μήκος l, η μετατόπιση σε t λεπτά θα είναι:

$$l = t \cdot S => l = t \cdot s \cdot n => t = l/(s \cdot n) \ \ (\mathrm{min})$$

2.5 Γεωμετρία κοπτικών εργαλείων τόρνου

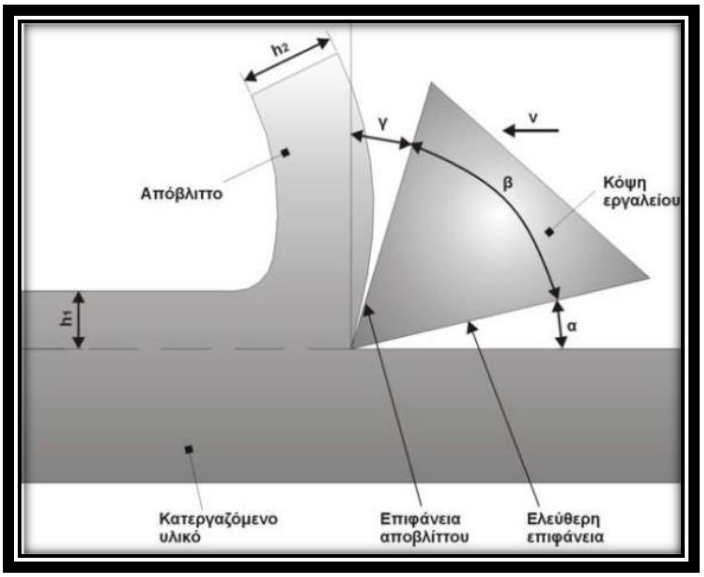
Η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου που χρησιμοποιείται για την κατεργασία της τόρνευσης καθορίζεται από τις κοπτικές γωνίες και επιφάνειες του εργαλείου. Στην Εικόνα 2.7α διακρίνονται οι βασικές επιφάνειες του κοπτικού και ονομάζονται παρακάτω:

- **e**: *Επιφάνεια αποβλήτου,* πάνω στην οποία ολισθαίνει το απόβλητο κατά την κίνησή του.
- **f**: *Ελεύθερη επιφάνεια κύριας κόψης,* είναι η επιφάνεια που αντικρίζει την κατεργασμένη επιφάνεια.
- **g**: *Ελεύθερη επιφάνεια δευτερεύουσας κόψης,* είναι η επιφάνεια που αντικρίζει την κατεργαζόμένη επιφάνεια.
- **c**: *Κύρια κόψη,* είναι η ακμή που προκύπτει από την τομή της επιφάνειας αποβλήτου και της ελεύθερης επιφάνειας κύριας κόψης
- **d**: *Δευτερεύουσα κόψη,* είναι η ακμή που προκύπτει από την τομή της επιφάνειας αποβλήτου και της ελεύθερης επιφάνειας δευτερεύουσας κόψης
- **B**: *Πλάτος στελέχους εργαλείου*
- **H**: *Ύψος στελέχους εργαλείου*



Εικόνα 2.7: Επιφάνειες (α) και γωνίες (β) κοπτικού εργαλείου [6].

Κατά την πραγματοποίηση της κοπής και αφού υποθέσουμε ότι το κοπτικό εργαλείο κινείται με ταχύτητα ***ν*** σε σχέση με το σταθερό κατεργαζόμενο τεμάχιο, το υλικό που κόβεται από το τεμάχιο, δημιουργείται λόγω της συνεχούς πλαστικής παραμόρφωσης που συμβαίνει ακριβώς μπροστά στη μύτη του κοπτικού. Η πλαστική παραμόρφωση οφείλεται στις διατμητικές δυνάνεις που ασκούνται. Στη συνέχεια το απόβλητο που γεννιέται κινείται πάνω στην επιφάνεια του κοπτικού και απομακρύνεται. Αντιθέτως, η τελική παραγόμενη επιφάνεια του τεμαχίου δημιουργείται από τη συνεχή θραύση του υλικού. Συνεπώς, όταν το υλικό του τεμαχίου περνά την ζώνη διατμήσεως, εφελκύεται [4].



Εικόνα 2.8: Γεωμετρία κοπής [1].

Η κατεργασία με αφαίρεση υλικού μπορεί να προσομοιωθεί με την είσοδο μιας κοπτικής σφήνας σε ένα κατεργαζόμενο τεμάχιο, όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 2.8, όπου φαίνονται και τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της του εργαλείου:

- $\boldsymbol{h_1}$: πάχος απαραμόρφωτου αποβλήτου
- $\boldsymbol{h_2}$: πάχος παραμορφωμένου αποβλήτου
- $\boldsymbol{v}$: ταχύτητα κοπής
- $\boldsymbol{\alpha}$: γωνία ελευθερίας
- $\boldsymbol{\beta}$: γωνία κόψης
- $\boldsymbol{\gamma}$: γωνία αποβλήτου

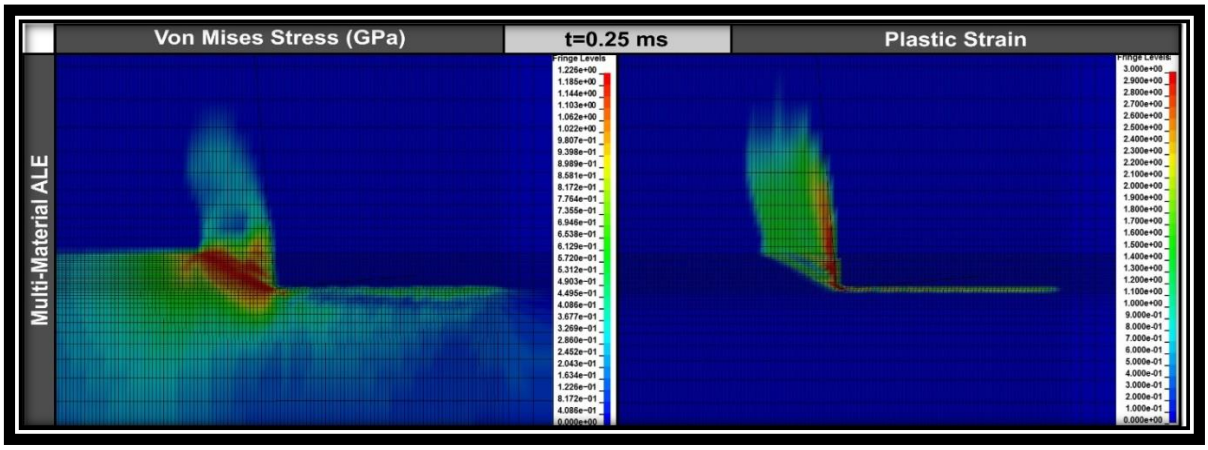
Στην Εικόνα 1.10 είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί ότι το πάχος $\boldsymbol{h}_2$ του παραμορφωμένου αποβλήτου είναι μεγαλύτερο από το πάχος $\boldsymbol{h}_1$ που αντιστοιχεί στο απαραμόρφωτο απόβλητο και αυτό οφείλεται στη συνεχή πλαστική παραμόρφωση. Τέλος, διακρίνονται οι τρεις χαρακτηριστικές γωνίες κοπής ($\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\beta},\boldsymbol{\gamma}$) για τις οποίες ισχύει η σχέση [6]

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^o.$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων FEM

Η **μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων**, αποτελεί μια αριθμητική μέθοδο, ή αλλιώς μια μέθοδο υπολογισμού με την χρήση Η/Υ, η οποία χρησιμοποιείται για την απόδοση προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων.



Εικόνα 3.1: Αποτελέσματα τάσεων και πλαστικών παραμορφώσεων τόρνευσης με FEM [16].

Παρόλο που η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μια προσεγγιστική μέθοδο, τα αποτελέσματα που αποδίδει είναι αξιόπιστα. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι βρίσκει εφαρμογή σε πληθώρα απλών και πολύπλοκων φυσικών προβλημάτων, ενώ το βασικότερο μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, κυρίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα προβλήματα. Αυτό το μειονέκτημα τείνει να εξαλειφθεί τα τελευταία χρόνια λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των υπολογιστών. Καταλυτικό ρόλο στην ανάπτυξη αυτή έπαιξε η βιομηχανία, ο στρατός και το κράτος των εκάστοτε ανεπτυγμένων χωρών, οι οποίες χρηματοδοτούσαν και συνεχίζουν έως και σήμερα να χρηματοδοτούν ανώτατα ιδρύματα, ερευνητικά κέντρα και ερευνητικές εταιρείες με σκοπό την ανάπτυξη προγραμμάτων για τον υπολογισμό και την μελέτη διαφόρων κατασκευών [7].

Η ανάγκη για την επίλυση των διάφορων πρακτικών προβλημάτων, οδήγησε στην ανάπτυξη γραφικών προγραμμάτων, τα οποία συνδέουν την ανάλυση και τον υπολογισμό των πεπερασμένων στοιχείων σε μια απλοποιημένη, προσιτή και δημιουργική επιστήμη.

Κατόπιν συστηματικής εργασίες οι ερευνητές κατάφεραν να αναπτύξουν εμπορικά προγράμματα, τα οποία περιλαμβάνουν δύο μεγάλα πακέτα λογισμικού για τα γραφικά και την ανάλυση:

α) ***λογισμικά***, τα οποία χρησιμοποιούνται πριν από την ανάλυση (Pre-processing) και μετά την ανάλυση (Post-processing).

- *Pre-processing:* Με τη χρήση του γραφικού προγράμματος σχεδιάζεται η γεωμετρία της κατασκευής και στη συνέχεια διακριτοποιείται σε πεπερασμένα στοιχεία.
- *Post-processing:* Μετά την ανάλυση γίνονται γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων που αφορούν παραδείγματος χάριν την παραμόρφωση του σώματος, την κατανομή των τάσεων εντός του σώματος και άλλων.

β) ***Προγράμματα για την ανάλυση και υπολογισμούς,*** τα οποία χρησιμοποιούνται για την μελέτη ποικίλων προβλημάτων σε διάφορα επιστημονικά πεδία [8].

3.1 Σύντομη ιστορική περιγραφή

Το 1909 ο Γερμανός μαθηματικός Ritz ανέπτυξε τις αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Το 1915 ο Ρώσος μαθηματικός Galerkin ανέπτυξε σε βάθος την θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων. Η απουσία του ηλεκτρονικού υπολογιστή καθυστέρησε την διάδοση και περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου και παρέμεινε στάσιμη μέχρις της ανακαλύψεως του υπολογιστή. Με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή η μέθοδος έγινε γνωστή και διαδόθηκε στους ερευνητές.

Η ιδέα της ανάπτυξης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων γεννήθηκε στην αεροναυπηγική από την ανάγκη της εύρεσης λύσης στα δύσκολα προβλήματα που αντιμετώπιζαν στην κατασκευή των αεροσκαφών. Το 1941 ο Hrenikoff εισήγαγε την καλούμενη framework method (μέθοδο του πλαισίου) με την οποία ένα επίπεδο ελαστικό μέσο μπορούσε να αντικατασταθεί με ένα ισοδύναμο σύστημα ράβδων και δοκών. Το 1943 ο Γερμανός μαθηματικός Courant έλυσε το πρόβλημα της στρέψης χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία με την αρχή της ελαχίστης δυναμικής ενέργειας (minimum potential energy) και την ονόμασε Rayleigh-Ritz μέθοδο. Επειδή τότε δεν υπήρχε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, η θεωρία του Courant δεν μπορούσε να εφαρμοσθεί και ξεχάστηκε μέχρι που ανακαλύφθηκε ο υπολογιστής και οι επιστήμονες ξανά θεμελίωσαν την μέθοδο.

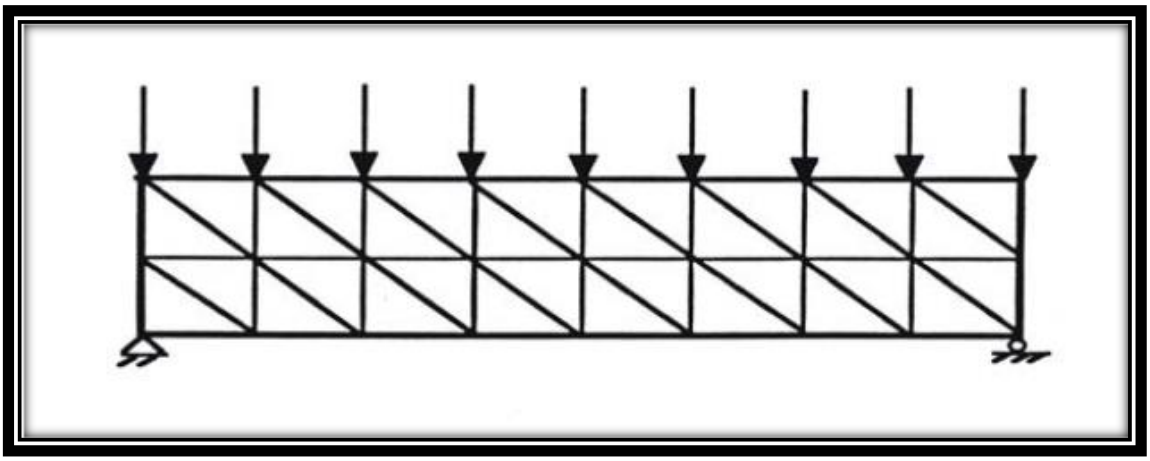
Το 1955 ο Έλληνας Ι. Αργύρης έγραψε ένα βιβλίο με θέμα «Ενεργειακά Γενικά περί των Πεπερασμένων Στοιχείων 21 θεωρήματα και η μέθοδος των μητρώων» και εισήγαγε τις αρχές των πεπερασμένων στοιχείων. Το 1956 οι Αμερικανοί Turner, Clough, Martin και Top

υπολόγισαν το μητρώο δυσκαμψίας της ράβδου και άλλων στοιχείων. Το 1960 ο Ι. Αργύρης και ο Kelsey δημοσίευσαν την εργασία τους η οποία βασιζόταν στις αρχές των πεπερασμένων στοιχείων. Το 1960 ο Clough καθηγητής του πανεπιστημίου 'University of California, Berkeley' της Αμερικής, χρησιμοποίησε για πρώτη φορά το όνομα «Πεπερασμένα Στοιχεία» (Finite Elements) στην εργασία του και από τότε όλοι χρησιμοποιούν την παραπάνω ονομασία.

Το 1967 οι Zienkiewicz και Chung έγραψαν το πρώτο βιβλίο των πεπερασμένων στοιχείων. Από τότε ένας μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων και βιβλίων ακολούθησε με αντικείμενο την εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων στην μηχανική, στα ρευστά, τη θερμότητα, την ακουστική, την κατεργασία των μετάλλων, τον ηλεκτρισμό και ηλεκτρομαγνητισμό και σε πολλές άλλες επιστήμες [8].

3.2 Βασικές έννοιες της FEM

Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι, όπως και στη μητρωϊκή ανάλυση, η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με επιμέρους στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως φυσική προσομοίωση πλαισίων πχ Εικόνα 3.2, καθώς αυτά αποτελούνται από δοκούς που είναι συνδεδεμένες στα άκρα τους. Σε μία συνεχή όμως κατασκευή δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί και συνεπώς απαιτείται να γίνει τεχνητός διαχωρισμός σε στοιχεία, τα οποία συνδέονται κατά μήκος των άκρων (πλευρών) τους. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία ή πεπερασμένα στοιχεία είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κόμβοι συνήθως βρίσκονται στα άκρα τους [18].



Εικόνα 3.2: Χρήση τριγωνικών στοιχείων στη διακριτοποίηση αμφιέρειστης δοκού σε κάμψη.

Η Εικόνα 3.2 δείχνει τον κορμό δοκού υποδιαιρεμένο σε τριγωνικά στοιχεία. Για να γίνει χρήση μητρωϊκών μεθόδων απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και σε ορισμένες περιπτώσεις και οι παράγωγοί τους. Εάν περιλαμβάνονται και οι παράγωγοι γίνεται λόγος για βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων και όλες οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σε σχέση με τις κομβικές μετατοπίσεις. Με αυτό τον τρόπο οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους και το πρόβλημα μετατρέπεται από συνεχές σε διακριτό. Παρ' όλο που μπορεί να υπάρχει μεγάλος αριθμός κομβικών μετατοπίσεων, ο αριθμός τους είναι πεπερασμένος. Το πρόβλημα εκφράζεται τότε ως ένα σύνολο (σύστημα) γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με αριθμητικές (μητρωϊκές) μεθόδους [9].

Για δομικές αναλύσεις, η συνήθης μητρωϊκή ανάλυση που χρησιμοποιείται, προσεγγίζει δύο βασικές μεθόδους, τη μέθοδο μετατόπισης ή δυσκαμψίας και τη μέθοδο δύναμης η ευκαμψίας. Η μέθοδος μετατόπισης μετασχηματίζει τις χαρακτηριστικές διαφορικές εξισώσεις του στοιχείου δομής στη μορφή $F_{loc} = K_{loc} * U_{loc}$, για στατική ανάλυση. Ως K_{loc} ορίζεται το μητρώο δυσκαμψίας του πεπερασμένου στοιχείου, F_{loc} το μητρώο των κομβικών δυνάμεων που ασκούνται στο στοιχείο και U_{loc} το μητρώο μετατοπίσεων των κόμβων του πεπερασμένου στοιχείου. Κατά την ανάλυση μιας κατασκευής, η οποία αποτελείται από πολλά στοιχεία, η εξίσωση παίρνει την μορφή $F_{glob} = K_{glob} * U_{glob}$, με το μητρώο K_{glob} να έχει διαστάσεις $kn \times kn$, όπου n ο συνολικός αριθμός των κόμβων της κατασκευής και k ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας κάθε κόμβου [12].

Κάθε πεπερασμένο στοιχείο προσδιορίζεται από τις ιδιότητες του υλικού που αντιπροσωπεύει. Κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες αποτελούν το πάχος του στοιχείου, η πυκνότητά του, το μέτρο ελαστικότητας του Young, ο λόγος Poisson, η μαγνητική διαπερατότητα, οι θερμικές ιδιότητες κλπ. [11].

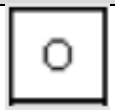
Το σχήμα και ο βαθμός παρεμβολής του εκάστοτε πεπερασμένου στοιχείου αποτελούν τα βασικά χαρακτηριστικά της ανάλυσης. Ως βαθμό παρεμβολής του στοιχείου ορίζεται ο βαθμός του πολυωνύμου που εμφανίζεται στη συνάρτηση μορφής του. Κάθε στοιχείο έχει διάσταση h και βαθμό p, όπου με το γράμμα p συμβολίζεται ο βαθμός του πολυωνύμου, ενώ με το γράμμα h συμβολίζεται η διάσταση του πολυωνύμου.

Γενικά ο κανόνας που ισχύει για την επίλυση ενός δεδομένου προβλήματος είναι ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός πολυωνύμου της συνάρτησης μορφής, τόσο περισσότερο ακριβής

είναι η λύση των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά και τόσο περισσότερο απαιτητική είναι η επίλυση [12].

3.3 Τα πεπερασμένα στοιχεία

Τα είδη των πεπερασμένων στοιχείων διακρίνονται ανάλογα της τοπολογίας τους και των ιδιοτήτων τους. Τα πεπερασμένα στοιχεία διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες. Τα μονοδιάστατα, τα δισδιάστατα και τέλος τα τρισδιάστατα. Τα δισδιάστατα στοιχεία κατηγοριοποιούνται σε τριγωνικά και τετραπλευρικά στοιχεία, ενώ τα τρισδιάστατα σε τετραεδρικά, κυβικά και πρισματικά. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα είδη των πεπερασμένων στοιχείων και μια σύντομη περιγραφή της χρήσης τους.

Τύπος στοιχείου & σχήμα			Χρήση
1D	Σημειακό (Point)		Για συγκεντρωμένη μάζα, ελατήριο ή αποσβεστήρα.
	Μονοδιάστατο (Bar)		Όταν η φόρτιση μεταβάλλεται σε μία διεύθυνση μόνο και όταν οι ιδιότητες του στοιχείου καθορίζονται κατά μήκος ενός ευθύγραμμου τμήματος ή μιας καμπύλης
2D	Τριγωνικά (Triangular)		Τριγωνικά και τετραπλευρικά στοιχεία όταν η φόρτιση μεταβάλλεται σε δύο διευθύνσεις και είναι σταθερή στην τρίτη. Χρησιμοποιούνται επίσης όταν το μήκος της μίας διεύθυνσης είναι πολύ μικρό συγκριτικά με τις άλλες δύο.
	Τετράπλευρα (Quad)		Χρησιμοποιούνται επίσης όταν το μήκος της μίας διεύθυνσης είναι πολύ μικρό συγκριτικά με τις άλλες δύο.
3D	Τετραεδρικά (Tetra)		Τετραεδρικά, σφηνοειδή και κυβικά ή εξαεδρικά στοιχεία χρησιμοποιούνται όταν η φόρτιση μεταβάλλεται και στις τρείς διευθύνσεις και όταν αυτές είναι συγκρίσιμες.
	Πρισματικά (Wedge)		
	Κυβικά ή Εξαεδρικά (Hexa)		

Πίνακας 3.1: Οι τύποι πεπερασμένων στοιχείων και οι χρήσεις τους [10].

3.4 Στάδια Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

1ο Στάδιο → Κατασκευή της γεωμετρίας.

2ο Στάδιο → Επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων και διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία.

3ο Στάδιο → Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών (μπορεί να γίνει και σε προηγούμενο στάδιο) και επιβολή των οριακών συνθηκών.

4ο Στάδιο → Επιλογή του τρόπου επίλυσης (γραμμικό – μη γραμμικό –υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων κ.α.) και επίλυση.

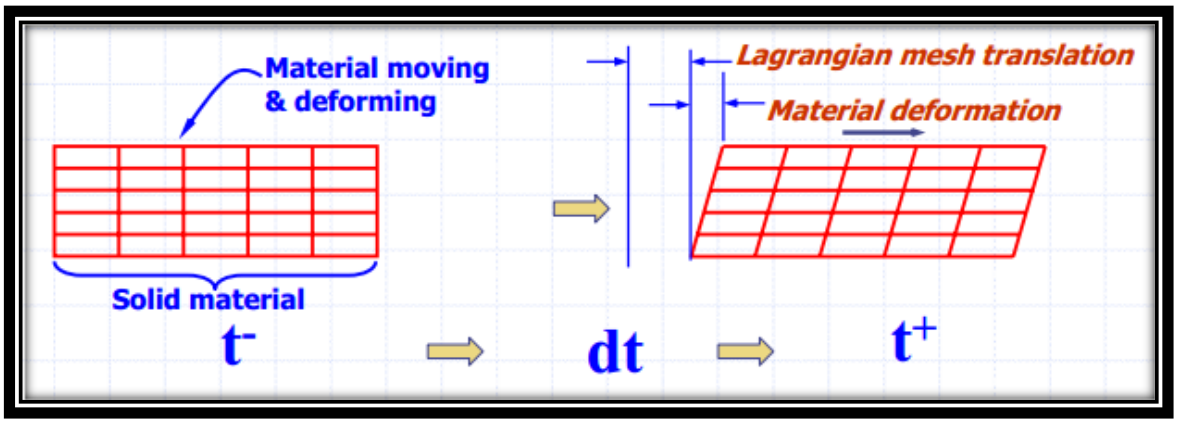
5ο Στάδιο → Ανάγνωση των αποτελεσμάτων και γραφική αναπαράστασή τους.

3.5 Η Μέθοδος ALE (Arbitrary-Lagrangian-Eulerian) των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η κίνηση των ρευστών δεν μελετάται μικροσκοπικά, λόγω του ότι η επιβολή, έστω και πολύ μικρών διατμητικών τάσεων προκαλεί μεταβολή στην κίνηση, με αποτέλεσμα η μικροσκοπική μελέτη να απαιτεί μεγάλο αριθμό εξισώσεων για τον προσδιορισμό των αντίστοιχων ποσοτήτων. Συνεπώς ο κατάλληλος τρόπος προσέγγισης της κίνησης των ρευστών είναι η μακροσκοπική μελέτη, βασιζόμενη στην υπόθεση του συνεχούς μέσου, όπου η μελέτη γίνεται τμηματικά για τα στοιχεία του ρευστού. Καθένα από τα στοιχεία του ρευστού, αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του, καθώς και με τα γειτονικά του στοιχεία, με αποτέλεσμα τα στοιχεία που περιλαμβάνονται σε αυτά να έρχονται σε επαφή με τα γειτονικά τους. Το σύνολο των στοιχείων αποτελούν τον καθολικό όγκο του μέσου και έτσι γίνεται η εισαγωγή μακροσκοπικών μεγεθών για την περιγραφή των ιδιοτήτων του ρευστού, όπως πίεση, θερμοκρασία, πυκνότητα κ.λπ. που μεταβάλλονται συνεχώς στον όγκου το ρευστού. Έτσι εισάγεται η έννοια της απεικόνισης της ροής ως πεδίο, εξαρτώμενο από τις χωρικές συντεταγμένες και το χρόνο σε μη μόνιμες ροές. Η μελέτη της κίνησης ενός στοιχείου του ρευστού μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρόπο αντίστοιχο της κίνησης των στερεών σωμάτων, δηλαδή με βάση την ταχύτητα και την επιτάχυνσή του. Οι βασικές μέθοδοι απεικόνισης της κίνησης ρευστού, βασιζόμενες στην υπόθεση του συνεχούς μέσου είναι η Lagrange και η Euler.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου Lagrange, η απεικόνιση της κίνησης του ρευστού πραγματοποιείται όπως και στην περίπτωση μελέτης της κίνησης των στερεών σωμάτων στην κλασική μηχανική. Η μελέτη υφίσταται για συγκεκριμένα στοιχεία του ρευστού και εξετάζεται η τροχιά που διαγράφουν στο χώρο. Ο παρατηρητής θεωρείται ότι κινείται μαζί με το στοιχείο

του ρευστού, το οποίο διαγράφει μία τροχιά στο χώρο και η απεικόνιση του πεδίου ροής επιτυγχάνεται με τη σχεδίαση των τροχιών του. Το διάνυσμα θέσης κάθε στοιχείου είναι συνάρτηση του χρόνου, ενώ παράλληλα εξαρτάται από την αρχική του θέση. Κατά την μελέτη προβλημάτων μηχανικής στερεού σώματος σύμφωνα με τη μέθοδο Lagrange, το υλικό μοντελοποιείται και παραμορφώνεται έτσι ώστε να μην υπάρχει ροή υλικού ανάμεσα στα στοιχεία. Αυτό συμβαίνει γιατί στα πλέγματα Lagrange, οι κόμβοι και τα στοιχεία κινούνται μαζί με το υλικό όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.3.[13]



Εικόνα 3.3: Lagrange πλέγμα στο χρόνο [13].

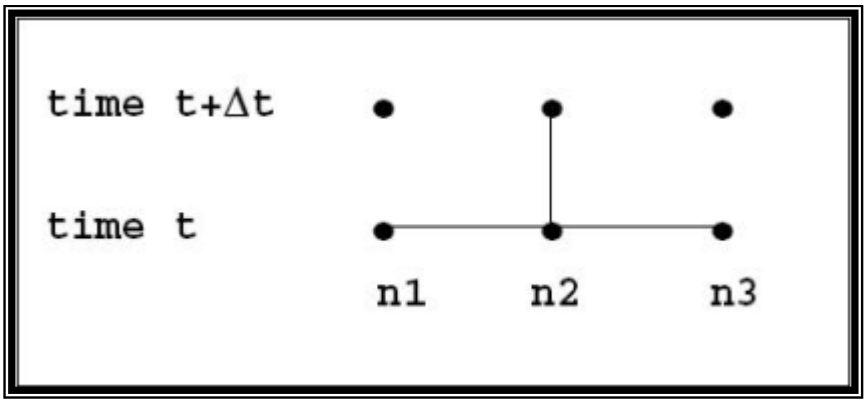
Με τη μέθοδο Lagrange ισχύει η διατήρηση της μάζας από τη στιγμή που το πλέγμα διατηρεί τη μάζα. Επίσης, οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος οι οποίες εκφράζονται για τα στοιχεία που βρίσκονται στα εξωτερικά γεωμετρικά όρια του υλικού, παραμένουν αμετάβλητες παρά τις όποιες παραμορφώσεις του πλέγματος, απλοποιώντας σημαντικά την επίτευξη της αριθμητικής λύσης του προβλήματος. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου Lagrange είναι ότι η ελεύθερη επιφάνεια του υλικού καταλαμβάνεται αυτομάτως από το πλέγμα, διευκολύνοντας τη διατύπωση των συνοριακών συνθηκών. Σε περίπτωση που το υλικό υπόκειται σε αυξημένες παραμορφώσεις, η ακρίβεια της λύσης μειώνεται σημαντικά καθιστώντας τη μέθοδο λιγότερο ακριβή. Η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού επιτυγχάνεται με τη χρήση προσαρμοστικότητας όπως η πύκνωση του πλέγματος ή η αύξηση του βαθμού των στοιχείων ή συνδυασμός αυτών, στην περιοχή που παρατηρούνται έντονες παραμορφώσεις.

Αντίθετα με τη μέθοδο Lagrange η μέθοδος Euler είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για προσομοιώσεις που λαμβάνουν χώρα μεγάλες παραμορφώσεις. Η μέθοδος ξεκίνησε από τον κλάδο της ρευστομηχανικής. Μιας και τα ρευστά δεν είναι συμπαγή όπως τα στερεά, τα σωματίδια του ρευστού δε μπορούν να μείνουν κοντά το ένα στο άλλο. Έτσι, αν το πλέγμα

απεικονίζει ρευστό, σύμφωνα με τη μέθοδο Lagrange, τότε όσο πυκνό και αν είναι το πλέγμα, τα σωματίδια του ρευστού, μετακινούνται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και απομακρύνονται στο χώρο. Μία τέτοια αντιμετώπιση οδηγεί το πλέγμα σε μεγάλες παραμορφώσεις άρα και σε δυσκολίες επίλυσης του προβλήματος. Η μέθοδος Euler δε μελετά την κίνηση συγκεκριμένων στοιχείων ρευστού, αλλά συγκεκριμένα σημεία του χώρου, χωρίς να εξετάζει ποια στοιχεία του ρευστού περνούν από κάθε σημείο του χώρου. Συνεπώς, για το χώρο που μελετάται ορίζεται ένα διανυσματικό πεδίο ταχύτητας, το οποίο μπορεί να είναι σταθερό με το χρόνο (μόνιμο πεδίο ροής) ή χρονικά μεταβαλλόμενο (μη-μόνιμο πεδίο ροής). Σε προβλήματα με μεγάλες ταχύτητες ροής, η μελέτη επικεντρώνεται σε τμήμα του χώρου που διακριτοποιείται από πεπερασμένα στοιχεία Euler που παραμένουν σταθερά ενώ το υλικό "ρέει" μέσα σε αυτά. Η διατήρηση της μάζας εκφράζεται υπολογίζοντας τη ροή που εισέρχεται και εξέρχεται από κάθε στοιχείο.

Η μέθοδος ALE (Arbitrary Lagrangian–Eulerian formulation) αποτελεί το συνδυασμό των μεθόδων Lagrange και Euler. Κατά την εφαρμογή της Lagrangian–Eulerian προσέγγισης, η πρώτη χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση του υλικού ενώ η δεύτερη για τη διακριτοποίηση του χώρου. Έτσι περιγράφεται κατάλληλα η κίνηση του πλέγματος και του υλικού που συνυπάρχουν στο ίδιο πρόβλημα, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τη δημιουργία τριών ειδών πλεγμάτων: ένα ευέλικτο πλέγμα για καθένα από τα πλέγματα Euler και Lagrange καθώς και ένα πλέγμα ALE που επιτρέπει την κίνηση του υλικού μέσα σε αυτό. Πρόκειται για αλγόριθμο αυτόματης αναδιάταξης του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων που κάνει τη συνδυαστική μέθοδο ALE ιδανική για προβλήματα στα οποία παρατηρούνται μεγάλες παραμορφώσεις και σε προβλήματα αλληλεπίδρασης στερεού-ρευστού. Επιτρέπει στο πλέγμα να προσαρμόζεται και να ακολουθεί το υλικό και όταν το πλέγμα παραμορφώνεται υπερβολικά σε σημείο που υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο όριο του λόγου παραμόρφωσης, τότε προσαρμόζεται με το πλέγμα του χώρου και υπολογίζει τη ροή του υλικού την προσαρμόζοντάς το στο πλέγμα.

Τα προβλήματα μου μοντελοποιούνται με τη βοήθεια της ALE επιλύονται με τη χρήση explicit αριθμητικών σχημάτων. Η explicit αριθμητική μέθοδος επίλυσης χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση και την επίλυση των παραγώγων του χρόνου στις εξισώσεις ορμής και ενέργειας. Στην Εικόνα 3.4 περιγράφεται η explicit ολοκλήρωση ως προς το χρόνο.



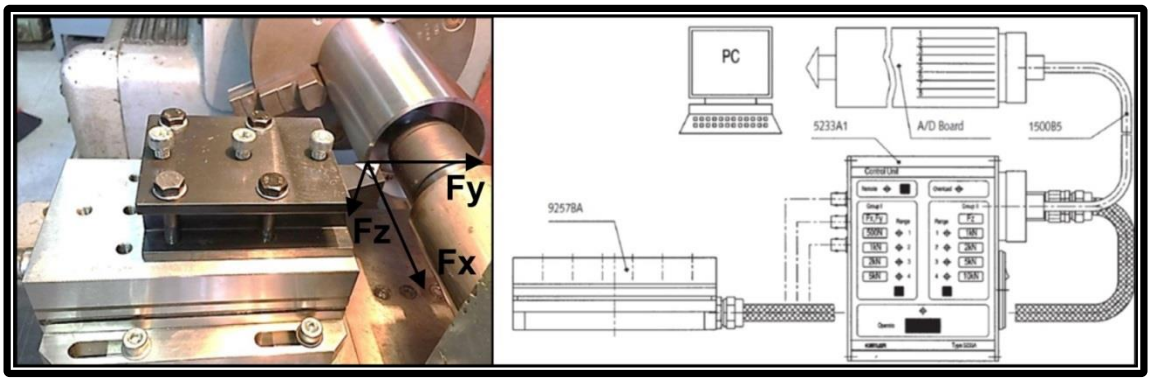
Εικόνα 3.4: Μέθοδος ενδογενούς (explicit) καθορισμού του βήματος ολοκλήρωσης.

Η μετατόπιση του κόμβου *n2* στο επίπεδο $t + \Delta t$ είναι ίση με τις γνωστές τιμές των μετατοπίσεων των κόμβων *n1 n2* και *n3*. στο επίπεδο του χρόνου t. Ένα σύστημα explicit αλγεβρικών εξισώσεων είναι γραμμένο για τους κόμβους του πλέγματος στο χρόνο $t + \Delta t$. Κάθε εξίσωση του συστήματος επιλύεται με τη σειρά για κάθε άγνωστη μετατόπιση κόμβου. Το χρονικό βήμα επίλυσης πρέπει να είναι μικρότερο από το χρόνο που χρειάζεται το σήμα να ταξιδέψει με την ταχύτητα του ήχου μέσα στο υλικό διανύοντας την απόσταση μεταξύ δύο κόμβων [14, 15].

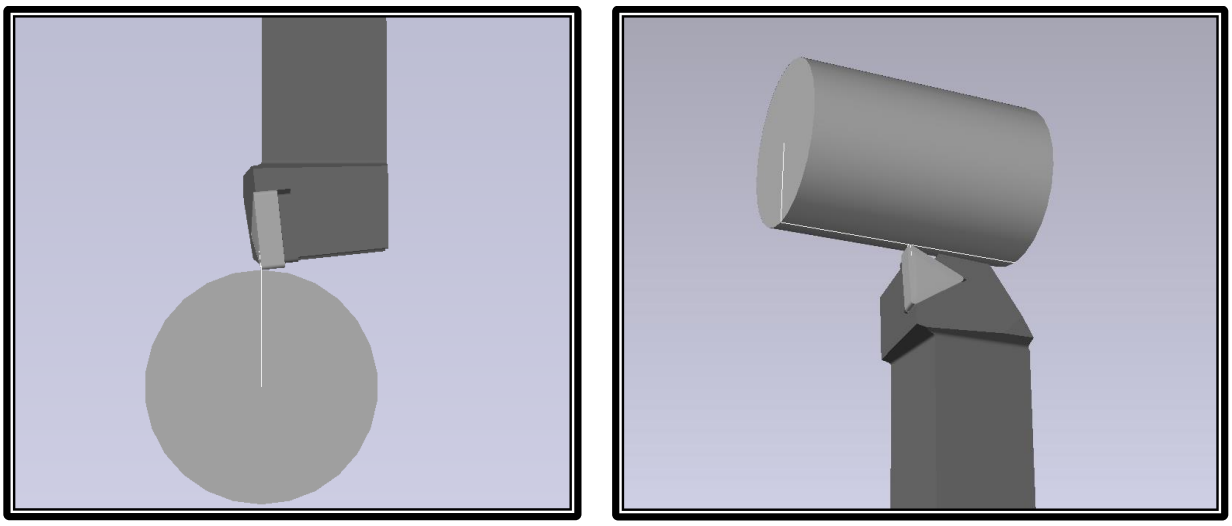
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. Προ-επεξεργασία μοντέλου τόρνευσης με τη μέθοδο ALE

Στην Εικόνα 4.1 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη της κατεργασία τόρνευσης, ενώ στην Εικόνα 4.2, εμφανίζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση της κατεργασίας. Για την κατασκευή του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε αρχικά το σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCad για τον αρχικό σχεδιασμό σε 2D μορφή και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το γραφικό πρόγραμμα Ansys για τον ψευδό 3D σχεδιασμό και την διακριτοποίηση του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία. Για την ολοκλήρωση της προ-επεξεργασίας (pre processing), το μοντέλο παραμετροποιείται με τη χρήση του προγράμματος Ls-Dyna [17][19].



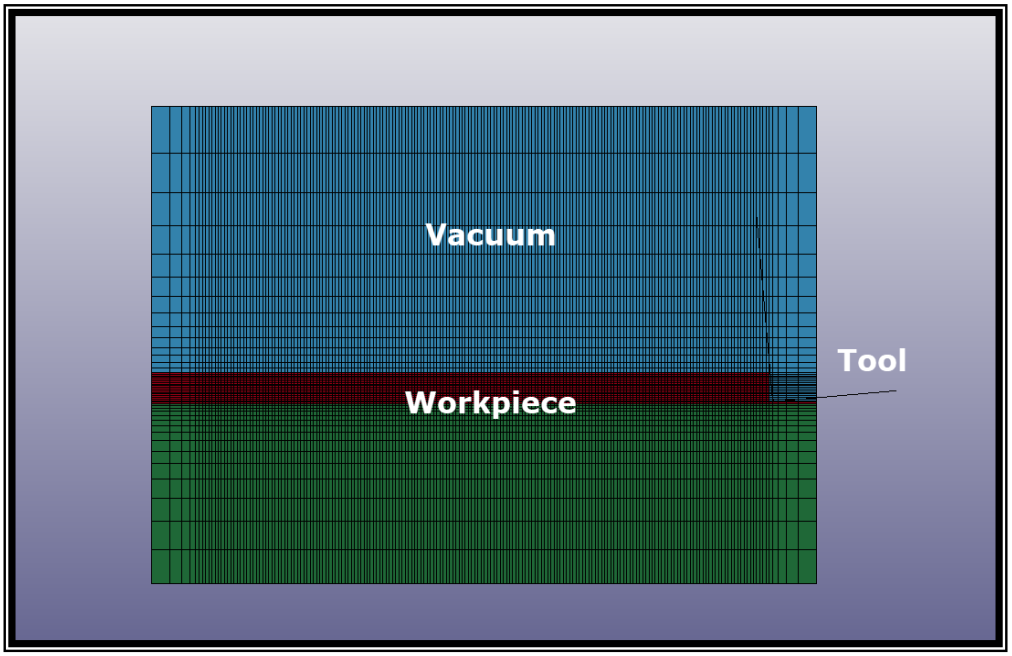
Εικόνα 4.1: Πειραματική διάταξη κατεργασίας τόρνευσης [16].



Εικόνα 4.2: Τρισδιάστατη απεικόνιση της κατεργασίας της τόρνευσης.

4.1 Κατασκευή γεωμετρικού μοντέλου και παραμέτρων κοπής

Το φυσικό πρόβλημα αντιστοιχίζεται σε orthogonal cut μιας μικρότερης κλίμακας, ώστε η μελέτη να γίνει στην πιο απλή μορφή της και να εξοικονομηθεί υπολογιστική ισχύς. Στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζεται η μορφή του μοντέλου που μελετάται, η οποία διακρίνεται σε τέσσερα βασικά κομμάτια. Το πρώτο και το δεύτερο κομμάτι χαρακτηρίζονται ως το τμήμα προς κατεργασία (Workpiece). Ο διαχωρισμός γίνεται βάση της περιοχής ενδιαφέροντος, στην οποία το κόκκινο τμήμα είναι εκείνο το οποίο θα κατεργαστεί από το κοπτικό εργαλείο, ενώ το πράσινο κομμάτι αποτελεί τη συνέχεια της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Το τρίτο κομμάτι αποτελεί τον αέρα (Vacuum), μέσα στον οποίο θα κινηθεί το απόβλητο κατά το πέρας της κατεργασίας και τέλος το τέταρτο κομμάτι αποτελεί το κοπτικό εργαλείο (Tool).

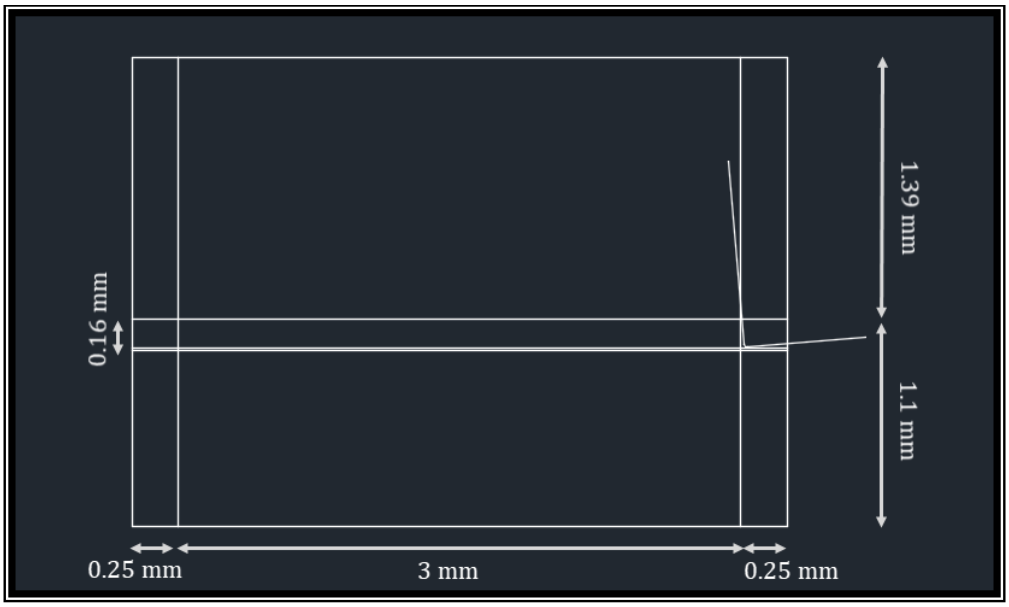


Εικόνα 4.3: Αντιστοιχία πραγματικού μοντέλου σε orthogonal cut.

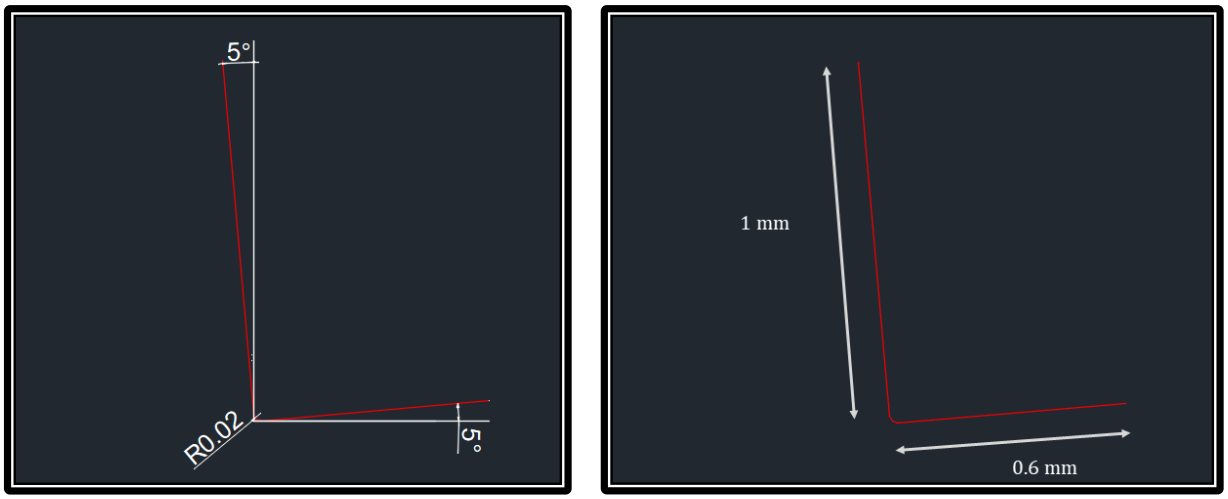
Αρχικά στο πρώτο στάδιο σχεδίαζεται το δισδιάστατο μοντέλο σε μικρότερη κλίμακα στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCad, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.4. Κατά τον σχεδιασμό προστέθηκαν κάποιες βοηθητικές γραμμές στο μοντέλο, οι οποίες θα βοηθήσουν στο επόμενο βήμα για την διακριτοποίηση του τελικού μοντέλου. Στην Εικόνα 4.5 εμφανίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου.

Μετά την ολοκλήρωση του δισδιάστατου σχεδιασμού, το αρχείο που θα χρησιμοποιηθεί για την μετέπειτα επεξεργασία θα πρέπει να έχει μια μορφή συμβατή με το πρόγραμμα του

Ansys, το οποίο θα αποτελέσει τη συνέχεια. Συνεπώς το αρχείο του AutoCad, εξάγεται σε IGES μορφή.



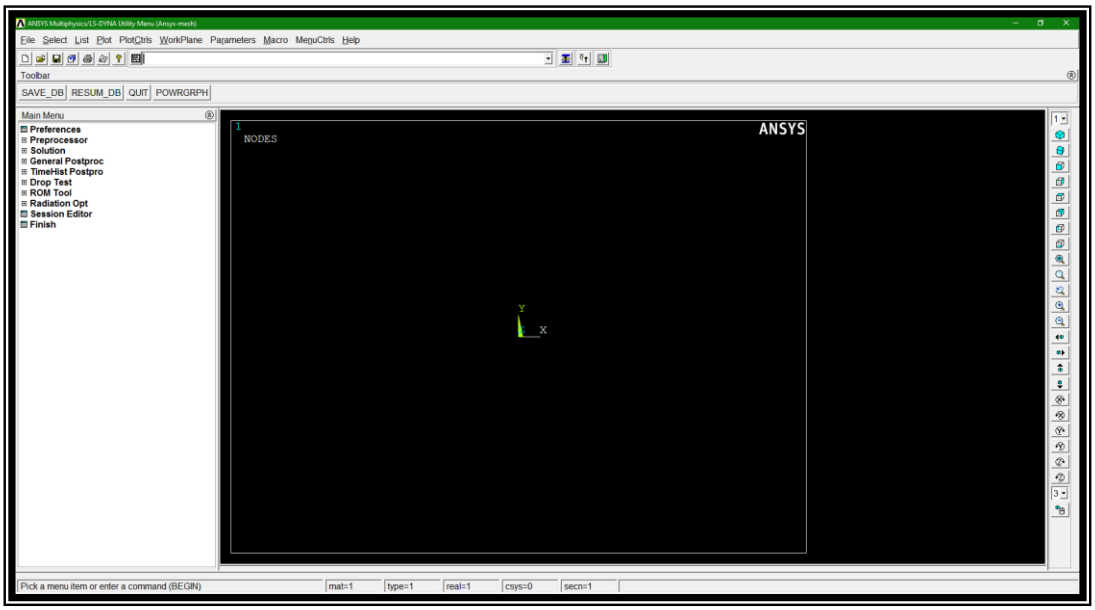
Εικόνα 4.4: Σχεδιασμός και διαστάσεις του 2D μοντέλου στο AutoCad.



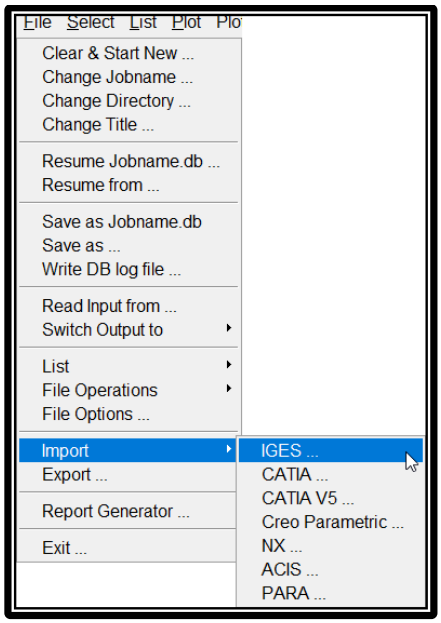
Εικόνα 4.5: Χαρακτηριστικά κοπτικού εργαλείου.

Το επόμενο στάδιο αφορά το πρόγραμμα του Ansys, μέσα στο οποίο το μοντέλο θα πάρει την τρισδιάστατη μορφή του και θα διακριτοποιηθεί σε πεπερασμένα στοιχεία. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται το Ansys είναι διότι μας δίνει τη δυνατότητα της χαρτογραφημένης διακριτοποίησης (Mapped Mesh Generation), με απώτερο σκοπό της μείωση της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύς, εστιάζοντας κυρίως με μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων στις περιοχές ενδιαφέροντος.

Στη συνέχεια περιγράφονται τα βήματα και ο τρόπος προσέγγισης του προβλήματος. Στην Εικόνα 4.6 εμφανίζεται το γραφικό περιβάλλον του Ansys. Το πρώτο βήμα είναι η εισαγωγή του IGES αρχείου που δημιουργήθηκε από το σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCad. Από την γραμμή εντολών (Εικόνα 4.7) ακολουθούνται τα βήματα *File→Import→IGES*. Στη συνέχεια εμφανίζεται το παράθυρο της Εικόνας 4.8 και αποδεχόμενοι τις επιλογές που εμφανίζει για την εισαγωγή του αρχείου πατώντας *OK*, εμφανίζεται το παράθυρο της Εικόνας 4.9, στο οποίο μας ζητείται η εύρεση του IGES αρχείου.

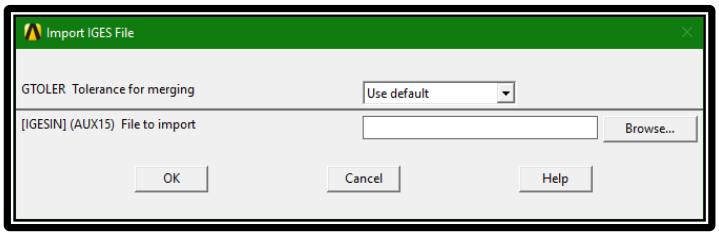


Εικόνα 4.6: Γραφικό περιβάλλον του Ansys.



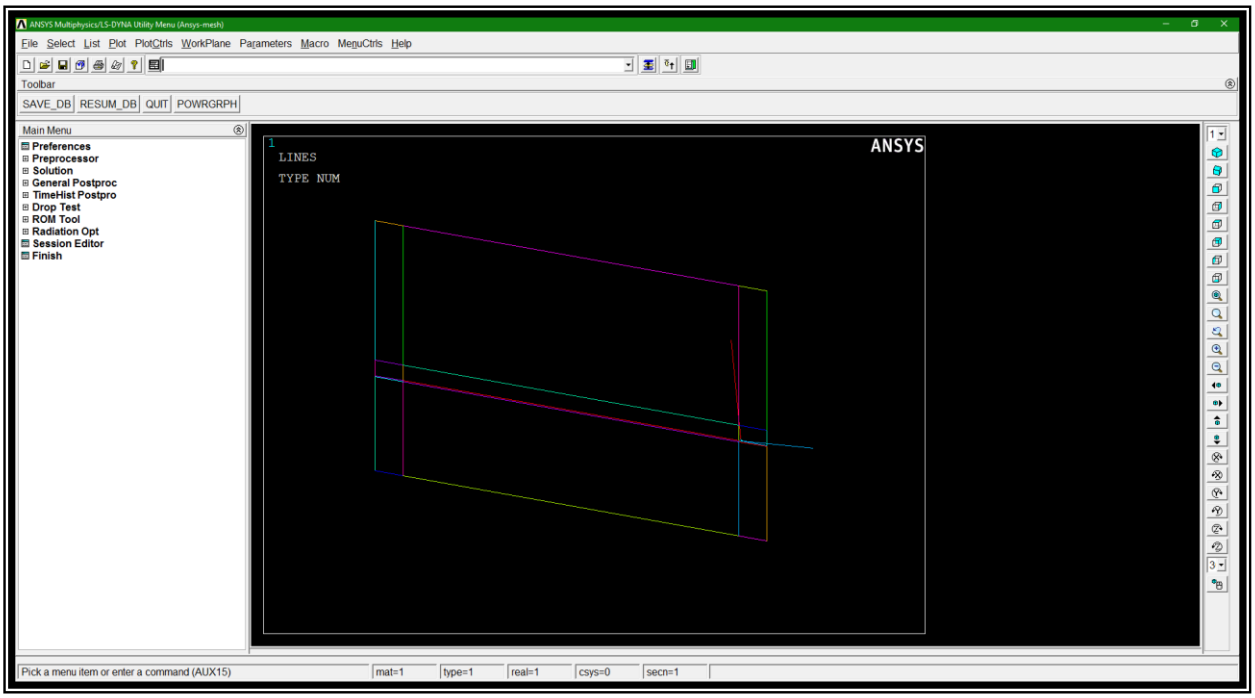
Εικόνα 4.7: Εισαγωγή IGES αρχείου.

Εικόνα 4.8: Επιλογές για την εισαγωγή IGES αρχείου.



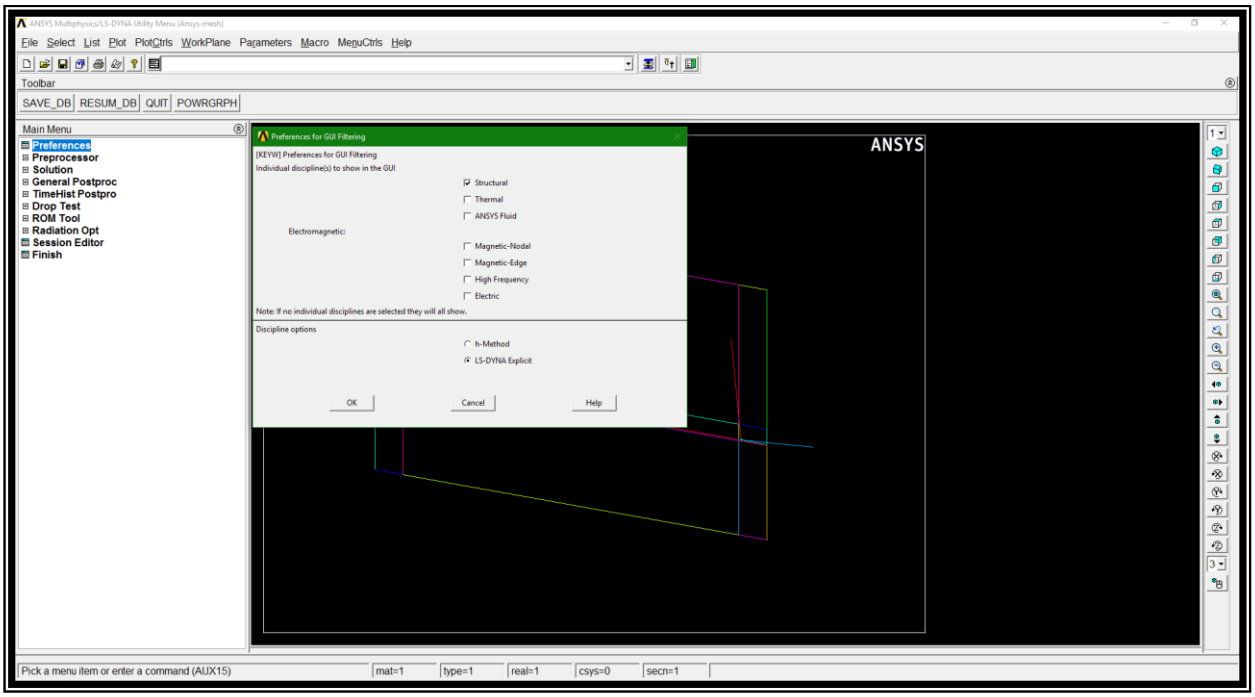
Εικόνα 4.9: Εύρεση IGES αρχείου.

Κατά την εισαγωγή του αρχείου, το μοντέλο έχει τη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 4.10. Παρατηρείται ότι κάθε γραμμή του μοντέλου αποτελεί ένα διαφορετικό τμήμα και για αυτό το λόγο εμφανίζεται με διαφορετικό χρώμα.



Εικόνα 4.10: Εμφάνιση αρχείου στο Ansys.

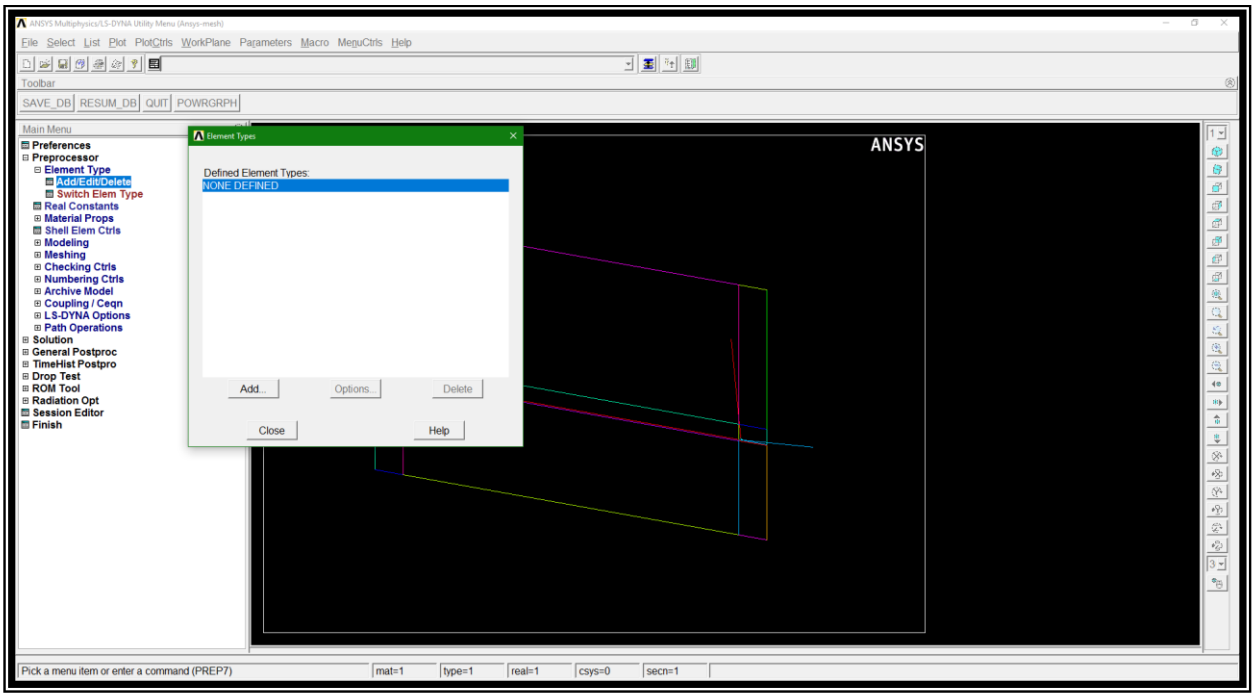
Στη συνέχεια, επιλέγεται το είδος της ανάλυσης που θα πραγματοποιηθεί για την προσομοίωση της κοπής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται να πραγματοποιηθεί explicit-structural ανάλυση (εικόνα 4.11).



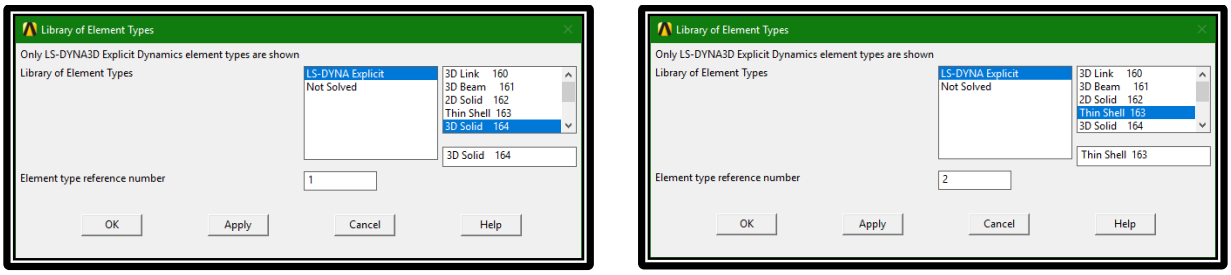
Εικόνα 4.11: Καρτέλα Preferences.

Παρόλο που η παραμετροποίηση θα πραγματοποιηθεί σε επόμενο στάδιο με τη χρήση του προγράμματος Ls-Dyna, για να μπορέσει να συνεχίσει η διαδικασία της διακριτοποίησης και ο διαχωρισμός σε τέσσερα διαφορετικά τμήματα, θα πρέπει να δηλωθούν τα είδη των στοιχείων που θα εισαχθούν και οι προσωρινές ιδιότητες των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν.

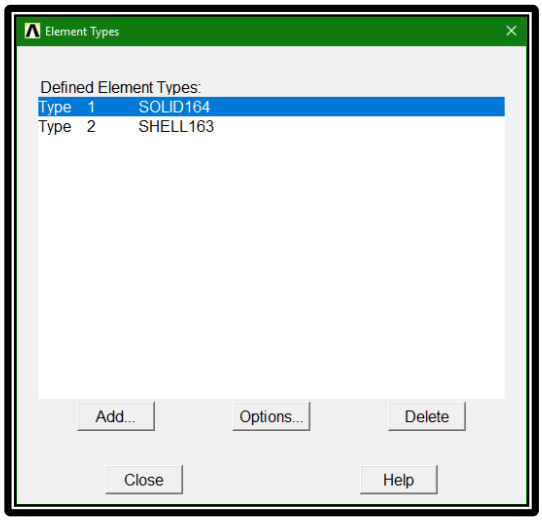
Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιούνται και δηλώνονται δύο στοιχεία, το ένα είναι το οκτακομβικό εξαεδρικό στοιχείο *3D Solid 164* και το άλλο είναι το τετρακομβικό στοιχείο λεπτού κέλυφους *Thin Shell 163*. Τα αρχικά βήματα δήλωσης των στοιχείων στο GUI (guide user interface) του Ansys όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.12 είναι τα εξής: *Main Menu→Preprocessor→Element Type→ Add/Edit/Delete*. Στη συνέχεια εμφανίζεται το παράθυρο *Element Type*, από το οποίο πατώντας το κουμπί *Add*, δίδεται η δυνατότητα προσθήκης στοιχείων από μια έτοιμη βιβλιοθήκη του Ansys (Εικόνα 4.13)



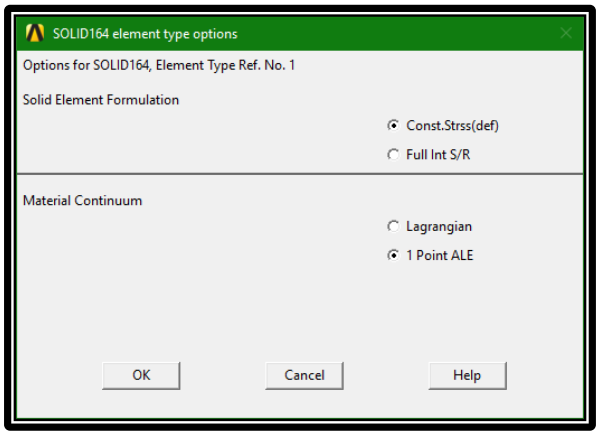
Εικόνα 4.12: Element Type.



Εικόνα 4.13: Επιλογή τύπων Element.

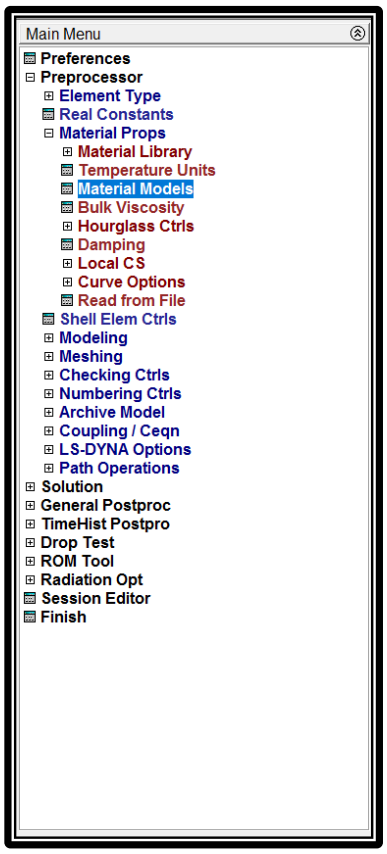


Εικόνα 4.14: Επιλεγμένα Element Type.

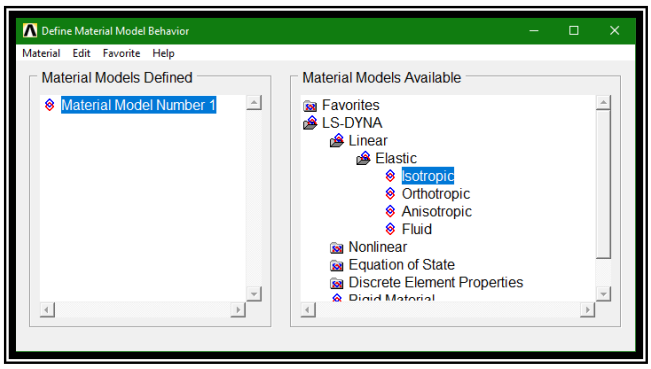


Εικόνα 4.15: Options του Solid 164.

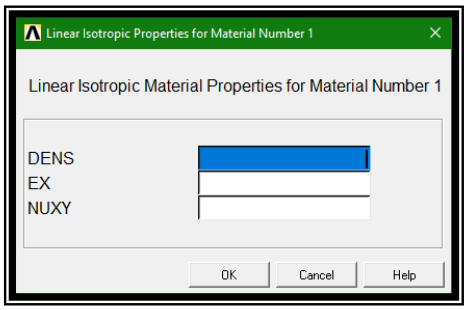
Στην Εικόνα 4.14 εμφανίζονται οι δύο τύποι των Element που θα χρησιμοποιηθούν, από τα οποία το Solid164 θα χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία πλέγματος για το τεμάχιο, ενώ το το Shell163 για τη διακριτοποίηση του κοπτικού εργαλείου. Για τον τύπο του Solid θα πρέπει να επιλεχθεί η ιδιότητα του 1 Point ALE, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η ALE μέθοδος, από την επιλογή Options όπως φαίνεται από την Εικόνα 4.15.



Εικόνα 4.16: Material Props.

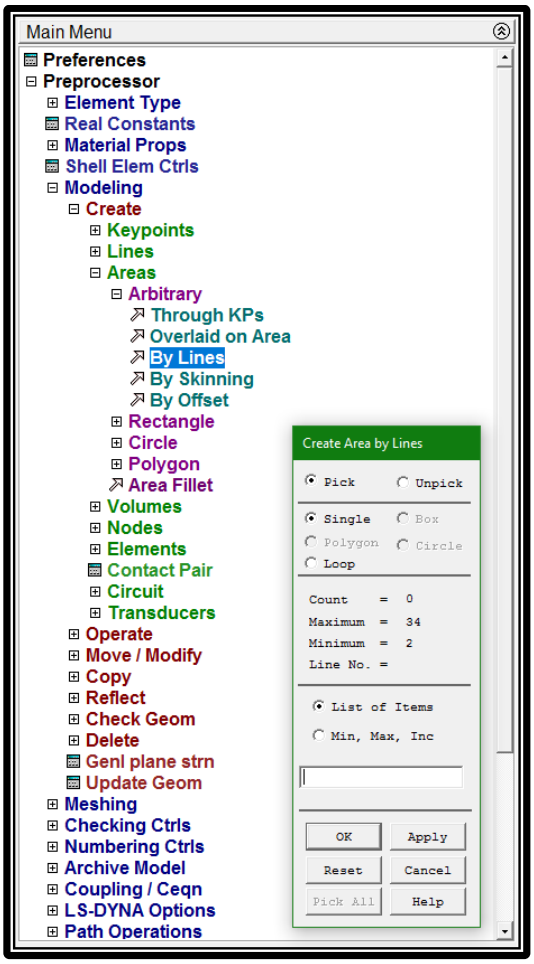


Εικόνα 4.17: Ορισμός τύπου υλικών.

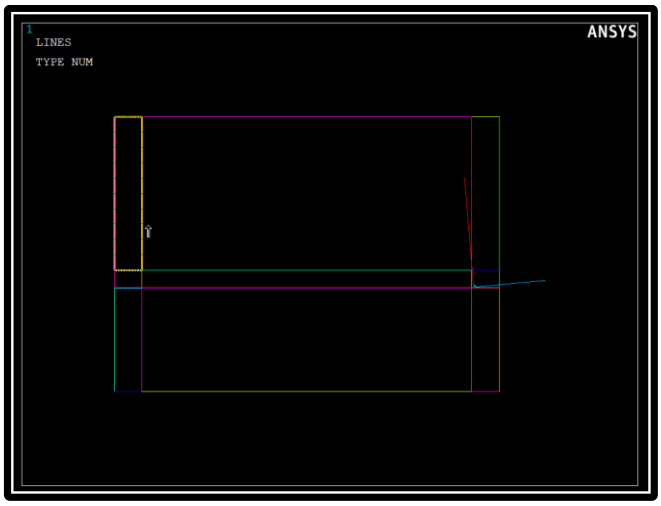


Εικόνα 4.18: Ορισμός ιδιοτήτων υλικών.

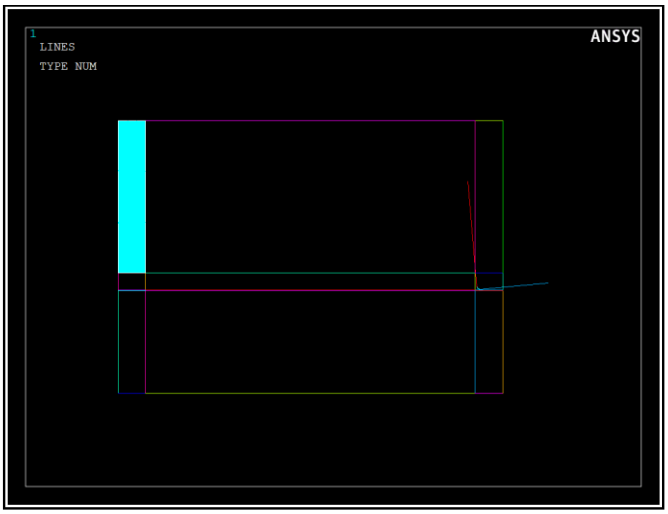
Στις Εικόνες 4.16 , 4.17, και 4.18 παρουσιάζονται τα βήματα για την εισαγωγή τεσσάρων διαφορετικών υλικών με τις ιδιότητες τους. Επιλέγονται στο GUI: *Main Menu→ Preprocessor→Material Props→Material Model.* Στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγονται *LS-DYNA→Linear→Elastic→Isotropic* και ορίζονται οι προσωρινές ιδιότητες των υλικών για τέσσερα διαφορετικά υλικά.



Εικόνα 4.19: Δημιουργία επιφάνειας βάση γραμμών.

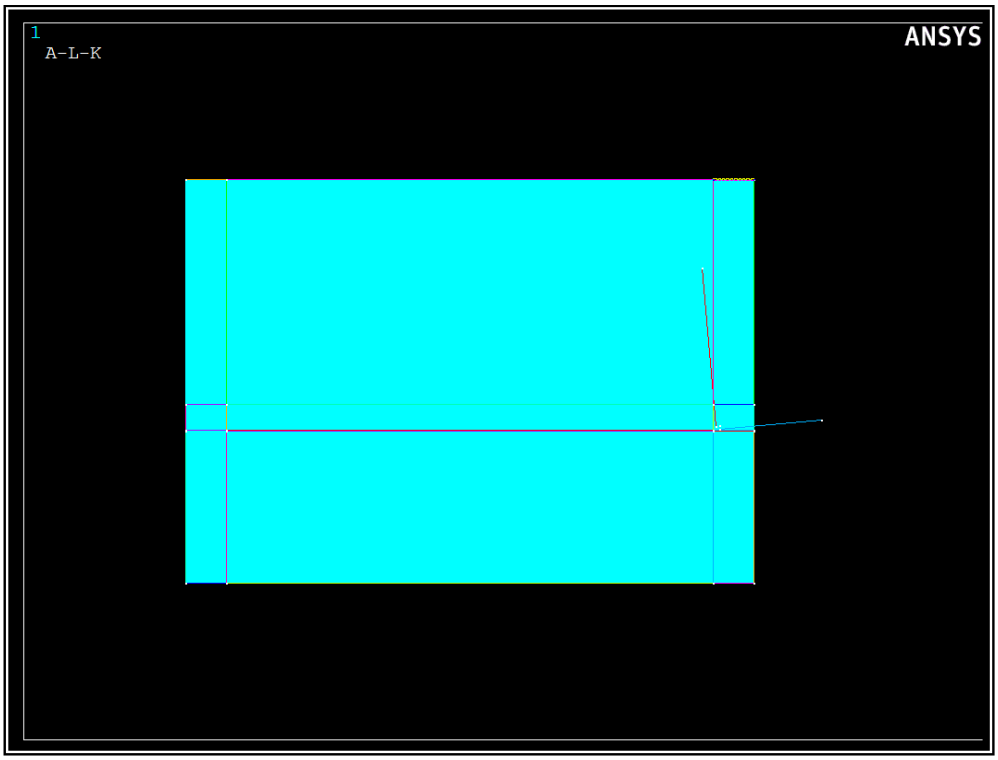


Εικόνα 4.20: Επιλογή γραμμών.



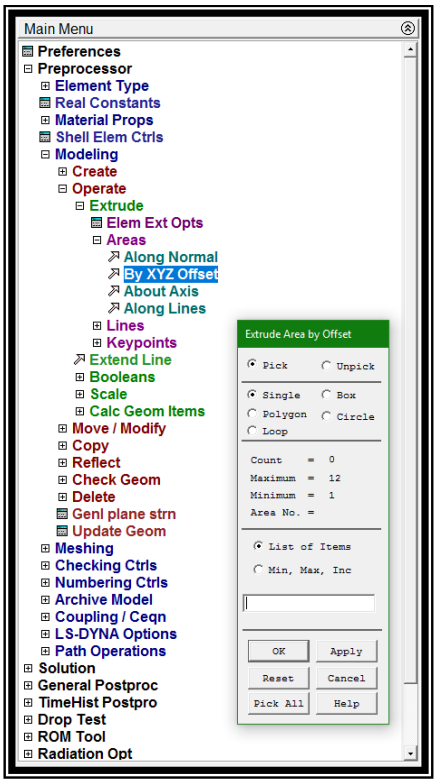
Εικόνα 4.21: Δημιουργία επιφάνειας.

Στις εικόνες 4.19-4.21 βλέπουμε τα βήματα που ακολουθούνται προκειμένου να δημιουργηθούν επιφάνειες από τις γραμμές, στα τρία διαφορετικά τμήματα (εκτός του εργαλείου). Στη συνέχεια δημιουργείται όγκος μέσω της εντολής extrude, δίδοντας πάχος στην κάθετη διεύθυνση (άξονας Z) και για τα τρία τμήματα. Επιλέγονται στο GUI: *Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Areas→By XYZ Offset* και στην εικόνα 4.22 παρατηρείται το τελικό αποτέλεσμα δημιουργίας όγκου σε όλο το τεμάχιο.

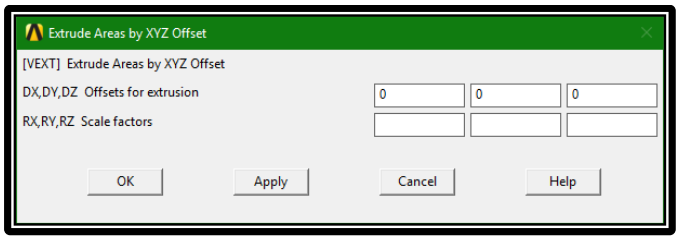


Εικόνα 4.22: Τελικό αποτέλεσμα δημιουργίας όγκου σε όλο το τεμάχιο.

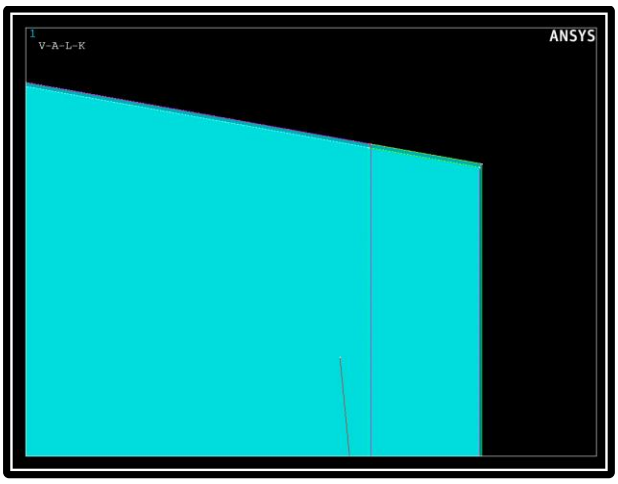
Αναλυτικά για τη δημιουργία όγκου, αφού επιλεχθούν οι επιφάνειες που θα γίνει το Offset, εμφανίζεται ένα παράθυρο (Εικόνα 4.24) στον οποίο πρέπει να οριστεί το μέγεθος του Offset, καθώς και ο άξονας στον οποίο θα γίνει. Το αποτέλεσμα του Offset εμφανίζεται στην Εικόνα 4.25.



Εικόνα 4.23: Απόδοση όγκου στις επιφάνειες του τεμαχίου.

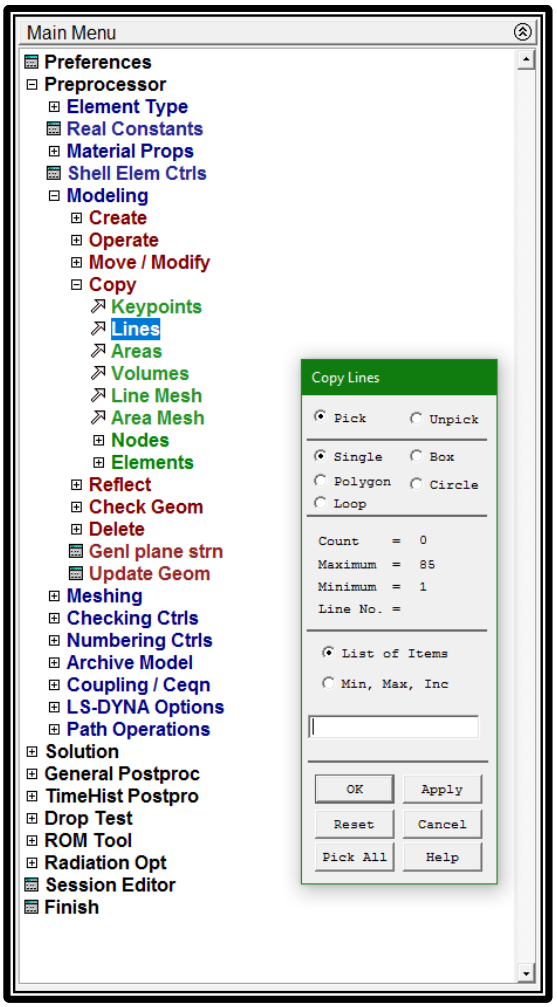


Εικόνα 4.24: Offset κατά τον άξονα Z.

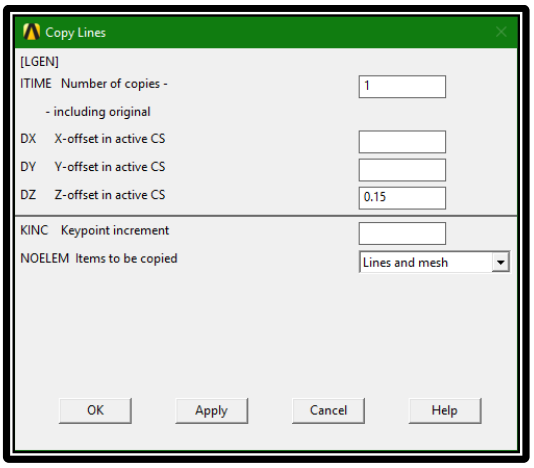


Εικόνα 4.25: Αποτέλεσμα Offset.

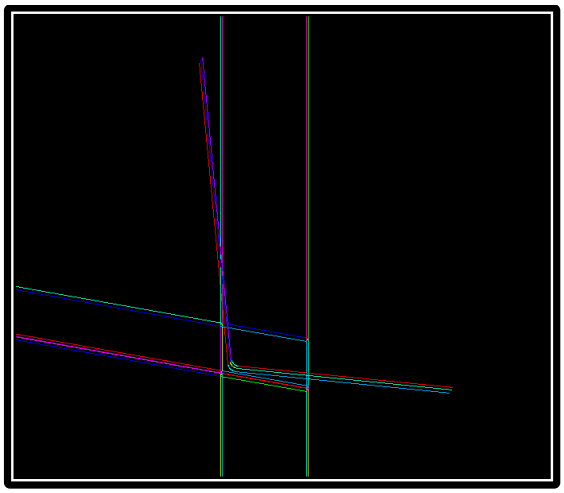
Για την ολοκλήρωση του σχεδιαστικής επεξεργασίας του μοντέλου, θα πρέπει να ολοκληρωθεί η μορφή του κοπτικού εργαλείου. Το κοπτικό εργαλείο για την συγκεκριμένη μέθοδο επίλυσης ορίζεται ως ένα Shell κομμάτι (δισδιάστατης μορφής). Για την δημιουργία επιφάνειας του κοπτικού, χρησιμοποιείται η ήδη υπάρχουσα ακμή του κοπτικού, η οποία αντιγράφεται και μεταφέρεται κατά τον άξονα Z. Τα βήματα εμφανίζονται στην Εικόνα 4.26 και είναι τα εξής: *Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Lines.* Στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγονται οι ακμές του κοπτικού και ορίζεται το Offset κατά τον Z άξονα όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.27. Το αποτέλεσμα της αντιγραφής ακμών του κοπτικού εργαλείου εμφανίζεται στην Εικόνα 4.28.



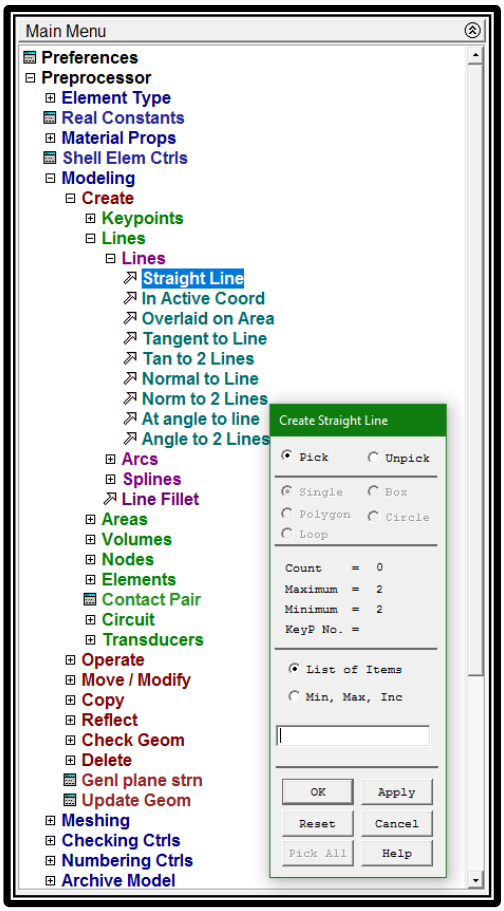
Εικόνα 4.26: Δημιουργία επιφάνειας κοπτικού εργαλείου.



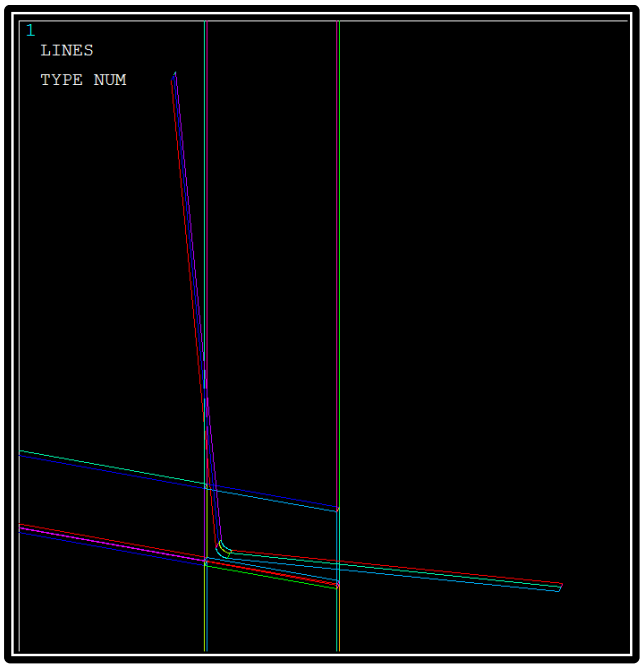
Εικόνα 4.27: Αντιγραφή ακμών κοπτικού.



Εικόνα 4.28: Αποτέλεσμα αντιγραφής ακμών κοπτικού εργαλείου.



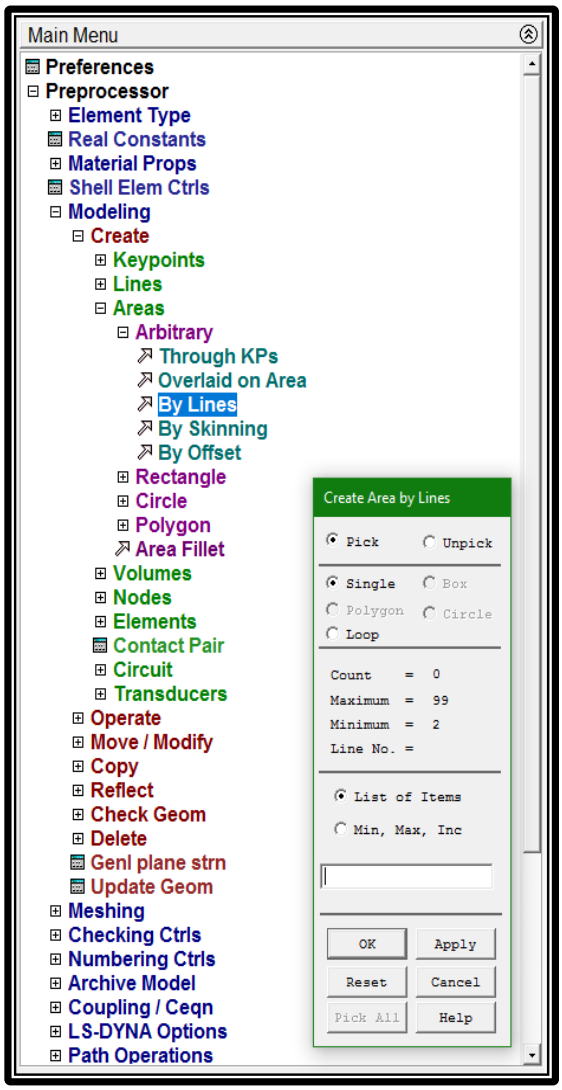
Εικόνα 4.29: Ένωση τελικών ακμών κοπτικού εργαλείου μεταξύ τους.



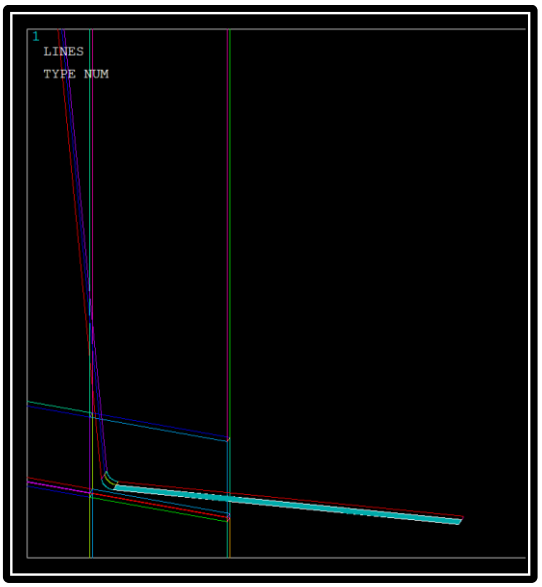
Εικόνα 4.30: Τελικό αποτέλεσμα ακμών κοπτικού.

Στη συνέχεια ενώνονται οι ακμές μεταξύ τους, ώστε να δημιουργούν τα όρια που απαιτούνται για την δημιουργία επιφανειών του κοπτικού εργαλείου. Στην Εικόνα 4.29 εμφανίζεται η σειρά εντολών που απαιτείται για την δημιουργία ακμών. *Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Straight Lines*

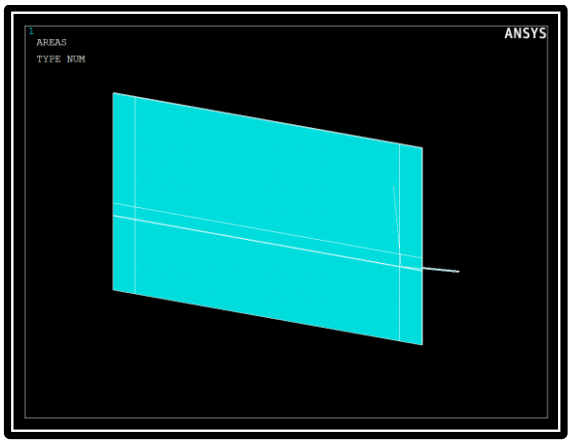
Μετά την ολοκλήρωση της ένωσης των ακμών (Εικόνα 4.30), δημιουργούνται επιφάνειες μεταξύ των ορίων των ακμών του κοπτικού εργαλείου. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής: *Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→By Lines.* Στην Εικόνα 4.33 παρουσιάζεται η τελική μορφή της γεωμετρίας του μοντέλου.



Εικόνα 4.31: Δημιουργία επιφανειών κοπτικού εργαλείου.

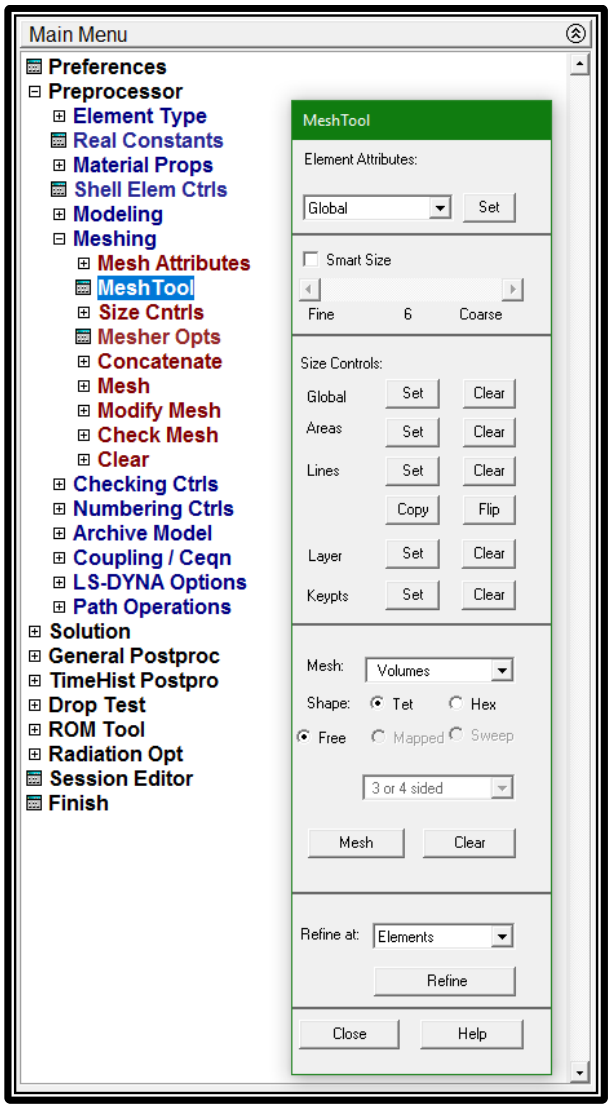


Εικόνα 4.32: Δημιουργία επιφανειών κοπτικού.

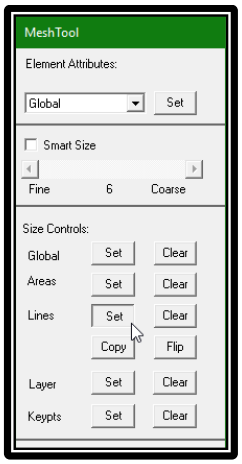


Εικόνα 4.33: Τελική μορφή γεωμετρίας μοντέλου.

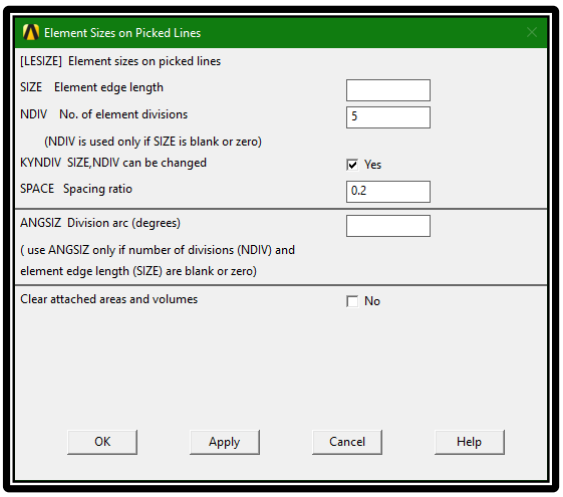
Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της διακριτοποίησης του μοντέλου, η δημιουργία πλέγματος (Meshing). Οι εντολές για την χρήση των εργαλείων mesh εμφανίζονται στην Εικόνα 4.34 και είναι οι εξής: *Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Tool*. Από το παράθυρο που εμφανίζεται (Εικόνα 4.35), επιλέγεται το *Set*, που βρίσκεται δίπλα στην κατηγορία *Line*. Επιλέγονται οι ακμές του μοντέλου με τον ίδιο επιθυμητό αριθμό στοιχείων και ορίζονται από το παράθυρο που εμφανίζεται (Εικόνα 4.36). Από το συγκεκριμένο παράθυρο χρησιμοποιούνται τα στοιχεία του *NDIV*, το οποίο διαιρεί τις επιλεγμένες ακμές στον αριθμό των στοιχείων που ορίζεται από το χρήστη, και το στοιχείο *SPACE*, αν κρίνεται απαραίτητο, το οποίο θέτει μια αναλογία της απόστασης μεταξύ των ορισμένων στοιχείων.



Εικόνα 4.34: Διακριτοποίηση μοντέλου.

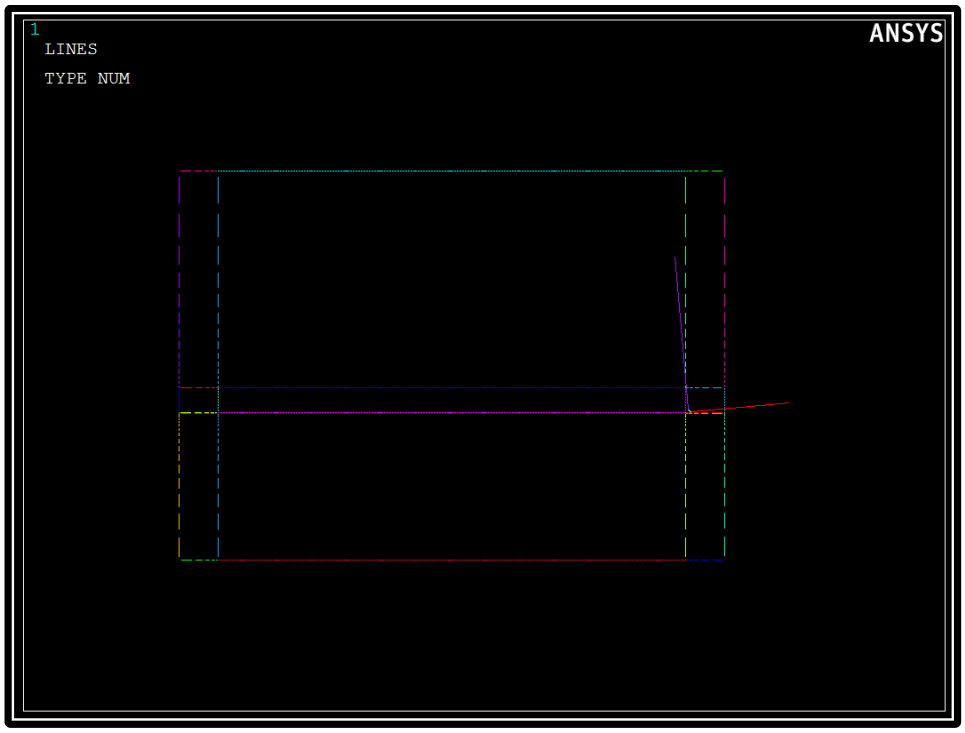


Εικόνα 4.35: Επιλογή Set Lines.

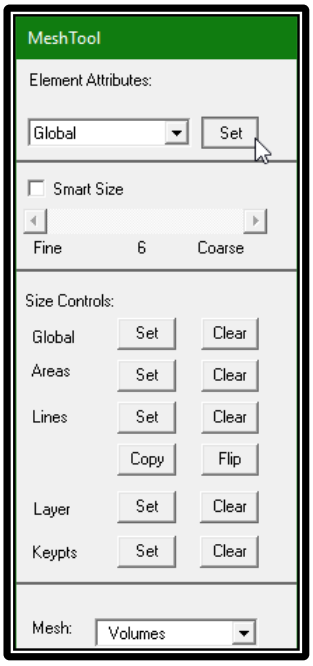


Εικόνα 4.36: Ορισμός αριθμού στοιχείων και αναλογία απόστασης μεταξύ τους.

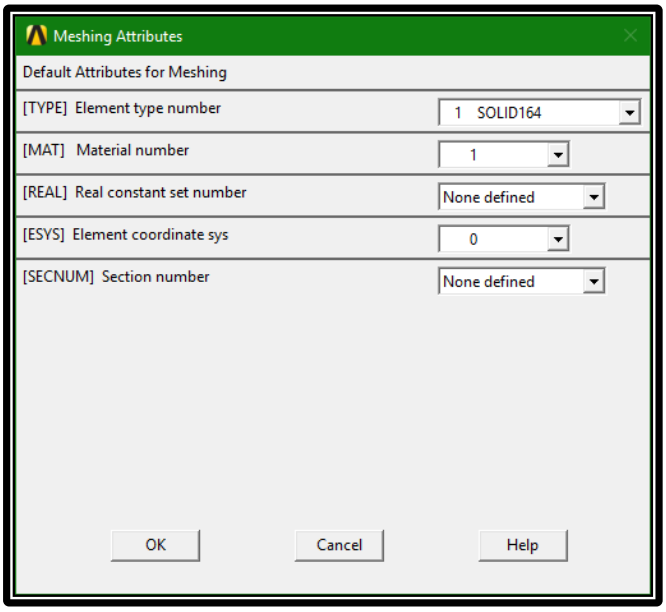
Η μορφή των ακμών του μοντέλου μετά τον ορισμό όλων των στοιχείων, παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.37. Το τελευταίο στάδιο για την ολοκλήρωση της διακριτοποίησης του μοντέλου, είναι η διακριτοποίηση ανά τμήμα με συγκεκριμένο τύπο Element και συγκεκριμένο υλικό. Στο παράθυρο *Mesh Tool* της Εικόνας 4.38 επιλέγοντας το *Set* του *Element Attributes* ανοίγει το παράθυρο *Meshing Attributes* (Εικόνα 4.39), από το οποίο επιλέγεται ο τύπος του στοιχείου (Solid ή Shell) και ο αριθμός του υλικού που έχει οριστεί από την αρχή της διαδικασίας για το κάθε κομμάτι.



Εικόνα 4.37: Μορφή των ακμών του μοντέλου μετά τον ορισμό όλων των στοιχείων.

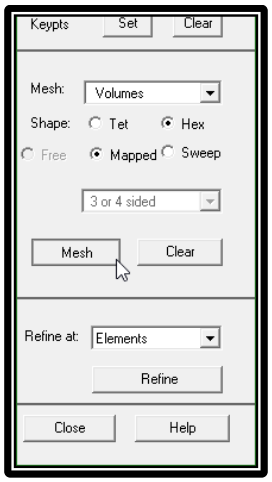


Εικόνα 4.38: Set Element Attributes.

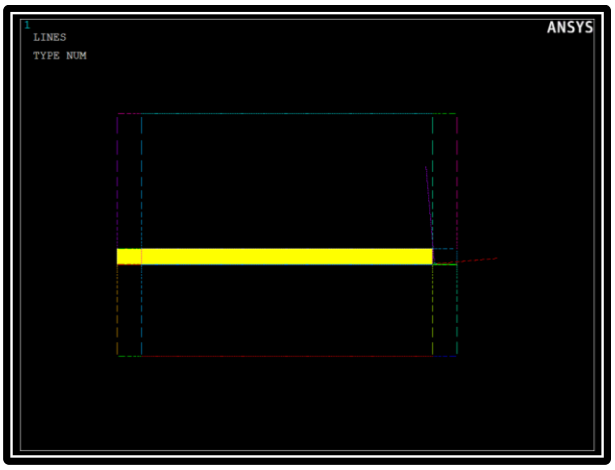


Εικόνα 4.39: Διακριτοποίηση ανάλογα τον τύπο του στοιχείου και του υλικού.

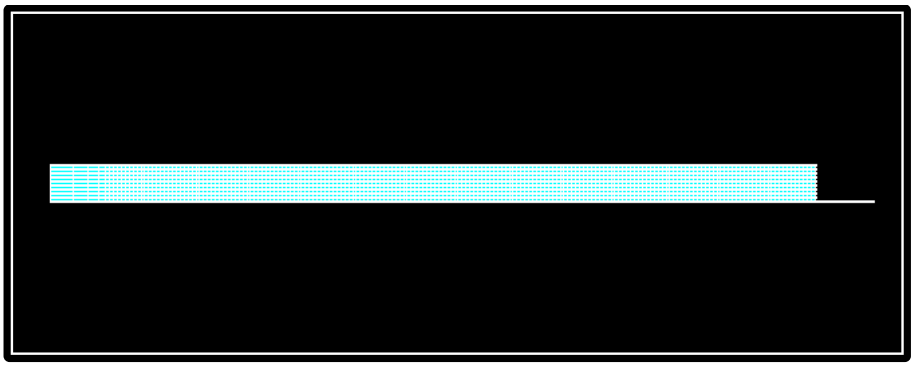
Αφού επιλεχθεί το στοιχείο και το υλικό, στο παράθυρο *Mesh Tool* (Εικόνα 4.40) ορίζεται στην περίπτωση του εξαεδρικού *Solid* στοιχείου, να γίνει mapped πλεγματοποίηση *(Mesh)* όγκων, ενώ στην περίπτωση του τετρεδρικού *Shell* που προορίζεται για το κοπτικό εργαλείο η διακριτοποίηση γίνεται στις επιφάνειες.



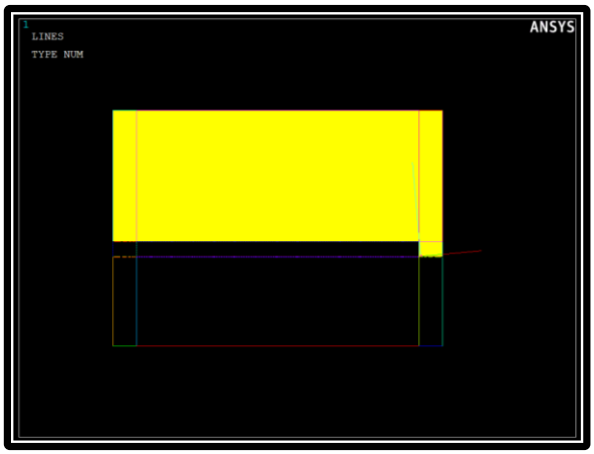
Εικόνα 4.40: Mesh.



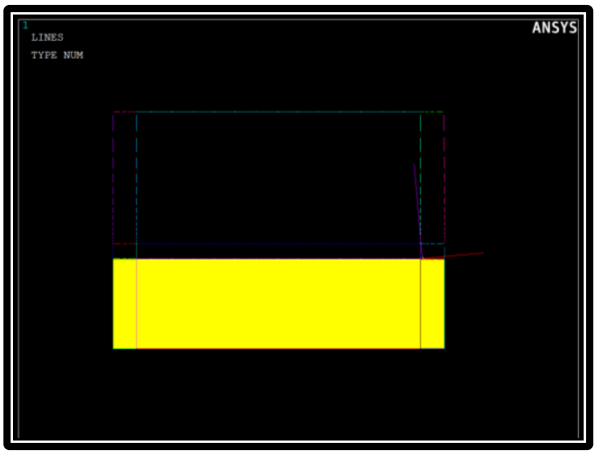
Εικόνα 4.41: Επιλογή Part 1.



Εικόνα 4.42: Διακριτοποίηση Part 1.

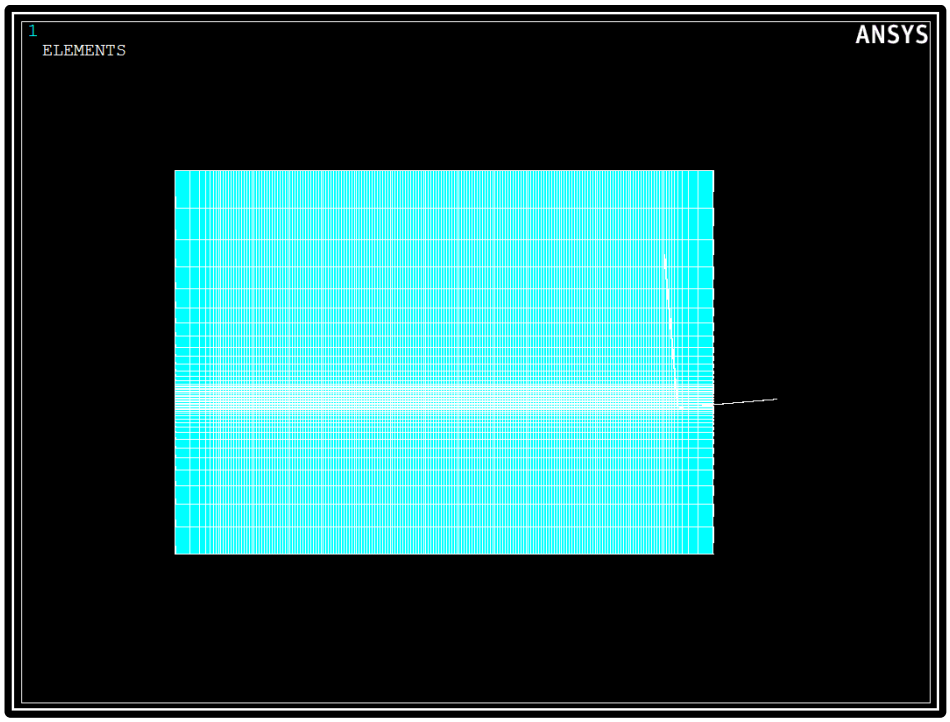


Εικόνα 4.43: Επιλογή Part 2.



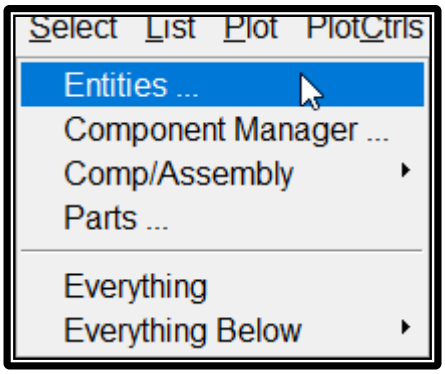
Εικόνα 4.44: Επιλογή Part 3.

Στην Εικόνα 4.41 επιλέγεται το τμήμα (Part) 1 και διακριτοποιείται όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.42. Στη συνέχεια επιλέγονται αντίστοιχα τα υπόλοιπα τμήματα του μοντέλου με τους αντίστοιχους τύπους στοιχείων και αριθμό υλικών και το αποτέλεσμα που προκύπτει εμφανίζεται στην Εικόνα 4.45.



Εικόνα 4.45: Τελική μορφή διακριτοποιημένου μοντέλου.

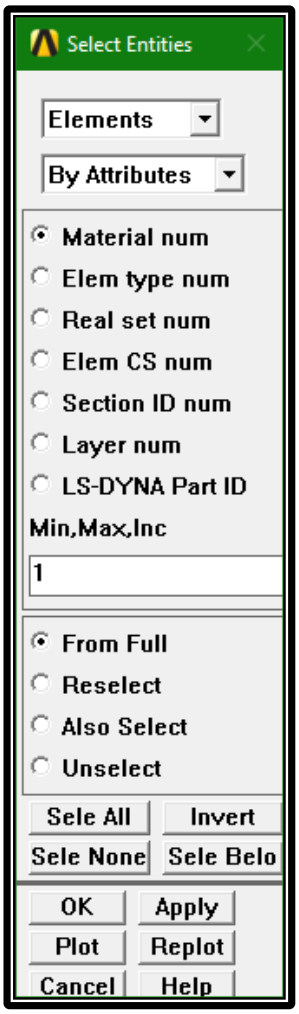
Το τελικό βήμα είναι να δημιουργηθεί ένα αρχείο της μορφής *.k, το οποίο είναι αναγνωρίσιμο από το πρόγραμμα Ls-Dyna, μέσα στο οποίο θα προστεθούν ιδιότητες υλικών και οι οριακές συνθήκες του προβλήματος προς επίλυση. Για να δημιουργηθεί το k-file, στο πρόγραμμα του Ansys, αποθηκεύονται για κάθε κομμάτι τα στοιχεία, οι κόμβοι και το είδος του κάθε Part, που έχει το μοντέλο. Απομονώνεται κάθε Part βάση του υλικού του με τα εξής βήματα (Εικόνα 4.46): *Select→Entities*



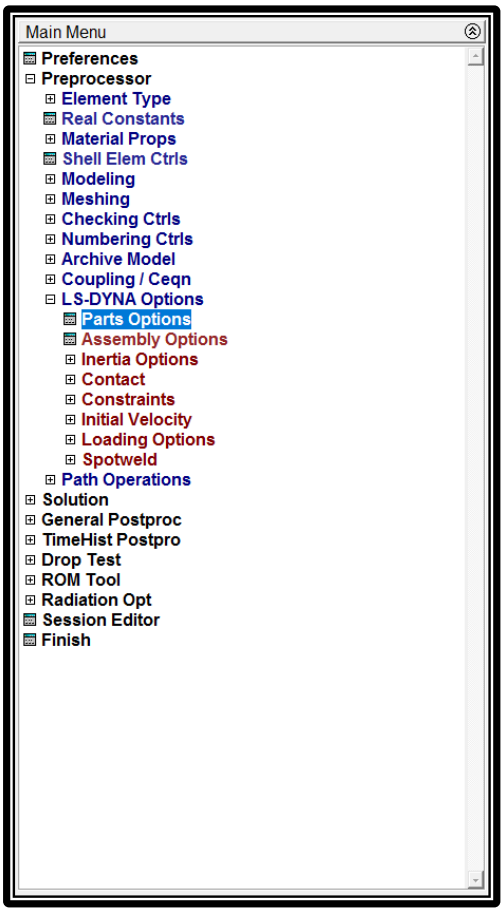
Εικόνα 4.46: Select Entities.

Από το παράθυρο που εμφανίζεται (Εικόνα 4.46) επιλέγεται ο αριθμός του μοναδικού υλικού για κάθε Part και στη συνέχεια δημιουργείται το αντίστοιχο Part ακολουθώντας τα εξής

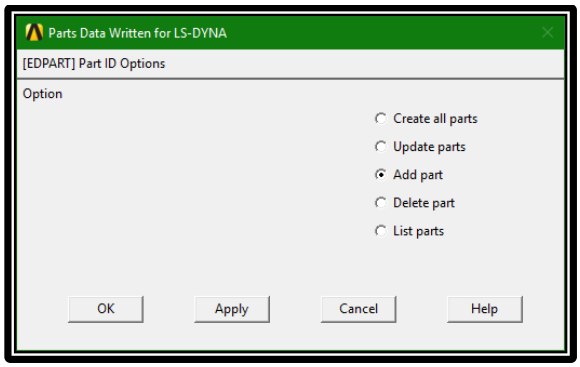
βήματα (Εικόνες 4.47, 4.48, 4.49): *Main Menu→Preprocessor→LS-DYNA Options→Parts Options*



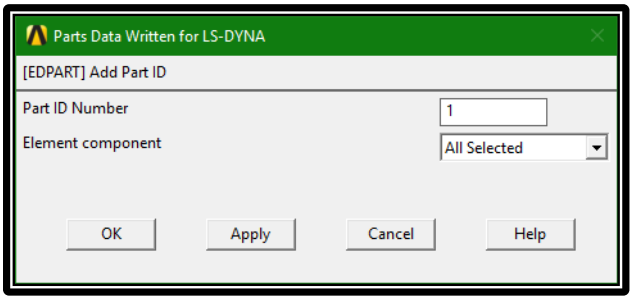
Εικόνα 4.47: Επιλογή βάση υλικού.



Εικόνα 4.48: Επεξεργασία Part.

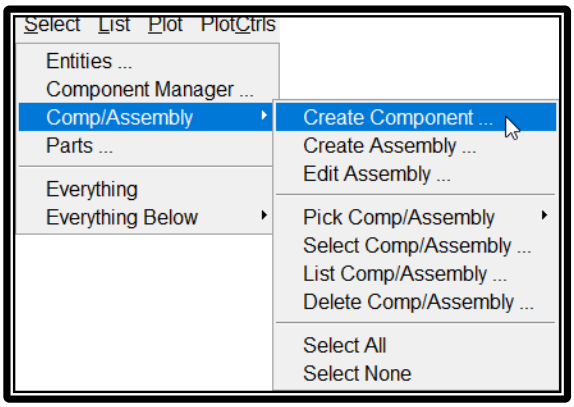


Εικόνα 4.49: Δημιουργία νέου Part.

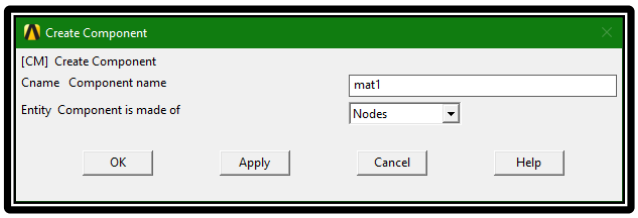


Εικόνα 4.50: Parts Written for LS-DYNA.

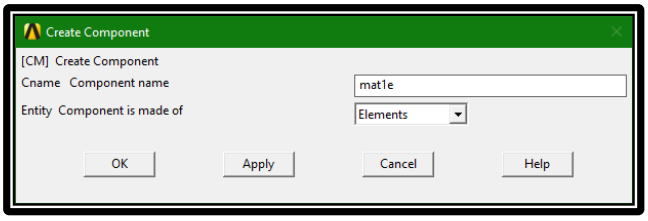
Για κάθε Part δημιουργείται ένα Component (Εικόνα 4.51), μέσα στο οποίο καταγράφονται τα στοιχεία και οι αντίστοιχοι κόμβοι (Εικόνα 4.52, 4.53). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τα υπόλοιπα 3 Parts.



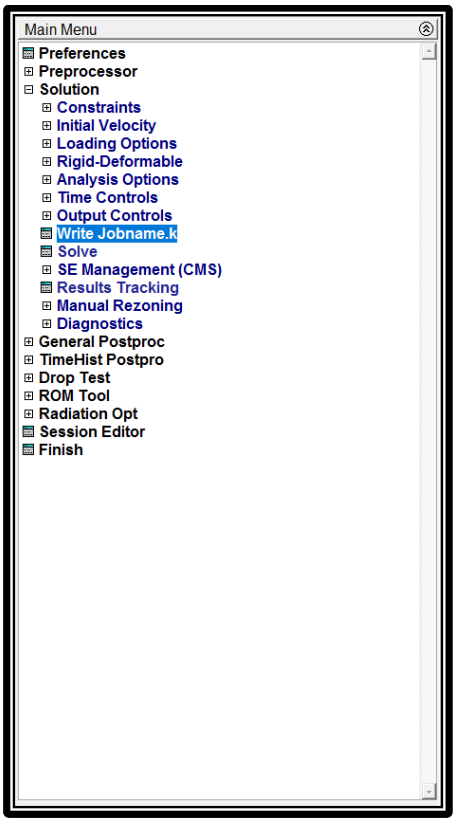
Εικόνα 4.51: Δημιουργία Component.



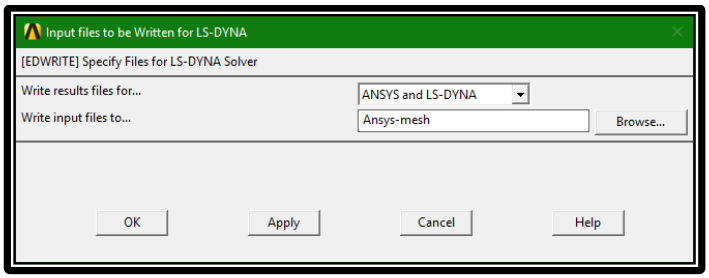
Εικόνα 4.52: Καταγραφή κόμβων.



Εικόνα 4.53: Καταγραφή στοιχείων.



Εικόνα 4.54: Δημιουργία k-file.

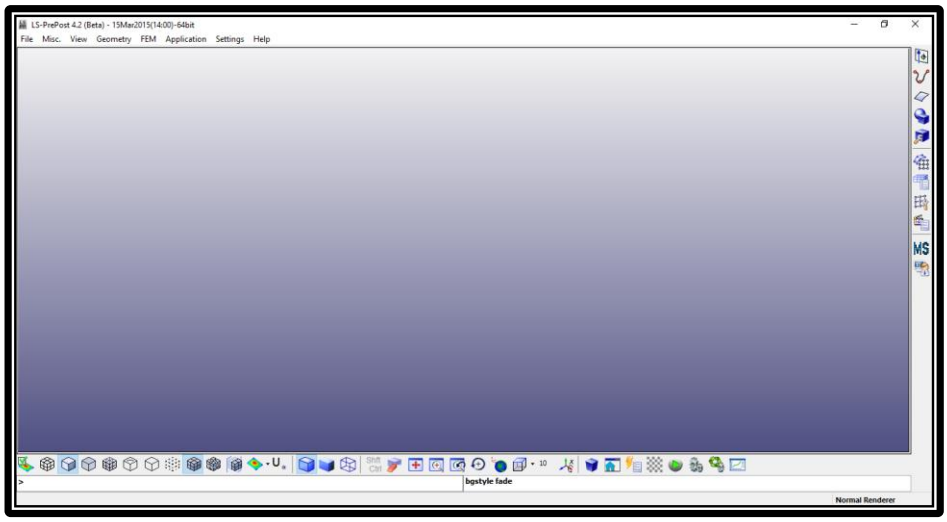


Εικόνα 4.55: Αποθήκευση k-file.

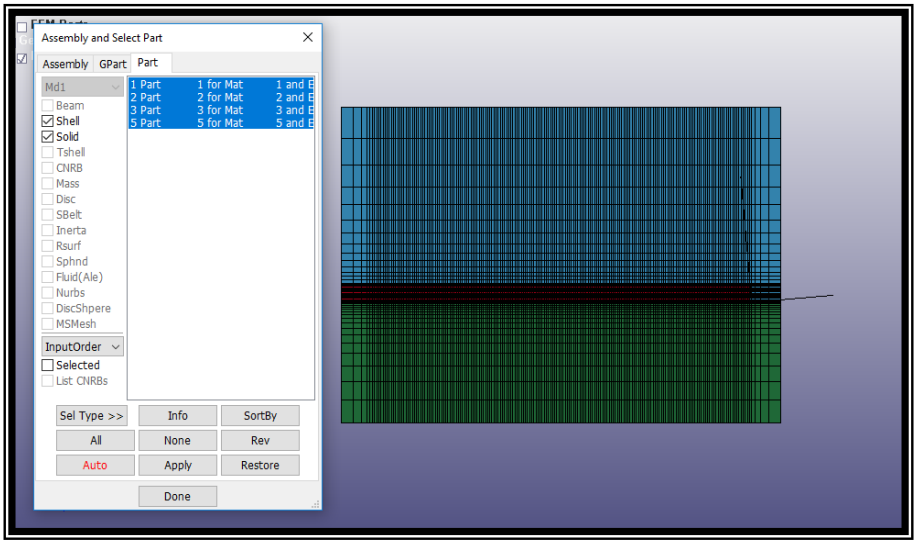
Τέλος δημιουργείται και αποθηκεύεται το k-file αρχείο όπως φαίνεται στις Εικόνες 4.54 και 4.55, το οποίο εισάγεται στο πρόγραμμα Ls-Dyna.

4.2 Μοντελοποίηση κοπής με πεπερασμένα στοιχεία στο LS -DYNA

Το γραφικό περιβάλλον του Ls-Dyna έχει τη μορφή που εμφανίζεται στην Εικόνα 4.56. Μέσα σε αυτό το γραφικό περιβάλλον πραγματοποιείται η παραμετροποίηση του μοντέλου προς μελέτη. Εισάγοντας το k-file που δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα του Ansys, το μοντέλο έχει τη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 4.57.



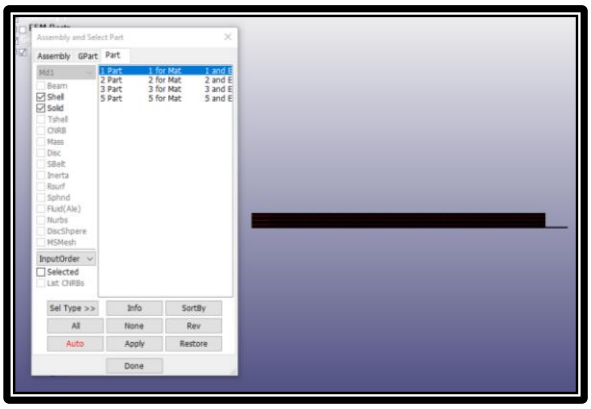
Εικόνα 4.56: Γραφικό περιβάλλον του Ls-Dyna.



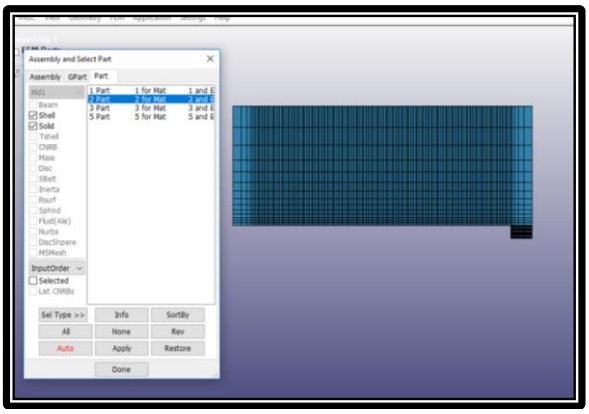
Εικόνα 4.57: Εισαγωγή k-file.

Στις Εικόνες 4.58-4.61 παρουσιάζονται μεμονωμένα τα τέσσερα διαφορετικά Part του μοντέλου. Η επεξεργασία των παραμέτρων του μοντέλου γίνεται μέσω του Keyword Manager (Εικόνα 4.62). Ο Keyword Manager περιέχει καρτέλες με τις πληροφορίες που ορίζονται από

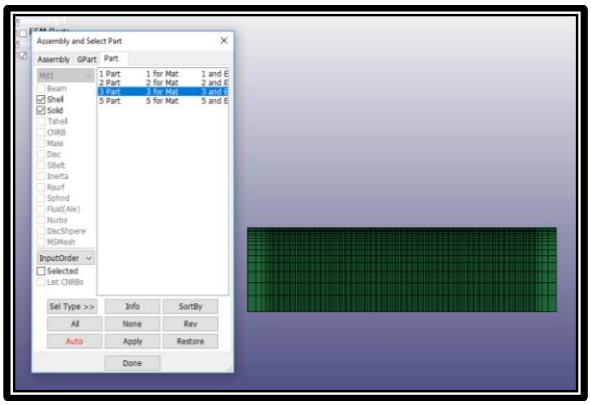
τον χρήστη, και αποθηκεύονται αντίστοιχα σε μορφή κώδικα στο k-file που περιγράφει το μοντέλο.



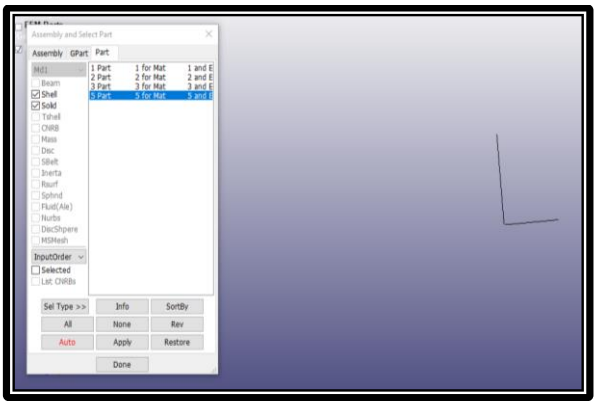
Εικόνα 4.58: Part 1.



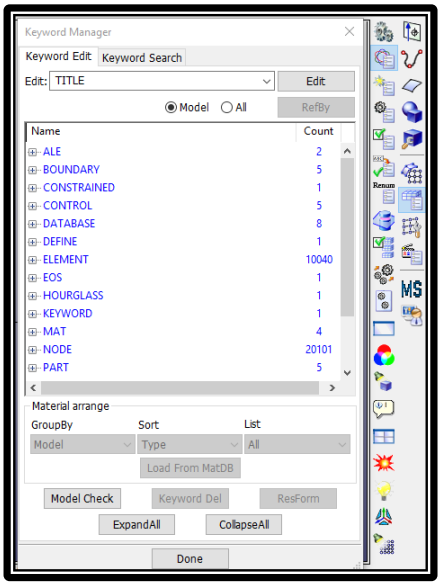
Εικόνα 4.59: Part 2.



Εικόνα 4.60: Part 3.



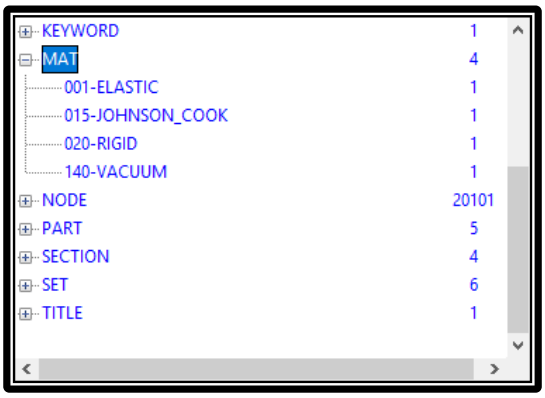
Εικόνα 4.61: Part 5.



Εικόνα 4.62: Keyword Manager.

Μετά την εισαγωγή του αρχείου, ορίζονται οι ιδιότητες των υλικών βάση των Πινάκων 4.1 και 4.2. Συνεπώς στην ενότητα MAT, δημιουργούνται τέσσερις διαφορετικοί τύποι υλικών

όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.63, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζει τα τέσσερα διαφορετικά Part. Στις Εικόνες 4.64-4.67 παρουσιάζονται οι καρτέλες δήλωσης των μεταβλητών για τα τέσσερα διαφορετικά υλικά που απαιτεί το μοντέλο.



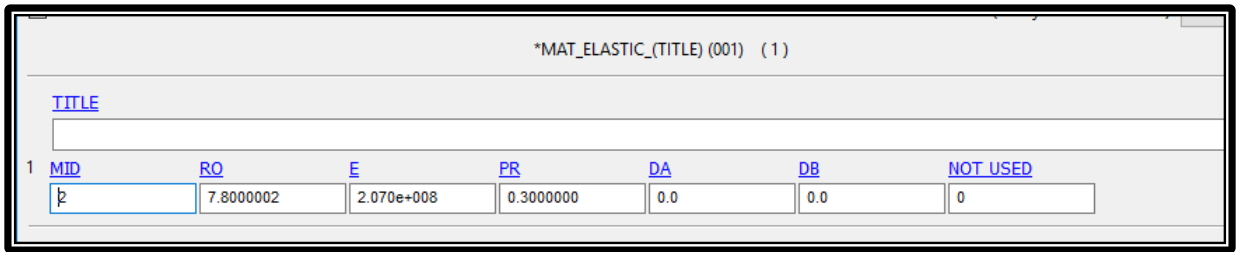
Εικόνα 4.63: Ορισμός υλικών.

Ιδιότητες	Τεμάχιο	Εργαλείο
Πυκνότητα [kg/m^3]	7800	3399
Μέτρο Ελαστικότητας [GPa]	211	652
Λόγος Poisson [-]	0.28	0.128
Ειδική Θερμότητα [J/kg K]	560	960
Θερμική Αγωγιμότητα [W/m K]	37	100
Σημείο τήξης [K]	1700	-

Πίνακας 4.1: Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του τεμαχίου (AISI H-13 ατσάλι) και κοπτικού (PCBN).

Παράμετρος	*A* [MPa]	*B* [MPa]	*n* [-]	*C* [-]	*m* [-]
Σετ 1	674.8	239.2	0.28	0.027	1.3
Παράμετρος	D_1 [-]	D_2 [-]	D_3 [-]	D_4 [-]	D_5 [-]
Values	-0.8	2.1	-0.5	0.0002	2.7

Πίνακας 4.2: Παράμετροι Johnson-Cook του υλικού του τεμαχίου (AISI H-13).



Εικόνα 4.64: 001-Elastic.

*MAT_JOHNSON_COOK_(TITLE) (015) (1)

	TITLE							
1	MID	RO	G	E	PR	DTF	VP	RATEOP
	1	0.0078000	8.100e+010	2.110e+011	0.2800000	0.0	0.0	0.0
2	A	B	N	C	M	TM	TR	EPSO
	6.750e+008	2.390e+008	0.2800000	0.0270000	1.3000000	1427.0000	20.000000	0.0010000
3	CP	PC	SPALL	IT	D1	D2	D3	D4
	4.600e+008	0.0	2.0	0.0	-0.8000000	2.0999999	-0.5000000	2.000e-004
4	D5	C2/P	EROD	EFMIN				
	2.7000000	0.0	0	1.000e-006				

Εικόνα 4.65: 015-Johnson Cook.

*MAT_RIGID_(TITLE) (020) (1)

	TITLE							
1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
	3	0.0034000	6.520e+011	0.1280000	0.0	0	0.0	
2	CMO	CON1	CON2					
	0.0	0	0					
3	LCO OR A1	A2	A3	V1	V2	V3		
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Εικόνα 4.66: 020-Rigid.

*MAT_VACUUM_(TITLE) (140) (1)

	TITLE	
1	MID	DEN
	20	0.0

Εικόνα 4.67: 140-Vacuum.

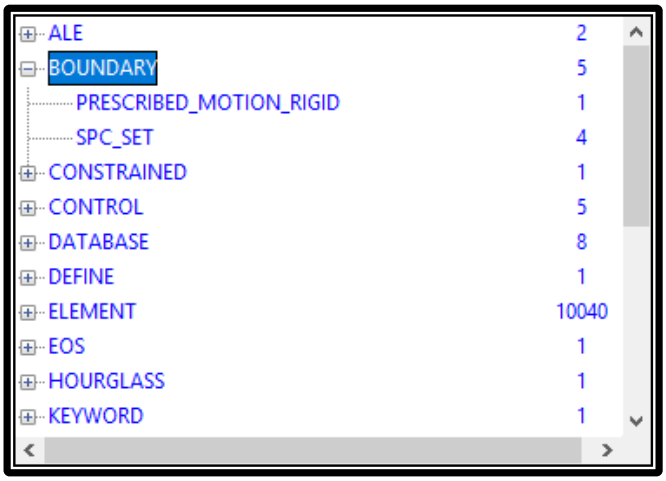
Για τον πλήρη καθορισμό του μαθηματικού μοντέλου, πρέπει να τεθούν οι οριακές συνθήκες. Στην ενότητα BOUNDARY (Εικόνα 4.68) περιέχονται δυο καρτέλες, εκ των οποίων η μία αναφέρεται στην κυρίως κίνηση του κοπτικού εργαλείου, η οποία είναι ο άξονας του *x*, και η άλλη αναφέρεται σε τέσσερα διαφορετικά σετ κόμβων, τα οποία περιορίζονται ως προς τους βαθμούς ελευθερίας τους.

Στη Εικόνα 4.69 απεικονίζονται τα τέσσερα Σετ κόμβων του μοντέλου, ενώ στον Πίνακα 4.3 εμφανίζονται οι περιορισμοί ανά Σετ κόμβων. Περιγραφικά αναφέρεται ότι το Σετ 1 αφορά τους κόμβους που βρίσκονται στο κάτω όριο του τεμαχίου και περιορίζονται ως προς (X,Y,Z). Το Σετ 2 αφορά τους κόμβους που βρίσκονται στα κάθετα όρια του τεμαχίου και περιορίζονται ως προς (X,Z). Επίσης το Σετ 3, το οποίο περιέχει τους κόμβους του άνω οριζόντιου ορίου του

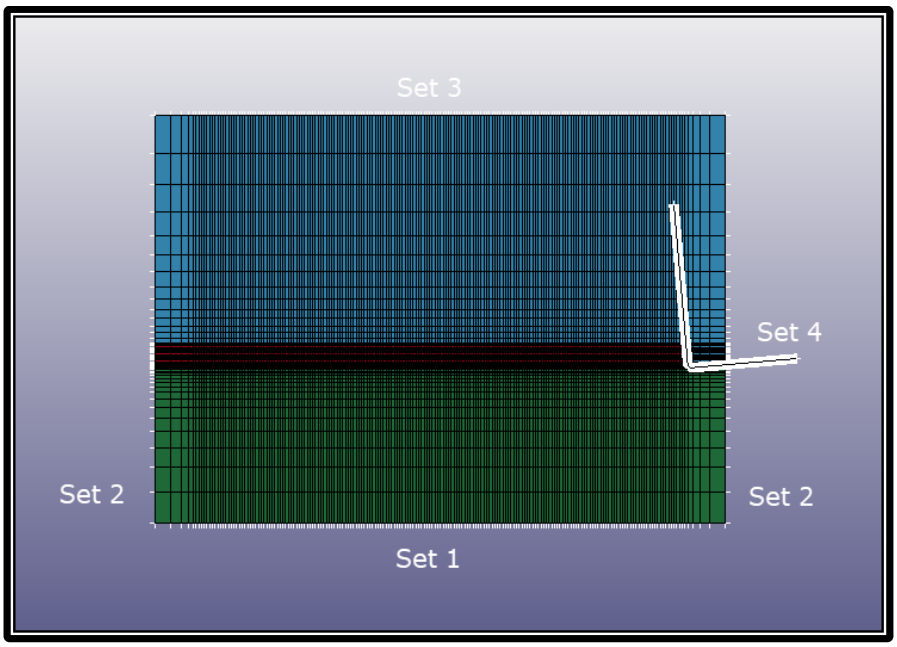
τεμαχίου, οι οποίοι περιορίζονται ως προς (Z). Τέλος το Σετ 4 περιέχει τους κόμβους του κοπτικού εργαλείου, οι οποίοι μπορούν να μετακινηθούν μόνο κατά τον άξονα X.

Περιορισμός	***X***	***Y***	***Z***	***RX***	***RY***	***RZ***
Σετ 1	✔	✔	✔	×	×	×
Σετ 2	✔	×	✔	×	×	×
Σετ 3	×	×	✔	×	×	×
Σετ 4	×	✔	✔	✔	✔	✔

Πίνακας 4.3: Βαθμοί ελευθερίας ανά σετ κόμβων.

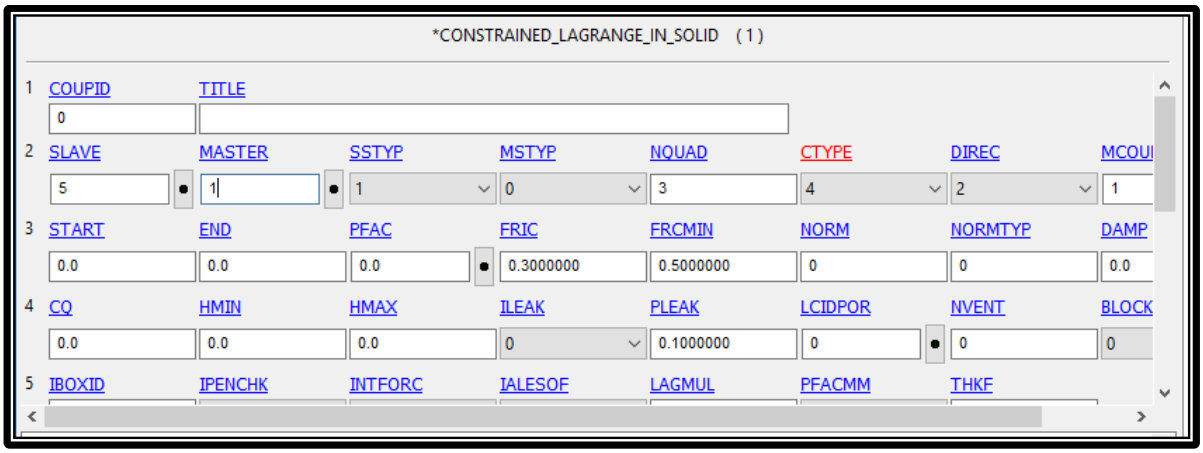


Εικόνα 4.68: Ενότητα BOUNDARY.



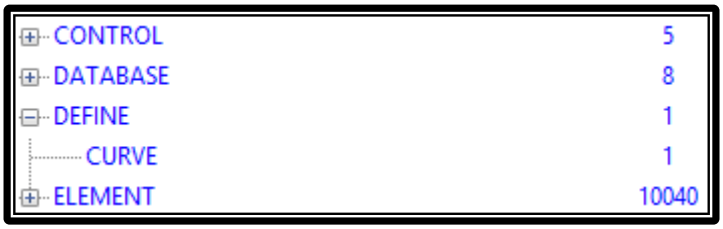
Εικόνα 4.69: Σετ κόμβων.

Στην εικόνα 4.70 απεικονίζεται η καρτέλα που χρησιμοποιείται για την ALE μέθοδο, όταν έρχεται σε επαφή το κοπτικό με το τεμάχιο προς κατεργασία και το κενό. Επιλύεται κατάλληλος ALE αλγόριθμος διεπαφής που θεωρεί το κοπτικό ως slave και το υπό κατεργασία τεμάχιο μαζί με το κενό ως master.



Εικόνα 4.70: Καρτέλα Constrained Lagrange_in_Solid.

Επιπρόσθετα, μια από τις παραμέτρους που θα πρέπει ακόμη να οριστεί είναι η ταχύτητα κοπής του κοπτικού εργαλείου, η τιμή της οποίας είναι $V_1 = 250\ m/min$. Η ταχύτητα κοπής καθορίζεται μέσω της ενότητας DEFINE (Εικόνα 4.71), στην καρτέλα CURVE.



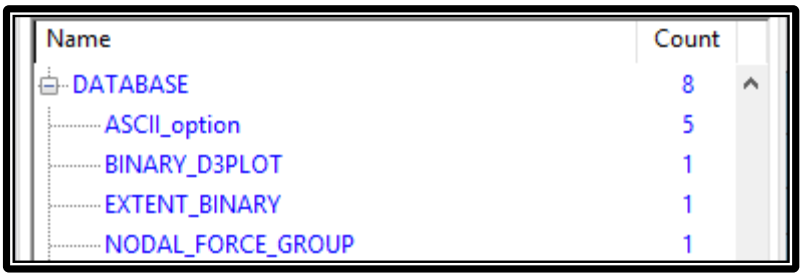
Εικόνα 4.71: Προσδιορισμός ταχύτητα κοπής.

Αφού ολοκληρώθηκε η παραμετροποίηση του μοντέλου με τη χρήση του προγράμματος Ls-Dyna, δημιουργούνται άλλα δύο k-file για το ίδιο μοντέλο αλλάζοντας μόνο την παράμετρο της ταχύτητας κοπής του κοπτικού εργαλείου. Οι νέες ταχύτητες έχουν τις τιμές $V_2 = 200\ m/min$, $V_3 = 150\ m/min$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. Επίλυση και αποτελέσματα προσομοιώσεων ALE

Μετά την ολοκλήρωση της παραμετροποίησης και πριν την επίλυση, ορίζεται το είδος των αποτελεσμάτων που θα εξαχθούν κατά την επίλυση του προβλήματος. Στο στάδιο της προ-επεξεργασίας (Pre-processing) στο Ls-Dyna ορίζονται στη DATABASE (Εικόνα 5.1) παράμετροι για τις ASCII_options και BINARY_D3PLOT. Συγκεκριμένα, στο ASCII_option, ορίζεται το GLSTAT με χρονικό βήμα DT = 1e-006 sec για την καταγραφή της ολικής ενέργειας και το RCFORC με DT= 5e-007 sec για την καταγραφή των δυνάμεων αντίδρασης εργαλείου-τεμαχίου της κοπής. Στη συνέχεια ορίζεται το BINARY_D3PLOT με DT=1.000e-007 sec για το χρονικό βήμα της επίλυσης και τέλος στην CONTROL_TERMINATION καθορίζεται ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος (~ 1 ms).



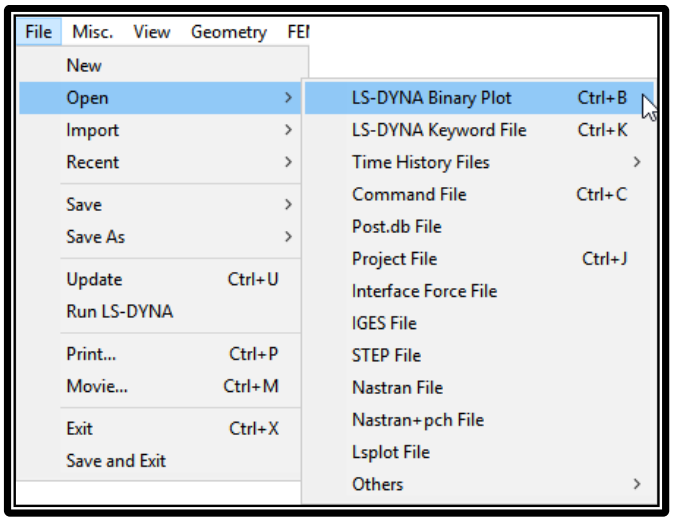
Name	Count
DATABASE	8
ASCII_option	5
BINARY_D3PLOT	1
EXTENT_BINARY	1
NODAL_FORCE_GROUP	1

Εικόνα 5.1: Ορισμός εξαγόμενων αποτελεσμάτων.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται το στάδιο της μετά-επεξεργασίας και τα αποτελέσματα για πλαστικές παραμορφώσεις και Von Mises τάσεις του μοντέλου, με ταχύτητα κοπής $V_1 = 250$ m/min, καθώς επίσης και αντίστοιχα αποτελέσματα για τα μοντέλα με ταχύτητες κοπής $V_2 = 200$ m/min, και $V_3 = 150$ m/min, όλα για σταθερή πρόωση 0.15 mm/rev. Τέλος, παρουσιάζεται ένα διάγραμμα με τις μέσες δυνάμεις κοπής Fc που υπολογίζονται από τη Multi-Material ALE προσέγγιση.

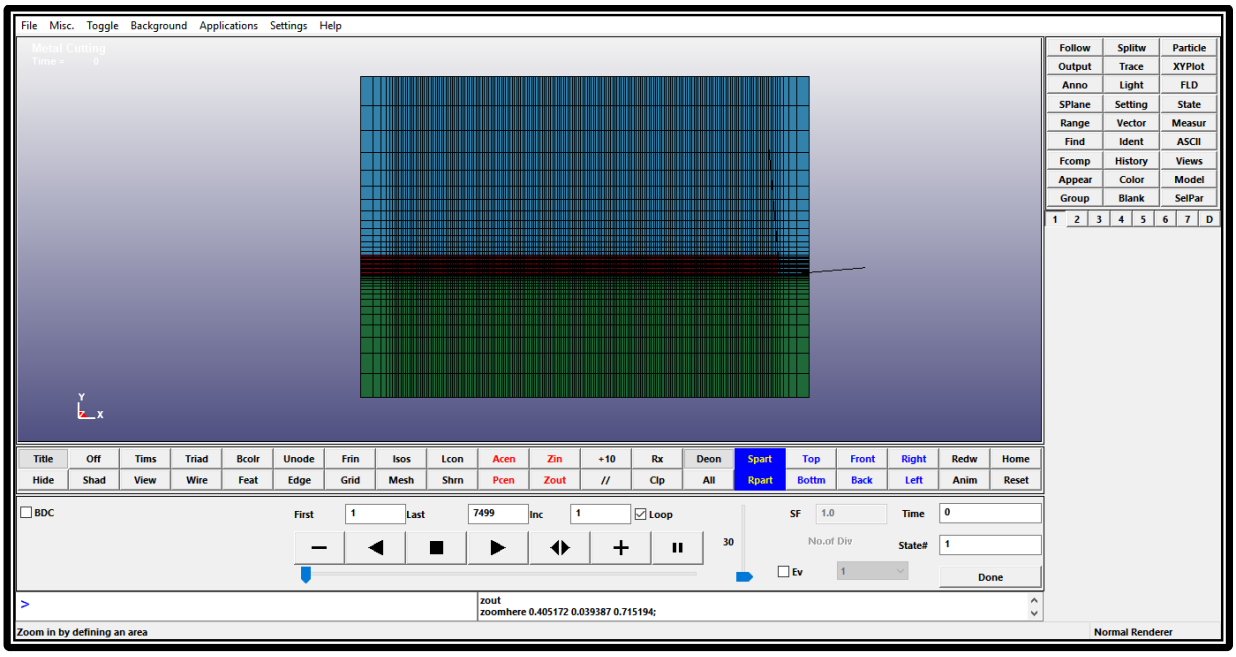
5.1 Μετα-επεξεργασία (Post-processing)

Η διαδικασία της μετα-επεξεργασίας (Post-processing) γίνεται μέσω του προγράμματος Ls PrePost. Αρχικά εισάγονται τα δεδομένα που εξήγαγε ο επιλύτης του Ls-Dyna, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής: *File→Open→ LS − DYNA Binary Plot*



Εικόνα 5.2: Εισαγωγή αποτελεσμάτων στο Ls-PrePost.

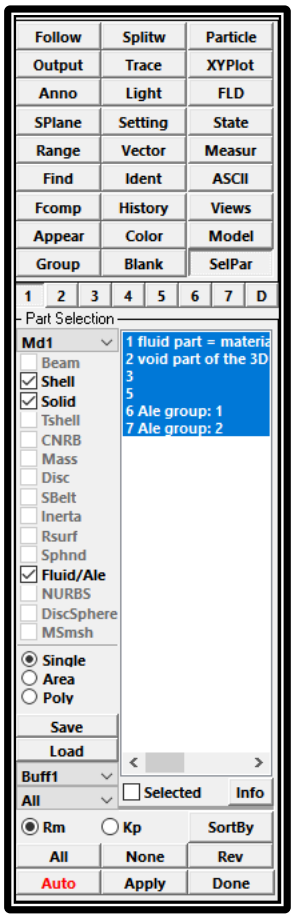
Η αρχική εικόνα του περιβάλλοντος μετά την εισαγωγή των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.3. Στο δεξί μέρος του παραθύρου, εμφανίζεται το *Main Button Menu* μέσω του οποίου γίνεται η διαχείριση εμφάνισης των αποτελεσμάτων.



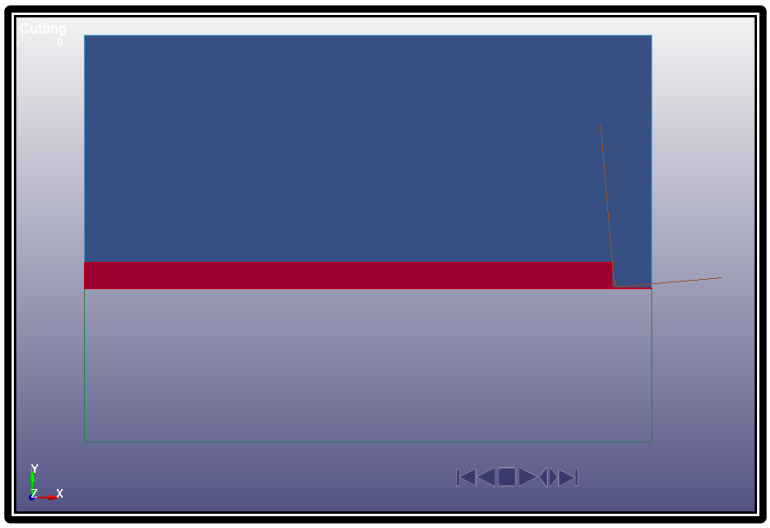
Εικόνα 5.3: Το γραφικό περιβάλλον του Ls-Dyna μετά την εισαγωγή των αποτελεσμάτων.

Αρχικά εμφανίζεται στην Εικόνα 5.4 το μενού επιλογής των Parts *SelPar* και στην Εικόνα 5.5, παρουσιάζονται στο γραφικό περιβάλλον δύο επιλεγμένα Parts του μοντέλου. Επιλέγοντας από το μενού την εντολή Fluid/Ale εμφανίζονται τα Parts, που συμμετέχουν στην Multi-

Material ALE προσέγγιση, στο γραφικό περιβάλλον για χρόνο 0 ms. Τα βήματα είναι τα εξής: *Main Button Menu* → *SelPar* → *Fluid/Ale*

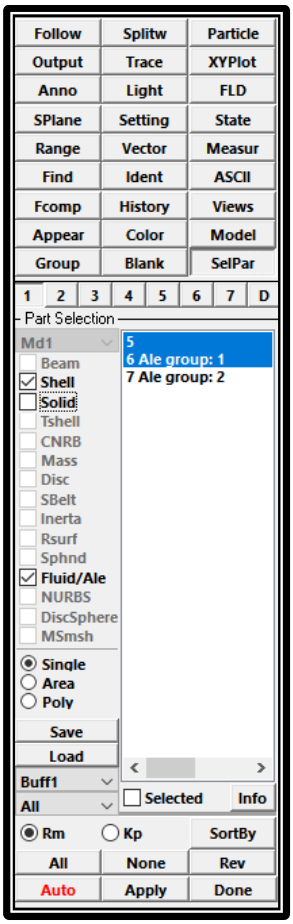


Εικόνα 5.4: Εμφάνιση Parts ALE από το *Main Button Menu*.

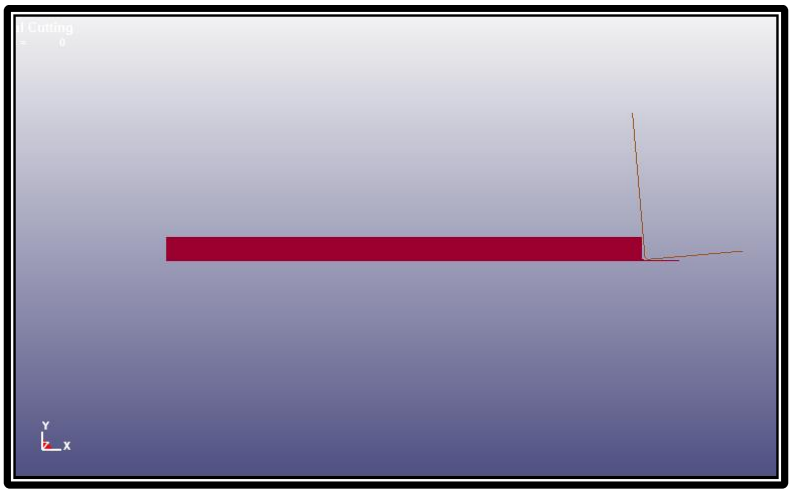


Εικόνα 5.5: Εμφάνιση Parts που συμμετέχουν στην διαδικασία του ALE.

Στη συνέχεια επιλέγεται από το μενού του *SelPar* να εμφανιστούν τα τμήματα με τα στοιχεία Shell και Fluid/Ale. Τα στοιχεία Shell περιέχουν μόνο το τμήμα του κοπτικού εργαλείου, ενώ τα στοιχεία του Fluid/Ale, περιέχουν δύο γκρουπ, εκ των οποίων το ένα είναι το κομμάτι προς κατεργασία και το άλλο είναι το κενό. Στις Εικόνες 5.6 και 5.7 εμφανίζεται η επιλογή του κοπτικού εργαλείου και το κομμάτι ALE προς κατεργασία για χρόνο 0 ms.

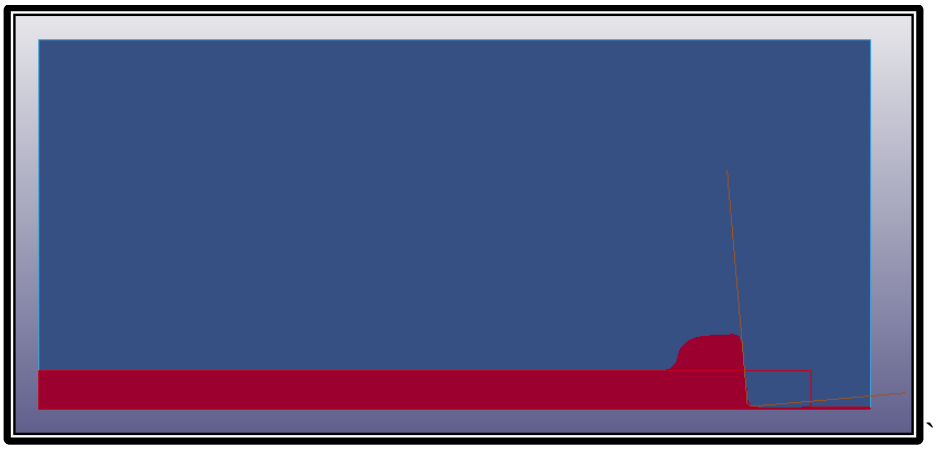


Εικόνα 5.6: Επιλογή Part 5 και Ale group 1.



Εικόνα 5.7: Εμφάνιση κοπτικού εργαλείου και Ale group 1, (τεμάχιο προς κατεργασία).

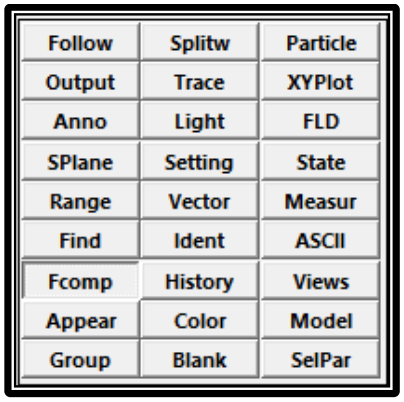
Τέλος στην Εικόνα 5.8 εμφανίζεται ενδεικτικό αποτέλεσμα για τυχαίο χρόνο προσομοίωσης κοπής των ALE Parts και του κοπτικού εργαλείου.



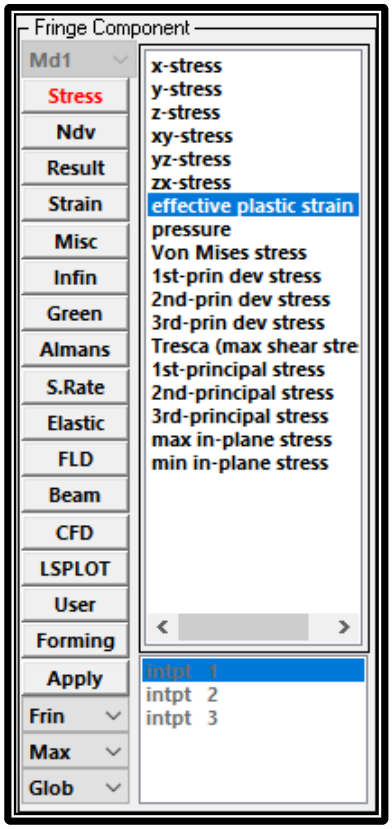
Εικόνα 5.8: Εμφάνιση ALE Parts και κοπτικού εργαλείου σε τυχαίο χρόνο.

5.2 Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων

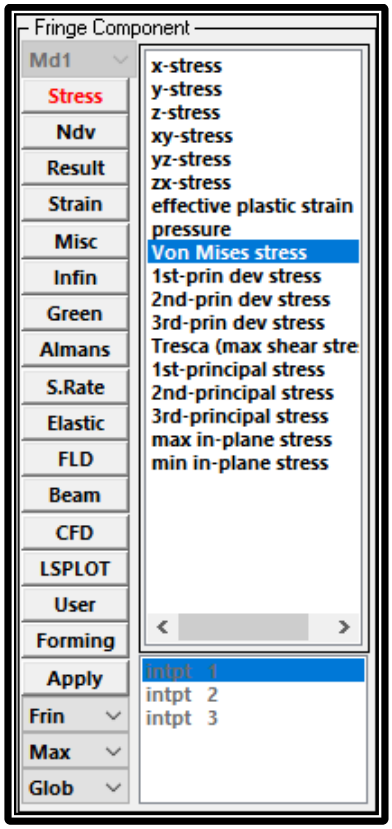
Παρουσιάζονται και σχολιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα για το μοντέλο προσομοίωσης με ταχύτητα $V_1 = 250\ m/min$ και για πρόωση 0.15 mm/rev. Για την εμφάνιση των επιθυμητών αποτελεσμάτων στο γραφικό περιβάλλον του Ls-PrePost, επιλέγεται από το *Main Button Menu*, η καρτέλα του *Fringe Component*, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.9. Στη συνέχεια από το μενού επιλογών που εμφανίζεται, επιλέγεται από τη καρτέλα του *Stress* το Effective plastic strain (Εικόνα 5.10) για τα αποτελέσματα που αφορούν τις πλαστικές παραμορφώσεις του μοντέλου και το *Von Mises stress* (Εικόνα 5.11) για τις *Von Mises* τάσεις.



Εικόνα 5.9: Fringe Component.

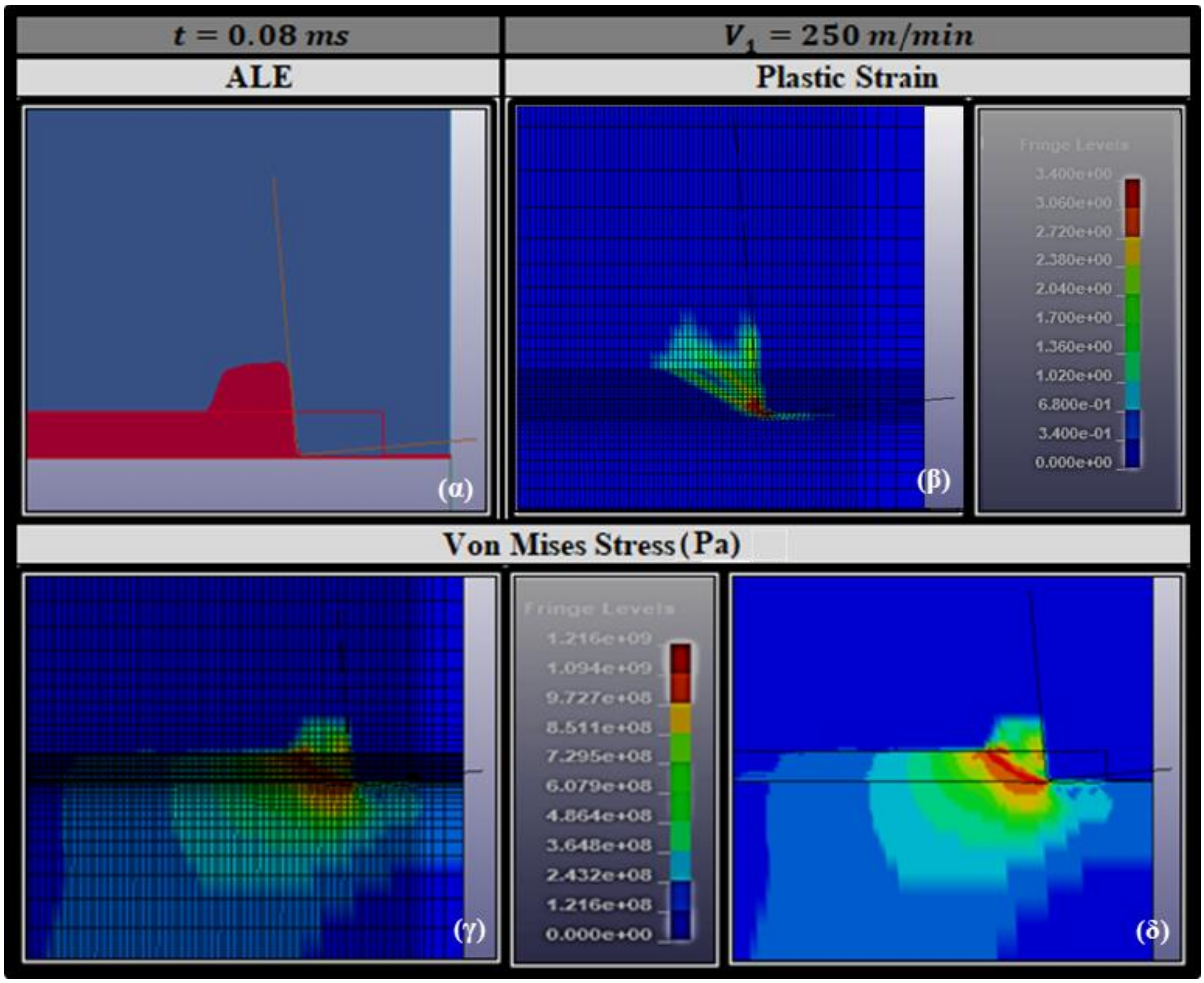


Εικόνα 5.10: Effective plastic strain.



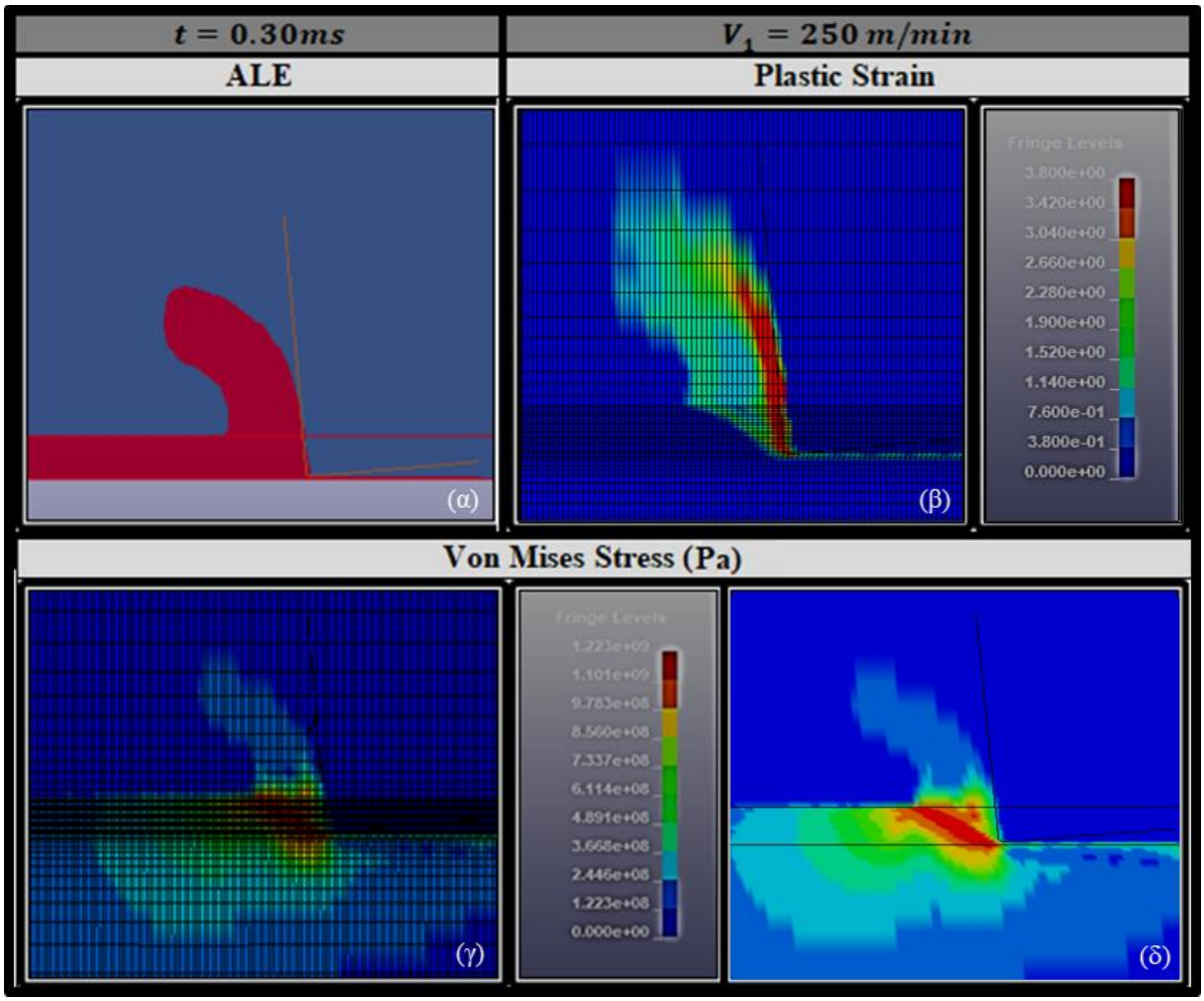
Εικόνα 5.11: Von Mises stress.

Στις Εικόνες 5.12-5.14 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα για το μοντέλο με ταχύτητα κοπής $V_1 = 250\ m/min$ για τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές προσομοίωσης της κοπής. Συγκεκριμένα απεικονίζονται τα αποτελέσματα των πλαστικών παραμορφώσεων και των Von Mises τάσεων, με και χωρίς, πλέγμα για το πέρας του χρόνου, όπως επίσης και η σταδιακή δημιουργία του αποβλήτου μέσω της Multi-material ALE απεικόνισης της κοπής.



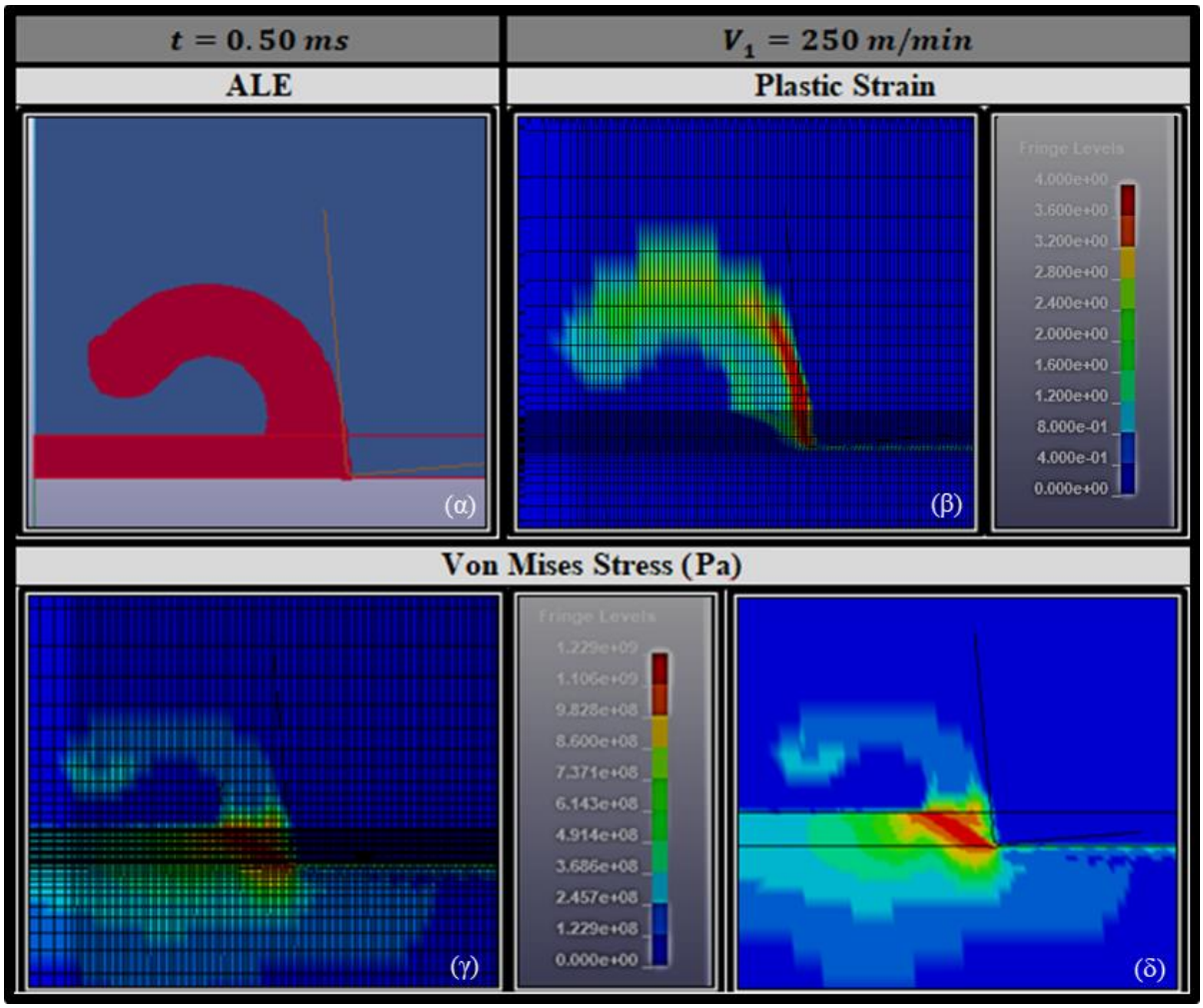
Εικόνα 5.12: α) ALE απεικόνιση της κοπής, β) Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων, γ) Κατανομή Von Mises τάσεων, δ) Απεικόνιση κατανομής Von Mises τάσεων χωρίς την εμφάνιση πλέγματος τη χρονική στιγμή 0.08 ms από την έναρξη της κοπής και για ταχύτητα κοπής 250 m/min.

Στην Εικόνα 5.12 παρουσιάζεται το 1^{ο} σετ αποτελεσμάτων για χρόνο 0.08 ms, όπου παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή των Von Mises τάσεων κυμαίνεται στα 1.216 GPa, ενώ η μέγιστη τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης κυμαίνεται στα 3.4 strain. Επίσης στα 0.08 ms παρατηρείται η αρχή της δημιουργίας του αποβλήτου από την ALE απεικόνιση.



Εικόνα 5.13: α) ALE απεικόνιση της κοπής, β) Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων, γ) Κατανομή Von Mises τάσεων, δ) Απεικόνιση κατανομής Von Mises τάσεων χωρίς την εμφάνιση πλέγματος τη χρονική στιγμή 0.30 ms από την έναρξη της κοπής και για ταχύτητα κοπής 250 m/min.

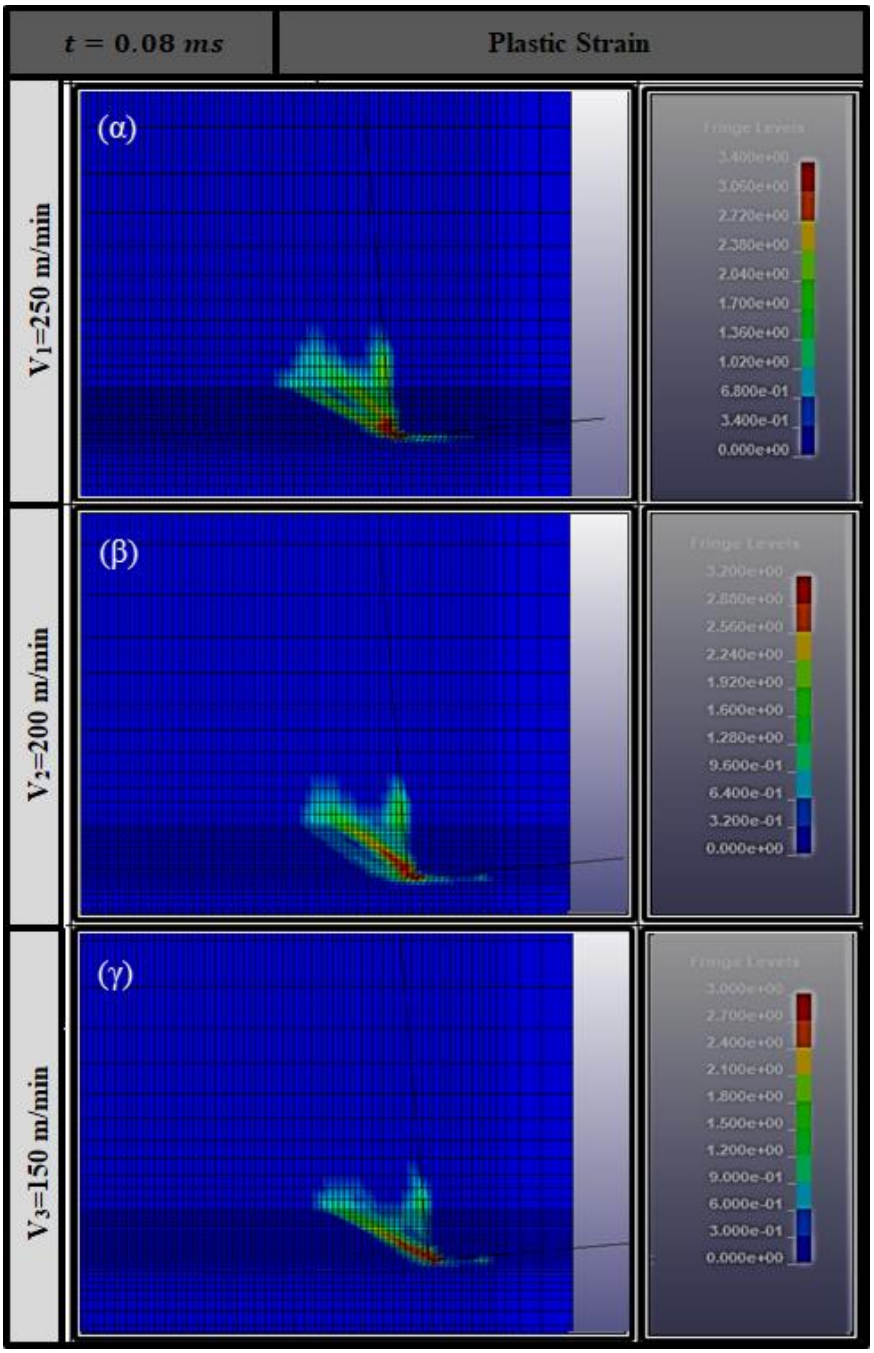
Εν συνεχεία, παρουσιάζεται το 2^{ο} σετ αποτελεσμάτων (Εικόνα 5.13) για χρόνο 0.30 ms. Συγκρινόμενο με το 1^{ο} σετ αποτελεσμάτων παρατηρείται αμελητέα αύξηση στη τιμή των Von Mises τάσεων, η οποία κυμαίνεται στα 1.223 GPa, καθώς επίσης και μια μικρή αύξηση στην τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης στα 3.8 strain. Το απόβλητο, βάση της ALE απεικόνισης, εμφανίζεται με συνεχή ομαλή γεωμετρία.



Εικόνα 5.14: α) ALE απεικόνιση της κοπής, β) Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων, γ) Κατανομή Von Mises τάσεων, δ) Απεικόνιση κατανομής Von Mises τάσεων χωρίς την εμφάνιση πλέγματος για τη χρονική στιγμή 0.50 ms από την έναρξη της κοπής και για ταχύτητα κοπής 250 m/min.

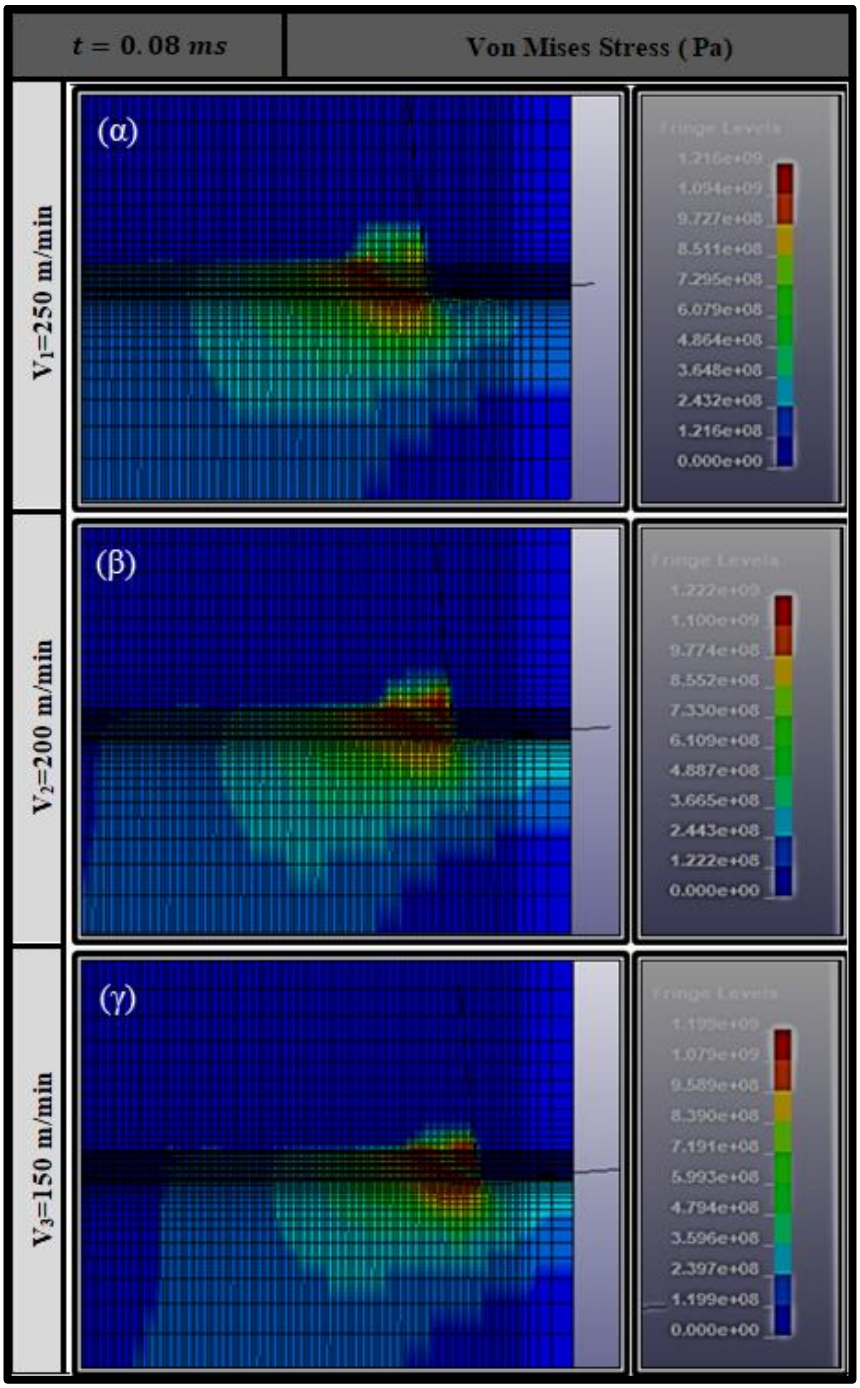
Τέλος, το 3° σετ αποτελεσμάτων για ταχύτητα κοπής $V_1 = 250\ m/min$ και χρόνο 0.50 ms, παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.14. Συγκρινόμενο με το προηγούμενο σετ αποτελεσμάτων, παρατηρείται μια επίσης αμελητέα αύξηση της τιμής των Von Mises τάσεων, η οποία κυμαίνεται στα 1.229 GPa. Αύξηση στην τιμή παρατηρείται και στην περίπτωση της πλαστικής παραμόρφωσης στα 4 strain. Όσον αφορά την ALE απεικόνιση, παρατηρείται η δημιουργία συνεχούς αποβλήτου, ενώ η κατεργαζόμενη επιφάνεια προσεγγίζεται ικανοποιητικά με το πέρας του χρόνου.

Στη συνέχεια παρατίθενται συγκριτικά αποτελέσματα που αφορούν τις πλαστικές παραμορφώσεις και τις Von Mises τάσεις για τα μοντέλα με τις τρεις διαφορετικές ταχύτητες κοπής $V_1 = 250\ m/min$, $V_2 = 200\ m/min$, και $V_3 = 150\ m/min$ για δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές προσομοίωσης κοπής.



Εικόνα 5.15: Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων α) για ταχύτητα κοπής 250 m/min, β) για ταχύτητα κοπής 200 m/min, γ) για ταχύτητα κοπής 150 m/min, για χρόνο 0.08 ms.

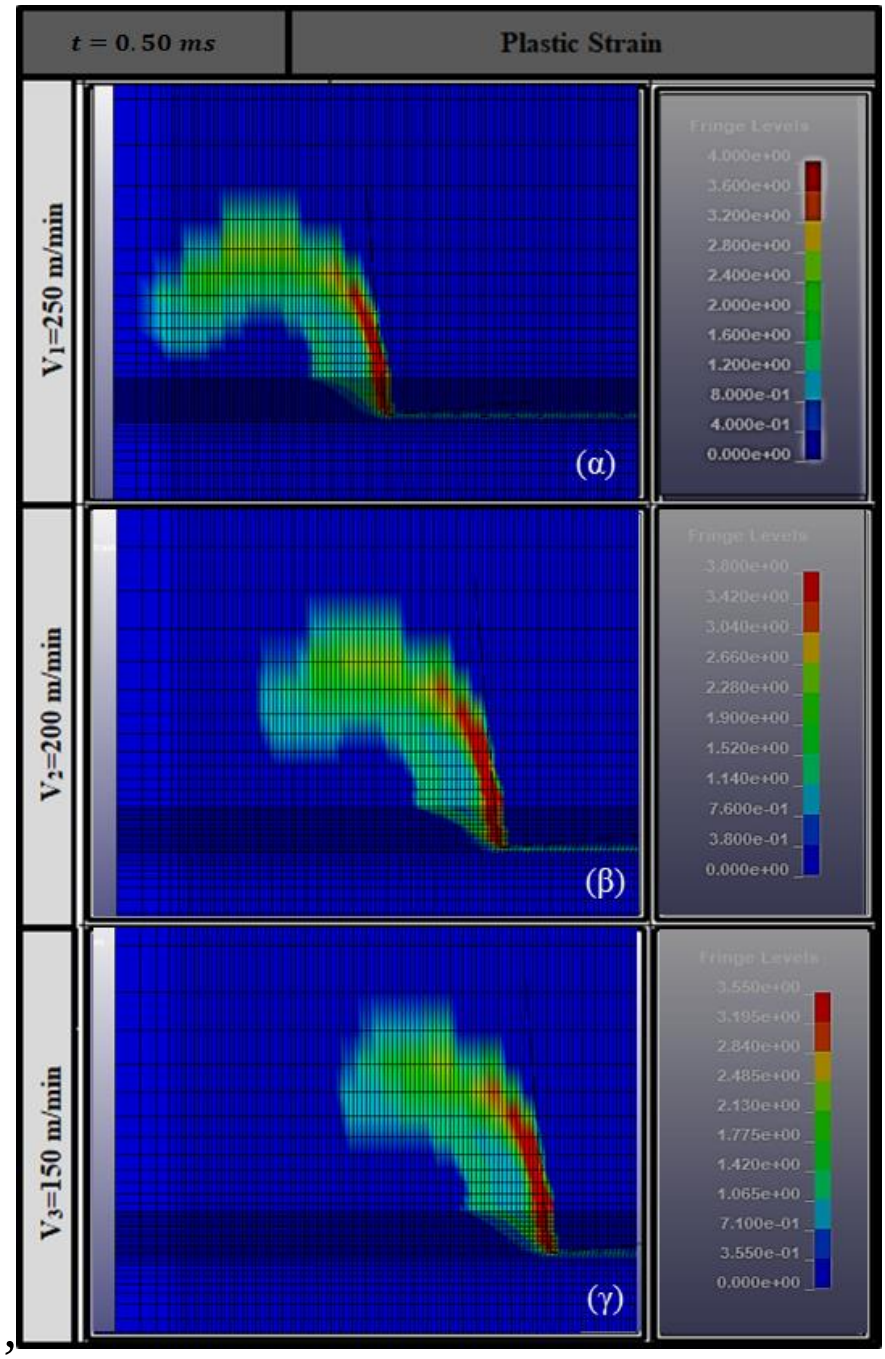
Στην Εικόνα 5.15, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πλαστικών παραμορφώσεων των τριών μοντέλων για χρόνο 0.08 ms. Οι μέγιστες τιμές παραμορφώσεων για τα μοντέλα με τις τρεις διαφορετικές ταχύτητες κοπής, βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους.



Εικόνα 5.16: Απεικόνιση κατανομής Von Mises τάσεων α) για ταχύτητα κοπής 250 m/min, β) για ταχύτητα κοπής 200 m/min, γ) για ταχύτητα κοπής 150 m/min, για χρόνο 0.08 ms.

Αντίστοιχα, στην Εικόνα 5.16, εμφανίζονται τα αποτελέσματα των Von Mises τάσεων, για τον ίδιο χρόνο, όπου παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές και για τρία μοντέλα κυμαίνονται στο εύρος των (1.199-1.222) GPa. Τέλος, λόγω της διαφορετικής ταχύτητας των τριών μοντέλων παρατηρείται, όπως αναμένεται, ότι για συγκεκριμένο χρόνο προσομοίωσης, το μοντέλο με τη

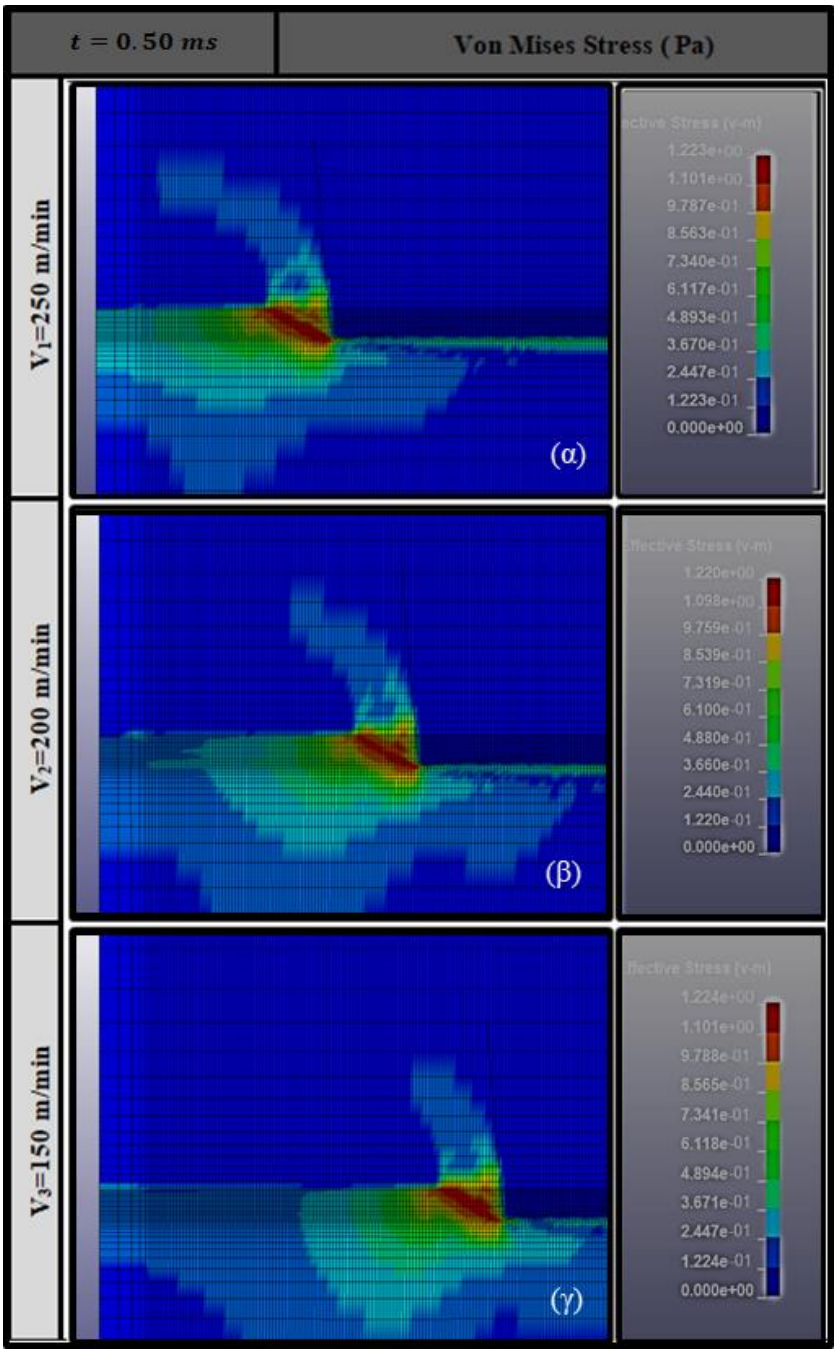
μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής, έχει διανύσει μεγαλύτερη απόσταση σε σχέση με το μοντέλο μικρότερης ταχύτητας κοπής.



Εικόνα 5.17: Κατανομή πλαστικών παραμορφώσεων α) για ταχύτητα κοπής 250 m/min, β) για ταχύτητα κοπής 200 m/min, γ) για ταχύτητα κοπής 150 m/min, για χρόνο 0.50 ms.

Στη συνέχεια, απεικονίζονται τα αποτελέσματα των πλαστικών παραμορφώσεων των τριών μοντέλων για χρόνο 0.50 ms (Εικόνα 5.17). Με το πέρας του χρόνου, παρατηρείται

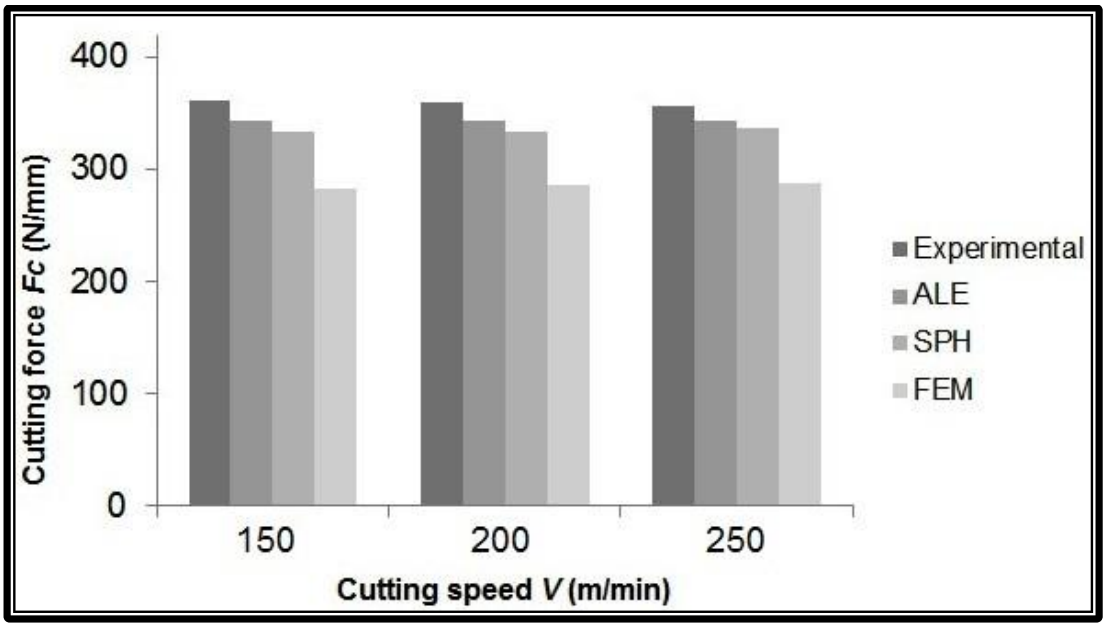
αύξηση στην μέγιστη τιμή πλαστικής παραμόρφωσης των τριών μοντέλων, όπου οι τιμές πλαστικής παραμόρφωσης κυμαίνονται από 3.55 έως 4.



Εικόνα 5.18: Απεικόνιση κατανομής Von Mises τάσεων α) για ταχύτητα κοπής 250 m/min, β) για ταχύτητα κοπής 200 m/min, γ) για ταχύτητα κοπής 150 m/min, για χρόνο 0.50 ms.

Τέλος, στην Εικόνα 5.18, εμφανίζονται τα αποτελέσματα των Von Mises τάσεων των τριών μοντέλων για χρόνο 0.50 ms. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν για τις μέγιστες τιμές των Von Mises τάσεων για χρόνο 0.50 ms σε σχέση με τα αποτελέσματα των Von Mises

τάσεων για χρόνο 0.08 ms, είναι ότι η διαφορά τους είναι αμελητέα, αφού η μέγιστη τιμή και στα τρία μοντέλα είναι περίπου 1.220 GPa.



Εικόνα 5.19: Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων της δύναμης κοπής *Fc* για ταχύτητες κοπής *V*=150, 200 και 250 m/min και για πρόωση *f*=0.15 mm/rev [16]

Στην Εικόνα 5.19 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα της δύναμης κοπής *Fc* , που ασκείται κατά μήκος της διεύθυνσης κίνησης του κοπτικού εργαλείου, συγκρινόμενα με πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Παρατηρούμε ότι οι μέσες δυνάμεις κοπής F_c που υπολογίζονται από τη Multi-Material ALE προσέγγιση είναι 5-6% μικρότερες από τις πειραματικές. Αναφορικά με τις μέσες κάθετες στο διάνυσμα ταχύτητας δυνάμεις F_t (truss forces) που υπολογίζονται από την ALE προσέγγιση αυτές είναι 12-14% μικρότερες από τις πειραματικές τιμές. Παράλληλα τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται με FEM και Smooth Particle Hydrodynamics - SPH προσομοιώσεις [16][20].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα

Τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα πτυχιακή εργασία, για την προσομοίωση ορθογωνικής κοπής, σε κατεργασία τόρνευσης με FEM και συγκεκριμένα με την προσέγγιση ALE, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στα μέρη της προ- και μετα- επεξεργασίας αλλά και των αποτελεσμάτων ώστε να οδηγήσουν σε ασφαλείς μελλοντικές επιλογές και διαδικασίες με τη χρήση της μεθόδου.

Στο στάδιο της προ-επεξεργασίας, η ειδική εργασία που απαιτείται για την κατασκευή του Vacuum Part στο μοντέλο, αποτελεί μεγάλο μειονέκτημα της προσέγγισης του προβλήματος με την Multi-Material ALE. Η μοντελοποίηση καθώς και η τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου στην προσομοίωση ALE, αποτελούν μια επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία σε σχέση με τις άλλες μεθόδους (πχ Lagrangian, Eulerian καθολικές). Στα μειονεκτήματα της μεθόδου δεν θα μπορούσε να παραληφθεί η πολυπλοκότητα ανάπτυξης της καθολικής προσομοίωσης, λόγω της συσχέτισης δύο διαφορετικών τεχνικών (Lagrangian-Eulerian) τόσο στο χωρικό πλαίσιο επίλυσης όσο και στο συσχετισμένο χρονικό.

Παρόλα αυτά τα μειονεκτήματα τις προ-επεξεργασίας, η μέθοδος ALE εμφανίζει μεγάλα πλεονεκτήματα, ειδικά στην μετα-επεξεργασία αλλά και την ακρίβεια και ποιότητα των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ελαχιστοποίηση των προβλημάτων που δημιουργούνται από στρεβλώσεις του πλέγματος (mesh distortions) και αποφυγή δημιουργιών αριθμητικών ιδιομορφιών (singularities). Επίσης παρατηρείται, καλύτερη προσέγγιση γένεσης και εξέλιξης της γεωμετρίας καθώς και της μορφής του αποβλήτου καθώς η ροή του Lagragian πλέγματος στο Eulerian γίνεται ομαλά και αυτο-προσδιορισμένα με στόχο και αποτέλεσμα τη βέλτιστη προσομοίωση της κίνησης του αποβλήτου. Επίσης, αποδίδεται ικανοποιητικά η κατεργασμένη επιφάνεια του μοντέλου. Τέλος οι μέσες δυνάμεις κοπής της μεθόδου ALE, προσεγγίζουν καλύτερα τις μέσες δυνάμεις των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Τα παραπάνω αναδεικνύουν την ALE ως βέλτιστο εργαλείο προσομοίωσης ορθογωνικών κοπών, με μόνο μειονέκτημα τις μεγάλες απαιτήσεις και δυσκολίες ανάπτυξης του μοντέλου, αλλά με ουσιαστικό όφελος τη μεγάλη ακρίβεια και πιστότητα της προσομοίωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Βιβλιογραφία

[1] Μηχανουργική Τεχνολογία Ι (Κατεργασίες Κοπής)-Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών Και Εκδόσεων «Διόφαντος», Αθήνα.

[2] ΤΕΙ Κρήτης. Εργαστήριο Προσομοιώσεων & Μηχανολογικών Κατασκευών - SMM, Σημειώσεις Κατασκευαστικές Τεχνολογίες Θεωρία, Επ. Καθηγητής Δρ. Βασίλης Δημητρίου, Χανια 2016

[3] Κατεργασίες Μετάλλων-Ευρωπαϊκές Τεχνολογικές Εκδόσεις-Josef Dillinger, Αθήνα 2010.

[4] Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολογίας & Βιομηχανικού Σχεδιασμού, Σημειώσεις Μηχανολογικό Εργαστήριο ΙΙ.

[5] Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης. Εργαστήριο Προσομοιώσεων & Μηχανολογικών Κατασκευών - SMM, Σημειώσεις Κατασκευαστικές Τεχνολογίες Εργαστήριο, Καθηγητής Δρ. Βασίλης Δημητρίου, Παπαδουλής Θεόδωρος, **Βαριαντζά Ελένη**, Χανια 2016

[6] Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Καθηγητής Γεώργιος Χρυσολουρης, Σημειώσεις «Γεωμετρία Κοπτικών Εργαλείων», Πάτρα 2003.

[7]https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%AD%CE%B8%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CF%82_%CF%80%CE%B5%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%B1%CF%83%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CF%89%CE%BD_%CF%83%CF%84%CE%BF%CE%B9%CF%87%CE%B5%CE%AF%CF%89%CE%BD, last visited: 15 Jan 2018

[8] Πεπερασμένα Στοιχεία –Δρ Πασχάλης Κ. Γκότσης-Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Σέρρες 2004.

[9] Υπολογιστικές Μέθοδοι και Εφαρμογές σε Λεπτότοιχες Κατασκευές – Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Τομέας Θαλασσίων Κατασκευών.

[10] Διπλωματική Εργασία -Θέμα Δυναμική Ανάλυση και Βελτιστοποίηση Βάσης Στήριξης Φωτοβολταϊκών Πάνελ- Ευαγγελάτου Χαρις- Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας-Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Κοζάνη 2014.

[11] Μεταπτυχιακή Εργασία, «Μοντελοποίηση θέσης και κίνησης μαγνητικού διπόλου με τεχνικές Μαγνητομετρίας», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Συστήματα Αυτοματισμού. Αικατερίνης Ε. Σκούτα, Αθήνα 2013

[12] Διπλωματική Εργασία, «Εμβιομηχανική Μελέτη Τάσεων Και Παραμορφώσεων Σε Μηριαίο Οστούν Φέροντος Ενδομυελικό Ηλο Τύπου Fi, Με Τη Μέθοδο Των Πεπερασμένων Στοιχείων», Κασελούρης Ευάγγελος , Αθήνα 2008.

[13] Overview of ALE Method-Ian Do, Jim Day- LS-DYNA ALE & Fluid- Structure Interaction Modeling.

[14] ALE Modeling of Surface Waves- AQUELET Nicolas- 6th European LS-DYNA Users' Conference, Livermore Software Technology Corporation 7374 Las Positas Road, Livermore, CA 94550, USA.

[15] Numerical modelling of partially filled aircraft fuel tanks submitted to Hydrodynamic Ram-D. Varas, R. Zaera, J. López-Puente, Department of Continuum Mechanics and Structural Analysis, University Carlos III of Madrid, Avda. de la Universidad, 30, 28911 Leganés, Madrid, Spain.

[16] Evaggelos Kaselouris, Theodoros Papadoulis, **Elenh Variantza**, Andreas Baroutsos and Vasilis Dimitriou, *"A Study of Explicit Numerical Simulations in Orthogonal Metal Cutting",* 9th International Congress on Precision Machining (ICPM 2017), Athens, Greece, 6-9 September 2017.

[17] Theodoros Papadoulis, **Eleni Variantza**, Evaggelos Kaselouris and Vasilis Dimitriou**,** "CAD/FEM SIMULATION OF THE GOVERNING MECHANICS OF DRY TURNING", 8th GRACM International Congress on Computational Mechanics Volos, 12 – 15 July, 2015

[18] M. Koliou, **E. Variantza,** E. Kaselouris, I. Papadopoulos and V. Dimitriou, "SEISMIC TESTING & DYNAMIC CHARACTER ANALYSIS OF HIGH-RISE BUILDING STRUCTURE IN CRETE BASED ON FEM",8th GRACM International Congress on Computational Mechanics Volos,12-15.7, 2015

[19] E. Kaselouris, T. Papadoulis, **E. Variantza**, A. Baroutsos and V. Dimitriou, "A Study of Explicit Numerical Simulations in Orthogonal Metal Cutting", Solid State Phenomena, Vol. 261, pp 339-346, 2017

[20] E. Kaselouris, T. Papadoulis, **E. Variantza**, A. Baroutsos and V. Dimitriou, "FEM. SPH & ALE Explicit Numerical Simulations in Orthogonal Metal Cutting", Machines, submitted 2018