

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΨΥΧΡΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕΣΩ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία Μιλτιάδη Σ. Λάσκαρη
Επιβλέπων: Γεώργιος Σταυρουλάκης

Χάνια , Ιούλιος 2015

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iv
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	
1.1 Ελαστοπλαστικότητα.....	1
1.2 Διαμόρφωση εν ψυχρώ.....	2
1.3 Πεπερασμένα στοιχεία.....	2
1.4 Τάσεις Von Mises	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	
2.1 Βάση.....	4
2.2 Εργαλείο Κατεργασίας.....	6
2.3 Μεταλλικό Φύλλο	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	
3.1 Συναρμολόγηση του μοντέλου και τοποθέτηση του στο χώρο.	9
3.2 Ορισμός ιδιοτήτων υλικών και συσχετισμός του με τα κομμάτια του μοντέλου....	10
3.3 Σχέσεις μεταξύ επιφανειών του μοντέλου.....	11
3.4 Μέθοδος επίλυσης του προβλήματος και χρονική παραμετροποίησης της προσομοίωσης	11
3.5 Περιορισμοί μοντέλου.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΤΑΔΙΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ SPRINGBACK	
4.1 Πρώτο στάδιο διαμόρφωσης	16
4.2 Δεύτερο στάδιο διαμόρφωσης.....	18
4.3 Τρίτο στάδιο διαμόρφωσης	20
4.4 Τέταρτο στάδιο διαμόρφωσης.....	22
4.5 Πέμπτο στάδιο διαμόρφωσης.....	23
4.6 Springback.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	31

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σε αυτή τη διπλωματική μελετήθηκε η προσομοίωση ψυχρής διαμόρφωσης μετάλλων μέσω πεπερασμένων στοιχείων. Στόχος ήταν η διαμόρφωση ενός φύλλου ασημιού, η προσπάθεια να αποτυπωθεί ένα σχέδιο σε αυτό, και επιδίωξη μας ήταν να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του ελαστοπλαστικού υλικού του σε κάθε στάδιο διαμόρφωσης. Το σχέδιο που επιλέχτηκε και υλοποιήθηκε ήταν ένα πλοίο.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφερόμαστε στο θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήσαμε.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύουμε τη διαδικασία σχεδίασης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μοντέλου που προσομοιώσαμε.

Στο τρίτο κεφάλαιο παραθέτουμε τη προετοιμασία των προσομοιώσεων περιγράφοντας αναλυτικά τις προδιαγραφές που έπρεπε κάθε στάδιο προσομοίωσης να διατηρεί.

Στο τέταρτο κεφάλαιο απεικονίζουμε τα στάδια διαμόρφωσης και τα αποτελέσματα αυτών καθώς και το springback που εμφανίστηκε έπειτα από το τέλος της κατεργασίας.

Η διπλωματική εργασία μας κλείνει με το πέμπτο κεφάλαιο με τα βασικά συμπεράσματα μας και τις δυνατότητες μελλοντικής επέκτασης της εργασίας αυτής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους πίστεψαν σε εμένα και με βοήθησαν να ολοκληρώσω την εκπόνηση αυτής της εργασίας .

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω το κύριο Γεώργιο Σταυρουλάκη που ήταν ο επιβλέπων της εργασίας αυτής για τη πολύτιμη βοήθεια του, τη συμπαράσταση του ,την υπομονή του και τη καθοδήγηση που προσέφερε απλόχερα όλους αυτούς τους μήνες. Η συνεργασία μου μαζί του με προώθησε τόσο σαν επιστήμονα αλλά και σαν άνθρωπο.

Ευχαριστώ ακόμη τους φίλους μου που ήταν συμπαραστάτες σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα που πέρασα μαζί τους γιατί ήταν πάντα πάρων στο να δίνουν νέες οπτικές σε οτιδήποτε είχα ανάγκη να επικοινωνήσω και δημιουργήσαμε στιγμές που θα μας ακολουθούν για πάντα.

Τέλος οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου που δε σταμάτησε ποτέ να πιστεύει σε μένα και να με υποστηρίζει ανιδιοτελώς, παρέχοντας μου πάντα τις καλύτερες δυνατές συνθήκες σε όλους τους τομείς για να πετύχω τους στόχους μου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1.1 Ελαστοπλαστικότητα

Ελαστοπλαστικότητα είναι ο συνδυασμός της ελαστικής συμπεριφοράς και της πλαστικής συμπεριφοράς των υλικών. Η συμπεριφορά αυτή εμφανίζεται μετά το πέρας της διαδικασίας της φόρτισης κατά την οποία έχουμε ξεπεράσει το σημείο διαρροής του υλικού και έχουμε περάσει στη πλαστική περιοχή του. Κατά την αποφόρτιση γνωρίζουμε πως το υλικό επανέρχεται σε ένα βαθμό εξαιτίας της ελαστικής συμπεριφοράς του αλλά υπάρχει και μόνιμη παραμόρφωση εξαιτίας της υπέρβασης του ορίου διαρροής. Αυτή η ενδιάμεση κατάσταση ονομάζεται ελαστοπλαστικότητα.

Στα ελαστοπλαστικά μοντέλα οι υπολογισμοί των κατανομών της τάσης και της παραμόρφωσης σε μικρές τιμές της παραμόρφωσης υπολογίζονται με βάση την ελαστική παραμόρφωση η οποία είναι γραμμική. Η έναρξη της μη γραμμικότητας που οφείλεται στη πλαστική παραμόρφωση συμβαίνει όταν το επίπεδο της τάσης φτάσει στο όριο διαρροής του υλικού. Η επακόλουθη αύξηση της τάσης με τη παραμόρφωση συνδέεται με τα αποτελέσματα της ψυχρής κατεργασίας μετάλλων, και η αύξηση αυτή φτάνει σε ένα μέγιστο το οποίο αντιστοιχίζεται στη περιοχή ροής.

Η περιοχή αυτή είναι μη γραμμική και το σύνολο της παραμόρφωσης που εμφανίζεται κατά τη διαδικασία θεωρείται σαν το άθροισμα της ελαστικής παραμόρφωσης και της πλαστικής παραμόρφωσης. Οι υπολογισμοί για την ανάλυση των τάσεων στη συνέχεια περιλαμβάνουν τη χρήση πολυαξονικών κριτηρίων διαρροής και ενός νόμου ροής. Το κριτήριο διαρροής συσχετίζει τα στοιχεία της εφαρμοζόμενης τάσης με τις παραμέτρους του υλικού μετά την έναρξη της διαρροής.

Οι παράμετροι του υλικού εξαρτώνται από τη πλαστική παραμόρφωση ενώ υπόκειται σε εν ψυχρώ παραμόρφωση. Τέλος ο υπολογισμός των στοιχείων της πλαστικής παραμόρφωσης επιτυγχάνεται με τη θεωρία της πλαστικότητας χρησιμοποιώντας ένα κανόνα ροής, ο οποίος συσχετίζει την αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης με μια πιθανή πλαστική ροη.

1.2 Διαμόρφωση εν ψυχρώ

Οι μηχανικές διαμορφώσεις χωρίζονται σε εν θερμώ και εν ψυχρώ. Οι διαμορφώσεις που πραγματοποιούνται σε θερμοκρασία μικρότερη από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του υλικού ονομάζονται εν ψυχρώ.

Η εν ψυχρώ παραμόρφωση προτιμάται από την εν θερμώ εξ' αιτίας των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει:

- αύξηση της τελικής αντοχής και σκληρότητας του κομματιού,
- μεγαλύτερη διαστασιακή ακρίβεια,
- καλύτερη ποιότητα επιφάνειας του κομματιού, αφού δεν υπάρχει κίνδυνος επιφανειακών οξειδώσεων λόγω υψηλών θερμοκρασιών,
- ευκολότερος χειρισμός των κομματιών και μικρότερο κόστος κατασκευής εργαλείων.

1.3 Πεπερασμένα στοιχεία

Η αρχική διατύπωση της μεθόδου έγινε με βάση την μητρική ανάλυση, αργότερα όμως δόθηκε ευρύτερη και πιο θεμελιώδης θεωρητική βάση. Αρχικά θα θεωρήσουμε την μέθοδο ως επέκταση της μητρικής ανάλυσης στην ανάλυση των συνεχών μέσων (ελάσματα, κελύφη). Το χαρακτηριστικό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων για την προσομοίωση συνεχών μέσων.

Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι, όπως και στη μητρική ανάλυση, η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί φυσιολογική προσομοίωση των πλαισίων, 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 να 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.

Η μέθοδος αποτελεί πλέον ένα ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων του μηχανικού.

Οι ιδιότητες των υλικών και οι διέπουσες σχέσεις υπολογίζονται πάνω σε αυτά τα στοιχεία και εκφράζονται σε όρους των άγνωστων

τιμών στις γωνίες των στοιχείων. Μία διαδικασία σύνθεσης, η οποία καταλλήλως θεωρεί τα φορτία και τους περιορισμούς, έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο εξισώσεων. Η λύση αυτών των εξισώσεων δίνει την κατά προσέγγιση συμπεριφορά του συνεχούς. Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

- Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο

- Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται
- Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος.
- Όταν τελειώσει η επίλυση τα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται post processor (μετεπεξεργαστής), για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.

1.4 Τάσεις Von Mises

Οι τάσεις Von Mises χρησιμοποιούνται γενικά ως βάση για την δημιουργία μοντέλων αστοχίας, πλαστικοποίησης. Στην προκειμένη χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των περιοχών πιθανής αστοχίας και εισέρχονται και στην περιοχή μη γραμμικής ανάλυσης, για να μελετήσουμε παραπέρα αστοχία. Το σημαντικό είναι όμως πως οι τάσεις αυτές είναι ανεξάρτητες του τυχαία επιλεχθέντος συστήματος αναφοράς, κάτι που δεν συμβαίνει για τις τάσεις Σ_x , Σ_y , Σ_z , οπότε αναμένουμε τα αποτελέσματα να είναι ανεξάρτητα του συστήματος αναφοράς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

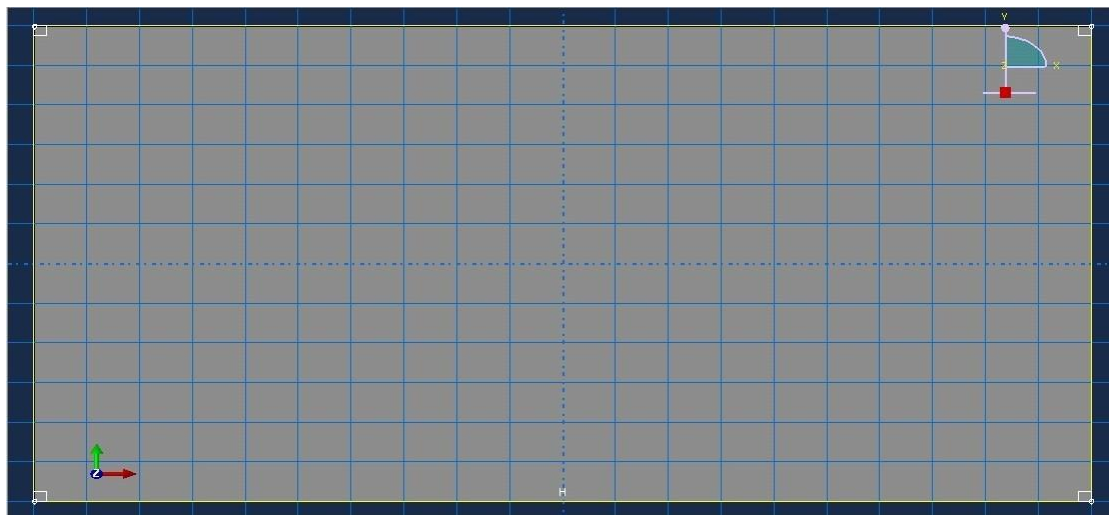
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το μοντέλο σχεδιάστηκε και μελετήθηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα στοιχεία που αποτέλεσαν το μοντέλο είναι μια μεταλλική βάση, ένα μεταλλικό φύλλο προς διαμόρφωση και το εργαλείο κατεργασίας.

Η σχεδίαση και διαστασιολόγηση του σχεδίου που θέλαμε να δώσουμε στο μεταλλικό φύλλο έγινε σε πρώτο στάδιο στο χαρτί και έπειτα σχεδιάστηκε στο περιβάλλον του προγράμματος. Η πηγή πληροφορίας των διαστάσεων ήταν η ερευνα μας στην αγορά για παρόμοια αντικείμενα. Ο λόγος του προσχεδιασμού σε χαρτί ήταν η ακριβής πληροφορία που παρέχει για τα σημεία από τα οποία το εργαλείο θα επεξεργαζόταν.

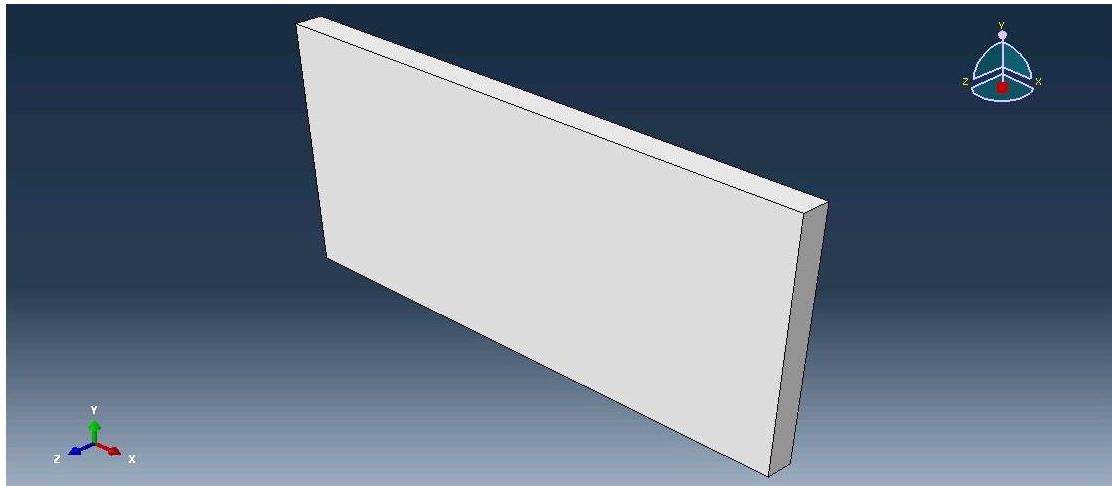
2.1 Βάση

Η βάση σχεδιάστηκε σαν ένα solid με σχήμα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο και διαστάσεις 100 mm πλάτος 60 mm μήκος.



Εικόνα 1: Σχέδιο Sketcher

Με την εντολή extrude από το πρόγραμμα της δώσαμε το πάχος των 5 mm και έτσι πήρε το τελικό σχήμα σε ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο.



Εικόνα 2: Extrude

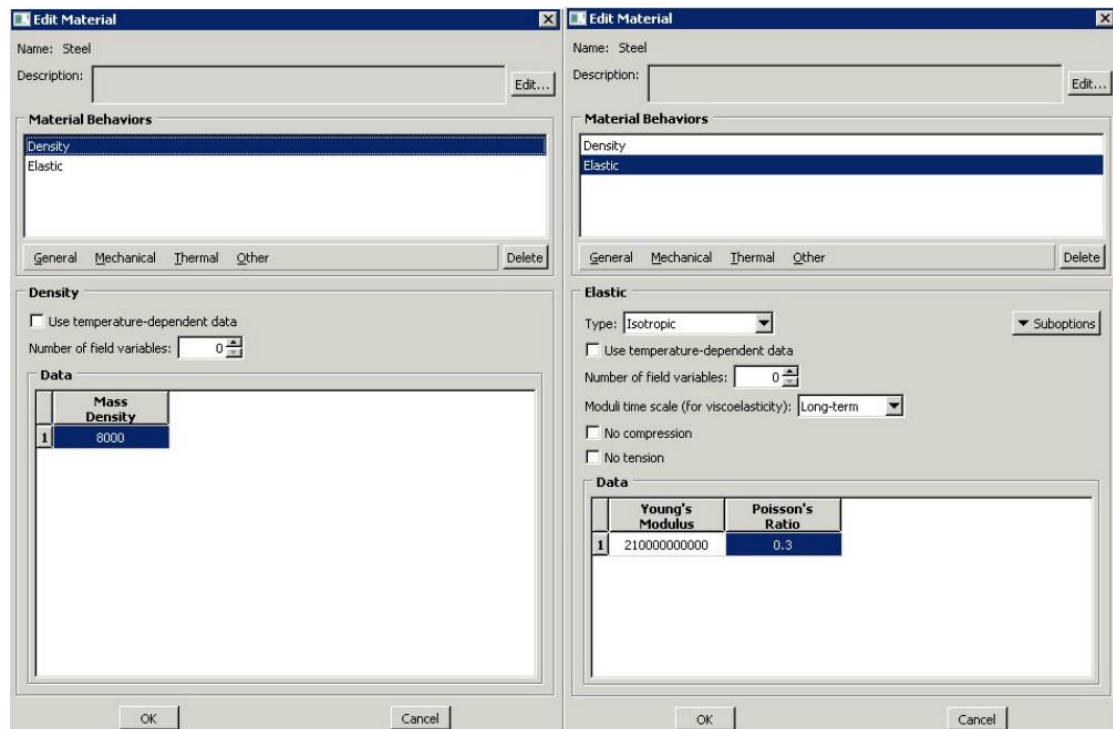
Για το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη η βάση επιλέξαμε το ατσάλι.

Τα χαρακτηριστικά του υλικού είναι:

πυκνότητα 8000 kg/m^3 ,

μέτρο ελαστικότητας 210 GPa

και ο λόγος του Poisson είναι $0,3$



Εικόνα 3: Πυκνότητα και ελαστικές ιδιότητες

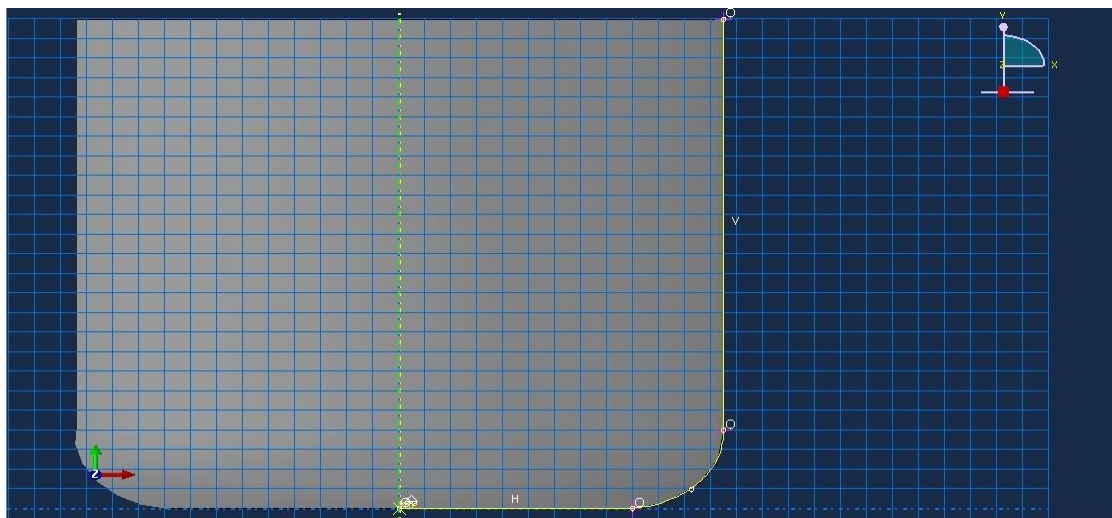
2.2 Εργαλείο Κατεργασίας

Το εργαλείο κατεργασίας σχεδιάστηκε σαν ένα rigid shell με το σχήμα του να προέρχεται από μια οριζόντια γραμμή και μια κάθετη γραμμή ενωμένες από ένα τόξο στο δυσδιάστατο επίπεδο. Οι διαστάσεις το εργαλείου είναι :

ύψος 2,5 mm,

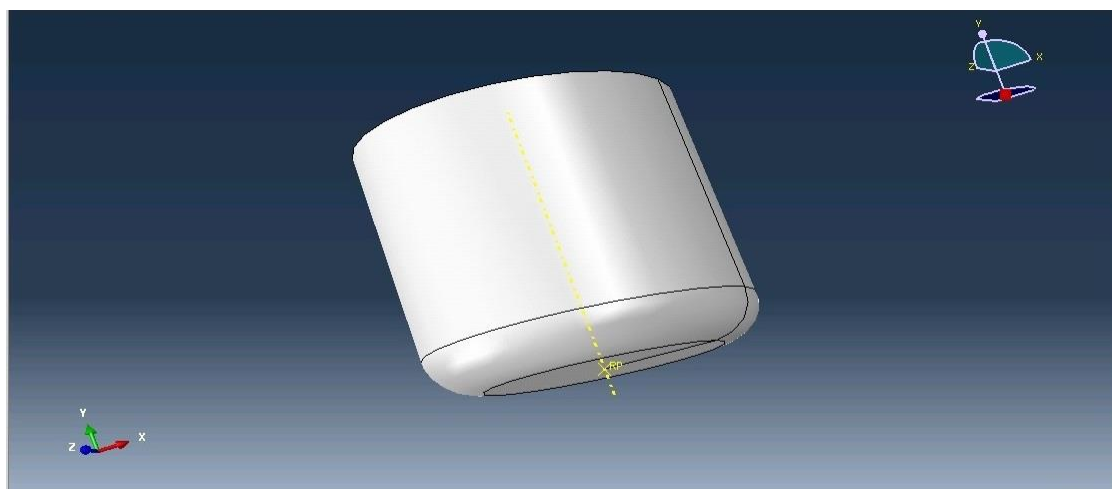
διάμετρος 5 mm

μάζα 0,5 kg



Εικόνα 4: Σχέδιο Sketcher

Έπειτα με την εντολή revolve πετύχαμε το κυλινδρικό σχήμα που θέλαμε να δώσουμε με στρογγυλεμένη την ακμή του κύκλου.

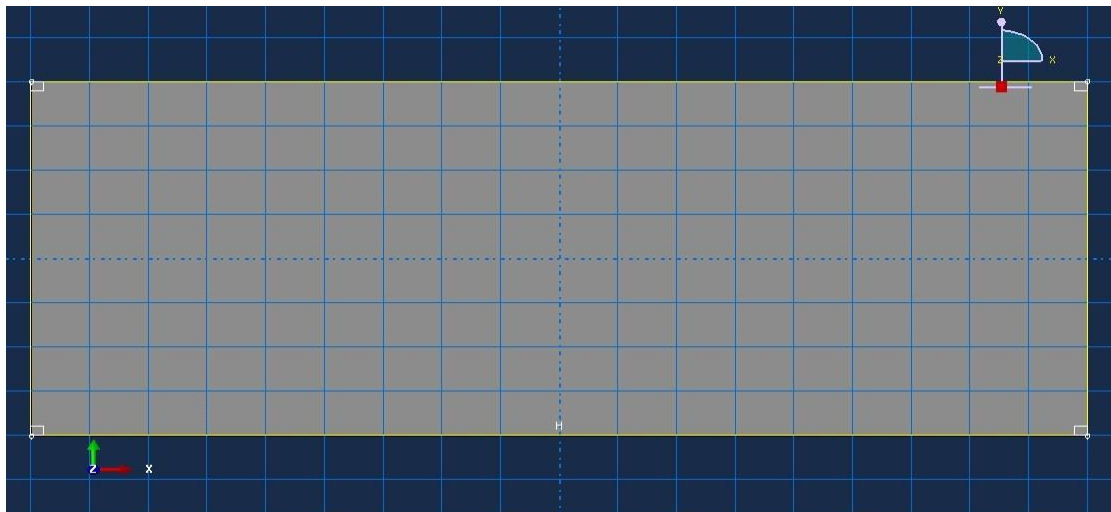


Εικόνα 5: Revolve

(η επιλογή να περιορίσουμε το ύψος σε 2,5 mm να γίνεται για λόγους σχεδιαστικής ευκολίας). Τέλος επιλέχτηκε το χαρακτηριστικό rigid γιατί θεωρούμε πως το εργαλείο είναι αρκετά σκληρό και δε θα υποστεί μεγάλες μεταβολές στη μάζα και το σχήμα του κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

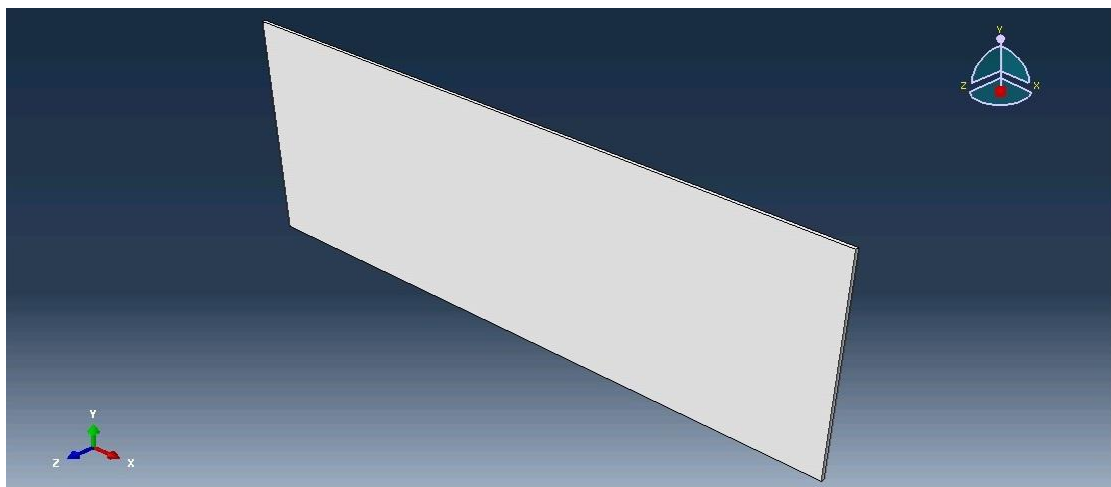
2.3 Μεταλλικό Φύλλο

Το μεταλλικό φύλλο σχεδιάστηκε σαν ένα solid με element type continuum shell, η επιλογή του element type continuum shell μας έδωσε τη δυνατότητα κάτι που σχεδιάστηκε σαν solid να μοντελοποιηθεί σαν shell και να μας επιτρέψει να αντιμετωπίσουμε το μεγάλο βαθμό μη γραμμικότητας που έχει η προσομοίωση, σε σχήμα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με διαστάσεις 90 mm πλάτος 40 mm μήκος.



Εικόνα 6: Σχέδιο Sketcher

Με την εντολή extrude από το πρόγραμμα της δώσαμε το πάχος των 0,5 mm και έτσι πήρε το τελικό σχήμα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο.



Εικόνα 7: Extrude

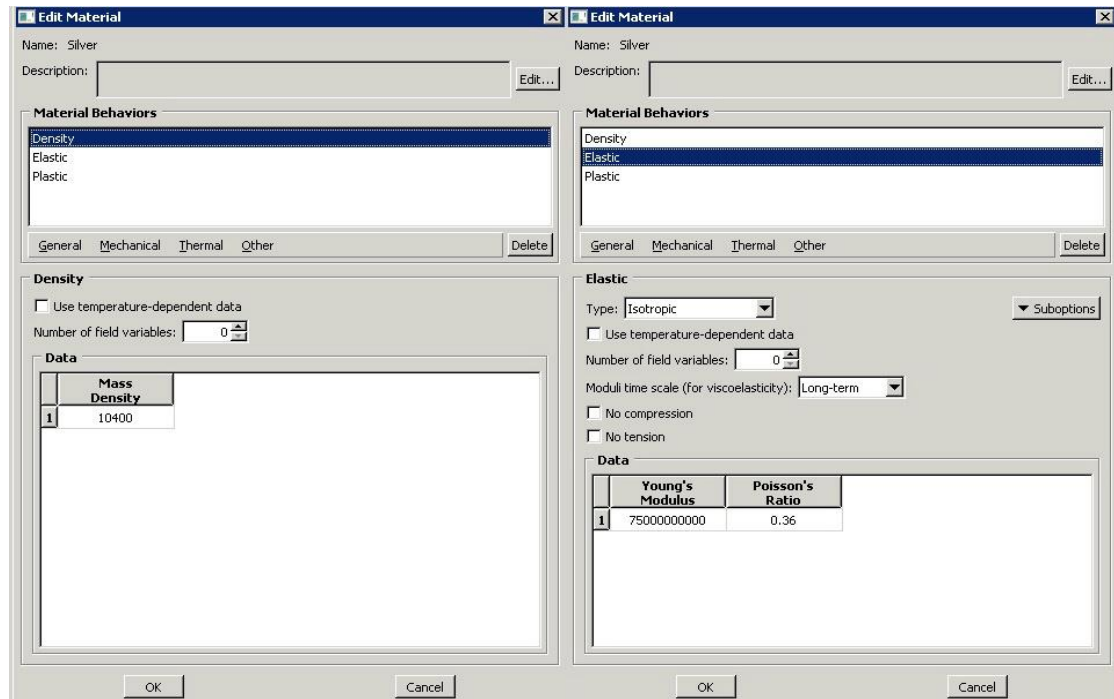
Για το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το φύλλο επιλέξαμε το ασήμι 925.

Τα χαρακτηριστικά του υλικού είναι :

πυκνότητα 10400 kg/m^3

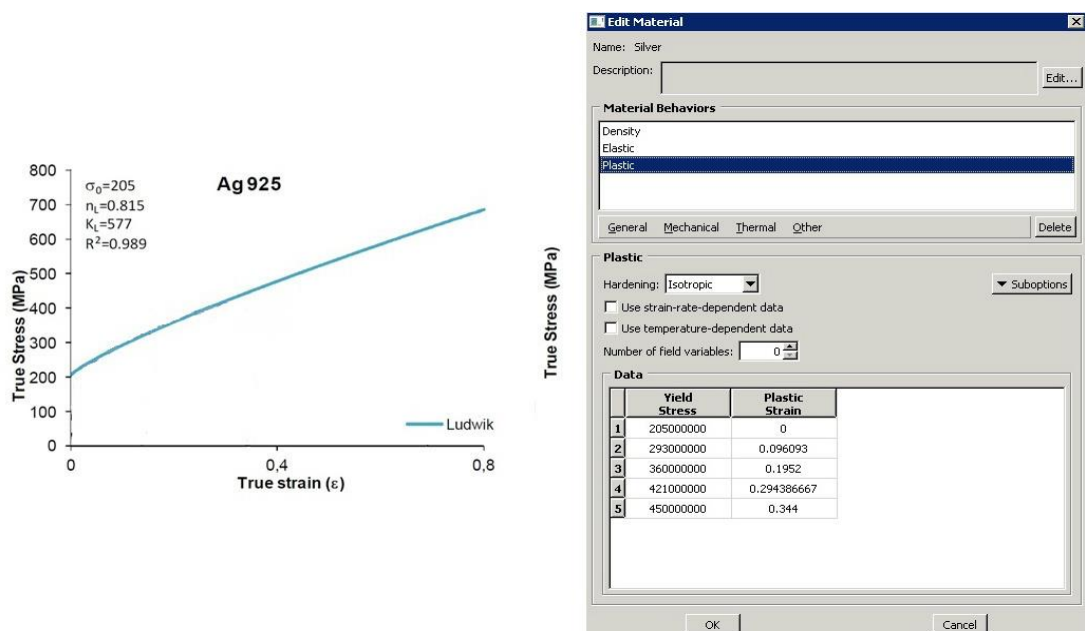
μέτρο ελαστικότητας 75 GPa

και ο λόγος του Poisson είναι $0,36$



Εικόνα 8: Πυκνότητα και ελαστικές ιδιότητες

Οι πλαστικές ιδιότητες για το υλικό εξήχθησαν από το παρακάτω διάγραμμα και αποθηκεύτηκαν στο πρόγραμμα



Εικόνα 9: Πλαστικές ιδιότητες υλικού

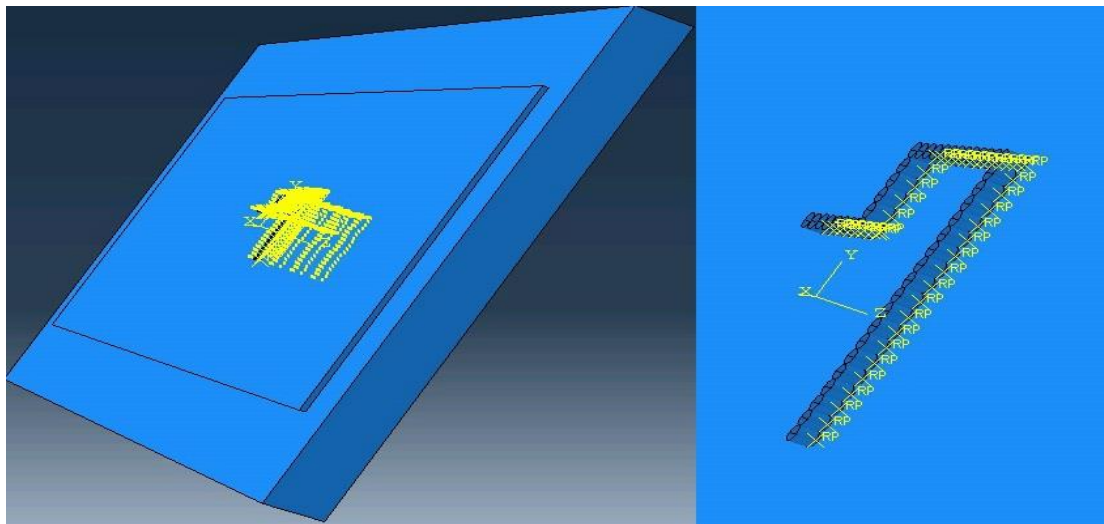
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Για να είναι πλήρως ορισμένη η διαδικασία της προσομοίωσης σε κάθε στάδιο έπρεπε να καταχωρήσουμε τα δεδομένα και τα ζητούμενα του προβλήματος στο πρόγραμμα.

3.1 Συναρμολόγηση του μοντέλου και τοποθέτηση του στο χώρο.

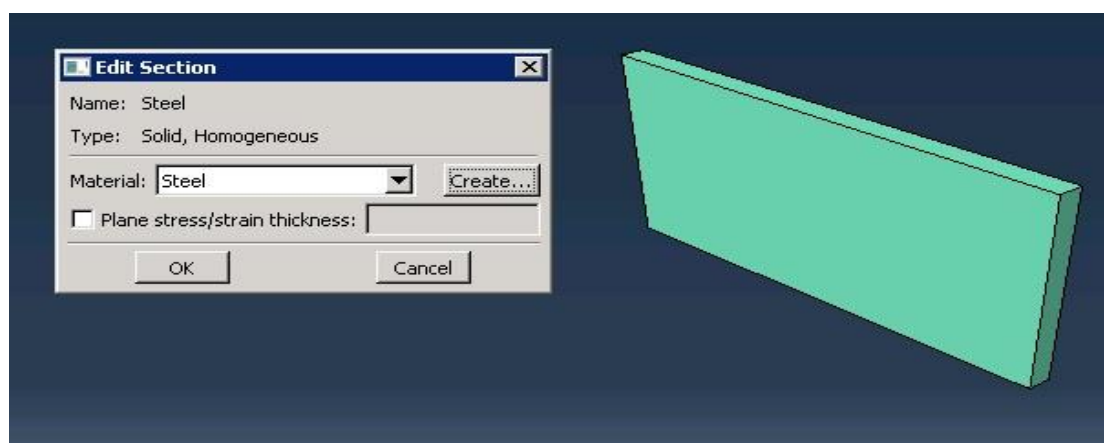
Η συναρμολόγηση έγινε στο CAE προγράμματος στο οποίο είχαμε σχεδιάσει και τα κομμάτια του μοντέλου. Στη διαδικασία της συναρμολόγησης τοποθετήσαμε στο χώρο τη βάση, το φύλλο προς κατεργασία και το εργαλείο κατεργασίας. Η σειρά με την οποία τοποθετήθηκαν τα κομμάτια είναι πρώτα η βάση έπειτα το φύλλο προς επεξεργασία σε επαφή με τη βάση και τέλος το εργαλείο σε επαφή με το φύλλο κατεργασίας. Οι συντεταγμένες του συστήματος περνούν από το κέντρο της βάσης και του φύλλου κατεργασίας. Έτσι το σημείο (0,0,0) χωρίζει σε ίσα μέρη τόσο τη βάση όσο και το μεταλλικό φύλλο.



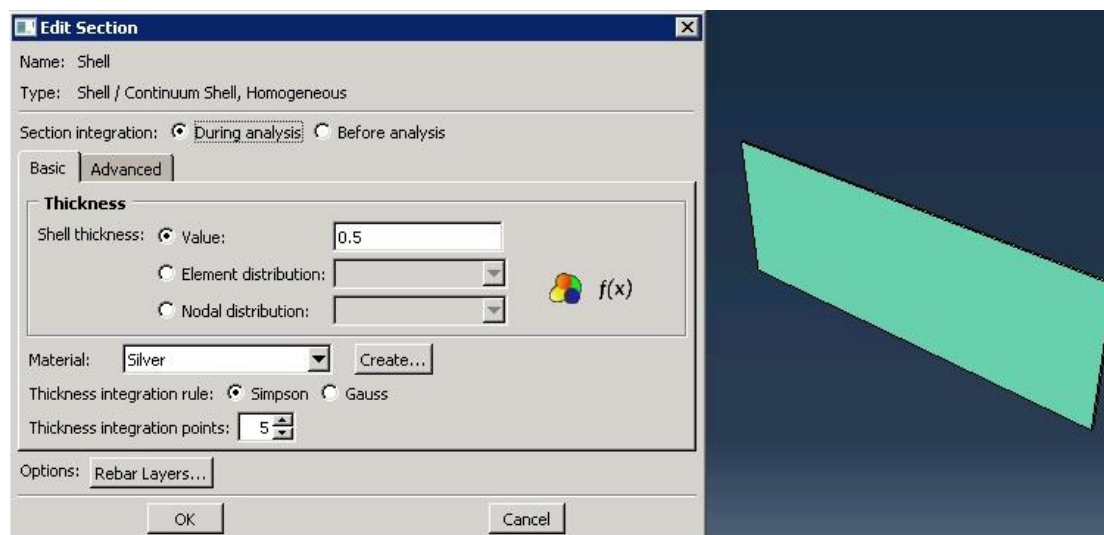
Εικόνα 10: Δείγμα συναρμολόγησης

3.2 Ορισμός ιδιοτήτων υλικών και συσχετισμός του με τα κομμάτια του μοντέλου

Ο ορισμός των ιδιοτήτων των υλικών πραγματοποιήθηκε με βάση τα δεδομένα που αναφέρονται παραπάνω και ορίστηκε στο πρόγραμμα στο πεδίο των υλικών. Καταχωρήθηκε η πυκνότητα, η ελαστική περιοχή των υλικών καθώς και η πλαστική περιοχή για το ασήμι το οποίο είναι το υλικό υπό επεξεργασία στη προσομοίωση. Ο συσχετισμός υλικών και κομματιών επετεύχθηκε με τον καθορισμό των τομέων των κομματιών που αντιπροσωπεύουν το εκάστοτε υλικό



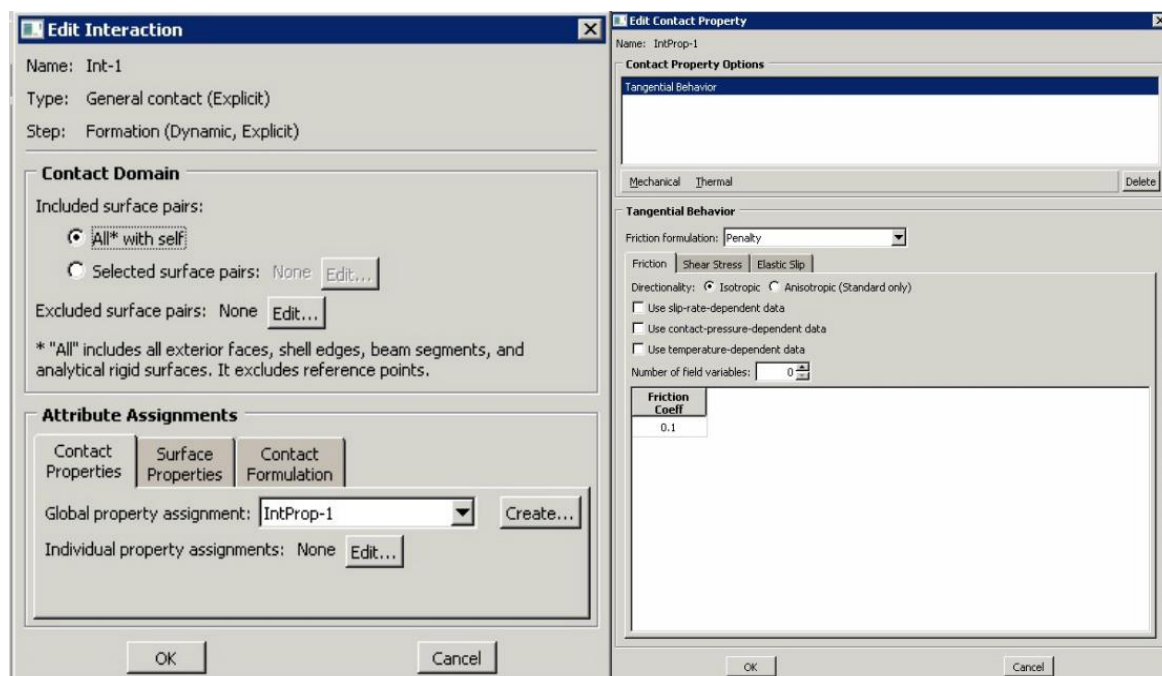
Εικόνα 11: Συσχετισμός βάση με το ασφάλι



Εικόνα 12: Συσχετισμός μεταλλικού φύλλου με το ασήμι

3.3 Σχέσεις μεταξύ επιφανειών του μοντέλου

Ορίσαμε τις σχέσεις μεταξύ των επιφανειών με βάση το κανόνα της γενικής επαφής που προσέφερε το πρόγραμμα. Η γενική επαφή επιτρέπει στο πρόγραμμα να εντοπίσει μόνο του τα ζευγάρια των επιφανειών που αλληλεπιδρούν και να τα καταχωρήσει για τη προσομοίωση. Επίσης για δώσουμε την έννοια της τριβής στη προσομοίωση μας έπρεπε να ορίσουμε ένα συντελεστή ποινής για την επαφή των αντικειμένων της προσομοίωσης, ο συντελεστής αυτός έχει τιμή 0.1 και αποθηκεύτηκε στις ιδιότητες των αλληλεπιδράσεων (interactions) και συσχετίστηκε με τη γενική επαφή μέσω των ιδιοτήτων της.

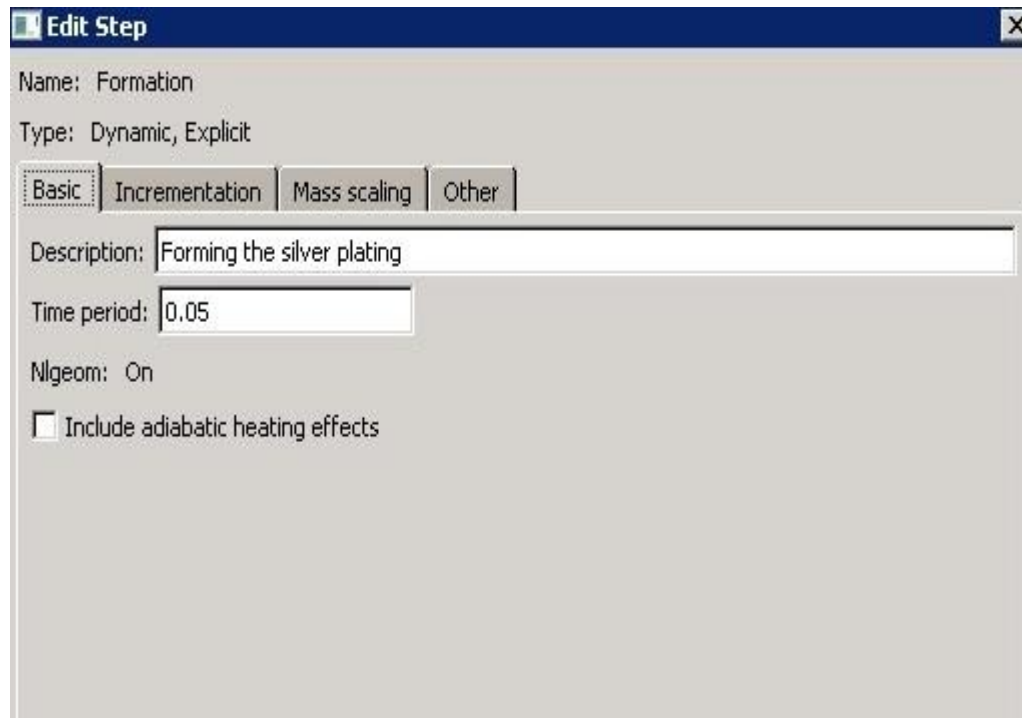


Εικόνα 13: Γενική επαφή και ιδιότητες

3.4 Μέθοδος επίλυσης του προβλήματος και χρονική παραμετροποίησης της προσομοίωσης

Η επιλογή της μεθόδου έγινε με την προσθήκη ενός βήματος πέρα του αρχικού στο μοντέλο μας. Το βήμα αυτό ορίζει το είδος της επίλυσης και μας επιτρέπει να κάνουμε χρήση του προγράμματος επίλυσης Explicit στη περίπτωση μας. Είναι προαπαιτούμενο η εισαγωγή ενός ή παραπάνω βήματος στο προγραμματιστικό περιβάλλον για τον ορισμό της διαδικασίας επίλυσης. Η χρονική παραμετροποίηση πραγματοποιήθηκε με την εισαγωγή στις ιδιότητες του βήματος

του χρόνου προσομοίωσης του μοντέλου. Ο χρόνος αυτός είναι 0.05 sec και αποτελεί το συνολικό χρόνο στον οποίο θα πραγματοποιούνταν η φόρτιση εάν λάμβανε χώρα η διαδικασία στη πραγματικότητα.

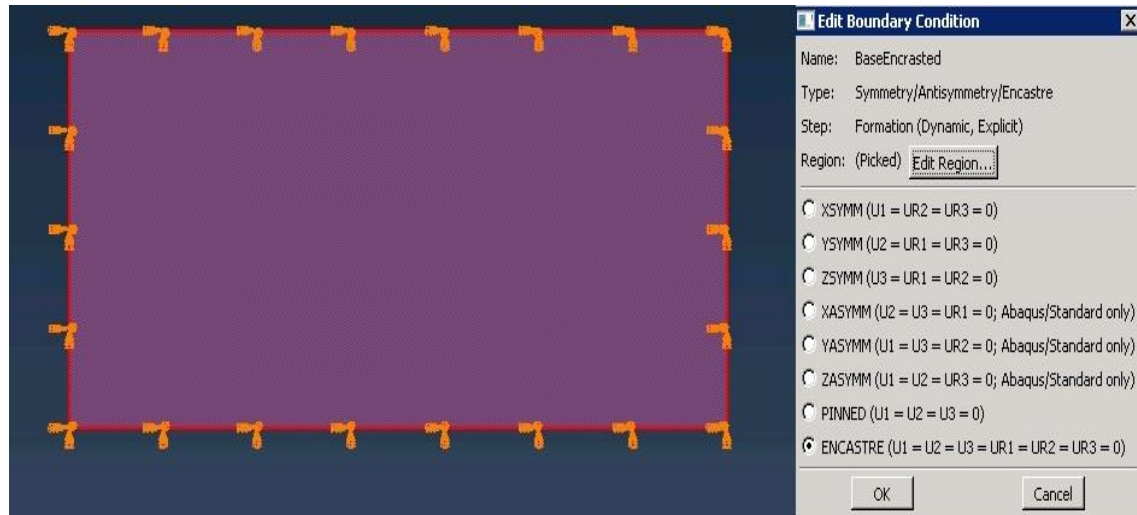


Εικόνα 14: Μέθοδος επίλυσης και χρόνος κατεργασίας

3.5 Περιορισμοί μοντέλου

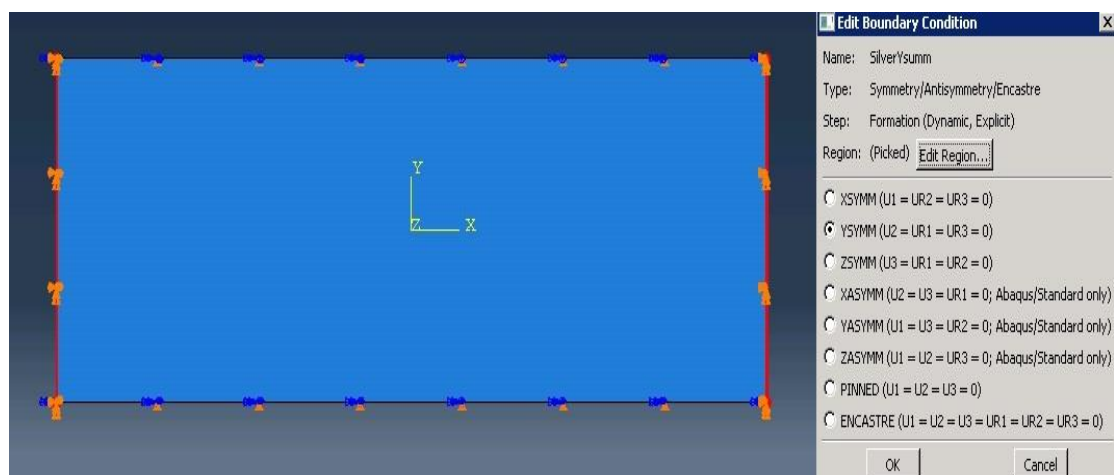
Για την επιτυχή διαδικασία της προσομοίωσης έπρεπε να περιορίσουμε τους βαθμούς ελευθερίας του μοντέλου.

Πακτώσαμε τη βάση ώστε να παραμένει αμετακίνητη

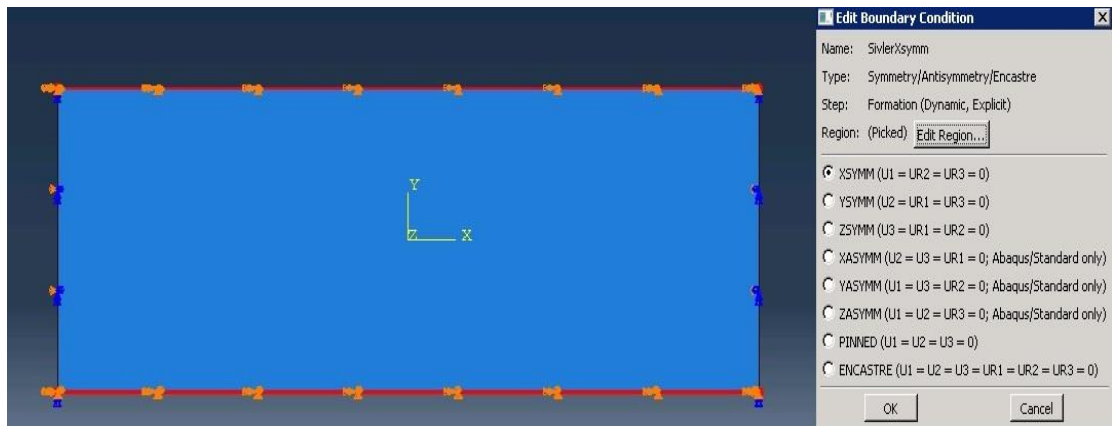


Εικόνα 15: Περιορισμός βάσης

Αφαιρέσαμε τους βαθμούς ελευθερίας στους άξονες x και y γύρω από το φύλλο κατεργασίας διότι η δε θέλαμε να υπάρξει κάποια μετακίνηση κατά τη διάρκεια της κατεργασίας

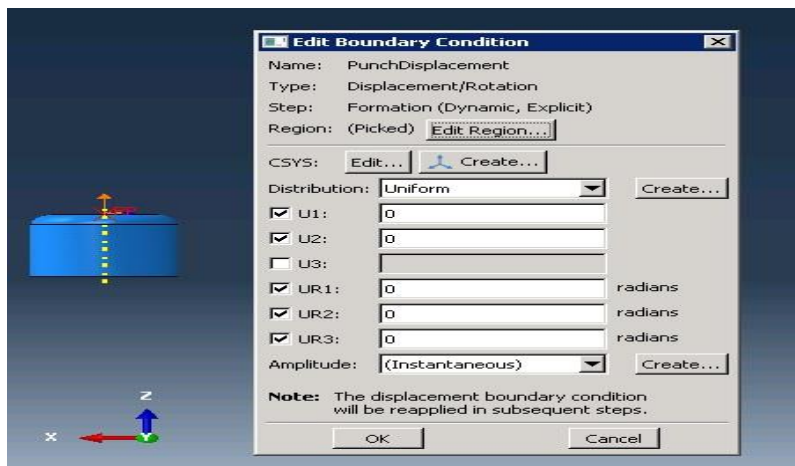


Εικόνα 16: Περιορισμός στον άξονα Y



Εικόνα 17: Περιορισμός στον άξονα X

Δημιουργήσαμε σημείο αναφοράς στο κέντρο του εργαλείου κατεργασίας και στο σημείο αυτό περιορίσαμε την ελευθερία στους x και y άξονες στο μηδέν επίσης αφαιρέσαμε τη περιστροφική κίνηση και στους τρεις άξονες μόνο τη γραμμική κίνηση στον άξονα z



Εικόνα 18: Περιορισμοί εργαλείου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΤΑΔΙΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ SPRINGBACK

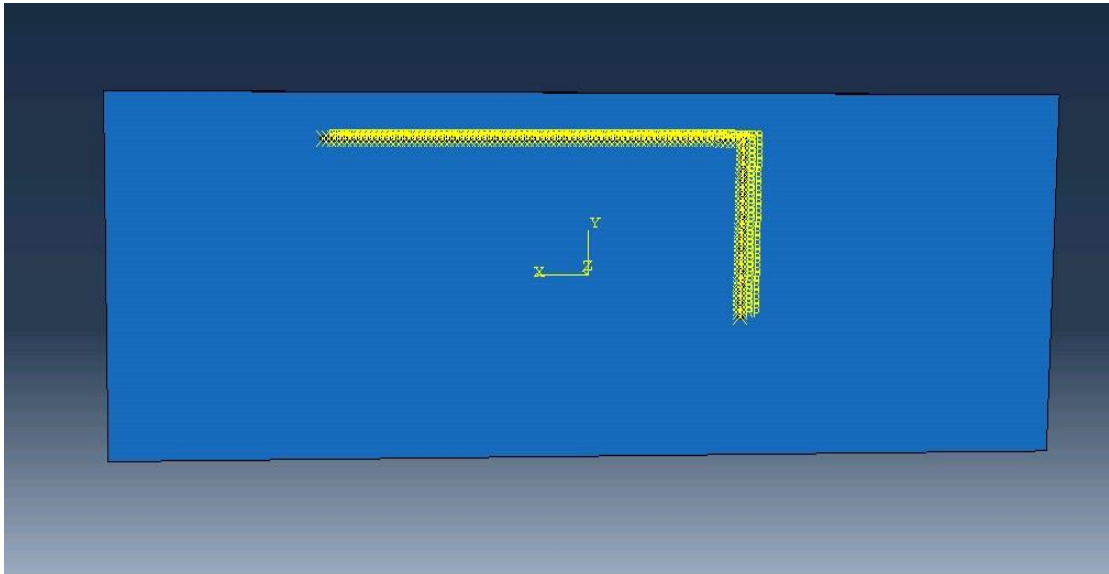
Η διαδικασία της διαμόρφωσης του μεταλλικού φύλλου έγινε σε πέντε διαδοχικά στάδια για να πάρει τη τελική του μορφή και κάθε στάδιο περιλάμβανε δεδομένα από το προηγούμενο ώστε η διαδικασία να είναι συνεχής στο σύνολο της. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε βήματος περιγράφηκαν ενδελεχώς στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Ο διαχωρισμός της διαδικασίας σε βήματα έγινε με τη σκέψη να προσεγγίσουμε τις εν ψυχρώ διαδικασίες διαμόρφωσης με ένα διαφορετικό τρόπο από το συνηθισμένο. Εξαιτίας αυτής της απόφασης είχαμε τη δυνατότητα να προσπαθήσουμε να μελετήσουμε τη διαμόρφωση σημειακά. Συγκεκριμένα η πρώτη προσπάθεια μας ήταν να διαμορφωθεί το τελικό σχήμα διάμεσου της σημειακής παραμόρφωσης. Αυτή η διαδικασία όμως δεν απέδωσε τα αναμενόμενα γιατί η έκδοση του προγράμματος μας περιόρισε τη δυνατότητα να προχωρήσουμε με αξιόπιστο τρόπο πέρα από ένα νούμερο βημάτων καθώς αδυνατούσε να προσδιορίσει την απόσταση που μεσολαβούσε μεταξύ του εργαλείου και του φύλλου διαμόρφωσης, σε σημεία που ήταν μερικώς διαμορφωμένα, και στο γραφικό περιβάλλον δεν είχε προστεθεί η δυνατότητα αυτή.

Η λύση που δώσαμε στο πρόβλημα ήταν να προσεγγίσουμε εκ νέου τη διαμόρφωση διατηρώντας τα σημεία που θα επεξεργαζόταν το εργαλείο αλλά αντί για ένα σημείο τη φορά να χρησιμοποιήσουμε ένα σύνολο σημείων. Η προσέγγιση αυτή μας έδωσε τελικά τη λύση που παρουσιάζουμε.

4.1 Πρώτο στάδιο διαμόρφωσης

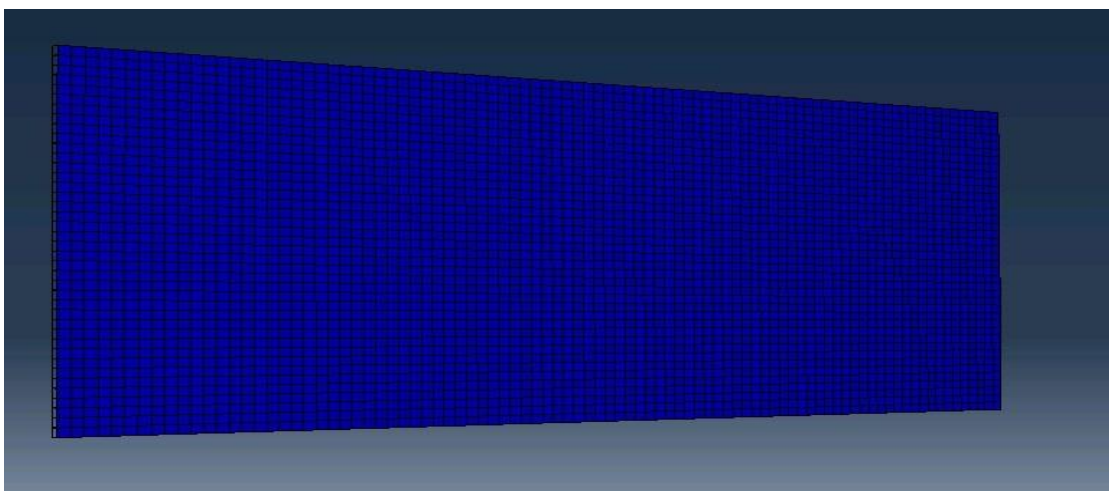
Στο πρώτο στάδιο έχουμε ένα μέρος του σχεδίου το οποίο θέλουμε να ολοκληρώσουμε. Η διάταξη μας αποτελείται από 2 ευθείες οι οποίες σχηματίζουν ορθή γωνία και θα αποτυπώσουν το συρματόσκοινο που ενώνει το πρυμνίο με το πλωριό κατάρτι και το πλωριό κατάρτι.



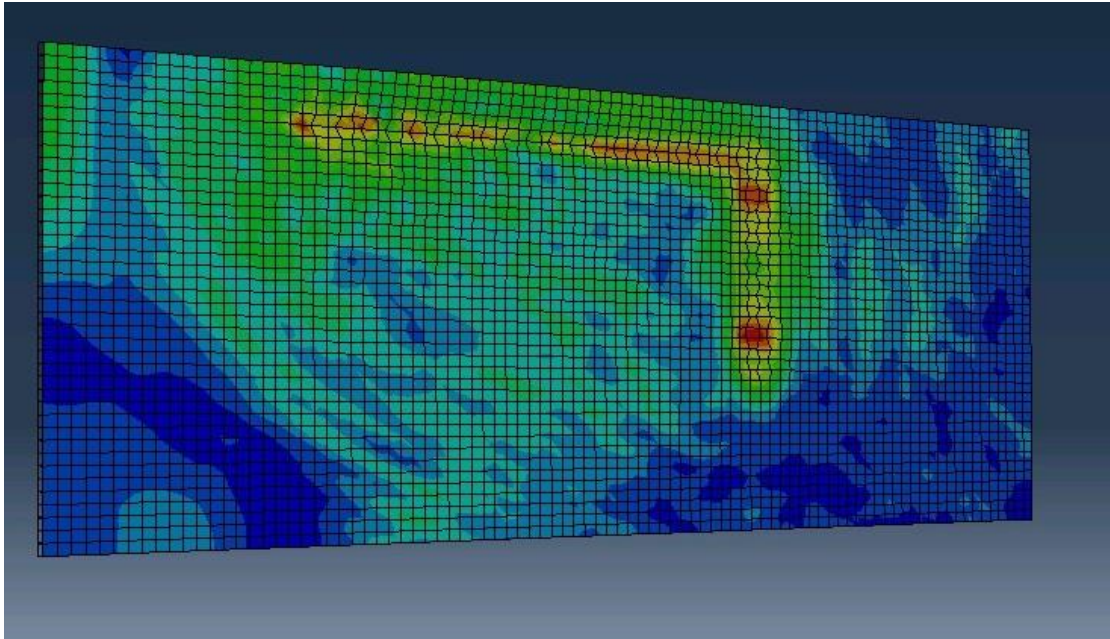
Εικόνα 19: Διάταξη πρώτου βήματος

Οι δυνάμεις που θα διαμορφώσουν τη μεταλλική πλάκα έχουν προσδιοριστεί στο πρόγραμμα ως μετακίνηση. Η μετακίνηση η οποία ζητήθηκε είναι 0,5 mm. Η εφαρμογή της δύναμης παραμόρφωσης θα γίνει κατά μήκος των ευθειών που ορίσαμε και τα σημεία τα οποία θα επηρεάσει περιγράφονται με τις εξισώσεις $y=15$ με $x \in [-15,25]$ και $x=-15$ με $y \in [-5,15]$.

Παρακάτω παρουσιάζουμε τη διαμόρφωση που έγινε με τις εικόνες της αρχικής και τελικής κατάστασης για το πρώτο στάδιο



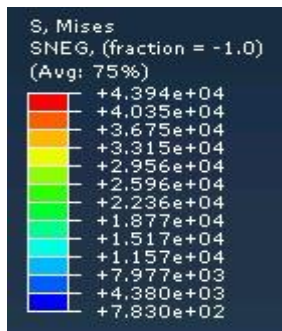
Εικόνα 20: Αρχική κατάσταση για το πρώτο στάδιο



Εικόνα 21: Τελική κατάσταση για το πρώτο στάδιο

Στη τελική κατάσταση βλέπουμε την απεικόνιση των παραμορφώσεων με χρώματα από τα οποία το καθένα αντιπροσωπεύουν τιμές που προκύπτουν από το κριτήριο von mises που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα.

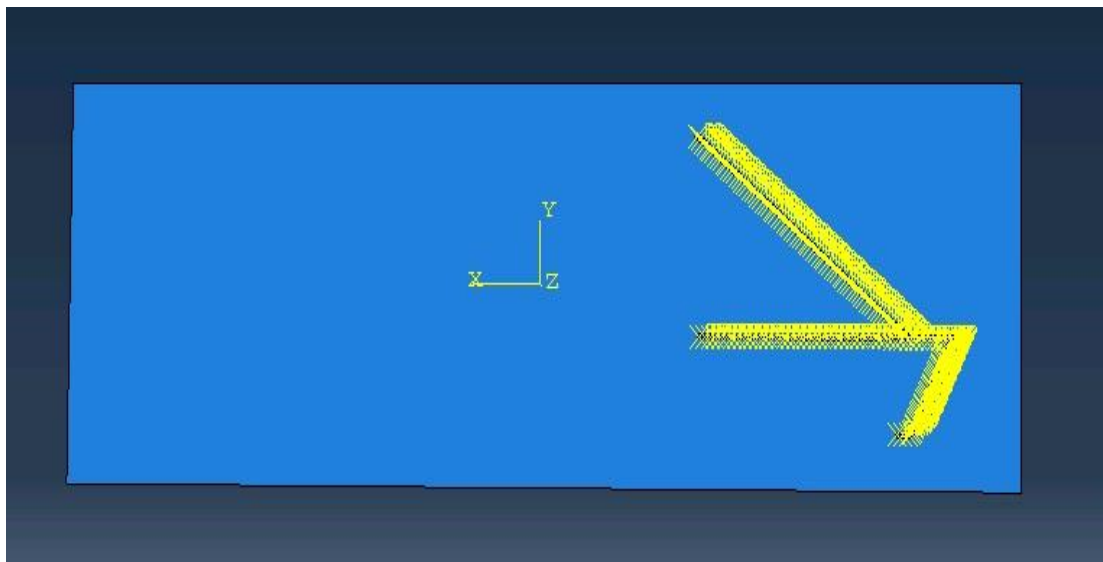
Οι τιμές του κριτηρίου για αυτή διαμόρφωση έχουν μονάδα μέτρησης το N/cm^2 και ισούται με 10^{-2} MPa οπότε η μέγιστη τιμή που εμφανίζεται στο υπόμνημα είναι 439,4 MPa



Εικόνα 22: Υπόμνημα τελικής κατάστασης πρώτου σταδίου

4.2 Δεύτερο στάδιο διαμόρφωσης

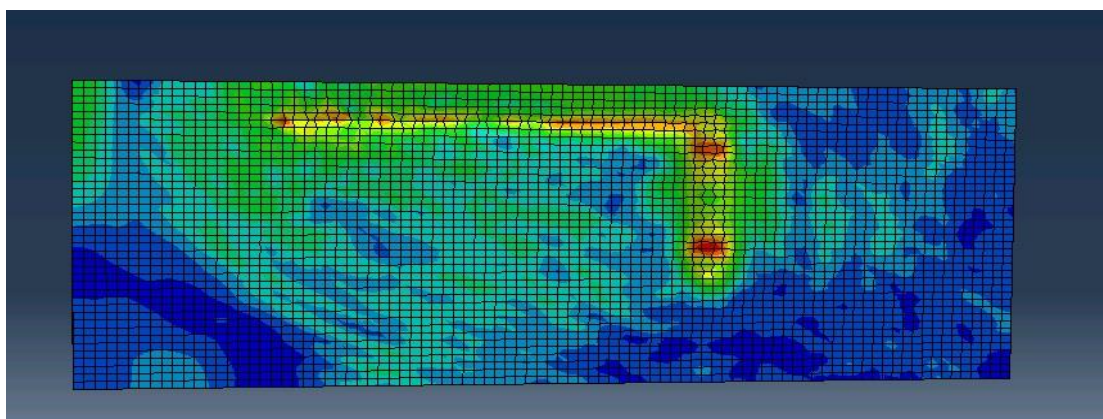
Στο δεύτερο στάδιο σχεδιάστηκε και διαμορφώθηκε το συρματόσκοινο που συνδέει το πλωριό κατάρτι με τη πλώρη και η ίδια η πλώρη του πλοίου. Η διάταξη μας περιλαμβάνει τρεις ευθείες οι οποίες ανά δυο σχηματίζουν γωνίες και διαγράφουν το επιθυμητό σχήμα και τη κλίση που θέλουμε να έχουν τόσο το συρματόσκοινο όσο και η πλώρη του πλοίου.



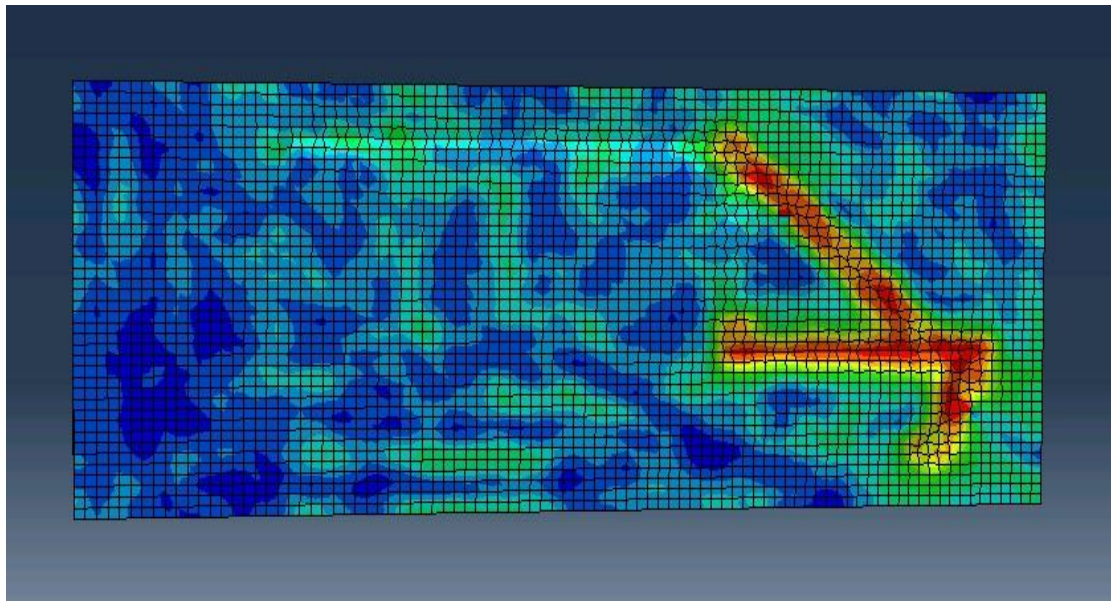
Εικόνα 23: Διάταξη δεύτερου σταδίου

Οι δυνάμεις που θα διαμορφώσουν τη μεταλλική πλάκα έχουν προσδιοριστεί στο πρόγραμμα ως μετακίνηση. Η μετακίνηση η οποία ζητήθηκε είναι 0,5 mm. Η εφαρμογή της δύναμης παραμόρφωσης θα γίνει κατά μήκος των ευθειών που ορίσαμε και τα σημεία τα οποία θα επηρεάσει περιγράφονται με τις εξισώσεις $y = -5$ με $x \in [-38.5, -15]$ για το ευθύγραμμο τμήμα της πλώρης που ενώνεται με το συρματόσκοινο και $y = -2.5x - 102.5$ με $x \in [-39, -35]$ και με $y \in [-15, -5]$ για την ευθεία που περιγράφει τη κλίση της πλώρης ενώ το συρματόσκοινο περιγράφεται από την ευθεία $y = x + 30$ με $x \in [-35, -15]$ και με $y \in [-5, 15]$

Παρακάτω παρουσιάζουμε τη διαμόρφωση που έγινε με τις εικόνες της αρχικής και τελικής κατάστασης για το δεύτερο στάδιο



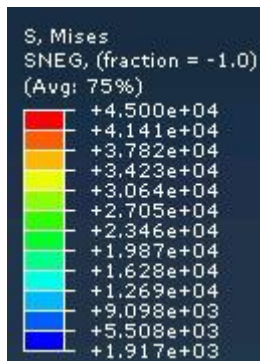
Εικόνα 24: Αρχική κατάσταση για το δεύτερο στάδιο



Εικόνα 25: Τελική κατάσταση για το δεύτερο στάδιο

Στη τελική κατάσταση βλέπουμε την απεικόνιση των παραμορφώσεων με χρώματα από τα οποία το καθένα αντιπροσωπεύουν τιμές που προκύπτουν από το κριτήριο von mises που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα.

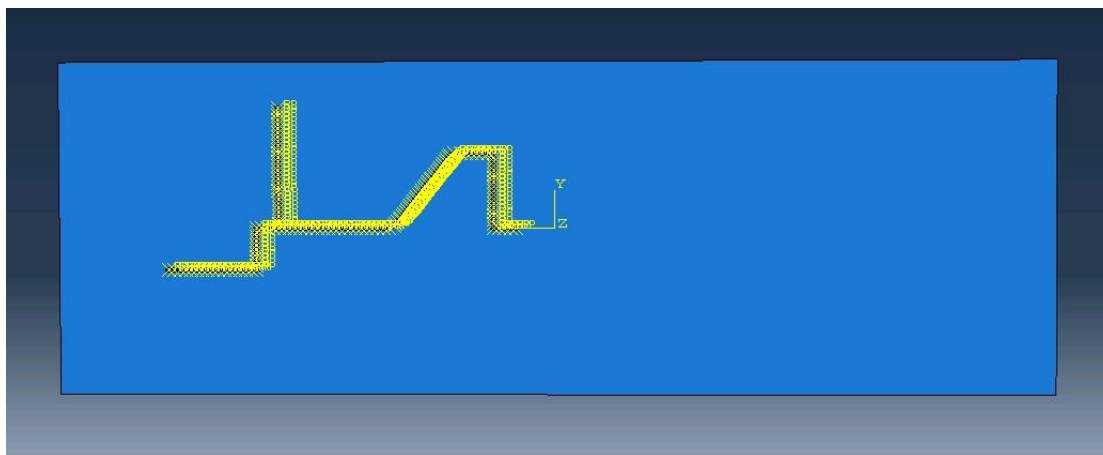
Οι τιμές του κριτηρίου για αυτή διαμόρφωση έχουν μονάδα μέτρησης το N/cm^2 και ισούται με 10^{-2} MPa οπότε η μέγιστη τιμή που εμφανίζεται στο υπόμνημα είναι 450 MPa



Εικόνα 26: Υπόμνημα τελικής κατάστασης δευτέρου σταδίου

4.3 Τρίτο στάδιο διαμόρφωσης

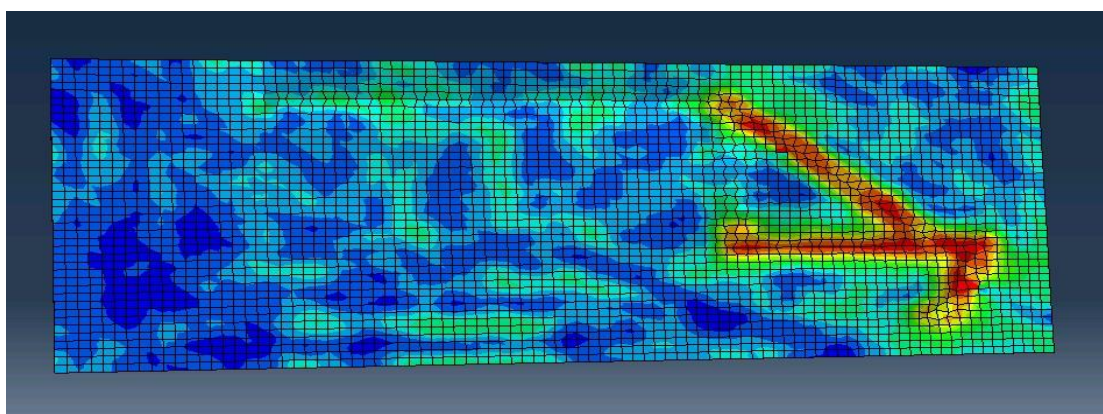
Στο τρίτο στάδιο σχεδιάστηκε και διαμορφώθηκε το πάνω μέρος της πρύμνης, το πρυμνίο κατάρτι και το φουγάρο του πλοίου. Η διάταξη μας περιλαμβάνει οκτώ ευθείες οι οποίες διαγράφουν το επιθυμητό σχήμα και τη κλίση που θέλουμε να έχει το φουγάρο του πλοίου.



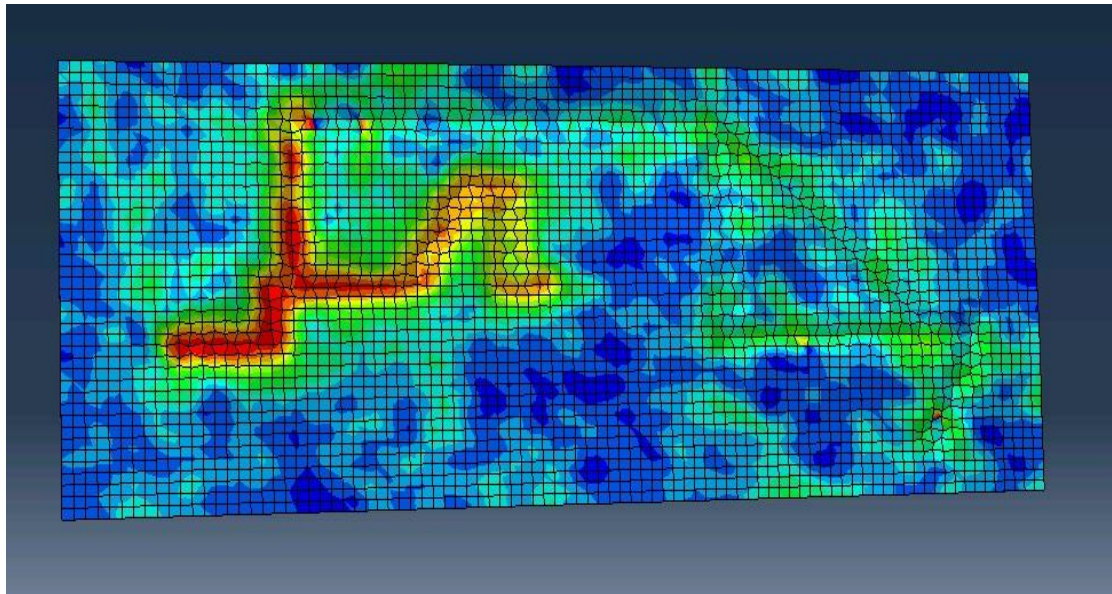
Εικόνα 27: Διάταξη τρίτου σταδίου

Οι δυνάμεις που θα διαμορφώσουν τη μεταλλική πλάκα έχουν προσδιοριστεί στο πρόγραμμα ως μετακίνηση. Η μετακίνηση η οποία ζητήθηκε είναι 0,5 mm. Η εφαρμογή της δύναμης παραμόρφωσης θα γίνει κατά μήκος των ευθειών που ορίσαμε και τα σημεία τα οποία θα επηρεάσει περιγράφονται με τις εξισώσεις $y=-5$ με $x \in [27,35]$ για την ευθεία που είναι στο τέλος δεξιά του σχήματος, $x=27$ με $y \in [-5,0]$ για την ευθεία που σχηματίζει ορθή γωνία με τη προηγούμενη, $x = 25$ με $y \in [0,20]$ για την ευθεία που σχηματίζει το κατάρτι, $y=0$ με $x \in [15,27]$ για την ευθεία που σχηματίζει ορθή γωνία με το κατάρτι, $y=1,6x-24$ με $x \in [9,15]$ και $y \in [0,10]$ για την ευθεία που περιγράφει τη κλίση του φουγάρου, $y= 1$ με $x \in [5,5,9]$ για την ευθεία που αποτελεί το οριζόντιο τμήμα του φουγάρου, $x=5,5$ με $y \in [0,10]$ για την ευθεία που ορίζει το κάθετο τμήμα του φουγάρου και τέλος $y=0$ με $x \in [1,5,5,5]$ για την ευθεία που σχηματίζει ορθή γωνία με το κάθετο τμήμα του φουγάρου.

Παρακάτω παρουσιάζουμε τη διαμόρφωση που έγινε με τις εικόνες της αρχικής και τελικής κατάστασης για το τρίτο στάδιο



Εικόνα 28: Αρχική κατάσταση τρίτου σταδίου



Εικόνα 29: Τελική κατάσταση τρίτου σταδίου

Στη τελική κατάσταση βλέπουμε την απεικόνιση των παραμορφώσεων με χρώματα από τα οποία το καθένα αντιπροσωπεύουν τιμές που προκύπτουν από το κριτήριο von mises που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα.

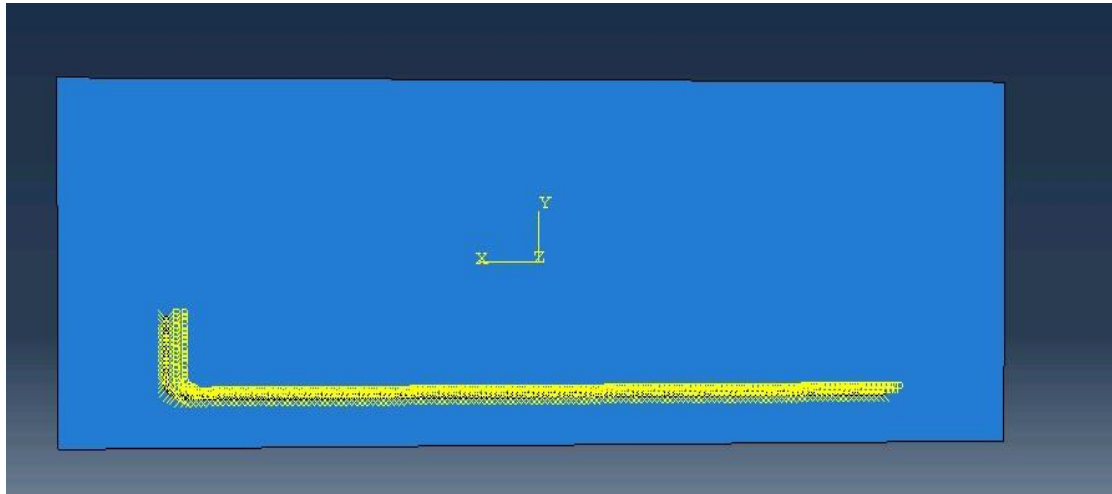
Οι τιμές του κριτηρίου για αυτή διαμόρφωση έχουν μονάδα μέτρησης το N/cm^2 και ισούται με 10^{-2} MPa οπότε η μέγιστη τιμή που εμφανίζεται στο υπόμνημα είναι 450 MPa



Εικόνα 30: Υπόμνημα τελικής κατάστασης τρίτου σταδίου

4.4 Τέταρτο στάδιο διαμόρφωσης

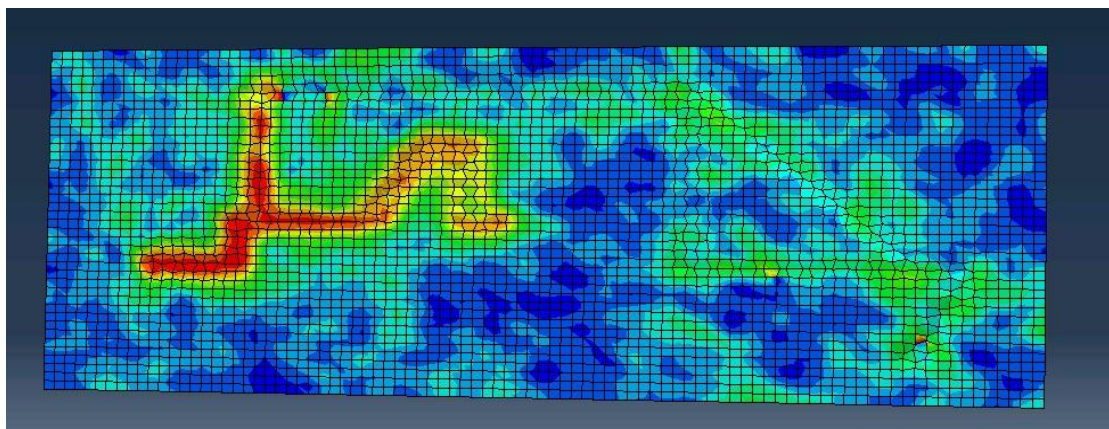
Στο τέταρτο στάδιο σχεδιάστηκε και διαμορφώθηκε η ίσαλος γραμμή και το υπολειπόμενο κομμάτι της πρύμνης. Η διάταξη μας περιλαμβάνει δυο ευθείες και ένα καμπύλο τμήμα που περιγράφουν το επιθυμητό σχήμα.



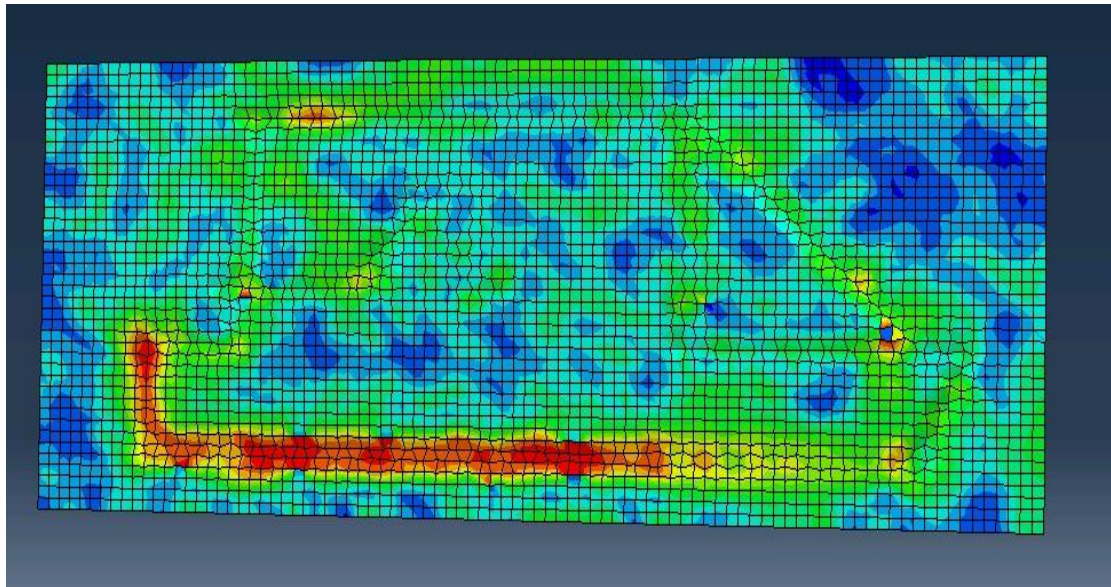
Εικόνα 31: Διάταξη τέταρτου σταδίου

Οι δυνάμεις που θα διαμορφώσουν τη μεταλλική πλάκα έχουν προσδιοριστεί στο πρόγραμμα ως μετακίνηση. Η μετακίνηση η οποία ζητήθηκε είναι 0,5 mm. Η εφαρμογή της δύναμης παραμόρφωσης θα γίνει κατά μήκος των ευθειών και του καμπύλου τμήματος που ορίσαμε και τα σημεία τα οποία θα επηρεάσει περιγράφονται με τις εξισώσεις $y = -15$ $x \in [-33, 33.5]$ για την ευθεία που περιγράφει την ίσαλο γραμμή και $x = 35$ $y \in [-15, -6]$ για το κομμάτι της πρύμνης το καμπύλο τμήμα σχεδιάστηκε προσεγγίστηκα με τη βοήθεια του προγράμματος που παρείχε την επιλογή δημιουργίας καμπύλου τμήματος

Παρακάτω παρουσιάζουμε τη διαμόρφωση που έγινε με τις εικόνες της αρχικής και τελικής κατάστασης για το τέταρτο στάδιο



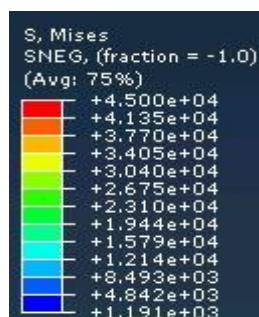
Εικόνα 32: Αρχική κατάσταση τέταρτου σταδίου



Εικόνα 33: Τελική κατάσταση τέταρτου σταδίου

Στη τελική κατάσταση βλέπουμε την απεικόνιση των παραμορφώσεων με χρώματα από τα οποία το καθένα αντιπροσωπεύουν τιμές που προκύπτουν από το κριτήριο von mises που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα.

Οι τιμές του κριτηρίου για αυτή διαμόρφωση έχουν μονάδα μέτρησης το N/cm^2 και ισούται με 10^{-2} MPa οπότε η μέγιστη τιμή που εμφανίζεται στο υπόμνημα είναι 450 MPa

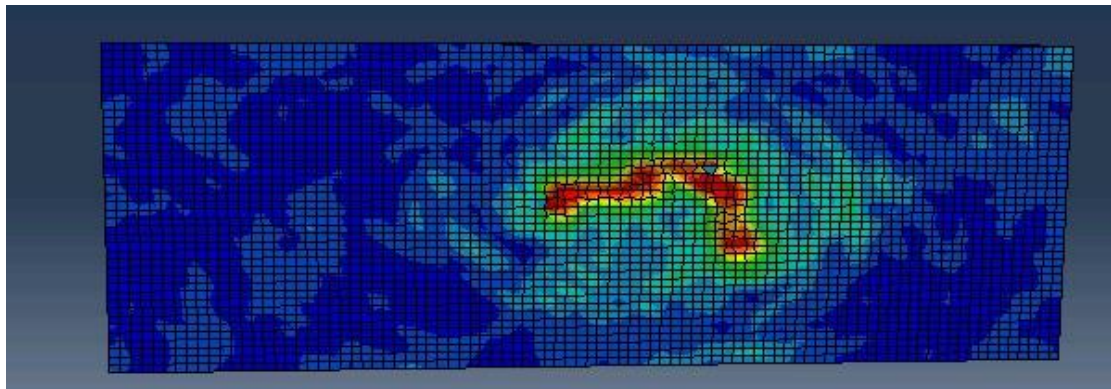


Εικόνα 34: Υπόμνημα τελικής κατάστασης τέταρτου σταδίου

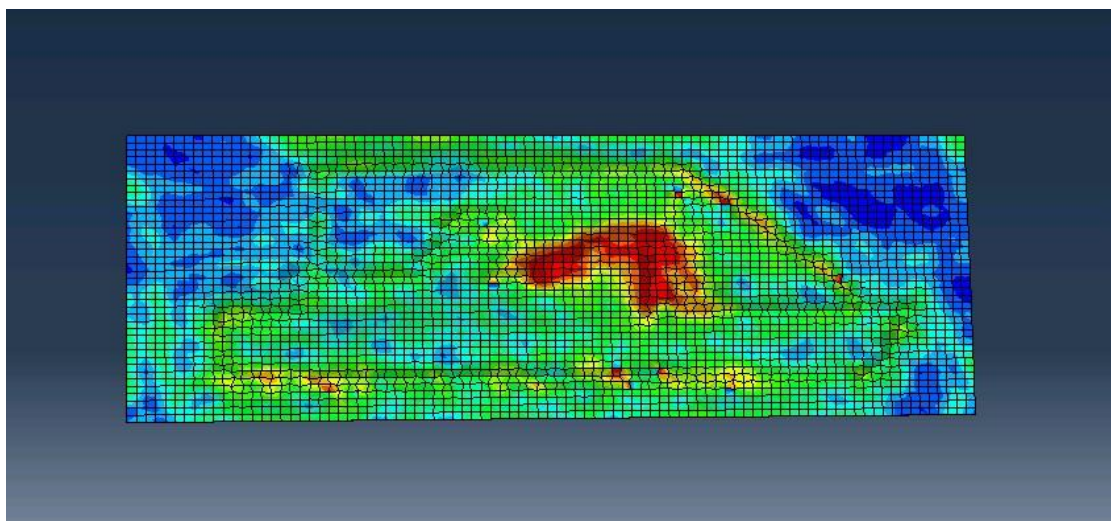
4.5 Πέμπτο στάδιο διαμόρφωσης

Στο πέμπτο στάδιο σχεδιάστηκε και διαμορφώθηκε το υπολειπόμενο μέσο κομμάτι του πλοίου. Στο τελευταίο στάδιο χρειάστηκε να αλλάξουμε τη λύση για να εξάγουμε ασφαλή αποτελέσματα. Εξαιτίας της παραμόρφωσης του μεταλλικού φύλλου το τμήμα που είχε μείνει προς επεξεργασία είχε δημιουργηθεί μια καμπυλότητα που δε μας επέτρεπε να χρησιμοποιήσουμε το τρόπο επεξεργασίας που είχαμε. Αυτή η αδυναμία αποπεράτωσης της διαδικασίας οφείλεται κυρίως στην έλλειψη τρόπου προσδιορισμού από το γραφικό περιβάλλον για τις αποστάσεις που έπρεπε να τηρούνται μεταξύ των επιφανειών που έρχονται σε επαφή για ένα

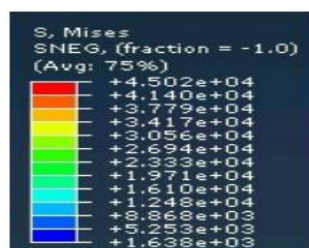
αντικείμενο το οποίο είχε ήδη παραμορφωθεί. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αποφασίσαμε να κάνουμε μια πειραματική προσομοίωση με τη διάταξη που είχαμε φτιάξει σε ένα μεταλλικό φύλλο το οποίο δεν ήταν επεξεργασμένο. Από τη διαδικασία αυτή εξάγαμε το μέγεθος των δυνάμεων που έπρεπε να εφαρμοστούν, η λύση που χρησιμοποιήσαμε ήταν να εφαρμόσουμε απευθείας τις δυνάμεις στο δοκίμιο αγνοώντας το κοπτικό εργαλείο για το μικρό τελευταίο κομμάτι της διαμόρφωσης. Τα αποτελέσματα ήταν στα πλαίσια του αποδεκτού καθώς καταπονήθηκε παραπάνω η πλακά με το τέλος της προσομοίωσης αλλά δε ξεπέρασε το όριο θραύσης του υλικού και δημιουργήσαμε το τελικό σχήμα.



Εικόνα 35: Αποτελέσματα πειραματικής προσομοίωσης



Εικόνα 36: Αποτελέσματα πέμπτου σταδίου διαμόρφωσης



Υπόμνημα πειραματικής προσομοίωσης

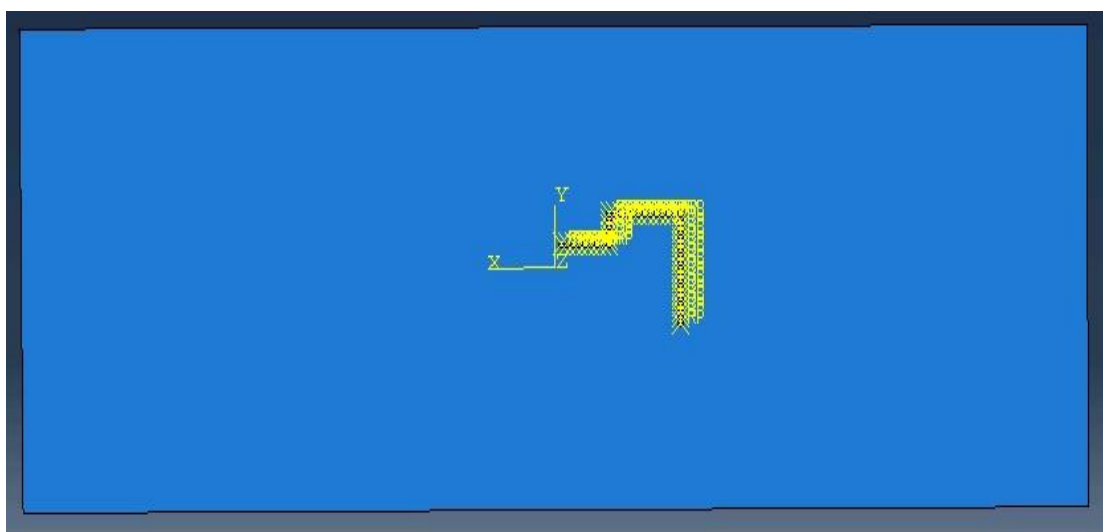


Υπόμνημα τελικής κατάστασης πέμπτου σταδίου

Εικόνα 37: Υπομνήματα

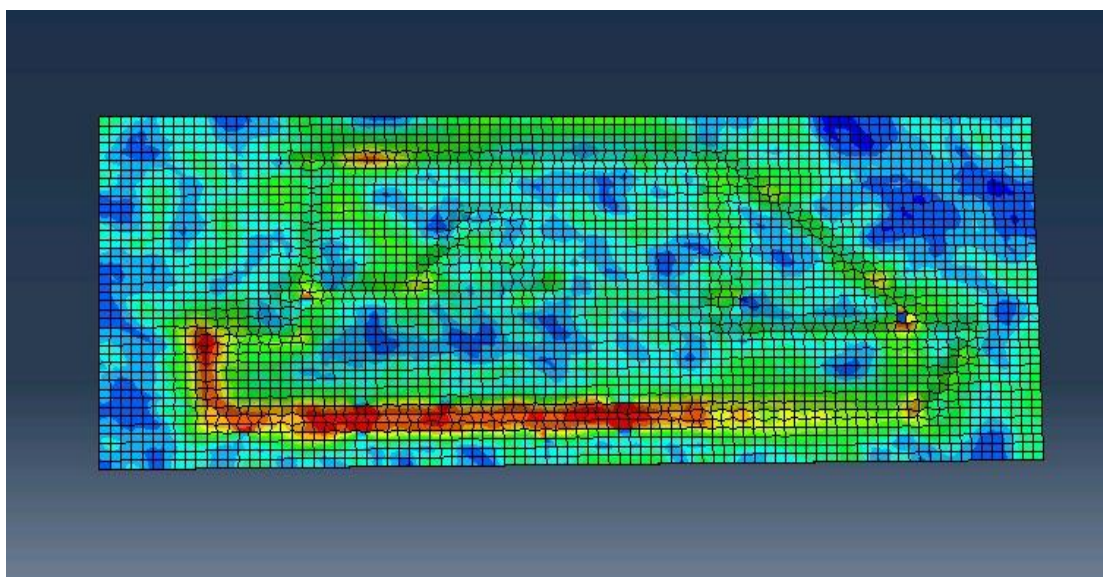
Οι τιμές του κριτηρίου von mises για αυτές τις διαμορφώσεις έχουν μονάδα μέτρησης το N/cm^2 και ισούται με 10^{-2} MPa οπότε η μέγιστη τιμή που εμφανίζεται στα υπομνήματα είναι 450 MPa

Η εφαρμογή της δύναμης παραμόρφωσης η οποία ήταν ίση με 38000 N έγινε στα σημεία που ορίσαμε και περιγράφονται με τις εξισώσεις $y=1$ με $x \in [-5, 1.5]$ για το πρώτο από αριστερά οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα, $x=-5$ με $y \in [1, 4]$ για το πρώτο από αριστερά κάθετο ευθύγραμμο τμήμα, $y=4$ με $x \in [-5, -11]$ για το δεύτερο από αριστερά οριζόντιο τμήμα και $x=-11$ με $y \in [4, -6]$ για το τελευταίο κάθετο τμήμα.

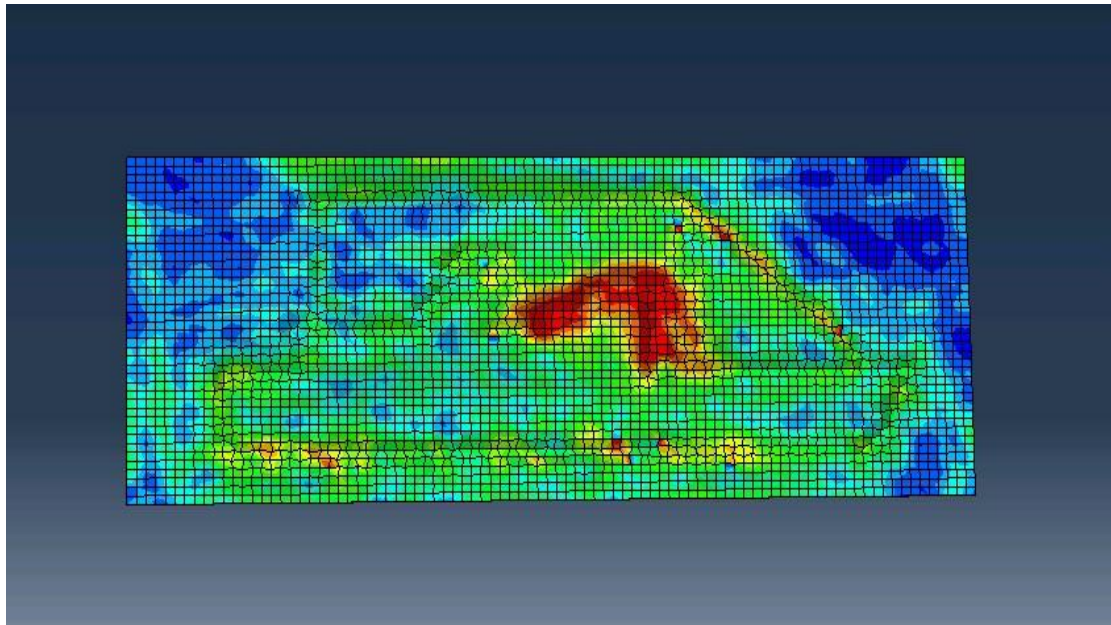


Εικόνα 38: Διάταξη σημείων πέμπτου σταδίου

Παρακάτω παρουσιάζουμε τη διαμόρφωση που έγινε με τις εικόνες της αρχικής και τελικής κατάστασης για το πέμπτο στάδιο



Εικόνα 39: Αρχική κατάσταση πέμπτου σταδίου



Εικόνα 40: Τελική κατάσταση πέμπτου σταδίου

Στη τελική κατάσταση βλέπουμε την απεικόνιση των παραμορφώσεων με χρώματα από τα οποία το καθένα αντιπροσωπεύουν τιμές που προκύπτουν από το κριτήριο von mises που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα.

Οι τιμές του κριτηρίου για αυτή διαμόρφωση έχουν μονάδα μέτρησης το N/cm^2 και ισούται με 10^{-2} MPa οπότε η μέγιστη τιμή που εμφανίζεται στο υπόμνημα είναι 450 MPa



Εικόνα 41: Υπόμνημα τελικής κατάστασης πέμπτου σταδίου

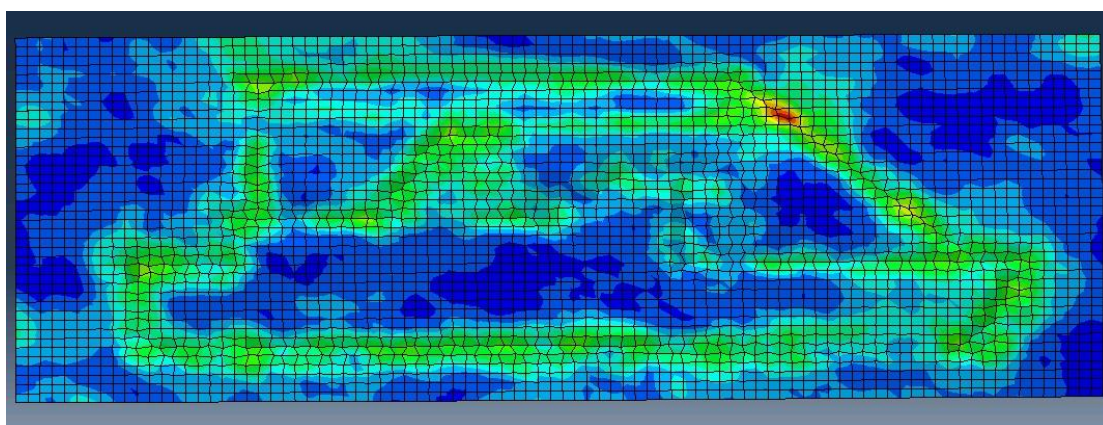
4.6 Springback

Με το πέρας της διαδικασίας διαμόρφωσης παρουσιάζεται η ανάγκη να μελετηθεί το springback που θα παρουσιάσει το μεταλλικό φύλλο. Το springback είναι η τάση των υλικών που έχουν υποστεί μόνιμη παραμόρφωση αμέσως μετά από την αφαίρεση του φορτίου να προσπαθούν να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση. Αυτή η τάση οφείλεται στην εσωτερική ενέργεια που εμφανίζεται από τις εσωτερικές τάσεις που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία της παραμόρφωσης και ενεργούν μέχρι το σημείο εκείνο όπου το εσωτερικό ισοζύγιο ενεργείας φτάσει σε ένα σημείο ισορροπίας.

Γενικά σε όλες τις εν ψυχρώ διαδικασίες που υπάρχουν καμπτικές τάσεις το φαινόμενο του springback εμφανίζεται είτε σε μικρό είτε σε μεγάλο βαθμό. Η αντιμετώπιση του είναι ένα πεδίο το οποίο επαφίεται στην έρευνα και το πειραματισμό γιατί για κάθε περίπτωση έχει διαφορετικό εύρος αποτελεσμάτων. Βέβαια υπάρχουν γενικές μεταβλητές που επηρεάζουν το μέγεθος της τιμής του springback και οι πιο γνώστες είναι το μέτρο ελαστικότητας (χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας βοηθά στη δημιουργία μεγαλύτερου springback), η εφαρμοζόμενη δύναμη (μεγάλη δύναμη ευνοεί περισσότερο τη δημιουργία μεγαλύτερου springback) και το πάχος του υλικού (λεπτότερα φύλλα υλικά εμφανίζουν μεγαλύτερο springback).

Για τη περίπτωση που μελετήσαμε είχαμε και εμείς την εμφάνιση του φαινομένου του springback. Έπειτα από την αφαίρεση του φορτίου στο τελευταίο στάδιο αναζητήσαμε τα αποτελέσματα του στο μεταλλικό φύλλο.

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων έπρεπε να μεταφέρουμε το μεταλλικό φύλλο σε ένα περιβάλλον για στατική ανάλυση ώστε να δούμε την ακριβής επίδραση στο μοντέλο μας. Αυτή τη δυνατότητα μας την παρείχε το προγραμματιστικό περιβάλλον στο οποίο εργαστήκαμε και έτσι εξάγαμε τα παρακάτω αποτελέσματα.



Εικόνα 42: Παραμένουσες τάσεις

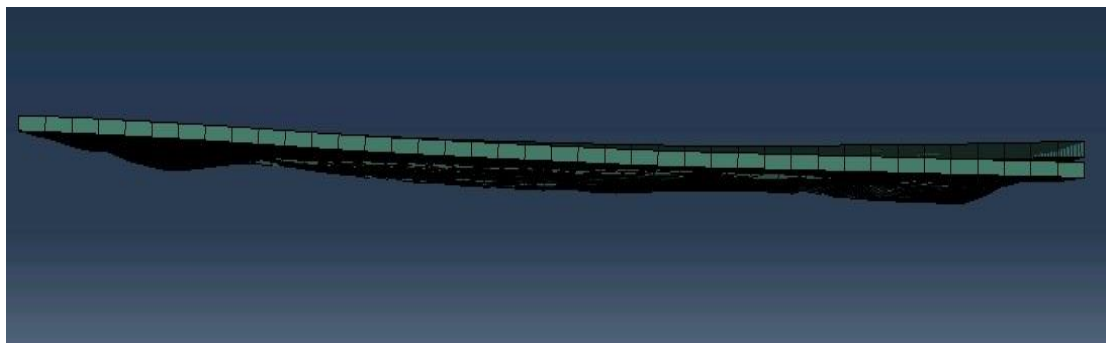


Εικόνα 43: Υπόμνημα παραμενουσών τάσεων

Οι τιμές του κριτηρίου von mises για αυτές τις διαμορφώσεις έχουν μονάδα μέτρησης το N/cm^2 και ισούται με 10^{-2} MPa οπότε η μέγιστη τιμή που εμφανίζεται στα υπομνήματα είναι 360 MPa



Εικόνα 44: Αρχική και τελική κατάσταση springback άξονας y

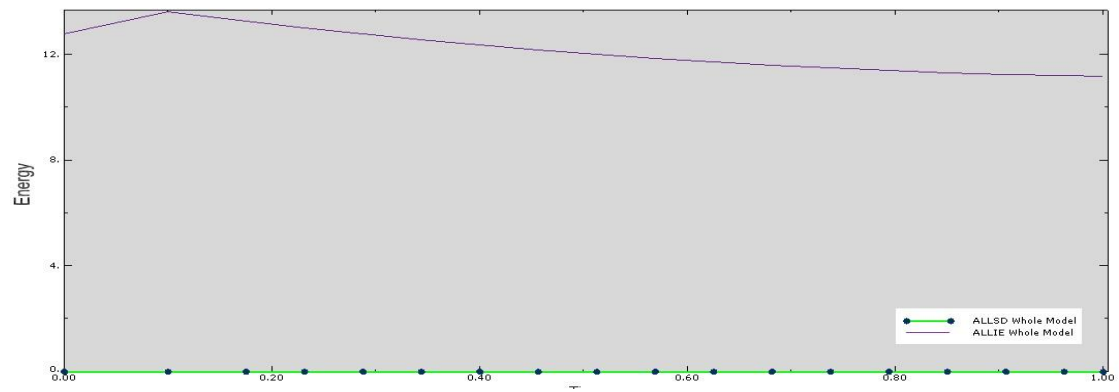


Εικόνα 45: Αρχική και τελική κατάσταση springback άξονας x

Παρατηρούμε στις παραπάνω εικόνες πως επηρεάστηκε και η δική μας μελέτη από το φαινόμενο του springback. Βλέπουμε πως το μεταλλικό φύλλο που επεξεργαστήκαμε τείνει να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση και η προσπάθεια επαναφοράς του εμφανίζεται τόσο στον άξονα x όσο και στον άξονα y. Πιο συγκεκριμένα η περιοχή που εμφανίζεται σαν διάφανη είναι η αρχική κατάσταση της διαδικασίας και φαίνεται το μεταλλικό φύλλο να επανέρχεται μετά το τέλος της διαδικασίας

Τέλος πρέπει να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα του springback ως προς την αξιοπιστία τους. Για να είναι αξιόπιστα θα πρέπει η εσωτερική ενέργεια να είναι

μεγαλύτερη από τη στατική ενέργεια ισορροπίας του μεταλλικού φύλλου. Αυτό θα το διαπιστώσουμε από ένα συγκριτικό διάγραμμα που θα σχεδιάσουμε παρακάτω



Εικόνα 46: Σύγκριση εσωτερικής ενέργειας με στατική ενέργεια ισορροπίας

Βλέπουμε τελικά πως η εσωτερική ενέργεια είναι μεγαλύτερη από τη στατική ενέργεια ισορροπίας και έτσι το αποτέλεσμα μας είναι αποδεκτό

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος αυτής της εργασίας ήταν να δούμε από μια διαφορετική σκοπιά τις εν ψυχρώ διαδικασίες παραμόρφωσης, μελετώντας ταυτόχρονα τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά του υλικού. Η δημιουργία του σχεδίου στο μεταλλικό φύλλο μας άφησε παρακαταθήκη ένα σύνολο πληροφοριών σχετικά με το τρόπο που συμπεριφέρεται το ασημί όταν περάσουμε στη πλαστική περιοχή καθώς επίσης διαπιστώσαμε πειραματικά το μέγεθος του springback του. Αυτή η πληροφορία είναι χρήσιμη γιατί πλέον μπορεί να υλοποιηθεί το σχέδιο γνωρίζοντας με ακρίβεια τα μεγέθη που πρέπει να χρησιμοποιηθούν.

Περαιτέρω η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε βρίσκει εφαρμογή και σε άλλους τομείς της μηχανικής καθώς ο τρόπος προσέγγισης μας δίνει τη δυνατότητα να μελετηθούν και άλλα υλικά υπό την ίδια διαδικασία.

Επιπλέον μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα δεδομένα της μεθόδου για την υλοποίηση από ένα ρομποτικό βραχίονα ο οποίος θα χρησιμοποιήσει όλα τα πεπερασμένα στοιχεία που έχουμε δημιουργήσει για το μονοπάτι του εργαλείου κατεργασίας και να δημιουργηθεί έτσι ένας νέος τρόπος κατεργασίας.

Ακόμη η μέθοδος μας αποτελεί και μια εναλλακτική από τις παραδοσιακές μορφές κατεργασίας καθώς απομακρύνεται από τη χρήση μητρών για την αποτύπωση σε μεταλλικά φύλλα και χρησιμοποιεί ένα εργαλείο που διαμορφώνει το σχήμα με συνεχόμενα βήματα κατεργασίας.

Τέλος η μέθοδος μας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία προγραμμάτων που έχουν ως βασικό στόχο τη δημιουργία μονοπατιών εργαλείων κατεργασίας και να περιλαμβάνει το μονοπάτι που δημιουργήσαμε.

Ολοκληρώνοντας την εργασία μας μπορούμε να πούμε με ασφάλεια πως δημιουργήσαμε ένα μικρό θύλακα πληροφοριών, προσπαθήσαμε να δημιουργήσουμε μια μέθοδο που ξεφεύγει σε ένα βαθμό από τα συνηθισμένα και βάλαμε τις βάσεις για περαιτέρω έρευνα τόσο για τη μέθοδο όσο και για τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Tirupathi R. Chandrupatla, Asok D. Belegundu. *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ*. ΑΘΗΝΑ: ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ, 2005.

WILLIAM D. CALLISTER, JR. *ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ*. Αθήνα: ΤΖΙΟΛΑ, 2004

J.R. Barber, *Elasticity*, Kluwer Academic Publishers 2002

Σημειώσεις διαμόρφωσης εργαστήριο M3, Αριστομένης Αντωνιάδης, Πολυτεχνείο Κρήτης 2010

On the Behaviour of the Process and Material in Incremental Sheet Forming, Tuomas Katajarinne, Aalto University publication series 2014